

Yatay Kavisli Farklı Yarıçaplı Köprülerin Ölü ve Hareketli Yükler Altındaki Gerilme

Değişimleri

Aslıhan Doğruyol

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2013

Stress Changes Of Horizontally Curved Different Radius Bridges Under Dead and Live

Loads

Aslıhan Doğruyol

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

June 2013

Yatay Kavisli Farklı Yarıçaplı Köprülerin Ölü ve Hareketli Yükler Altındaki Gerilme  
Değişimleri

Aslıhan Doğruyol

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Nevzat Kıraç

Haziran 2013

## ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Aslıhan Doğruyol'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Yatay Kavisli Farklı Yarıçaplı Köprülerin Ölü ve Hareketli Yükler Altındaki Gerilme Değişimleri" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Nevzat Kırac

**İkinci Danışman** : -

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Doç. Dr. Nevzat Kırac

**Üye** : Prof. Dr. Hasan GÖNEN

**Üye** : Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

**Üye** : Doç. Dr. Mizan DOĞAN

**Üye** : Doç. Dr. Necati MAHİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu çalışmada, Yakakent-Gerze Yolu kapsamında 117+430 Km ile 117+625 Km arasında bulunan, 60, 75, 60 m açıklıklı I kirişli kompozit İdemli-3 Viyadüğünün üstyapısı baz alınıp 60, 150, 300, 500, 800, 1000, 1500 ve 3000 m yarıçaplarında farklı yatay kavisler ele alınarak, ölü ve hareketli yükler altında SAP 2000 paket programı ile AASHTO Şartnamesine uygun bilgisayar destekli analizleri yapılarak analiz sonuçları belirlenmiş, mesnet reaksiyonlarının ve en kritik yükleme durumunu bulmak için ise kullanılan farklı kombinasyonlarının en olumsuz yükleme kombinasyon sonucuna göre çıkan gerilmelerin hesaplanması ve sonuçların karşılaştırılması hedef alınmıştır.

Tüm modellerde; İdemli-3 viyadüğünden döşeme betonu, I profiller, orta ve uç ayaklarda kullanılan elastomer örnekleri alınmıştır. Analizde İdemli-3 viyadüğünden farklı olarak, viyadüğün belirtilen farklı çaplarda kavisliliğinin devam ettiği, açıklıklarının ve köprü uzunluğunun ise değişmediği varsayılmış, bu varsayımlar altında merkezkaç kuvveti yarıçapa bağlı olarak her farklı yarıçapta yeniden hesaplanarak analizlere katılmıştır. Viyadükte verev bulunmadığı için analizde kullanılmamıştır. Köprü üstyapısı 4 adet yapma çelik I kiriş ile yerinde dökme betonarme bir tabliyeden oluşan kompozit bir üstyapıdır. Bu sebeple kompozit kirişin maksimum momentini verdiği yerde ve kombinasyonda çıkan momentler gerilme hesabında kullanılmıştır.

Yapısal analizlerde SAP2000, yardımcı program olarak AUTOCAD 2012 ve EXCELL programları kullanılmış olup, şartname olarak Amerikan Köprü Şartnamesi AASHTO, Karayolları Teknik Şartnamesi ve AASHTO LRFD esas alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yatay kavisli kompozit köprü, kavis, modelleme.

## SUMMARY

In this study, the analysis results were obtained by doing computer-aided analysis with SAP 2000 Programme fit to AASHTO Certification under dead and live loads by gathering different horizontally curves in 60, 150, 300, 500, 800, 1000, 1500 and 3000 meters radius on the basis of the superstructure of 60, 75, 60 m span I-girder composite İdemli-3 Viaduct located in 117+430 Km and 117+625 Km in the scope of Yakakent-Gerze Highway, it is targeted to compare results and to calculate the tensions of different combinations used to find the the most critical loading situation and support reactions due to the most negative loading combination.

In all models, samples of laying concrete, I-profiles, elastomers used in mid and end abutments were taken from İdemli-3 viaduct. In analysis, differently from İdemli-3 viaduct, the different curve diameters has continued, span and bridge lengths is assumed unchanged, centrifugal force computed for every different radius and added to analysis. It did not use in the analysis when there is no curve on the viaduct. Bridge composite superstructure has four steel I-beam and an in-situ slab. So maximum moment of compozite beam and moments of combinations used in stress calculation.

Sap2000 is used at structural analysis, as utility Autocad 2012 and excell programmes are used and based on The American Bridge Specification AASHTO, Highways Specification and the AASHTO LRFD Specification.

Anahtar Kelimeler: Horizontally curved composite bridges, curves, modeling.

## TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Doç. Dr. Nevzat Kır aç Hocama, program çalışmalarında ve proje örneğinde yardımlarını esirgemeyen Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. yöneticilerine ve Sayın Dr. Cenan  zkaya'ya, hayatım boyunca her konuda desteklerini bana gösteren ve her zaman yanımda olan değerli Aileme ve yanımda olan arkadaşılarım teşekkürlerimi sunarım.

Aslıhan DOĞRUYOL

Temmuz 2013

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET .....</b>	<b>V</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>VI</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>VII</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>XI</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>XIV</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2.YATAY KAVİSLİ KÖPRÜLER VE DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR4</b>	
2.1. Genel .....	4
2.2 Yatay Kavisli Köprülerle Düz Köprülerin Karşılaştırılması.....	6
2.3.1 Yatay kavisli çelik I-Kirişli köprülerin mukavemet özellikleri üzerine bir .....	8
değerlendirme (Lauren E. Cullen).....	8
2.3.2 Üniversite araştırma takımları konsorsiyum projesi (CURT Project).....	10
2.3.3 Kavisli çelik köprü araştırma projesi CSBRP .....	18
2.3.4 Yatay kavisli ve çarpık I kirişli bir köprünün davranışı ve analizi üzerine yapılan bir çalışma (Çağrı Özgür): .....	21
2.3.5 Woo Seok Kim, Jeffrey A. Laman ve Daniel G. Linzell tarafından yapılan yatay kavisli köprülerin hareketli yük moment dağılımı üzerine bir çalışma: .....	43
2.3.6 Saeed Eghtedar Doust tarafından yapılan eğri köprü sistemlerinde integral kavramlar üzerine yapılan çalışma .....	51
2.3.7 Diğer Çalışmalar.....	53
<b>3. AASHTO ŞARTNAMESİ'NE GÖRE YÜKLER VE KAVİSLİ KÖPRÜ .....</b>	<b>55</b>
<b>TASARIMI.....</b>	<b>55</b>



## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

3.1.2 Hareketli yükler .....	56
3.1.3 Taşıt yükleri .....	56
3.1.4 Trafik şeritleri .....	58
3.1.5 Standart kamyonlar ve şerit yükleri.....	59
3.1.6 Dinamik etki katsayısı .....	61
3.1.7 Yük değerlerinin azaltılması.....	63
3.1.8 Yük sınıfının seçilmesi .....	63
3.1.9 Aşırı yükleme .....	64
3.1.10 Karma yükleme .....	64
3.1.11 Fren kuvvetleri.....	65
3.1.12 Merkezkaç kuvveti .....	65
3.1.13 Kaldırım yüklemesi .....	66
3.1.14 Yaya yüklemesi .....	67
3.1.15 Korkuluk yüklemesi .....	67
3.1.16 Rüzgâr yükü.....	67
3.1.17 Termal kuvvetler .....	69
3.1.24 Sürüklenme koşullarından, yüzen buz kütlelerinden ve akarsu akımından kaynaklanan kuvvetler .....	72
3.2.1 Yapım safhalarından ötürü etkiler .....	75
3.2.2 Deprem Etkisi .....	75
3.2.3 Çarpma Etkisi .....	76
<b>4. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ VE MODELLEMELER.....</b>	<b>79</b>
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	79
4.1.1 Sonlu Elemanlar Metodu'nun Modelleme ve Çözüm Basamakları.....	80
4.2 Yakakent – Gerze Yolu İdemli - 3 Viyadüğü .....	80

**İÇİNDEKİLER (devam)****Sayfa**

4.3 Modellemelerde Esas Alınan Yükler .....	82
4.3.1 Zati yükler .....	82
4.3.2 Hareketli yükler .....	83
4.3.3 Merkezkaç kuvveti .....	87
4.3.4 Rüzgâr yükü.....	88
4.3.5 Fren yükü.....	90
4.3.6 Isı değişimi yükü .....	91
4.3.7 Yük kombinasyonları .....	91
4.3.8 Elastomer mesnetlerin tanımlanması.....	92
4.3.9 Sürekli kirişlerde hareketli yük tesir çizgileri hesabı .....	94
4.3.10 Kullanılan I profiller .....	101
4.3.11 Modellemeler.....	101
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>124</b>
<b>6.KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>127</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Eski bir köprü.....	1
2.1 Vardaha Köprüsü .....	4
2.2 Gerilme Ölçerlerin Yerleştirilişleri .....	14
2.3 Kompozit Köprü Geometrisi .....	23
2.4 Çelik üst yapının plan görünüşü .....	24
2.5 Sonlu elemanlar yöntemi uygulanan köprünün perspektif görünüşü .....	25
2.6 Kiriş gövde derinliği boyunca sonlu eleman ağları .....	26
2.7 Sonlu elemanlar modelinin şematik en kesiti .....	27
2.8 Dış kirişe bağlanan konsollar (Jung, 2006). .....	28
2.9 Tasarım aracı AASHTO (2007).....	30
2.10 Beton tabliyede noktasal yük uygulanan etkili yüzeyler (156 nokta).....	31
2.11 Tabliye genişliği boyunca uygulanan yükler (13 nokta) .....	31
2.12 G3 'te alt başlık yatay eğilme gerilmesi ve etkili yüzey .....	32
2.13 Kompozit olmayan köprünün 1.25 DC <sub>1</sub> yükü altında geometrik doğrusal olmayan analizi sonrası şekil değiştirmiş halinin perspektif görünüşü .....	35
2.14 Dayanım IV Yük Kombinasyonu altında inşa edilebilirlik limit durumunun kontrolü için belirlenen kritik kesitler (1.5 DC <sub>1</sub> ). .....	36
2.15 Kritik kesit olarak kabul edilen bölümler (STRENGTH I yük seviyesi) .....	37
2.16 Tasarım taşıt yüklemesi uygulanacak yerin tanımlanmasındaki anahtar parametreler .....	37
2.17 G1 at G1-S1 kesitinde kiritik tasarım taşıt yüklemesinin maksimum dayanım kontrolü.....	38
2.18 G1 at G1-S1 kesitinde kritik tasarım şerit yüklemesinin elde edilmesi.....	38
2.19 G6-S1 kesitinde G6 kirişinde maksinimum dayanımı veren kritik tasarım taşıt yüklemesi .....	39
2.20 Çapraz en kirişler ve gösterimleri .....	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.21 Çalışılan köprünün en kesiti .....	45
2.22 Teğetsel normal gerilme değişimi, Kiriş 1, 41. analiz durumu.....	47
2.23 Çapraz çubuk aralığının ve yarıçapın dağılım Şekil 2.24 Açıklık uzunluğu ve yarıçapın dağılım faktörleri .....	49
2.25 Dağıtım faktörleri üzerinde L/R oranı.....	52
2.26 Dağıtım faktörleri kıyaslamalar $S=3,4$ m $S=(a) 3.05$ m (b) 3.35 m (c) 3.7 m $X=2,2$ m (b) 3,7 m ve (c) 5,5 m .....	50
3.1 Standart kamyon yükleri .....	57
3.2 Standart kamyon yükleri A. Standart HS Kamyonları .....	58
3.3 Şerit yüklemesi .....	61
3.4 Yük değerlerinin azaltılması .....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>
3.5 Köprüler için aşırı yükleme .....	64
4.1 Proje Yeri.....	81
4.2 İdemli-3 Viyadüğü boy kesiti .....	81
4.3 HS 20-44 Kamyon yükü .....	84
4.4 HS 20-44 Kamyon şerit yüklemesi.....	84
4.5 SAP 2000'de kamyon yüklemesi görünümü .....	85
4.7 SAP 2000'de şerit yüklemesi.....	86
4.8 Şerit ve taşıt yüklemesi için tanımlanan şeritlerin görüntüsü .....	86
4.9 Merkezkaç kuvvetin yönü.....	88
4.10 Yapıya gelen rüzgâr yükü .....	88
4.11 Hareketli yüke gelen rüzgâr yükü .....	89
4.12 Fren yükü gösterimi .....	90
4.13 Mesnet detayı-1.....	92
4.14 Elastomer mesnet.....	93

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
4.15 Çalışılan köprünün mesnet aralıkları .....	94
4.16 $M_2$ mesneti tesir çizgileri .....	99
4.17 $M_3$ mesneti tesir çizgileri .....	99
4.18 Tesir Çizgileri Yüklemeleri .....	100
4.19 Kullanılan I profiller .....	101
4.20 Model 1 Düz köprü tasarımı .....	102
4.21 Model 2 R= 60 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	108
4.22 Model 3 R= 150 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	110
4.23 Model 4 R= 300 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	112
4.24 Model 5 R= 500 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	114
4. 25 Model 6 R= 800 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	116
4.26 Model 7 R= 1000 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	118
4.27 Model-8 R= 1500 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	120
4.28 Model-9 R= 3000 m yatay kavisli köprü tasarımı .....	122
5.1 Farklı yarıçaplı köprü modellerinin çekme ve basınç gerilmeleri .....	125

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Anahtar parametreler .....	44
3.1 Malzeme birim ağırlıkları .....	56
3.2 Kamyon Yüklemeleri.....	57
3.3 Yol genişliğine göre trafik şerit sayısı .....	59
3.4 Yük sınıfları .....	60
3.5 Karayolları yük sınıfları.....	63
3.6 Grup II ve Grup V yüklemelerinde kullanılacak değerler .....	68
3.7 Grup III ve Grup IV yüklemeleri.....	69
3.8 $\alpha$ ve $\beta$ katsayıları tablosu .....	78
4.1 İdemli-3 Viyadüğü Özellikleri.....	82
4.2 Merkezkaç kuvvetlerin yarıçaplara momentlerinin ve kuvvetlerinin göre değişimi	87
4.3 Fren yükü ve momenti .....	90
4.4 Elastomer boyutları.....	92
4.5 M2 mesneti tesir çizgisi ordinat değerleri.....	97
4.6 M3 mesneti tesir çizgisi ordinat değerleri.....	98
4.11 Kompozit kesitin kesit modülleri hesabı (Sünme var).....	106
4.12 Maksimum ve minimum değerler .....	106
4.13 Çelik kesitte oluşan gerilme değerleri .....	107
4.14 R=60 m yatay kavisli köprü yükleri ve momentleri .....	108
4.15 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 2) .....	109
4.16 R=150 m yatay kavisli köprü yükleri .....	110
4.17 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 3) .....	111
4.18 R=300 m yatay kavisli köprü yükleri .....	112
4.19 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 4) .....	113
4.20 R=500 m yatay kavisli köprü yükleri .....	114

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
4.21 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 5) .....	115
4.22 R=800 m yatay kavisli köprü yükleri .....	116
4.23 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 6) .....	117
4.25 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 7) .....	119
4.26 R=1500 m yatay kavisli köprü yükleri .....	120
4.27 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 8) .....	121
4.28 R=3000 m yatay kavisli köprü yükleri .....	122
4.29 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 9) .....	123
5.1 Gerilmeler .....	124

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Acıklama</u></b>
in	inç
ft	foot
k	kip
ksi	basınç birimi
Ec	Betonun elastisite modülü
Es	Çeliğin elastisite modülü
$f_{ctk}$	Betonun karakteristik çekme dayanımı
I	Atalet momenti
R	Kavislilik yarıçapı
V	Köprüden geçiş hızı (km/h)
$F_D$	Hidrodinamik kuvvet
g	Yerçekimi ivmesi
tw	Gövde levhası kanlınlığı
D	Gövde levhasının derinliği
$b_{af}$	Alt başlık genişliği
$t_{afSahil}$	Alt başlık kalınlığı
$b_{üf}$	Üst başlık genişliği
$t_{üf}$	Üst başlık kalınlığı
$t_d$	Döşeme kalınlığı
L	Açıklık uzunluğu
$t_{kaldırım}$	Kaldırım Kalınlığı
$B_{kaldırım}$	Kaldırım genişliği
$W_1$	Alt başlığa göre kesit modülü
$W_2$	Üst başlığa göre kesit modülü
$W_3$	Döşemeye göre kesit modülü
d1i	Tekerin şeridin dış kısmına olan uzaklığı
d2i	Şeridin dış uzunluğu



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
ASCE/SEI	American Society of Civil Engineers / Structural Engineering Institute
FHWA	Federal Highway Administration
NCHRP Project	National Cooperative Highway Research Program
UTCA	University Transportation Center for Alabama
CURT	Consortium of University Research Teams
TRB	Transportation Research Board
CSBRP	Curved Steel Bridge Research Project
AISC	American Institute of Steel Construction
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
et al	Ve diğerleri
km	Kilometre
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
kNm	Kilonewton metre
m	Metre
N	Newton
t	Ton

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Köprüler belli bir engeli aşmak için yapılan, uzun süre dayanması amaçlanan yapılardır. Zor ve yıpratıcı koşullara maruz kaldıkları için, oldukça güçlü ve korozyona karşı dayanıklı kaplamalarla korunmaları gerekmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü Yollar Fenni Şartnamesinde köprünün tanımı; Akarsu, yol, demiryolu vb. engelleri geçmek için yapılan üzerine dolgu gelmeyen ve mesnet eksenleri arasındaki açıklığı 10 m den fazla olan sanat yapıları olarak yapılmıştır. Şekil 1.1’de çok eski bir köprü gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Eski bir köprü

Köprü tasarımı için güncel bir kaynak bulunmaması, projelerin tasarlanmasında Karayolları Genel Müdürlüğü'nce de kabul gören yabancı yönetmelikleri kullanma ihtiyacı doğmuştur. Söz konusu şartnameler; AASHTO ve AASHTO LRFD olarak sıralanmıştır. AASHTO-LRFD, köprülerin malzeme açısından doğrusal olmayan, elastik ötesi davranışını göz önünde bulundurarak, belirli köprüler için kuvvet esaslı doğrusal yöntemlerle tasarlanmasına olanak sağlamıştır. (AASHTO LRFD, 1998, Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.). AASHTO LRFD yönetmeliği, Amerika Birleşik Devletleri'nde, AASHTO yönetmeliğinin yerine yürürlüğe girmiştir. Mevcut AASHTO yönetmeliği yük katsayıları yöntemine göre (LFD), AASHTO-LRFD ise yük ve dayanım faktörüne (LRFD) göre tasarımı benimsenmiştir. Bu iki yönetmelik karşılaştırıldığında, LRFD yönetmeliğinde değişen köprü açıklıklarına göre, 3,2 ile 4 kat arasında değişen emniyetli tasarım, AASHTO yönetmeliğinde ise 1,5 ile 4,5 kat arasında değişen emniyetli tasarım yapılabilmektedir. (FHWA, Introduction to LRFD-Load and Load Distribution, Federal Highway Administration, Chicago).

Yol yapımı için sınırlı şartlara ve koşullara sahip olunması, buna ek olarak trafik yoğunluğunu azaltmanın bir sonucu olarak ortaya çıkan karmaşık geometriler yatay olarak kıvrılmış köprü, karayolu ve kavşaklar kentselliğin bir normu haline gelmiştir. (Ahmad M. Itani, Mark L. Reno, Bridge Eengineering Handbook).

Yapı elemanının bilgisayar ortamında modellenmesi ile yapı davranışı çeşitli yük durumları altında daha detaylı gözlemlenebilmektedir. Modellemeyle, köprü elemanlarında sorun oluşturabilecek durumlar daha detaylı şekilde incelenebilir ve gerekli görülmesi durumunda da istenilen değişiklikler yapılabilmektedir. Modelleme çalışmaları ile, analitik çözüm sonuçlarına veya deneysel analiz sonuçlarına göre daha yaklaşık sonuçlar elde edilse de, modellemeler deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldıklarında daha az zaman alan, daha ekonomik çalışmalar olmuşlardır (M. K. Ali, Öngermeli Betonarme Köprü Kirişi Modellenmesi, 2010).

Tez çalışması kapsamında; farklı yarıçapları bulunan kompozit köprünün özelliklerini, hareketli ve ölü yükler altında davranışlarını incelemek için, açıklık ve üst

yapı olarak bazı özellikleri örnek alınarak düz olarak modellenen Sinop-Gerze-İdemli 3 Viyadüğü modellemelerde kullanılmış ve 3 farklı yük kombinasyonunda etkileri incelenmiştir. Belirtilen analizlerin yapılması için SAP 2000, AUTOCAD programları ile kompozit kiriş hesaplamalarında yardımcı Excell paket programları kullanılmıştır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, konuyla ilgili bir giriş yapılmıştır. Bölüm 2’de Yatay Kavisli Köprüler genel olarak anlatılmış olup daha önceki çalışmalara değinilmiştir. Bölüm 3’te AASHTOO LRFD’ ye göre Yatay Kavisli Köprülerin Tasarımı, köprülere gelen yük çeşitleri ve sınıfları ile yük kombinasyonları açıklanmıştır. Bölüm 4’te modellemeleri yapılan Sinop-Gerze-İdemli 3 Viyadüğü’ nün tanıtılması ve genel bilgilerle birlikte, SAP 2000 Sonlu Elemanlar Programına giriş, tez çalışmasında incelenen köprünün AASHTOO LRFD’ ye göre yüklerinin hesaplanması ve modellere uygulanması açıklanmıştır. Bölüm 5’ te elde edilen sonuçların, düz tasarımı yapılan köprüye göre karşılaştırması yapılmıştır.

## BÖLÜM 2

### YATAY KAVİSLİ KÖPRÜLER VE DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 2.1. Genel

Yapı ve arazi şartları sebebiyle tercih edilen yatay kavisli köprü kullanımı geçmişten de günümüze kadar ulaşmıştır. Ülkemizde yatay kavisli olarak en eski köprülerden biri olarak Şekil 2.1’ de gösterilen, Osmanlı’ nın son döneminde Alman sermayesi ve teknolojisi ile yapılmış, Toros dağlarından Karaisalı’ ya doğru uzanan, yüksekliği 100 m’ yi bulan Vardaha Köprüsü örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Vardaha Köprüsü

Modern otoyol inşaatlarında artması, genellikle yatay kavisli köprüleri gerektirmiştir. Artan trafik kapasitesi ile başa çıkabilmek amacıyla yeni otoyol ve köprülere artan ilgi 1960 lı yıllardan bu yana yatay kavisli köprülere olan gereksinimi

arttırmıştır. 1991' deki araştırmaya göre; pazardaki yeni çelik köprü inşaatlarının yüzde 20-25' ini kavisli köprülerin temsil ettiği belirlenmiş ve bu eğilimde artmasına muhtemel gözle bakılmıştır (Chai H.Yoo, Dann H. Hall, Michael A. Grubb, 1998, NCHRP Project 12-38). İlk zamanlarda yatay kavisli köprüler, yatay kavislilik kullanımının gerekli olduğu durumlarda küçük açıklıklı düz bağlantılar ile birleştirilmesi şeklinde tasarlanmışlardır (L. E. Cullen, 2007).

Tasarımda ayakların yerleşimi veya zor olan karayolu yerleşimleri, mühendisler için zorluk oluşturmaktadır. Yatay kavisliliğin kullanılması gerekliliği durumlarda; kavisli köprü yapımında, mühendisler tarafından sürekli kavisli elemanlar yerine, küçük basit düz bağlantılar kullanılmıştır (Linzell et al., 2004). Maliyet karşılaştırmasında yatay kavisli köprülerin tasarımı için iki metod belirtilmiştir. Araştırma, düz bağlantılanmış elemanlardan oluşan köprülerin, kavisli elemanlardan oluşan köprülere kıyasla daha fazla maliyet gerektirdiğini göstermiştir. Bununla beraber kavisli elemanların imalat maliyetlerinin, düz elemanlara göre daha pahalı olmasına karşın, kavisli köprülerin düz köprülere göre daha az altyapı elemanı gerektirmesi sebebiyle inşaat maliyetleri daha düşük olduğu belirlenmiştir (McManus et al., 1969). Ayrıca, kavisli elemanların kullanımı, derin olmayan kesit elemanlarının kullanımını ve daha uzun açıklıkların geçilmesini sağladığı gibi daha estetik bir görüntü oluşturmakla birlikte tabliye çıkıntı mesafesinin artmasına neden olmuştur (Lavelle, 1966) (L. E. Cullen, 2007).

Büyük metropol alanlarda nüfusun artması ile, düzgün bir trafik akışı için otoyolları ve diğer büyük yolları gibi büyük yolların yapılmasına ihtiyaç artacaktır. Bu durum kavisli karayollarına kaçınılmaz bir uyum olarak genellikle kavisli köprülerin yapımını gerektirmektedir. Yatay kavisli köprüler, Amerika Birleşik Devletleri köprü pazarının büyüyen payını işgal etmeye devam etmektedir (D. Linzell, D. Hall, D. White, ASCE). Amerika Birleşik Devletleri'nde ülke çapında inşa edilen bütün çelik üst yapı köprülerin üçte birinden fazlasını yatay kavisli köprüler oluşturmaktadır (J. S. Davidson, R. S. Abdalla, M. Madhavan, UTCA, 2002). Bu durum kavisli köprülerin davranışlarını incelemek için çeşitli araştırmaların yapılmasına sebep olmuştur.

Kavisli I kirişler daha yaygın olarak kavisli köprülerde kullanılmıştır. Yapının bu elemanları, küçük burulma rijitliğine sahip olup, çapraz çerçeve elemanlar ve diyaframlarla birbirine bağlanmaktadır (D. Linzell, D. Hall, D. White, ASCE).

Kavisli köprü tasarım ve inşaatı ilk çalışmalarda; çoğunlukla kısa ve basit açıklıklı kirişlerden oluşmakta olup, köprü üst yapısını destekleyen düz destekleri birbirine bağlayan kısa düz kirişlerin birbirine hizalandırılması ile oluşturulmuştur. Bu durum mesnetler arasında çok kısa aralıkların verimsiz kullanılmasına yol açmıştır. Tasarım ve kavisli kiriş imalatı için teknoloji kullanılabilir hale geldikçe, çok büyük mesafeli mesnetler arasında kavisli köprü tasarlamak mümkün hale gelmiştir (J. S. Davidson, R. S. Abdalla, M. Madhavan, UTCA, 2002).

Günümüzde ise yatay kavisli kirişler yaygın olarak köprülerde kullanılmaktadır. Tasarımcı için malzeme (beton, çelik vs.) ve kesit (I, box kiriş vs.) de dâhil olmak üzere birçok seçenek sunulmaktadır. Son otuz yılda yenilikçi ve estetik yapılarla sonuçlanan kavisli köprü tasarımı çeşitli gelişmelerle sonuçlanmıştır. Ancak kavislilik etkisi ile kavisli köprü köprünün tasarım ve yapımı düz köprülere oranla daha karmaşık hale gelmiştir. Kavisli köprüler; kirişlere, boylamalara ve döşemelere, sistematik olarak her elemana, standart yükler uygulanarak tasarlanabilir olsa da, sistemde kavisliliğin artışı ile sistemdeki burulmaların artışı ile eğilme ve burulma gerilmeleri kesit elemanları içinde arttığından kavisli köprüler sistem çapında dikkatli dizayn edilmelidir (J. S. Davidson, R. S. Abdalla, M. Madhavan, UTCA, 2002).

## **2.2 Yatay Kavisli Köprülerle Düz Köprülerin Karşılaştırılması**

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, kavisli köprü yapımında bugüne kadar en sık karşılaşılan sorunların, inşaat aşamasında yaşandığı belirtilmiştir. Bu sorunlar daha çok kavisli köprülerin inşaatı sırasında daha sık ve şiddetli olarak görülmektedir. Kavisli köprü kirişlerinin ağırlık merkezinin ve kiriş kesiti eksenini ile çakıştırılması, kaldırılması ve ayarlanması güçlük göstermektedir. Bu sebeple montaj aşamasında sıkıntı yaşanmaktadır. Kavisli köprülerin tasarımında ise önemli olan burulma gerilmeleri ile ikincil eksen eğilme gerilmeleridir.

Yatay kavisli köprüler, düz köprülere nazaran işçilik ve inşaat aşamalarında uzmanlık ve deneyim gerektirmektedir. Kavisli köprü yapımında, tasarım ve davranışın aynı olduğunu varsayan deneyimsiz iş gücü, büyük hatalara yol açmaktadır. İnşaat sırasındaki istikrarsızlıklar ve kolayca öngörülmeven ek maliyetler inşaat çalışanları için de güvensiz koşullara sebep olmaktadır. Kavisli kesitlerle düz bağlantılanmış kesitlerin karşılaştırılmasında, kavisli elemanların daha ekonomik olduğunu görülmüştür. Yatay kavisli köprüler, yüksek imalat maliyetler gerektirmelerine rağmen düz bağlantılı köprülere nazaran daha az alt yapı elemanına ihtiyaç duymaktadırlar (L. E. Cullen, 2007). Tasarım ve inşaat zorlukları ile birlikte kavisli köprüler için artan talep, kavisli köprülerin tasarımı ve yapımı için son teknolojik gelişimleri araştırmaya ve kavisli köprü deneylerinin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

### **2.3 Literatür Araştırmaları**

Çeşitli araştırmacılar, Japon ve Amerikan köprü tasarım rehberleri arasındaki formülasyonların eşitsizliği sebebiyle daha fazla araştırma yapılması gerektiğinin altını çizmektedirler. Bu sebeple kavisli köprüler yaygın olarak bu araştırmalar için seçilmiştir.

Sistem davranışını etkileyen en önemli parametreler eğrilik derecesi, açıklık uzunluğu ve başlık genişliği olarak bu çalışmada tespit edilmiştir. Burulma rijitliğinin ve kesit üzerinde kompleks gerilmelerin dağılımının olumsuz etkileri nedeniyle fabrikasyon, taşıma ve montajla ilgili sorunlar düz kirişlerden daha çok kavisli kiriş imalatının daha yaygın olduğu belirlenmiştir. Alabama’ da kavisli köprü inşaatı sırasında hiçbir ciddi sorunla karşılaşılmamıştır.



### **2.3.1 Yatay kavisli çelik I-Kirişli köprülerin mukavemet özellikleri üzerine bir değerlendirme (Lauren E. Cullen)**

Yatay kavisli köprüler, zor geometrik şartlarda kullanılabilir birkaç seçenektен biri olması sebebiyle ABD’de artan bir hızla tercih edilmektedir. Yatay kavisli köprüler düz köprüler ile kıyaslandığında daha estetik ve ekonomik yararlar sunmaktadırlar. Ancak düz köprülere nazaran ek tasarım, analiz gerektirir ve çeşitli yapısal sorunları bulunmaktadır.

Tek tip şartname ve güvenlik gerekliliklerini belirlemek ve yatay kavisli köprülerin tasarımını geliştirmek için, Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolları İdaresi FHWA (Federal Highway Administration) tarafından 1969 yılında CURT Projesi (Consortium of University Research Teams) başlatılmıştır. CURT Projesinde; Carnegie-Mellon Üniversitesi, Pennsylvania Üniversitesi, Rhode Island Üniversitesi, Syracuse Üniversitesi ve Maryland Üniversitesi'nden araştırmacılar yer almışlardır. Bununla birlikte, CURT Projesinden geliştirilen tasarım özelliklerini iyileştirmek ve yatay kavisli köprüleri araştırma süreci sonucunda FHWA tarafından 1992 yılında Yatay Kavisli Köprü Araştırma Projesi CSBRP (Curved Steel Bridge Research Project) başlatılmıştır. CSBRP projesinde tam ölçekli 3 kirişli sistem test edilmiştir.

Bu çalışmada, CSBRP Projesi test örnekleri üzerinde yapılan modellerde sonlu elemanlar analizi üzerinde durulmuştur. Kompozit olmayan eğilme elemanları ve kompozit olan test köprüsünün sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinin sonuçları, yatay kavisli I kirişlerin dayanım karakteristiklerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Yatay kavisli I kirişli köprülerin tasarım ve analizi, CURT Projesi ve CSBRP’ nin kapsamı dışında henüz ele alınmamıştır.

Birçok tasarım ve analiz, 2004 AASHTO LRFD Köprü Tasarım Özellikleri ve yatay kavisli I kirişlerde dayanım kapasite limitleri dahilinde tasarım ekonomisini belirlemek için kullanılmıştır. Yatay kavisli I kirişli köprülerin kapasitelerini tahmin etmek ve şartnamelerin doğruluklarını tespit etmek için 2003 AASHTO Yatay Kavisli

Köprü Şartnamesi ile 2004 AASHTO LRFD şartnamesi arasında karşılaştırma yapılmıştır. 2004 AASHTO LRFD Şartnamesi'nde yatay kavisli köprülerin limit kapasiteleri, sistemin ilk akmaya başladığı moment, maksimum kapasitesi olarak alınmıştır. Kompozit test köprüsünün kapasitesinin, ilk akma momentini aşması ve kesit  $M_p$  kapasitesi limitine ulaşma haline sahip olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Bu araştırmanın asıl amacını; CSBRP kompozit test köprüsünün kapasitesini belirlemek için, 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri yapmak, kompozit olmayan yapı elemanlarının eğilme momentlerini belirlemek ve güncel tasarım özellikleri için bu sonuçları karşılaştırmak olarak belirlenmiştir. Yatay kavisli köprüler için 2003 AASHTO Şartnamesi ve 2004 AASHTO LRFD Şartnamesi, yatay kavisli sistemlerin kapasitesini tahmin etmek için kullanılmış ve bu şartnamelerin doğruluklarını tespit etmek için şartnameler birbiri ile karşılaştırılmıştır. 2004 AASHTO LRFD Şartnamesinde; yatay kavisli köprünün maksimum kapasite sınırı, sistemin akmaya başladığı moment olarak belirlenmiştir.

Bahsi geçen çalışma 7 bölümden oluşturulmuştur. Genel olarak; CURT Projesi, CSBRP projeleri anlatılmış ve FHWA tarafından yapılan genişletilmiş şekilde yapılan araştırmaların özetini verilmiş, Ayrıca, Japon Hanshin Expressway Code şartnamesini geliştirilmesi için yürütülen araştırmaya genel bir bakış sunulmuş, yatay kavisli I kirişli köprüler köprülerin yapı etkileşimleri incelenmiştir. Daha sonra, yatay kavisli köprülerin tasarımı ve özellikleri 2004 AASHTO LRFD Şartnamesi 2005 ve 2006 ara yenilemeleri de dahil olmak üzere incelenmiştir. Ayrıca tasarım yüklerinin tipleri, sınır durumları ve hareketli yük dağılım faktörlerini belirtmiştir. Kompozit test köprüsü ve kompozit olmayan eğilme bileşenlerinin her ikisi de sonlu elemanlar modelleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada deneysel çalışmalar da anlatılmıştır. Bu çalışmaların deneysel sonuçları gözden geçirilmiş AASHTO Şartnamesinin özellikleri kullanılmış, CSBRP nin bir parçası olarak denklemler geliştirilmiştir. Eğilme elemanının ve kompozit test köprüsünün sonlu elemanlar modelleri sunulmuştur. Sonlu elemanlar yönteminin sonuçları deneysel ve analitik olarak karşılaştırılmıştır. 2004 AASHTO LRFD Şartnamesindeki eşitlikler, kompozit test köprüsünün kapasitesini belirlemek için kullanılmıştır. Yatay kavisli köprüler için 2003 AASHTO Şartnamesi

ile 2004 AASHTO LRFD Şartnamesi karşılaştırıldığında, numunelerin eğilme moment kapasitelerini belirlemede kullanılmıştır.

### **2.3.2 Üniversite araştırma takımları konsorsiyum projesi (CURT Project)**

1960' ların öncesinde yatay kavisli köprüler için tasarım özellikleri standardı bulunmamaktadır. Tasarım sayısı sürekli artan kavisli köprüler için, yapılar için güvenlik şartlarının sağlanması ve sabit şartların sağlanması için resmi bir şartnameye ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple FHWA tarafından 1969 yılında CURT Projesi (Consortium of University Research Teams) oluşturulmuştur. CURT Projesi kavisli köprülerin davranışını incelemek ve sabit bir şartname geliştirmek üzere 25 Federal eyaletin katılımı ile finanse edilen büyük ölçekli bir program olarak tanımlanmıştır. CURT Projesi; Carnegie-Mellon Üniversitesi, Pennsylvania Üniversitesi, Rhode Island Üniversitesi, Syracuse Üniversitesi, Maryland Üniversitesi'nden gelen araştırmacılardan oluşmaktadır (Zureick et al., 2000). CURT Projesi'nin çeşitli amaçları yer almaktadır. Bunlardan ilki kavisli köprüler ve kavisli kirişler hakkında, eyaletler bazında yapılan çalışma sonuçları da dahil olmak üzere daha fazla deneysel çalışma yapmak, tasarım ve analiz metotlarını geliştirmek ve bütün var olan ve yeni analizleri gözden geçirmek olarak belirtilmiştir. CURT Projesi için yürütülen deneysel çalışmaların kapsamını, küçük ölçekli ikili ya da tekli kiriş sistemleri serilerinin kirişleri arasındaki etkileşimi incelemek ve davranışlarını araştırmak oluşturmuştur. Bu çalışmanın çoğunluğu Mozer, Culver ve Brennan tarafından 1970' lerde oluşturulmuştur.

#### **➤ Culver ve Christiano (1969)**

CURT proje kapsamında tamamlanan ilk deneysel çalışmalardan biri Culver ve Christiano (1969) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma kavisli köprüler için geliştirilen bir bilgisayar programını doğruluğunu kanıtlamak için yapılmıştır. Mevcut bir otoban kavşağının 1/30 ölçekli modeli üzerinde statik ve dinamik testler yapılmıştır. Dinamik test sonuçları Christiano ve Culver tarafından 1969 yılında tamamlanıp sunulmuştur.

Model 2 açıklık, 2 kirişli sistemden oluşup, sadece kiriş ve çapraz elemanlardan oluşan kompozit olmayan yapı ile kirişler, çapraz elemanlar ve döşemeden oluşan kompozit sistemin her ikisi de test edilmiştir. Ölçekli model; yaklaşık 2,5 m'lik yay uzunluğundan, 0,2 m'lik genişliğinde tabliye döşemesinden oluşturulmuş olup, küçük yükler altındaki deformasyonları sağlamak için ise plastik camdan (plexiglass) üretilmiştir. Plastik cam materyalinin, materyal özelliklerini belirlemek için Coupon testi yapılmıştır. Köprü mesnet bölgelerinde dikey deplasmanlara ve dönmelere karşı sınırlandırılmıştır. Fazla yükleme, açıklık boyunca farklı bölgelerde ya iç kirişin ya da dış kirişin üst başlığına bir bağlantı ile ek ağırlık eklenmesiyle köprüye uygulanmıştır. Dönmeleri ve yer değiştirmeleri ölçmek için orta mesnetin üstündeki üst başlığa ve her iki kirişin alt başlığının ortasına ölçüm yapan göstergeler yerleştirilmiştir. Analiz sonuçları; yatay kavisli kirişler için farklı eşitliklerden elde edilen esneklik etki katsayısı kullanan, kuvvet metodunu analizine dayalı bilgisayar programından üretilen analitik değerlerle karşılaştırılmıştır (Culver ve Christiano, 1969). Deneysel sonuçlar; sehim ve gerilme değerleri hesaplanarak karşılaştırılmış olmasına rağmen, kompozit olmayan test köprüsü uzunluğu boyunca mesnetin merkezinin üzerinden tutturulmuş gerilme ölçerlerden alınan veriler analitik sonuçlara göre zayıf çıkmıştır. Bu değerlerdeki farklılıklar gerilme yığılmalarından ve orta mesnette bulunan gövde berkitmeleri nedeniyle oluşmuştur (Culver ve Christiano, 1969). Deney, sistemde gelişen gerilmelerde eğriliğin etkilerini göstermiştir. Dış kirişteki maksimum gerilmelerin, iç kirişteki yükleme boyunca elde edilenden 1,5 kat daha fazla olduğunu belirtilmiştir (Culver ve Christiano, 1969). Eğriliğin burulma gerilmeleri üzerindeki etkisi gösterilmiş ve kavisli köprü sistemlerinin tasarımında bu gerilmelerin dikkate alınması gerektiği tavsiye edilmiştir.

Christiano ve Culver kavisli köprü numunesinin dinamik test sonuçlarını statik test sonuçları ile beraber yayınlamışlardır. Bu dinamik testlerin sonuçları, o dönemde yapılan en kapsamlı testlerden biri olarak gösterilen ve Dabrowski (1964, 1965) tarafından yapılan dinamik test ile karşılaştırılmıştır. Ölçekli model; 3 akslı, elektrik motorlu bir yük taşıyıcı ile yaylı ve yaysız kütleler dinamik olarak yüklenmiştir. Artan yükleme durumu; ölçekli köprüye bağlanan ek levhaların taşıdığı yüklerle uygulanmış ve bu taşıyıcı levhanın hızı değiştirilerek hızın sisteme olan etkisi incelenmiştir. Serbest

titreşim testi uygulanmış ve frekanslar düşey deplasmanları belirlemek için kaydedilmiştir. Strengeler orta açıklıkta gerilmeleri ve deplasmanları ölçmek için yerleştirilmiştir. Dinamik yüklerden meydana gelen eğilme ve çarpılma momentleri birim şekil değiştirmelerden hesaplanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki yükün taşınmasında ve sistemin kavisliliğinde dinamik etki faktörü önemli ölçüde etkilidir. Dinamik yükleme altındaki sonuçların karşılaştırılması da göstermiştir ki, çarpılma gerilmesi yaklaşık olarak eğilme gerilmesinin iki katıdır. Bu nedenle, etki faktörü çarpılma momentleri ilişkili olup, kavisli sistemin tasarımında kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir (Christiano ve Culver, 1969).

➤ **Heins ve Spates (1970)**

CURT Projesi kapsamında yürütülen bir diğer araştırmadan olan; kavisli tek I kiriş davranışının incelenmesi testi, 1970’ de Heins ve Spates tarafından tamamlanmıştır. Testin sonuçları, yatay kavisli I kirişin burulma açısı ve dikey deplasmanı için, diferansiyel denklemler kullanılarak geliştirilen denklemlerle karşılaştırılmıştır. Test için; 15,24 m (50 ft) yarıçapında, 0,54 radyanlık kavisin başlangıcından çizilen teğetle yatay arasındaki açıyı, 8,23 m ‘lik (27 ft) kavisli I kirişin orta açıklığı, burulma açısı ve dikey deplasmanını belirlemek için tekil yük ve momentle yüklenmiştir. Yük kriko vasıtasıyla uygulanmış, tork ise, orta açıklıkta 1 m (40 inç) manivela kolu uzaklığından ölü ağırlıklar ile uygulanmıştır.

Kirişin uçları, mesneti oluşturma benzetiminin yapılması için betona gömülmüş ve orta açıklık burulma açısı ve dikey deplasmanlar strengeler ile ölçülerek kaydedilmiştir. Gerilme değerleri, açıklığın dörtte biri boyunca alınmış, sehim 10 noktada bir ölçülmüş ve dönme kirişin sağ tarafı boyunca 10 noktada bir kaydedilmiştir. Analitik sonuçlar, deneysel sonuçlara nazaran daha klasik sonuçlar vermiştir. Deneysede; Betondaki çatlaklar yüklemeler boyunca, artış göstermiştir. Mesnetler kiriş uçlarından yaklaşık 1 ft kadar yeri değiştirilip yeniden yerleştirilmiş, yeni kiriş uzunluğu hesaplanmış, dikey deplasman ve burulma açısı yeniden hesaplanmıştır. Yeni analitik ve deneysel veriler arasındaki karşılaştırmalar arasında daha iyi uyuma sağlanmıştır.

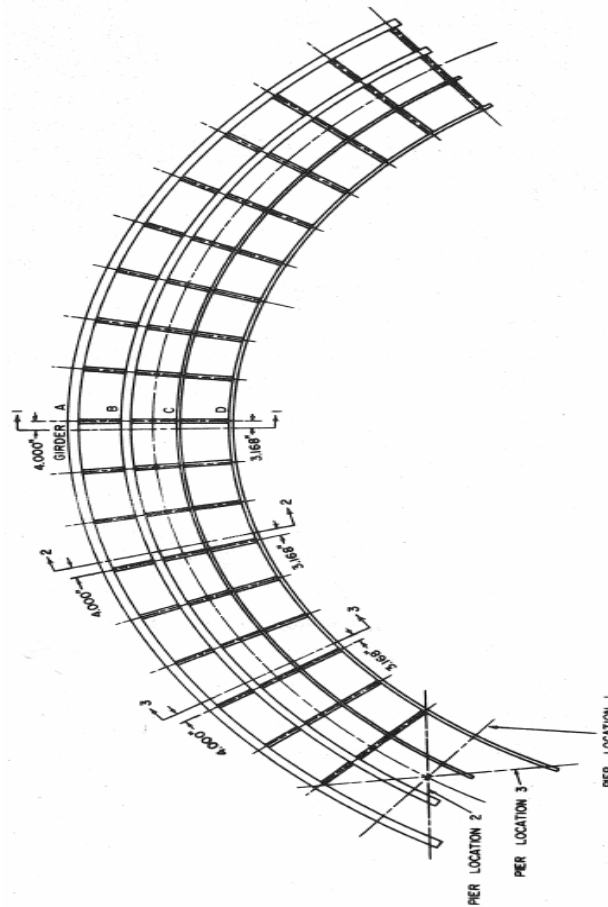
➤ **Kuo ve Heins (1971)**

Kuo and Heins tarafından, kavisli kompozit kirişlerin burulma rijitliğini, göçme modunu ve çarpılma davranışını belirlemek için 1971’de bir çalışma yapmışlardır. Ankastre ya da mafsallı olan kirişlerin serbst ucuna artan bir tork uygulanmıştır. Döşeme kalınlığı değişken 4 numune test edilmiştir. Strengeçler; gerilmeleri, dönmeleri ve deplasmanları ölçmek için, kiriş ve döşeme uzunluğu boyunca çeşitli bölgelere yerleştirilmiştir. Kesme merkezinin yerleri, çarpılma normal ve kesme gerilmeleri ve çarpılma sabitleri, deneysel veriler kullanılarak analitik eşitliklerden belirlenmiştir. Deneysel veriler; kavisli kirişler için “İnce Cidar” teorisi kullanılarak belirlenen yaklaşık değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasındaki farklılıkların, test boyunca deneysel hatalardan kaynaklandığı kabul edilmiştir. Çalışma sonuçları, beton döşemede burulma davranışının hakim olduğunu ancak çarpılmaların ihmal edilebilir düzeyde bulunduğunu göstermiştir. Çarpılmalar daha çok kavisli kirişlerde yoğunlaşmıştır. Deneysel parçalarının göçmesi, çapraz germelerden dolayı döşemenin çatlaması sonucu oluşmuştur.

➤ **Brennan (1974), Brennan ve Mandel (1979)**

Brennan ve Mandel tarafından yürütülen çalışmaların her ikisinde de, yatay kavisli köprüler için mümkün olan koşulların kombinasyonlarını ve çeşitliliklerini araştırmak üzere, küçük ölçekli köprülerin çeşitli sıralamalarındaki küçük ölçekli köprü bileşenlerinin sayısını birincil sayıda birleştirme kavramı kullanılmıştır (Brennan, 1974). Değişik açıklık ve değişik diyafram aralığında, kompozit köprüler ve kompozit olmayan köprüler şeklinde çalışılmak üzere tasarlanmıştır. 28 köprü düzenlemesinin 8’ inde, sistemin düşey deplasman ve eğilme moment kapasitesinin belirlenmesi için inceleme yapılmıştır. 8 köprü düzenlemesi iki ya da üç sürekli açıklık bölümleri, beton döşeme olmaksızın çelik köprü şeklinde yapılmıştır. Düz ve çarpık köprü ayaklarının her ikisi de, köprü sistemine etkilerinin belirlenmesi için çalışılmıştır. I kiriş yapılandırmasına plakalar eklenerek kutu kirişe dönüştürülmüş ve farklı kesit aralıkları, sistemin kapasitesi üzerindeki davranışını belirlemek için çalışılmıştır. Deneysel sonuçlar, Brennan tarafından geliştirilen bilgisayar programı sonuçları ile

karşılaştırılmıştır (1970). Yapılarda yapılan testler boyunca, arttırılmış yükler hidrolik krikolar tarafından uygulanmıştır. 1 kip'lik arttırılmış noktasal yükler, çeşitli yerlerdeki kiriş gövdesi ile başlık birleşim noktalarına uygulanmıştır. Köprülere, dikey deplasmanların ve dönmelerin kaydedilmesi için strengaç cihazları konulmuştur. Cihazlı kesitler (1,2,3) Şekil 2.2 'de gösterilmiştir (Brennan, 1974). Gerilme, moment ve tepki değerleri, strengaçler tarafından kaydedilen verilerden hesaplanmıştır. Dikey deplasman, eğilme ve burulma momentleri hesaplanmış ve deneysel test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bilgisayar programında; düz bağlantılandırılmış kesitler gibi kavisli elemanlar da analiz edilmiş, fakat bilgisayar modelinin, köprü rijitliğini fazlaca tahmin ederken, dikey deplasmanlarda daha az tahminler ortaya koyduğu belirlenmiştir. Yapılar kavisli elemanları ile yeniden analiz edilmiş ve bilgisayar programı, eğilme moment değerleri ve dikey deplasmanları öngörecek şekilde geliştirilmiştir.



Şekil 2.2 Gerilme Ölçerlerin Yerleştirilişleri

➤ **Mozer ve Culver (1970), Mozer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar (1971)**

Mozer, Culver ve diğer araştırmacılar CURT Projesi kapsamında bir dizi deney yapmış ve araştırmalarının çoğunda şartname özelliklerinin ilk kısımlarını temel alarak kullanmışlardır. Kiriş gövde kesme dayanımını ve kiriş başlık burkulma davranışını incelemek için kavisli tek I kirişli ve çift kirişli sistemlerin her ikisinin de ölçekli modelleri, üç çalışma için oluşturulmuştur. İki deneyin sonuçları, tasarım özelliklerinin ilk kısmı için geliştirilmiş ve analitik denklemlerle karşılaştırılmıştır.

Yedi kirişli deney numunesi, 3,05 m (10 foot) yay açıklık uzunluğuna sahip olarak verilmiştir. Yanal sınırlamalar ve burulma sınırlamaları mesnetlere eklenmiştir. Yük, önceden belirlenmiş kritik bölgelerde, göçmenin oluşacağı açıklığın merkezine uygulanmıştır. I kirişinin başlık genişliğinin kalınlığına oranı, başlık gövdesinin genişliğinin kiriş gövde kalınlığına oranının kavislilik yarıçapının, kiriş yerel burkulma davranışını nasıl etkilediğini incelemek için değiştirilmiştir. Kiriş gövde narinlik oranı ve çapraz berkitme aralıkları, kiriş gövde kesme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için değiştirilmiştir. Kiriş numuneleri, son mesnetlerde ve merkezde dönme ve dikey deplasmanları kaydetmek için strengeler yerleştirilmiştir. Strengeler, kirişin belli noktalarında, basınç olan kiriş başlığının yatay sapmasını ölçmek için kullanılmış, basınçlı kiriş başlığında burkulma başlangıcını ve basınç başlığının gerilmesini belirlemek için yüzeylerin her iki tarafına da bağlanmışlardır. Eklenen strengeler, çekme plakasının gövde ve alt yüzeylerine monte edilmiştir. Deney numuneleri, yükün yüklendiği noktanın yakınında basınç başlığı ya da gövde panelinin burkulmaya başlamasından göçme oluşuncaya kadar yükleme yapılmıştır. Daha sonra sisteme berkitmeler eklenmiş ve yükleme model üzerinde yenilenmiştir.

DeneySEL testlerin sonuçları analiz edilmiş ve sonuçlar önerilen tasarım özellikleri kullanılarak, araştırmacılar tarafından geliştirilen denklemlerle karşılaştırılmıştır. Önerilen denklemler, kiriş numunelerinin davranışlarını yeterli düzeyde tahmin edebilmiştir. Ayrıca bu denklemler ile elastik kiriş teorisinin, numunelerin dönme ve sapmalarını doğru tahmin ettiği tespit edilmiştir. Kavisli kirişin gövde kesme dayanımının, karşılaştırılan bir düz kirişe göre daha az olduğu belirlenmiştir. Üretim süreci, kirişlerde artık gerilmelerin kalmasına sebep olmuş



dolayısı ile inelastik davranış hesaplanan akma yükü altında oluşmuş ve ısı işlemi burkulma dayanımının başlıkta bir artışına sebep olmuştur.

Mozer ve arkadaşları, açıklık boyunca yay uzunluğu 4,7 m (15 ft - 4 inç) olan 2 kirişli kavisli bir sistemde 6 test yapmışlardır (1971). Üç bölüme ayrılan test serileri, çapraz berkitmelerle numuneler üzerinde yürütülmüş ve bir başka seri testleri ise 3 kirişli sistemde derin berkitmeler kullanılarak yürütülmüştür. Bir testte, her iki seri içinde açıklık uzunluğu boyunca 3 noktada yük uygulanmıştır. Bu testlerin amacı, sabit moment bölgelerindeki eğilme dayanımının ve davranışının incelenmesidir (Mozer ve ark., 1971). Numuneler üzerinde yapılan diğer iki testte, berkitmelede orta açıklığın bir tarafından 0,38 m (1 ft - 3) inç kadar uzaklığa ve uçlardan da açıklığın 3 m (10 ft) açıklığında yüklemeler yapılmıştır. Bu testlerde, maksimum kesme bölgelerindeki kiriş gövdesinin kesme çatlağının araştırılması çalışması yapılmıştır. Mozer ve arkadaşları; ayrıca burulma gerilmesinin çeşitli seviyelerde, eğilme ve kesme yüklemesi altındaki davranışını çalışmış, 3 m açıklığın merkezinde tüm yükseklik boyunca berkitmelerle kirişler üzerinde yüklenerek 2 test daha yapmışlardır (1971). Strengeler; basınçlı başlıklardaki yatay ve dikey deplasmanları ve dönmeleri ölçmek için, yük ve mesnet bölgelerinde kirişlere bağlamışlardır. Strengeler; kiriş derinliği boyunca beş noktada gövde panelinin merkezine ve orta berkitme bölgelerindeki kirişlere monte edilmiştir. Kaydedilen birim şekil değiştirmeler, kiriş gövde eğilmesi, berkitme gerilmesi ve başlıklardaki çarpılma normal ve eğilme gerilmelerini hesaplamak için kullanılmıştır. Önceki çalışmada olduğu gibi, deneysel sonuçlar tasarım denklemlerine kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu; akma sonrası dayanım; basınç başlıklarında, kompakt bölümde geliştirilebilir olduğu belirlenmiş ve kavisli kirişin eğilme dayanımının, düz kiriş yanal burkulma formüllerini sınırladığını ortaya konulmuştur (Mozer ve ark. 1971). Eğilme ve kesme testleri, dayanımı artırmak için, kavisli kirişin yapılmasına izin veren enine berkitmelerin, gerilmeleri taşımak için boyutlandırılması gerektiğini belirlemiştir. Momentin yönü, kirişlerin kesme dayanımını etkilediğini göstermiştir. Berkitmelerin, enkesit deformasyonunu önlediğini göstermiştir.

➤ **Mozer ve arkadaşları (1973)**

Mozer ve arkadaşları, sistemin davranışında çapraz berkitmelerin etkisini ve kiriş gövdesinin davranışını ve dayanımını incelemek için basit mesnetli kavisli iki kirişli sistemde 8 adet statik yükleme deneyi yapmışlardır (1973). Kirişler, orta ve uçlarda çapraz elemanlarla desteklenmiştir. Buna ek olarak, kirişler iç kısımlarından enine berkitmeler ile bağlanmıştır. İç kirişin 1/6' sında arttırılmış yük uygulanarak, kirişin kesme davranışı incelenmiştir. Sistemin kesme ve eğilme davranışını üç test yapılarak incelenmiş, yapılan 2 testte iç kirişin 3 noktasında arttırılmış yük uygulanmış ve diğer testte de arttırılmış yük dış kirişin 3 noktasına uygulanmıştır. Son 3 test, sistemin teorik eğilme davranışını incelemek için 3 noktada 2 arttırılmış yük uygulanmıştır. Tüm arttırılmış yükler hidrolik krikolar ile uygulanmıştır. Dikey ve radyal deplasmanlar ile kiriş gövde bozulmaları (distortion), iki kirişli sistem boyunca birkaç ayrı noktada yerleştirilen strengçe yardımı ile ölçülmüştür. Başlıklardaki boyuna şekil değiştirmeler, aksenal ve eğilme kuvvet berkitmeleri ve kiriş gövde şekil değişimleri, derinlik ve uzunluk boyunca çeşitli yerlerde yerleştirilen strengçe tarafından ölçülmüştür. Sistemin elastik davranışını elastik sınırlar içerisinde belirlemek için, bütün numuneler yüklenmiş daha sonra geri boşaltılmıştır. Akabinde sistemin tüm eğilmeleri, dönmeleri ve şekil değiştirmeleri kaydedilirken, sistem göçme anına kadar yüklenmeye devam edilmiştir.

Mozer ve Mozer'in takipçileri olan araştırmacılar; bu deney serilerinin ikinci aşaması boyunca ampirik denklemleri geliştirmişlerdir (1971). Bu eşitlikler, Culver ve McManus tarafından geliştirilen ilave denklemler ile (1971) sistem davranışının tahminine deneysel verilerin uygulanabilirliğini belirlemek için kullanmışlardır. Bu sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Deplasmanların, elastik sınırlar içerisinde tahmin edilen değerler ile iyi korelasyon sağladığını göstermiştir.
- Çapraz çerçevelerin, sistem içerisindeki kuvvetlerin dağılımında ana rolü oynadığını göstermiştir.
- Enine berkitmeler, kesitsel deformasyonlara karşı yeterli direnç vermemiştir.

- Berkitme eğilme gerilmeleri, gerilmelerin kombinasyonu tarafından büyük gösterilmektedir.

Kiriş gövde tasarımı, eğer gerilme alan teorisine dayalı olsaydı, berkitmelerdeki eğilme gerilmelerinin, berkitme tasarımına dahil edileceği belirlenmiştir. Ampirik denklemler, deneysel değerlere uyarak sistemin davranışını tahmin etmede aşırıya kaçmamıştır. İlk akma değerinin üzerinde olan ek eğilme dayanımının önemli bir miktarı, kavisli I kirişlerin basınç başlıklarında gerçekleştiği bulunmuştur. Kesme testinin sonuçları, gerilme alanının kavisli kirişlerin enine berkitmelerde gelişmiş olabileceğini göstermiştir. Mozer ve arkadaşları; kavisli kiriş tasarımı için gerilme alan teorisinin uygun olmadığını, çünkü burkulma sonrası dayanımın, eğrilik etkileri tarafından azaldığını öne sürmüşlerdir.

### **2.3.3 Kavisli çelik köprü araştırma projesi CSBRP**

1992 yılında I kirişli kavisli köprülerin davranışını incelemek için CSBRP adıyla çok yıllık bir proje başlatılmıştır. CURT projesi adı altında yürütülen önceki araştırmalar ölçekli boyutlara ve idealize edilmiş mesnetli sistemler üzerine yürütülmüştür. FHWA, CURT projesinin kapsamından daha fazla araştırmanın gerekli olduğunu belirtmiş, gerçek boyutlara ve mesnetlere sahip kavisli sistemleri içeren bir çalışma başlatmıştır. Bu çalışma FHWA tarafından TRB ( Transportation Research Board) ile birlikte yürütülmüştür.

CSBRP, 2 adet tam ölçekli test düzeneği içermektedir. 6 kompozit olmayan eğilme elemanı numunesi, maksimum kapasitedeki yatay kavisin, eğilme, kesme ve diğer kombinasyonlara maruz kaldığında gösterdiği davranışları incelemek için teste tabi tutulmuştur. Diğer 2 kompozit olmayan yapıdaki çalışmada, açıklık kirişlerinin sistem üzerindeki davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalar boyunca tam ölçekli kompozit köprü benzetilmiş tekerlek yükleri altında test edilmiştir. Araştırmacılar daha önce CURT araştırmalarından elde edilen eşitlikleri kontrol etmek için, etkileşim eşitlikleri geliştirmişlerdir. Bu araştırmanın sonuçlarında ise, yatay kavisli köprülerin

tasarım kriterlerini güncelleyen, revize etkileşim eşitliklerini oluşturmuş olup, bu araştırma ile yapım aşaması boyunca kavisli köprülerin davranışları incelenmiş, tasarım için eğilme ve kesme dayanımları belirlenmiş ve kavisli köprüler için gerekli olan analiz aşamaları belirlenmiştir.

#### ➤ **Eğilme bileşenlerinin testleri**

Çeşitli geometriye sahip numuneler, sistemin moment kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için test edilmiştir. 6 sistemin yüksek fabrikasyon maliyetlerinden dolayı numuneler dıştaki kirişin orta açıklığına bağlanmıştır. Bileşenleri test etmenin amacı; basınç başlığı ve gövde narinliği ile açıklıktaki enine berkitmenin boyuna eğilme momenti üzerindeki etkisini belirlemektir. Köprüye belirlenen eğilme momentlerini kaydetmesi için strengeler takılmıştır.

Eğilme bileşeni testinin sonuçları, basınç başlık narinliğinin moment kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir bir etkisinin olduğunu, gövde narinliğinin ve enine berkitmenin ise hiçbir etkisinin olmadığını göstermektedir. Yaklaşık olarak bütün numunelerde akma, basınç başlığının orta açıklığında meydana gelmiştir.

#### ➤ **Montaj çalışma testleri**

Araştırmacılar montaj sırasının etkilerini belirlemek için 9 adet test yapmışlardır. Enine çaprazlı tek, ikili ve üçlü kiriş sistemlerle çalışıldı. Reaksiyon kuvvetleri, kiriş şekil değiştirmeleri, çapraz eleman kuvvetleri kaydedilmiş ve sonlu eleman sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Açıklık momentini hesaplamak için Düşey Yük Metodu kullanılmıştır. Montaj testi; orta açıklık yanal elemanlarının düşey sehimini azaltmadaki önemini göstermiştir. Kirişlerdeki burkulmayı azaltmak için çaprazlamaların yükü düzgün yayılı olarak boşaltılmalıdır.

#### ➤ **Çapraz eleman testi**

Araştırmacılar kavisli köprülerdeki yatay gergilerin önemini araştırmışlardır. X tipi çapraz elemanların sisteme K tipi elemanlardan daha fazla narinlik eklediğini öne

sürmüştür. X tipi elemanların ağırlık artışı sistemde büyük gerilmelere ve şekil değiştirmelere neden olmaktadır. Buna rağmen X tipi elemanlar K tipi elemanlardan daha baskındır ve sistem davranışı aynıdır. Sonuçlar göstermektedir ki çapraz elemanlar düşey sehimde önemli bir etkiye sahip değildir ve gergisiz sistemler yanıl gergili sistemlere göre daha büyük sehım ve gerilmelere neden olmuştur.

➤ **Fukumoto ve Nishida (1981)**

Fukumoto ve Nishida açıklığın ortasında münferit yük altındaki 6 eğik I-kirişin kırılma hareketini ve burulma sapmasını incelemiştir. Denklemler burulma hareketi ve bükmelere bağılı olarak tek bir kesitli kiriş için geliştirilmiştir. Boyuna sehım denklemleri sonlu elemanlar teorisinden alınmıştır. Bu denklemlerle gövde ve başlık içindeki artık gerilimlerini, kritik lastik ve plastik hareketleri hesaplanmıştır. Denge ve sınır koşulları kiriş için belirlenmiş ve Runge-Kutta metodu sehım ve iç kuvvet dengeleri elde etmek için kullanılmıştır. Eğik I-kirişinin kırılma direnci için tam ve yaklaşık denklemler ibraz edilmiştir.

Enkesit, köprü açıklığı ve kavis yarıçapı değiştirilerek 6 numune alınmıştır. Kalıcı gerilmeler deneyden önce her bir numune için toplanmıştır. Açıklığın ortasındaki kiriş hidrolik kriko ile yüklenmiştir. Deneysel sonuçlar analitik değerlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir.

➤ **Nakai ve arkadaşları (1984)**

Nakai ve arkadaşları, kavis yarıçapı ve değişen enkesitle 31 adet kavisli I-kirişini inceleyip, kayma gerilmelerinin ve kombinasyonlarının kirişlerin kırılma direncine etkilerini test etmiştir (1984). Numuneler ya çarpazlama ile ya da boylamsal olarak, kapasite üzerindeki etkilerini görmek için rijitleştirilmiştir. Kavis yarıçapı arttırıldıkça kritik hareketin de azaldığı belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca kayma yükü altında 10 I-kiriş numunesini test etmişlerdir. Kayma kapasitesi analitik ve deneysel verileri arasında karşılaştırılan sonuçlar da uyum içerisinde çıkmıştır. Etkileşim içindeki kavisli

12 I-kirişinin kayma yükü testi toplanan verilerden hareketle geliştirilmiştir. Boylamsal rijitlikteki I-kirişlerinin birleşik eğilme ve kayma yükü altındaki kapasitesini artıramadığına karar verilmiştir.

#### ➤ **Nakai ve Kotoguchi**

Enine kuşaklamanın değişen boyutlardaki hareket çalışmasına izin vererek enine kuşaklamanın üç değişik şekliyle iki kiriş sisteminin üç yanal burkulma testini yürütmüştür (1983).

İki kiriş sisteminden her biri eşit ve karşıt döngülerle basit eğilmeye maruz bırakılan kolonlarla desteklenmiştir. Kiriş ve enine kuşaklama zinciri gerinim ölçerle ölçülürken, enine sehim strengeler kullanılarak ölçülmüştür. Bu test enine kuşaklama yükünün elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca, burkulmanın enine kuşaklamaya göre kavisli kiriş sisteminin kapasitesi için daha önemli olduğu gözlemlenmiştir.

#### **2.3.4 Yatay kavisli ve çarpık I kirişli bir köprünün davranışı ve analizi üzerine yapılan bir çalışma :**

Çağrı Özgür tarafından yapılan bu çalışmada; oldukça çarpık ve yatay kavisli köprüler gibi bu türdeki yapıların analiz ve tasarım prosedürleri bir numune üzerinde incelenmiştir. Köprü tasarımında, AASHTO 2007 Şartnamesi sınır şartları kabul edilerek kullanılmıştır. Çalışılan köprünün elastik analizinde çeşitli niteliklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Araştırmada; sonlu elemanlar modelinin doğruluğu araştırılmış, inşaat sırasında oluşan birinci mertebe ve ikinci mertebe etkileri karşılaştırılmış, basitleştirilmiş denklemler kullanılarak iki mesnet arasındaki taşıt geçiş sürelerinin tahmin edilebilmesinin kontrolü yapılmıştır.

3 boyutlu sonlu elemanlar ve 3 boyutlu ızgara modelleri tarafından ön görülen köprü davranışının elastik tasarımı yapılmıştır. AASHTO 2007 de eğilme direnç

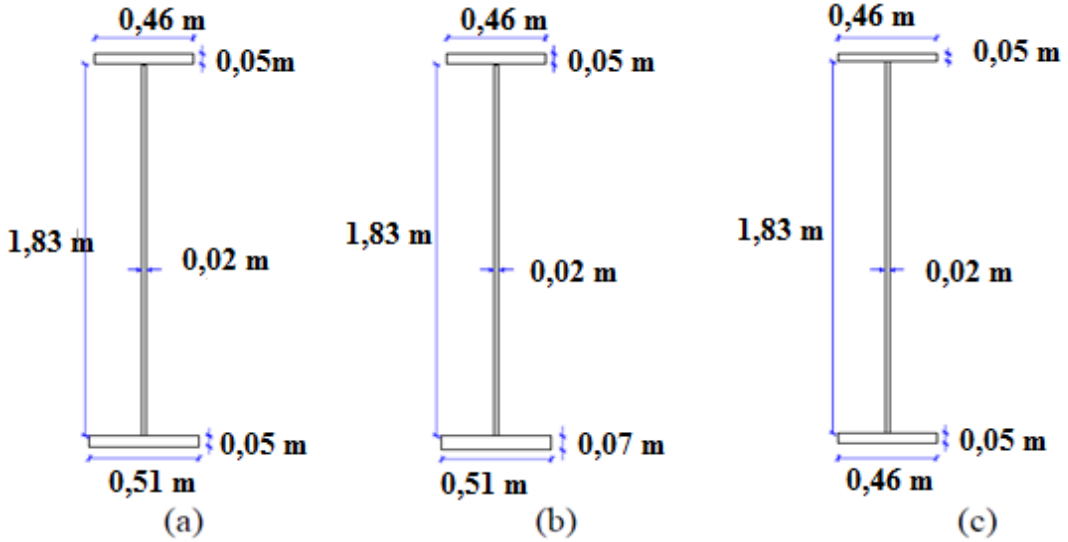
denklemlerinin kısa açıklamaları ilk olarak sunulmuştur. Daha sonra elastik sonlu elemanlar yöntemi analizleri tartışılmıştır. Akabinde, köprü tasarımlarının detayları tartışılmıştır. Son olarak, elastik sonlu elemanlar yönteminin sonuçları ile 3 boyutlu ızgara modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Köprünün doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ek olarak yapılmıştır. Yükleme planları, kullanılan materyal özellikleri ve tam doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinin prosedürleri gibi ana konular incelenmiştir. Kapsamlı olarak, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerinin bulguları ilerleyen aşamalarda gösterilmiştir. Farklı yük seviyelerinde G1, G3 ve G6 kirişleri maksimumlarda kontrolleri değerlendirilmiştir. Pozitif eğilme bölgelerindeki kompozit kesitlerde moment eşitlikleri kullanılarak sonuçlar tartışılmıştır. Finalde sonuçlara yönelik öneriler ve araştırmalar sunulmuştur. Ayrıca AISC 2005 Şartnamesindeki prosedürler de kullanılarak çapraz en kirişler üzerinde de önemli kontroller yapılmıştır.

Bu araştırmada ayrıca, nihai dayanım davranışını yakalamak için farklı AASHTO 2007 dayanım denklemlerinin becerisi ele alınmıştır. Bu, elastik tasarım ve analiz sonuçları ile doğrusal olmayan 3 boyutlu sonlu elemanlar teorisi çalışmalarının sonuçlarının karşılaştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Özellikle, kompozit kesitlerdeki pozitif eğilmeler için üçte bir kural denklemleri temel alınarak, AASHTO 2007 momentlerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Jung (2006) tarafından doğrulanan modelleme yaklaşımı kullanılarak sadeleştirilmiş 3 boyutlu sonlu elemanlar modelinin çözümleri tarafından öngörülen sonuçları elde etmek için 3 boyutlu ızgara modellerinin kapasitesi irdelenmiştir. Ayrıca basitleştirilmiş analizlerin diğer tiplerinin kontrol etmek için potansiyel deney çözümü olarak hizmet verebilir tarzda 3 boyutlu sonlu elemanlar yönteminin sonuçları verilmiştir. Geometrik doğrusal olmayan inşaat boyunca etkilerin potansiyel olarak öneminin değerlendirilmiş, farklı hareketli yükler sebebiyle oluşan maksimum momentlerin kullanımları ile karşılaştırıldığında, kesit dayanımlarının kontrol edilmesinde, hareketli yükten dolayı aynı noktada kesişen ana eksenin, başlık yanal eğilme değerlerinin ve momentlerinin kullanılmasının avantajları da incelenmiştir.

Bu çalışmanın sonucuna, yatay kavislilik ve önemli ölçüde çarpık mesnet hatlarının her ikisini de içeren, temsili basit mesnetli I kirişli köprünün kapsamlı bir analiz ve tasarım çalışmasının yapılması ile ulaşılmıştır.

Şekil 2.3 ve 2.4’ te gösterilen köprü, eğilme dayanım denklemlerinin ve çeşitli analiz tiplerinin AASHTO 2007 ‘ye göre doğrulamalarını dikkate almak için önemli bir örnek olarak Mr. Dann Hall tarafından tavsiye edilerek, örnek olarak alınmıştır. Çalışılan kompozit köprü özellikleri; basit mesnetli ve tek açıklıklı, yatay kavisli 2,74 m (8,5 ft) aralığa sahip 6 I kirişten oluşan, köprü tabliye kalınlığı 0,2 m (7.5 inç), döşemeden daha geniş uzunluklarda etkili genişlikler AASHTO 2007 kuralları temel alınarak oluşturulmuştur. Köprü; çapraz en kirişli, G6 adı verilen iç kirişinde sağ mesnette  $64,64^0$  çarpıklık açılı ve sol kirişte  $60,46^0$  çarpıklık açıları mevcut olup, G1 ve G2 adı verilen kirişinin alt başlıkları bağlantılandırılmış ancak bütün kirişleri prizmatiktir. Çapraz en kirişler yüksüz durum için detaylandırılmıştır. Akma gerilmesi bütün çelik elemanlar için 50 ksi, beton döşeme için de 4 ksi alınmıştır.



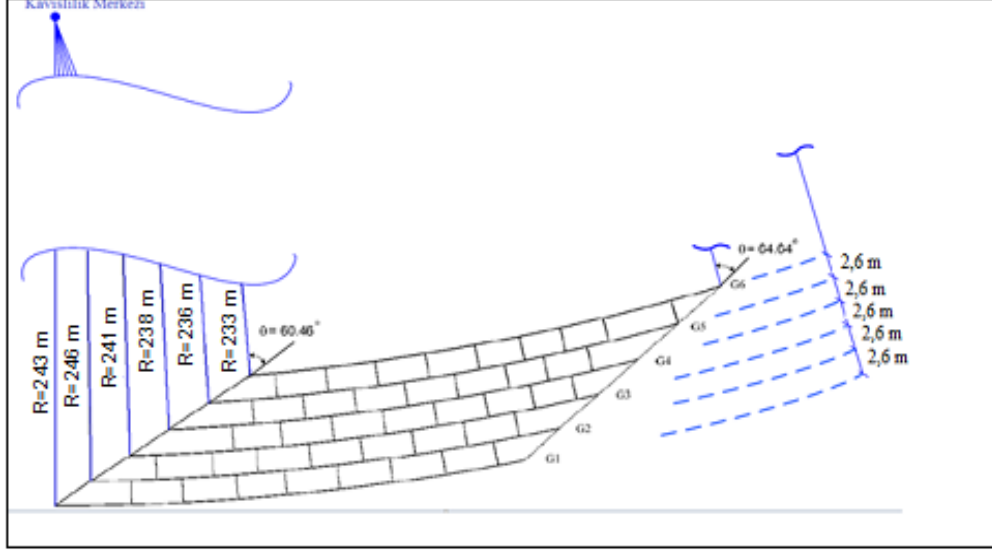
G1-En Kesiti 1 (G1-1)(a)

G1 En Kesiti 2 (G1-2)(b)

G3 En Kesiti (G3)(c)

Şekil 2.3 Kompozit Köprü Enkesiti





Şekil 2.4 Çelik üst yapının plan görünüşü

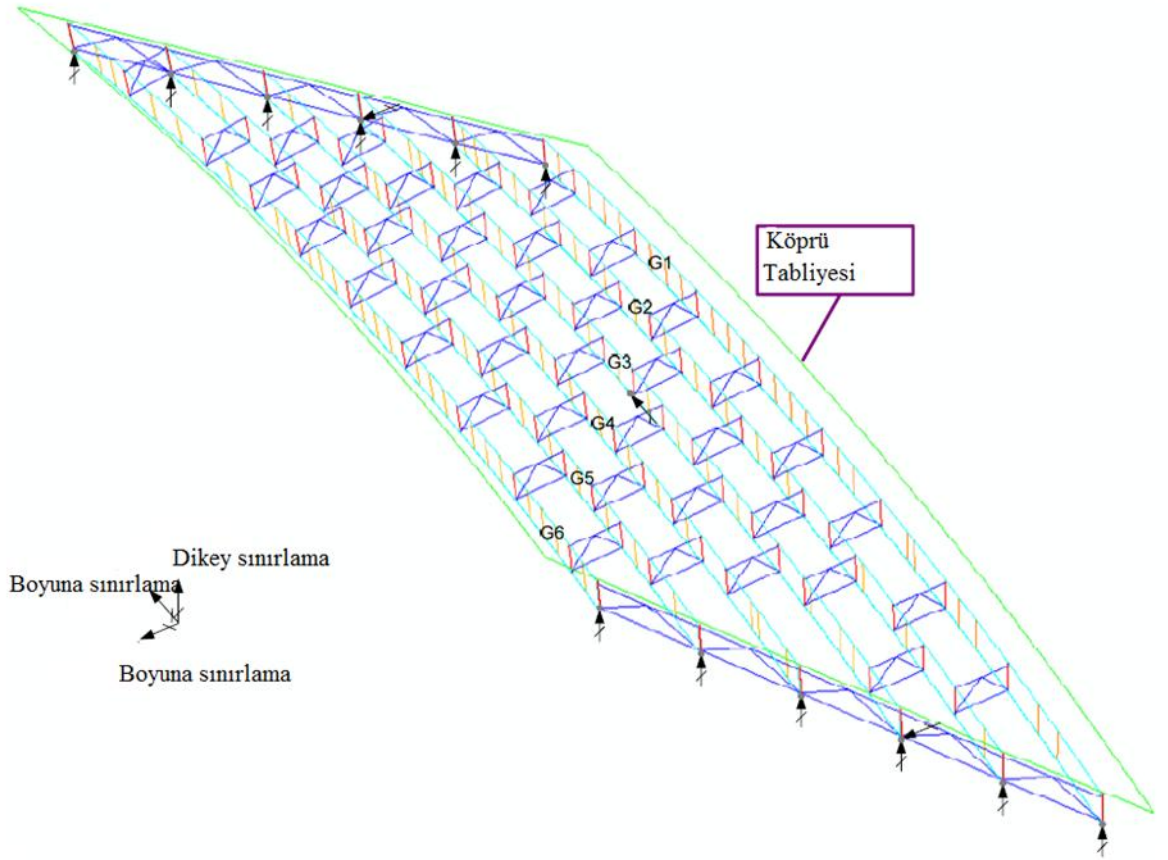
Bununla birlikte; yatay kavisliliğin yarıçapı Şekil 2.4 'te verilmiştir. G1 kirişinin yay uzunluğu 48,5 m (159,88 ft), G2 kirişinin yay uzunluğu 48,9 m (159,93 ft), G3 kirişinin yay uzunluğu 49 m (160,29 ft), G4 kirişinin yay uzunluğu 49,07 m (160,78 ft), G5 kirişinin yay uzunluğu 49,5 m (162,48 ft) ve G6 kirişinin yay uzunluğuda 48,5m olarak belirlenmiştir.

Toplam tabliye kalınlığı 15,5 m, 3 trafik şeridinden oluşan tabliye toplam genişliği ise 14 m'dir. Konsolların genişliği 1,3 m'dir. Ayrıca; gelecekteki aşınma yüzeyi ve parapet yükleri de çalışılmıştır. Parapetler 0,5 m genişlikleri ve 0,7 m yükseklikleri ile hesaplara katılmıştır.

Köprüye; ortada 41 adet sonda ise çapraz en kiriş eklenmiştir. Çarpıklık derecesi her iki mesnettede  $20^{\circ}$ 'den büyük olduğundan, orta çapraz en kirişler, kirişlere normal yönlendirilmiştir. Çapraz en kirişler; kiriş başlıklarındaki yanal eğilme gerilmelerini azaltma pahasına, en kirişlerdeki kuvvetlerin büyüklüğünün azaltılması için dirsekli kalıpta yerleştirilmiştir.

### ➤ Konu köprünün elastik sonlu elemanlar modeli

Tasarımı yapılan köprünün sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ilk tasarımı yapılmıştır. Daha sonra, elastik malzeme özellikleri tartışılmış ve yüklerin hesaplanması verilmiştir. Konu köprünün sonlu eleman modeli ABAQUS 6.5.1 (2004) kullanılarak oluşturulmuştur. Araştırılan köprünün sonlu eleman modeli, belirlenen sınır koşulları ve geometrisi Şekil 2.5 de gösterilmiştir.



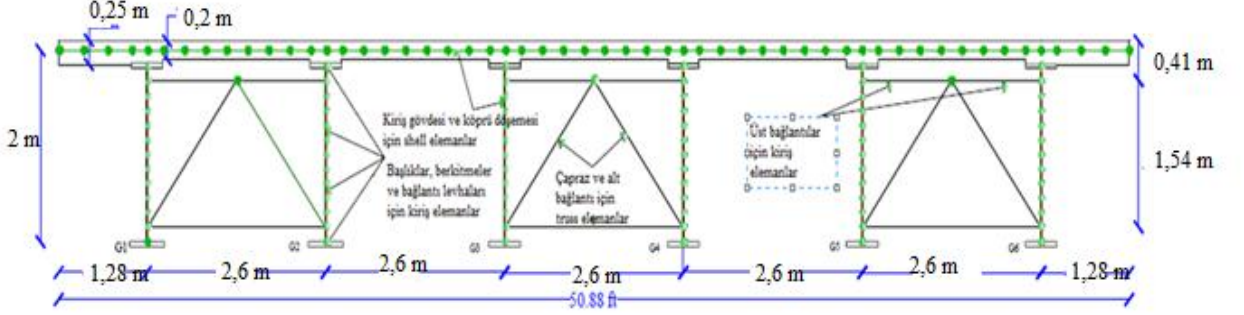
Şekil 2.5 Sonlu elemanlar yöntemi uygulanan köprünün perspektif görünüşü

12 eleman kirişlerin gövde derinliği boyunca kullanılmıştır. Elemanların sayısı kirişlerin uzunlukları boyunca birer kabuk eleman olarak belirli bir oranda seçilmiştir.

Kiriş gövdeleri ve beton döşeme S4R elemanı olarak modellenmiştir. Şekil 2.6 köprü içindeki örnek alınan bir bölgedeki kiriş gövde derinliği boyunca sonlu eleman



üzerinde bulunan döşeme düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler, model düğüm noktaları ve üst başlık düğüm noktalarındaki deplasmanlar ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.7 Sonlu elemanlar modelinin şematik en kesiti

En kirişlerin alt ve çapraz elemanları T3 köprü makas elemanı olarak modellenmiştir ve üst bağlantılar en kirişlerin düzlemine dik yönde çapraz en kiriş kararlılığını sağlamak için B31 kiriş elemanları tarafından temsil edilmiştir.

Köprü; çeliğin kendi öz ağırlığı, beton döşeme ve kompozit olmayan köprüye etki eden diğer yükler ( $DC_1$ ), parapet ölü yükü ( $DC_2$ ), gelecekte kaplama aşınma yüzeyi ölü yükü ( $DW$ ) ve kompozit köprüde hareketli araç yükü ( $LL$ ) için analiz edilmiştir. Yükler; AASHTO LRFD 2007 Köprü Tasarım Özellikleri esas alınarak kullanılmıştır.  $DW$  ve  $DC_2$  yüklerinin etkilerini anlamak amacıyla ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Sonuç olarak; birçok mevcut faktör, izin verilen dinamik yük ve uygulanabilir merkezkaç kuvveti de dahil olmak üzere  $LL$  yüklerinin, araç hareketli yüklerinden oluştuğu varsayılmıştır.



Şekil 2.8 Dış kirişe bağlanan konsollar (Jung, 2006).

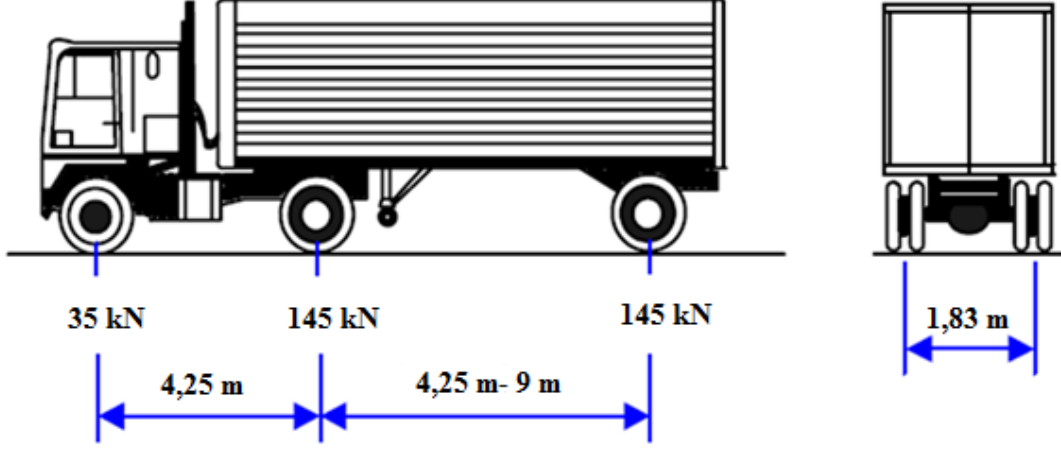
Kompozit yapının ölü yükleri, döşeme sertleştikten sonraki durum için hesaplamaları sunulmuştur. Parapetlerin ağırlıkları için ilk hesaplamalar gösterilmiş ve gelecekteki aşınma yüzeyi yük hesaplamaları gösterilmiştir.

$DC_2$ , parapet ölü yük ağırlıkları olarak alınmıştır. Parapetler; 0,75 m yüksekliğinde ve 0,48 m genişliğinde alınmıştır. Parapet ağırlıkları ft başına 1150 lbs olarak hesaplanmıştır. Modelde;  $DC_2$  yükü parapetlerin genişlikleri boyunca düzgün yayılı yük olarak alınmıştır.  $DC_2$  nedeniyle uygulanan düşey yük 191 kip olarak hesaplanmıştır. Ayrıca; parapetlerin köprünün rijitliğine herhangi bir etkide bulunmadığı varsayılmıştır. DW olarak verilen kaplama ağırlığı ölü yükü, döşeme boyunca düzgün yayılı bir yük olarak 14 m genişliğinde uygulanmıştır. Kaplama

ağırlığı, ft başına 55 kg olarak hesaplanmıştır. Ayrıca; DW nedeniyle uygulanan dikey yüklerin toplamı 184,49 kip'tir.

Eğilme için tasarım hareketli yükleri olarak alınan (LL); AASHTOO 2007 Şartnamesi esas alınarak dinamik etki katsayısı, merkezkaç kuvvetleri ve diğer faktörler da hesaba katılarak alınmıştır. Fren yükleri ve çarpışma yükleri köprü üzerindeki küçük etkisi nedeniyle ihmal edilebilir alınmıştır. Ek olarak; Yatay Kavisli Köprüler için Teknik Özellikler Kılavuzunda dever açısı yüzde 0-10 arasında olduğunda ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle dever etkisi ihmal edilmiştir. Köprü yatay kavisli olduğundan merkezkaç etkileri göz önüne alınmıştır. Merkezkaç kuvvet radyal bir kuvvettir ve aracın tekerlekleri vasıtasıyla tabliyeye iletilmektedir. Merkezkaç kuvveti sebebiyle devrilme momenti oluşmaktadır. Dolayısı ile devirme momenti köprünün dışına doğru dikey tekerlek yükleri arttırılmış ve köprünün içine doğru bunlar azalma eğilimi gösterdiğinden azaltılmıştır. Tasarım hızı 72,4 km/h olarak alınmıştır. Merkezkaç kuvveti; S tasarım hızı, r kavislilik yarıçapı olmak üzere araç ağırlığının yüzdesi olarak AASHTOO 2007' de verilmiştir.

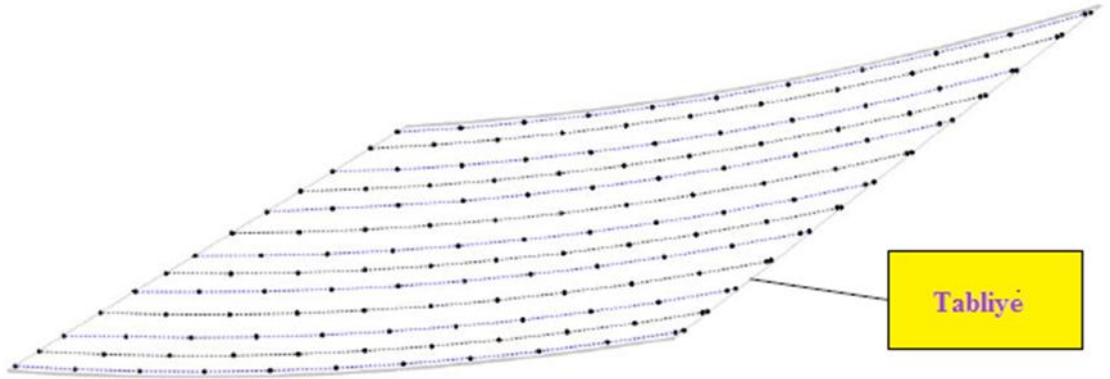
Tasarım araç hareketli yükleri AASHTO 2007 esas alınarak kullanılmıştır. Tasarım hareketli yükleri HS-93 olarak tasarlanmış ve tasarım taşıt (DT) ve tasarım şerit (DT) yükünden oluşmaktadır. Tasarım karayolu; 3,65 m genişliğinde 3 trafik şeritli, toplamda 14 m genişliğinde karayolundan oluşmuştur. Tasarım araç hareketli yükleri, kuvvet etkilerini maksimize etmek için düzenlenmiştir. Ek olarak, şerit yükleri bu etkileri daha da yükseltmek için kullanılmışlardır. Dinamik yük katsayısı; tasarım aracının statik etkilerini arttırmaktadır. Şekil 2.9 tipik tasarım kamyon özelliklerini göstermektedir. Aks yükü, dinamik etki faktörü de dahil olmak üzere kompozit döşemeye noktasal yük olarak etki ettirilmiştir.



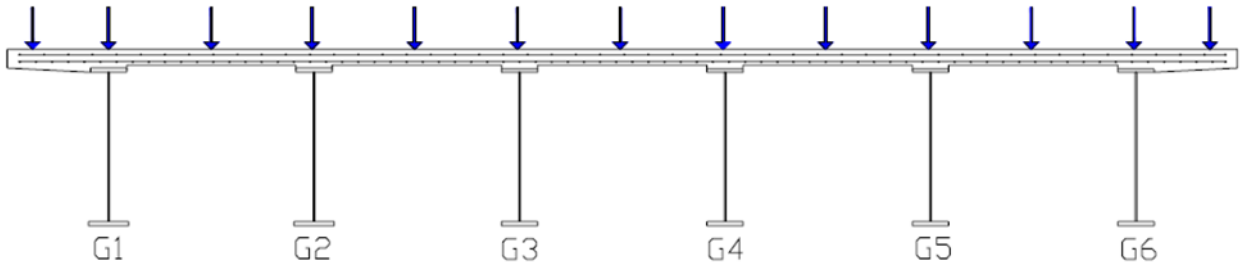
Şekil 2.9 Tasarım aracı AASHTO (2007)

Tasarım şerit yükü; 0,064 kip/ft<sup>2</sup> yayılı yük olarak, 3 m genişliğindeki her şeritte uygulanmıştır. Ayrıca; tüm şeritlerin aynı anda taşıt hareketli yükleriyle yüklü olması durumu tahkik edilmiş ve yük azaltma katsayısı ile çarpılarak hesaplanmıştır. Tasarım araç yüklerinin yerleştirilmesi; yüzeylerin etkileri kullanılarak belirlenmiştir. Özel kirişler için oluşturulan, ana aks eğilme ve başlık yanal eğilmeler ve maksimum çekme ve basınç kuvvet değerleri çapraz çerçeve elemanlar için oluşturulmuştur.

Hesabı yapılan yüzeyler; tasarım araç yüklerinin yerlerini belirlemeye karışık yapılı köprüler için ihtiyaç duyulmaktadır. Birim yükler; etkili yüzeylerde çeşitli etkiler oluşturmak için kompozit köprünün döşemesinde 156 noktada uygulanmıştır. Noktalar; tabliye genişliğinde kirişlerin üzerinde, kirişlerin orta noktalarında ve yol kenarlarında olacak şekilde seçilmiştir. Benzer bir şekilde; tabliye genişliği boyunca eşit yay uzunlukları oluşturacak şekilde seçilmiştir. Şekil 2.10 etkili yüzeyler oluşturmak için tabliyede kullanılan noktaları göstermiştir.



Şekil 2.10 Beton tabliyede noktasal yük uygulanan etkili yüzeyler (156 nokta)



Şekil 2.11 Tabliye genişliği boyunca uygulanan yükler (13 nokta)

Bu çalışmanın sonuçlarının yorumlanmasını basitleştirmek amacıyla G1, G3 ve G6 kirişlerinin davranışlarına odaklanılmıştır. Bu nedenle; köprü davranışlarını izlemek için kiriş uzunlukları boyunca ayrı ayrı yerler seçilmiştir. Maksimum yanal eğilme davranışı sergileyen yerlerde bu noktalar seçilmiştir. Etkili yüzeyler bu noktalar için belirlenmiştir. Daha sonra bu etkili yüzeylerdeki tepkiler; ana eksen eğilme ve başlık yanal eğilme hareketli yük diyagramlarını oluşturmak için kullanılmıştır. Hareketli yük diyagramları; kirişler boyunca değişik yerlerde tasarım araç yüklerinden kaynaklanan, maksimum tepkilerin miktarlarını vermiştir. Ayrıca; çapraz çerçeve en kiriş elemanları için etkili yüzeyler, çapraz elemanlar için maksimum eksenel kuvvet değerlerini





gibi, maksimum eksenel kuvvet değerleri seçilen çapraz en kirişler için de elde edilmiştir. Bu çapraz en kirişler ön analizler için seçilmiştir.

Köprünün elastik analizi; AASHTO 2007' de tanımlanan Dayanım, Servis ve inşa edilebilirlik sınır değerlerini değerlendirmek için yapılmıştır. Bununla beraber; diğer limit durumları tasarım için kontrol maksatlıda olsa bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Bu çalışma kapsamında; Dayanım IV, Dayanım I ve Servis II yük kombinasyonları üzerinde durulmuştur. Bu kombinasyonlar;

Dayanım IV:  $1.5 DC_1 + 1.5 DC_2 + 1.5 DW$

Dayanım I:  $1.5 DC_1 + 1.25 DC_2 + 1.5 DW + 1.75 LL$

Servis:  $1.0 DC_1 + 1.0 DC_2 + 1.0 DW + 1.33 LL$

Burada;

$DC_1$  = Kompozit olmayan yapının ölü yükleri

$DC_2$  = Kompozit yapıdaki parapet ağırlıkları

$DW$  = Gelecekteki aşınma yüzey ağırlığı

$LL$  = Araç hareketli yükleri temsil etmiştir.

Sistemin elastik olduğu varsayımı temel alındığında ve kompozit köprünün yükler altındaki sonuçları geometrik doğrusal olduğunda, süperpozisyon geçerli olmuştur. Bu sebeple,  $DC_1$ ,  $DC_2$ ,  $DW$  ve  $LL$  için ayrı analizler yapılmış ve ortaya çıkan gerilme ve deplasmanlar üst üste eklenmiştir. Gerilmeler için; başlıkta orta kalınlıkta alt başlık ve üst başlık değerleri hesaplanmış ve başlık ana eksenel eğilme gerilmeleri büyük liflerde tahmini olarak bulunmuştur. Kompozit olmayan kesit özellikleri, kompozit olmayan köprünün ölü yük analizlerinden elde edilen gerilmelerden momentlerin hesaplanması için kullanılmıştır. Ayrıca; kompozit kesit özellikleri, kompozit yapının ölü yükten oluşan gerilmelerini momentlere dönüştürmek için kullanılmıştır. Diğer taraftan; köprünün kesit özelliklerini ve hareketli yük gerilmelerini, momentlere çevirmek için kullanılmıştır. Tabliyenin tam kalınlığı, kompozit en kesit özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Doğrusal elastik ve geometrik doğrusal olmayan analizleri  $DC_1$  için yapılmıştır. Bir ön çalışmadan sonra; geometrik doğrusal olmayan etkiler kompozit köprünün yüklemesinde ihmal edilmiştir.

Kompozit olmayan köprünün yüklemeleri için geometrik doğrusal olmayan etkiler daha sonra tartışılmıştır. Bu sebeple; doğrusal elastik analizler kompozit köprü yapısının yüklemeleri (DC<sub>2</sub>, DW ve LL) için yapılmıştır.

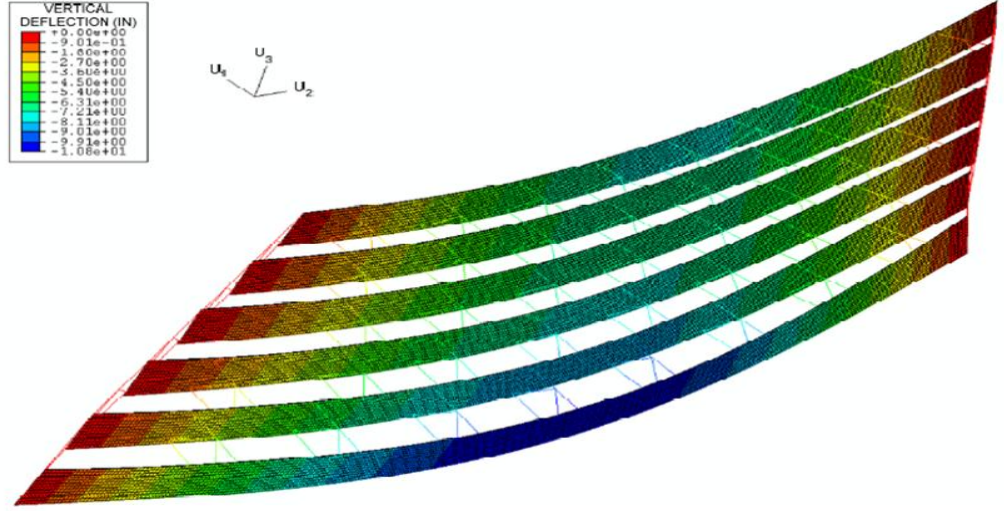
➤ **Kompozit olmayan köprünün yapı ölü yük analizlerinin sonuçları (DC<sub>1</sub>)**

Dayanım IV yük kombinasyonları, inşa edilebilirlik kontrolleri için Dayanım I yük kombinasyonundan daha kritik olduğu için, ilk olarak üst başlık, alt başlık değerleri ve yönü değiştirilmiş geometriler kompozit olmayan köprünün ölü ve yapı yükleri için, Dayanım IV (1.5 DC<sub>1</sub>) yük kombinasyonunun altında gösterilmiştir. Çarpanlarla arttırılmış kompozit olmayan köprünün tepkileri tamamının, elemanların akma gerilmelerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca; başlık yanal eğilme gerilmelerinin çapraz çerçeve bölgelerinde daha büyük olduğu, beklendiği gibi çapraz olmayan uzunlukların açıklık ortalarına yakın olduğu kaydedilmiştir. Ek olarak; ana aksenal eğilme gerilmeleri geometrik doğrusal olmama etkilerinden etkilenmemiştir, hâlbuki geometrik doğrusal olmayan etkilerin başlık yanal eğilme gerilmeleri için belirgin ölçüde yüksek bulunmuştur. Geometrik doğrusal olmayan etkilerle G1 deki maksimum yer değiştirme 0,33 m, doğrusal elastik analizde 0,32 m ve maksimum sapma yüzde 4 olarak belirlenmiştir. Geometrik doğrusal olmayan etkiler, kompozit yapının ölü ve yapı yükleri için önemli olmuştur bunun sebebi, geometrik doğrusal olmayan analizlerin tepkileri, sonradan oluşan tasarım kontrollerindeki kompozit yapının yüklemeleri için bir sonraki geometrik doğrusal analizlerin tepkileri ile birleştirilmiştir.

Son kompozit köprü için Dayanım I yük kombinasyonunu, kirişlerin alt başlıkları için dayanım sınır durum kontrollerini etkilemektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi; sadece geometrik doğrusal olmayan DC<sub>1</sub> yüklemesinin sonuçları, sonraki dayanım kontrolleri için dikkate alınmıştır, çünkü ikinci dereceden analiz sonuçları, doğrusal elastik analiz sonuçlarından önemli derecede farklıdır.

Ayrıca bu çalışmada; kompozit olmayan köprü, 1.25 DC<sub>1</sub> yükü altında, analiz edilmiştir. Bu döşeme; tam doğrusal olmayan analiz çalışmaları sonrası için başlangıçtaki düz konumdaki sonlu elemanlar modelinde örnek gösterilmiştir. Şekil

2.13, 1.25 DC<sub>1</sub> yükü altında ikinci dereceden analizden elde edilen deformasyona uğramış kompozit olmayan yapının perspektif görünüşünü göstermektedir.



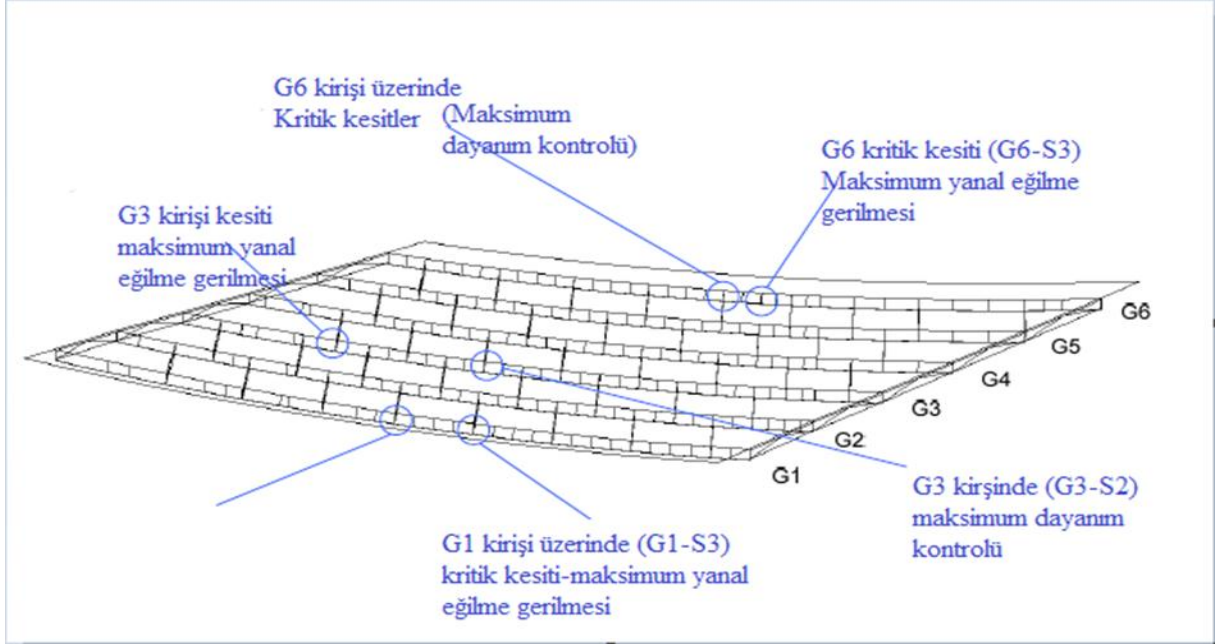
Şekil 2.13 Kompozit olmayan köprüünün 1.25 DC<sub>1</sub> yükü altında geometrik doğrusal olmayan analizi sonrası şekil değiştirmiş halinin perspektif görünüşü

Denklemlerin ve sonlu elemanlar yönteminin sonuçları arasındaki farklılıklar sol mesnet için %1.27, sağ mesnet için %5.96 olarak belirlenmiştir. Bu farklılık; çapraz çubuk elemanların düzlemsel deplasmanlarından kaynaklanmıştır.

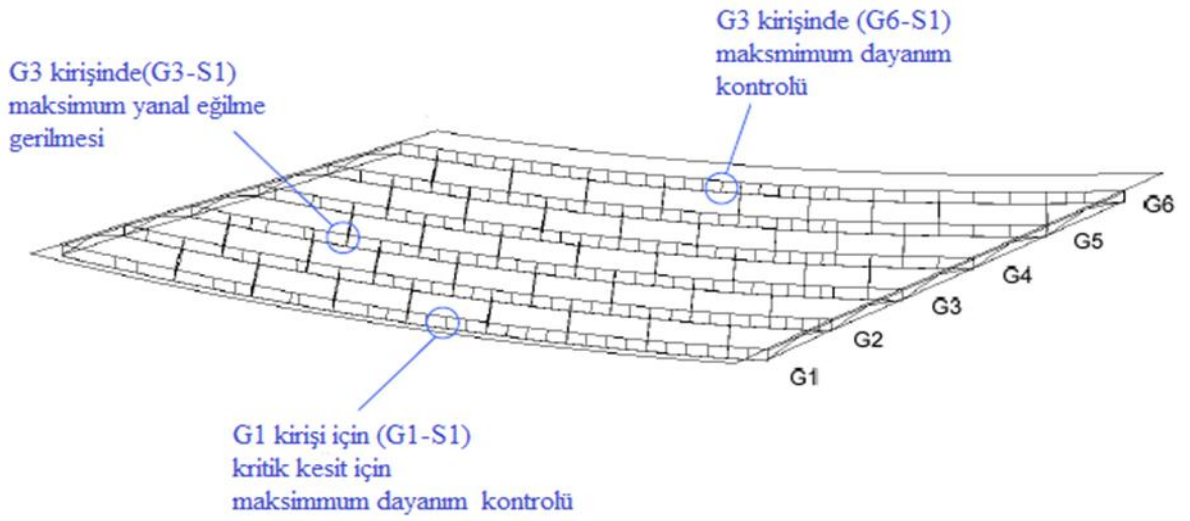
#### ➤ LL Hareketli yük pozisyonlarının ve kritik kesitlerin belirlenmesi

Kritik bölümlerde; AASHTO 2007’de tanımlanan Dayanım IV ve Dayanım I yük kombinasyonları altında inşa edilebilirlik, dayanım ve servis sınır durumları için çeşitli bölümlerde kontroller yapıлып karşılaştırılmıştır. Bütün kontroller, herhangi bir limit durum için kapasite analizinden hesaplanan gereksinimin oranlarıdır. G1,G3 ve G6 kirişlerinin her biri için 2 kritik kesit belirlenmiş ve 1.5 DC<sub>1</sub> yük altında inşa edilebilirlik limit durumları için tanımlanmıştır. Dayanım IV yük kombinasyonu altında

inşa edilebilirlik durumu için kritik bölümler sunulmuş ve Şekil 2.14' de gösterilmiştir. G1 kirişi üzerinde G1-S2, G3 kirişi üzerinde G3-S2 ve G6 kirişi üzerinde G6-S2 bölümleri, Dayanım IV yük kombinasyonu altında bu kirişlerde maksimum dayanım kontrolü yapılmıştır. Ayrı ayrı kritik bölümler, tamamlanmış yapıdaki dayanım limit durumlarının kontrolü için, G1 kirişi üzerinde G1-S2, G3 kirişi üzerinde G3-S2 ve G6 kirişi üzerinde G6-S2 bölümleri olarak tanımlanmıştır. Ayrıca; G1 kiriş üzerinde G1-S3, G3 kirişi üzerinde G3-S1 ve G6 kiriş üzerinde G6-S3 kesitlerinde, Dayanım IV yük kombinasyonu altında maksimum yanal eğilme gerilmeleri bulunmuştur.

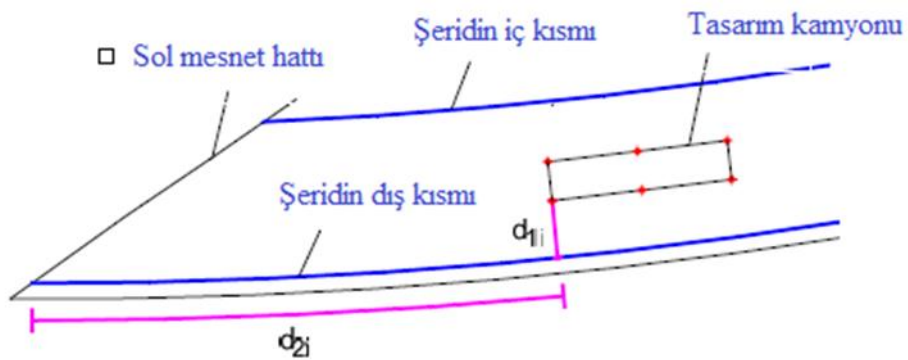


Şekil 2.14 Dayanım IV Yük Kombinasyonu altında inşa edilebilirlik limit durumunun kontrolü için belirlenen kritik kesitler (1.5 DC1).



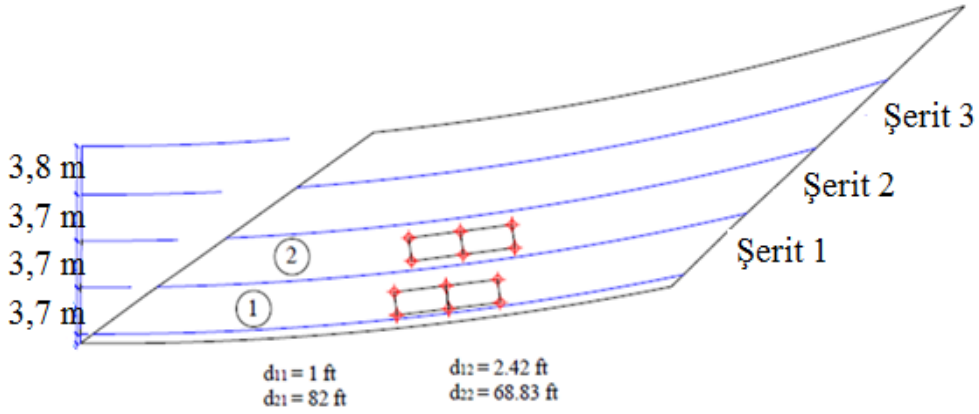
Şekil 2.15 Kritik kesit olarak kabul edilen bölümler (STRENGTH I yük seviyesi)

Tasarım kamyonunun şeritteki yerinin temsili olarak uygulanacağı anahtar parametreler Şekil 2.16' da gösterilmiştir. Şeridin dış kenarı ve tasarım kamyonunun tekerlekleri arasında kalan mesafeye  $d_{1i}$  denilmiştir. İlk tekerlek şeridin solunda kalan ve sistemin dışına doğru olarak belirlenmiştir. Sol mesnetten dış şeride kadar ölçülen mesafe ise  $d_{2i}$  olarak adlandırılan ve ilk tekerleğin radyal mesafesine verilen isimdir.

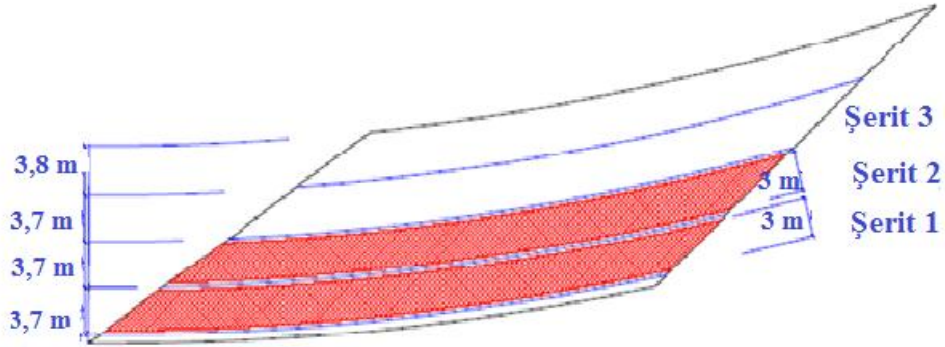


Şekil 2.16 Tasarım taşıt yüklemesi uygulanacak yerin tanımlanmasındaki anahtar parametreler

Şekil 2.17 ve Şekil 2.18 Dayanım I yük kombinasyonu altında, G1 üzerinde G1-S1 kesitinde; maksimum dayanım kontrollerini veren araç tasarım yük kombinasyonu uygulamasını göstermektedir. Şekil 2.19'te; Dayanım I yük kombinasyonu altında G6 kirişi boyunca G6-S1 kesitinde maksimum dayanım kontrolünü veren araç tasarım yük kombinasyonu uygulanması gösterilmiştir.



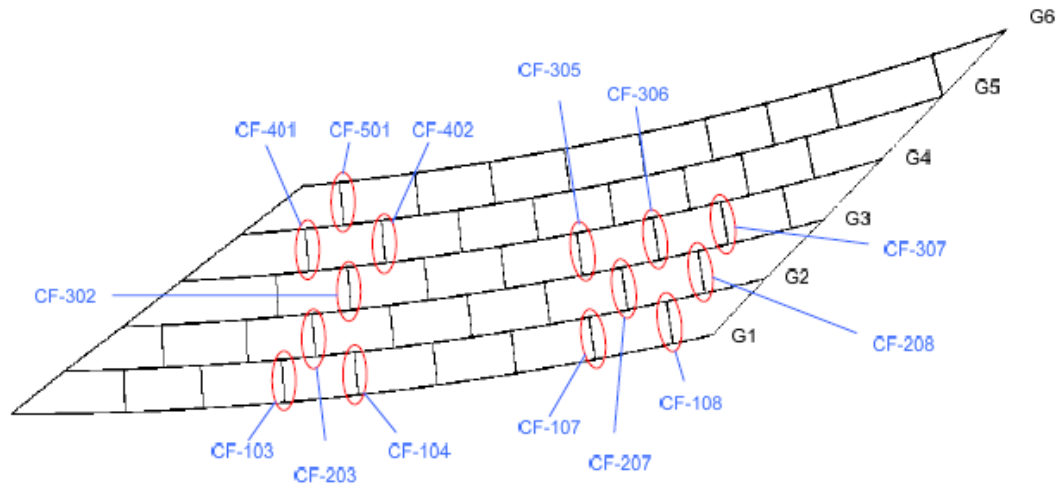
Şekil 2.17 G1 at G1-S1 kesitinde kiritik tasarım taşıt yüklemesinin maksimum dayanım kontrolü



Şekil 2.18 G1 at G1-S1 kesitinde kiritik tasarım şerit yüklemesinin elde edilmesi







Şekil 2.20 Çapraz en kirişler ve gösterimleri

### ➤ Elastik analiz sonuçları

G1 ve G6 kritik kesitleri için eğilme değerlerinin maksimumlarını içeren hareketli yük sonuçları verilmiştir. Buna ek olarak; maksimum eğilme tepkilerinin maksimum değerleri G3 kritik kesiti için raporlandırılmıştır. 6 serbestlik dereceli kiriş elemanları kullanılarak ızgara sistem oluşturulmuştur. Çapraz çerçevelerin yükleri de modelde noktasal yük olarak uygulanmıştır. Modeller Dayanım I yük kombinasyonu altında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar karşılaştırılırken, G1-S1 'deki maksimum eğilme etkilerinin oluşturulması için kritik hareketli yük konumları kullanılmıştır.

Bu sonlu elemanlar analiz çalışmalarının sonuçları; çarpık I kirişli köprüler ve yatay kavisli köprülerin tasarımı için önerilerin sunulması öncesinde ilk çalışmaların sonuçları ile kabul edilmiştir. İkinci dereceden büyütme katsayıları, kompozit olmayan köprünün ölü yükleri altında 3 boyutlu sonlu elemanlar analizlerinden belirlenmiş ve AASHTO büyütme katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Yanal eğilme gerilmelerinin ikinci dereceden büyütme katsayıları, AASHTO büyütme katsayıları tarafından öngörülen büyütme katsayılarına kıyasla, söz konusu köprüde oldukça büyük olduğu bulunmuştur.

Bu durumun köprünün genel burulma deplasmanlarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu etki sadece, köprü sisteminin ikinci dereceden analizinin yapılması sonucu ortaya çıkarılabilmektedir. AASHTO büyütme katsayıları, sadece çapraz bağlanmamış uzunluklar ile çapraz elemanlar arasındaki yerlerin karakteristiklerine dayanmaktadır.

#### ➤ **Elastik analiz ve tasarım**

İkinci dereceden büyütme katsayıları, yapı yükleri ve kompozit olmayan yapının ölü yükleri altında 3D sonlu elemanlar analizinden belirlenerek AASHTO büyütme katsayılarıyla karşılaştırılmıştır. Yanal eğilme gerilmelerinin ikinci derece büyütme katsayılarını, AASHTO büyütme katsayıları tarafından tahmin edilen büyütme katsayılarına kıyasla örnek köprüde oldukça büyük olduğu bulunmuştur.

- Geometrik doğrusal olmama etkilerinin, kompozit olmayan yapının ölü yükleri için oldukça önemli olması sebebiyle, bu yüklemeler için geometrik doğrusal olmayan analizlerin tepkileri ile tasarım kontrollerindeki kompozit yapıdaki yükleme için geometrik doğrusal analiz tepkileri birleştirilmiştir.
- Gerilme ve eğilme moment eşitliklerinin her ikisi de dayanım sınır koşullarının kontrolü için kullanılmıştır. Konu olan köprünün kritik kesitleri için, AASHTO tabanlı eğilme moment eşitlikleri kullanılarak dayanımdaki azalmalar belirlenmiştir. G1-S1 kesiti için dayanımdaki azalmalar %15 olarak belirlenmiştir.
- Farklı hareketli yüklerin yol açtığı maksimum değerlerin kullanılarak karşılaştırılması yapılmış, kesit dayanımlarının kontrollerinde hareketli yükler sebebiyle maksimum eğilme değerlerinin birleştirilmesinin yararları incelenmiştir. İnceleme sonucu; kabul edilen kesit için, farklı hareketli yük pozisyonlarının eğilme değerlerinin her birinin maksimum değerlerini hesaplamanın, hesap fazlalığından başka bir şey olmadığı belirlenmiştir.

- Söz konusu köprüdeki eğilmenin; mesnetlerin çarpıklığından ve çapraz en kirişlerin kullanımından kaynaklandığı belirlenmiştir. Köprüdeki eğilme momentlerinde, yanal kavisliliğin etkilerinin daha çok hakim olduğu tahmin edilmiştir.
- Sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile 3D ızgara modelleri arasındaki kiriş tepkileri varyasyonunun oldukça küçük olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte; çapraz çerçeve eleman kuvvetlerinin bu iki model arasındaki önemli farklılıkları gösterilmiştir.

#### ➤ Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi

- Şekil değiştirmeler köprü genişliği boyunca doğrusal bir şekilde yaklaşık olarak değişmiştir.
- Çapraz çerçeve elemanlar yatay kavisli köprülerdeki kritik yükleri taşıyan elemanlardır. Söz konusu köprüdeki kirişlerin elastikiyetsizliği sebebiyle, çapraz çerçeve elemanlardaki aksenal kuvvetlerin %13,7 olarak artmış olduğu belirlenmiştir. 3D ızgara modelindeki aksenal kuvvet tahminlerinin, 3D sonlu elemanlar analiz modellerinin tahmininden %21.5 daha büyük olduğu belirlenmiştir.
- AASHTO 2007 hükümlerinin klasik elastik analiz ve tasarım sınırlarını verdiği görülmüştür.
- Köprü aşamalı olarak çapraz çerçevlendirilmiştir. Kademeli Çapraz çerçevelerin; çapraz çerçeve kuvvetlerini azaltıcı ve başlık yanal eğilme gerilmelerini arttırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.
- Çapraz çerçeveler, köprünün ana yük transfer elemanlarıdır. Elastik 3D sonlu elemanlar analiz modeli; 3D ızgara modeline kıyasla kritik çapraz çubuk elemanlarda aksenal kuvvetlerin daha küçük olduğunu tahmin etmiştir.

### **2.3.5 Woo Seok Kim, Jeffrey A. Laman ve Daniel G. Linzell tarafından yapılan yatay kavisli köprülerin hareketli yük moment dağılımı üzerine bir çalışma:**

Bu çalışma, eğri kiriş maksimum toplam eğilme momentleri üzerindeki önemli parametrelerin etkisini belirlemek, kiriş dağıtım faktörleri arasında ilişki kurmak için yapılmıştır. Üç sayısal model kullanılarak analiz çalışması oluşturulmuş ve toplam 81 adet iki şeritli kavisli köprü HL 93 hareketli yüklemesi altında analiz edilmiştir.

Köprü tasarlamak için maksimum kiriş momentinin tahmin edilebilir olması gerekmektedir. Bu sebeple tasarımı devam ettirebilmek ya da yaklaşık bir analiz yapmak için bireysel kirişlere araç yükünü dağıtan yaklaşık katsayı kullanımı gibi basit bir yöntem bulunmuştur. Kiriş dağıtım faktörü (KDF), AASHTO LRFD 2006' da düz bir kiriş için, kiriş aralığının, açıklık uzunluğunun, döşeme kalınlığının ve kiriş stabilitesinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Daha önceki araştırmalarda, mümkün olandan daha az doğruluk ile başlık normal gerilmeleri öngörülmekteydi. Bu nedenle; bu çalışmada mevcut köprü geometrik parametreleri için anahtar olan ve yatay eğimli I kiriş köprüler için yaklaşık KDF denklemlerini pratikçe geliştirmek için çalışma yapılmıştır.

Kapsamlı bilgi edinilen ve saha testleri yapılan köprünün özellikle geometrisi sınırlı olduğundan ve geliştirilmiş tahmin modelleri gerektirdiğinden mevcut araştırma mevcut deney verileri kullanılarak doğrulanarak sayısal bir yaklaşım izlenmiştir. Çalışmada, sayısal analiz sayısını azaltmak için, çalışmanın sınırlı bağımsız parametreler içerdiği kabul edilmiş, sabit köprü kesiti baz alınmıştır. Seçilen köprü kesiti iki trafik şeritli, bir beton döşeme ile desteklenen basit mesnetli, dört kavisli kiriş çelik üstyapı dan oluşmaktadır. Kesit döşemesinde deyer bulunmamaktadır ve HL 93 yüklemesi AASHTOO 2006' dan alınmıştır.

Çalışmada, incelenen tasarım parametrelerinin moment dağılımını etkilemesi beklenmiştir. Sürekli beton korkuluklar, beton döşemenin kalınlığı, kiriş gövde derinliği ve başlık genişliği etkisi değerlendirilmiş radyal dağılım üzerinde çok az ya da önemsiz bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Bu sebeple, bu parametreler söz konusu

çalışmada kapsam dışı bırakılmıştır. Mevcut araştırma tarafından belirlenen temel parametreler; köprü yarıçapı, kiriş aralığı, köprü açıklık uzunluğu ve çapraz çerçeve aralığıdır. Seçilen dört temel parametre aralığı Çizelge 2.1 ' de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Anahtar parametreler

<b>Anahtar parametreler</b>	m					
Parametre aralıkları						
Yarıçaplar	61	107	229	200	350	750
Kiriş açıklıkları	3,05	3,35	3,66	10	11	12
Açıklık uzunluğu	22	33	44	72	108	144
Çapraz eleman açıklığı	2,2	3,7	5,5	7,2	12	18

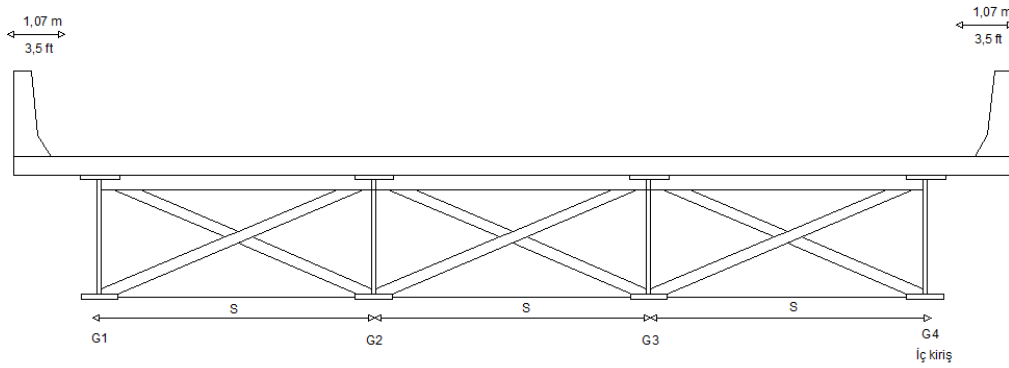
Buna ek olarak, Xtip çapraz çerçeve ve sabit beton döşemenin çıkıntı uzunluğu her bir 81 durum için modellenmiştir. Çalışmanın hedefinde; parametrik ve istatistiksel yöntemler kullanarak anahtar parametreler ile dağıtım faktörleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak ve kavisli köprü canlı yük moment dağılımını tahmin etmek için yeni ve yaklaşık dağıtım faktörleri geliştirmek yer almaktadır.

Sayısal modelleme metodolojisi kurulumu parametrik çalışmadan önce başlatılmıştır. 3 boyutlu sayısal modeller, standartlar ve yazılım paketleri kullanılarak oluşturulmuştur. Modellemede; kiriş başlıklarında çubuk elemanlar, kiriş başlıklarında kabuk elemanlar ve yapının nümerik modeli boyunca katı cisim elemanları kullanılmıştır. Bütün nümerik modeller geometrik özellikler, materyal özellikler ve normal yapılarda gözlenen koşulları içermektedir.

McElwain deneysel türetilmiş canlı yük dağıtım faktörlerini elde etmek için kıvrımlı, çelik I kiriş köprülerin saha testlerini gerçekleştirmiştir. McElwain tarafından test edilmek üzere tek açıklıklı, kiriş açıklıkları 2,44 m olan dört kirişten oluşan üç köprü seçilmiştir. Bu köprülerin seçilme nedeni; benzersiz karakteristik özellikleri ile tipik kavisli kiriş köprüler ve benzer yapı eşleşmesidir. En dıştaki kiriş; 2,9 m düz

uzunlukta, 75,9 m yarıçapla 21,9 m kavisli uzunluğa sahiptir. Köprü döşemesi 21,6 cm ve çapraz çubuk eleman aralığı 5,2 m olarak teşkil edilmiştir. Test köprülerinin tüm geometrik şartları, gözlenen tepki ve sayısal tepki arasında doğrudan karşılaştırma analizi, çalışmanın tüm seviyeleri boyunca modellenmiştir. Buna ek olarak, saha testleri için kullanılan aks yükleri ve aracın boyutları modellerde yeniden üretildi.

Parametrik çalışmaları başlatmak için 81 tane model DESCUS ticari programı ve AASHTOO LRFD 2003 Şartnamesi kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 2.21 Çalışılan köprü'nün en kesiti

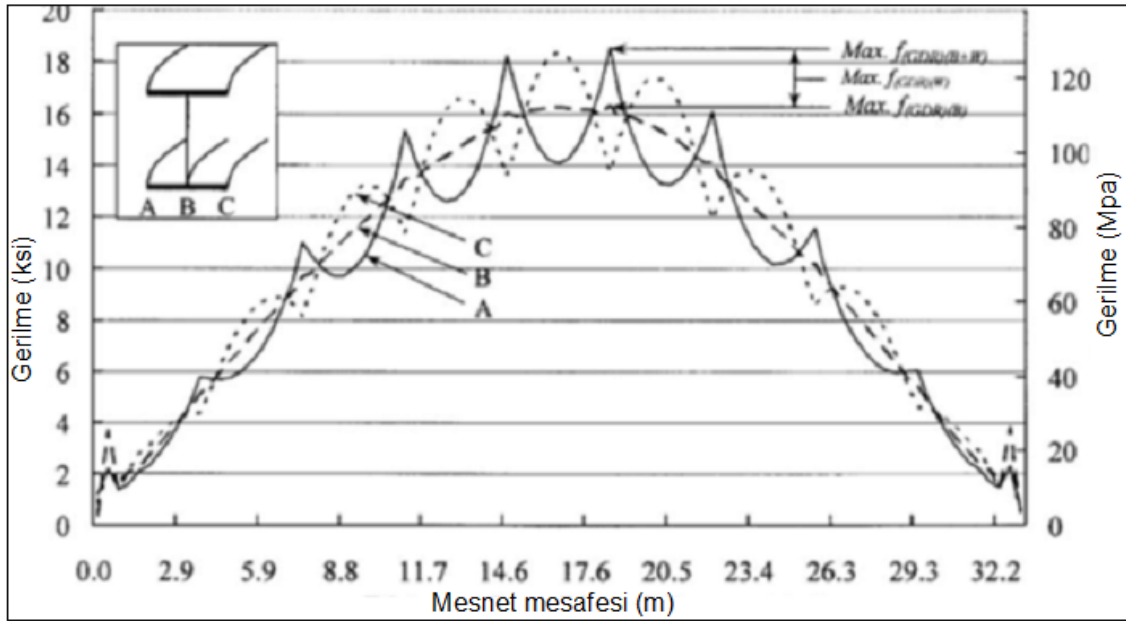
Bu çalışmada üretilen tipik köprü kesiti ve planı şekilde gösterilmiştir. 81 köprü için sınırlı koşullar sebebiyle aynı kiriş kesiti 4 kirişin tümünde aynı kullanılmıştır. Impact faktörü ve kombinasyonlar AASHTOO şartnamesinden temin edilmiştir.

Parametrik çalışmaya; yarıçap, açıklık uzunluğu, kiriş aralığı ve çapraz çubuk aralığı dahil olup, parapetler, kiriş başlık genişliği, gövde derinliği ve döşeme kalınlığı gibi diğer parametrelerin etkileri de araştırılmıştır. Ancak bu parametreler önemsiz bulunarak dağıtım faktörlerinden çıkarılmıştır (Kim, 2004).

Dağıtım faktörleri üzerinde eğrilik yarıçapının etkisini araştırmak için; küçük, orta ve büyük yarıçaplar seçilmiştir. AASHTO 1993 Şartnamesinde; farklı çapraz frame aralıklarına karşılık dört aralık önerilmiştir.

- 1- 61 m'den küçük yarıçaplar
- 2- 61- 152 m arası yarıçaplar
- 3- 152-305 m arası yarıçaplar
- 4- 305 m' den büyük yarıçaplar

61 m' den küçük yarıçaplar pratik kavisli karayolu köprülerinde nadiren kullanılmakla beraber, dış kirişli yarıçapı 61 m olarak şiddetli eğrilik etkisini değerlendirmek üzere seçilmiştir. 305 m' yi aşan yarıçaplar AASHTO 2003'e göre düz kirişli köprü davranışına yaklaşıldığını açıkladığından bu çapın üzerindeki yarıçaplar çalışma dışı bırakılmıştır. Çalışmada; AASHTO 1993' te bulunan orta ve küçük dış kiriş yarıçap değeri: 61 m, 107 m ve 229 m alınarak kullanılmıştır. Pratik tek açıklıklı kavisli çelik I-kiriş köprülerin açıklığı uzunluğu aralığı genelde 15m ila 60 m arasında değiştiğinden, bu çalışmada 22 m, 33 m ve 44 m ( 72 ft, 108 ft, ve 144 ft) kabul edilen açıklık uzunlukları kullanılmıştır. Eşit açıklıklı çapraz çerçeveler, 2.2, 3.7 ve 5.5 m (7.2, 12 ve 18 ft) aralıkları olarak seçilmiştir. İki şeritli, kavisli I-kiriş köprüler radyal kiriş aralığı 3.05, 3.35 ve 3.66 m ( 10, 11 ve 12 ft) olarak alınarak değerlendirilmiştir. Modellenen kavisli köprülerin, seçilen hareketli yük modeline maksimum tepkisini belirlemek için, kritik kamyon pozisyonları tespit edilmiştir. Bu çalışmada, iki ve üç AASHTO HS25 kamyon ve şerit yüklerinin köprü genişliği dayalı sayısal model uygulanmıştır. HL-93 yüklemeleri sistematik dış kirişin 305 mm uzağına yerleştirilmiştir. Maksimum kiriş tepkileri için kamyon pozisyonlarının belirlenmesi, en dış kirişin başlığındaki eğilme ve çarpılma normal gerilmelerini oluşturmuştur. Çalışmada, büyük yarıçaplı köprüdeki kritik kamyon pozisyonlarının kısa yarıçaplı köprününkünden farklı olmadığı görülmüştür.



Şekil 2.22 Teğetsel normal gerilme değişimi, Kiriş 1, 41. analiz durumu

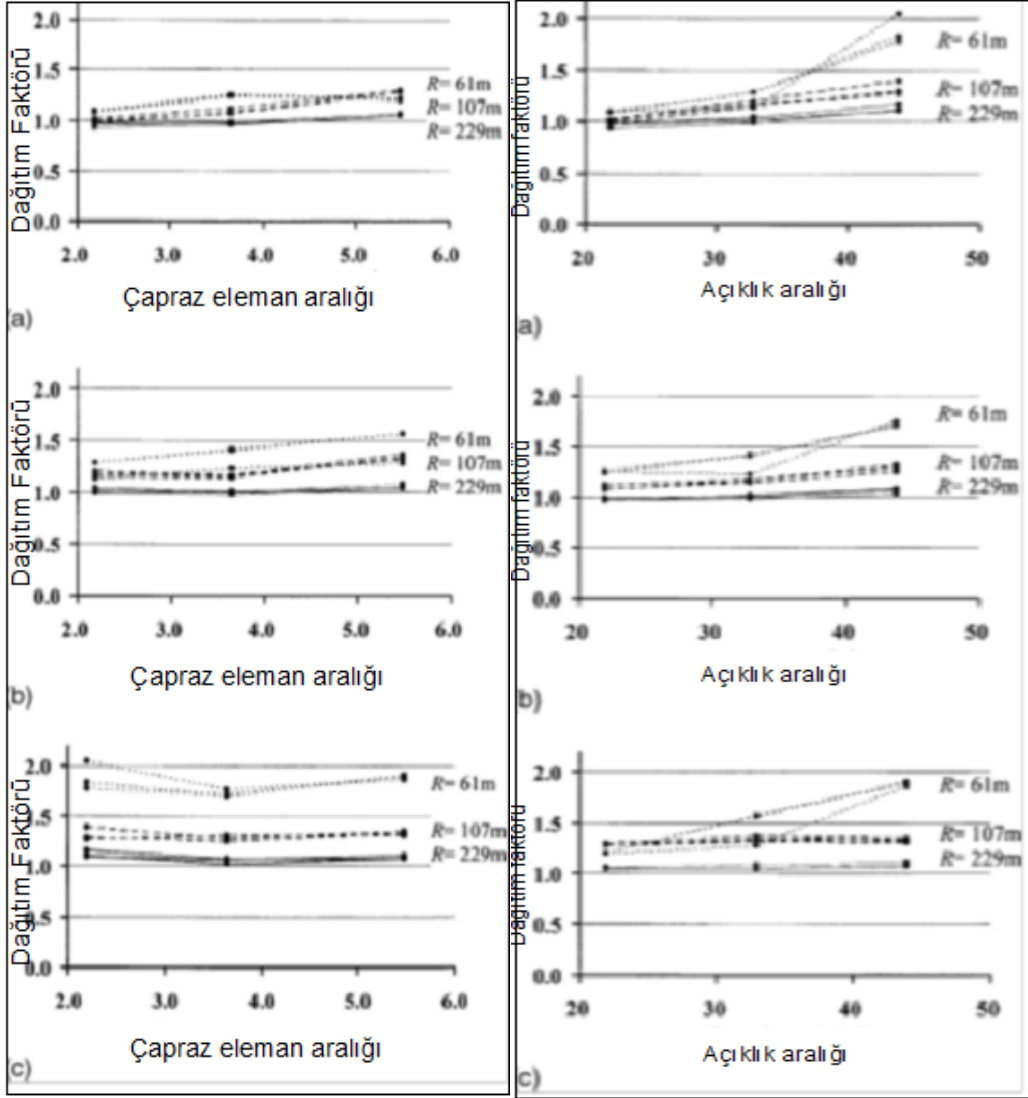
### ➤ Sonuçlar

Eğilme gerilmelerinin ve şekil değiştirmelerin her ikisi de maksimum normal gerilmelerini bulabilmek için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kiriş maksimum toplam eğilme momenti ve eğilme gerilmeleri 81 deneyin dış kirişi için Şekil 2.22’ de gösterilmiştir. Buruşma momentinin, toplam eğilme momenti üzerindeki büyük etkisi görülmüştür. Buruşma gerilmeleri dahil kiriş toplam momentleri, dikey eğilme momentleri tarafından %2-29 un üzerinde arttırılmış ve bu etkinin yarıçap azaldıkça ve açıklık arttıkça daha önemli hale geldiği görülmüştür. Beklenen ise, tüm açıklık uzunlukları ve yarıçaplar için; çapraz çerçeve aralığı arttıkça, buruşma normal gerilmelerin artmasıdır. Şekil 2.23 ve 2.25; radyal moment dağılımı üzerindeki dört anahtar parametrenin her birinin etkisini gösterilmiştir.

Çapraz çerçeve aralık uzunluğu arttıkça sayısal analizlerden de elde edilen dağıtım faktörleri genellikle artmaktadır. Buruşma normal gerilme değişimleri bu etkiden öncelikle sorumludur. Şekil 2.23’ ten de görüleceği gibi, kabul edilen kiriş açıklığı, açıklık uzunluğu ile karşılaştırıldığında dağıtım faktörleri üzerinde güçlü bir



etkiye sahip değildir. Ancak, daha geniş bir kiriş aralığı üzerinde önemli ölçüde radyal moment dağılımını etkileyecek ve nihai dağıtım faktörlerinin denklemlerde parametre olarak muhafaza edilmesi öngörülmektedir. ( AASHTO Guide 1993, Brockenbrough 1986, Schelling et al. 1989; Sennah ve Kennedy 1999). Şekil 2.23' teki veriler; dağıtım faktörlerinin, yarıçap arttıkça en belirgin olarak büyük açıklıklarda azaldığını göstermektedir. Sayısal analizlerden türetilen Şekil 2.24' te sunulan veriler göstermektedir ki; dağıtım faktörlerinde özellikler kısa yarıçaplarda, açıklık uzunluğunun kuvvetli etkisi vardır. Dağıtım faktörleri, 60 m yarıçaptaki kavislerde çapraz çerçeve açıklık aralığını %38-100 arasında arttırdığı belirlenmiştir. Dağıtım faktörleri, yarıçapı arttıkça azalır ve bu parametre dağıtım faktörlerindeki diğer tüm parametrelerin etkisini etkimiştir. Dağıtım faktörlerinde açıklık uzunluğunun etkisi, özellikle buruşma gerilmesinin bir sonucu olarak, yarıçap uzunluğu tarafından etkilenmektedir. Şekil 2.24 a-c'de gözlemlenen; 229 m yarıçapta açıklığın etkileri çok küçüktür. Şekil 2.23, Şekil 2.24, Şekil 2.25 ve Şekil 2.26 Woo Seok Kim, Jeffrey A. Laman ve Daniel G. Linzell tarafından bu çalışma sonucunda elde edilmiştir.

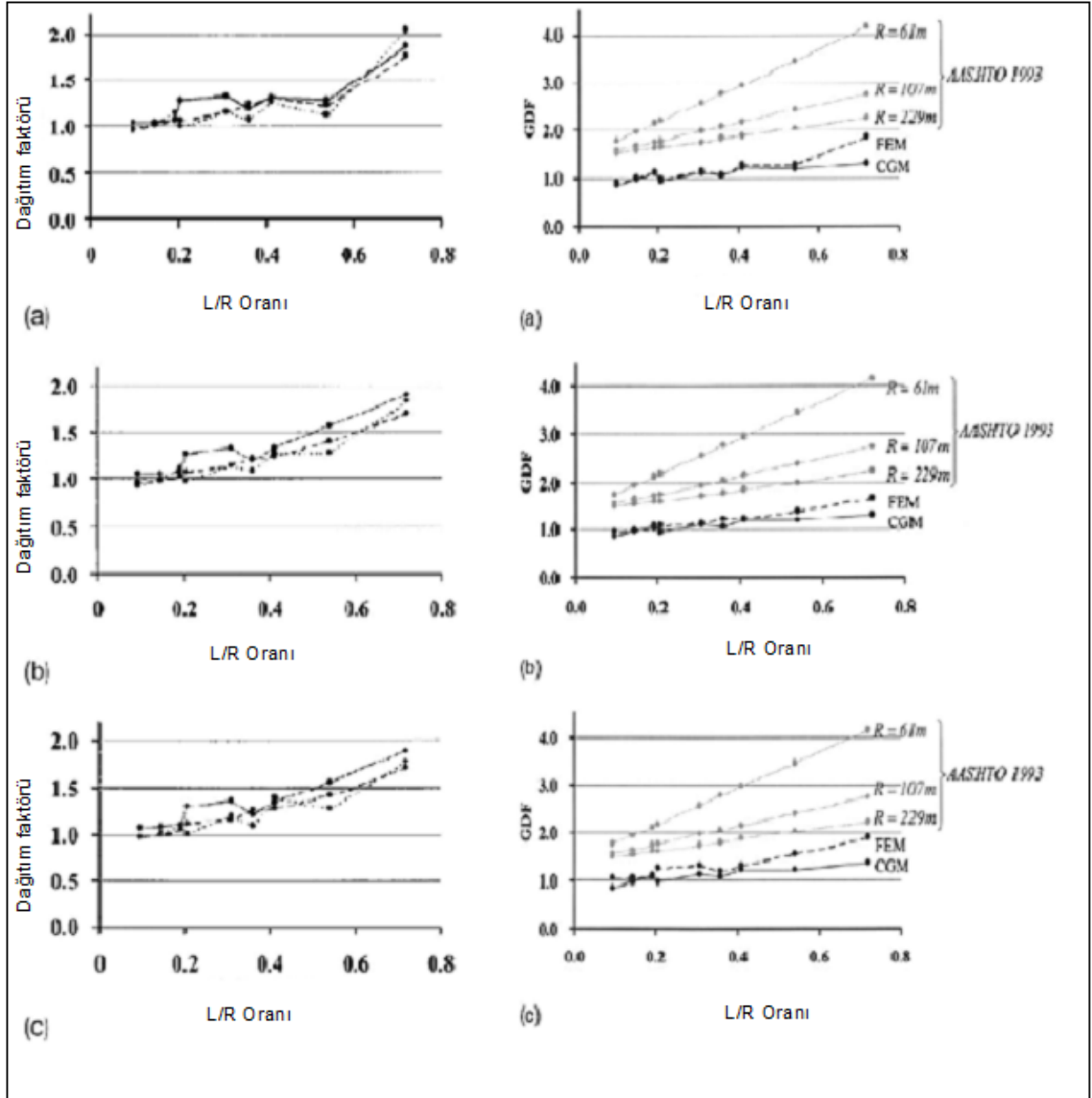


Şekil 2.23 Çapraz çubuk aralığının ve yarıçapın dağılım Faktörleri Üzerindeki etkisi  $S=3,1, 3,4, \text{ ve } 3,7 \text{ m}$  Sırasıyla  $L(a) = 22 \text{ m}, (b) 33 \text{ m}, (c) 44 \text{ m}$

Şekil 2.24 Açıklık uzunluğu ve yarıçapın dağılım faktörleri üzerindeki etkisi  $S=3,1, 3,4, \text{ ve } 3,7 \text{ m}$   $X=(a) 2,2 \text{ m} (b) 3,7 \text{ m} \text{ ve } (c)=5,5 \text{ m}$

Kavisli I-kiriş köprülerin moment dağılımını ve canlı yük dağıtım faktörlerini tahmin etmek için bir sayısal parametrik çalışma yapılmış ve dağıtım faktörleri modeli kullanılarak araştırılmıştır, istatistiksel yöntemler kullanılarak geliştirilmiştir. Aşağıdaki sonuçlar bu araştırmanın sonucunda elde edilmiştir. Sayısal modeller, gözlemlenen alan davranışının temelinde değerlendirilmiş ve sayısal modeller canlı yükler altında kavisli I kirişli köprü davranışına benzetim kurmak için kullanılmıştır.

Kavisli I kirişli köprülerde yük dağılımını etkileyen en önemli parametrelerin köprü yarıçapı, açıklık uzunluğu, kiriş aralığı ve çapraz çerçeve aralığı olduğu belirlenmiştir. Yarıçap, açıklık uzunluğu ve çapraz çerçeve aralığı maksimum eğilme warping ve dağıtım faktörleriyle güçlü bir şekilde ilişkili olduğu açıklanmıştır. Parapet, tabliye kalınlığı, başlık kalınlığı ve kiriş gövdesinin derinliği; ana parametrelerle karşılaştırıldığında, dağıtım faktörleri üzerinde küçük ve göreceli olarak önemsiz bir etkiye sahiptir.



Şekil 2.25 Dağıtım faktörleri üzerinde L/R oranı  
S=(a) 3.05 m (b) 3.35 m (c) 3.7 m

Şekil 2.26 Dağıtım faktörleri kıyaslamalar S=3,4 m  
X=2,2 m (b) 3,7 m ve (c) 5,5 m

Dağıtım faktörlerinde eğilme etkisi, açıklık arttıkça artar, dağıtım faktörleri üzerinde warping etkisi ise, yarıçap azaldıkça artar.  $R=61$  m kısa yarıçap için dağıtım faktörleri üzerinde warping etkisi, dış kirişin önemli ölçüde eğilmeye verdiği cevaba göre artış göstermiştir. Bununla birlikte; warping gerilmesinin, eğilme gerilmesine oranının yüzde 14 olması, 229 m yarıçap için nispeten küçük bulunmuştur. Çarpılma dağıtım faktörleri üzerindeki en baskın parametre çapraz çerçeve aralığı iken eğilme dağıtım faktörleri üzerindeki etkin parametre açıklık uzunluğudur. 107-229 m yarıçaplı köprülerde önerilen denklemler, doğru tahminlerle sonuçlandırılmıştır.

### **2.3.6 Saeed Eghtedar Doust tarafından yapılan eğri köprü sistemlerinde integral kavramlar üzerine yapılan çalışma**

Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk integral köprü 1938 yılında inşa edilmiştir. O zamandan günümüze integral köprüler ülke genelinde yayılma göstermiştir. Integral köprü inşası Avrupa, Avustralya, Yeni Zelanda, Japonya, Güney Kore gibi ülkelerde de devam etmektedir (S. E. Doust, 2011, Extending Integral Concepts to Curved Bridge Systems).

İlk yıllarda integral köprü sistemleri beton üst yapıya sahip köprüler için kullanılmıştır. Bu köprülerin uzunlukları 15-30 m arasında değişmektedir. 1960' lara kadar kavisli köprülerin davranışını anlamak üzere büyük bir çalışma projesi yapılmamıştır (S. E. Doust, 2011, Extending Integral Concepts to Curved Bridge Systems). 1960' larda, yatay kavisli köprüler için minimal tasarım ve inşaatlar herhangi bir kılavuz yardımı olmadan yapılmış ve bu inşaatlarda kavisli çelik kirişler kullanılmıştır (D. Linzell, D. Hall, D. White, 2004, ASCE). 1960' lardan sonra uzunluğu 90 m 'yi bulan 30 derece çarpıklığa sahip çelik köprüler tanınmış ve inşa edilmeye başlanmasıyla bazı eyaletlerde mükemmel performanslar elde edilmiştir (S. E. Doust, 2011, Extending Integral Concepts to Curved Bridge Systems).

Kavisli köprü yapım ihtiyacının zamanla artması üzerine köprüler için bir şartname geliştirilmesinin yolu açılmıştır. İlk resmi girişim Üniversite araştırma

ekipleri tarafından AASTHO ara revizyonları yoluyla ilk yayım tarihinden sonra kılavuz birkaç kez revize edilmiş ve 1993 yılında teknik (Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık Yetkilileri Derneği, 1993) ikinci baskısı yayınlanmıştır. Kılavuzdaki eksiklikler sebebiyle köprü yapımında belirsizlikler yaşanmıştır. Bu nedenle daha fazla araştırma yapmak için öneriler geliştirilmiştir.

İntegral köprü ayak sistemleri ve kavisli köprüler için uygulamadaki davranışlar incelenmiştir. İlk olarak, tipik köprü ayak gerilmeleri, yazılım paketi Abaqus kullanılarak doğrusal olmayan sonlu eleman analizi ile incelenmiştir. Sonuçlar, köprü ayaklarının detayları için tasarım önerileri sunulmuştur. Çelik ve beton köprü sistemleri ayrı ayrı incelenmiştir.

Çalışılan köprü sistemleri, çelik H kazıklarla desteklenen integral ayaklardan ve kompozit I kiriş üst yapıdan oluşmaktadır. Farklı köprü uzunlukları ve yarıçapları için sonlu elemanlar analizi ile çeşitli yüklerin etkisinde bir dizi çalışma yürütülmüştür. Bu köprüler, köprü ayak kazık gerilmelerinin tasarımı açısından kritik önem arz etmektedir. Sonuçlarda göstermektedir ki; yatay kavisliliğin bu gerilimlerin etkisini azalttığını göstermiştir.

Çalışmada köprü hareketi de incelenmiş ve kavisli köprüler deplasmanlarını bulmak için bir prosedür sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada farklı mesnet tipleri de araştırılmış ve diğer mesnet tiplerine göre elastomer mesnetlerin üstün yapısal performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Yol ve otoyol tasarımı tasarımında optimum geçişler için kavisli yollar üzerine istihdam çağruları yapılmıştır. Bu optimize geometrik tasarımlar kavisli köprü ihtiyacını doğurmuştur. İntegral köprü yapısı ise üstün performansı ile daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Mevcut çalışmada; köprü iki farklı türde incelenmektedir.

- Rijit iskele entegre ayaklı çelik I kirişli köprüler
- Esnek iskeleli entegre ayaklı beton köprüler

Bu çalışmada yolun eğrilik yarıçapı, aşağıdaki denklem kullanılarak tasarım hızı ve sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olarak bulunmuştur.

$$R_{min} = \frac{V^2}{15(e + f)} \quad (2.1)$$

Burada; R ft cinsinden yarıçap, V tasarım hızı (mil/h), e süperelevasyon sayısı, f sürtünme katsayısıdır.

Çalışmada çelik köprü yarıçapı 300 m, beton köprüde 200m çalışılmış ve düz köprülere yaklaşım için sonsuz büyük yarıçaplarda incelenmiştir.

Köprü davranışı üzerinde yarıçap ve uzunluğun etkisi göstermiştir ki; köprü uzunluğu arttıkça köprü ayaklarındaki kazıklara gelen iç kuvvetlerde artmıştır. Yüksek kavisli köprülerde; örneğin 60 m yarıçaplı köprülerde eğilme momentleri 90 m'den daha uzun hale getirildikçe momentler sabit hale gelmektedir. Ancak uzunluk arttıkça, momentler pike ulaştıktan sonra azalmaya başlamıştır. Bu sebeple; genleşme nedeniyle eğilme momentlerinin değeri, çok eğri ve uzun köprülerde, eşdeğer düz köprülerden daha küçük olmuştur. Pozitif ve negatif sıcaklık farkı sebebiyle eğilme momentleri, farklı uzunluk veya farklı yarıçap için yaklaşık olarak eşittir. Yarıçapı 300 m olan köprülerde, momentler düz köprülerle hemen hemen aynıdır. Çelik kazıklara nazaran beton kazıklar, daha büyük ve rijittir.

### 2.3.7 Diğer Çalışmalar

E.Kalaycı tarafından 2010 Massachusetts Üniversitesi' nde verilen yüksek lisans tezinde Vermont Stockbridge köprüsü çalışılmıştır. Bu çalışmada, aynı uzunluk ve farklı eğrilik derecelerinde 5 modelde çalışma yapılmıştır. Bu 5 model üzerinde sadece ölü yük ve sıcaklık yüklemelerine göre yapılmıştır. Sonlu eleman modelleri, köprü deplasmanları ve kazık üst yapı momentleri için oluşturulmuştur. Hatalara neden

olabileceğinden basitleştirilmiş modeller kullanmaya çalışılmış ancak NCHRP Raporu 563 esasları basitleştirilmiş üç boyutlu sonlu eleman analizlerinin kabul edilemez olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada diğer köprü etkenleri olarak; uzun açıklık, yük kuvvetleri olarak ölü, canlı ve sıcaklık dışında çeşitli yüklerin etkileri dikkate alınmamıştır. Bu yüklerin dışında toprak basıncı, merkezkaç kuvveti, frenleme kuvveti, rüzgâr yükü ve beton rötreleri etkilerinde incelenmesi gerekmektedir (S. E. Doust, 2011).

## BÖLÜM 3

### AASHTO ŞARTNAMESİ'NE GÖRE YÜKLER VE KAVİSLİ KÖPRÜ

#### TASARIMI

Yapılar çeşitli yük ve kuvvetleri taşımak üzere tasarlanmalıdır. Genel olarak yük grupları ikiye ayrılarak incelenmiştir. Bunlar;

#### 3.1 A Grubu Yükler

Köprüye gelen ana yüklerin sıralandığı ve her köprüde hesaplanması gereken yük grubudur.

##### 3.1.1 Zati yükler

Yapının her bir kısmının, yol, kaldırımlar, kanallar, kablolar, korkuluklar, üst yapı sistemleri ve diğer kamu yararına olan servisleri içeren tüm yapı ağırlığından oluşmaktadır.

Yapıda betonun aşınmasının beklenmediği yerlerde trafik direkt olarak beton tarafından taşınabilir. Arzu edilirse lastikler üzerinde zincir kullanma veya kar lastiklerinin kullanılmasının tahmin edildiği yerlerde aşınma tabakası için ¼ inch veya daha fazlası beton eklenebilir. Ölü yük hesaplanırken kullanılacak birim ağırlıklar Çizelge 3.1.'de verilmiştir.



Çizelge 3.1 Malzeme birim ağırlıkları

Malzeme	Hesap Ağırlığı	
Çelik	78,500 kN/m <sup>3</sup>	( 7850 kg/m <sup>3</sup> )
Demir döküm	72,500 kN/m <sup>3</sup>	( 7250 kg/m <sup>3</sup> )
Kurşun	114,000 kN/m <sup>3</sup>	(11400 kg/m <sup>3</sup> )
Alüminyum alaşımları	28,000 kN/m <sup>3</sup>	( 2800 kg/m <sup>3</sup> )
Bakır	89,000 kN/m <sup>3</sup>	( 8900 kg/m <sup>3</sup> )
Bronz	85,000 kN/m <sup>3</sup>	( 8500 kg/m <sup>3</sup> )
Pirinç	85,000 kN/m <sup>3</sup>	( 8500 kg/m <sup>3</sup> )
Beton	23,000 kN/m <sup>3</sup>	( 2300 kg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>
Betonarme	24, 000 kN/m <sup>3</sup>	( 2400 kg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>
Betonarme (vibre edilmiş)	25,000 kN/m <sup>3</sup>	( 2500 kg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>
Granit, porfirden	28,000 kN/m <sup>3</sup>	( 2800 kg/m <sup>3</sup> )
Kalker taşı, dolamitten	27,000 kN/m <sup>3</sup>	( 2700 kg/m <sup>3</sup> )
Gre, kum taşından	26,000 kN/m <sup>3</sup>	( 2600 kg/m <sup>3</sup> )
İğne yapraklı ağaçlar	6 500 kN/m <sup>3</sup>	( 650 kg/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
Yapraklı ağaçlar	8 500 kN/m <sup>3</sup>	( 850 kg/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
Kontraplak (1 cm kalınlık için)	0,100 kN/m <sup>2</sup>	( 10 kg/m <sup>2</sup> )
Silindirilenmiş makadam veya çakıl	16,000 kN/m <sup>3</sup>	( 1600 kg/m <sup>3</sup> )
Asfalt tabaka (1 cm kalınlık için)	2,2 Ton/m <sup>3</sup>	( 2200 kg/m <sup>3</sup> )

### 3.1.2 Hareketli yükler

Taşıt, araba ve yaya yüklerinin ağırlıklarından oluşan yüklerdir.

### 3.1.3 Taşıt yükleri

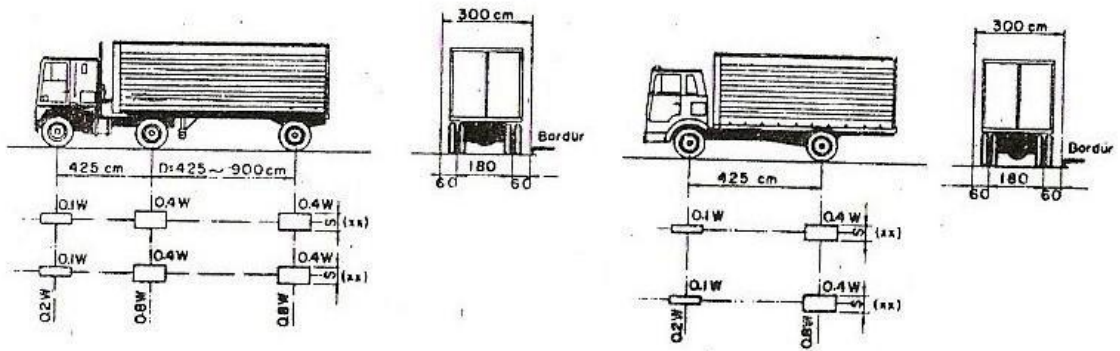
Yapıların üzerinden geçen “Standart Kamyon” lardan ya da standart kamyon koşullarına eşdeğer olan “Şerit Yükler” inden oluşur. Yük sınıfları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Yük sınıfını belirten simgelerden H iki dingilli bir kamyon ya da dengi bir şerit, S ise ona bağlı bir yarım treylere denk gelmektedir. H harfinden sonra gelen rakam kamyonun iki dingilinden gelen W ağırlığını, S harfinden sonra gelen rakam ise

yarım treylerin tek dingilinden gelen brüt ağırlığı vermektedir. D değişken dingil aralığı, kullanılmakta olan yarım treylerli kamyonların dingil aralıklarına daha yakından uyabilmek gayesi ile kabul edilmiştir. En büyük negatif moment elde etmek üzere ağır dingil yüklerinin komşu açıklıklara en elverişsiz şekilde yerleştirilmesini sağlamak sureti ile de, değişken dingil aralığı, sürekli kirişler için de uygun bir yüklemedir.

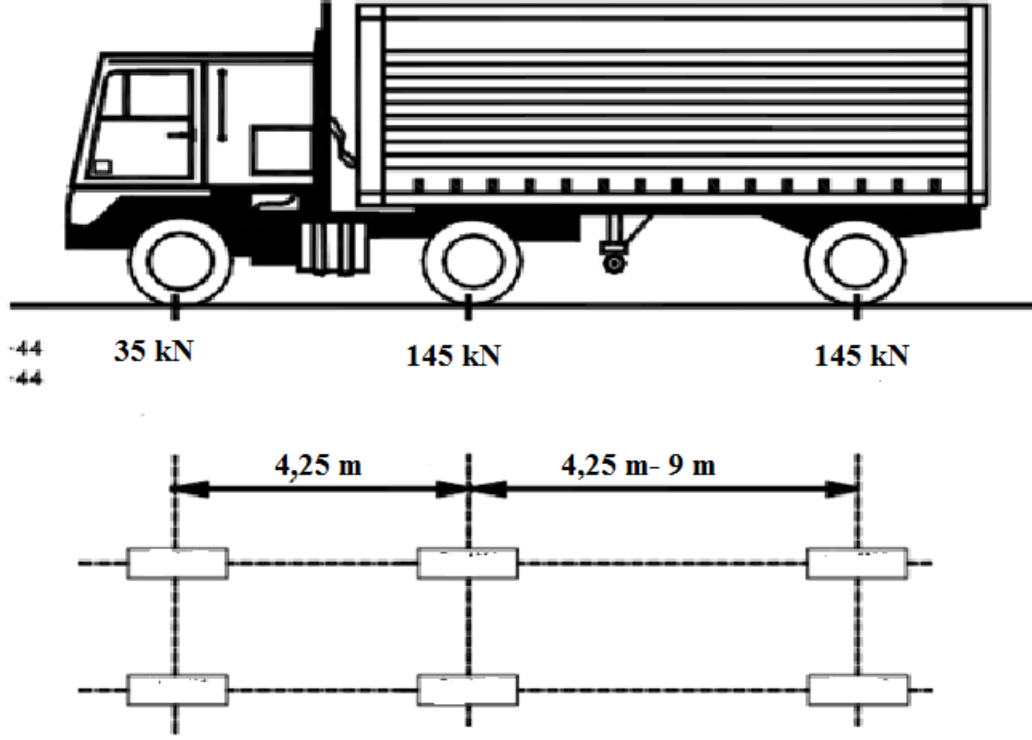
Karayolları yüklemelerinin; H 20, H 15, HS 20 ve HS 15 yüklemesi olmak üzere dört ana sınıfı bulunmaktadır. HS yüklemesi H yüklemesinden daha ağırdır. H 15 yüklemesi, H 20 yüklemesinin % 75'idir. Belirtilenlerden farklı bir yüklemeye ihtiyaç duyuluyorsa standart kamyon ya da denk şerit yüklerinin ağırlıkları orantılı olarak değiştirilerek elde edilen yüklemeler modellemelerde ya da hesaplarda kullanılır.

Çizelge 3.2 Kamyon Yüklemeleri

H 15 Yüklemesi	1944 Basımı.....	H 15-44
H 20 Yüklemesi	1944 Basımı.....	H 20-44
H 15-S 12 Yüklemesi	1944 Basımı.....	HS 15-44
H 20-S 16 Yüklemesi	1944 Basımı.....	HS 20-44



Şekil 3.1 Standart kamyon yükleri



Şekil 3.2 Standart kamyon yükleri A. Standart HS Kamyonları  
 $W$ = İlk iki aks üzerindeki denk H kamyonu için aynı olan birleşik ağırlık  
 $V$ =Değişken aralık 4,25 m- 9 m

### ➤ Minimum yükleme

Eyaletler arası karayollarını destekleyen köprüler ya da ağır kamyon trafiğini taşıyan veya taşıyabilecek diğer karayolları HS 20- 44 yüklemesine göre ya da her dingili 24000 pound ağırlığında olan ve iki dingil arasında 4 foot mesafe bulunan bir diğer alternatif askeri yükleme ifadelerinden daha büyük gerilme oluşturana göre dizayn edilmelidir.

### 3.1.4 Trafik şeritleri

Şerit yüklemesinin veya standart kamyonun 3 m (10 foot)'lük bir genişliği kapladığı varsayılmalıdır. Bu yükler bordürler arasında ölçülmüş tüm platform genişliği boyunca uzanan, 12 foot' luk bir tasarım genişliğindeki trafik şeritleri boyunca yerleştirilmelidir. Tasarım şeritlerinin kesitli kısımları kullanılmamalı ancak 20-24 ft

genişliğindeki platformlar, platform genişliğinin yarısına eşit genişlikteki iki şeride sahip olmalıdır. Trafik şeritleri ve yükler platform üzerinde öyle bir sayı ve konumda yerleştirilmelidir ki göz önüne alınan elemanda maksimum gerilme oluşturulmalıdır. Hesaplarda bu yükleri yerleştirmek üzere kullanılacak eşit genişlikteki trafik şeritlerinin sayısı Çizelge 3.3 verilmiştir.

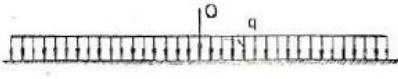
Çizelge 3.3 Yol genişliğine göre trafik şerit sayısı

Yol genişliği (ortada bir röfütj varsa bunun genişliği hariç olmak üzere)	Trafik şeridi sayısı
6.00 m ilâ 9.00 m	2
9.01 m ilâ 13.00m	3
13.01 m ilâ 16.50 m	4

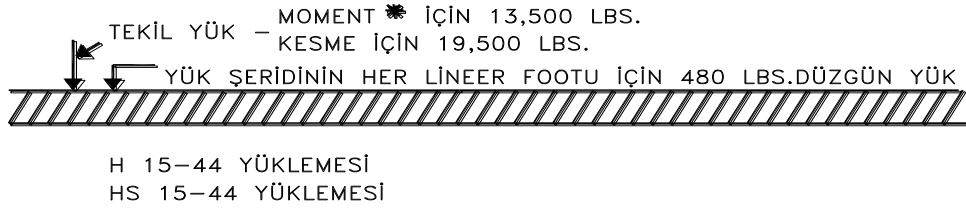
### 3.1.5 Standart kamyonlar ve şerit yükleri

Köprülerin platformları üzerindeki karayolu hareketli yükleri veya kamyon katarlarına denk şerit yüklerini ve standart kamyonları içerir. H ve HS yüklemeleri olarak iki yükleme sistemi sağlanmıştır. Her bir şerit yükü, trafik şeridinin birim boyu başına düzgün yayılı bir q yükü ile bir tek tekil Q yükünden (veya sürekli açıklıklar için iki tekil yükten ibaret olup, bunlar en büyük etki doğuracak şekilde yerleştirilmelidir.

Çizelge 3.4 Yük sınıfları

Şerit Yüktü					
Yük sınıfı		H <sub>30</sub> - S <sub>24</sub>	H <sub>20</sub> - S <sub>16</sub>	H <sub>15</sub> - S <sub>12</sub>	H <sub>10</sub>
W Ağırlığı, KN (ton)		300 ( 30)	200 ( 20)	150 ( 15)	100 (10)
Q KN (ton)	Eğilme etkisi için (x)	135 (13,50)	90 (9,00)	67,5 (6,75)	90 (9,00)
	Kesme etkisi için	195 (19,50)	135 (13,50)	97,5 (9,75)	130 (13,00)
q kN/m (t/m)		15 (1,50)	10 (1,00)	7,5 (0,75)	5 (0,50)
s (cm)		75	50	38	25

Gerek tekil yük gerekse düzgün yayılı yükün, şeridin 3, 00 m genişliğince düzgün olarak yayıldığı varsayılmalıdır. Eğilme momenti ve kesme kuvvetlerinin hesabı için, Çizelge 3.4' de gösterildiği gibi farklı tekil yükler kullanılmalıdır. Bu tekil yüklerden küçük olanı gerilmelerin özellikle eğilmeden, büyük olanı, ise gerilmelerin özellikle kesme kuvvetlerinden doğduğu durumlarda kullanılmalıdır.



Şekil 3.3 Şerit yüklemesi

Kesme ve momentlerin hesabı için Şekil 3.3' te belirtildiği gibi farklı münferit yükler kullanılmalıdır.

### 3.1.6 Dinamik etki katsayısı

Köprülerden geçen taşıtların dinamik etkisini hesaba katmak amacı ile standart kamyon veya şerit yüklerinden elde edilen gerilmeler "dinamik etki (titreşim) katsayısı" ile çarpılırlar. A Grubundaki yapısal elemanlar için karayolu hareketli yükü; dinamik etkiler, titreşim etkileri ve çarpma etkilerini dahil etmek için arttırılabilir. Çarpma etkileri B grubundaki parçalara uygulanmamaktadır. Çarpmanın üst yapıdan alt yapıya aktarılan yüklere dahil edilmesi amaçlanmıştır. Ancak temellere ya da yeraltındaki kazık ve kolonlara aktarılan yüklere dahil edilmemelidir. Bunlar;

### 3.1.6.1 A grubu çarpma dahil edilmesi gereken yapılar

- Rijit çerçevelerin ayaklarını içeren üst yapı
- Yeraltı çizgisi altındaki kısımlar ve temeller dışında (çeşitten bağımsız olarak mesnetli veya mesnetsiz) kazıklar
- Beton yeraltı çizgisi üzerindeki kısımlar veya üst yapıyı destekleyen çelik kazıklar

### 3.1.6.2 B grubu çarpma dahil edilmemesi gereken yapılar

- Kenar ayaklar, istinat duvarları, 3.1.6.1.3 dışındaki kazıklar
- Temel basınçları ve köprü ayakları
- Ahşap yapılar
- Kaldırım yükleri
- Menfez ve 0,9 m veya daha fazla örtüye sahip yapılar

olarak gruplandırılmıştır. Emniyetli çarpma miktarı veya daha fazlası hareketli yük gerilmesinin bir oranı olarak ifade edilir. Impact katsayısı;

$$I = 1 + 15 / (L + 38) \quad (3.1)$$

Olarak formüle edilmiştir.

Bu ifadede:

I= Impact oranı (maksimum % 30 )

L=Elemanda maksimum gerilme oluşturmak üzere yüklenmiş açıklık kısmının m uzunluğudur.

- Üzeri örtülü menfezler için;

0'-0" ila 1'-0" inç. I= %30

1'-1" ila 2'-0" inç. I=%20

2'-1" ila 2'-11" inç. I=%10 olarak alınır.

1.00 m'den az dolgu altındaki menfezlerde ise I 'nın, azalan dolgu kalınlığına göre, 1.30 ile 1.00 arasında doğrusal değiştiği varsayılır.

### 3.1.7 Yük değerlerinin azaltılması

En büyük etkilerin, birçok trafik şeridinin aynı zamanda yüklenmesi ile elde edildiği durumlarda, tam yük ihtimalinin çok zayıf olduğu göz önünde bulundurarak, hareketli yükten doğan etkilerin Şekil 3.4'te verilen yüzdeleri alınmalıdır:

Çizelge 3.5 Yük değerlerinin azaltılması

Şerit sayısı	LRFD	AASHTO STND.
1	1,2	1
2	1	1
3	0,85	0,9
4	0,65	0,75

### 3.1.8 Yük sınıfının seçilmesi

Köprüler için yük sınıfı aksi belirtilmedikçe Çizelge 3.6 'ya göre belirlenmelidir.

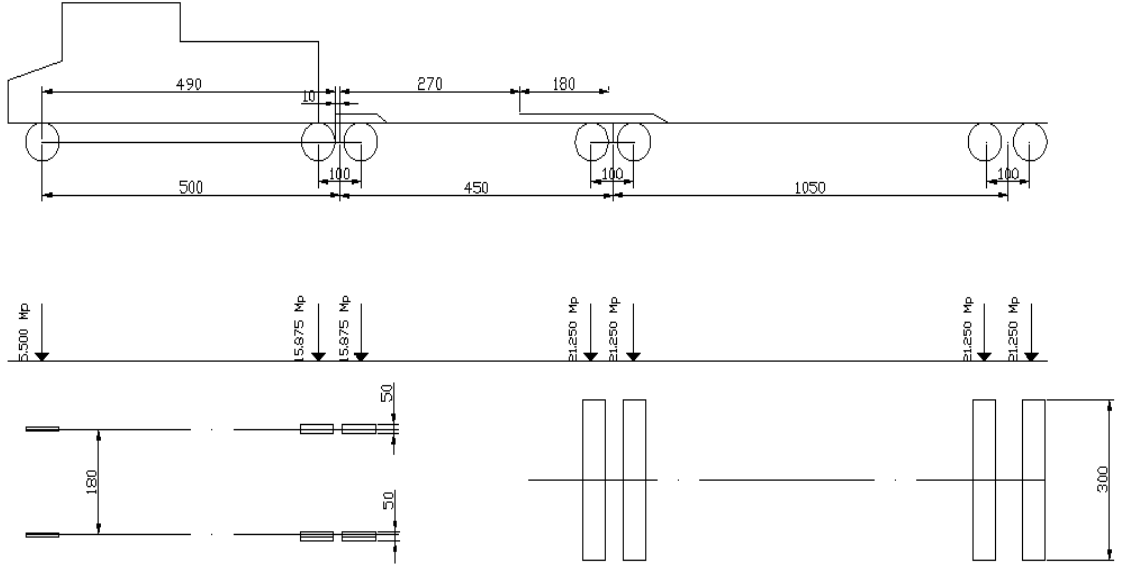
Çizelge 3.6 Karayolları yük sınıfları

Yük Sınıfı	Trafik cinsi
H <sub>30</sub> - S <sub>24</sub>	Karayolları Genel Müdürlüğü Köprüler Dairesi Başkanlığı'nca Gerekli Görüldüğü Hallerde
H <sub>20</sub> - S <sub>16</sub>	Proje saatlik trafiği 100 - 400 taşıt ise veya ağır sanayi merkezlerine giden yollarda
H <sub>15</sub> - S <sub>12</sub>	Proje saatlik trafiği 100 taşıttan az ise
H <sub>10</sub>	Köy yollarında



### 3.1.9 Aşırı yükleme

Köprüden seyrek geçen ağır yükleri karşılamak amacı ile aşağıdaki şekilde, aşırı yükleme tahkiki yapılmalıdır.



Şekil 3.4 Köprüler için aşırı yükleme

Köprünün üstündeki yolun herhangi bir şeritinde, Şekil 3.4 'teki yük katarın tek basma geçtiği ve diğer hiçbir serine trafik bulunmadığı farz edilmelidir. Ayrıca, taşıntıların yaya kaldırımı veya emniyet bordürüne çıkmasına bir engel bulunmadığı hallerde, köprünün hesabına esas alınmış olan yük sınıfına ait en ağır tekerlek yükünün münferit olarak yaya kaldırımına veya emniyet bordürüne ve bunları taşıyan elemanlara etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.1.10 Karma yükleme

Köprüden, tramvay veya demiryolu geçmesi durumunda, bunlara ait yük ve etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.1.11 Fren kuvvetleri

Aynı doğrultuda akan trafiği taşıyan tüm şeritlerde hareketli yükün yüzde 5'inden oluşan boyuna kuvvet etkisi için takviye yapılmalıdır. Gelecekte tek doğrultulu olması beklenen köprülerin tüm şeritleri yüklü olmalıdır. Boyuna kuvvet için döşeme levhasının 1,83 m üstünden yapıya aktarıldığı farz edilmelidir. Ayrıca yük azaltılması göz önünde bulundurulmalıdır. Aşağıda hesaplanan fren yüklerinden maksimum olan dizaynda kullanılır.

- %25 Tasarım aracı

$$BF_{\text{Tek şerit}} = (0,25).(W)$$

- %25 Tasarım şerit yükü

$$BF_{\text{Tek şerit}} = 0,25.(W_{\text{şerit}})$$

- Şerit yüklemesi ve dizayn aracının %5'i (HS20-44)

$$BF_{\text{Tek şerit}} = (0,05) [(W)+(2).(L).(0,64 \text{ k/ft})]$$

- Şerit yüklemesi ve dizayn sıralı şeridin %5'i

$$BF_{\text{tek şerit}} = (0,05). [(W_{\text{sıralı şerit}})+(2).(L).(0,64 \text{ k/ft})]$$

Bu formüllerden bulunan maksimum BF, net fren yükünün (BF net) bulunmasında kullanılmalıdır.

$$BF_{\text{NET}} = (BR_{\text{Tek şerit}}).(\text{Şerit sayısı}).(\text{Yük azaltma katsayısı})$$

### 3.1.12 Merkezkaç kuvveti

Kurbda bulunan köprülerde, hareketli yükün geçişinden ileri gelen merkezkaç kuvvetin etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kuvvet, köprünün herhangi bir en kesitinde;

$$C = f \frac{V^2}{g \cdot R} \quad (3.2)$$

formülü ile, o en kesit içinde etkileyen hareketli yükün yüzdesi olarak verilir. Burada;

V= tasarım hızı (ft/sc)

f= 4/3 (yorulma için tüm kombinasyonlarda)

g=yerçekimi ivmesi (ft/sc)

R= Kavisin yarıçapı ( ft)

Merkezkaç kuvvet=(Aksa gelen yük).(C).(Şerit sayısı).(Yük azaltma katsayısı)

Merkezkaç kuvvetin hesabında, trafik şeritleri Bölüm 3.1.7' ye uygun olarak yüklenir ve hareketli yükler dinamik etki katsayısı ile çarpılmaz ve şerit yükleri bu hesapta kullanılmaz. Maksimum yükleme durumu için her tasarım şeridinde bir standart kamyon olacak şekilde yüklenmelidir. Merkezkaç kuvvetin, yatay olarak ve yol yüzünün 1,8 m üstünde etkidiği kabul edilir; bu mesafe, yol ekseninden itibaren ve yol yüzüne dik olarak ölçülür.

### 3.1.13 Kaldırım yüklemesi

Kaldırım döşemeleri, boyuna kirişler ve bunların mesnetleri; kaldırım alanının her bir ft<sup>2</sup>'si için 0,378 kN/m'lik yüke göre tasarlanmalıdır. Kirişler, makaslar, kemerler ve diğer elemanlar aşağıdaki kaldırım yüklerine göre tasarlanmalıdır.

- Boy itibarıyla 0 ila 25 feet ( 0 – 7,62 m) olan açıklıklar
- Boy itibarıyla 26 ila 100 feet ( 7,92m – 30,48m) olan açıklıklar
- Boy itibarıyla 100 foot (30,48m)'tan uzun açıklıklar için aşağıdaki formül kullanılır:

$$P = \left( 1435 + \frac{43800}{L} \right) \left( \frac{16.7 - W}{15.2} \right) \quad (3.3)$$

Bu ifadede:

P=Herbir ft<sup>2</sup> için hareketli yük (maksimum 60 lb/foot<sup>2</sup> (2.61x10<sup>-3</sup>N/mm<sup>2</sup>))

L=Foot cinsinden kaldırımın yüklenmiş olan boyu

W=Foot cinsinden kaldırım genişliği

### 3.1.14 Yaya yüklemesi

Yaya köprülerinde, hareketli yük olarak, 4,00 kN/m<sup>2</sup> (0,400 t/m<sup>2</sup>) düzgün yayalı bir yük alınmalıdır. Taşıt köprülerinin yaya kaldırımalarında, hareketli yük olarak 3,00kN/m<sup>2</sup> (0,300 t/m<sup>2</sup>) düzgün yayılı bir yük alınmalı ve yapının yalnız bir tarafındaki yaya kaldırımının yüklü olması durumu da incelenmelidir. Yaya, bisiklet köprülerinin bakım araçları tarafından da kullanılması bekleniyorsa bu tür yükler için de özel bir tasarım göz önüne alınmalıdır.

### 3.1.15 Korkuluk yüklemesi

Köprülerin korkuluklarının üst küpeştesine 1,500 kN/m (0,150 t/m) düşey bir yük ile birlikte 2,250 kN/m (0,225 t/m) yatay bir yükün etkidiği varsayılır.

### 3.1.16 Rüzgâr yükü

Rüzgâr yükü yapının açık alanına uygulanan hareketli düzgün dağıtılmış yüklerden oluşur. Açık alan yapının boyuna eksenine 90°'lik bir açı yapan bir yükseklikte görüldüğü gibi döşeme sistemini ve parmaklıkları dahil tüm elemanların

alanlarının toplamıdır. Burada verilen kuvvet ve yükler 100 mil/sa' lik bir taban rüzgâr hızı içindir. Grup II ve Grup V yüklemeleri için maksimum olası rüzgâr hızının makul bir doğrulukla araştırılmasının sağlanması halinde veya bu tür değişiklikleri güvenilir ve önerilebilir kılan bazı sürekli arazi özelliklerinin varolmasının sağlanması halinde, tasarım rüzgâr hızının karesi bölü taban rüzgâr hızının karesi oranıyla azaltılıp çoğaltılabilirler (Grup III ve IV hariç). Tasarım rüzgâr hızında bir değişiklik yapıldığında, tasarım rüzgâr hızı planlarda gösterilmelidir. Rüzgâr tarafındaki kiriş düzleminde toplam kuvvet 4380 N/m ve truss açıklıklarda kirişin rüzgâr altına doğru olan düzleminde 2190 N/m ve kiriş açıklıklarda 4380 N/m'den az olmamalıdır.

#### ➤ Grup II ve Grup V yüklemeleri

Aşağıdaki yoğunluklardaki rüzgâr yükü yapının boyuna eksenine dik açılarda yatay olarak uygulanmalı:

Kemerler için.....75pound/foot<sup>2</sup>(3.26x10<sup>-3</sup>N/mm<sup>2</sup>)

Kirişler için.....50pound/foot<sup>2</sup>(2.17x10<sup>-3</sup>N/mm<sup>2</sup>)

Çizelge 3.7 Grup II ve Grup V yüklemelerinde kullanılacak değerler

Rüzgar eğim Açısı	Kafes kirişler (Trusses)		Kirişler	
	Yanal Yük	Boyuna yük	Yanal Yük	Yanal Yük
Derece	psf (MPA)	psf(MPA)	psf(MPA)	psf(MPA)
0	75(3.59)	0	50(2.39)	0
15	70(3.35)	12(0.57)	44(2.11)	6(0.29)
30	65(3.11)	28(1.34)	41(1.96)	12(0.57)
45	47(2.25)	41(1.96)	33(1.58)	16(0.77)
60	24(1.15)	50(2.39)	17(0.81)	19(0.91)

➤ **Grup III ve Grup IV yüklemeleri**

Grup III ve Grup VI yüklemeleri, Grup II ve Grup V yüklemeleri için kullanılan yüklerin %70 azaltılmasıyla elde edilen yük ve hareketli yük üzerinde rüzgâr yükü olarak tabliyenin 6 foot (1,83m) üzerinde yapının boyuna eksenine dik açılarda uygulanan 100 pound/foot'luk yükten oluşur. Betonarme döşeme levhası veya çelik ızgara tabliye mesnet elemanlarına bağlandığında veya tutturulduğunda, hareketli yük üzerindeki rüzgâr yükünden kaynaklı kesmeye, kendi düzleminde tabliyenin mukavemet ettiği varsayılır.

Çizelge 3.8 Grup III ve Grup IV rüzgar yüklemeleri

<b>Rüzgar eğim Açısı</b>	<b>Yanal Rüzgar Yüğü</b>	<b>Boyuna rüzgar yüğü</b>
<b>Derece</b>	<b>Psf (Mpa)</b>	<b>Psf (Mpa)</b>
0	100(4.79)	0
15	88( 4.21)	12( 0.58)
30	82( 3.93)	24( 1.15)
45	66( 3.16)	32( 1.53)
60	34( 1.63)	38( 1.82)

Grup III ve Grup IV rüzgar yüklemeleri Çizelge 3.8 için, bu yükler %70 oranında azaltılmalı ve her bir foot için hareketli hareketli yük üzerindeki rüzgar yükü olarak eklenmelidir. Bu yük tabliyenin 1,83 m (6 feet) üzerinden uygulanmalıdır.

### 3.1.17 Termal kuvvetler

Sıcaklık değişimleri sonucu olarak ortaya çıkan gerilme ve deformasyonlar hesaplarda göz önüne alınacaktır. Isıda yükselme ve azalma miktarı, yapım sırasında

kabul edilen bir ısı derecesine bağı olarak ve yapının bulunduğu bölgeye göre saptanacaktır. Sıcaklıktaki azalma veya yükselme yapının inşa edileceği yerde sabitlenmeli ve inşa sırasında varsayılan bir sıcaklıktan hesaplanmalıdır. Havadaki ısı ile kütle beton elemanlar veya yapılarda mevcut içsel ısı arasındaki uyumsuzluk göz önünde bulundurulacaktır. Isı değişim alanı genellikle aşağıdaki gibi alınacaktır:

- Metal Yapılarda Isıda yükselme Isıda azalma  
Ilıman iklim  $50^{\circ} -15^{\circ}$   
Soğuk İklim  $50^{\circ} -30^{\circ}$
- Beton yapılarda Isıda yükselme Isıda azalma  
Ilıman iklim  $15^{\circ} -20^{\circ}$   
Soğuk iklim  $20^{\circ} -25^{\circ}$

### 3.1.18 Kar yükü

Kar ve buz yükü, hareketli yükler (ve dinamik etki) de meydana gelecek azalma ile karşılanmış olacağı düşünülerek, genellikle hesaba katılmaz. Ancak, hareketli köprülerin (baskül köprüler hariç) açık durumlarında muhtemel kar ve buz yükünün etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.1.19 Yükselme

Herhangi bir mesnette hesaplanmış yükselmeye aşağıdaki durumlardan biri altında elde edilecek en büyük kuvvete eşit duvar kütlesiyle tutturulmuş kesme elemanlarıyla mukavemet edilmesinin sağlanması yoluyla üst yapının alt yapıya yeterli bir biçimde tutturulması için takviye yapılmalıdır:

- Çarpma ve hareketli yüklemenin %100 arttırıldığı yükleme kombinasyonu veya herhangi bir yükleme sebebiyle oluşmuş hesaplanmış yükselmenin %100'ü
- Çalışma yükü seviyesinde hesaplanmış yükselmenin %150'si

Çekmeye tabi ankraj bulonları veya yukarıdaki koşullar altında gerilmiş diğer elemanlar emniyet gerilmesinin %150'sine göre dizayn edilmelidir.

### **3.1.20 Rötire**

Hiperstatik taşıyıcı sistemlerin hesabında ve çekme elemanlarında rötrenin etkisi sıcaklık düşüşü şeklinde göz önüne alınmalıdır. Rötire için 20°C'lik sıcaklık düşüşü kabul edilebilir. Bu değer sürekli olarak su veya nemli toprak içinde kalan yapı elemanları için 0°C, çok rutubetli çevrede 10°C ye indirilebileceği gibi çok kuru çevrelerde 30°C'ye kadar arttırılmalıdır. Rötrenin etkilerini yok etmek için yapı kısım kısım tamamlanır. Aralarında geçici derz bırakılır ve bu derzler betonun yaşı en az bir ay olduktan sonra kapatılırsa, bitmiş yapı üzerinde esas rötire etkilerinin %25'i alınmalıdır. Toprak, su veya her zaman doymun rutubetli hava ile temasta bulunan betonlarda rötire olmadığı kabul edilmelidir.

### **3.1.21 Sünme**

Beton ve betonarme yapı elemanlarında uzun süreli yüklerden meydana gelen deformasyonların zamanla ilintili değişimlerin hesabı, gereken yerlerde yapılmalı ve bu değişimlerin hiperstatik bilinmeyenler üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

### **3.1.22 Zemin itkisi**

Zemin itkisinin hesabında, mümkün olan her durumda, zemin hakkındaki bilgi zemin mekaniği bilimi bakımından değerlendirilmelidir. Bu itibarla, zemin itkisinin hesabında, hakikate en uygun sonucu verecek formül kullanılmalı ve yapının veya yapı elemanlarının deformasyonu ve muhtemel hareketi göz önünde bulundurulmalıdır. Hiç bir yapı 5,000 KN/m<sup>3</sup> (0,500 t/m<sup>3</sup>)'e tekabül eden bir sıvı basıncından daha az basınca



göre hesaplanmamalıdır. Zemin itkisinin hesabında, dolgu üst yüzünün yatayla teşkil edebileceği açının en uygunsuz değeri alınmalıdır.

Rijit çerçevelerde, aynı zamanda etkiyen diğer yükler veya yük bileşimlerinden doğan momentler, zemin itkisi aynı kesitte zıt işaretli moment doğuruyorsa, bu son momentin en çok yarısı kadar ve zemin itkisinin varlığı muhakkak olan hallerde, azaltılabilirler. Şev içinde bulunan narin yapı elemanlarına, sade, genişliklerince etkiyen bir zemin itkisine göre hesabı kabul edilebilir. Fakat bu elemanların diğer taraflarındaki pasif basınç hesaba katılmaz. Menfezlere gelen zemin itkisi, doğrudan doğruya, menfezin üstündeki dolgu zeminin ağırlığı olarak kabul edilebilir.

### 3.1.23 Suyun kaldırma kuvveti

Suyun kaldırma kuvveti, gerek kazıklar dâhil olmak üzere alt yapının, gerekse üst yapının projelendirilmesinde etkisine göre göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.1.24 Sürüklenme koşullarından, yüzen buz kütlelerinden ve akarsu akımından kaynaklanan kuvvetler

#### ➤ Kazıklarda akarsu akımı kuvveti

Kazıklarda akan suyun ve oluşan yığılmaların etkisi üç genel bir basınç dağılımı olmasına rağmen ikici derece parabolik bir hız dağılımı varsayılarak aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$P_{avg}=K(V_{avg})^2 \quad (3.4)$$

$P_{avg}$ =Ortalama akım basıncı, pound/foot<sup>2</sup>

$V_{avg}$ =Akım oranını akım alanına bölerek elde edilen suyun ortalama hızı, foot/sn

K=Kare uçlu kazıklar ve sürüntü maddesi yığılmalarına tabi tüm kazıklarda 1,4 , dairesel kazıklar için 0,7 ve açının 30 derece veya aşağısı olduğu açılı kazıklar için 0,5 olan bir sabittir.

Maksimum akarsu akımı basıncı,  $P_{max}$ , Denklem (3.4)'le hesaplanmış ortalama akarsu akımı basıncının,  $P_{ort}$ , iki katına eşittir. Akarsu akımı basıncı,  $P_{max}$ 'ın su yüksekliğinin tepesinde olduğu ve sıfır basıncında akım çizgisi üzerinde olduğu üçgenel bir dağılıma sahip olmalıdır.

Akarsu akım kuvvetleri, basınç dağılımını göz önüne alarak akarsu akım basıncı ve açık kazık alanının çarpımıyla bulunmalıdır. Su yüksekliğinin alçak kirişin üzerinde olduğu durumlarda üst yapıda akarsu akımı etkileri araştırılmalıdır. Üst yapıya etkileyen akarsu akımı düzgün bir dağılımla  $P_{max}$  olarak belirlenebilir.

#### ➤ Kazıklarda buz kuvveti

Kazıklara etkileyen buz kuvvetleri bölge koşullarına ve beklenen buz hareketi moduna uygun seçilmelidir.

- Hareket eden buz tabakaları ve akarsu akımı, rüzgar, veya akımlarla taşınan buz bankizlerinden dolayı dinamik buz basıncı.
- Büyük su kütleleri üzerindeki sürekli sabit buz tabakalarının termal hareketlerinden dolayı statik buz basıncı
- Buz yığılmalarından kaynaklanan statik basınç
- İnip çıkan su seviyesinden dolayı yapışan buzlardan kaynaklanan statik yükselme veya düşey yükler.

Hareket eden buz basıncından kaynaklanan yatay kuvvetler;

$$F=C_n p.t.w \quad (3.5)$$

ile hesaplanmalıdır. Bu ifadede:

F= Kazıkta yatay buz kuvveti (pound),

$C_n$ = Tablodan bulunan burun eğimi katsayısı,

$p$ = Etkin buz dayanımı (pound/inç<sup>2</sup>)

$t$ =Kazıkla temas eden buz kalınlığı (inç)

$w$ =Buz etkisi seviyesinde kazık genişliği veya dairesel şaft kazığı çapı (inç)

Orta ayaklara gelen buz itkisi olarak 300 N/cm<sup>2</sup> (30 kg/cm<sup>2</sup>) alınmalıdır. Buzun kalınlığı ve hangi seviyede etkidiği, köprü yerinde inceleme yaparak tespit edilmelidir.

### 3.1.25 Atalet etkisi

Hareketli köprülerde, kitlelerin hızlanmasından veya yavaşlamasından doğan atalet etkileri incelenmelidir.

### 3.1.26 Öngerilme etkisi

Her çeşit öngerilme, ilkel yükleme ve benzeri yapı işlemlerinden doğan etkiler göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.1.27 Mesnet şartlarında değişme durumu:

Temel zeminindeki hareketten ötürü mesnetlerde vuku bulabilecek öteleme ve dönmeler, beklenen büyüklükleri ile göz önünde bulundurulmalıdır. Mesnet şartları eski haline getirilmesi öngörülen hallerde, öteleme ve dönme için, müsaade edilebilecek en büyük değerler göz önünde bulundurulabilir. Temel zemininde beklenen hareket büyük olmasa dahi, hiperstatik sistemlerin hesabında, mesnetlerin, beherinde düşey veya yatay doğrultuda 1 cm lik bir öteleme ve gerekiyor ise, 1 grad bir dönme olabileceği kabul edilerek, mesnet reaksiyonlar ve kesit tesirleri incelenmelidir. Ancak, yapı rijit mesnetle dirilmiş olduğu (örneğin kaya üzerine) veya mesnet Şartlarındaki değişikliklere az hassas olduğu hallerde, bu tahkik yapılmayabilir.

## 3.2 B Grubu Yükler

### 3.2.1 Yapım safhalarından ötürü etkiler

Yapım sırasında etkiyebilecek bütün yükler ve bu arada montaj, betonlama, öngerilme ve iskelelerin alınması gibi işlemlerden doğan yükler ile yapım gereçlerinin ve yapı malzemesi yığınlarnın yükleri, geçici dayanaklardan gelen düşey ve yatay reaksiyonlar, ayrı ayrı ve yapım sırasına göre göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.2.2 Deprem Etkisi

Depremlerin beklendiği bölgelerde, yapılar bölgenin aktif fay hattına yakınlığı, bölgedeki zeminin deprem hareketlerine tepkisi ve tüm yapının Bölüm I-A-Sismik Tasarıma uygun olarak dinamik tepki karakteristikleri deprem hareketlerine mukavemet etmek için tasarlanmalıdır. Deprem olaylarının beklendiği bölgelerde, aşağıdaki değerde deprem yatay kuvvetlerinin etkileri göz önüne alınacaktır.

$$F = C.G \quad (3.6)$$

F, yapı zati yükünün ağırlık merkezinden geçen ve her yönde etkidiği kabul edilen yatay kuvvet, G, yapı zati ağırlığı ve C, deprem katsayısı olup Őu değerlerde alınabilir:

Taşıma gücü 40-50 N/cm<sup>2</sup> (4-5 kg/cm<sup>2</sup>) ve daha yüksek olarak bilinen zeminlere normal temellerle oturan yapılarda C =0.020 .

Taşıma gücü 40-50 N/cm<sup>2</sup> (4-5 kg/cm<sup>2</sup>)'den daha az olarak bilinen zeminlere, normal temellerle oturan yapılarda C =0,04 .

Temelleri kazıklı olan yapılarda C = 0,06 .

Hareketli yükler hesap dışı bırakılabilir.

### 3.2.3 Çarpma Etkisi

Köprülerin pandül ayak, kafes kiriş uç dikmesi ve benzeri önemli taşıyıcı elemanları, buldukları yer veya özel tedbirler sayesinde, taşıtların çarpmasından korunmamışlar ise, diğer yükler ile birlikte en elverişsiz yüklemeyi doğurmak üzere, gidiş doğrultusunda 1000 kN (100 ton) veya gidiş doğrultusuna dik olarak 500 kN (50 ton) tek bir kuvvetin yol yüzeyinden 1,20 m'de etkidiği varsayımına göre tahkik edilmelidirler. Bu tahkik ancak göz önünde bulundurulmuş parça ve onun uç birleşimleri veya mesnetleri için yapılmalıdır. Bordürler, üst kenarına yatay olarak etkiyen ve 7,500kN/m (0,750 t/m) den az olmayan bir yanal yüke dayanabilmelidirler. Bordür toplam yüksekliği 25 cm'den fazla ise, bu kuvvetin yol yüzünden 0,25 m'de etkidiği varsayılır. Bordür yüksekliği 25 cm'den az olmadığı takdirde, korkulukların alt küpeştesi 4,500 KN/m (0,450 t/m) yatay bir yanal yüke dayanabilmelidir. Bordür yüksekliği 25 cm'den az olduğu takdirde, bu kuvvet, bordür yüksekliğinin 25 cm'den eksik her cm'si için 0,250 kN/m (0,025 t/m) artırılmalıdır. Fakat bu şekilde artış, 1,250kN/m (0,125) t/m'den fazla olamaz. Alt küpeşte yoksa korkuluğun parmakları, yerden 50 cm uzaklıkta etkiyen aynı kuvvete dayanabilmelidir. Yaya kaldırımı korkuluğuna bir çarpma etkisi olması, yapının teşkili bakımından mümkün değilse, bu tahkik yapılmaz.

### 3.3 Yük Kombinasyonları

Aşağıdaki gruplar bir yapının maruz kalabileceği yük ve kuvvetlerin çeşitli kombinasyonlarıdır. Yapının her bileşeni veya üzerinde bulunduğu temel, bu kuvvetlerin özel bölge ve tiplere uygulanabilecek kombinasyonlarına dayanacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Servis yükü tasarımı ve yük çarpanı şöyle verilmiştir:

$$\text{Grup(N)} = \gamma [\beta_D D + \beta_L (L+1) + \beta_C CF + \beta_E E + \beta_B B + \beta_S SF + \beta_W W + \beta_{WL} WL + \beta_{LL} LF + \dots + \beta_R (R + S + T) + \beta_{EQ} EQ + \beta_{ICE} ICE] \quad (3.7)$$

Bu ifadede;

N=Grup numarası;

$\gamma$ =Yük faktörü , bknz. 3.22.1A

$\beta$ =Katsayı , bknz. 3.22.1A

D=Ölü yük ;

L=Hareketli yük;

I=Hareketli yük darbesi;

E=Toprak basıncı

B=Kaldırma kuvveti

W=Yapıda rüzgâr yükü;

WL=Hareketli yük üzerinde rüzgâr yükü-100pound/foot;

LF=Hareketli yükten dolayı boyuna kuvvet;

CF=Merkezkaç kuvvet;

R=Nervür kısalması

S=Büzülme;

T=Isı;

EQ=Deprem;

SF=Akarsu akımı basıncı;

ICE=Buz basıncı'dır.

Servis yükü tasarımında, çeşitli grupların esas birim gerilmesi yüzdesi Çizelge 3.7'de verilmiştir. Her gruptaki yük ve kuvvetler uygun olanı olarak alınmalı ve kullanılmalıdır. Gerekli olan maksimum kesit kullanılmalıdır. Yük tasarımı metodu için, yapısal elemanları ve temelleri tasarlamak için Çizelge 3.7' de kullanılan gama ve beta çarpanları kullanılabilir.

Çizelge 3.9  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları tablosu

Kolon No.	1	2	3	3A	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
GRUP	$\gamma$	$\beta$ Çarpanları														
		D	(L+I) <sub>n</sub>	(L+I) <sub>p</sub>	CF	E	B	SF	W	WL	LF	R+S+T	EQ	BUZ	%	
SERVİS YÜKÜ	I	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	100
	IA	1.0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
	IB	1.0	1	0	1	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	**
	II	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	125
	III	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	0	0	0	125
	IV	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	1	0	0	125
	V	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	140
	VI	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	1	0	0	140
	VII	1.0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	133
	VIII	1.0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	140
	IX	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	150
X	1.0	1	1	0	0	$\beta_E$	0	0	0	0	0	0	0	0	100	Menfez
YÜK ÇARPANI TASARIMI	I	1.3	$\beta_D$	1.67*	0	1.0	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	Uygulanmaz.
	IA	1.3	$\beta_D$	2.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	IB	1.3	$\beta_D$	0	1	1.0	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	
	II	1.3	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	1	0	0	0	0	0	
	III	1.3	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	0	0	0	
	IV	1.3	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	1	0	0	
	V	1.25	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	1	0	0	1	0	0	
	VI	1.25	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	1	0	0	
	VII	1.3	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	1	0	
	VIII	1.3	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	1	
	IX	1.20	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	1	0	0	0	0	1	
X	1.30	1	1.67	0	0	$\beta_E$	0	0	0	0	0	0	0	0	Menfez	

(L+I)<sub>n</sub>= AASHTO Karayolu H veya HS Yüklemesi için hareketli yük artı darbe yükü

(L+I)<sub>p</sub>=İşletme firmasının aşırı yük kriterine uygun hareketli yük artı darbe yükü

## BÖLÜM 4

### SONLU ELEMAN YÖNTEMİ VE MODELLEMELER

#### 4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metoddur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de basan ile kullanılabilceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde bir çok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metodlardan birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanları için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir (M. A. S. Arıkan,seminer).

Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır (M. Topçu, S. Taşgetiren)



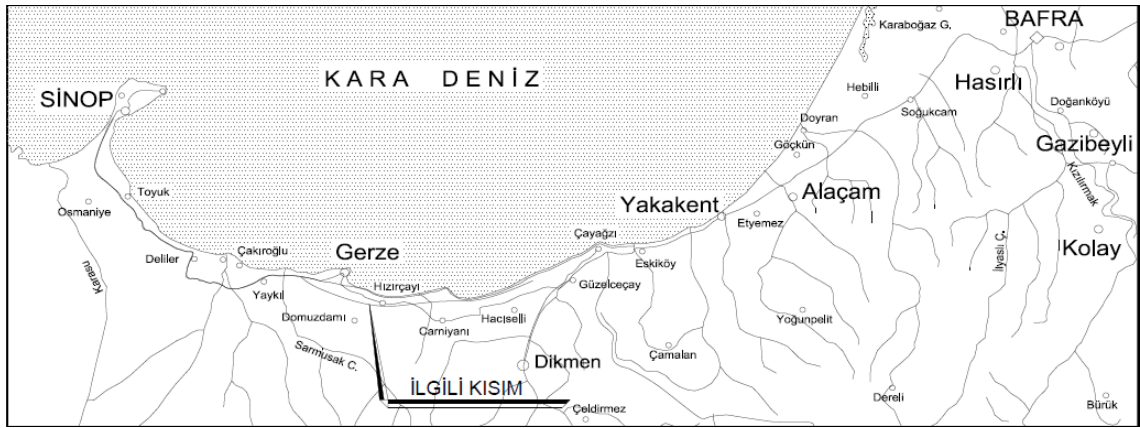
#### 4.1.1 Sonlu Elemanlar Metodu'nun Modelleme ve Çözüm Basamakları

Sonlu elemanlar metodunda katı, sıvı veya gaz gibi gerçek cisimler veya kontinyum, birbirine bağlanmış, *sonlu eleman* adı verilen alt bölümler ile tarif edilmektedir. Bu elemanlar birbirlerine *düğüm noktası* adı verilen özel noktalardan bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanlarının birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır. Kontinyumun içerisindeki deplasman, gerilme, sıcaklık, basınç, hız vs. gibi değişkenlerin gerçekte nasıl değiştiği bilinemediğinden, bunların basit fonksiyonlar ile yaklaşık olarak ifade edilebildikleri varsayılmaktadır. Bu yaklaşık fonksiyonlar, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmektedir. Sistem için denge denklemleri vs. gibi yeni denklemler yazıldığı zaman, bilinmeyenleri değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri olan ve ortak çözümleri gereken yeni denklemler ortaya çıkmaktadır. Genellikle matris denklemleri şeklinde olan bu denklemlerin çözülmesi ile de değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmektedir. Yaklaşık fonksiyonların, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmiş olmaları nedeni ile de, bu fonksiyonların eleman içerisindeki ve sonuç olarak ta bütün kontinyum içerisindeki değerleri bulunmakta ve istenilen sonuçlar elde edilmiş olmaktadır (M. A. S. Arıkan).

#### 4.2 Yakakent – Gerze Yolu İdemli - 3 Viyadüğü

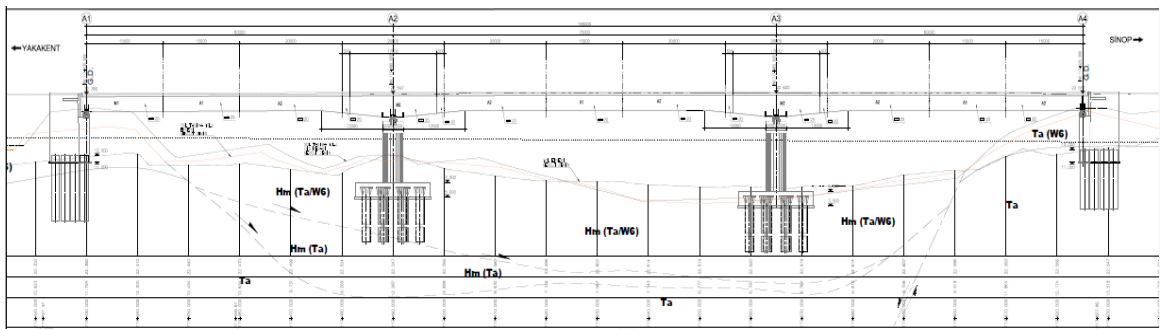
Yakakent-Gerze (Gerze Geçişi Dahil) Yolu kapsamında Km:117+430 ile 117+625 arasında bulunan İdemli-3 viyadüğünün çelik üstyapısına ait hesaplar sunulmaktadır. Viyadük-3 3 açıklıklı olup açıklıklar 60+75+60 metredir. Viyadükte verev bulunmamaktadır. Köprü üstyapısı 4 adet yapma çelik I kiriş ile yerinde dökme betonarme bir tabliyeden oluşan kompozit bir üstyapıdır. Kirişler ile tabliyeyi birbirine bağlamak için 205 mm uzunluğunda çelik çiviler kullanılmıştır. Üstyapı sistemi sürekli olup bir tek kenar ayaklarda genleşme derzi mevcuttur.

Yapısal analizlerde SAP2000 ve Excell programları kullanılmış, şartname olarak Amerikan Köprü Şartnamesi AASHTO LRFD ve Karayolları Teknik Şartnamesi esas alınmıştır.



Şekil 4.1 Proje Yeri

Köprü malzemesi olarak; üstyapı çeliğinde, S355 JR (St 52), döşeme betonunda ise C30 kullanılmıştır.



Şekil 4.2 İdemli-3 Viyadüğü boy kesiti

Bu çalışmada, Yakakent – Gerze Yolu İdemli - 3 Viyadüğünün malzeme özellikleri, uzunluğu, bazı yükleri ve yük kombinasyonları baz alınarak düz köprü ve 8 tane de ayrı yarıçapa sahip fakat İdemli-3 Viyadüğü ile aynı uzunlukta, aynı yük ve yük

kombinasyonlarında yatay kavisli 8 adet köprü SAP 2000’de dizayn edilmiş ve analizi yapılmıştır.

Çizelge 4.1 İdemli-3 Viyadüğü Özellikleri

Eleman	Açıklama
Yol adı	Yakakent-Gerze (Gerze Geçişi Dahil) Yolu
Köprü adı	İdemli-3 Viyadüğü
Köprü tipi	Üç açıklıklı kompozit köprü
Köprü açıklığı	L=195 m
Açıklık boyu	L=60+75+60 m
Tasarım hızı	V=50 km/h
Şerit sayısı	3

### 4.3 Modellemelerde Esas Alınan Yükler

#### 4.3.1 Zati yükler

Ölü yük, yapının tüm sabit parçalarını ve ilavelerinin ağırlıklarını kapsamaktadır. Bu yük SAP2000 programı tarafından otomatik olarak alınmaktadır. Tüm ağırlık hesapları için aşağıdaki kabuller yapılmıştır. Bu yük hesaplanırken SAP2000 programına yapısal çelik birim hacim ağırlığı  $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$  olarak tanımlanmıştır. Döşeme beton ve area section olarak tanımlanmış olup, kalınlığı 25 cm olarak alınmıştır. Ek olarak bazı yükler zati yükler olarak yapıya dahil edilmiştir.

- Asfalt kaplama yükü

Asfalt kaplama kalınlığı 6 cm alınmıştır. Buna göre;

$$22 \text{ kN/m}^3 * 0,06 \text{ m} = 1,32 \text{ kN/m}^2$$

➤ Korkuluk yükleri

Korkuluk yükleri 0,15 ton/m olarak verilmiş olup; 1,47 kN/ m olarak nodelara etki ettirilmiştir.

➤ Prekast cephe elemanı

Prekast cephe elemanının alanı ile birim ağırlığı çarpılarak gerekli hesaplama yapılmıştır.

$25 \text{ kN/ m}^3 * 0,7 * 0,07 = 1,23 \text{ kN/m}$  olarak konsol uçlarına kuvvet olarak etki ettirilmiştir.

➤ Kaldırım yükü

Sağ Kaldırım  $A=0,375 \text{ m}^2$ ;  $0,375 \text{ m}^2 * 25 \text{ kN/m}^3 = 9,375 \text{ kN/m}$

Sol Kaldırım  $A=0,19 \text{ m}^2$ ;  $0,19 \text{ m}^2 * 25 \text{ kN/m}^3 = 4,75 \text{ kN/m}$ 'dir.

Sisteme kaldırım yükü ortalama alınarak 6,5 kN/m olarak ortalama değer olarak girilmiştir.

### 4.3.2 Hareketli yükler

Trafik şeritleri İdemli-3 Viyadüğünde 3 şerittir. Bu sebeple;

Yük azaltma katsayısı=0,85 olarak alınmalıdır.

Impact katsayısı;  $I = 1 + 15 / (L + 38)$        $L=60 \text{ m}$  için;  $I = 1 + 15 / (60 + 38) = 1,15 \leq 1,30$

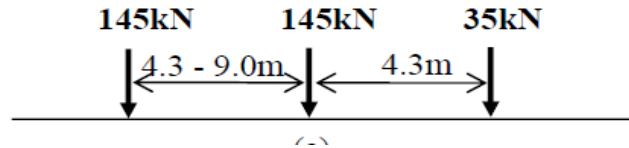
$L=75 \text{ m}$  için;  $I = 1 + 15 / (75 + 38) = 1,13 \leq 1,30$

➤ Yaya yükü

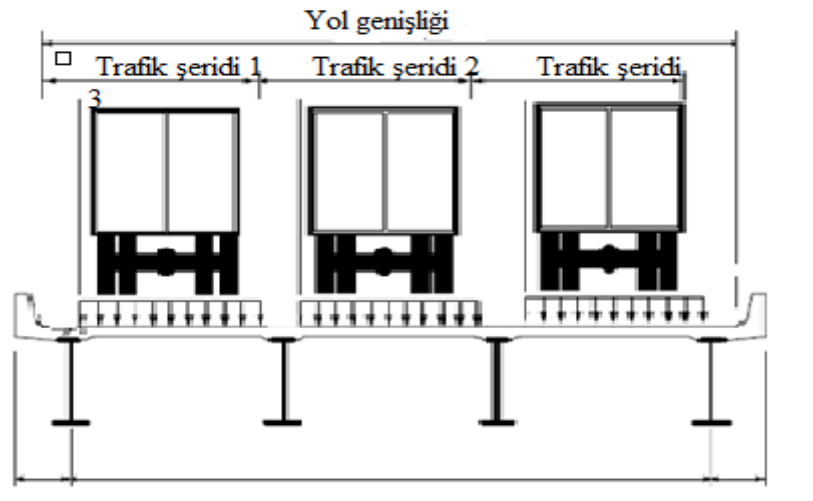
Bölüm 3.1.14' te verilenlere göre; taşıt köprülerinin yaya kaldırımlarında, hareketli yük olarak  $3,00 \text{ kN/m}^2$  ( $0,300 \text{ t/m}^2$ ) düzgün yayılı bir yük alınmış ancak köprü'nün her iki yanının da dolu olmasına göre yükleme yapılmıştır.

➤ Taşıt yükleri

Yol ve köprü tasarımında en çok başvuru olan şartname AASHTO' dur. AASHTO' da tanımlı çok sayıda kamyon mevcuttur. 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 HS<sub>n</sub>-44 olarak modifiye edilerek tanımlanmıştır.



Şekil 4.3 HS 20-44 Kamyon yükü



Şekil 4.4 HS 20-44 Kamyon şerit yüklemesi

Her şeritte bir taşıt olacak şekilde, belirtilen yükler altında, SAP 2000’de tanımlamalar yapılmış, Şekil 4.5’te gösterilen şekilde, köprüye taşıt ve şerit yüklemesi yapılmıştır.

General Vehicle Data

Vehicle Name: H20-44 taşıt

Usage:

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

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

Use BS 5400 (1978) for Uniform Load Length Effects

Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only

Straddle Reduction Factor: [ ]

Load Plan

Load Elevation

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.	Zero Width		35.	Two Points	1.8288
Leading Load	4.25		0.	Zero Width		35.	Two Points	1.8288
Fixed Length	4.25	9.	0.	Zero Width		145.	Two Points	1.8288
Variable Length			0.	Zero Width		145.	Two Points	1.8288

Add Insert Modify Delete

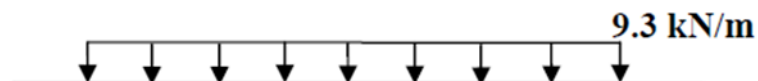
OK Cancel

Units: KN, m, C

Şekil 4.5 SAP 2000’de kamyon yüklemesi görünümü

### ➤ Şerit yükleri

Şerit yüklemesinin veya standart kamyonun 3 m (10 foot)’lük bir genişliği kapladığı varsayılmalıdır. Bu yükler bordürler arasında ölçülmüş tüm platform genişliği boyunca uzanan, 12 foot’ luk bir tasarım genişliğindeki trafik şeritleri boyunca etki ettirilmiştir.



Şekil 4.6 HS 20-44 Şerit yükü

General Vehicle Data

Vehicle Name: H20-44 serit

Usage:

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

Floating Axle Loads:

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	90.	Fixed Width Line	3.
For Other Responses	135.	Fixed Width Line	3.

Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Use BS 5400 (1978) for Uniform Load Length Effects:

Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only:

Straddle Reduction Factor:

Load Plan

Load Elevation

Loads:

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Trailing Load	Infinite		9.3401	Zero Width				
Trailing Load	Infinite		9.3401	Zero Width				

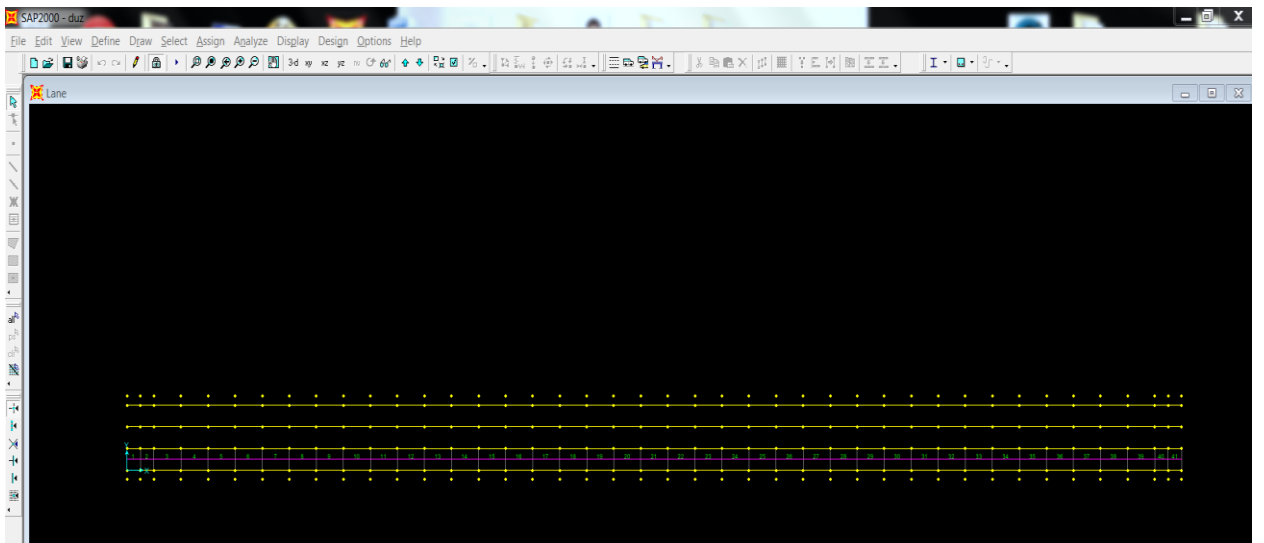
Add Insert Modify Delete

OK Cancel

Units: KN, m, C

Şekil 4.7 SAP 2000'de şerit yüklemesi.

Şerit yüklemeleri, SAP 2000'de tanımlanan fiktif kirişler üzerinde tanımlanan katar yüklemeleriyle verilmiştir. Köprü üzerindeki her 3 şeridin ortasından geçecek şekilde bir şerit olarak, toplamda 3 şerit tanımlanmış ve Şekil 4.8'te gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Şerit ve taşıt yüklemesi için tanımlanan şeritlerin görüntüsü

### 4.3.3 Merkezkaç kuvveti

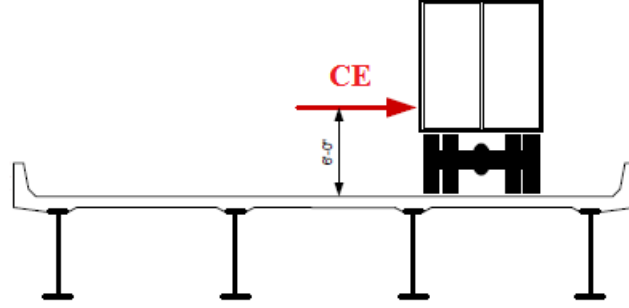
Bölüm 3.1.12 ' de verilen (3.2) formülü ile, o en kesit içinde etkileyen hareketli yükün yüzdesi olarak verilir. Burada; tüm köprü modellemelerinde, tasarım hızı 50Km/h (45,57 ft/sc), G yerçekimi ivmesi  $9,81 \text{ m/s}^2$  (32,2 ft/sc) ve R yarıçapı her modellemede farklı değer olarak alınmıştır.

$$\text{Merkezkaç kuvvet} = (\text{Aksa gelen yük}) \cdot (C) \cdot (\text{Şerit sayısı}) \cdot (\text{Yük azaltma katsayısı}) \quad (4.1)$$

Çizelge 4.2 Merkezkaç kuvvetlerin yarıçaplara göre momentlerinin ve kuvvetlerinin değişimi

Merkezkaç Kuvvet	$C=4/3(V^2/g \cdot R)$	CE Force= $0,85 \cdot C \cdot W$	$M=1,83 \cdot CE$
R=196,85 ft = 60 m	0,435730948	118,628633	217,0903984
R=492,13 ft= 150 m	0,174290609	47,45097111	86,83527713
R=984,25 ft= 300 m	0,08714619	23,72572661	43,41807969
R= 1640,42 ft= 500 m	0,052287608	14,23540704	26,05079488
R=2624,67 ft= 800 m	0,03267978	8,897136178	16,28175921
R=3280,84 ft= 1000 m	0,026143804	7,117703519	13,02539744
R=4921,26 ft= 1500 m	0,017429203	4,745135679	8,683598293
R=9842,52 ft= 3000 m	0,008714601	2,37256784	4,341799146





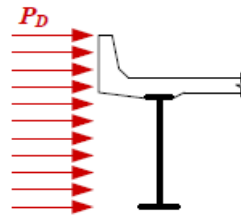
Şekil 4.9 Merkezkaç kuvvetin yönü

Buradan; her farklı köprü yarıçap değeri için CE değeri hesaplanmış ve Çizelge 4.2’te gösterilmiştir. Her merkezkaç yükü SAP 2000’ de hem moment hem de kuvvet olarak sisteme yüklenmiştir.

#### 4.3.4 Rüzgâr yükü

##### ➤ Yapıya gelen rüzgâr yükü

AASHTO 3.15.1.1.1 ve AASHTO 10.21.2’ den yatayla  $90^0$  olarak uygulanacak rüzgâr yükü  $2,4 \text{ kN/m}^2$  olmaktadır. Rüzgâra maruz kalan yüzey yüksekliği (çelik toplam yüksekliği+döşeme+kaldırım+korkuluk) ile çarpılarak rüzgâra maruz yüzeye yayılı yük olarak uygulanmıştır. Şekil 4.10’da yapıya gelen rüzgar yükü gösterilmiştir.



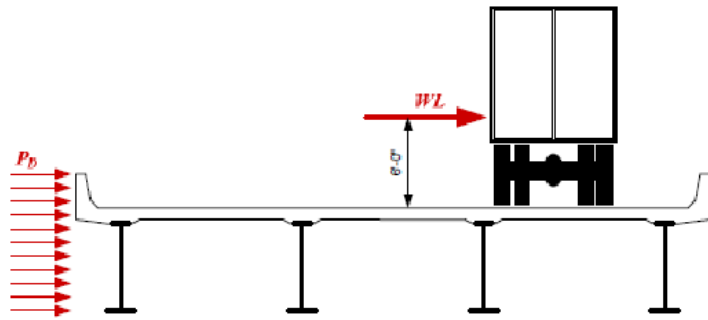
Şekil 4.10 Yapıya gelen rüzgâr yükü

Çelik toplam yüksekliği+döşeme+kaldırım+korkuluk= $2,53+0,25+0,25+1,1=4,13 \text{ m}$

WL Ölü= $F_w = Ht * W_{Load} = 4,13 * 2,4 = 9,89 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır.

➤ **Hareketli yüke gelen rüzgâr yükü**

Hareketli yük üzerindeki rüzgâr 1,459 kN/m ( 100 lb/ft) olarak Çizelge 3.6 Grup III ve Grup IV yüklemeleri' nde belirtildiği gibi alınmıştır. Bu yük döşemenin 1,83 m üstünden etki ettirilmiştir. Ayrıca bu yüklemeye yapı elemanlarına etkiyen rüzgâr yüklerinin %70' i alınmıştır. Şekil 4.11'de Hareketli yüke gelen rüzgar yükü gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Hareketli yüke gelen rüzgâr yükü

Hareketli yüke etkiyen rüzgar yükünü bulabilmek için tüm modellerde eşit olarak 5 m aralıklarla yerleştirilen diyaframların, kesitine uygulanan yükün bulunması gerekmektedir. Bu sebeple;

$$F_w = W_{\text{Ölü}} = 9,89 \text{ kN/m,}$$

$$S_d = 5 \text{ m,}$$

Diyafram kesitine uygulanan yük;

$$S_d * F_{WLL} + 0,7 * S_d * F_w = 5 * 1,459 + 0,7 * 5 * 9,89 = 49,45 \text{ kN araca dikey yönde etkimektedir.}$$

$$M_{WLL} = 1,83 * S_d * F_{WLL} = 1,83 * 5 * 1,459 = 13,35 \text{ kNm olarak kirişlere moment olarak eklenmiştir.}$$

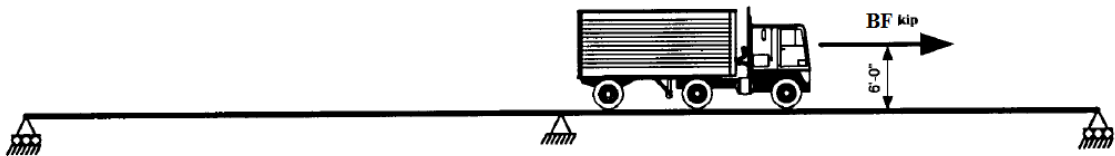
### 4.3.5 Fren yükü

Fren yükü modellemelerin hepsinde aynı taşıtı kullanıldığından bir defa hesaplanmıştır. Bölüm 3.1.11’de belirtildiği üzere fren yükü tasarım araç ağırlığının %25’ i alınarak tek şerit için kuvvet belirlenmiş daha sonrasında AASHTO LRFD’de belirtilen şerit sayısına göre belirtilen yük azaltma katsayısı ve şerit sayısı ile çarpılarak hesaplanmıştır. Buna göre; Çizelge 4.3 Fren yükü ve momenti verilmiştir.

Çizelge 4.3 Fren yükü ve momenti

<b>Fren Yükü</b>		
$BR = 0,25*(35+145+145)$		81,25 kN
$BR_{NET}=0,85*81,25*3$		207,19 kN
Bir lane için alınacak fren yükü		69,0625 kN
$Moment_{FREN} = 1,83*69,06$		126,3798 kNm

$BF_{NET}$  değeri döşemenin 1,83 m üzerinden döşemeye boyuna doğrultuda etki etmektedir. Bu değerler, moment ve kuvvet olarak SAP 2000’ de bütün modellerde kamyon tekerlek aralıkları sabit kabul edilerek 5 m’lik diyaframlara eşit olarak yüklenmiştir. Şekil 4.12 de Fren yükü gösterimi yapılmıştır.



Şekil 4.12 Fren yükü gösterimi

#### 4.3.6 Isı değişimi yükü

Köprüde ortalama olarak 30<sup>0</sup>'lik ısı farkı SAP 2000'de kullanılmıştır.

#### 4.3.7 Yük kombinasyonları

Belirtilen ve hesabı yapılan yükler altında 3 yük kombinasyonu verilmiş ve SAP 2000'de bu kombinasyonlara göre tanımlamalar yapılmıştır.

Dayanım : 1,25 DL+1,25DC+1,50DW+1,75PL+1,75×1,33LL+0,50(CR+SH)±0,50TU

Servis : 1,00 DL+1,00DC+1,00DW+1,30PL+1,30×1,33LL+1,00(CR+SH)±1,00 TU

Yorulma : 0,75 PL+0,75×1,15 LL (Alt ve üst başlık yorulma tahkikleri için)

Burada;

#### **İnşaat Halinde Alınacak Yükler:**

1. DL: Köprü Zati Ağırlığı
2. DC1: Kaldırım Yükleri
3. DC2: Korkuluk+Bariyer+Prekast Cephe Elemanı Yükü

#### **Bitmiş Durumda Alınacak Yükler:**

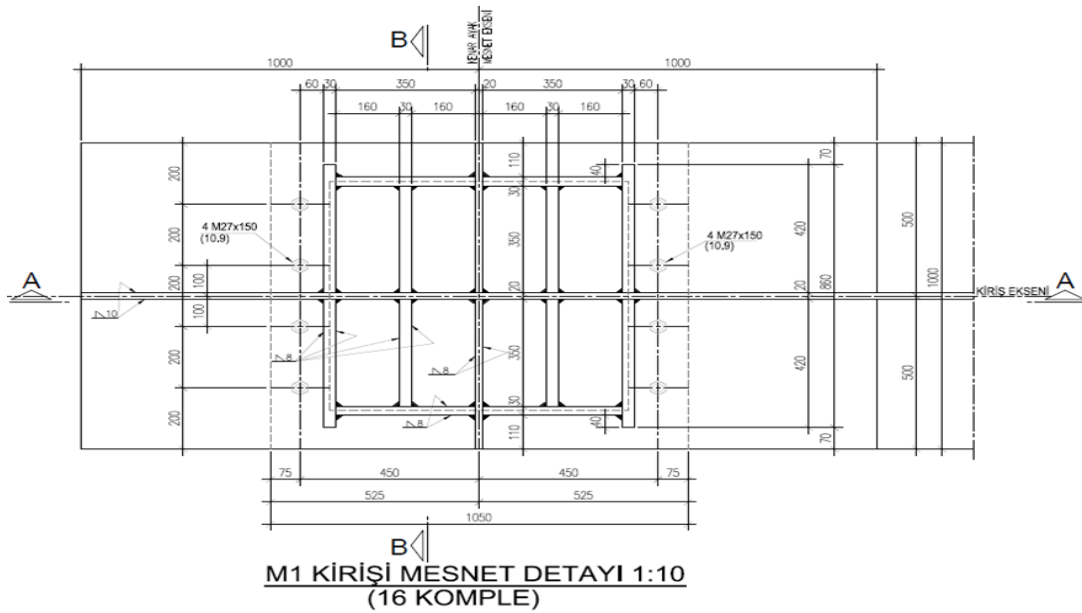
1. DL: Köprü Zati Ağırlığı
2. DC1: Kaldırım Yükleri
3. DC2: Korkuluk+Bariyer+Prekast Cephe Elemanı Yükü
4. DW: Kaplama Yükü
5. PL: Yaya Yükleri
6. LL: Hareketli Yükler (Aynı anda enkesitte max. 3 H20-S44 yükü bulunabileceği düşünülmüştür)
7. TU: Düzgün Isı Değişimleri 'ni temsil etmektedir.

### 4.3.8 Elastomer mesnetlerin tanımlanması

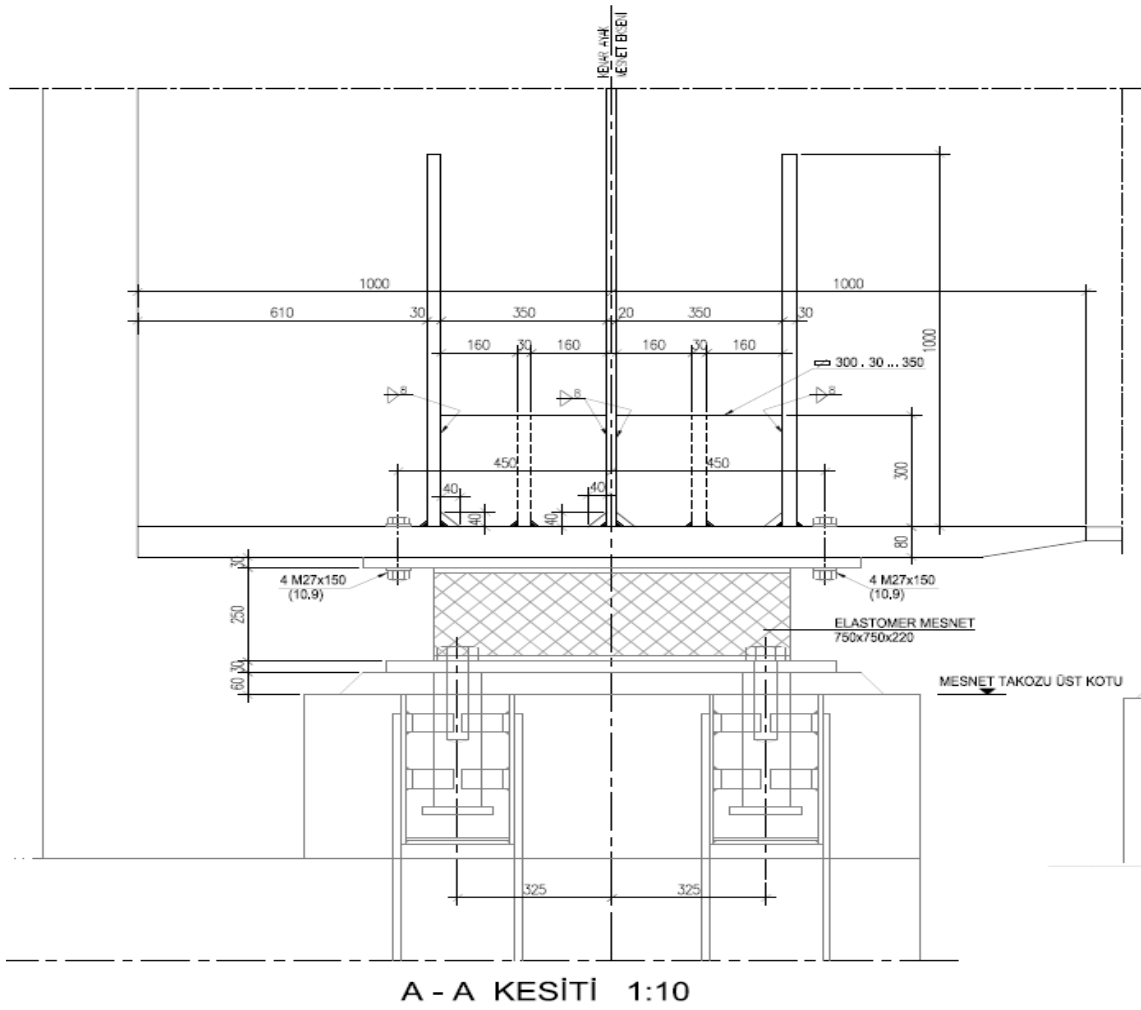
İdemli-3 Viyadüğü'nde kullanılan elastomerin tipi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'da ve özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Kayma modülü elastomerin şekil değiştirmesine bağlı olarak değişmektedir. Modellerde elastomerin efektif kayma modülü AASHTO şartnamesinde tanımlanan değerlerden  $G_{eff} = 0,9\text{MPa} = 900\text{ kN/m}^2$  olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.4 Elastomer boyutları

Elastomer Mesnet Boyu L (cm)	75
Elastomer Mesnet Genişliği W (cm)	75
Elastomer Mesnet Yüksekliği H (cm)	22
Toplam Kauçuk Katman Kalınlığı hr (cm)	5,2
Elastomer Alanı A (cm <sup>2</sup> )	5625
Elastomer Atalet Momenti I (cm <sup>4</sup> )	2636718
Elastomer kayma gerilmesi	0,9 Mpa
Mesnet Adetin (Kiriş ucunda)	4



Şekil 4.13 Mesnet detayı-1



Şekil 4.14 Elastomer mesnet

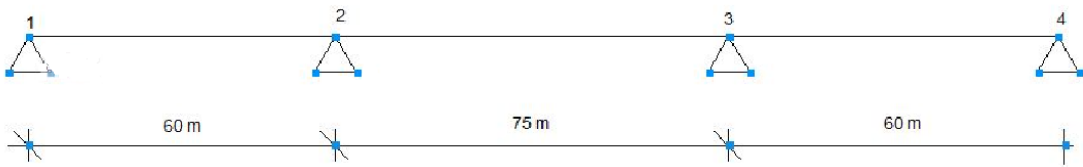
Link elemanı olarak SAP 2000’de modellenen elastomer mesnetlerin rijitlikleri Çizelge 4.4’te verilen özellikler ve efektif kayma modülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$K_H = k_{eff} = \frac{G_{eff} A}{H_r} =$	$900 * 0,5625 / 168$	$3013 \text{ kN/m}$
---	----------------------	---------------------

Link olarak modellenen elastomer  $K_H$  rijitliği 3013 olarak modellerde kullanılmıştır.

### 4.3.9 Sürekli kirişlerde hareketli yük tesir çizgileri hesabı

Hareketli yük etkisi altında taşıyıcı sistemlerin analizinin yapılabilmesi için tesir çizgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Tesir çizgileri birim hareket eden yük için çizilmekte olup, birim yükün sistem üzerindeki herhangi bir konumunda, hesaplanan bir mesnet tepki kuvveti veya bir kesit tesir değerinin yükün o anda bulunduğu konuma ait kesite çizilmesi ile elde edilmiştir. Sonuçta elde edilen grafi, belirli bir mesnet tepki kuvveti veya kesit tesirinin, hareket eden birim yükün sistem üzerindeki konumlarına ait değişimlerini vermiştir. Hesaplarda kirişlerin atalet momentleri sabit alınmıştır.



Şekil 4.15 Çalışılan köprünün mesnet aralıkları

Tesit çizgilerinin ordinatlarının hesaplanabilmesi için çeşitli formüllere ihtiyaç duyulmaktadır

$$\alpha = L_1/L_2 ,$$

$$\beta_1 = x/L_1 ,$$

$$\beta_2 = x/L_2 , \quad \text{olmak üzere;}$$

$$A = 1/(1 - 4(1 + \alpha)^2)$$

$$B = A*(1 + \alpha)$$

$$C = A*(1 + 2\alpha)$$

$$D = A*(3 + 2\alpha)$$

$$K_{x1} = \beta_1(1 - \beta_1)$$

$$K_{x2} = \beta_2(1 - \beta_2)$$

#### 4.3.9.1 M<sub>2</sub> mesnet eğilme momenti tesir çizgisi ordinatları

Mesnete ait tesir çizgilerinin çizilebilmesi için tesir çizgisi ordinatlarının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için bazı formüller verilmiştir.

$$y_1 = 2 \cdot B \cdot \alpha \cdot (1 + \beta_1) \cdot K_{x1} \cdot L_1$$

$$y_2 = 2 \cdot B \cdot (2 - \beta_2) - A \cdot (1 + \beta_2) \cdot K_{x2} \cdot L_2$$

$$y_3 = -A \cdot \alpha \cdot (2 - \beta_1) \cdot K_{x1} \cdot L_1$$

**Buradan  $\alpha, \beta_1, \beta_2, y_1, y_2$  ve  $y_3$  hesaplanırsa;**

$$\alpha = L_1/L_2 = 60/75 = 0,8$$

$$A = 1/(1 - 4(1 + \alpha)^2) = 1/((1 - 4(1 + 0,8)^2) = -0,08361$$

$$B = A \cdot (1 + \alpha) = -0,08361 \cdot (1 + 0,8) = -0,15050$$

$$C = A \cdot (1 + 2\alpha) = -0,08361 \cdot (1 + 2 \cdot 0,8) = -0,21739$$

$D = A \cdot (3 + 2\alpha) = -0,08361 \cdot (3 + 2 \cdot 0,8) = -0,38462$  olarak hesaplanmıştır. Buradan ordinatları verecek denkleler ise;

$$y_1 = 2 \cdot B \cdot \alpha \cdot (1 + \beta_1) \cdot K_{x1} \cdot L_1 = 2 \cdot (-0,15050) \cdot 0,8 \cdot (1 + \beta_1) \cdot K_{x1} \cdot L_1$$

$$y_1 = -0,2408 \cdot (1 + \beta_1) \cdot K_{x1} \cdot L_1$$

$$y_2 = 2 \cdot B \cdot (2 - \beta_2) - A \cdot (1 + \beta_2) \cdot K_{x2} \cdot L_2$$

$$y_2 = (2 \cdot (-0,15050) \cdot (2 - \beta_2) - (-0,08361 \cdot (1 + \beta_2))) \cdot K_{x2} \cdot L_2$$

$$y_2 = (-0,5184 + 0,3846\beta_2) \cdot K_{x2} \cdot L_2$$



$$y_3 = -A. \alpha. (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1 = -(-0,08361) * 0,8 * (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1$$

$$y_3 = 0,0669. (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1$$

#### 4.3.9.2 M<sub>3</sub> mesnet eğilme momenti tesir çizgisi ordinatları

$$y_1 = -A. \alpha. (1 + \beta_1). K_{x1}. L_1$$

$$y_2 = [2. B. (1 + \beta_2) - A. (2 - \beta_2)]. K_{x2}. L_2$$

$$y_3 = 2. B. \alpha. (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1$$

Olarak verilmiştir. Bu durumda;

$$y_1 = -A. \alpha. (1 + \beta_1). K_{x1}. L_1 = (-0,08361) * 0,8 * (1 + \beta_1). K_{x1}. L_1 =$$

$$y_1 = 0,06688(1 + \beta_1). K_{x1}. L_1$$

$$y_2 = [2. B. (1 + \beta_2) - A. (2 - \beta_2)]. K_{x2}. L_2 =$$

$$y_2 = [2 * (-0,15050) (1 + \beta_2) + 0,08361 * (2 - \beta_2)]. K_{x2}. L_2 =$$

$$y_2 = (-0,13378 - 0,38461. \beta_2). K_{x2}. L_2$$

$$y_3 = 2. B. \alpha. (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1 =$$

$$y_3 = 2 * (-0,15050) * 0,8 * (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1 =$$

$$y_3 = 0,2408. (2 - \beta_1). K_{x1}. L_1$$

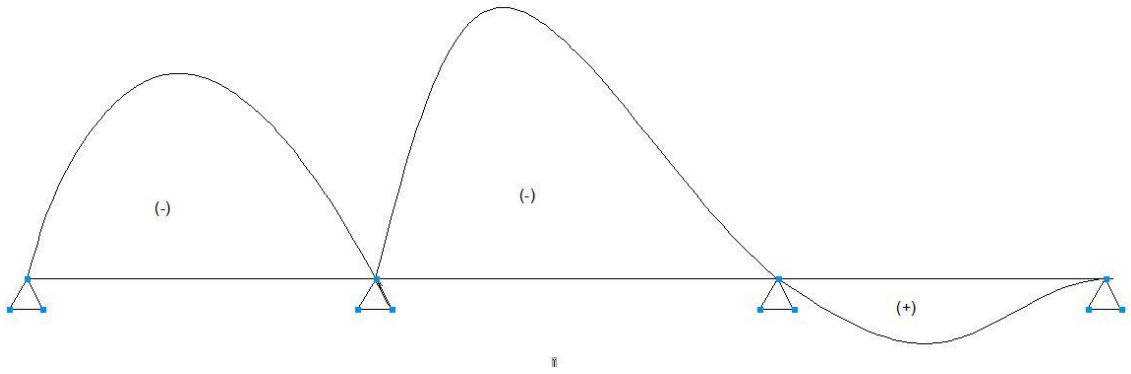
olarak belirlenmiştir. Denklemlerden hesaplanan ordinat değerleri Çizelge 4.5 'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 M2 mesneti tesir çizgisi ordinat değerleri

M2			
$\beta_1$	K <sub>x1</sub>	$y_1 = -0,2408 \cdot (1+\beta) \cdot K_x$	$y_1 = -0,2408 \cdot (1+\beta) \cdot K_x \cdot L_1$
0	0	0	0
0,1	0,09	0,0238	1,428
0,2	0,16	0,0462	2,772
0,3	0,21	0,0657	3,942
0,4	0,24	0,0809	4,854
0,5	0,25	0,0903	5,418
0,6	0,24	0,0925	5,55
0,7	0,21	0,086	5,16
0,8	0,16	0,0694	4,164
0,9	0,09	0,0412	2,472
1	0	0	0
$\beta_2$	K <sub>x1</sub>	$y_2 = (-0,5184 + 0,3846 \cdot \beta_2) \cdot K_x$	$y_2 = (-0,5184 + 0,3846 \cdot \beta_2) \cdot K_x \cdot L$
0	0	0	0
0,1	0,09	0,0432	3,24
0,2	0,16	0,0706	5,295
0,3	0,21	0,0846	6,345
0,4	0,24	0,0875	6,5625
0,5	0,25	0,0815	6,1125
0,6	0,24	0,069	5,175
0,7	0,21	0,0523	3,9225
0,8	0,16	0,0337	2,5275
0,9	0,09	0,0155	1,1625
1	0	0	0
$\beta_1$	K <sub>x1</sub>	$y_3 = 0,0669 \cdot (2 - \beta_1) \cdot K_x$	$y_3 = 0,0669 \cdot (2 - \beta_1) \cdot K_x \cdot L$
0	0	0	0
0,1	0,09	0,0114	0,684
0,2	0,16	0,0193	1,158
0,3	0,21	0,0239	1,434
0,4	0,24	0,0257	1,542
0,5	0,25	0,0251	1,506
0,6	0,24	0,0225	1,35
0,7	0,21	0,0183	1,098
0,8	0,16	0,0128	0,768
0,9	0,09	0,0066	0,396
1	0	0	0

Çizelge 4.6 M3 mesneti tesir çizgisi ordinat değerleri

M3			
$\beta_1$	$K_{x1}$	$y_1 = 0,00669 \cdot (1+\beta) \cdot K_x$	$y_1 = 0,00669 \cdot (1+\beta_1) \cdot K_x \cdot L_1$
0	0	0	0
0,1	0,09	0,0066	0,396
0,2	0,16	0,0128	0,768
0,3	0,21	0,0183	1,098
0,4	0,24	0,0225	1,35
0,5	0,25	0,0251	1,506
0,6	0,24	0,0257	1,542
0,7	0,21	0,0238	1,428
0,8	0,16	0,01934	1,1604
0,9	0,09	0,01144	0,6864
1	0	0	0
$\beta_1$	$K_{x1}$	$y_2 = (-0,13378 - 0,3846 \cdot \beta_2) \cdot K_x$	$y_2 = (-0,13378 - 0,3846 \cdot \beta_2) \cdot K_x \cdot L_2$
0	0	0	0
0,1	0,09	0,0155	1,1625
0,2	0,16	0,0337	2,5275
0,3	0,21	0,0523	3,9225
0,4	0,24	0,069	5,175
0,5	0,25	0,0815	6,1125
0,6	0,24	0,0875	6,5625
0,7	0,21	0,085	6,375
0,8	0,16	0,071	5,325
0,9	0,09	0,0432	3,24
1	0	0	0
$\beta_1$	$K_{x1}$	$y_3 = 0,2408 \cdot (2 - \beta_1) \cdot K_x$	$y_3 = 0,2408 \cdot (2 - \beta_1) \cdot K_x \cdot L_1$
0	0	0	0
0,1	0,09	0,0412	2,472
0,2	0,16	0,0694	4,164
0,3	0,21	0,0859	5,154
0,4	0,24	0,0925	5,55
0,5	0,25	0,0903	5,418
0,6	0,24	0,081	4,86
0,7	0,21	0,066	3,96
0,8	0,16	0,0462	2,772
0,9	0,09	0,0238	1,428
1	0	0	0

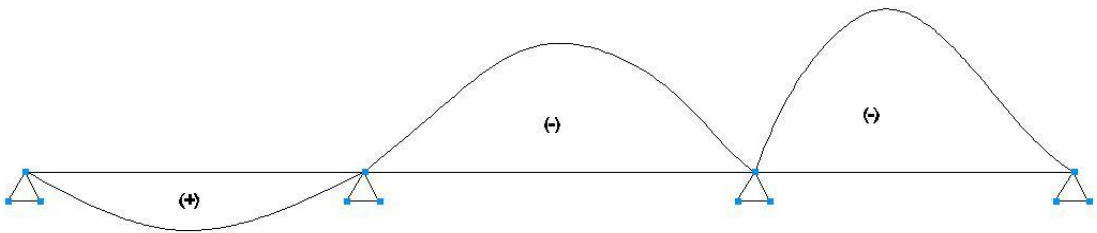
Şekil 4.16 M<sub>2</sub> mesneti tesir çizgileri

$$A_1 = (-1,428 - 2,772 - 3,942 - 4,854 - 5,418 - 5,55 - 5,16 - 4,164 - 2,472) = -178,8 \text{ m}^2$$

$$A_2 = (-3,24 - 5,295 - 6,345 - 6,5625 - 6,1125 - 5,175 - 3,9225 - 2,5275 - 1,1625) = 252,14 \text{ m}^2$$

$$A_3 = (0,0114 + 0,0193 + 0,0239 + 0,0257 + 0,0251 + 0,0225 + 0,0183 + 0,0128 + 0,0066) = 0,1068 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 49,68 \text{ m}^2$$

Şekil 4.17 M<sub>3</sub> mesneti tesir çizgileri

$$A_1 = 0,396 + 0,768 + 1,098 + 1,35 + 1,506 + 1,542 + 1,428 + 1,1604 + 0,6864 = 49,68 \text{ m}^2$$

$$A_2 = -1,1625 - 2,5275 - 3,9225 - 5,175 - 6,1125 - 6,5625 - 6,375 - 5,325 - 3,24 = -252,52 \text{ m}^2$$

$$A_3 = -2,472 - 4,164 - 5,154 - 5,55 - 5,418 - 4,86 - 3,96 - 2,772 - 1,428 = -178,8 \text{ m}^2$$

- **Bir trafik şeridindeki eşdeğer şerit yüküne ait  $M_1$  mesneti eğilme momenti;**

$$M_{qş} = 10 * (-178,8 - 252,14) - 90 * (5,55 + 6,5625)$$

$$M_{qş} = -4309,4 - 109,125 = 4418,41 \text{ kNm}$$

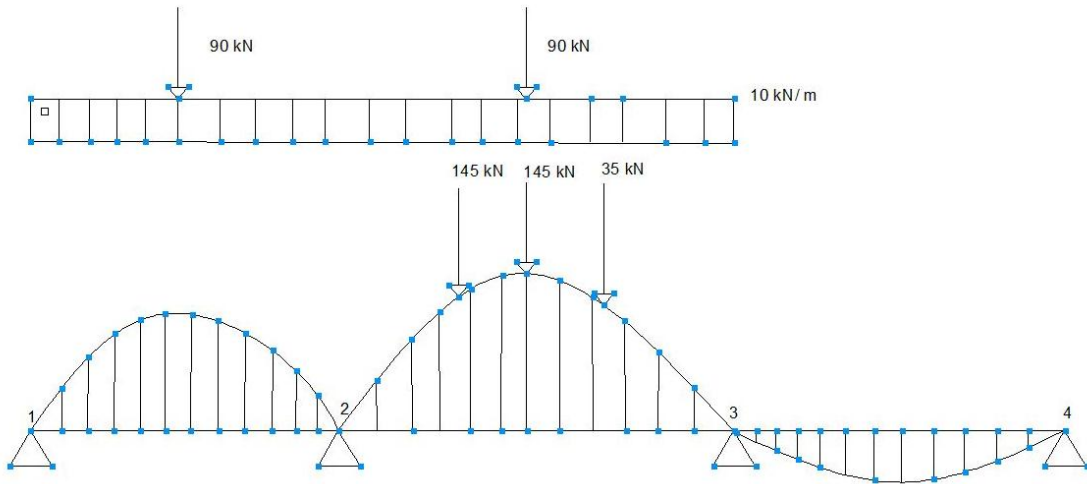
- **Bir trafik şeridindeki dingil yüküne ait  $M_1$  mesneti eğilme momenti**

$$M_{qd} = 145 * (6,56 + 6,34) - 35 * (5,17) = 1870,5 - 181 = 1689,5 \text{ kNm}$$

$$M_{qş} + M_{qd} = 6107 \text{ kNm}$$

$$I = 1 + 15 / (L + 37) = 1,16$$

$$I = 1 + 15 / (L + 37) = 1,13$$



Şekil 4.18 Tesir Çizgileri Yüklemeleri

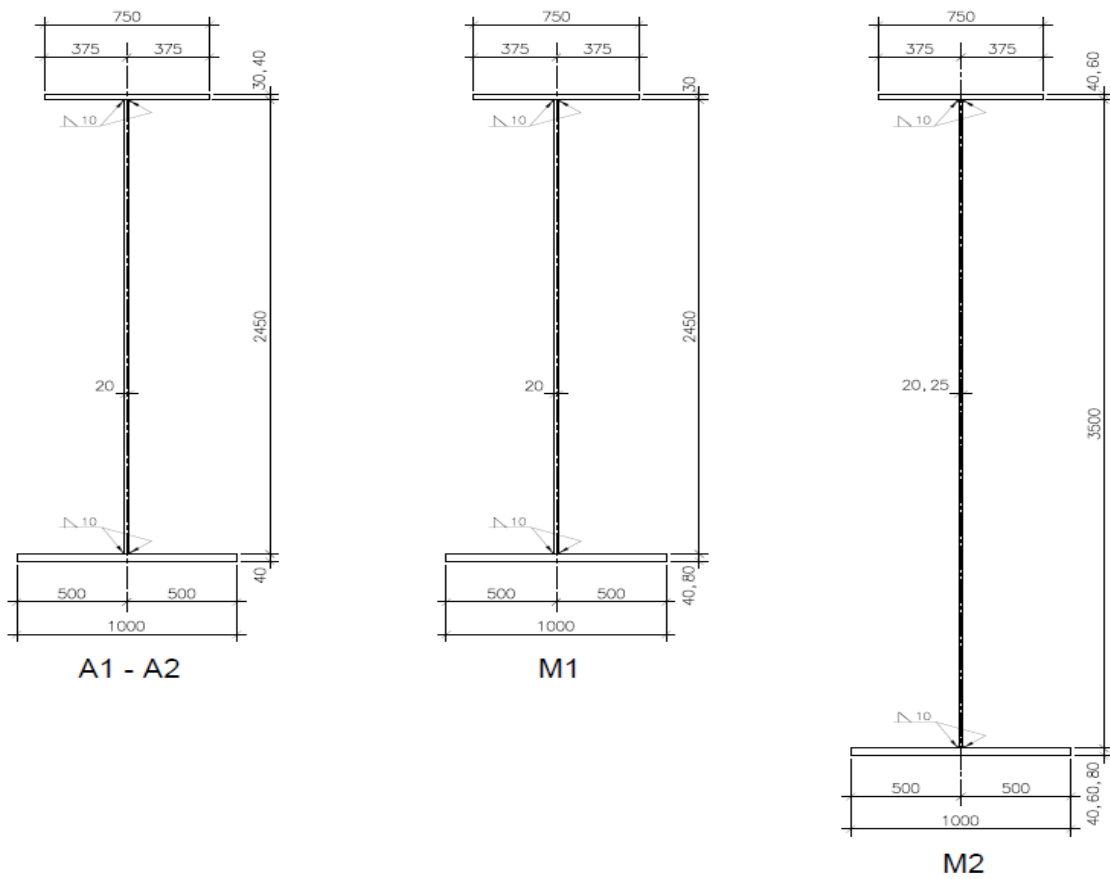
Buradan;

$$M_1 = 1/n (M_g + M_q \cdot k_{ij} \cdot Q + M_q \cdot k_{ij})$$

$$M_1 = 1/7 * (1,134 * 6107 * 12,93) = 12762 \text{ kNm} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

### 4.3.10 Kullanılan I profiller

Modellemelerin tamamında kullanılan köprü kompozit özelliğe sahip olması sebebi ile, köprü gerilmelerini hesaplamak için, kompozit malzemenin atalet momentlerinin hesaplanması gerekmektedir. Yapılan analiz sonucunda; maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak atalet momenti hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 Kullanılan I profiller

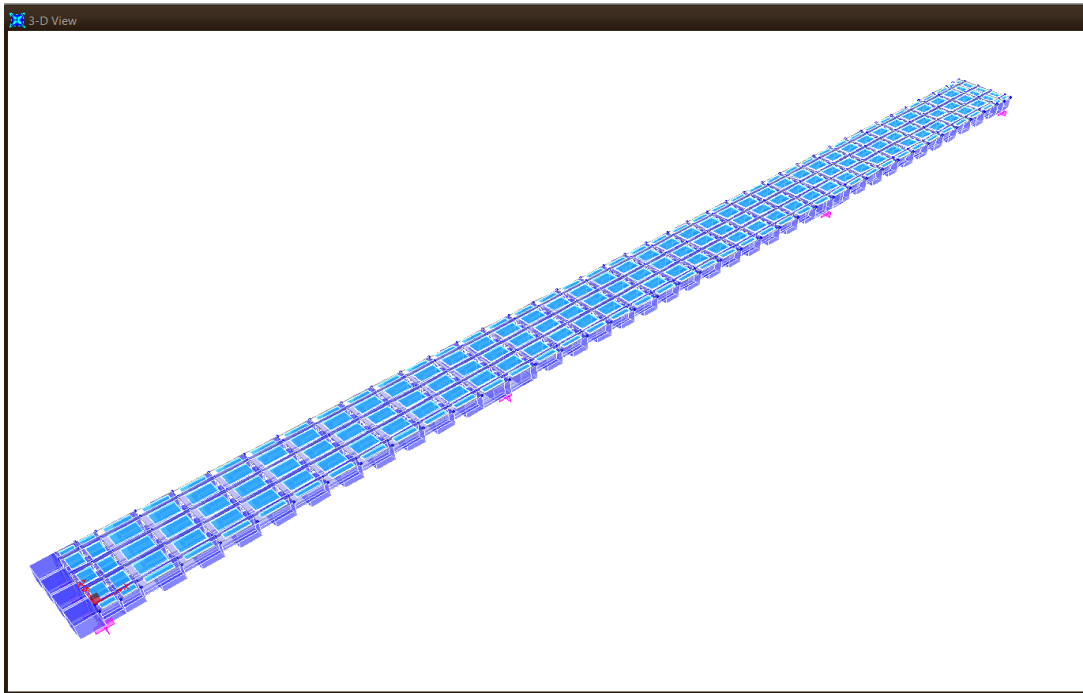
### 4.3.11 Modellemeler

Modellemelerin tamamında; İdemli-3 viyadüğünün açıklık, uzunluk çelik özellikleri, bazı yükleri ve uygulanan yük kombinasyonları baz alınarak

oluşturulmuştur. Modellerde köprü yarıçapı, buna bağlı olarak merkezkaç kuvveti, döşeme geometrisi değişmiş, uygulanan kombinasyonlar çelik özellikleri, köprü uzunluğu ve yarıçapa bağlı olmayan fren yükü ve rüzgar yükü her modelde aynı yük alınarak uygulanmıştır. Temel olarak yarıçap eğrisi boyunca köprü uzunluğu sabit tutulmuş, İdemli-3 viyadüğü'nde olduğu gibi 195 m olarak SAP 2000'de modellenmiştir. Hareketli yükler çapraz bağlantı elemanları bağlantı noktalarına eşit olarak uygulanmıştır.

#### 4.3.11.1 Model-1 Düz köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü kurpsuz olarak merkezkaç kuvveti dahil edilmeden hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.20 Model 1 Düz köprü tasarımı

Çizelge 4.7 Model 1 tasarımında kullanılan yükler

	Wind load <sub>ölü</sub>	Wind load <sub>LL</sub>	Moment Wind	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
<b>Model 1 Düz Köprü</b>	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1	126,4

Çizelge 4.7’te alınan yükler; taşıt teker aralığı 5 m sabit alınarak sisteme etki ettirilmiştir. Hareketli yüklerde ise; yükler yine 5 er metre aralıklarla yükler tekerlere göre paylaştırılarak moment ve kuvvet olarak diğer modellerde de dahil olmak üzere SAP 2000’de sisteme dahil edilmiştir.

Model 1’in analizi yapılarak momentleri belirlenmiştir. Yapılan analiz sonucunda; maksimum momentlerin M2<sub>80-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğı belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Modellemelerde bu bölgede kullanılan kesit özellikleri Şekil 4.19’te verilmiştir.

#### **Kompozit kirişin atalet momentinin bulunması:**

Sünme bulunup bulunmadığı durumlarına göre hesaplamalar gerilmelerin hesaplanmasında kullanılmak üzere hesaplanmıştır.



Çizelge 4.8 M<sub>2 80-60</sub> Kirişinin özellikleri

<b>M2 80-60 Kirişi:</b>		
t <sub>w</sub> =	2 cm	Gövde levhası kalınlığı
D =	350 cm	Gövde levhası derinliği
b <sub>af</sub> =	100 cm	Alt başlık genişliği
t <sub>af</sub> =	8 cm	Alt başlık kalınlığı
b <sub>üf</sub> =	75 cm	Üst başlık genişliği
t <sub>üf</sub> =	6 cm	Üst başlık kalınlığı
t <sub>d</sub> =	25 cm	Döşeme kalınlığı
L =	75 m	Açıklık

AASHTO 10.38.3.1' e göre kompozit kirişlerde etkili tabla genişliği aşağıdaki değerleri geçmemelidir.

(1) Kiriş açıklığının 1/4 i = 1/4\* L=1875 cm

(2) Kiriş aralığı= 330 cm

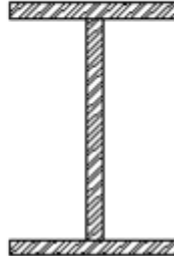
(3) 12 \* t<sub>d</sub> =300 cm

Etkili tabla genişliği = 300 cm

Çizelge 4.9 M<sub>2 80-60</sub> Çelik kirişin kesit modülleri hesabı

<b>Çelik Kesit</b>	A (cm <sup>2</sup> )	y (cm)	A*y	y-y	A(y-y) <sup>2</sup>	I <sub>o</sub>
Gövde	700	183	128100	32,36	7,330E+05	7,15E+06
Alt flanş	800	4	3200	-146,64	1,720E+07	4,27E+03
Üst flanş	450	361	162450	210,36	1,991E+07	1,35E+03
Toplam	1950		293750		3,785E+07	7,15E+06

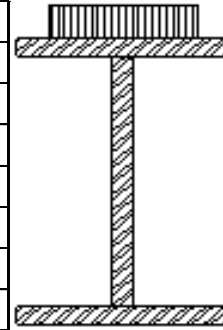
$W_1 =$	Alt başlığa göre kesit modülü		
$W_2 =$	Üst başlığa göre kesit modülü		
$W_3 =$	Döşemeye göre kesit modülü		
$y = (A \cdot y)_{\text{tot}} / A_{\text{tot}} =$	151	cm	
$I_{x-x}$	45000199	$\text{cm}^4$	
$y_1$	151	cm	
$y_2$	213	cm	
$W_1$	298725	$\text{cm}^3$	
$W_2$	210913	$\text{cm}^3$	



Çizelge 4.10 Kompozit kesitin kesit modülleri hesabı (Sünme yok)

Kompozit Kesit (n) - Sünme yok						
	A ( $\text{cm}^2$ )	y (cm)	A*y	y-y	A(y-y) <sup>2</sup>	$I_o$
Gövde	700	183	128100	1,16	9,468E+02	7,15E+06
Alt flanş	800	4	3200	-177,84	2,530E+07	4,27E+03
Üst flanş	450	361	162450	179,16	1,444E+07	1,35E+03
Döşeme	312,5	376,5	117656	194,66	1,184E+07	1,63E+04
Toplam	2263		411406		5,159E+07	7,17E+06

$y = (A \cdot y)_{\text{tot}} / A_{\text{tot}} =$	182	cm
$I_{x-x}$	58755969	$\text{cm}^4$
$y_1$	182	cm
$y_2$	182	cm
$y_3$	207	cm
$W_1$	323124	$\text{cm}^3$
$W_2$	322546	$\text{cm}^3$
$W_3$	283622	$\text{cm}^3$

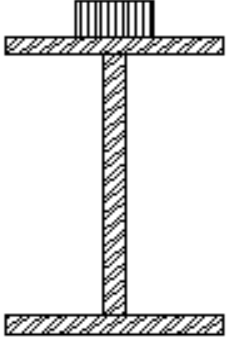


Çizelge 4.11 Kompozit kesitin kesit modülleri hesabı (Sünme var)

Kompozit Kesit (3n) - Sünme var						
	A (cm <sup>2</sup> )	y (cm)	A*y	y-y	A(y-y) <sup>2</sup>	I <sub>o</sub>
Gövde	700	183,0	128100	20,91	3,059E+05	7,15E+06
Alt flanş	800	4,0	3200	-158,09	2,000E+07	4,27E+03
Üst flanş	450	361,0	162450	198,91	1,780E+07	1,35E+03
Döşeme	104,167	376,5	39219	214,41	4,789E+06	5,43E+03
Toplam	2054		332969		4,289E+07	7,16E+06

$y = (A*y)_{tot} / A_{tot} =$	162	cm
I <sub>x-x</sub>	50049941	cm <sup>4</sup>
y <sub>1</sub>	162	cm
y <sub>2</sub>	202	cm
y <sub>3</sub>	227	cm
W <sub>1</sub>	308770	cm <sup>3</sup>
W <sub>2</sub>	247888	cm <sup>3</sup>
W <sub>3</sub>	220576	cm <sup>3</sup>



### Gerilmelerin hesaplanması:

Belirlenen kesit modüllerine göre gerilmeler hesaplanmıştır. Analizlerden elde edilen ölü yük momentleri ve oluşturulan 3 farklı kombinasyondan maksimum momentleri veren dayanım kombinasyonundaki maksimum momentler Çizelge 4.12 de verilmiştir. Bu moment ve kesme kuvvetleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12 Maksimum ve minimum değerler

Yükler	Mmax	Vmax
Dead Linearadd	18797	1383,86
Live	41893,3	3632,16

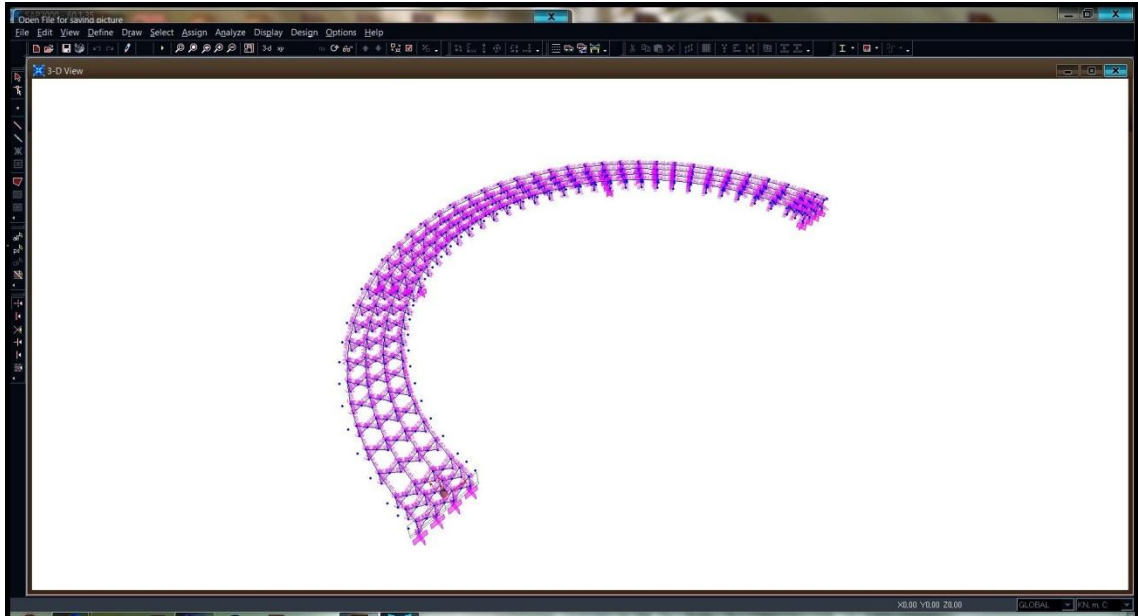
Çizelge 4.13 Çelik kesitte oluşan gerilme değerleri

<b>Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:</b>					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	18797			308770	60,87702821
LL+IM		41893,25	323124		129,6506914
Toplam					190,5277196
<b>Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:</b>					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	18797			247888	75,82860001
LL+IM		41893,25	322546		129,8830244
Toplam					205,7116244

Model 1 Düz Köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  $\sigma_{\text{Çekme}} = 190,53 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}} = 205,71 \text{ MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.2 Model-2 R=60 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=60m kurbulu olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.21 Model 2 R= 60 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.14 R=60 m yatay kavisli köprü yükleri ve momentleri

	CE	Moment CE	Rüzgar yükü	Rzgar vükü LL	Moment Wind	Fren Yüğü	Moment FFV
Model 2 R=60 m	118,6 kN	217,1 kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Çizelge 4.14'de alınan yükler; taşıt teker aralığı 5 m sabit alınarak sisteme etki ettirilmiştir. Hareketli yüklerde ise; yükler yine 5 er metre aralıklarla yükler tekerlere göre paylaştırılarak moment ve kuvvet olarak diğer modellerde de dahil olmak üzere SAP 2000'de sisteme dahil edilmiştir.

Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momenleri aynı olduğundan atalet

moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.15 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 2)

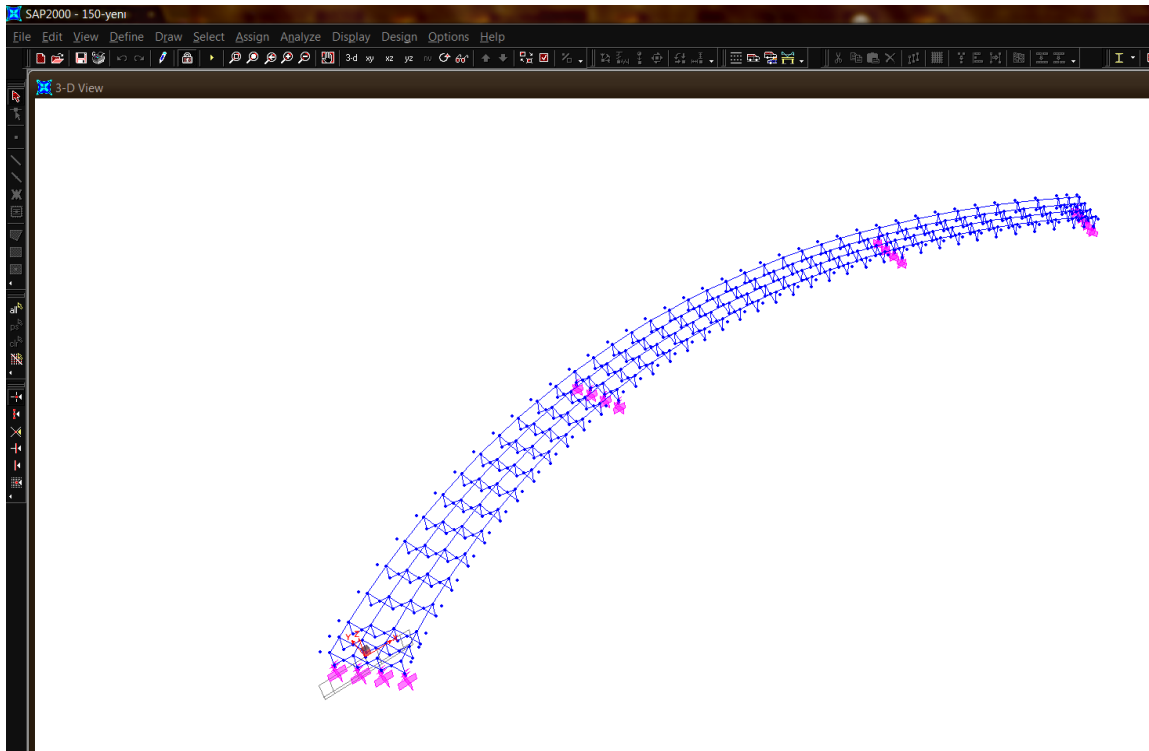
Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
$W_1$	323124	cm <sup>3</sup>	$W_1$	308770	cm <sup>3</sup>
$W_2$	322546	cm <sup>3</sup>	$W_2$	247888	cm <sup>3</sup>
$W_3$	283622	cm <sup>3</sup>	$W_3$	220576	cm <sup>3</sup>
<b>Yükler</b>		<b>M<sub>max</sub></b>	<b>V<sub>max</sub></b>		
<b>Dead Linearadd</b>		23445,35	1579,2		
<b>Live</b>		51534,2	3451,86		

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	23445,35			308770	75,93143764
<b>LL+IM</b>		51534,2	323124		159,4873795
<b>Toplam</b>					235,4188171
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	23445,35			247888	94,58041535
<b>LL+IM</b>		51534,2	322546		159,7731796
<b>Toplam</b>					254,353595

Model 2 R=60 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  $\sigma_{\text{Çekme}}=235,41\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=254,35\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.3 Model-3 R=150 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=150 m kurbli olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.22 Model 3 R= 150 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.16 R=150 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>010</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 3 R=150 m	47 kN	86, kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Çizelge 4.16'de alınan yükler; taşıt teker aralığı 5 m sabit alınarak sisteme etki ettirilmiştir. Hareketli yüklerde ise; yükler yine 5 er metre aralıklarla yükler tekerlere göre paylaştırılarak moment ve kuvvet olarak diğer modellerde de dahil olmak üzere SAP 2000'de sisteme dahil edilmiştir.

Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momentleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1'de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.17 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 3)

Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
W <sub>1</sub>	323124	cm <sup>3</sup>	W <sub>1</sub>	308770	cm <sup>3</sup>
W <sub>2</sub>	322546	cm <sup>3</sup>	W <sub>2</sub>	247888	cm <sup>3</sup>
W <sub>3</sub>	283622	cm <sup>3</sup>	W <sub>3</sub>	220576	cm <sup>3</sup>

Yükler	Mmax	Vmax
Dead Linearadd	25544,74	1521,83
Live	49664,4	3506,6

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	21002,1			308770	68,01859
LL+IM		49664,4	323124		153,7007
<b>Toplam</b>					<b>221,7193</b>

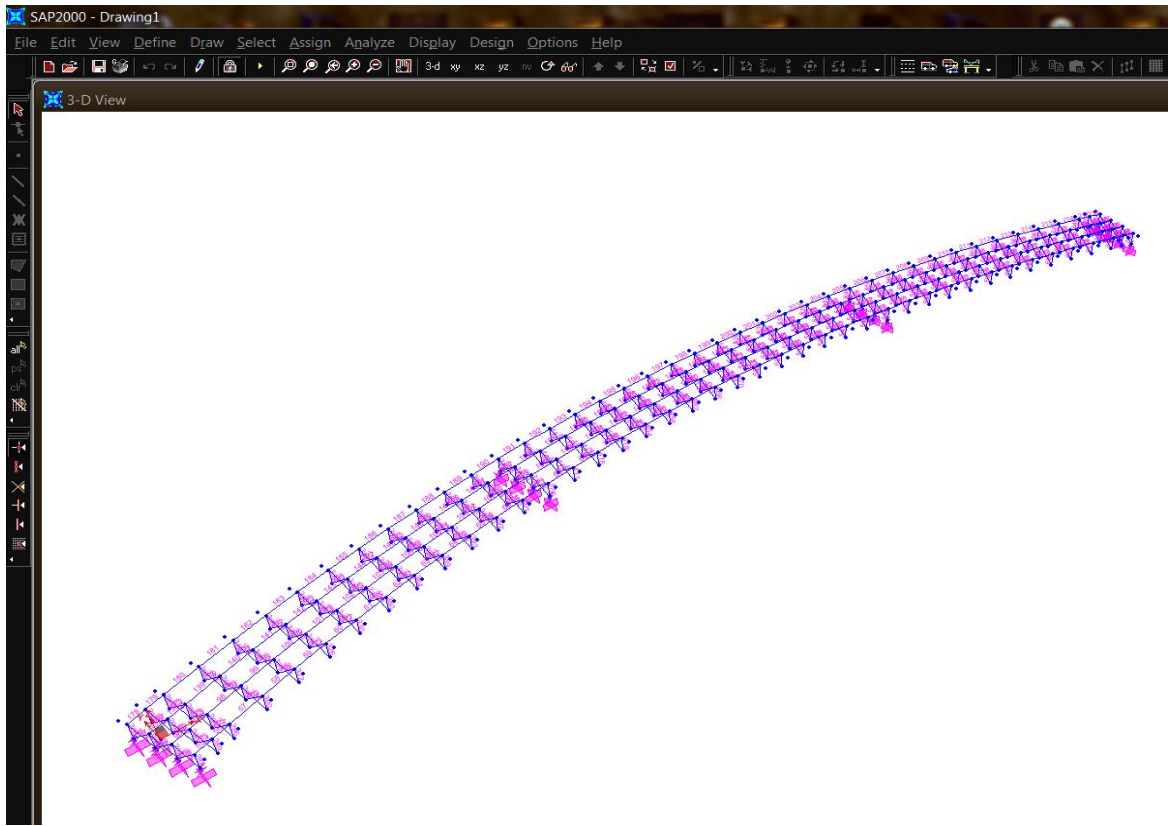
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	21002,1			247888	84,72415
LL+IM		49664,4	322546		153,9762
<b>Toplam</b>					<b>238,7003</b>



Model 3 R=150 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=221,71\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=238,7\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.4 Model-4 R=300 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=150 m kurbolu olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.23 Model 4 R= 300 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.18 R=300 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>ülü</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 4 R=300 m	23 kN	43, kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Çizelge 4.18’de alınan yükler; taşıt teker aralığı 5 m sabit alınarak sisteme etki ettirilmiştir. Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momenleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 4)

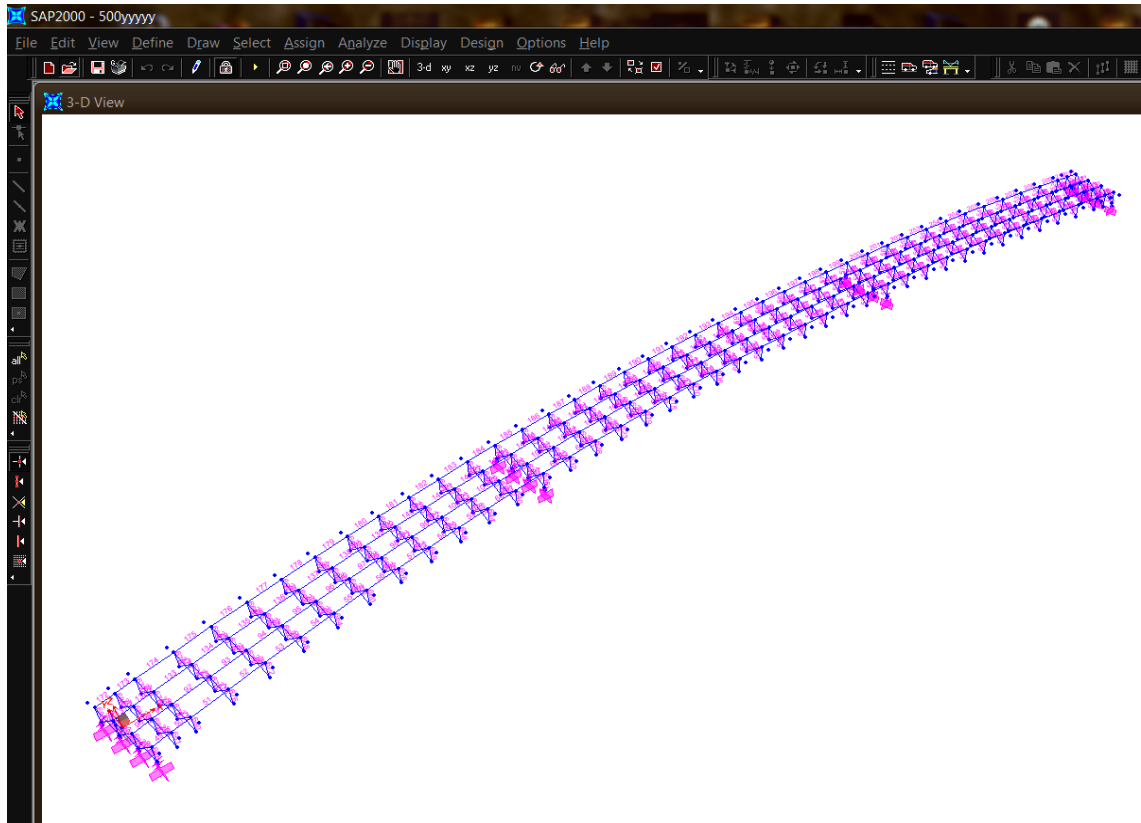
Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
W <sub>1</sub>	323124	cm <sup>3</sup>	W <sub>1</sub>	308770	cm <sup>3</sup>
W <sub>2</sub>	322546	cm <sup>3</sup>	W <sub>2</sub>	247888	cm <sup>3</sup>
W <sub>3</sub>	283622	cm <sup>3</sup>	W <sub>3</sub>	220576	cm <sup>3</sup>
<b>Yükler</b>		<b>Mmax</b>	<b>Vmax</b>		
<b>Dead Linearadd</b>		19647,8	1334		
<b>Live</b>		46109,5	3255,65		

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	19647,83			308770	63,632574
<b>LL+IM</b>		46109,5	323124		142,69909
<b>Toplam</b>					206,33166
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	19647,83			247888	79,260916
<b>LL+IM</b>		46109,5	322546		142,9548
<b>Toplam</b>					222,21572

Model 4 R=300 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=206,33\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=222,21\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.5 Model-5 R=500 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=150 m kurbli olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.24 Model 5 R= 500 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.20 R=500 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>üü</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 5 R=500 m	14kN	26,1kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğı belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin

belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momentleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.21 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 5)

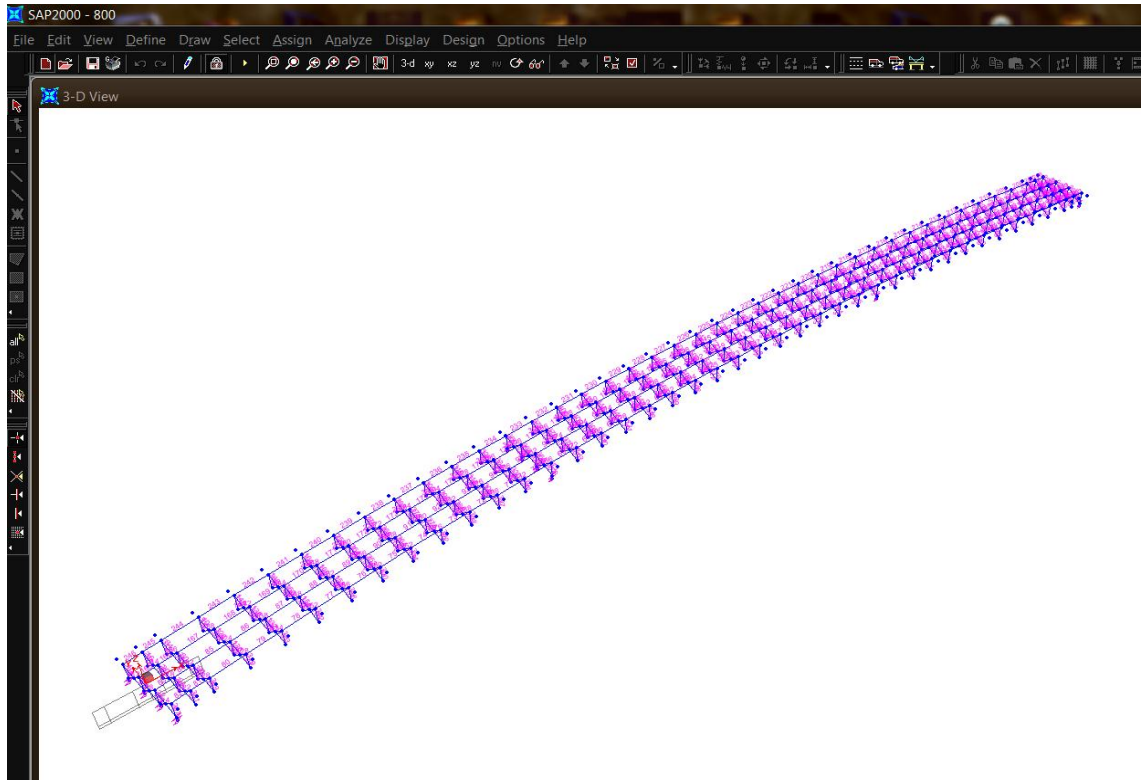
Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
$W_1$	323124	cm <sup>3</sup>	$W_1$	308770	cm <sup>3</sup>
$W_2$	322546	cm <sup>3</sup>	$W_2$	247888	cm <sup>3</sup>
$W_3$	283622	cm <sup>3</sup>	$W_3$	220576	cm <sup>3</sup>
<b>Yükler</b>		<b>Mmax</b>	<b>Vmax</b>		
<b>Dead Linearadd</b>		18975,1	1318,15		
<b>Live</b>		44285,8	3182,07		

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	18975,1			308770	61,4538
<b>LL+IM</b>		44285,8	323124		137,055
<b>Toplam</b>					198,509
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	18975,1			247888	76,547
<b>LL+IM</b>		44285,8	322546		137,301
<b>Toplam</b>					213,848

Model 5 R=500 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=198,51\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=213,848\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.6 Model-6 R=800 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=800 m kurbli olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4. 25 Model 6 R= 800 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.22 R=800 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>ülü</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 6 R=800 m	8, kN	16, kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğı belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit

özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momenleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.23 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 6)

Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
W <sub>1</sub>	323124	cm <sup>3</sup>	W <sub>1</sub>	308770	cm <sup>3</sup>
W <sub>2</sub>	322546	cm <sup>3</sup>	W <sub>2</sub>	247888	cm <sup>3</sup>
W <sub>3</sub>	283622	cm <sup>3</sup>	W <sub>3</sub>	220576	cm <sup>3</sup>

Yükler	Mmax	Vmax
Dead Linearadd	19208,4	1365,17
Live	43842,9	3288,02

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	19208,4			308770	62,2093
LL+IM		43842,9	323124		135,684
<b>Toplam</b>					<b>197,894</b>

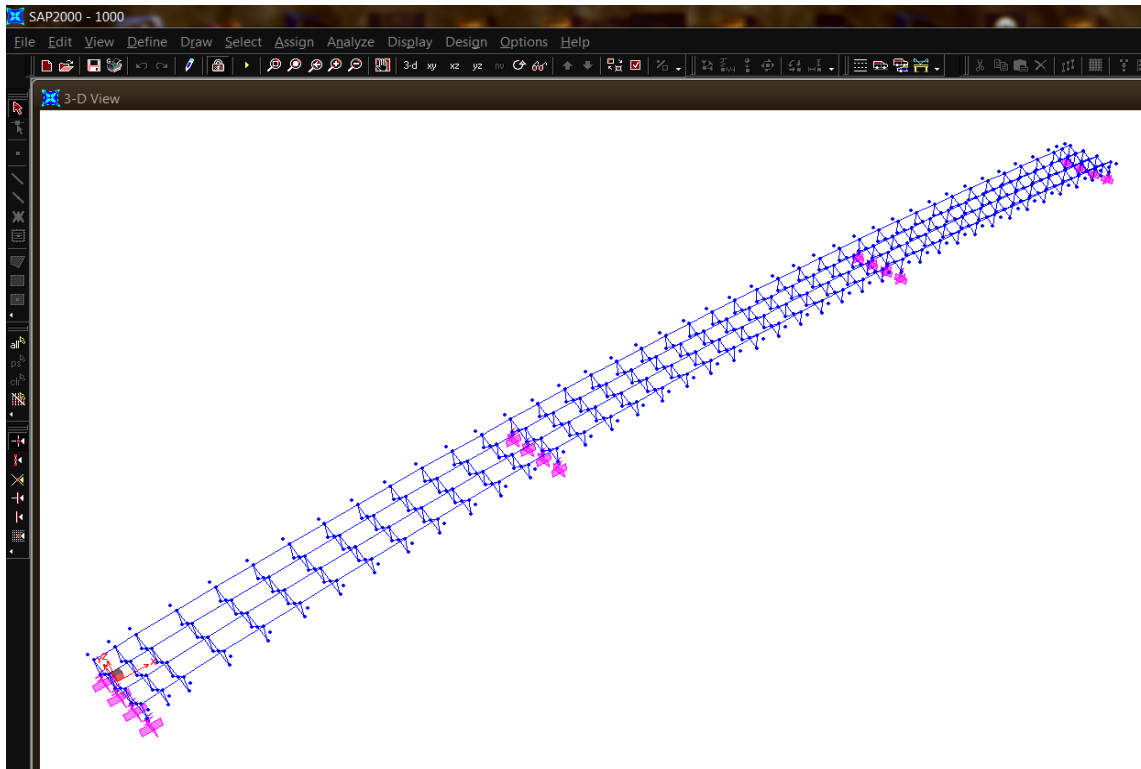
  

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	19208,4			247888	77,4881
LL+IM		43842,9	322546		135,927
<b>Toplam</b>					<b>213,415</b>

Model 6 R=800 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=197,89\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=213,415\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.7 Model-7 R=1000 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=1000 m kurbli olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.26 Model 7 R= 1000 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.24 R=1000 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>atı</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 7 R=1000 m	7, kN	13, kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit

özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momenleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.25 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 7)

Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
W <sub>1</sub>	323124	cm <sup>3</sup>	W <sub>1</sub>	308770	cm <sup>3</sup>
W <sub>2</sub>	322546	cm <sup>3</sup>	W <sub>2</sub>	247888	cm <sup>3</sup>
W <sub>3</sub>	283622	cm <sup>3</sup>	W <sub>3</sub>	220576	cm <sup>3</sup>

Yükler	Mmax	Vmax
Dead Lin	19044,7	1358,6
Live	43769,7	3376,9

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	19044,7			308770	61,6792
LL+IM		43769,7	323124		135,458
<b>Toplam</b>					<b>197,137</b>

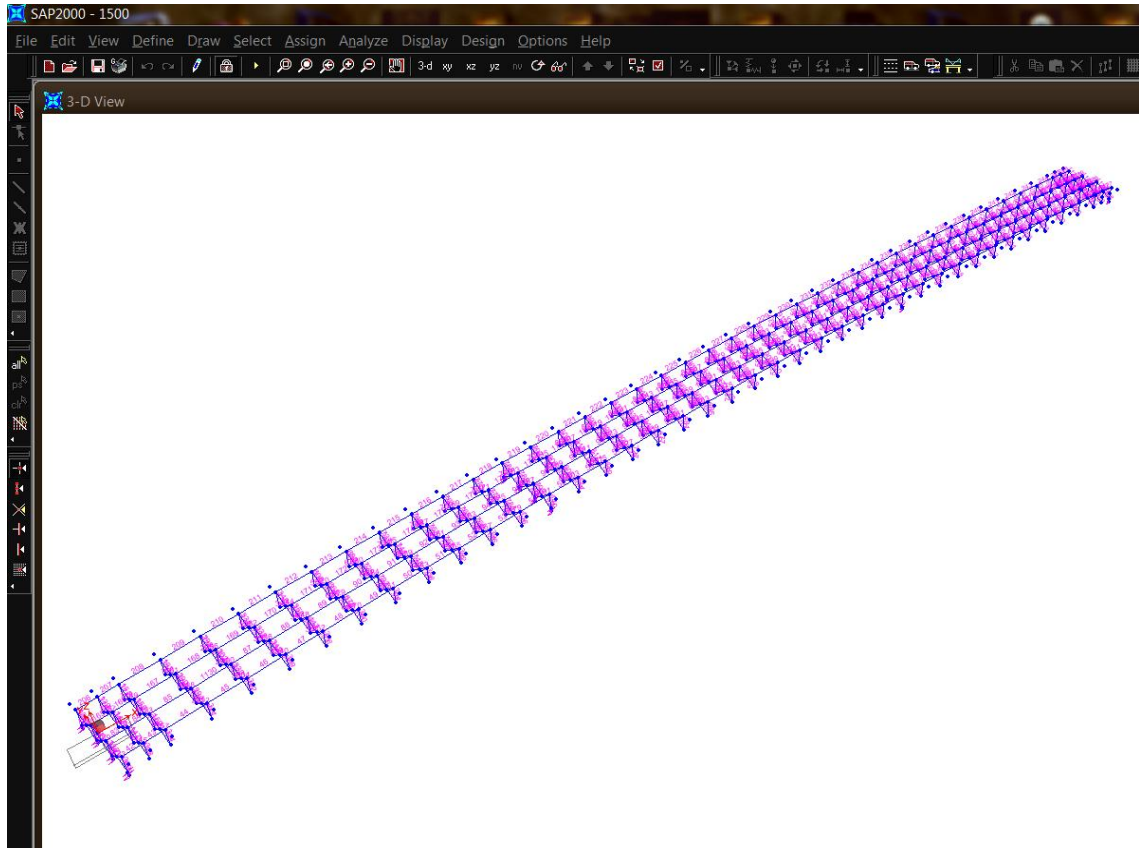
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
Dead	19044,7			247888	76,8278
LL+IM		43769,7	322546		135,701
<b>Toplam</b>					<b>212,528</b>

Model 7 R=1000 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=197,13\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=212,52\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.



#### 4.3.10.8 Model-8 R=1500 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=1000 m kurbolu olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.27 Model-8 R= 1500 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.26 R=1500 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>üü</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yükü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 8 R=1500 m	4 kN	8,7 kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Sistem analizi yapıldığında maksimum, M<sub>280-60</sub> kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit

özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momenleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.27 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 8)

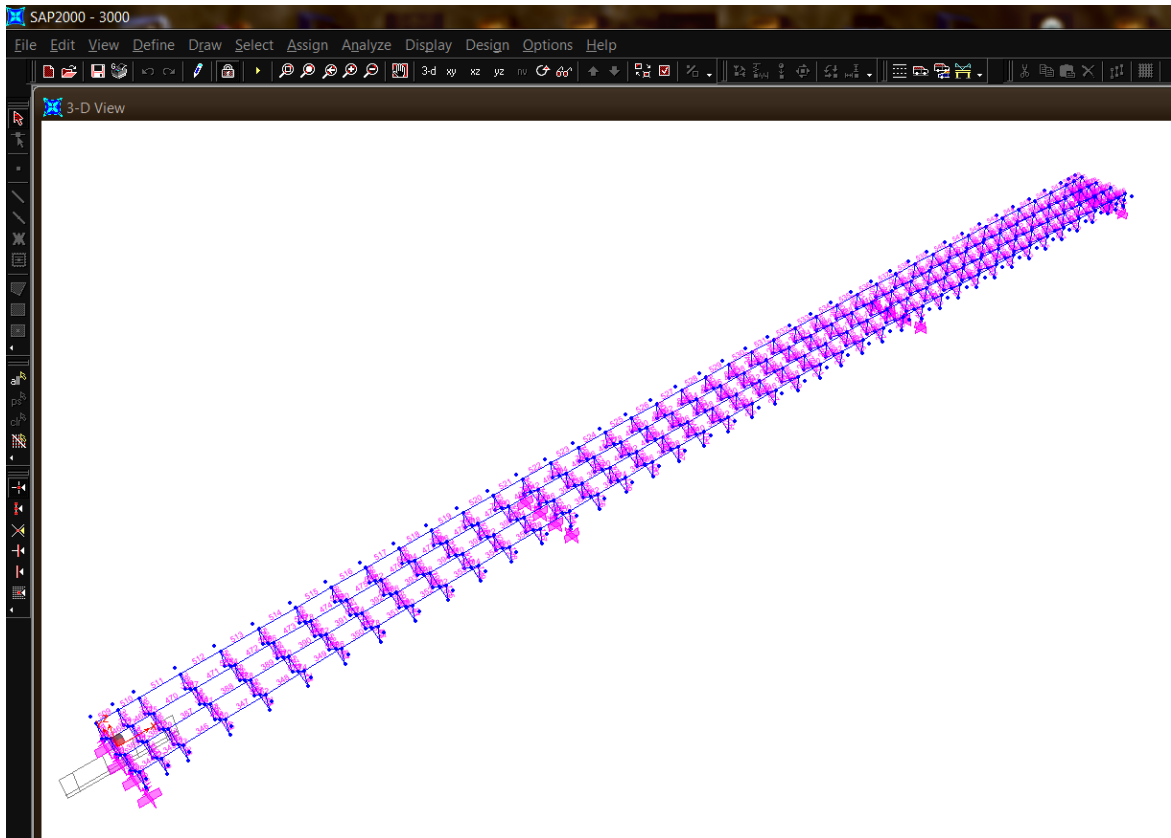
Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
W <sub>1</sub>	323124	cm <sup>3</sup>	W <sub>1</sub>	308770	cm <sup>3</sup>
W <sub>2</sub>	322546	cm <sup>3</sup>	W <sub>2</sub>	247888	cm <sup>3</sup>
W <sub>3</sub>	283622	cm <sup>3</sup>	W <sub>3</sub>	220576	cm <sup>3</sup>
<b>Yükler</b>			<b>Mmax</b>	<b>Vmax</b>	
<b>Dead Linearadd</b>			18898,3	1356,42	
<b>Live</b>			42722	3305,16	

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	18898,3			308770	61,205
<b>LL+IM</b>		42722	323124		132,216
<b>Toplam</b>					193,421
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	MD kNm	MLL+I kNm	W(n) cm <sup>3</sup>	W(3n) cm <sup>3</sup>	Gerilme Mpa
<b>Dead</b>	18898,3			247888	76,2371
<b>LL+IM</b>		42722	322546		132,452
<b>Toplam</b>					208,69

Model 8 R=1500 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=193,42\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=208,69\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.3.10.9 Model-9 R=3000 m yatay kavisli köprü tasarımı

Düz olarak tasarlanan köprü R=3000 m kurbolu olarak merkezkaç kuvveti dahil edilerek hesaplamaları ve analizi yapılmıştır.



Şekil 4.28 Model-9 R= 3000 m yatay kavisli köprü tasarımı

Çizelge 4.28 R=3000 m yatay kavisli köprü yükleri

	Merkezkaç kuvvet	Merkezkaç Moment	Rüzgar yükü <sub>ülü</sub>	Rüzgar yükü <sub>LL</sub>	Rüzgar yükü Momenti	Fren Yüğü	Moment <sub>FREN</sub>
Model 9 R=3000 m	2, kN	4, kN/m	9,89 kN/m	49,45 kN	13,35 kNm	69,1 kN	126,4 kN/m

Sistem analizi yapıldığında maksimum,  $M_{280-60}$  kirişinin bulunduğu mesnet bölgelerinde oluştuğu belirlenmiştir. Maksimum moment oluşan yerdeki malzeme kesit özelliklerinden faydalanılarak kompozit kesit atalet momenti köprüdeki gerilmelerin belirlenebilmesi için hesaplanmıştır. Kesit ve atalet momentleri aynı olduğundan atalet moment hesabı tekrarlanmamış, Model 1’de kullanılan atalet momentleri kullanılarak gerilmeler hesaplanmıştır.

Çizelge 4.29 Kompozit kesitin gerilme hesabı (Model 9)

Kompozit Kesit (n) - Sünme yok			Kompozit Kesit (3n) - Sünme var		
$W_1$	323124	cm <sup>3</sup>	$W_1$	308770	cm <sup>3</sup>
$W_2$	322546	cm <sup>3</sup>	$W_2$	247888	cm <sup>3</sup>
$W_3$	283622	cm <sup>3</sup>	$W_3$	220576	cm <sup>3</sup>
<b>Yükler</b>		<b>Mmax</b>	<b>Vmax</b>		
<b>Dead Linearadd</b>		<b>18758,6</b>	<b>1358,42</b>		
<b>Live</b>		<b>42422,2</b>	<b>3330,24</b>		

Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Çekme Gerilmesi:					
Yükler	kNm	kNm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	Mpa
<b>Dead</b>	18758,6			308770	60,7527
<b>LL+IM</b>		42422,2	323124		131,288
<b>Toplam</b>					192,04
Çelik Kesitte Oluşan Maksimum Basınç Gerilmesi:					
Yükler	kNm	kNm	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	Mpa
<b>Dead</b>	18758,6			247888	75,6738
<b>LL+IM</b>		42422,2	322546		131,523
<b>Toplam</b>					207,197

Model 9 R=3000 m kavisli köprü için maksimum gerilemeler mesnetlerde;  
 $\sigma_{\text{Çekme}}=192,04\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\text{Basınç}}=207,2\text{MPa}$  olarak hesaplanmıştır.

## BÖLÜM 5

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada daha önce inşaatı yapılmış; 60+75+60 m açıklıklı İdemli-3 Viyadüğü esas alınarak oluşturulan modellerin AASHTO Standartlarına uygun bilgisayar destekli analizi yapılmıştır. Çalışmada; ölü yükler, hareketli yükler, sıcaklık, rüzgâr, merkezkaç, fren kuvvetleri de göz önüne alınmıştır. Mevcut çeşitli kombinasyonlar halinde bu yükler sisteme etki ettirilmiştir.

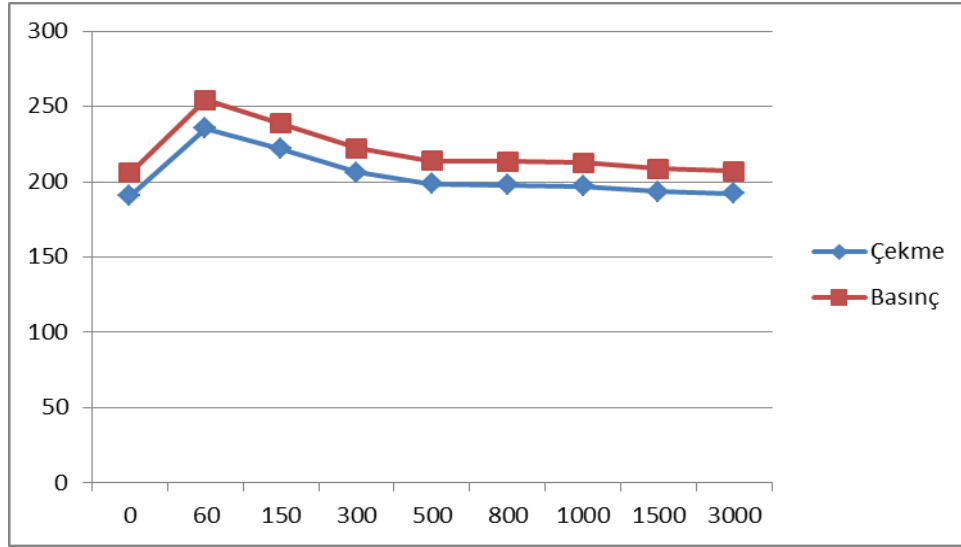
Sistem davranışlarını anlayabilmek için, 9 farklı köprü modeline farklı yarıçaplarda yatay kavislilik verilerek bazı yorumlar yapılmıştır. Bunu yaparken köprü uzunluğu, düz köprü dışındaki yükler, çelik özellikleri ve açıklık kurp uzunlukları sabit tutulmuştur.

Oluşturulan modellerin analizi ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen gerilmeler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Gerilmeler

	$\sigma_{\text{Çekme}}$ (Mpa)	$\sigma_{\text{Basınç}}$ (Mpa)
Model 1 Düz Köprü	190,52	205,71
Model 2 R=60 m	235,42	254,35
Model 3 R= 150 m	221,72	238,7
Model 4 R= 300 m	206,33	222,21
Model 5 R= 500 m	198,5	213,85
Model 6 R= 800 m	197,8	213,42
Model 7 R= 1000 m	197,14	212,5
Model 8 R= 1500 m	193,42	208,69
Model 9 R= 3000 m	192,04	207,19

Maksimum çekme ve basınç gerilmeleri Model 2’de elde edilmiştir. Model 4’ten sonra yani köprü yatay kavisi  $R=300$  m’den sonra köprü davranışı düz köprüye yaklaşmaktadır. Bunun yanı sıra çekme ve basınç gerilmeleri benzer bir eğri düzenini takip etmektedir.



Şekil 5.1 Farklı yarıçaplı köprü modellerinin çekme ve basınç gerilmeleri

Model 2’ de hesaplanan çekme gerilme değeri, düz köprüdeki çekme gerilme değerinden %23,56 daha fazladır. Model 2 basınç gerilme değeri ise düz köprü basınç gerilmesinden %23,64 daha fazladır. Model 2 ile Model 1 arasındaki %23,56 ‘lık farkı merkezkaç kuvvetinin büyüklüğü etkilemiştir.

Model 1 düz köprü çekme gerilmesi ile Model 9  $R=3000$  m kavisli köprü çekme gerilme değeri arasında %0,79’luk bir fark bulunmuştur. Bu da  $R=3000$  m yatay kavise sahip köprünün düz köprü davranışı ile aynı davranışa sahip olduğunu göstermiştir.

Yapılan çalışma sonucunda ayrıca,  $R=300$  m yarıçaptan daha küçük çaplardaki köprülerde ve yollarda araç hız limitlerinin göz önünde bulundurulması gerektiği saptanmıştır. Böylece; McElwain’in deneysel türetilmiş canlı yük dağıtım faktörlerini elde etmek için kıvrımlı, çelik I kiriş köprülerin saha testleri sonucu ulaştığı sonuçla aynı görüşe varılmıştır.

Kavisli karayolu yapılarında yapılması düşünölen kavisin yarıçapları için, yol kenarlarında kurba giriş hız limitlerinin belirtilmesi önem kazanmaktadır.

Çalışmaların doktora aşamasında deneysel olarak da değeriendirilmesi yapılabilecektir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Davidson J.S., Abdalla R.S and Madhavan M., 2002, Design and Construction of Modern Curved Bridges, UTCA, Alabama.
- Kim, W.S., Laman, J.A. and Linzell, D.G., 2007, Live Load Radial Moment Distribution for Horizontally Curved Bridges, ASCE, 736.
- Nevling, D., Linzell, D., and Laman, J., 2006, Examination of Level of Analysis Accuracy for Curved I-Girder Bridges through Comparisons to Field Data, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 160.
- Doust, S.E., 2011, Extending Integral Concepts to Curved Bridge Systems, Degree of Doctor of Philosophy, University of Nebraska, Lincoln.
- Davidson J.S., Abdalla R.S. and Madhavan M., 2004, Stability of Curved Bridges During Construction, UTCA, Alabama, 03228.
- Linzell, D., Hall, D. and White, D., 2004, Historical Perspective on Horizontally Curved I Girder Bridge Design in the United States, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 218.
- Hall, D.H., Grubb, M.A., Yoo, C.H., 1998, Improved Design Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges, Alabama and Pennsylvania, NCHRP Project 12-38, 102.
- Chavel, B.W., 2008, Construction and Detailing Methods of Horizontally Curved Steel I-Girder Bridges, University of Pittsburgh, Pittsburgh.
- Linzell, D., How Much Influence does Construction Have on Curved steel Bridges Results From Experimental and Analytical Studies, Pennsylvania state University, IBC-00-58.



Çağrı, Ö., 2007, Behavior and Analysis of a Horizontally Curved and Skewed I-Girder Bridge, Georgia Institute of Technology, Georgia.

Kulicki J.M., Wassef W.G., Smith C., Johns K., 2005, AASHTO-LRFD Design Example Horizontally Curved Steel I-Girder Bridge, Harrisburg, Pennsylvania, Project No. NCHRP 12-52.

Linzell, D., Chen A., Sharafbayani M., Seo, J., Nevling, D., Jaissa-Ard T., Ashour O. and Larson, T.D., 2010, Guidelines for Analyzing Curved and Skewed Bridges and Designing Them for Construction Final Report, Pennsylvania Department of Transportation, Project No. PSU-009.

AASHTO (1998). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2nd Edition with 1999, 2000 and 2001 Interims, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington D.C.

AASHTO (2003). Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges with Design Examples for I-Girder and Box-Girder Bridges, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington D.C.  
AASHTO (2004a).

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Edition, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington D.C.

AASHTO (2004b). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Edition with 2005 Interims, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington D.C.

AASHTO (2007). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition, American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington D.C.