

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KUTU KESİTLİ KARAYOLU KÖPRÜLERİNDE EN KESİT ŞEKLİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAKİNE BOSTAN

**HAZİRAN 2019
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KUTU KESİTLİ KARAYOLU KÖPRÜLERİNDE EN KESİT ŞEKLİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ**

Sakine BOSTAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 05 / 2019

Tezin Savunma Tarihi : 26 / 06 / 2019

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Volkan KAHYA

Trabzon 2019

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Sakine BOSTAN tarafından hazırlanan

KUTU KESİTLİ KARAYOLU KÖPRÜLERİNDE EN KESİT ŞEKLİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ


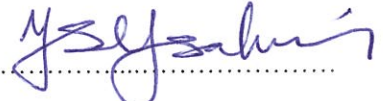

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2019 gün ve 1806 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Üye : Prof. Dr. Talat Ş. ÖZŞAHİN

Üye : Prof. Dr. Volkan KAHYA


.....

.....

.....

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Kutu Kesitli Karayolu Köprülerinde En Kesit Şeklinin Dinamik Davranışa Etkisi” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasını tamamlamamda desteğini, ilgisini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan Prof. Dr. Volkan KAHYA’ya minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamı inceleyen ve görüşlerini benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Ragıp ERDÖL, Prof. Dr. Talat Şükrü ÖZŞAHİN ve Arş. Gör. Dr. Barbaros ATMACA’ya teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca her türlü konuda desteklerini esirgemeyen çok kıymetli ve saygıdeğer annem ve babam başta olmak üzere, sevgili kardeşlerime en kalbi şükranlarımı sunarım.

Sakine BOSTAN

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kutu Kesitli Karayolu Köprülerinde En Kesit Şeklinin Dinamik Davranışa Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Volkan KAHYA'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20.05.2019

Sakine BOSTAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1 GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kutu Kesitli Köprüler Hakkında Genel Bilgiler	1
1.3. Kutu Kesitli Kirişlerin Avantaj ve Dezavantajları	6
1.4. Kutu Kirişli Köprülerin Yapım Yöntemleri.....	8
1.4.1. Dengeli Konsol Yöntemi	9
1.4.2. İtme Sürme Yöntemi	9
1.4.3. Açıklık Boyunca Yerinde Dökümle İnşa Yöntemi	10
1.4.3.1. Tam İskele Yöntemi.....	10
1.4.3.2. Hareketli İskele Yöntemi	11
1.4.4. Gezici Kalıplı Segmental İnşa Yöntemi	11
1.5. Literatür Taraması.....	12
1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	17
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	18
2.1. Köprü Modelinin Tanıtılması	18
2.2. Sistem Modelinin CSiBridge Programında Oluşturulması.....	19
2.2.1. Birimler	20
2.2.2. Yol Platformu ve Şeritlerinin Oluşturulması	21
2.2.3. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması.....	23
2.2.4. Kesit Özelliklerinin Tanımlanması	24
2.2.4.1. Kolon Kesiti Tanımlaması	25

2.2.4.2.	Başlık Kirişi Kesiti Tanımlaması.....	26
2.2.4.3.	Tabliye Özelliklerinin Tanımlanması	27
2.3.	Mesnet Koşullarının Tanımlanması	37
2.3.1.	Elastomerik Mesnetlerin Tanımlanması	37
2.3.2.	Kenar Ayakların Tanımlanması	38
2.3.3.	Yapı-Zemin Bağlantısı Tanımlaması	39
2.3.4.	Orta Ayakların Tanımlanması.....	40
2.4.	Öngerilme Tendonlarının Oluşturulması	48
2.5.	Taşıt Yüğü Analiz Durumlarının Modellenmesi	54
2.5.1.	Hareketli Katar Yüğü Analizi	56
2.8.	Kamyon Yüğü Analizi	58
3.	BULGULAR VE İRDELEME	66
3.1.	Modal Analiz Sonuçları	66
3.2.	Hareketli Yüğü Altında Dinamik Davranışa Ait Sonuçlar	71
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
5.	KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KUTU KESİTLİ KARAYOLU KÖPRÜLERİNDE EN KESİT ŞEKLİNİN DİNAMİK
DAVRANIŞA ETKİSİ

Sakine BOSTAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Volkan KAHYA

2019, 85 (Tez Sayfa)

Bu tez çalışması kapsamında, kutu kesitli betonarme karayolu köprülerinin dinamik davranışı üzerinde en kesit şeklinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, farklı en kesitli kirişlere sahip olan dört kutu kesitli köprü modellenmiş, modal ve dinamik analizleri yapılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kutu kesitli karayolu köprüleri ile ilgili çalışmalar, kutu kesitli köprüler ile ilgili genel bilgiler, kutu kesitli köprülerin yapısal davranışı ve kutu kesitli köprülerin yapım yöntemleri sunulmuştur. İkinci bölümde yapılan çalışmalara yer verilmektedir. Bu bölümde yapılan çalışmalar beş kısma ayrılmıştır. İlk kısımda, model köprü bütün özellikleriyle tanıtılmıştır. İkinci kısımda, sistem modelinin CSiBridge programında oluşturulmasına yer verilmiştir. Üçüncü kısımda, sisteme ait mesnet koşullarının tanımlaması yapılmıştır. Dördüncü kısımda, öngerilme tendonlarının model köprü için tanımlaması ve kesit içindeki yerleşimleri yapılmıştır. Son kısımda, hareketli katar yükü analizi ve kamyon yükü analizi olmak üzere iki tür taşıt yükü analiz durumlarının modellenmesi yapılmıştır. Üçüncü bölümde; yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular tablo ve grafiklerle sunulmuş ve irdelenmiştir. Bu bölümde modal analiz, öngerilmeli tendon yükü analizi, hareketli katar yükü analizi ve kamyon yükü analizi sonuçlarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve tezin devamı niteliğinde yapılabilecek çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur. Bu bölümü, kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Kutu kesitli köprü, En kesit etkisi, Dinamik davranış, CSiBridge

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF CROSS SECTIONAL SHAPE ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF BOX-GIRDER
HIGHWAY BRIDGES

Sakine BOSTAN

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Volkan KAHYA

2019, 85 Pages

In this thesis, the effect of cross-sectional shape on the dynamic behavior of box-sectional reinforced concrete highway bridges is investigated. For this purpose, four box-girder bridges with different cross-sections are modeled and their modal and dynamic analyzes are performed.

The thesis study consists of four chapters. In the first chapter, the studies about the box-section highway bridges, general information about box-section bridges, structural behavior and construction methods of box-section bridges are presented. The second part includes the studies done. The studies in this section are divided into five sections. In the first part, the model bridge is introduced with all its features. In the second part, the creation of the system model in the CSiBridge program is included. In the third section, definition of the support conditions of the system has been made. In the fourth part, the definition of the prestressed tendons for the model bridge and their placement in the section are made. At the last part, two types of vehicle load analysis cases are carried out, namely, moving load analysis and truck load analysis. In the third chapter, the findings obtained from the studies are presented in the form of tables and graphs, and discussions are made. In this section, the results of modal analysis, prestressed tendon load analysis, moving load analysis and truck load analysis are given. In the fourth chapter, the conclusions obtained from the thesis study and the suggestions that can be made as a continuation of the thesis are presented. This section is followed by references and resume.

Key Words: Box-girder bridge, Cross sectional effect, Dynamic behavior, CSiBridge

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tipik kutu giriş en kesiti.....	2
Şekil 2. Zaman içerisinde kutu giriş en kesitlerindeki	3
Şekil 3. Sclayn Köprüsü (Belçika)	3
Şekil 4. Geometrisine göre kutu kesitli girişler	5
Şekil 5. Kullanılan malzemeye göre kutu girişler	6
Şekil 6. Murray Nehri üzerinde Swanport köprüsü	8
Şekil 7. Planda kavisli kutu girişler, Fossedyke Köprüsü, Lincoln.....	8
Şekil 8. Dengeli konsol yöntemi	9
Şekil 9. İtme sürme yöntemi.....	10
Şekil 10. Tam iskele yöntemiyle yerinde döküm	10
Şekil 11. Hareketli iskele yöntemiyle yerinde döküm.....	11
Şekil 12. Gezici kalıplı segmental inşa yöntemi	12
Şekil 13. Çalışmada göz önüne alınan köprü modeli	18
Şekil 14. Köprü tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekilleri.....	19
Şekil 15. Yol platformunun oluşturulması	21
Şekil 16. Yol şeritlerinin oluşturulması.....	22
Şekil 17. Köprüde yol şeritlerinin görünümü	22
Şekil 18. Malzeme sınıfının eklenmesi	23
Şekil 19. C30 ve C40 beton malzeme özelliklerinin tanımlaması.....	24
Şekil 20. Kesit özellikleri kısmı	25
Şekil 21. Köprüde kolon en kesiti	25
Şekil 22. Kolon kesit özellikleri tanımlaması.....	26
Şekil 23. Başlık girişi en kesiti	26
Şekil 24. Başlık girişi kesit özellikleri tanımlaması	27
Şekil 25. KK-1 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli	28
Şekil 26. Kutu Kesit 1 için seçilen tabliye tipi	28
Şekil 27. KK-1 tabliyesi özelliklerinin girilmesi.....	29
Şekil 28. Kutu Kesit 2, 3 ve 4 için seçilen tabliye tipi	30
Şekil 29. KK-2 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm).....	31

Şekil 30	KK-2 tabliyesi özellikleri	32
Şekil 31	KK-3 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm).....	33
Şekil 32	KK-3 Tabliyesi özellikleri.....	34
Şekil 33	KK-4 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm).....	35
Şekil 34	KK-4 tabliyesi özellikleri	36
Şekil 35	Elastomerik mesnetlerin kolon ve başlık kirişi arasındaki yerleşimi ...	37
Şekil 36	Elastomerik mesnet yapısı.....	38
Şekil 37	Elastomerik mesnet tanımlaması.....	38
Şekil 38	Kenar ayak detayı.....	39
Şekil 39.	Kenar ayak tanımlaması	39
Şekil 40.	Yapı- zemin bağlantısı tanımlaması	40
Şekil 41.	Orta ayak tanımlaması.....	41
Şekil 42.	Orta ayak oluşturma işlemi	41
Şekil 43.	Açıklık mesafelerinin belirlenmesi	42
Şekil 44.	Yol platform mesafelerinin belirlenmesi.....	43
Şekil 45.	Köprünün 50. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması	44
Şekil 46.	Köprünün 100. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması	45
Şekil 47.	Köprünün 150. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması	45
Şekil 48.	Köprünün 200. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması	46
Şekil 49.	Kutu kesit dilim kalınlığının belirlenmesi.....	46
Şekil 50.	Kolonların eşit dilimlere bölünmesi.....	47
Şekil 51.	Kolonların eşit dilimlere bölünmesi	47
Şekil 52.	Model köprünün son halinin CSiBridge programındaki 3 boyutlu görünümü	48
Şekil 53.	Göz önüne alınan kiriş kesitlerindeki tendon yerleşimleri.....	48
Şekil 54.	Öngerme yük bileşeninin oluşturulması.....	49
Şekil 55.	Tendon 1'in tanımlanması.....	49
Şekil 56.	Tendon 1 için düz tendon seçilmesi	50
Şekil 57.	Tendonun köprü içerisindeki yerleşim mesafesinin belirlenmesi	51
Şekil 58.	Tendonun köprü içerisindeki yerleşim mesafesinin belirlenmesi	51
Şekil 59.	Tendon 2'nin tanımlanması.....	52
Şekil 60.	Tendonların kesitteki yerleşimleri.....	53
Şekil 61.	KK-1 kirişli köprü modelinde tendonların görünüşü	54

Şekil 62.	Taşıt yüklemesi tanımlaması	55
Şekil 63.	AASHTO HS _n -44 tipi taşıt yüklemesi	55
Şekil 64.	Analizde kullanılacak taşıt sınıfının seçilmesi	56
Şekil 65.	HS _n -44 kamyonunun bit taşıt sınıfına atanması	56
Şekil 66.	Hareketli yük analizi durumunun oluşturulması	57
Şekil 67.	Analiz için kullanılan HS _n -44 taşıt yüklemesi.....	58
Şekil 68.	Kamyon analizinde kullanılacak taşıt yükleme durumları.....	59
Şekil 69.	Durum 1 için kamyon yüklemesi	60
Şekil 70.	Durum 1’de kamyonun köprü üzerindeki hareketi	60
Şekil 71.	Durum 2 için kamyon yüklemesi	61
Şekil 72.	Durum 2’de kamyonların köprü üzerindeki hareketi	61
Şekil 73.	Durum 3 için kamyon yüklemesi	62
Şekil 74.	Durum 3’te kamyonların köprü üzerindeki hareketi	62
Şekil 75.	Durum 4 için kamyon yüklemesi	63
Şekil 76.	Durum 4’te kamyonların köprü üzerindeki hareketi	63
Şekil 77.	Durum 5 için kamyon yüklemesi	64
Şekil 78.	Durum 5’te kamyonların köprü üzerindeki hareketi	64
Şekil 79.	Durum 6 için kamyon yüklemesi	65
Şekil 80.	Durum 6’da kamyonların köprü üzerindeki hareketi	65
Şekil 81.	KK-1 köprü modeli için ilk altı mod şekli	69
Şekil 82.	KK-1 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları	72
Şekil 83.	KK-2 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları	73
Şekil 84.	KK-3 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları	74
Şekil 85.	KK-4 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları	75
Şekil 86.	Durum-1: Maksimum burulma momentleri	76
Şekil 87.	Durum-1: Minimum burulma momentleri	77
Şekil 88.	Durum 2: Maksimum burulma momentleri	77
Şekil 89.	Durum 2: Minimum burulma momentleri.....	78
Şekil 90.	Durum 3: Maksimum burulma momentleri	78
Şekil 91.	Durum 3: Minimum burulma momentleri.....	79

Şekil 92.	Durum 4: Maksimum burulma momentleri	79
Şekil 93.	Durum 4: Minimum burulma momentleri.....	80
Şekil 94.	Durum 5: Maksimum burulma momentleri	80
Şekil 95.	Durum 5: Minimum burulma momentleri.....	81
Şekil 96.	Durum 6: Maksimum burulma momentleri	81
Şekil 97.	Durum 6: Minimum burulma momentleri.....	82



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. En uzun ana açıklıklı kutu kirişli köprüler	4
Tablo 2. Model köprüde kullanılan malzeme özellikleri	19
Tablo 3. Göz önüne alınan beton sınıfları için malzeme özellikleri	23
Tablo 4. KK-1 kesitli köprünün doğal frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri	66
Tablo 5. KK-2 kesitli köprünün doğal frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri	67
Tablo 6. KK-3 kesitli köprünün doğal frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri	68
Tablo 7. KK-4 kesitli köprünün doğal frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri	68
Tablo 8. Hareketli yük etkisiyle köprülerde meydana gelen en büyük ve en küçük normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti değerleri	76

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Isıl genleşme katsayısı
A	: Kutu kesitli kirişin kesit alanı
E	: Elastisite modülü
G	: Kayma modülü
I_{22}, I_{33}	: Atalet momenti
J	: Polar atalet momenti
KK-1	: Kutu Kesit 1
KK-2	: Kutu Kesit 2
KK-3	: Kutu Kesit 3
KK-4	: Kutu Kesit 4
R1	: Düşey eksen etrafında dönme
R2	: Boy kesit düzlemine dik eksen etrafında dönme
R3	: Açıklığa paralel eksen etrafında dönme
U1	: Düşey ötelenme
U2	: Boy kesit düzlemine dik ötelenme
U3	: Açıklık boyunca ötelenme
ν	: Poisson oranı
γ	: Birim hacim ağırlık

Bu listede gösterilmeyen semboller, tez içerisinde ilgili yerlerde tanımlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyanın en aktif deprem kuşaklarından birinde bulunan ülkemizde betonarme karayolu köprülerinin depremlerde hasar görmesi, can ve mal kaybının yanı sıra il, ilçe ve köylere ulaşımın aksamasına sebep olabilmektedir. Bundan dolayı, plan, proje ve yapım aşamaları önemli mühendislik bilgi ve tecrübesi gerektiren karayolu köprülerinin deprem gibi dinamik etkiler altındaki yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Son yıllarda, büyük açıklıklı köprülerin yapımında yüksek burulma rijitliğine sahip betonarme kutu kesitli kirişler sıklıkla tercih edilmektedir. Kutu kesitli kiriş köprüler karayolu üst geçitleri ve hafif demiryolu taşımacılığında sıklıkla kullanılmaktadır. Kutu kesitli kirişlerde üst başlık hem yol tabliyesi olarak kullanılmakta hem de düşey veya eğik gövde elemanlarına yüklerin aktarılması sağlanmaktadır. Klasik köprülerle karşılaştırıldıklarında kutu kesitli kiriş köprülerin titreşim etkilerine karşı daha dirençli oldukları bilinmektedir.

1.2. Kutu Kesitli Kiriş Köprüler Hakkında Genel Bilgiler

Kutu kesitli köprülerde ana kirişler, genellikle içi boş kutu şeklinde dikdörtgen veya yamuk en kesitlere sahiptir (Şekil 1). Kutu kirişler, öngerilmeli beton, çelik veya çelik-betonarme karma şeklinde inşa edilmektedir. Kutu kesitli kiriş köprüler, karayolu üst geçitleri ve hafif demiryolu taşımacılığında sıklıkla kullanılmaktadır. Kutu kesitli kiriş, ayrıca portal çerçeve köprüleri, kemer köprüler, eğik kablolu ve asma köprülerin bir parçası olabilir. Kutu kiriş tabliyeleri, planda düz, eğri veya kavisli olarak inşa edilebilirler. Yüksek burulma direnci nedeniyle kutu kirişler, özellikle eğri eksenli köprü yapıları için uygundur.



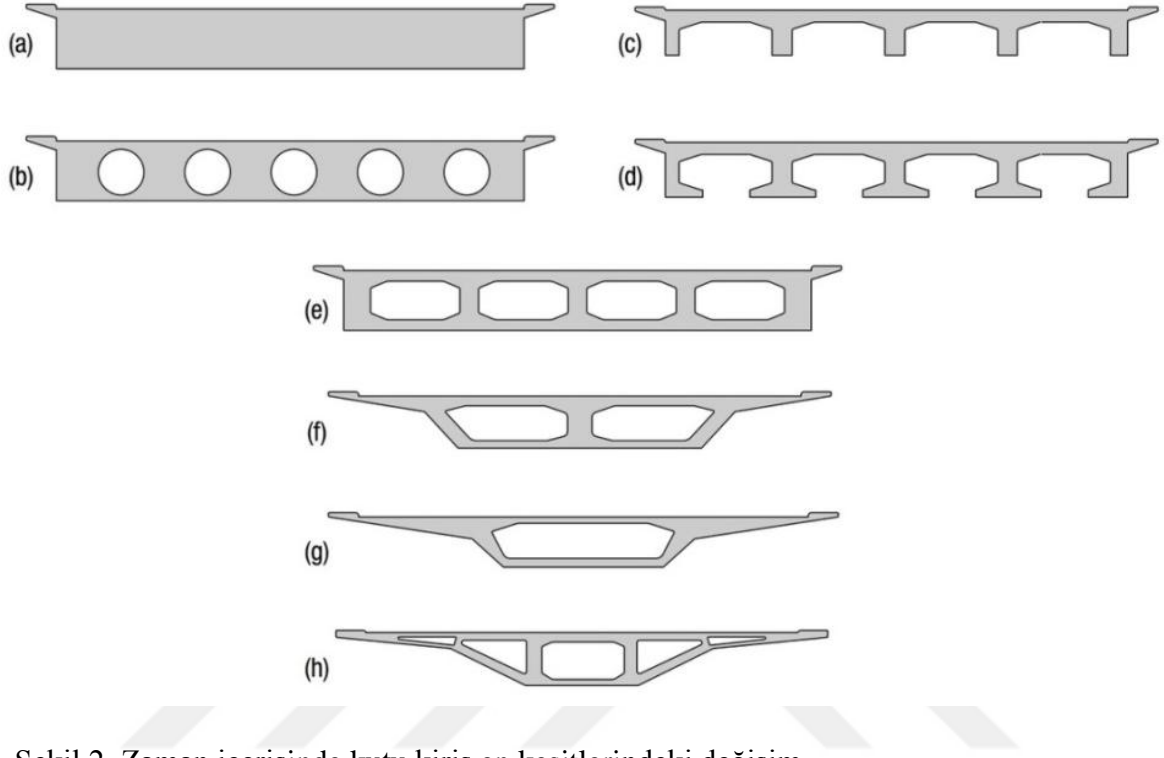
Şekil 1. Tipik kutu kiriş en kesiti

İlk kutu kiriş kesitinde, Şekil 2a-e’de görülen kutu bölümünden hafifçe konsollu tabliye levhaları bulunmaktaydı. Öngerilmeli betonun icadı ile konsol uzunluğu arttırılarak Şekil 2f-h’da görülen kesitleri elde etmek mümkün olmuştur. Konsol uzunluğunun artmasıyla kesitteki hücre sayısı azaltılmış ve bu sayede maliyet ve yapım süresinden ekonomi sağlanmıştır.

Yüksek dayanımlı öngerilme çeliklerinin geliştirilmesiyle birlikte kutu kesitli kirişler daha büyük açıklıkların geçilmesi için kullanılmaya başlanmıştır. İlk I-kesitli öngerilmeli beton köprüler 1920’lerin sonlarına doğru inşa edilmiş, 1945’ten sonra ise öngerilmeli beton kutu kesitli köprü inşası hız kazanmıştır. 1948’de Magnel tarafından Maas nehri üzerine yaptırılan Sclayn Köprüsü, 62,70m uzunluğa sahip öngerilmeli betondan inşa edilmiş iki açıklıklı ilk kutu kesitli kiriş köprüdür (Şekil 3).

Tabliyeyi oluşturan 3 ila 5 metre uzunluğundaki segmentlerin prefabrik veya yerinde dökme tekniği kullanılarak birleştirilmesiyle yapılan köprülerin inşası 1950’li yıllara uzanmaktadır. Bununla birlikte, son zamanlarda geleneksel yerinde beton dökümüyle yapımı gerçekleştirilen köprü inşaatı, yerini prefabrik segmentli köprü inşaatına

bırakmaktadır. Bunun en önemli sebebi, prefabrik segmentli köprü inşaatının hem inşa kalitesini yükseltmesi hem de yapım süresini kısaltmasıdır (Anagnostopoulou, 2009).



Şekil 2. Zaman içerisinde kutu kiriş en kesitlerindeki değişim



Şekil 3. Sclayn Köprüsü (Belçika)

1960’larda kutu kirişli köprülere olan ilgi hayli artmıştır. Ancak, 1970 yılında West Gate ve Cleddau köprüleri ile 1971’de Koblenz köprüsünün çökmesi bu popüleriteye ciddi bir darbe vurmuştur. 51 kişinin hayatını kaybetmesine neden olan bu olaylar dizisi, İngiltere’de Merrison Komitesinin kurulmasına ve çelik kutu kiriş davranışına yönelik yeni araştırmalar yapılması için önemli yatırımların önünü açmıştır. O zamandan beri konuya yönelik çalışmalar hız kesmeden devam etmiş; malzeme ve inşaa teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak kutu kesitli kiriş köprüler popüleritesini korumuştur. Tablo 1’de dünyadaki en büyük ana açıklığa sahip kutu kesitli köprüler sıralanmıştır.

Tablo 1. En uzun ana açıklıklı kutu kirişli köprüler

Sıra No	Köprü	Ülke	Ana Açıklık
1	Jacques Cartier Köprüsü	Kanada	334 m
2	Shibanpo Köprüsü	Çin	330 m
3	Stolmasundet Köprüsü	Norveç	301 m
4	Raftsundet Köprüsü	Norveç	298 m
5	Sundoya Köprüsü	Norveç	298 m
6	Beipanjiang Köprüsü	Çin	290 m
7	Sandsfjord Köprüsü	Norveç	290 m
8	Bras de la Plaine Köprüsü	Fransa	281 m
9	Ujina Köprüsü	Japonya	270 m
10	Sutong Köprüsü	Çin	268 m

Kutu kesitli kirişler farklı sınıflandırma kriterlerine tabi tutulabilir. Genel kabul olarak;

(a) geometrisine göre

- Basit tek hücreli kutu kirişler (Şekil 4a)
- Çubuk veya dikmeli tek hücreli kutu kirişler (Şekil 4b)
- Çift hücreli kutu kirişler (Şekil 4c)
- Kompozit çok hücreli kutu kirişler (Şekil 4d)

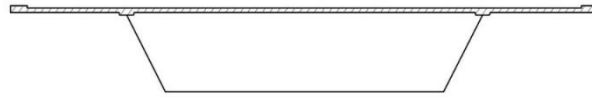
(b) kullanılan malzemeye göre

- Beton kutu kiriş (Şekil 5a)
- Çelik kutu kiriş (Şekil 5b)
- Kompozit kutu kiriş (Şekil 5c) ve

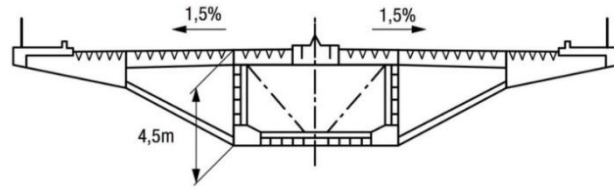
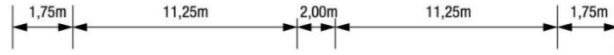
(c) güçlendirme tekniğine göre

- Betonarme kutu kirişler
- Öngerilmeli beton kutu kirişler

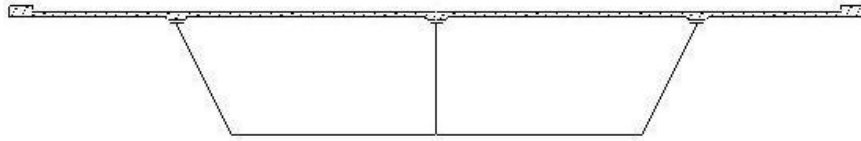
- Ardgermeli beton kutu kirişler
 - Segmental beton kutu kirişler
- olarak sınıflandırılabilirler.



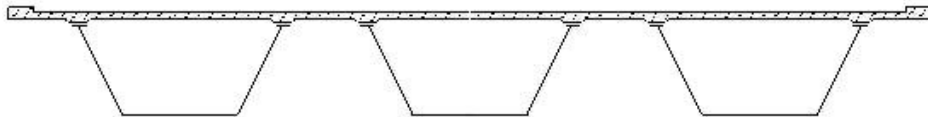
a) Tek hücreli kutu kirişleri



b) Eğimli dikmeleri olan tek hücreli kutu kirişler

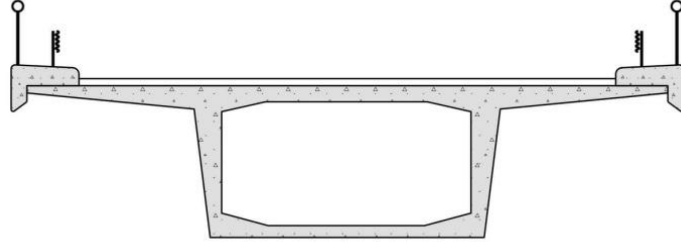


c) Çift hücreli kutu kirişler

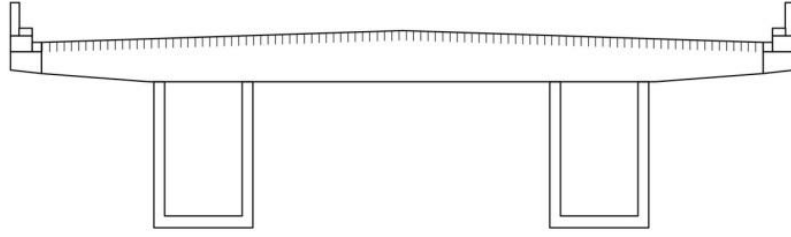


d) Kompozit çok hücreli kutu kirişler

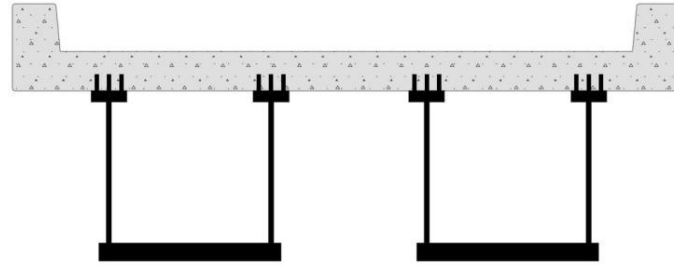
Şekil 4. Geometrisine göre kutu kesitli kirişler



a) Tipik tek hücreli betonarme kiriş en kesiti



b) Çelik kutu kiriş en kesiti



c) Kompozit kutu kiriş en kesiti

Şekil 5. Kullanılan malzemeye göre kutu kirişler

1.3. Kutu Kesitli Kirişlerin Avantaj ve Dezavantajları

Kutu kesitli kirişlerin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kutu kiriş, eşdeğer açık kesitli bir elemana kıyasla daha yüksek burulma rijitliğine sahiptir. Bu özellik, karayolu rampaları gibi planda kavisli yapılar için büyük avantaj sağlamaktadır. Planda doğrusal yapılarda ise eksantrik yüklerin etkili şekilde karşılanmasına ve enine doğrultuda yükün etkili bir şekilde dağıtılmasına katkı sağlar.

- b. Kutu kiriş, büyük başlık genişliklerine sahiptir. Artan başlık genişlikleri büyük açıklık/derinlik oranlarını mümkün kılar. Yükseklik ile ilgili bir kısıtlama varsa bu bir avantajdır. Ayrıca, kutu kesit kullanımı daha estetik ve ince yapıların inşasını sağlar.
- c. Kirişin içinde bulunan kapalı boşluk, gaz boruları, kablolar, su şebekeleri vb. tesisatın/ekipmanın yerleşimi için kullanılabilir. Bazı durumlarda, alt başlık da trafik geçişleri için ikinci bir tabliye olarak kullanılabilir.
- d. Kapalı şekli, plak kirişlerine göre korozyon direncinde daha verimli olmasını sağlar. Çünkü, açıktaki yüzey alanı büyük ölçüde azaltılmaktadır.
- e. Kutu kirişin bakımı daha kolaydır, çünkü iç boşluk doğrudan ulaşılabilir hale getirilebilmektedir.
- f. Farklı geometrilerde kutu kiriş enkesitleri yapılabilir. Bu durum, özellikle büyük açıklıklı köprüler için bir avantaj olan aerodinamik kesitlerin tasarımını kolaylaştırır.

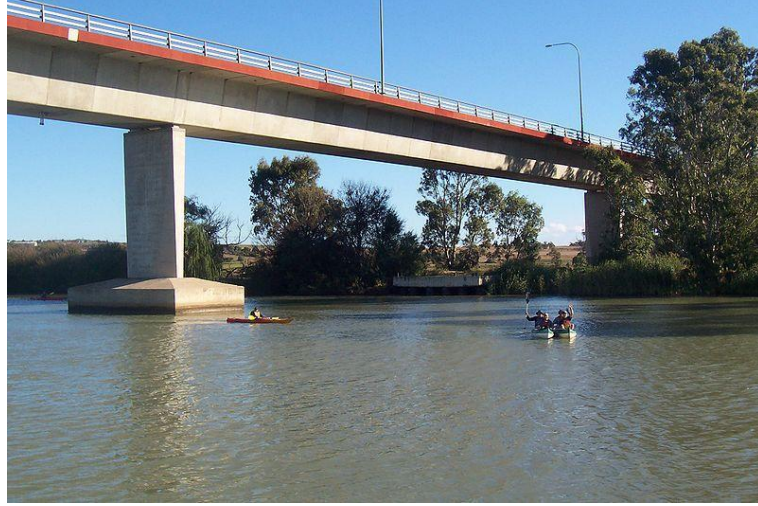
Bununla birlikte, kutu kesitli kirişler aşağıda sıralanan bazı dezavantajlara da sahiptir:

- a. Alt levhaya erişilememesi ve iç kapağı çıkarma ihtiyacı nedeniyle yerinde dökmesi zordur.
- b. Her bir kutu, ya kesintisiz yerinde döküm veya aşamalı olarak dökünecek şekilde tasarlanmalıdır.
- c. Kutu kirişler, büyük açıklıkların geçilmesinde kafes kirişler kadar verimli değildir.
- d. Daha yüksek inşaat maliyeti gerektirirler.
- e. Tasarımları nispeten daha karmaşıktır.

Sayılan bu avantaj ve dezavantajlar değerlendirildiğinde, kutu kesitli kiriş köprülerin

- a. Köprü açıklığının 12 m ila 300 m arasında olduğu durumlarda (Şekil 6)
- b. Daha yüksek burulma rijitliği gerektiren planda kavisli kirişlerde (Şekil 7)
- c. Yükseklik kısıtlamasının söz konusu olduğu (derinliğin az olmasının istendiği) durumlarda

kullanılması daha uygun olmaktadır.



Şekil 6. Murray Nehri üzerinde Swanport köprüsü



Şekil 7. Planda kavisli kutu kirişler, Fossedyke Köprüsü, Lincoln

1.4. Kutu Kirişli Köprülerin Yapım Yöntemleri

Kutu kesitli kiriş köprülerin inşasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

1.4.1. Dengeli Konsol Yöntemi

Dengeli Konsol Yöntemi, bir orta ayağın her iki yanında simetrik olarak yerleştirilen bir çift kalıp arabası kullanılarak, tabliyenin segmentler halinde dökülmesi yöntemidir. Ekonomik uygulama açıklığı 60 ila 170 metredir. Bu yöntemde köprü tabliyesinin kurulmasında, iskeleden başlayarak sırasıyla her seferinde bir kesit inşa edilir. Tabliye tamamlanıncaya kadar iki yönlü olarak bu işlem tekrarlanır (Şekil 8).

1.4.2. İtme Sürme Yöntemi

İtme Sürme Yöntemi, bir kenar ayak arkasında oluşturulan döküm alanında, tabliye betonunu segmentler halinde dökerek, betonun prizini almasından sonra itmek suretiyle yerine sürülmesi olarak tanımlanır (Şekil 9).



Şekil 8. Dengeli konsol yöntemi

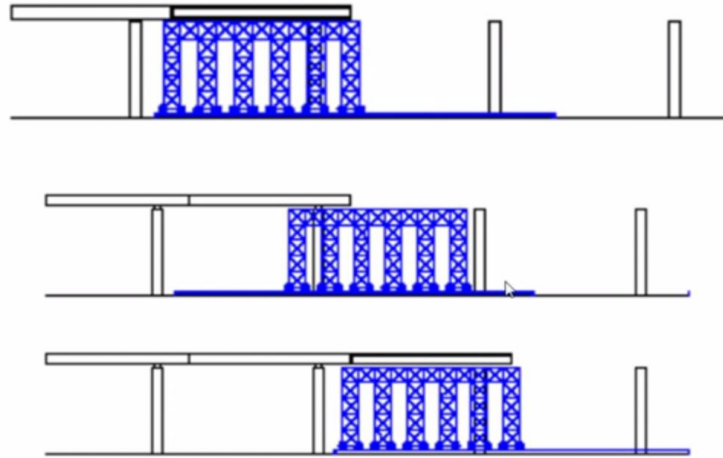


Şekil 9. İtme sürme yöntemi

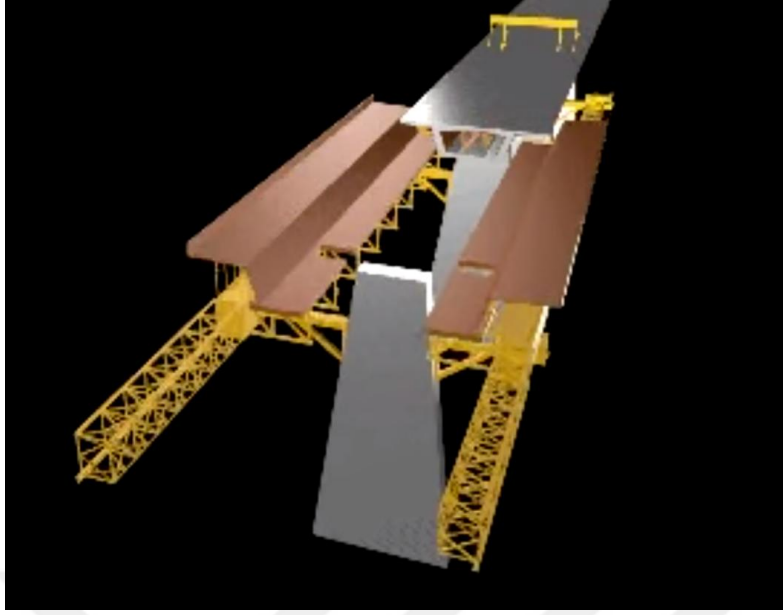
1.4.3. Açıklık Boyunca Yerinde Dökümle İnşa Yöntemi

1.4.3.1. Tam İskele Yöntemi

Bu yöntem, ciddi ulaşım kısıtlamaları olan veya çevre sorunlarıyla müteahhidin iş alanına girmesi kısıtlı olan bölgeler için uygundur (Şekil 10). İlk yerinde dökme uygulaması 1967'de Finlandiya'da yapılmıştır.



Şekil 10. Tam iskele yöntemiyle yerinde döküm



Şekil 11. Hareketli iskele yöntemiyle yerinde döküm

1.4.3.2. Hareketli İskele Yöntemi

Bu yöntemde, bir segment daha önce tamamlanmış köprü üst yapısına bağlanır ve sonra bütün tamamlanmış köprü, sonraki segment monte edilmeden önce dışa doğru açılır (Şekil 11). Bu yöntem, ilk kez 1963 yılında Venezuela'daki Rio Caroni Köprüsü'nde uygulanmıştır.

1.4.4. Gezici Kalıplı Segmental İnşa Yöntemi

Köprü tabliyesinin kurulma mantığı dengeli konsol yöntemindeki gibidir. Ancak burada, her segment, yerinde dökülmektedir. Daha önce dökülen parçaya asılı olan gezici kalıplar, sonraki segmentin dökülmesi için kullanılır. Bir segment döküldükten sonra 3-4 gün segmentin yerine yerleşmesi için geçici gerilme uygulanır. Ardından kalıp bir sonraki bölüme ilerletilerek dengeli bir konsol yapısını oluşturacak şekilde aynı işlem her iki yönde tekrar edilir (Şekil 12).



Şekil 12. Gezici kalıplı segmental inşa yöntemi

1.5. Literatür Taraması

Godden (1979), büyük açıklıklı kutu kesitli eğri eksenli köprülerin sismik modelleri üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Yazar çalışmasında, sarsma tablası ile iki köprü modeli üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Birinci model olarak tek doğrultuda uzanan kolonlar üzerine oturtulmuş çok açıklıklı beton köprüyü ele almıştır. Buradan çıkardığı önemli sonuçlardan biri, yapıda hasarın olduğu kritik bölgelerin genleşme derzleri ve kolon tabanları olduğudur. İkinci model olarak ise tek açıklıklı çelik kirişli planda kavisli (eğri eksenli) asma köprüyü incelemiştir. Köprüde en önemli dinamik davranışın, yer hareketinin düşey bileşeninden dolayı meydana geldiği ve bunun birinci düşey modda baskın şekilde ortaya çıktığı görülmüştür.

Huang ve diğ. (1995), taşıt yükü etkisindeki ince cidarlı kutu kirişli köprülerin titreşimlerini ele almışlardır. Çalışmada, kamyon yükünden dolayı ince cidarlı kutu kirişli köprülerin dinamik davranışı için bir yöntem sunulmuştur. Burada, kutu kirişli köprü çok sayıda ince cidarlı kiriş elemanlarına bölünmüş; kesit çarpılmasının etkileri dikkate alınmıştır. Taşıt yüklemesinde AASHTO HS20-44 kamyonu 11 serbestlik derecesine sahip doğrusal olmayan bir araç modeli olarak düşünülmüştür. Analizde zayıf, orta, iyi ve çok iyi olmak üzere dört farklı tabliye yüzeyi kullanılmıştır. Önerilen yöntem, katlanmış plak teorisi ile kıyaslanmış ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre,

düsey dinamik hareket sırasında eğilme momenti esasen birkaç titreşim modunda etkili olurken, burulma ve çarpılma ise yüksek modlarda etkili olmaktadır.

Batmaz (2002), kutu kesitli öngerilmeli prefabrikte kirişli 9 açıklıklı bir viyadüğün analizi ve boyutlandırmasını yapmıştır. Tasarım esnasında AASHTO, Karayollarında Yapılacak Köprüler Hakkında Teknik Şartname, TS500, TS3233 ve Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmelik'te belirtilen yöntemler ve yapım kuralları uygulanmıştır. Kutu kesitli prefabrikte kirişlerin SAP90 programında modelleri hazırlanmış, bunlar üzerinde hareketli yükler gezdirilerek en elverişsiz duruma ait kesit tesirleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre öngerilme hesapları yapılmış ve kiriş donatıları elde edilmiştir.

Densley ve diğ. (2003), tabliye döşemesinde düşük gerilmeli yardımcı tendonlarla desteklenmiş prekast segmental üst yapının performansını çalışmışlardır. Tendonlar, yer hareketi sonrasında sistemde kalıcı mafsalsız açılma olasılığını en aza indirmek amacıyla kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, prekast segmental üst yapıların sürekliliğinin tabliyede düşük gerilmeli yardımcı öngerme tendonlarının kullanılmasıyla sağlanabileceğini ve bunların segment bağlantı yerlerinde oluşabilecek kalıcı açıklıkları azalttığını göstermiştir.

Androus (2003), kompozit çok hücreli kutu kirişli köprülerle ilgili deneysel ve teorik bir araştırma yapmıştır. Deneysel araştırma, üç köprü modelinin çökünceye kadar olan testlerini içermektedir. Teorik araştırmada ise orta açıklıkta eğilme etkisiyle ortaya çıkan en büyük normal gerilmeleri elde etmek amacıyla 225 farklı köprünün sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılmıştır.

Huang (2004) kutu kirişli kavisli çelik köprünün tam ölçekli statik ve dinamik testlerini yapmıştır. Statik yükleme için toplamda 117 tona kadar yük sağlayan iki Florida taşıma test aracı kullanılmıştır. Dinamik yükleme için ise toplam ağırlığı 52,7 ton olan bir Florida nakliye test aracı kullanılmıştır. Test sonuçlarını değerlendirmek amacıyla iki farklı teorik model geliştirilmiştir. Çalışmada, yol üzerindeki engellerin etkisi, betonarme döşemelerin etkili genişliği ve dinamik etki faktörleri değerlendirilmiştir.

Walid (2005), kayma gerilmelerinin etkisini değerlendirmek amacıyla CHBDC kamyon yükleme koşullarına maruz 225 prototip köprünün sonlu eleman analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada ele alınan parametreler, hücre sayısı, şerit sayısı, açıklık uzunluğu ve açıklık-yarıçap eğrilik oranıdır. Sayısal olarak elde edilen veriler yardımıyla

kayma gerilmesi dağılım faktörleri için ampirik ifadeler çıkarılmış, bunlar Yapay Sinir Ağı (YSA) uygulamasında denenmiştir.

Pindado ve diğ. (2005), dengeli konsol yöntemi kullanılarak inşa edilen betonarme köprülerin kutu giriş tabliyelerine etki eden sapma momentini, farklı köprü kesitleri için deneysel olarak analiz etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, köprü tabliyeleri aerodinamik hale geldikçe sapma momenti katsayısının azaldığını ve tabliye uzunluğunun, genişliğin yaklaşık iki katı olması durumunda sapma moment katsayısının maksimuma ulaştığını göstermiştir.

Gülhan (2005), tek açıklıklı, basit mesnetli öngerilmeli kutu kesitli köprülerin analizinde Yapay Sinir Ağları (YSA) ile analizini yapmıştır. Farklı geometriye sahip çeşitli açıklık ve genişlikteki köprü kesitleri SAP2000 yazılımı ile modellemiş ve mesnetteki kesme kuvveti ile açıklık ortasındaki eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Yük sınıfı olarak TCK Köprüler Teknik Şartnamesinde tanımlı H20S16 standart kamyonu alınmıştır. Yapay Sinir Ağlarının eğitiminde veri dosyasında 200, test dosyasında ise 64 adet kesit tesiri kullanılmış, mimarisinde ise tek bir ara katman kullanılmıştır. Yapay sinir ağı, Quick-Propagation (QuickProp) öğrenme algoritması ile eğitilmiş ve kesme kuvveti değerleri için 100.000, eğilme momenti değerleri için ise 400.000 iterasyon kullanılmıştır. Eğitim sonucunda, YSA'nın problemi çok küçük hata oranları ile öğrendiği görülmüştür.

Sarıtaş (2007), çok açıklıklı değişken kesitli kutu girişleri olan elastomer mesnetli köprülerin sonlu eleman analizlerini yapmıştır. Köprülerin kuvvetli yer hareketleri etkisinde olduğu varsayılmış; dinamik davranış, farklı zemin tiplerine bağlı olarak rasgele titreşim kuramına dayalı stokastik analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Kaydedilmiş ve benzeştirilmiş olmak üzere iki tür yer hareketi göz önüne alınmıştır. Kaydedilmiş bir yer hareketinin etkisindeki köprünün stokastik yöntemlerle çözümü yapılmıştır. Stokastik analizler ile frekans tanım alanında elde edilen yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri, deterministik yöntemlerle zaman tanım alanında elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Analiz süresi ve hesap hacmi bakımından; stokastik yöntemin deterministik yöntemle kıyasla üstünlükleri belirtilmiştir.

Veletzos (2007), iki boyutlu doğrusal olmayan zaman-tanım analizleri ile prekast segmental köprülerin sismik davranışını ele almış ve dengeli konsol yöntemi kullanılarak inşa edilen köprülerde segmentlerin birleşim noktalarının davranışı üzerine eğilmiştir. Birleşim yerlerinin modellenmesinde kullanılan yaklaşım, büyük ölçekli deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiştir. Çalışmada,

Kaliforniya'daki Otay Nehri Köprüsü ve San Francisco-Oakland Körfezi Köprüsü Skyway'e benzer geometrilere ve özelliklere sahip tam ölçekli prekast segmental köprülerin analitik modelleri de kullanılmıştır. Analizlerde 20 adet yakın-fay deprem kaydı kullanılmıştır. Deprem kayıtları iki farklı ölçekleme yöntemi ile ölçeklendirilmiş ve yapı davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sünme, büzülme ve sıcaklık etkilerinin birleşim noktalarının sismik davranışını etkileyip etkilemediğini belirlemek üzere dört farklı deprem öncesi gerilme koşulu incelenmiştir. Sonuçlar, düşey deprem hareketinin ve deprem öncesi gerilme durumunun segment bağlantılarının davranışını değiştirebileceğini göstermiştir. Ayrıca, ölçeklendirme yönteminin orta noktadaki birleşim yerinin davranışını önemli ölçüde değiştirmedeğini, ancak davranıştaki değişimi etkileyebileceğini göstermiştir.

Altunışık ve diğ. (2010) ve Adanur ve diğ. (2012), büyük açıklıklı, değişken kesitli ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen betonarme karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır.

Ateş (2011), dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen beton kutu kesitli kiriş köprülerinin analizini yapım aşamalarını dikkate alarak yapmıştır. Betonun ve çeliğin zamana bağlı malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen ve Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan Budan Köprüsü sayısal uygulama için seçilmiştir. Köprü modeli SAP2000 programında oluşturulmuş; analizlerde P-Delta ve büyük yer değiştirme etkileri dikkate alınmıştır. Köprü'nün farklı inşa aşamalarında yapısal davranışı incelenmiştir. Eğilme momenti, kesme kuvveti ve eksenel kuvvetlerin değişimi ile köprü tabliyesi ve ayağı için yer değiştirmeler detaylı olarak verilmiştir. Analizler sonucunda, beton köprülerin gerçek davranışını elde etmek için zamana bağlı malzeme özellikleri ile büyük yer değiştirmelerin yapım aşamalarına göre analizlerde göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Choi ve Oh (2013), düşey yükleme altındaki beton kutu kirişli köprülerde, kiriş tabliyesinin nihai yük kapasitesi üzerinde guse ve kavis etkilerini göz önüne alan bir model önermişlerdir. Model, rijit bağlantıların ve prizmatik olmayan elemanların etkisini dikkate alabilmektedir. Modeli doğrulamak için kapsamlı bir deneysel program oluşturulmuş ve birkaç tam ölçekli beton kutu kiriş test edilmiştir. Guselerin kutu kirişlerin kırılma modları ve çatlak şekilleri üzerinde büyük ölçüde etkili oldukları; guse boyutlarının artırılması ile kiriş tabliyesinin nihai yük kapasitesinin önemli miktarda arttığı görülmüştür.

Gouda (2013), açıklık uzunluğu sabit, eğriliği değişken 5 adet kutu kesitli kiriş köprü modeli üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, açıklık uzunluğu, kesit ve malzeme özellikleri sabit tutularak sadece yatay yönde eğrilik yarıçapının değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizler, SAP2000 programında yapılmış, göz önüne alınan modeller IRC sınıfı kamyon araç yüklemesine maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda, köprü eğriliği arttıkça burulma momenti, eğilme momenti ve çökmelerin arttığı görülmüştür.

Garg ve Kumar (2014), kutu kesitli kiriş köprülerde öngerme tendonlarının yerleştirilebileceği çeşitli konumları incelemişlerdir. Sabit yükleme altında tendonların konumlarını değiştirerek bu tendonların yerleştirilebileceği en etkili konumları elde etmeye çalışmışlardır. Analizlerde SAP2000 yazılımı, köprü için AASHTO-PCI-ASBI tipi kesit şekli kullanılmıştır. Köprü tabliyesinde gerilme kontürlerini ve çökmeleri elde ederek sonuçları karşılaştırmışlardır. Aynı yükleme altında, farklı konumlarda tendon sayısı artırıldığında köprünün stabilitesinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, köprü stabilitesine en iyi katkıyı sağlayan tendon konumlarını göstermişler, bu konumların köprüde etkili olan gerilmenin azaltılmasında en büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Yu ve diğ (2015), öngerilmeli beton kutu kesitli köprülerde, köprü tabliyesi üzerinde araç yüklerinin yerel etkilerini incelemişlerdir. Bunun için bir araç-köprü etkileşim modeli benimsemişler; yol yüzeyi pürüzlülüğü, araç hızı ve köprü açıklık uzunluğu ile dinamik büyütme çarpanı arasındaki ilişkiyi çalışmışlardır. Sonuçlar, global ve yerel dinamik büyütme çarpanları arasında güçlü bir korelasyon olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, yerel dinamik büyütme çarpanı ile yüzey pürüzlülüğü ve köprü açıklık uzunluğu arasında iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür. Farklı köprü tasarım standartlarındaki büyütme çarpanı formülleri üzerinde bir irdeleme de yapılmıştır.

Najm (2015), kesme saplaması bağlantılarının sayısının ve dağılımının kompozit kutu kiriş köprülerin davranışına etkilerini incelemiş; ardından değişik sonlu eleman modelleri kurarak bu modellerin doğruluğunu literatürdeki laboratuvar test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Sonuçlar, kutu kiriş köprü tasarımlarında yeni düzenlemeler yapılmasıyla kesme saplaması sayısının azaltılabileceğini işaret etmektedir. Kompozit kutu kiriş modeli üzerinde değişik parametrelerin etkilerini belirlemek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde çelik kiriş ve kesme saplaması bağlantısı için geometrik ve malzeme davranışında lineer olmayan özellikler hesaba katılmış; beton ve çelik etkileşimi yüzey değme elemanları kullanılarak sağlanmıştır. Kesme saplaması bağlantılarının elde

edilen kapasiteleri EC4, AISC, BS ve BS5950 gibi değişik tasarım şartnameleriyle karşılaştırılmıştır.

1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, kutu kesitli kiriş köprülerin dinamik davranışı üzerinde en kesit şekillerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, tek hücreli 4 dört farklı kutu kiriş en kesiti dikkate alınarak CSIBridge programında çeşitli araç geçişi senaryoları için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Burulma rijitliğinin dinamik davranış üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

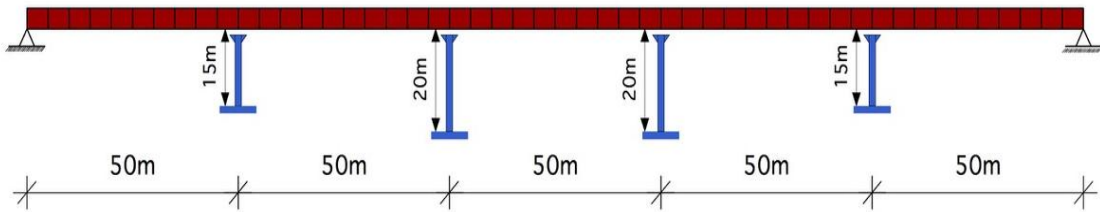
Birinci bölümde, kutu kesitli kiriş köprülerin tarihçesi, tasarım yöntemleri ve yapım usulleri hakkında özet bilgiler verilmiş, literatürde konuyla ilgili yapılan çalışmalara kısaca değinilmiştir. İkinci bölümde, tez kapsamında ele alınan dört farklı en kesit şekli için kutu kesitli kiriş köprülerin CSIBridge programında modellenmesi yapılmıştır. Köprü modelinin oluşturulması ve hareketli yüklerin tanımlanması adım adım kısaca özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, dinamik analizlerden elde sonuçlar, grafik ve tablolarla sunularak tartışılmıştır. Dördüncü bölümde, çalışmadan çıkarılan sonuçlara değinilmiş ve ileriye yönelik yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir. Son kısımda ise çalışma esnasında yararlanılan kaynakların listesi sunulmuştur.

2.YAPILAN ÇALIŞMALAR

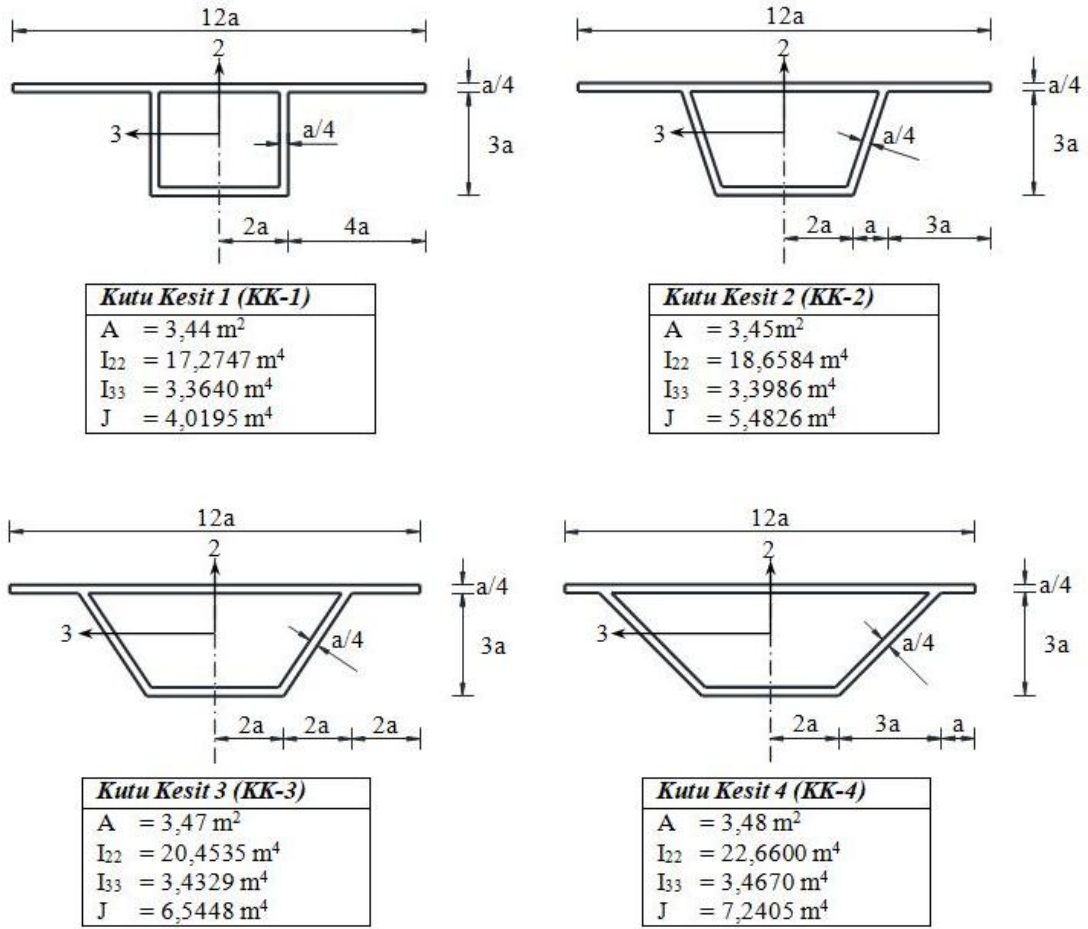
2.1. Köprü Modelinin Tanıtılması

Bu çalışmada, kutu kesitli kiriş köprülerinin dinamik davranışına en kesit şeklinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, genişliği 9,6 m ve toplam uzunluğu 250 m olan bir karayolu köprüsü CSiBridge programı yardımıyla modellenmiştir. Model köprüünün boy kesit görünümü ve fiziki özellikleri Şekil 13'te görülmektedir. Köprü, her bir açıklığı 50 m olan toplam 5 açıklığa sahiptir. Model köprüünün taşıyıcı sisteminde 2 adet 15 m ve 2 adet 20 m yüksekliğe sahip toplam 4 adet kolon ayak mevcuttur. Kolonların üst kısımlarında başlık kirişleri bulunmaktadır. Başlık kirişleri yamuk kesitli olup, taban genişliği 1,8 m, tepe genişliği 3,2 m, derinliği 1,2 m ve uzunluğu 3,2 m'dir. Köprüünün sol kenar ayağı sabit mesnet, sağ kenar ayağı ise boyuna uzamaya izin verilen hareketli mesnet olarak düşünülmüştür. Modelde tek bir açıklıkta dilim kalınlığı 5 m olan 10 adet kutu kesitli prefabrik kiriş kullanılmıştır.

Kutu kesitli kiriş köprülerinin dinamik davranışına en kesit şeklinin etkisini incelemek üzere köprü tabliyesi, tek hücreli 4 farklı kutu kesit ile ayrı ayrı tanımlanmıştır. Köprü tabliyesinde kullanılan kutu kesitler ve fiziksel özellikleri Şekil 14'te verilmiştir (Pindado vd. 2005). Burada ele alınan 4 kesit şeklinin en önemli özelliği, kesit düzlemindeki eksenlere göre atalet momentleri (I_{22} ve I_{33}) hepsinde yaklaşık olarak aynıyken polar atalet momentlerinin (J) farklı olmasıdır. Bu şekilde alınmasının sebebi, dinamik davranışa burulmanın etkisinin incelenecek olmasındandır. Köprü tabliyesi, kolon ayakları ve başlık kirişinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2'de görülmektedir.



Şekil 13. Çalışmada göz önüne alınan köprü modeli



Şekil 14. Köprü tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekilleri (a = 80 cm)

Tablo 2. Model köprüde kullanılan malzeme özellikleri

Köprü Tabliyesi	Kolon Ayakları ve Başlık Kirişi
Beton sınıfı: C40	Beton sınıfı: C30
Elastisite Modülü (E) = 34000 MPa	Elastisite Modülü (E) = 32000 MPa
Poisson Oranı (ν) = 0.20	Poisson Oranı (ν) = 0.20
γ = 25kN/m ³	γ = 25kN/m ³

2.2. Sistem Modelinin CSiBridge Programında Oluşturulması

CSiBridge, köprü yapılarının modellenmesi, analizi ve tasarımı için kullanılan bir paket programdır. Tüm bunların yerine getirilme kolaylığı, CSiBridge'i bugün piyasada bulunan en çok yönlü ve üretken yazılım programı haline getirmektedir.

CSiBridge ile karmaşık köprü geometrileri, sınır koşulları ve yükleme durumları kolayca tanımlanabilir. Köprü modelleri, yerleşim düzenleri, açıklıklar, mesnetler, mafsallar ve ardgerme gibi köprü mühendislerinin aşına olduğu terimler kullanılarak parametrik olarak oluşturulabilir. Yazılım, köprü tanımı parametreleri değiştikçe otomatik olarak güncellenen omurga, kabuk veya katı nesne modelleri oluşturur.

CSiBridge tasarımı, çelik ve beton köprülerin hızlı ve kolay bir şekilde tasarlanmasına ve güçlendirilmesine olanak sağlar. Parametrik modelleyici, kullanıcının basit veya karmaşık köprü modelleri oluşturmasına ve tasarım süreci üzerinde tam kontrol sağlarken verimli bir şekilde değişiklik yapmasına izin verir. Şeritler ve araçlar hızlı bir şekilde tanımlanabilir ve genişlik hesaba katılabilir. Basit ve pratik Gantt çizelgeleri, inşaat aşamalarının modellenmesini ve programlanmasını simüle etmek için kullanılabilir.

CSiBridge, bir köprü modeli oluşturmak için gerekli adımları ana hatlarıyla açıklayan bir sihirbaz içerir.

CSiBridge tasarım paketi içine tamamen entegre edilmiş SAPFire® analiz motoru ile aşamalı inşa, sünme ve rötre analizi, hedef kuvvetlere ulaşılacak şekilde kablo gerdirmeye, eğrilik ve şekil bulma, geometrik nonlinearite (P-delta ve büyük yer değiştirmeler), malzeme nonlineeritesi göz önüne alınarak statik, dinamik ve stabilite analizleri gerçekleştirebilir. Ek olarak, AASHTO LRFD tasarımı, otomatik yük kombinasyonları, üst yapı tasarımı ve en son sismik tasarım ile birlikte sisteme entegre edilmiştir.

Program, Windows ortamında çalışmakta ve tüm işlemler grafik kullanıcı ara yüzü yardımı ile CSiBridge ekranı üzerinde gerçekleştirilmektedir. Köprü modelinin CSiBridge programı ile analiz ve boyutlandırılmasında genel olarak izlenecek yol aşağıdaki alt başlıklar halinde kısaca özetlenmiştir.

2.2.1. Birimler

Modellemeden önce kullanıcıların modelleme ve analiz boyunca kullanacakları birimleri seçmeleri gerekmektedir. Tez çalışmasında birimler kN / m / C olarak kabul edilmiştir.

2.2.2. Yol Platformu ve Şeritlerinin Oluşturması

Bir köprü modelini oluşturmanın en önemli adımı yol platformunu tanımlamaktır. Yol platformları program aracılığıyla düz, yatay, dikey, sağa-sola kavisli olarak oluşturulabilir. Bu işlem yapılırken platformun genişliği, şerit sayısı, başlangıç ve bitiş koordinatları vb. gibi bilgiler programa girilir.

Tez kapsamında ele alınan model köprü'nün platformu, Şekil 15'te gösterilen ara yüz yardımıyla tanımlanmıştır. Her bir açıklığı 50 m olan köprü'nün toplam uzunluğu 250 m dir. Model köprü iki şeritten oluşmaktadır ve her bir şerit 4,8 m genişliğinde olup, toplam genişlik 9,6 m'dir. Burada yapılan işlem, yol platformunun şeritlerinin oluşturulması ve bu şeritlerin genişliğinin, uzunluğunun, merkez noktalarının koordinatlarının, başlangıç ve bitiş noktalarının uygun bir şekilde ileti kutusuna yazılmasıdır. Toplam 6 m genişliğinde olan yol platformunun merkezinden, sağda 3 m ve solda 3 m olmak üzere iki şeritli bir güzergâh tanımlanarak bu şeritlerin merkez koordinatlarının yol platformunun sağında ve solunda 3'er m uzaklıkta olması sağlanır (Şekil 16). Köprüde yol şeritlerinin görünümü (Şekil 17)'deki gibidir.

Şekil 15. Yol platformunun oluşturulması

Bridge Lane Data

General
Lane Name: LANE1

Coordinate System: GLOBAL
Units: KN, m, C

Maximum Lane Load Discretization Lengths
Along Lane: 3,048
Across Lane: 3,048

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane
 Discretization Length Not Greater Than 1/ 4, of Span Length
 Discretization Length Not Greater Than 1/ 10, of Lane Length

Lane Data

Bridge Layout Line	Station m	Centerline Offset m	Lane Width m	Radius m
BLL1	250,	2,4	3,	0,
BLL1	0,	2,4	3,	0,
BLL1	250,	2,4	3,	0,

Plan View (X-Y Projection)

North

Y
X

Layout Line
Station
Bearing
Radius
Grade
X: 94,2446
Y: 0,
Z:

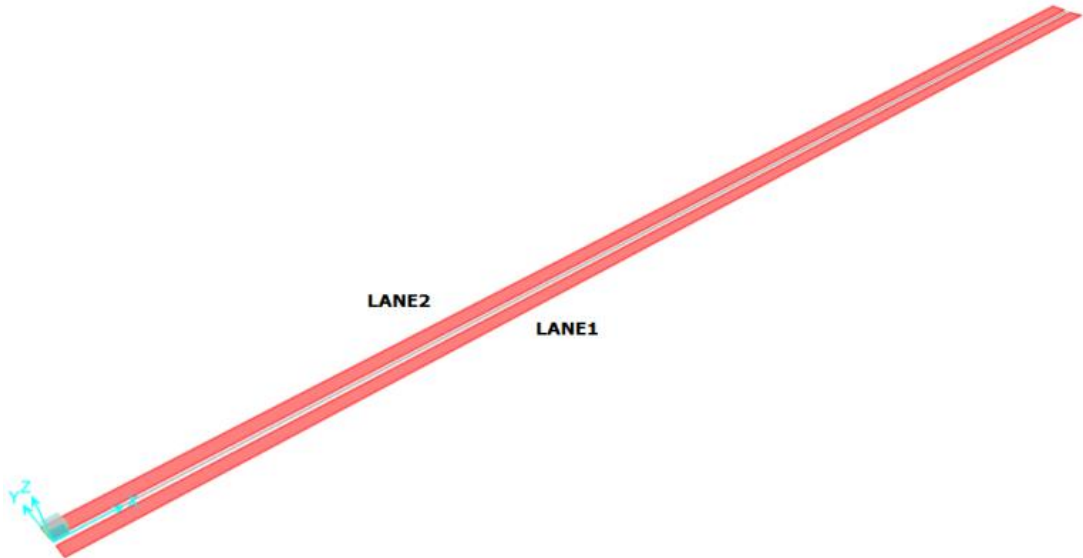
Snap To Layout Line
 Snap To Lane

Objects Loaded By Lane
 Program Determined
 Group

Lane Edge Type
Left Edge: Interior
Right Edge: Interior

OK Cancel

Şekil 16. Yol şeritlerinin oluşturulması



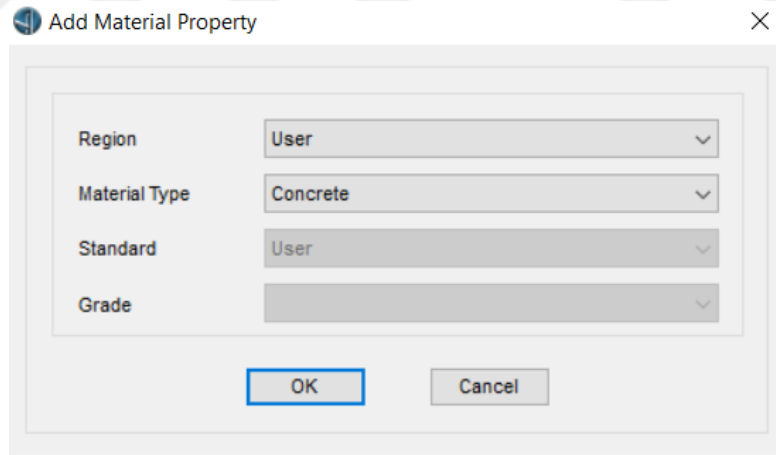
Şekil 17. Köprüde yol şeritlerinin görünümü

2.2.3. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Yol platformu tanımlandıktan sonra malzeme özellikleri tanımlanır. Köprü modeli için C30 ve C40 beton sınıfları seçilmiş ve Tablo 3’te verilmiştir. Components sekmesinin Type bölümünden Properties-Materials sekmesi aktif hale getirilir. Buradan da New (Add a new material Property) açılır Add Material Property ekranında Region “User” ve Material Type “Concrete” seçiler. Ardından modelin betonarme malzemeleri olan C30 ve C40 betonlarının özellikleri Şekil 19’da görüldüğü gibi girilir.

Tablo 3. Göz önüne alınan beton sınıfları için malzeme özellikleri

Malzeme özelliği	C30	C40
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	25	25
Elastisite modülü (kN/m^2)	$3,2 \times 10^7$	$3,4 \times 10^7$
Poisson oranı	0,2	0,2
Isıl genişleme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$)	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Karakteristik basınç dayanımı (kN/m^2)	$3,0 \times 10^4$	$4,0 \times 10^4$



Şekil 18. Malzeme sınıfının eklenmesi

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in a software application. The left window is for material C30 and the right window is for material C40. Both windows show fields for General Data, Weight and Mass, Isotropic Property Data, and Other Properties for Concrete Materials.

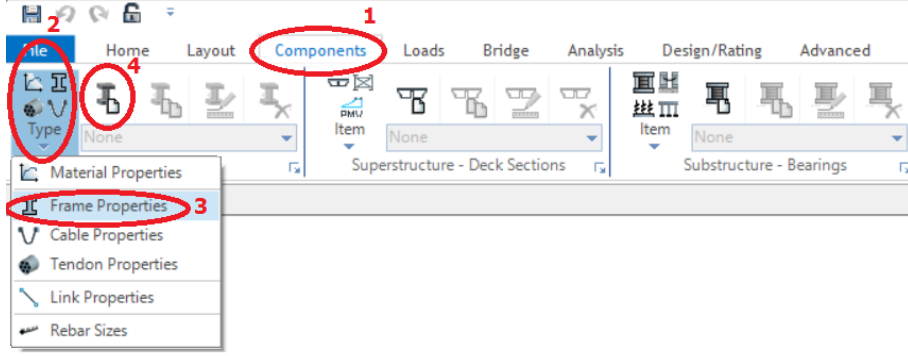
Property	C30 Value	C40 Value
Material Name and Display Color	C30	C40
Material Type	Concrete	Concrete
Weight per Unit Volume	25	25
Mass per Unit Volume	2,5493	2,5493
Units	KN, m, C	KN, m, C
Modulus of Elasticity, E	32000000	34000000
Poisson, U	0,2	0,2
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,000E-05	1,000E-05
Shear Modulus, G	13333333	14166667
Specified Concrete Compressive Strength, fc	30000	40000
Lightweight Concrete	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Shear Strength Reduction Factor		
Switch To Advanced Property Display	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Şekil 19. C30 ve C40 beton malzeme özelliklerinin tanımlaması

2.2.4. Kesit Özelliklerinin Tanımlanması

Program içerisinde çeşitli kesit tipleri verilmiştir. Bunlar arasından seçilen veya kullanıcı tarafından tanımlanan kesitler, sistem elemanlarına atanır.

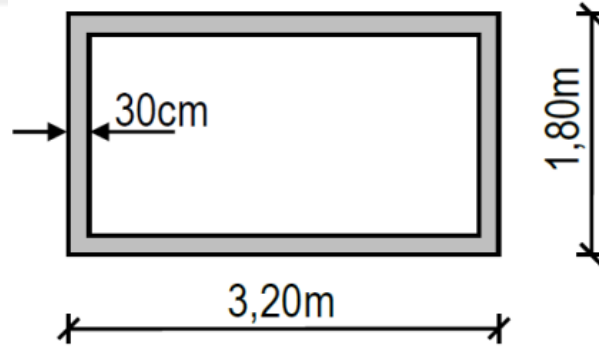
Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra dördüncü aşama oluşturulan köprü modeli için kesit özelliklerini tanımlamaktır. Components sekmesinin “Type” bölümünden “Frame Properties” ikonuna tıklanarak aktif hale getirilir ve “Properties- Frames” bölümünden New (Add a new frame section property) ‘den “Add Frame Section Property” ileti ekranı getirilir (Şekil 20).



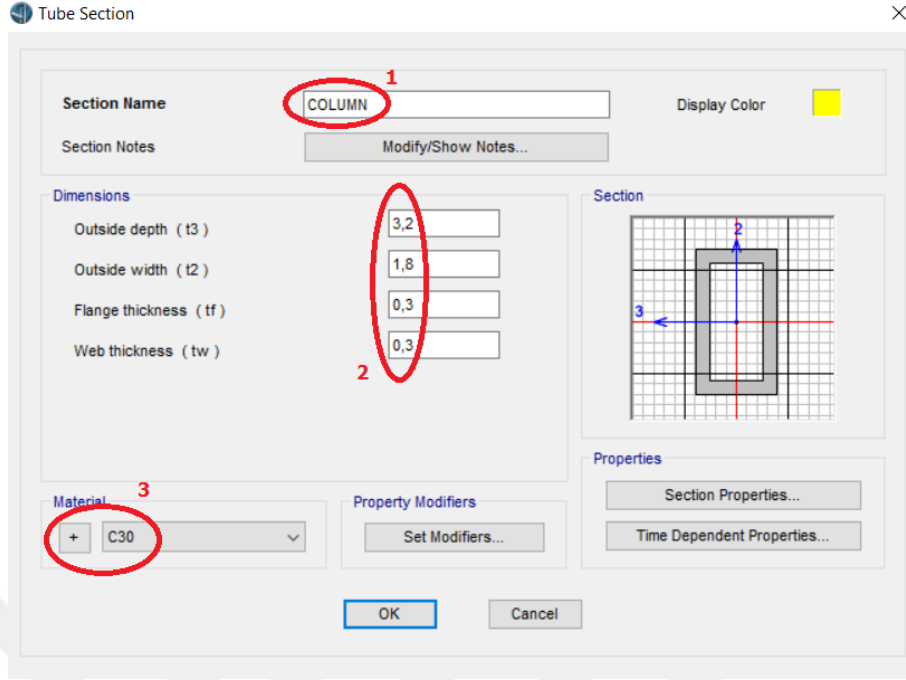
Şekil 20. Kesit özellikleri kısmı

2.2.4.1. Kolon Kesiti Tanımlaması

İlk olarak kolon kesit özellikleri tanımlanır. Köprüde kullanılan kolon boyutları (Şekil 21)'te verilmiştir. Kolon kesitimize uygun olarak “Tube” seçeneği seçilerek kesitin kalınlıkları girilir. Model köprünün kolon kesitinin fiziksel özellikleri Şekil 22’de görüldüğü gibidir



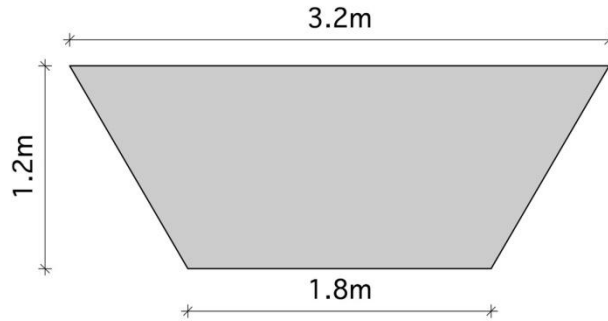
Şekil 21. Köprüde kolon en kesiti



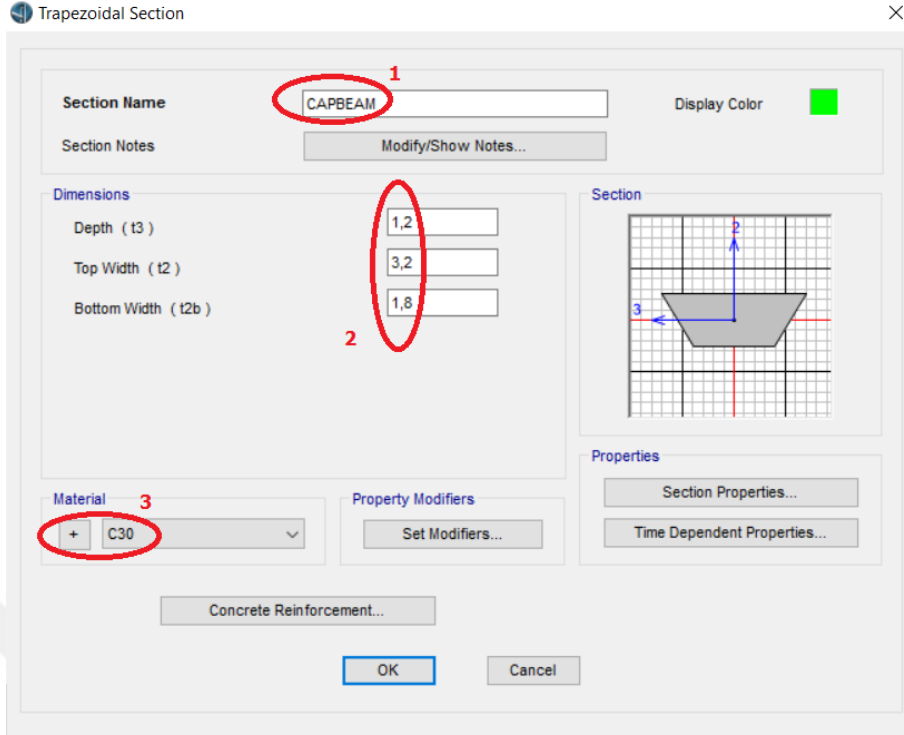
Şekil 22. Kolon kesit özelliklerinin tanımlanması

2.2.4.2. Başlık Kirişi Kesiti Tanımlaması

Kolon kesiti özellikleri tanımlandıktan sonra başlık kirişi özellikleri tanımlanır. Başlık kirişi en kesiti Şekil 23'te görüldüğü gibi yamuk şeklindedir. Başlık kirişinde C30 beton malzeme kullanılmıştır. Kesit özellikleri tanımlanırken bu da C30 malzeme seçilir (Şekil 24).



Şekil 23. Başlık kirişi en kesiti



Şekil 24. Başlık kirişi kesit özellikleri tanımlaması

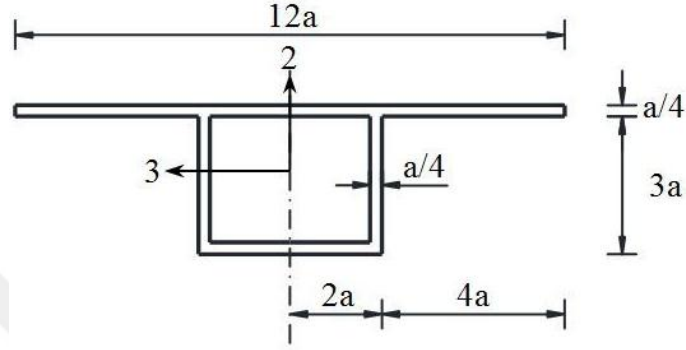
2.2.4.3. Tabliye Özelliklerinin Tanımlanması

CSiBridge programında çeşitli şekillerdeki köprü modelleri için üst yapı kesitleri tanımlanabilir. Bu üst yapılar, AASHTO yönetmeliğine uygun olmakla birlikte, çeşitli değişiklikler yapılarak istenilen üst yapı tasarımı elde edilebilir. Programda birçok köprü modeli için kullanılabilecek tabliye çeşitleri mevcuttur. Beton Kutu Kesit, Monolitik Beton Kesit, Prefabrik I Kiriş, Prefabrik U kiriş, Çelik profil kiriş, T kesit, Açılı Kesit, Eğimli Kesit vb. pek çok model program ara yüzüne entegre edilmiştir. Tabliye kesitinin tanımlanacağı ara yüzde, prefabrik kutu kesit boyutları, tabliyenin toplam genişliği ve yüksekliği, tabliyenin beton sınıfı ve kalınlığı gibi bilgiler istenmektedir.

Bu ara yüzde prefabrik kutu kesit boyutları, tabliyenin toplam genişliği, toplam yüksekliği, tabliyenin beton sınıfı ve kalınlığı gibi bilgiler irdelenmiştir.

Şekil 25'te fiziki özellikleri verilen Kutu Kesit 1 (KK-1) için tabliye özelliklerinin tanımlanmasında "Concrete Box Girders" sekmesinden "Ext. Girders Vertical" tabliyesi seçilir (Şekil 26).

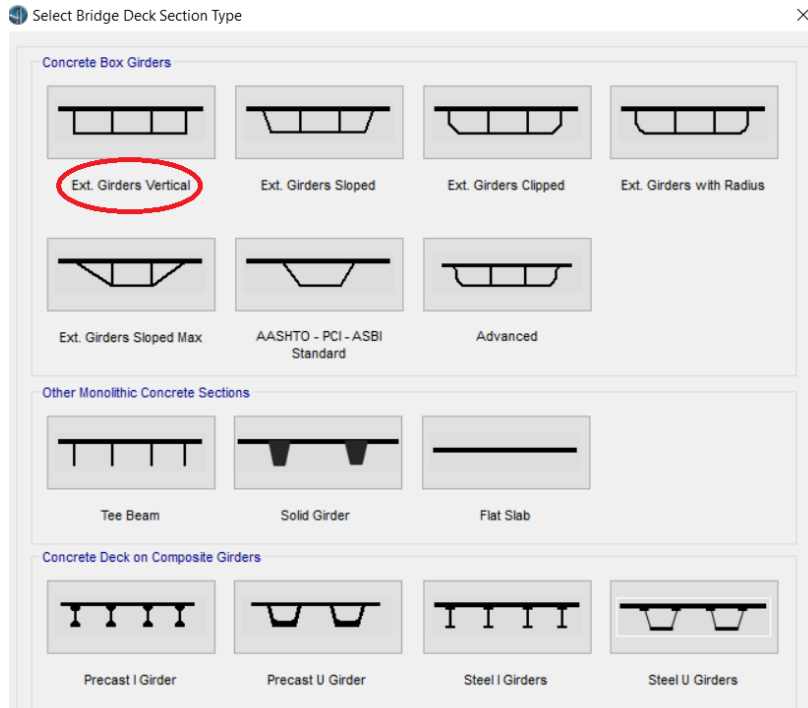
- Material Property: C40
- Number of Interior Girders: 0
- Total Width: 9,6
- Total Depth: 2,6



Kutu Kesit 1 (KK-1)

A	$= 3,44 \text{ m}^2$
I_{22}	$= 17,2747 \text{ m}^4$
I_{33}	$= 3,3640 \text{ m}^4$
J	$= 4,0195 \text{ m}^4$

Şekil 25. KK-1 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm)



Şekil 26. Kutu Kesit 1 için seçilen tabliye tipi

Slab and Girder Thickness bölümünde

- Top Slab Thickness (t1): 0,2
- Bottom Slab Thickness: 0,2
- Exterior Girder Thickness: 0,2

Define Bridge Section Data - Concrete Box Girder - Vertical

Section Data

Item	Value
General Data	
Bridge Section Name	KK-1
Material Property	C40
Number of Interior Girders	0
Total Width	9,6
Total Depth	2,6
Keep Girders Vertical When Superelevate? (Area & Solid Models)	No
Slab and Girder Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	0,2
Bottom Slab Thickness (t2)	0,2
Exterior Girder Thickness (t3)	0,2
Fillet Horizontal Dimension Data	
f1 Horizontal Dimension	0,
f2 Horizontal Dimension	0,
f3 Horizontal Dimension	0,
f4 Horizontal Dimension	0,
f5 Horizontal Dimension	0,
f6 Horizontal Dimension	0,
f7 Horizontal Dimension	0,
f8 Horizontal Dimension	0,
Fillet Vertical Dimension Data	
f1 Vertical Dimension	0,
f2 Vertical Dimension	0,
f3 Vertical Dimension	0,
f4 Vertical Dimension	0,
f5 Vertical Dimension	0,
f6 Vertical Dimension	0,
f7 Vertical Dimension	0,
f8 Vertical Dimension	0,
Left Overhang Data	
Left Overhang Length (L1)	3,2
Left Overhang Outer Thickness (t5)	0,2
Right Overhang Data	
Right Overhang Length (L2)	3,2
Right Overhang Outer Thickness (t6)	0,2
Live Load Curb Locations	
Distance to Inside Edge of Left Live Load Curb	0,
Distance to Inside Edge of Right Live Load Curb	0,
Distance to Centerline of Median Live Load Curb	0,
Width of Median Live Load Curb	0,
Insertion Point Location	
Offset X From Reference Point To Insertion Point	0,
Offset Y From Reference Point To Insertion Point	0,
Design Data	
Top Slab Cut Line Distance (From Top of Section)	0,605
Bottom Slab Cut Line Distance (From Bottom of Section)	0,355

Girder Output

Modify/Show Girder Force Output Locations...

Modify/Show Properties

Materials... Frame Sects...

Units: KN, m, C

Convert To User Bridge Section

OK Cancel

Şekil 27. KK-1 tabliyesi özelliklerinin girilmesi

Fillet Horizontal Data ve Fillet Vertical Dimensions Data bölümünde

- Tüm değerleri 0

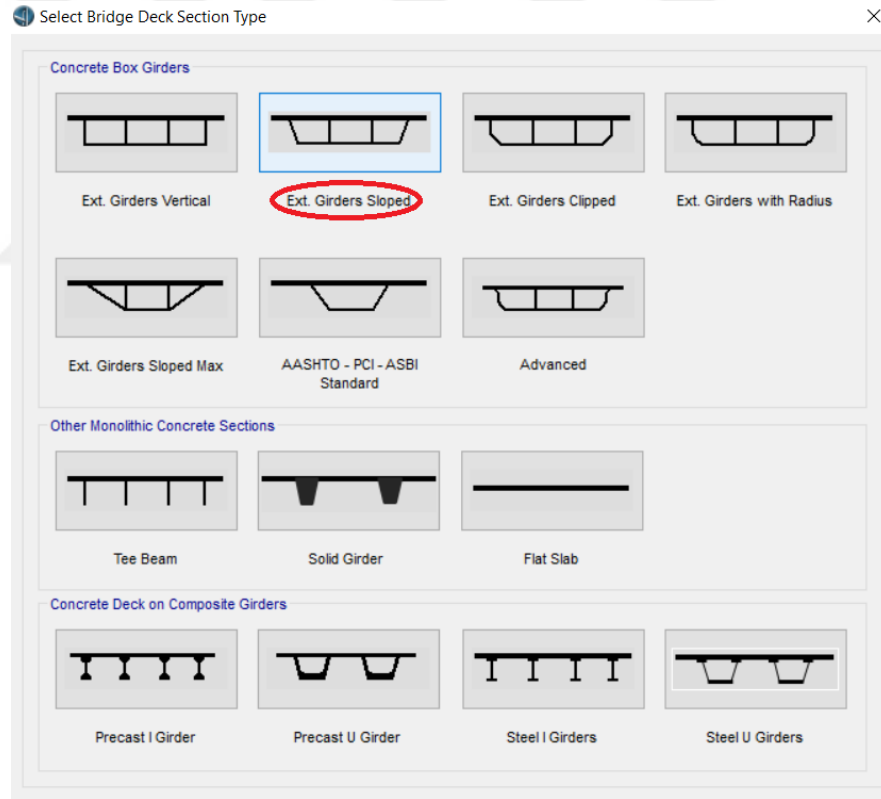
Left Overhang Data bölümünde

- Left Overhang Lenght (L1): 3,2
- Left Overhang Outer Thickness (t5): 0,2

Right Overhang Data bölümünde

- Right Overhang Lenght (L2): 3,2
- Right Overhang Outer Thickness (t6): 0,2

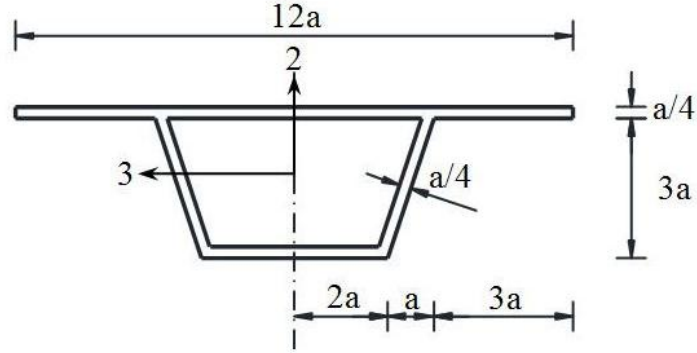
olarak girilerek bu kesit için tanımlama yapılmış olur. Yukarıda yapılan işlemlerin tümü Şekil 27’de gösterilmiştir



Şekil 28. Kutu Kesit 2, 3 ve 4 için seçilen tabliye tipi

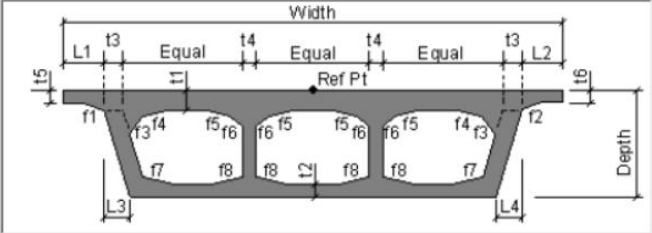
Şekil 29’te verilen KK-2 tabliyesinin kesit özellikleri Şekil 34’te görüldüğü gibi ilgili kısımlara girilir. Böylece KK-2 tabliyesi tanımlanmış olur.

Diğer üç tabliye özellikleri için aynı yol izlenerek veriler girilmektedir. Diğer üç tabliyenin ilk tabliyeden farkı, kutu kesit yan yüzlerinin eğimli olmasıdır. Bunun için “Concrete Box Girders” sekmesinden “Ext. Girder Vertical” sekmesi yerine “Ext. Girders Sloped” seçilerek veriler girilir (Şekil 28).



<i>Kutu Kesit 2 (KK-2)</i>	
A	= 3,45m ²
I ₂₂	= 18,6584m ⁴
I ₃₃	= 3,3986m ⁴
J	= 5,4826m ⁴

Şekil 29. KK-2 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm)



Section Data

Item	Value
General Data	
Bridge Section Name	KK-2
Material Property	C40
Number of Interior Girders	0
Total Width	9,6
Total Depth	2,6
Left Exterior Girder Bottom Offset (L3)	0,8
Right Exterior Girder Bottom Offset (L4)	0,8
Keep Girders Vertical When Superelevate? (Area & Solid Models)	No
Slab and Girder Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	0,2
Bottom Slab Thickness (t2)	0,2
Exterior Girder Thickness (t3)	0,2
Fillet Horizontal Dimension Data	
f1 Horizontal Dimension	0,
f2 Horizontal Dimension	0,
f3 Horizontal Dimension	0,
f4 Horizontal Dimension	0,
f5 Horizontal Dimension	0,
f6 Horizontal Dimension	0,
f7 Horizontal Dimension	0,
f8 Horizontal Dimension	0,
Fillet Vertical Dimension Data	
f1 Vertical Dimension	0,
f2 Vertical Dimension	0,
f3 Vertical Dimension	0,
f4 Vertical Dimension	0,
f5 Vertical Dimension	0,
f6 Vertical Dimension	0,
f7 Vertical Dimension	0,
f8 Vertical Dimension	0,
Left Overhang Data	
Left Overhang Length (L1)	2,4
Left Overhang Outer Thickness (t5)	0,2
Right Overhang Data	
Right Overhang Length (L2)	2,4
Right Overhang Outer Thickness (t6)	0,2
Live Load Curb Locations	
Distance to Inside Edge of Left Live Load Curb	0,
Distance to Inside Edge of Right Live Load Curb	0,
Distance to Centerline of Median Live Load Curb	0,
Width of Median Live Load Curb	0,
Insertion Point Location	
Offset X From Reference Point To Insertion Point	0,
Offset Y From Reference Point To Insertion Point	0,
Design Data	
Top Slab Cut Line Distance (From Top of Section)	0,605
Bottom Slab Cut Line Distance (From Bottom of Section)	0,355

Girder Output

Modify/Show Girder Force Output Locations...

Modify/Show Properties

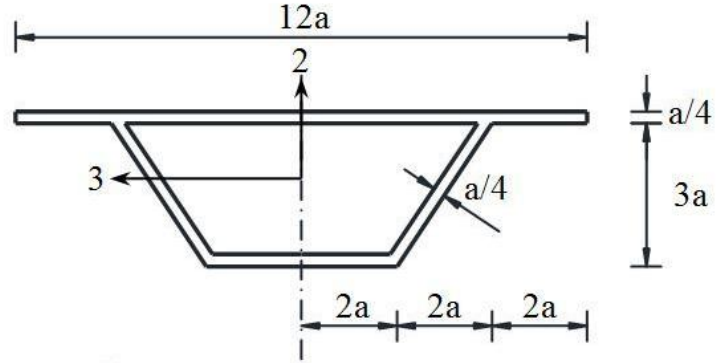
Materials... Frame Sects... Units: KN, m, C

Convert To User Bridge Section

OK Cancel

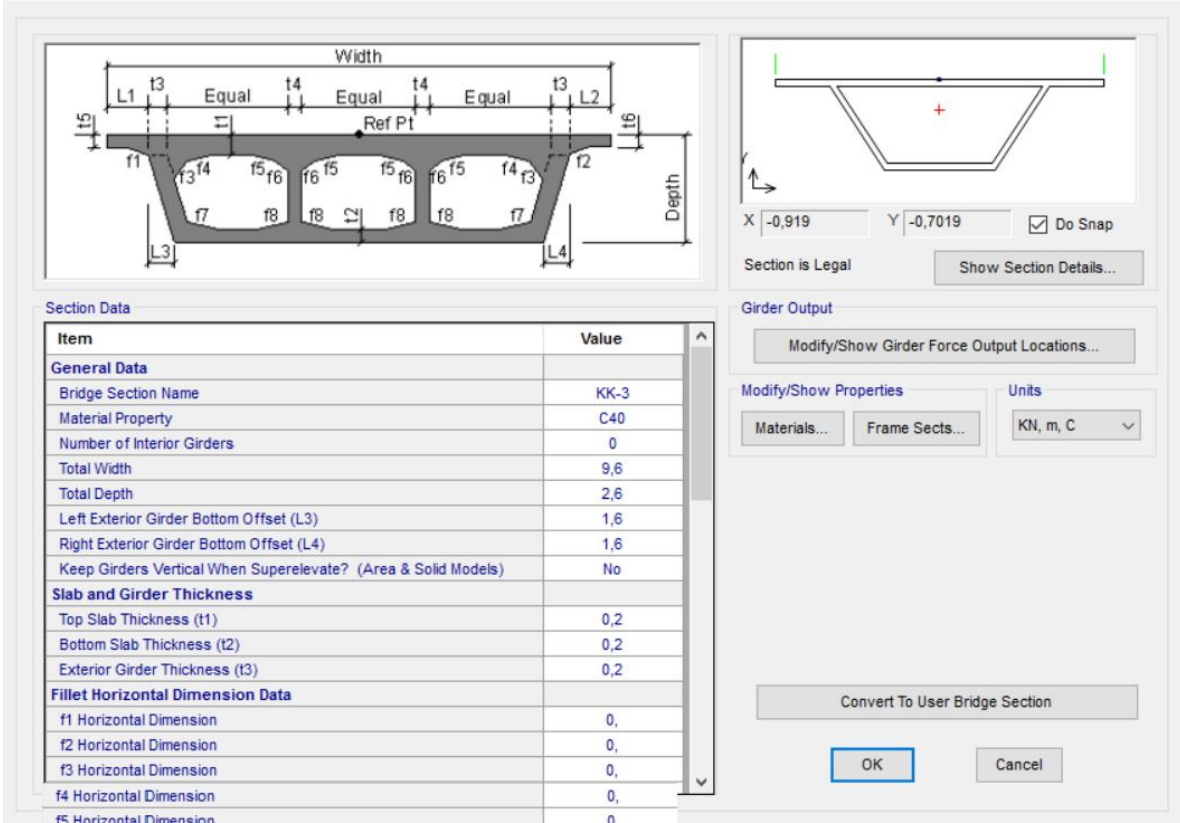
Şekil 30. KK-2 tabliyesi özellikleri

KK-3 kesitli tabliyenin verilerini girmek için KK-2 kesitli tabliyede yapılan işlemlerin aynısı tekrarlanarak “Define Bridge Section Data- Concrete Box Girder-Sloped” ileti kutucuğu ekrana getirilir. Şekil 31’de verilen KK-3 tabliyesinin kesit özellikleri Şekil 32’de görüldüğü gibi ilgili kısımlara girilir. Böylece KK-3 tabliyesi tanımlanmış olur.



Kutu Kesit 3 (KK-3)	
A	= 3,47 m ²
I ₂₂	= 20,4535 m ⁴
I ₃₃	= 3,4329 m ⁴
J	= 6,5448 m ⁴

Şekil 31. KK-3 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm)



Section Data

Item	Value
General Data	
Bridge Section Name	KK-3
Material Property	C40
Number of Interior Girders	0
Total Width	9,6
Total Depth	2,6
Left Exterior Girder Bottom Offset (L3)	1,6
Right Exterior Girder Bottom Offset (L4)	1,6
Keep Girders Vertical When Superelevate? (Area & Solid Models)	No
Slab and Girder Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	0,2
Bottom Slab Thickness (t2)	0,2
Exterior Girder Thickness (t3)	0,2
Fillet Horizontal Dimension Data	
f1 Horizontal Dimension	0,
f2 Horizontal Dimension	0,
f3 Horizontal Dimension	0,
f4 Horizontal Dimension	0,
f5 Horizontal Dimension	0,
f6 Horizontal Dimension	0,
f7 Horizontal Dimension	0,
f8 Horizontal Dimension	0,
Fillet Vertical Dimension Data	
f1 Vertical Dimension	0,
f2 Vertical Dimension	0,
f3 Vertical Dimension	0,
f4 Vertical Dimension	0,
f5 Vertical Dimension	0,
f6 Vertical Dimension	0,
f7 Vertical Dimension	0,
f8 Vertical Dimension	0,
Left Overhang Data	
Left Overhang Length (L1)	1,6
Left Overhang Outer Thickness (t5)	0,2
Right Overhang Data	
Right Overhang Length (L2)	1,6
Right Overhang Outer Thickness (t6)	0,2
Live Load Curb Locations	
Distance to Inside Edge of Left Live Load Curb	0,
Distance to Inside Edge of Right Live Load Curb	0,
Distance to Centerline of Median Live Load Curb	0,
Width of Median Live Load Curb	0,
Insertion Point Location	
Offset X From Reference Point To Insertion Point	0,
Offset Y From Reference Point To Insertion Point	0,
Design Data	
Top Slab Cut Line Distance (From Top of Section)	0,605
Bottom Slab Cut Line Distance (From Bottom of Section)	0,355

Girder Output

Modify/Show Girder Force Output Locations...

Modify/Show Properties

Materials... Frame Sects...

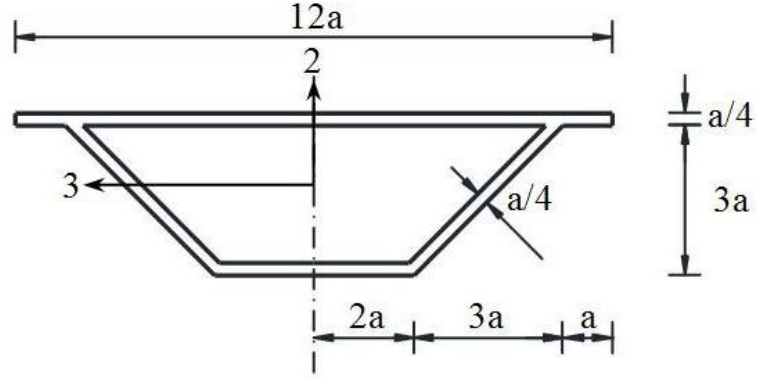
Units: KN, m, C

Convert To User Bridge Section

OK Cancel

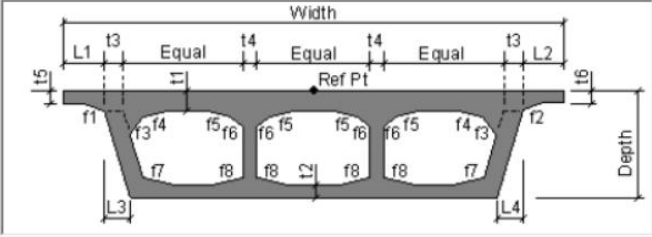
Şekil 32. KK-3 Tablisesi özellikleri

KK-4 kesitli tabliyenin verilerini girmek için “Define Bridge Section Data-Concrete Box Girder- Sloped” ileti kutucuğu ekrana getirilir. Şekil 33’te verilen KK-4 tabliyesinin kesit özellikleri Şekil 34’te görüldüğü gibi ilgili kısımlara girilir. Böylece KK-4 tabliyesi tanımlanmış olur.



<i>Kutu Kesit 4 (KK-4)</i>	
A	= 3,48 m ²
I ₂₂	= 22,6600 m ⁴
I ₃₃	= 3,4670 m ⁴
J	= 7,2405 m ⁴

Şekil 33. KK-4 tabliyesinde kullanılan kutu kesit şekli (a=80cm)



Section Data

Item	Value
General Data	
Bridge Section Name	KK-4
Material Property	C40
Number of Interior Girders	0
Total Width	9,6
Total Depth	2,6
Left Exterior Girder Bottom Offset (L3)	2,4
Right Exterior Girder Bottom Offset (L4)	2,4
Keep Girders Vertical When Superelevate? (Area & Solid Models)	No
Slab and Girder Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	0,2
Bottom Slab Thickness (t2)	0,2
Exterior Girder Thickness (t3)	0,2
Fillet Horizontal Dimension Data	
f1 Horizontal Dimension	0,
f2 Horizontal Dimension	0,
f3 Horizontal Dimension	0,
f4 Horizontal Dimension	0,
f5 Horizontal Dimension	0,
f6 Horizontal Dimension	0,
f7 Horizontal Dimension	0,
f8 Horizontal Dimension	0,
Fillet Vertical Dimension Data	
f1 Vertical Dimension	0,
f2 Vertical Dimension	0,
f3 Vertical Dimension	0,
f4 Vertical Dimension	0,
f5 Vertical Dimension	0,
f6 Vertical Dimension	0,
f7 Vertical Dimension	0,
f8 Vertical Dimension	0,
Left Overhang Data	
Left Overhang Length (L1)	0,8
Left Overhang Outer Thickness (t5)	0,2
Right Overhang Data	
Right Overhang Length (L2)	0,8
Right Overhang Outer Thickness (t6)	0,2
Live Load Curb Locations	
Distance to Inside Edge of Left Live Load Curb	0,
Distance to Inside Edge of Right Live Load Curb	0,
Distance to Centerline of Median Live Load Curb	0,
Width of Median Live Load Curb	0,
Insertion Point Location	
Offset X From Reference Point To Insertion Point	0,
Offset Y From Reference Point To Insertion Point	0,
Design Data	
Top Slab Cut Line Distance (From Top of Section)	0,605
Bottom Slab Cut Line Distance (From Bottom of Section)	0,355

Girder Output

Modify/Show Girder Force Output Locations...

Modify/Show Properties

Materials... Frame Sects... Units: KN, m, C

Convert To User Bridge Section

OK Cancel

Şekil 34. KK-4 tabliyesi özellikleri

Tabliye özellikleri tanımlandıktan sonra kesit özelliklerinin model köprü boyunca nerelerde olacağını belirleme işlemine geçilir. Yani oluşturulan kesitler atanır. Bu kesitler atanmadan önce mesnet koşulları tanımlanmalıdır.

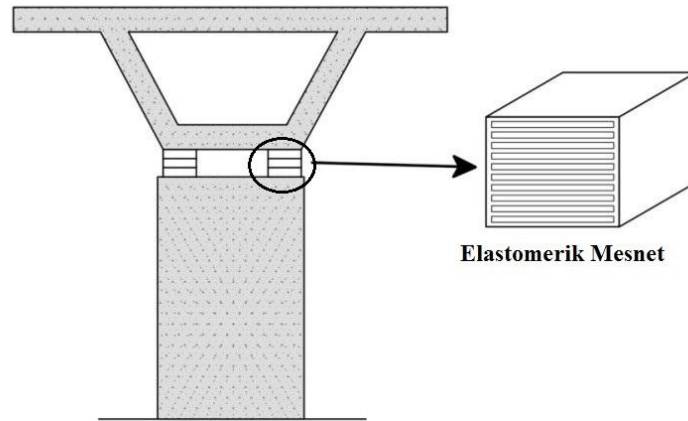
2.3. Mesnet Koşullarının Tanımlanması

2.3.1. Elastomerik Mesnetlerin Tanımlanması

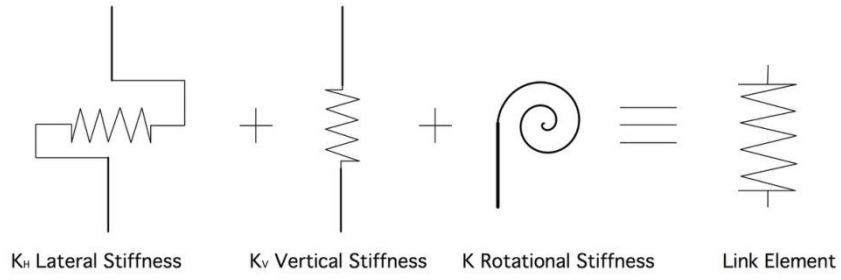
Kolon, başlık kirişi, döşeme ve tabliye, 3 ötelenme ve 3 dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Kolonların üstünde yer alan başlık kirişleri ile tabliyenin bağlantısını sağlayan elastomerik mesnetlerin (Şekil 35) CSiBridge programında tanımlanmasında “NLLINK” elemanları kullanılır. Program, bu elemanları başlık kirişleri ile tabliyenin arasında bulunan yerlere otomatik olarak atamaktadır.

Bir köprü, çeşitli koşullara veya yapısının türüne bağlı olarak farklı mesnet tiplerine sahip olabilir. Bu nedenle, köprülerin yapımında kullanılan çeşitli tipte mesnetler vardır. Bunlar içerisinde en yaygın olanlar şunlardır:

- Sismik izolasyon mesnetleri
- Mafsallı mesnetler
- Kayıcı mesnetler
- Sabit mesnetler



Şekil 35. Elastomerik mesnetlerin kolon ve başlık kirişi arasındaki yerleşimi



Şekil 36. Elastomerik mesnet yapısı

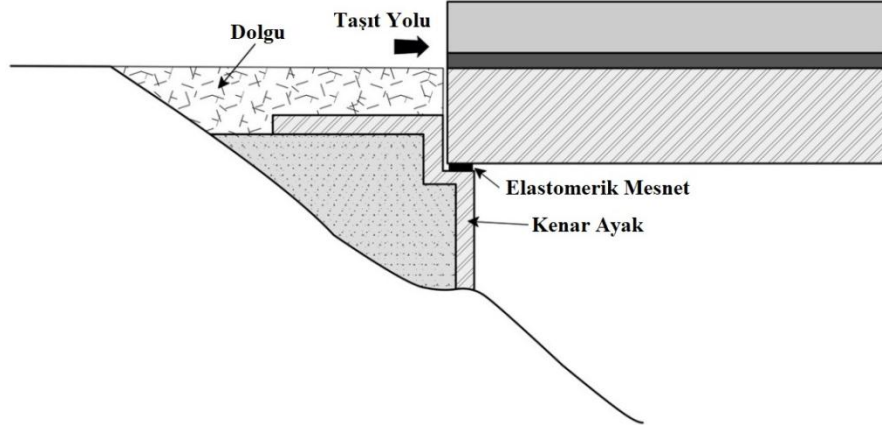
Başlık kirişleri ile tabliyenin bağlantısını sağlayan elastomerik mesnetlere ait koşullar şu şekilde tanımlanır (Şekil 37).

DOF/Direction	Release Type	Stiffness
Translation Vertical (U1)	Fixed	
Translation Normal to Layout Line (U2)	Fixed	
Translation Along Layout Line (U3)	Fixed	
Rotation About Vertical (R1)	Fixed	
Rotation About Normal to Layout Line (R2)	Fixed	
Rotation About Layout Line (R3)	Fixed	

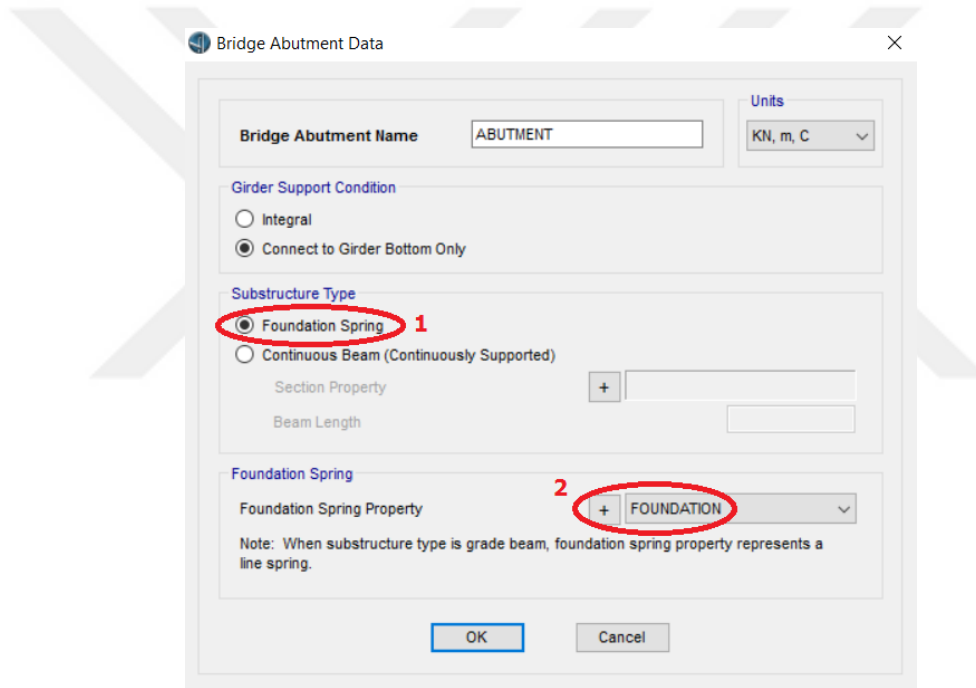
Şekil 37. Elastomerik mesnet tanımlaması

2.3.2. Kenar Ayakların Tanımlaması

Köprünün uçlarındaki mesnetler için “Kenar Ayak” tanımı kullanılır (Şekil 38). Kenar ayaklar bir köprünün uç destekleri olup ve zemin koşullarına bağlı olarak kazık destekli veya yayılı ayaklı bir temelle yapılabilirler. Kenar ayaklar, üstyapının düşey ve yanal ötelenmesi ile burulma dönmesini sınırlar. Köprüde ısıl genleşme sebebiyle meydana gelecek boyuna hareketler sınırlandırılmaz. Kenar ayaklara mesnet şartları atanırken bu hususlara dikkat edilmelidir. Kenar ayak tanımlaması Şekil 39’daki gibi yapılır.



Şekil 38. Kenar ayak detayı

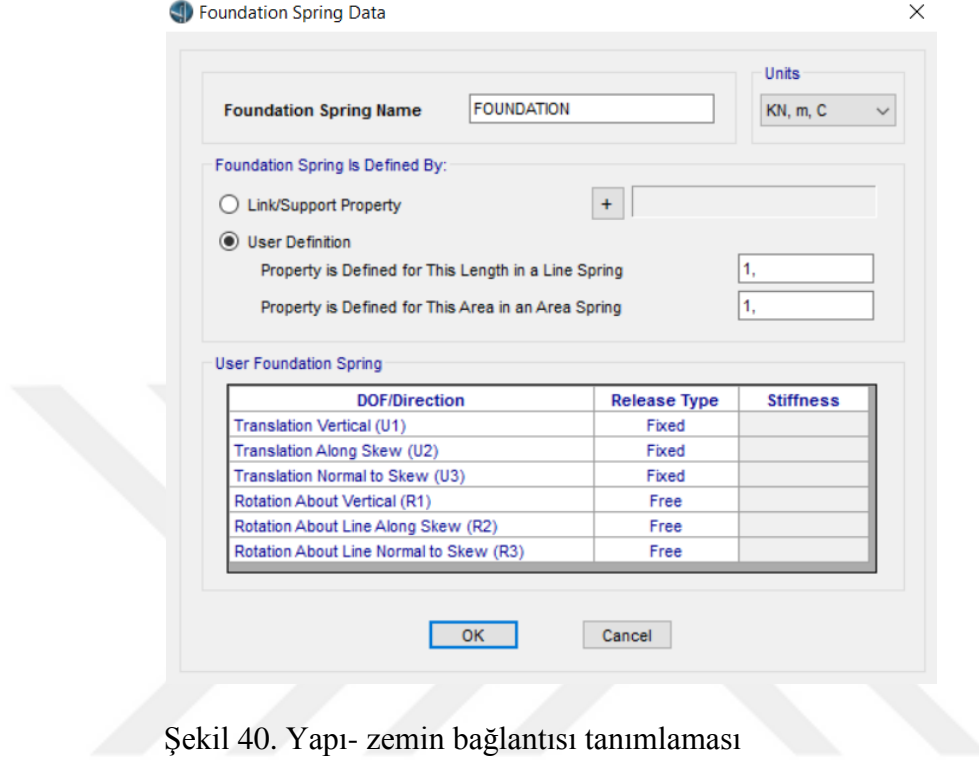


Şekil 39. Kenar ayak tanımlaması

2.3.3. Yapı-Zemin Bağlantısı Tanımlaması

Köprü ayaklarının zeminle bağlantısı yay atamasıyla yapılır. Orta ayaklarda, her kolonun tabanına yay ataması yapılabilir. Bu durumda noktasal yaylar kullanılır. Kenar ayaklarda ise, tekil temel için noktasal yaylar, sürekli temel için ise birim uzunluğa yayılı yay ataması yapılır. Temelde kullanılacak yay elemanı, Link/Support Property özelliğiyle

veya kullanıcı tanımlı (User Definition) olarak belirtilir. Şekil 40’da çalışmada kullanılan köprü modeli için yay özelliklerinin tanımlanması gösterilmiştir.



Şekil 40. Yapı- zemin bağlantısı tanımlaması

2.3.4. Orta Ayakların Tanımlanması

Bridge Bent Data ileti ekranında CSiBridge programı tarafından “Bent” olarak adlandırılan ikon, kolon ve başlık kirişlerini bir bütün olarak ele almaktadır. Yani, Bent olarak isimlendirilen kısım, kolonları ve başlık kirişlerini temsil etmektedir. Bridge Bent Data ileti ekranında orta ayaklardaki başlık kirişinin uzunluğu, bir orta ayakta kaç adet kolonun mevcut olduğu, orta ayağın başlık bölümündeki başlık kirişinin kesit özelliklerinin atanması gibi işlemler bu ileti ekranı aracılığıyla sağlanır.

Orta ayakların tanımlanmasında geometri, başlık kirişi (bent cap beam) ve orta ayak kolonlarının (bent columns) kesit özellikleri belirtilir. Aynı zamanda, orta ayak kolonlarının taban mesnet şartları (base supports) da tanımlanır.

Model köprüde toplam 4 adet orta ayak mevcuttur. Bunların başlık kirişi ve kolonlarının kesit özellikleri aynı olup sadece kolon uzunluklarında farklılıklar vardır. İki kolon 15 m diğer iki kolon ise 20 m uzunluğundadır. Orta ayak özellikleri programda girilirken başlık kirişinin uzunluğunun 3,2 m (köprü tabliyesinin alt genişliği ile aynı

uzunlukta) ve kolon sayısının 1 olmasına dikkat edilmelidir (Şekil 41). “Modify Column Data” bölümünde, yüksekliği 15 m olan kolonların yerleştirilmesi Şekil 42’de gösterilmiştir.

Diğer orta ayaklar da benzer şekilde tanımlanır. Sıradaki işlem model köprüünün açıklık mesafelerinin tanımlanmasıdır. Model, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi 250 m uzunluğundadır ve 5 açıklıktan oluşmaktadır (4 adet orta ayağa sahiptir). Açıklık uzunlukları eşit olup 50 m’dir. Şekil 43’te görülen pencere kullanılarak açıklıklar atanır.

Şekil 41. Orta ayak tanımlaması

Column	Section	Distance	Height	Angle	Foundation Spring
1	COLUMN	1,6	15,	0,	Fixed

Column	RH Long	RH Trans	Hinge Prop. Top	Hinge Prop. Bottom
1	1,	1,	Auto	Auto

Column	R1 Release	R2 Release	R3 Release	R1 Stiffness	R2 Stiffness	R3 Stiffness
1	Fixed	Fixed	Fixed			

Şekil 42. Orta ayak oluşturma işlemi

Bridge Object Data

Bridge Object Name: Bridge_1

Layout Line Name: BLL1

Coordinate System: GLOBAL

Units: KN, m, C

Define Bridge Spans

Span Label	Start Station m	Length m	End Station m	Start Support	End Support
Span 1	0,	50,	50,	Abutment	BENT1
Span 2	50,	50,	100,	BENT1	BENT1
Span 3	100,	50,	150,	BENT1	BENT1
Span 4	150,	50,	200,	BENT1	BENT1
Span 5	200,	50,	250,	BENT1	Free

Note: 1. Bridge object location is based on bridge section insertion point following specified layout line.

Bridge Object Plan View (X-Y Projection)

Modify/Show Assignments

- Spans
- User Discretization Points
- Abutments
- Bents
- In-Span Hinges (Expansion Jts)
- In-Span Cross Diaphragms
- Superelevation
- Prestress Tendons
- Girder Rebar
- Staged Construction Groups
- Point Load Assigns
- Line Load Assigns

Lock to Prevent Updating the Linked Model

OK Cancel

Şekil 43. Açıklık mesafelerinin belirlenmesi

Açıklık mesafeleri de belirlendikten sonra ABUTMENT ve BEARING olarak tanımlanan ve zeminle temas eden yerlerde tanımlanan “NLLINK” elemanlarının Global Z eksenini doğrultusunda yol platformuna ne kadar mesafede olduğu belirlenir. Bunun için “**Substructure Location**” bölümünde

- Elavation (Global Z): **-2,9**

“**Bearing Assingment**” bölümünde

- Elavation at layout line (Global Z): **-3,5**

olarak atanır (Şekil 44).

The image displays two screenshots of the 'Bridge Object Abutment Assignments' dialog box, showing the configuration for a bridge object named 'BOBJ1'.

Top Screenshot (Start Abutment):

- Bridge Object Name:** BOBJ1
- Units:** KN, m, C
- Start Abutment Tab:**
 - Support Name:** Start Abutment
 - Abutment Direction (Bearing Angle):** Default
 - Diaphragm Property:** None
 - Substructure Assignment:** Abutment Property (selected)
 - Substructure Location:** Elevation (Global Z) = -3.5, Horizontal Offset = 0.
 - Bearing Assignment:** Girder-by-Girder (selected), Bearing Property = BEARING, Restrainer Property at Bearing = None, Elevation at Layout Line (Global Z) = -2.9, Rotation Angle from Bridge Default = 0.

Bottom Screenshot (End Abutment):

- Bridge Object Name:** BOBJ1
- Units:** KN, m, C
- End Abutment Tab:**
 - Support Name:** Span 5
 - Abutment Direction (Bearing Angle):** Default
 - Diaphragm Property:** None
 - Substructure Assignment:** Abutment Property (selected)
 - Substructure Location:** Elevation (Global Z) = -3.5, Horizontal Offset = 0.
 - Bearing Assignment:** Girder-by-Girder (selected), Bearing Property = BEARING, Restrainer Property at Bearing = None, Elevation at Layout Line (Global Z) = -2.9, Rotation Angle from Bridge Default = 0.

Şekil 44. Yol platform mesafelerinin belirlenmesi

Bridge Object Bents Assignments iletı ekranında her bir açıklık için o açıklığa karşılık gelen orta ayağı seçilerek bunlar için yeniden mesnet koşulları tanımlanır. Ayrıca bu aşamada bir önceki adımda yapılan Global Z eksenine olan mesafe belirlenir. Örnek olarak 1. orta ayak için;

Bridge Object Bents Assignments ekranında **Specify Bent Considered** bölümünde

- Bent is At the End of This Span: **Span 1**

Bent Assignment bölümünde

- Bent Property: **BENT1**

Bent Location bölümünde

- Elavation (Global Z): **-2,9**

Bearing Assignment bölümünde

- Bearing Property: **Fixed**
- Elavation (At Layout Line, Global Z): **-3,5**

işlemleri yapılır. Diğer orta ayaklar için de benzer işlemler tekrar edilir. Şekil 45-48'de tüm orta ayaklar için yapılan işlemlere ait ekran görüntüleri verilmiştir. Böylece model köprünün yol platformu, açıklıkları, kolonlar, başlık kirişleri, zeminle temas eden yerler, prefabrik kirişler, tabliye ve mesnet koşullarının tanımlanması tamamlanmış olur.

Şekil 45. Köprünün 50. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması

Bridge Object Bent Assignments

Bridge Object Name: BOBJ1 Units: KN, m, C

Specify Bent Considered

Bent Is At The End of This Span: Span 2

Bent Is At This Station: 100,

Support Name: Span 2

Superstructure Assignment

Superstructure Continuity Condition: Continuous

Mesh Superstructure to Match Bent Bearing: Yes

Diaphragm Property: + None

Steel U-Girder Diaphragm: + None

Bent Assignment

Bent Property: + BENT2

Bent Direction (Bearing Angle): Default

Bent Location

Elevation (Global Z): -3,5

Horizontal Offset: 0,

Note: Horizontal offset is from bridge layout line to midlength of cap beam.

Bearing Assignment

Girder-by-Girder General

Bearing Property: + Fixed

Restrainer Property at Bearing: + None

Elevation (At Layout Line, Global Z): -2,9

Rotation Angle from Bridge Default: 0,

Girder-by-Girder Bearing Overwrites

Modify/Show Overwrites... No Overwrites Exist

OK Cancel

Şekil 46. Köprünün 100. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması

Bridge Object Bent Assignments

Bridge Object Name: BOBJ1 Units: KN, m, C

Specify Bent Considered

Bent Is At The End of This Span: Span 2

Bent Is At This Station: 100,

Support Name: Span 2

Superstructure Assignment

Superstructure Continuity Condition: Continuous

Mesh Superstructure to Match Bent Bearing: Yes

Diaphragm Property: + None

Steel U-Girder Diaphragm: + None

Bent Assignment

Bent Property: + BENT2

Bent Direction (Bearing Angle): Default

Bent Location

Elevation (Global Z): -3,5

Horizontal Offset: 0,

Note: Horizontal offset is from bridge layout line to midlength of cap beam.

Bearing Assignment

Girder-by-Girder General

Bearing Property: + Fixed

Restrainer Property at Bearing: + None

Elevation (At Layout Line, Global Z): -2,9

Rotation Angle from Bridge Default: 0,

Girder-by-Girder Bearing Overwrites

Modify/Show Overwrites... No Overwrites Exist

OK Cancel

Şekil 47. Köprünün 150. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması

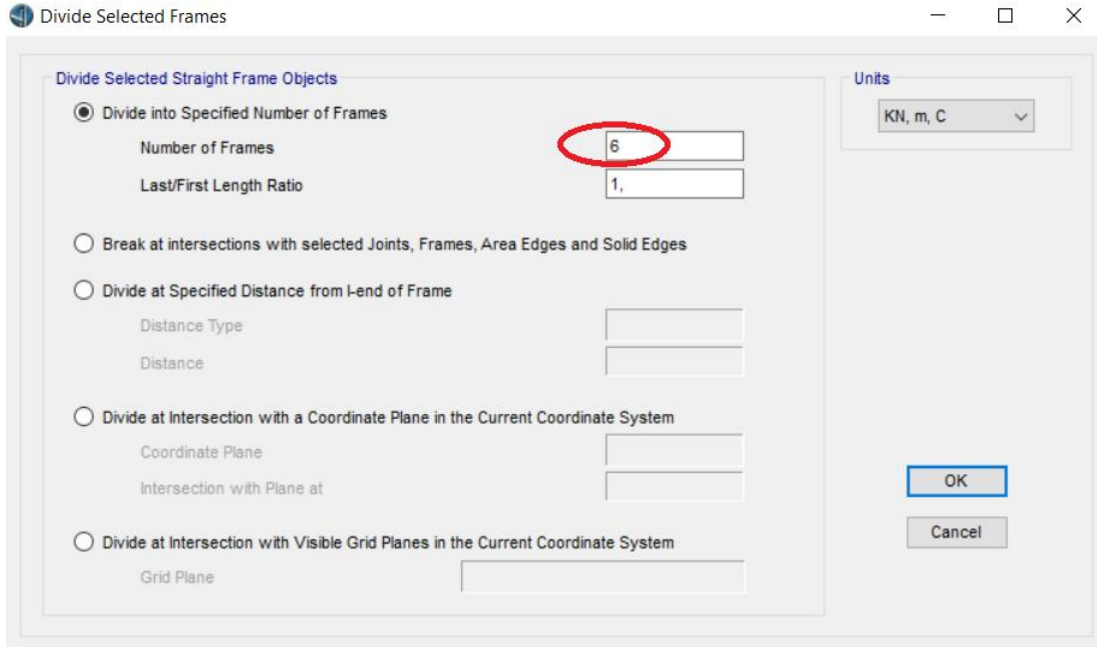
Şekil 48. Köprünün 200. metresindeki orta ayakların açıklığa atanması

Şimdiye kadar olan değişiklikler “Update Bridge Structural Model” ekranından güncellenir. Köprüde segment dilimlerinin kalınlıkları 5 m’dir. Şekil 53’te görülen pencere yardımıyla segment dilim kalınlığı 5 m olarak girilir. İsteğe göre farklı değerler yazılıp dilim kalınlıkları değiştirilebilir.

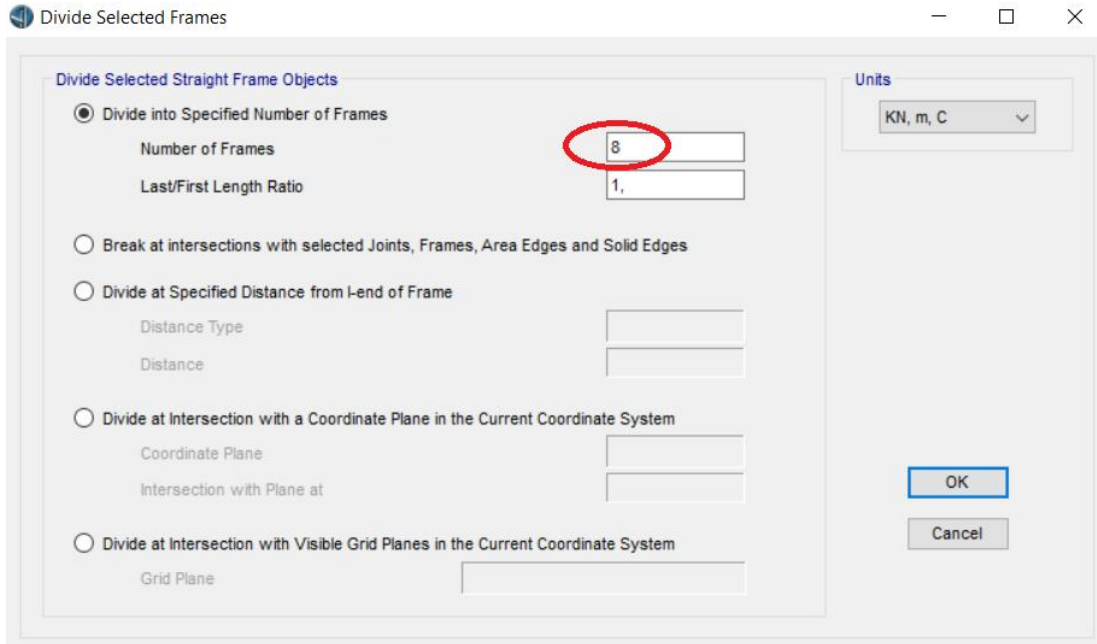
Şekil 49. Kutu kesit dilim kalınlığının belirlenmesi

15 metre uzunluğundaki birinci ve dördüncü kolon kolonlar 2,5 metre uzunluğunda 6 eşit parçaya, 20 metre uzunluğundaki ikinci ve üçüncü kolonlar ise 2,5 metre uzunluğunda

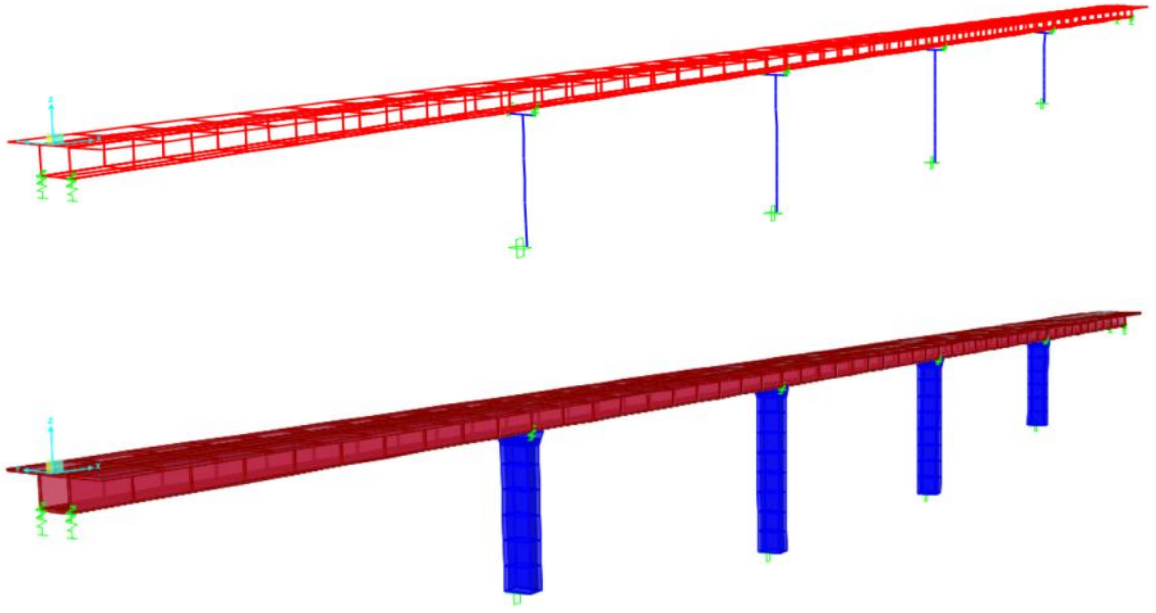
8 eşit parçaya ayrılır (Şekil 50) ve (Şekil 51). Tüm bu işlemlerin tamamlanmasının ardından model köprümüz tanımlanmış olur. Köprünün tamamlanmış haline ait görüntüler Şekil 52’de verilmiştir.



Şekil 50. Kolonların eşit dilimlere bölünmesi



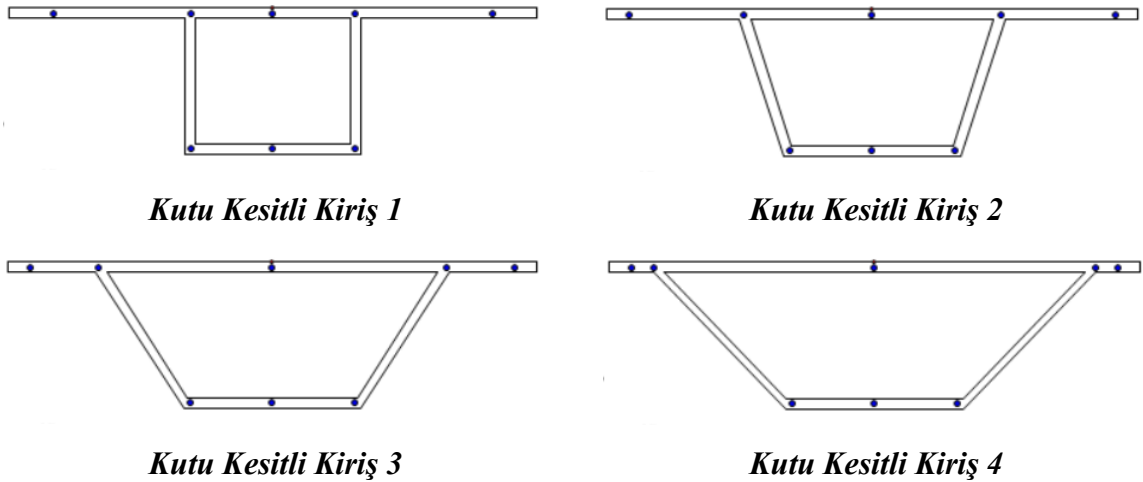
Şekil 51. Kolonların eşit dilimlere bölünmesi



Şekil 52. Model köprünün son halinin CSiBridge programındaki 3 boyutlu görünümü

2.4. Öngerilme Tendonlarının Oluşturulması

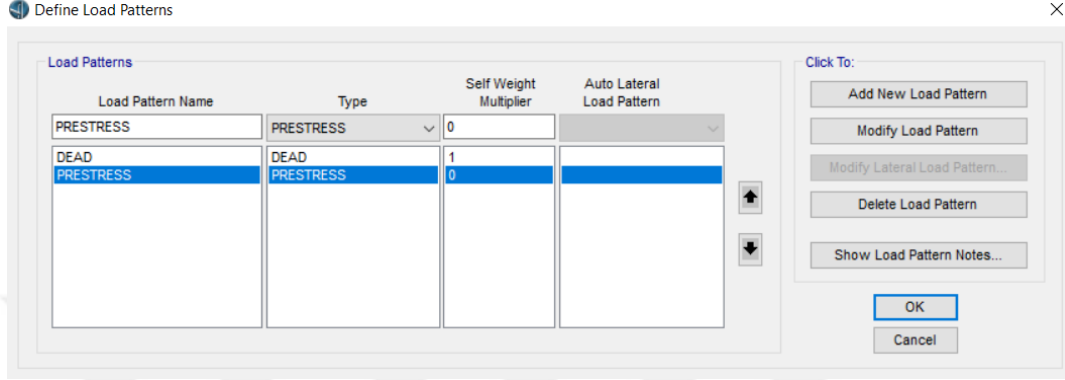
Çalışmada göz önüne alınan kutu kiriş en kesitlerine tendon yerleştirilmesinde Garg ve Kumar (2014) tarafından yapılan çalışma esas alınmıştır. Buna göre her bir kutu kesit için tendon konumları Şekil 53’te görülmektedir. Bir öngerme kablosunun (tendon) alanı $98,7 \text{ mm}^2$, tendon kuvveti ise 1950 kN olarak alınmıştır. Kesitlere toplamda 8 adet düz tendon yerleştirilmiştir.



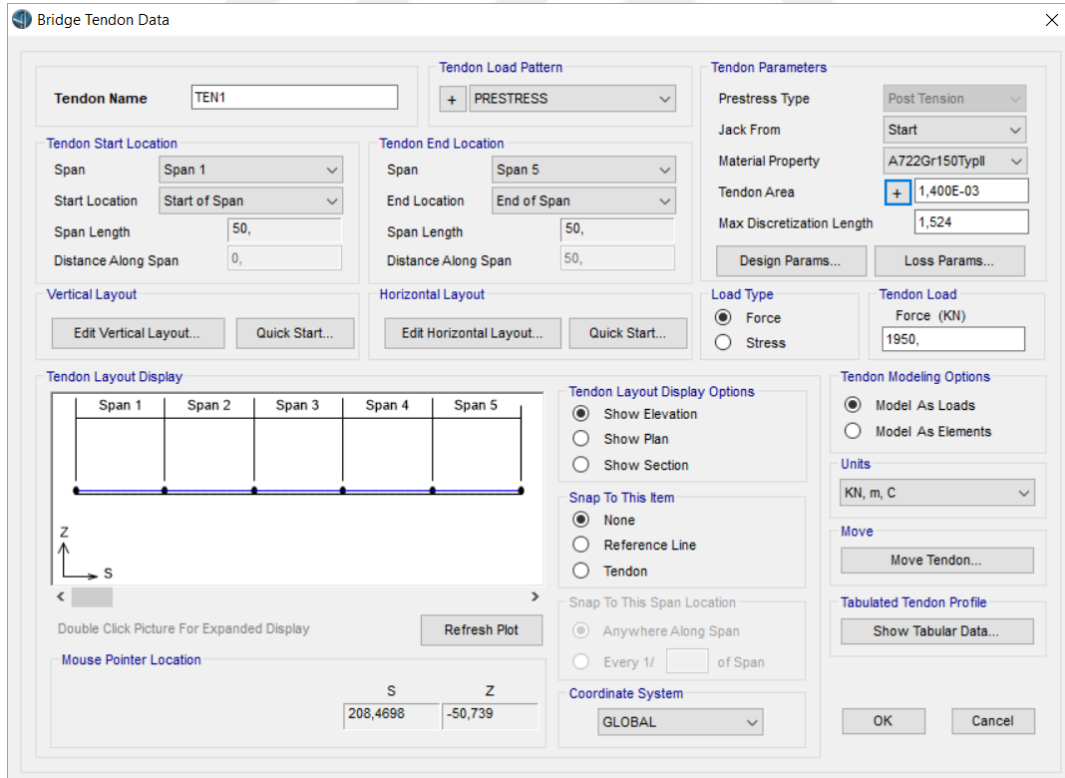
Şekil 53. Göz önüne alınan kiriş kesitlerindeki tendon yerleşimleri

Bu aşamada, ilk olarak öngermeli yük durumu oluşturulur. Bunun için Define Load Patterns ekranından Prestress tipi yük bileşeni seçilir (Şekil 54).

Tendonları tanımlamak için Bridge Tendon Data ekranından Prestress yük durumu seçilir. Tendon kesit alanı, sayısı ve tendon kuvveti tanımlanır. Tendon düz olarak seçilir.



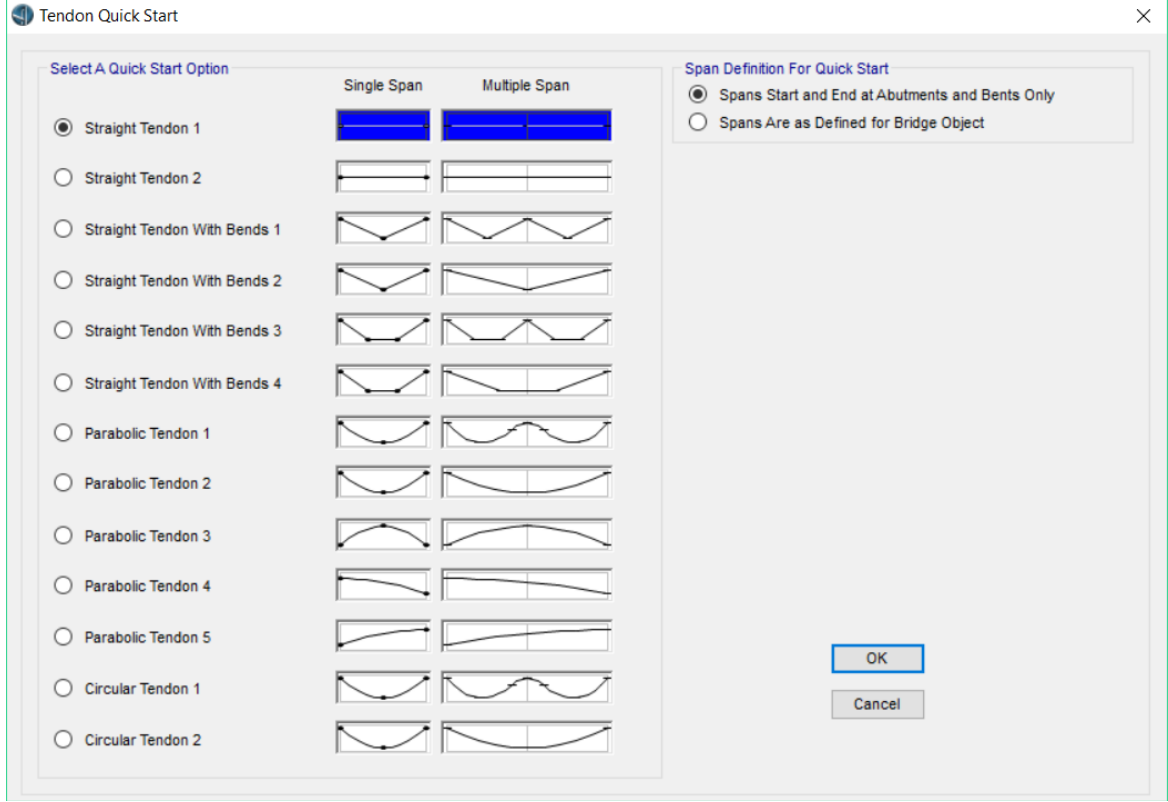
Şekil 54. Öngermeli yük bileşenin oluşturulması



Şekil 55. Tendon 1'in tanımlanması

Tendon Quick Start ekranında Düz Tendon 1 seçilir (Şekil 56). Ardından Tendon Vertical Layout Data ekranı açılarak 0m, 50m, 100m, 150m, 200 m ve 250m'deki Vert.

Offset değerleri -0,1 olarak değiştirilir (Şekil 57). Tabliye 0,2 m kalınlığındadır ve tendonun bu kalınlığın ortasına gelmesi için değerler -0,1 olarak değiştirilmiştir.



Şekil 56. Tendon 1 için düz tendon seçilmesi

Ardından **Edit Horizontal Layout** kısmı açılır ve **Horiz. Offset** bölümünde **Start of Tendon** “1,5”, **Linear to End of Tendon** “-4,4” olarak girilir (Şekil 62). Böylece ilk tendon tanımlanmış olur.

Tendon Vertical Layout Data - TEN1

Tendon Layout Data

Point ID	Segment Type From Point (n - 1) to Point(n)	Tendon Dist. m	Vert. Offset m	Slope m / m
1		0,	-0,1	
1	Start of Tendon	0,	-0,1	
2	Linear	50,	-0,1	
3	Linear	100,	-0,1	
4	Linear	150,	-0,1	
5	Linear	200,	-0,1	
6	Linear to End of Tendon	250,	-0,1	

Tendon Layout Display

Span 1 Span 2 Span 3 Span 4 Span 5

z
s

Double Click Picture For Expanded Display Refresh Plot

Mouse Pointer Location

Span	Span Dist.	Tendon Dist.	S	Z
Span 5	47,2607	247,2607	247,2607	-0,1

Tendon Layout Display Options

Elevation Is Shown
 Plan Is Shown
 Section Is Shown

Snap To This Item

None
 Reference Line
 Tendon

Snap To This Span Location

Anywhere Along Span
 Every 1/ of Span

Coordinate System

GLOBAL

Units: KN, m, C

Move: Move Tendon...

Tabulated Tendon Profile: Show Tabular Data...

OK Cancel

Şekil 57. Tendonun köprü içerisindeki yerleşim mesafesinin belirlenmesi

Tendon Horizontal Layout Data - TEN1

Tendon Layout Data

Point ID	Segment Type From Point (n - 1) to Point(n)	Tendon Dist. m	Horiz. Offset m	Slope m / m
1		0,	-4,4	
1	Start of Tendon	0,	-4,4	
2	Linear to End of Tendon	250,	-4,4	

Tendon Layout Display

Span 1 Span 2 Span 3 Span 4 Span 5

Y
X

Double Click Picture For Expanded Display Refresh Plot

Mouse Pointer Location

Span	Span Dist.	Tendon Dist.	X	Y
Span 1				

Tendon Layout Display Options

Elevation Is Shown
 Plan Is Shown
 Section Is Shown

Snap To This Item

None
 Reference Line
 Tendon

Snap To This Span Location

Anywhere Along Span
 Every 1/ of Span

Coordinate System

GLOBAL

Units: KN, m, C

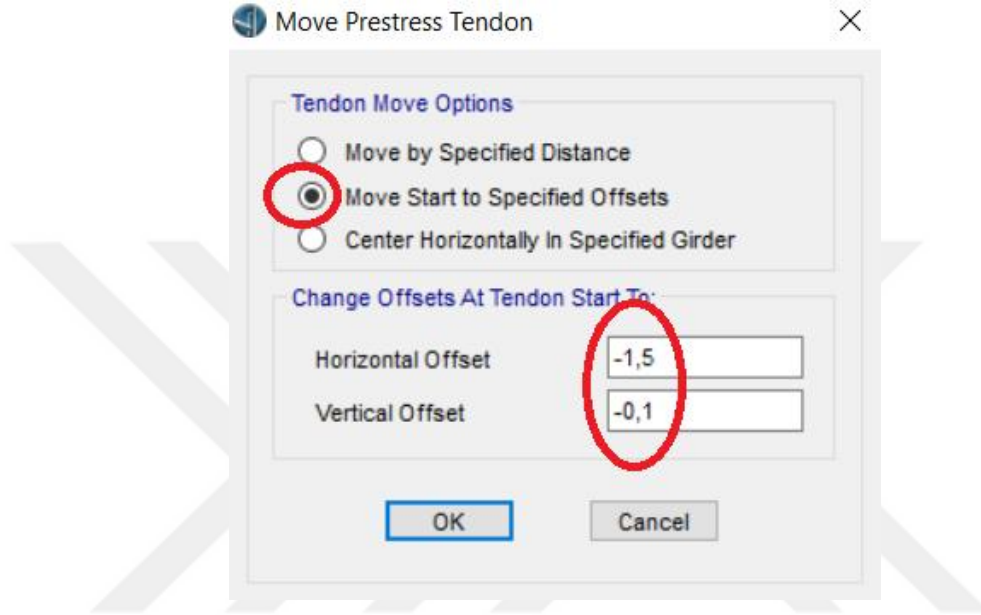
Move: Move Tendon...

Tabulated Tendon Profile: Show Tabular Data...

OK Cancel

Şekil 58. Tendonun köprü içerisindeki yerleşim mesafesinin belirlenmesi

Kalan 7 tendonun koordinatları hariç bütün özellikleri aynıdır. Bu sebeple Tendon 1 diğer tendonların koordinatlarına kopyalanarak pratikçe tendon tanımlama işlemi tamamlanır. Bunun için tendon 1 seçilerek Move Prestress Tendon ekranı açılır. Bu ekranda tendonların başlangıç noktası (0,0) koordinatına mesafesi yatay ve düşey eksende yazılır. Tendon 2 için bu işlem Şekil 59' da gösterilmiştir.



Şekil 59. Tendon 2'nin tanımlanması

Diğer kalan tendonlar için yatay ve düşey koordinatlar aşağıda verilmiştir.

Tendon 3;

Delta Horiz. Offset: 0

Delta Vert. Offset: -0,1

Tendon4;

Delta Horiz. Offset: 1,5

Delta Vert. Offset: -0,1

Tendon 5;

Delta Horiz. Offset: 4,4

Delta Vert. Offset: -0,1

Tendon 6;

Delta Horiz. Offset: -1,5

Delta Vert. Offset: -2,5

Tendon 7;

Delta Horiz. Offset: 0

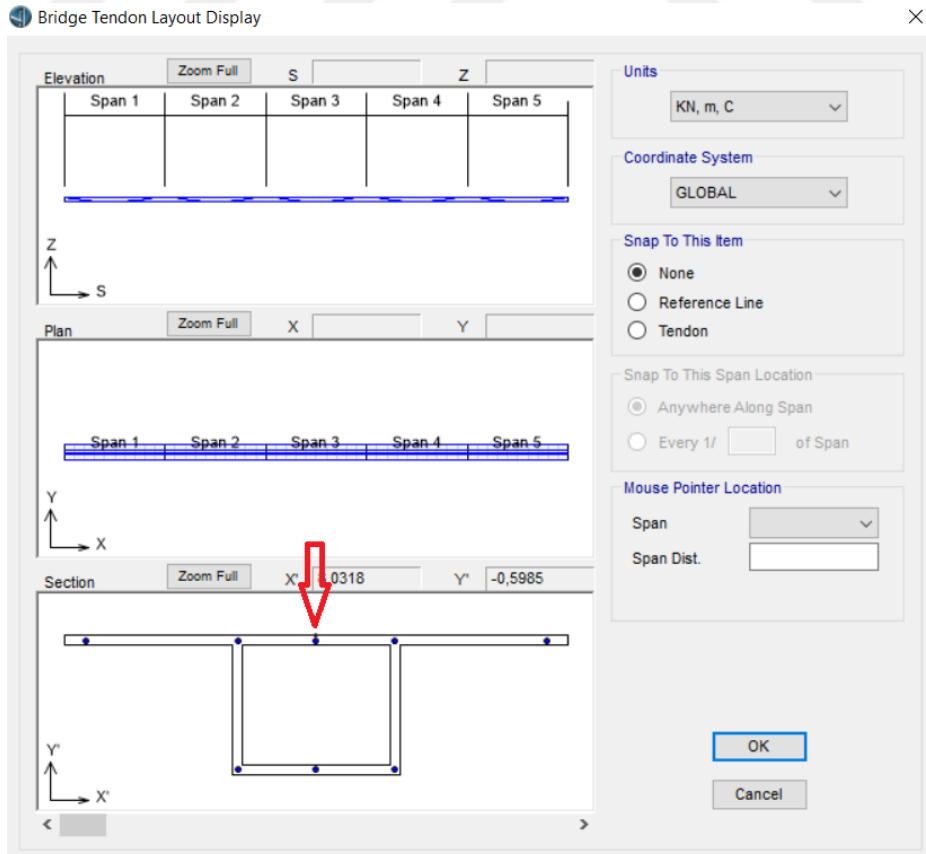
Delta Vert. Offset: -2,5

Tendon 8;

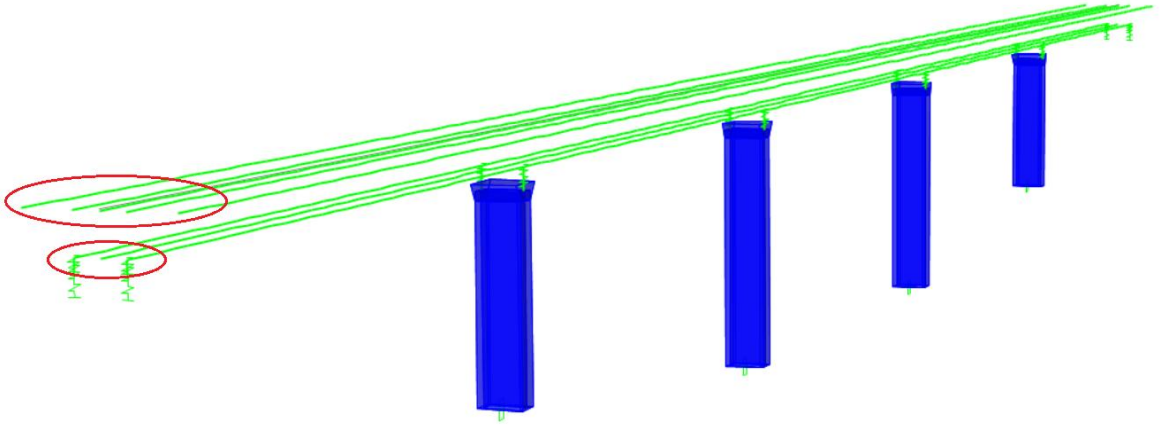
Delta Horiz. Offset: 1,5

Delta Vert. Offset: -2,5

Böylece Kutu Kesit 1 için 8 adet tendon tanımlama işlemi tamamlanmış olur. Tendonların yerleşimleri Şekil 60'da verilmiştir. Kutu Kesit 2, 3 ve 4 için de aynı işlemler yapılarak tendonlar tanımlanır.



Şekil 60. Tendonların kesitteki yerleşimleri



Şekil 61. KK-1 kirişli köprü modelinde tendonların görünüşü

2.5. Taşıt Yüğü Analiz Durumlarının Modellenmesi

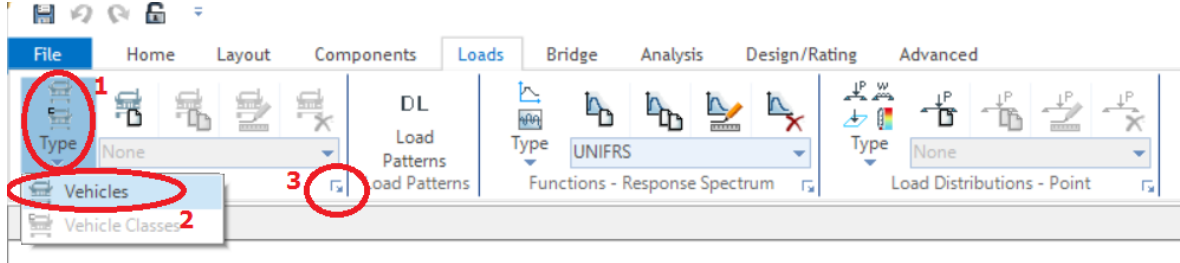
Köprünün analizi yapılırken herhangi bir analiz durumu tipi kullanılabilmesine rağmen, taşıt hareketli yüklerine özel birkaç çeşit analiz seçeneği vardır. Bunlar Hareketli katar yükü analiz durumları, Çok-adımlı statik ve çok-adımlı dinamik (doğrudan integrasyon zaman alanı) analiz durumlarıdır.

Çok-adımlı statik ve çok-adımlı dinamik (doğrudan integrasyon zaman alanı) analiz durumları (*multi-step static ve multi-step dynamic analysis cases*) bir ya da birden fazla taşıtın köprü üzerinde belirli bir hızda hareket ettiği durumu analiz etmede kullanılır. Bu çok-adımlı analiz durumları özel hareketli katar yük durumu tipleriyle tanımlanır. Bunlar da Trafik Şeritleri üzerinde hareket eden taşıtların doğrultusu (*direction*), başlangıç zamanı (*starting time*) ve hızlarıyla (*speed*) tanımlanır.

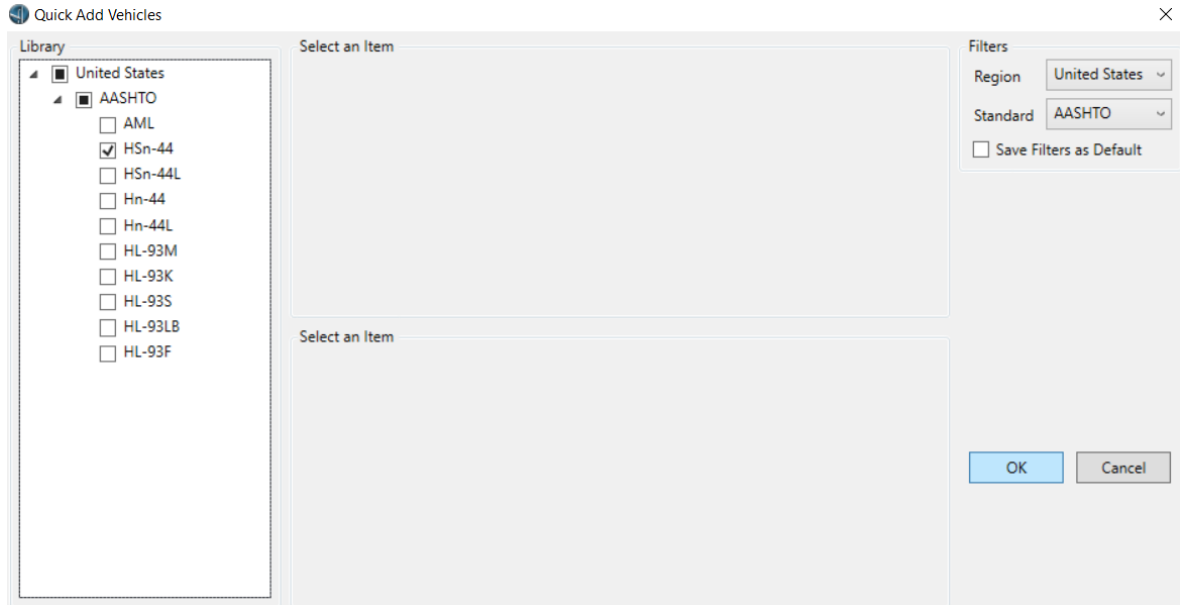
Çalışmada Hareketli Katar Yüğü Analizi ve Çok Adımlı Statik Analiz (Kamyon Yüğü Analizi) yapılmıştır. Bu analizlerin yapılabilmesi için öncelikle taşıt seçilmesi ya da oluşturulması ve bu taşıtın bir sınıfa atanması gerekmektedir. Taşıt sınıfı oluşturulması tamamlandıktan sonra bir hareketli katar yükü analiz durumu ve kamyon yükü analizi durumu oluşturulabilir.

Taşıt Yükleme Tanımlanması: Şeritleri üzerinde hareket eden herhangi bir sayıda araç hareketli yükü tanımlanabilir. CSiBridge programında bu işlem için ya bilinen standart araç tipleri ya da kullanıcı tanımlı araç tipleri oluşturmak için genel araç tanımlaması özelliği kullanılır.

Bu çalışmada hareketli yük analizi için araç tipi olarak **Library** kısmında United States > AASHTO > HSn-44 tipi araç seçilmiştir. Adımları Şekil 62 ve Şekil 63'te gösterilmektedir.



Şekil 62. Taşıt yüklemesi tanımlaması

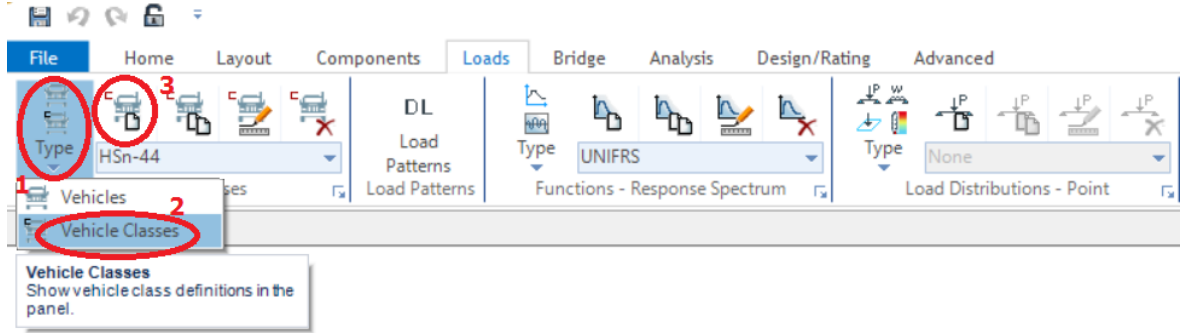


Şekil 63. AASHTO HSn-44 tipi taşıt yüklemesi

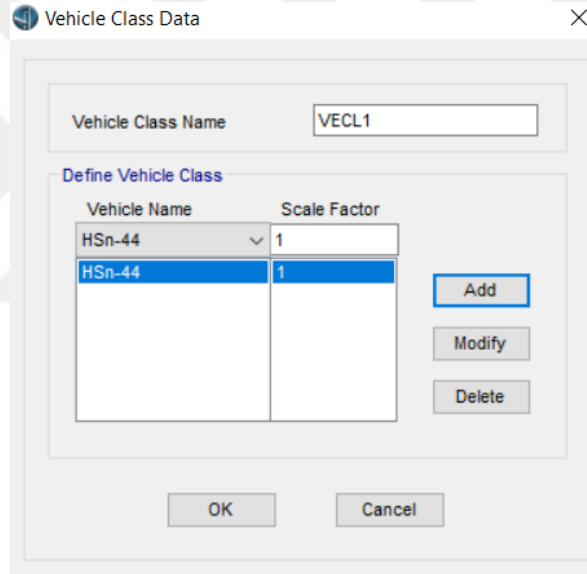
Taşıt Sınıfının Oluşturulması: Taşıt sınıfları bir hareketli yük durumu kullanılarak bir köprü modelinin taşıt hareketli yük analizini yapmak için tanımlanmak zorundadır. Bir taşıt sınıfı, sadece bir hareket yükü analizinin gerçekleştirildiği bir veya daha fazla araç grubudur (bir seferde bir araç).

Tanımlanan taşıtların bir taşıt sınıfına atanması gerekmektedir. Taşıtların bir ya da daha fazla sayıdaki taşıtın gruplanmasına olanak sağlar. Bunun için Loads > Type > Vehicle Classes ardından, Add a new vehicle classes > Vehicle Classes Data ekranından

analizde kullanılacak taşıt sınıfı seçilir. Bu ekranda **Vehicle Name** “HSn-44” seçilerek taşıt sınıfı tanımlama işlemi tamamlanır. (Şekil 65).



Şekil 64. Analizde kullanılacak taşıt sınıfının seçilmesi

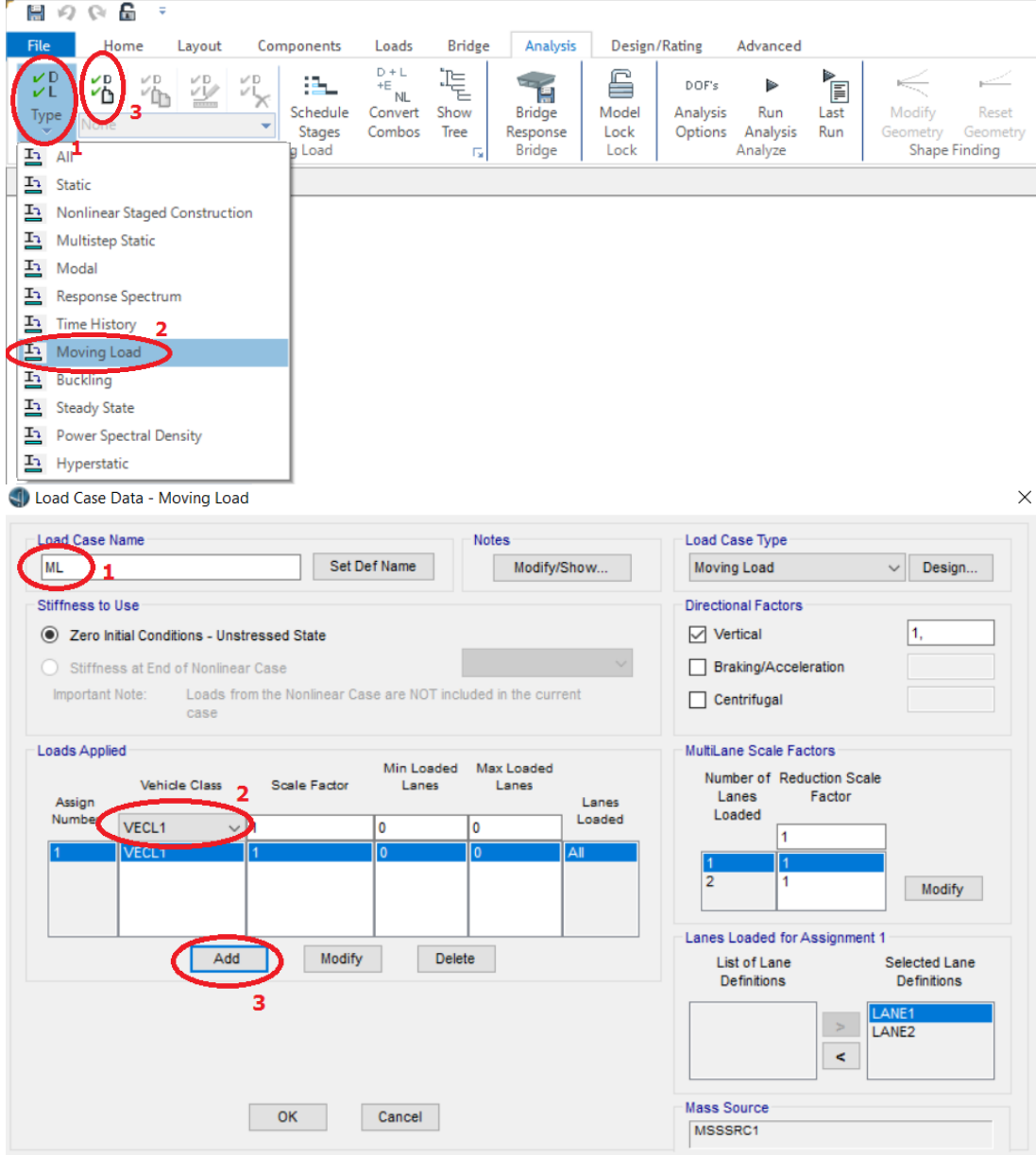


Şekil 65. HSn-44 kamyonunun bit taşıt sınıfına atanması

2.5.1. Hareketli Katar Yüğü Analizi

Taşıt analizi durumlarından birincisi olan hareketli katar yüğü analizi (Program içerisinde “Moving Load Analysis” olarak tanımlıdır.) tanımlaması yapılır. Hareketli katar yüğü analiz durumları (*moving load analysis cases*) farklı değerler için tesir çizgilerini hesaplar ve maksimum ve minimum tepki değerlerini elde etmek için şerit yüklerinin tüm permütasyonlarını çözer.

Analiz durumu bir hareketli katar yükü (*moving load*) ve üzerinde Trafik Şeritleri üzerine 1 ölçeğiyle uygulanan taşıt sınıfı olacaktır. Bunun için ilk olarak Analysis sekmesinde DL Type kısmında Moving Load, ardından Add a new moving load case sembolüne basılarak Load Case Data – Moving Load ekranı açılarak tanımlama yapılır (Şekil 66).



Şekil 66. Hareketli yük analizi durumunun oluşturulması

Köprü modeline taşıt yükleri eklenecek ise şeritlerin tanımlanması gereklidir. Şeritler, hareketli yüklerin üst yapı üzerinde hareket edeceği çizgiyi veya alanı temsil eder.

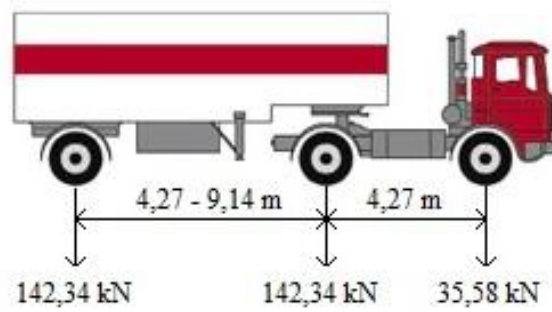
Şeritler düz veya eğri bir yörünge izleyebilir. CSiBridge programında çoklu şeritlerin paralel veya aynı uzunlukta olması gerekmez. Böylece, karmaşık trafik modelleri dikkate alınabilir. Hareketli yükler, programda tanımlı standart karayolu ve demiryolu araçları arasından seçilebileceği gibi kullanıcı tarafından da tanımlanabilir.

2.5.2. Kamyon Yükü Analizi

Çalışmada program içerisinde tanımlı ve AASHTO standartlarından HSn-44 tipi araç kullanılarak 6 tip farklı taşıt yükleme durumu analiz edilerek farklı kutu kesitlerin farklı durumlardaki tepkilerine bakılmıştır.

Tip = Hn-44 ve tip = HSn-44 ile belirtilen araçlar, sırasıyla AASHTO standart H ve HS Kamyon Yüklerini temsil eder. Tipteki n, Taşıtın nominal ağırlığını ton cinsinden belirten bir ölçek faktörüdür. Dolayısıyla, örneğin; H15- 44, nominal olarak 15 tonluk bir H Kamyon Yükü ve HS20- 44, sembolik olarak 20 tonluk bir HS Kamyon Yüküdür. Bir H Aracının etkisi, aynı sembolik ağırlığa sahip bir HS Aracına dahil edilir. Hem H hem de HS Araçlar için tasarım yapılıyorsa, sadece HS Aracına ihtiyaç vardır.

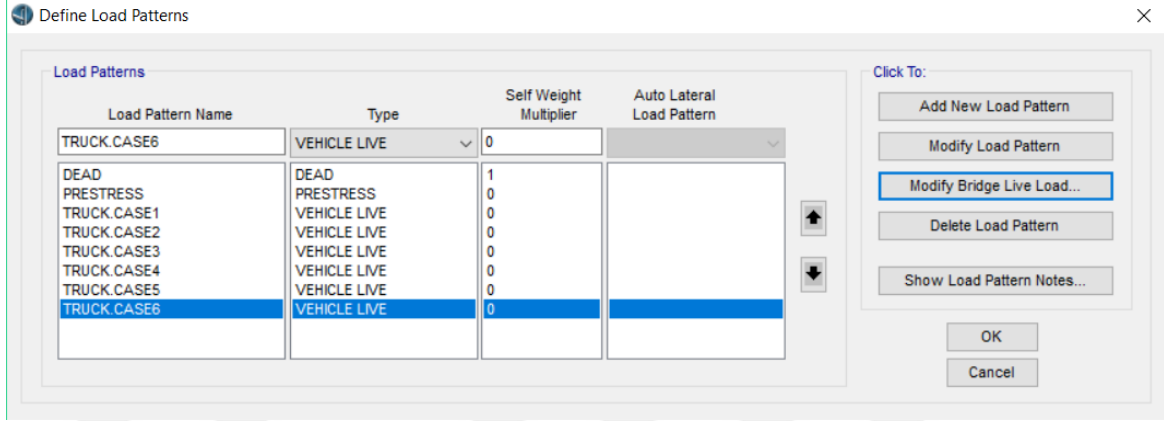
Analizde kullanılacak olan taşıtın belirlenmesi ve bir sınıfa atanması önceki kısımlarda yapılmıştır.



Şekil 67. Analiz için kullanılan HSn-44 taşıt yüklemesi

Tesir çizgileri (*influence lines*) yapıda tanımlanan bir köprü şeridi üzerindeki birim yükün düğüm noktası, çubuk, kabuk, düzlem, solid ve link elemanlarda meydana getirdiği çeşitli deplasman, reaksiyon, kuvvet, moment, kesme kuvvetleri, burulma veya eksenel kuvvetler için gösterilebilir.

Çalışmada 6 farklı tip taşıt analiz durumu analiz edilmiştir. İki şeritli yolda her iki yönden taşıtlar hareket edecek şekilde durumlar belirlenmiştir (Şekil 68).



Şekil 68. Kamyon analizinde kullanılacak taşıt yükleme durumları

Durum 1: Durum 1 için köprü bir kamyonla yüklenecektir. Kamyon Şerit 1’de 25 m/sn hızla harekete başlayıp 250 m’lik köprü üzerinde hareketini 10 sn’de tamamlamış olacaktır. Hareketin süresinin 10 sn olması için **Load Pattern Discretization Information** kısmında **Duration of Loading is** 10 yazılır. Böylece 25 m/sn hızla giden birinci ve ikinci araç 10 sn sonra 250m’lik yolu tamamlamış olacaktır. **Discretize Load every** kısmına 0,1 yazılarak 10 sn’lik süre 0,1 sn aralıklara bölünüp 100 tane hareket elde edilir. Yani oluşturulacak Multi-step Animation Video 100 adımda bitecektir (Şekil 69). Diğer tüm durumlarda da hareket 100 adımda bitecek şekilde yükleme süresi adımlara ayrılmıştır. Durumların yüklemeleri ve her bir durumda kamyonların hareketleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

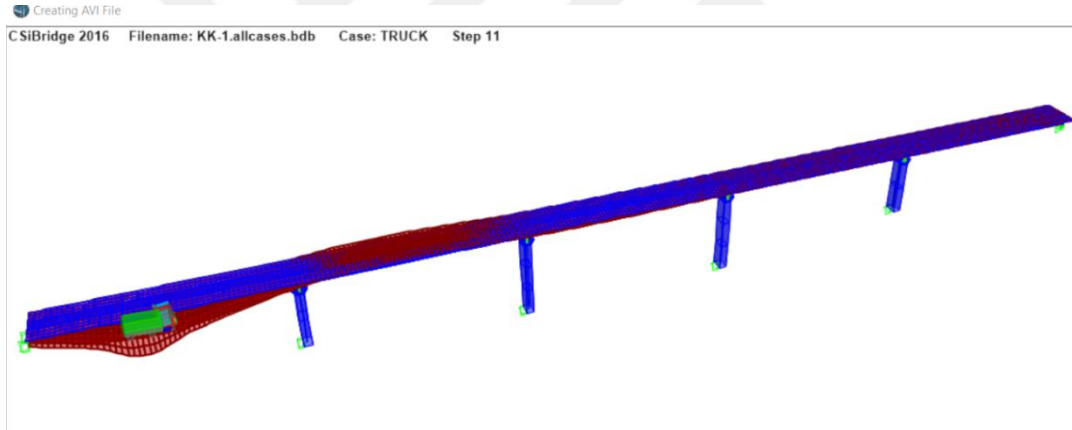
Duration of Loading is seconds

Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Şekil 69. Durum 1 için kamyon yüklemesi



Şekil 70. Durum 1'de kamyonun köprü üzerindeki hareketi

Durum 2: Durum 2 için köprü iki kamyonla yüklenecektir. İlk kamyon Şerit 1'de 25 m/sn hızla harekete başladıktan 10 sn sonra ikinci kamyon, yine Şerit 1'den 25 m/sn hızla harekete başlayacaktır. Hareketin süresinin 10 sn olacaktır (Şekil 71).

Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	10,	Forward	25,

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

Duration of Loading is seconds

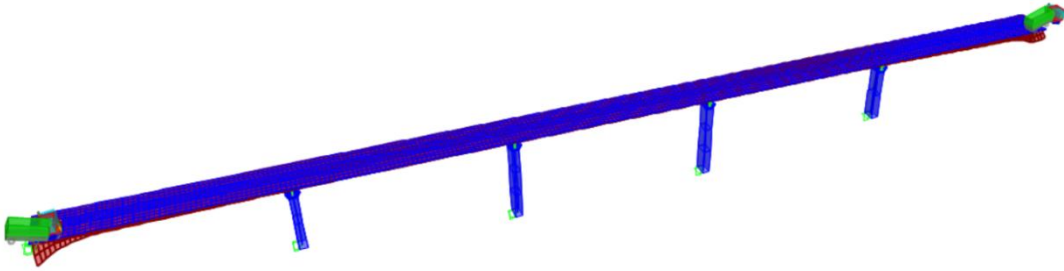
Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Şekil 71. Durum 2 için kamyon yüklemesi

Creating AVI File
 CSiBridge 2016 Filename: KK-1.allcases.bdb Case: TRUCK.CASE2 Step 52



Şekil 72. Durum 2’de kamyonların köprü üzerindeki hareketi

Durum 3: Durum 3 için köprü iki kamyonla yüklenecektir. İlk kamyon Şerit 1’de 25 m/sn hızla harekete başladıktan 10 sn sonra ikinci kamyon, Şerit 2’den köprü’nün diğer ucundan 10 sn sonra 25 m/sn hızla harekete başlayacaktır. Hareketin süresi 10 sn olacaktır (Şekil 73).

Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE2	250,	10,	Backward	25,

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

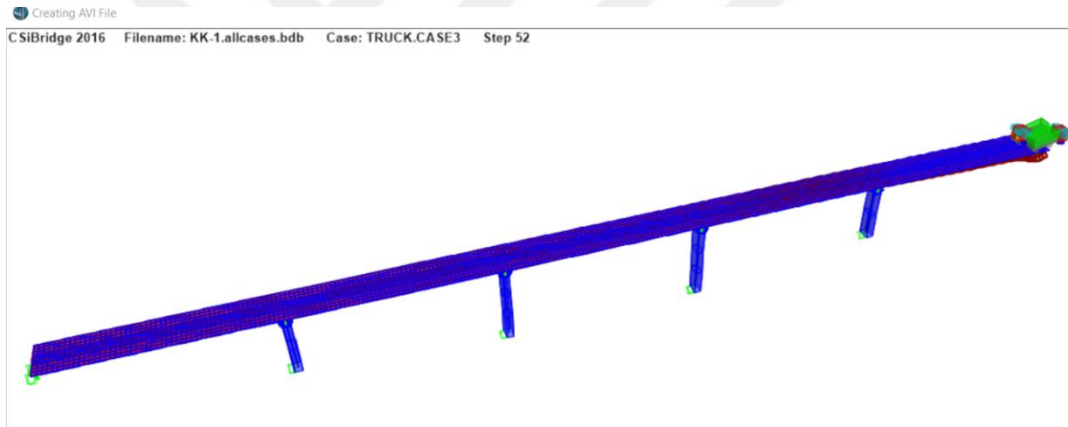
Duration of Loading is seconds

Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Şekil 73. Durum 3 için kamyon yüklemesi



Şekil 74. Durum 3'te kamyonların köprü üzerindeki hareketi

Durum 4: Durum 4 için köprü iki kamyonla yüklenecektir. İlk kamyon Şerit 1'de 25 m/sn hızla harekete başlarken ikinci kamyon, Şerit 2'den aynı anda köprü'nün diğer ucundan 25 m/sn hızla başlayacaktır. Hareketin süresinin 10 sn olacaktır (Şekil 75).

Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE2	250,	0,	Backward	25,

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

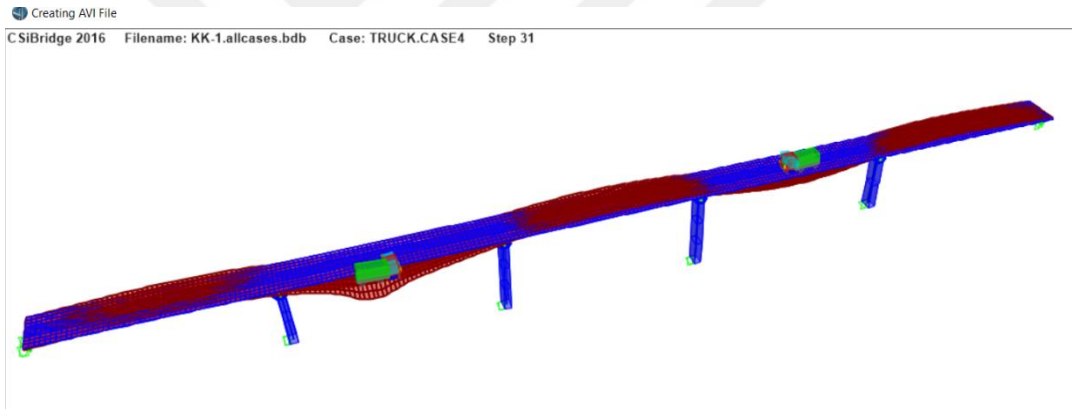
Duration of Loading is seconds

Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Şekil 75. Durum 4 için kamyon yüklemesi



Şekil 76. Durum 4'te kamyonların köprü üzerindeki hareketi

Durum 5: Durum 5 için köprü dört kamyonla yüklenecektir. Bütün kamyonlar 25 m/sn hızla hareket edecektir. İlk kamyon Şerit 1'den harekete başlarken ikinci kamyon yine aynı şerit ve yönde 4 sn sonra harekete başlar. Üçüncü kamyon Şerit 2 üzerinden karşı yönde 10. sn'de ve dördüncü kamyon aynı şekilde Şerit 2 üzerinde ters yönden 14. sn'de 25 m/sn hızla harekete başlayacaktır Hareketin süresi 24 sn olacaktır. Discretize Load every kısmına 0,24 yazılarak 24 sn'lik süre 0,1 sn aralıklara bölünüp 100 tane hareket elde edilir (Şekil 77).

Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE2	250,	10,	Backward	25,
HSn-44	LANE2	250,	14,	Backward	25,

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

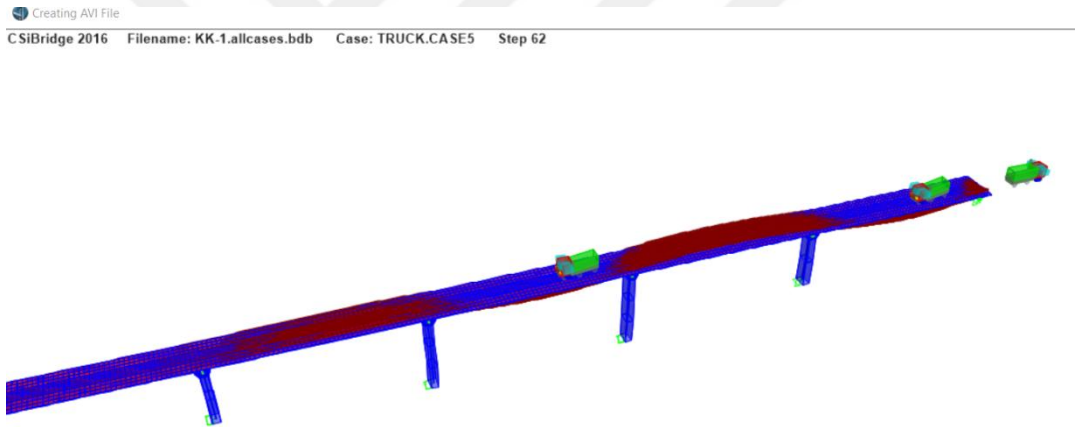
Duration of Loading is 24, seconds

Discretize Load every 0,24 seconds

Units: KN, m, C

OK Cancel

Şekil 77. Durum 5 için kamyon yüklemesi



Şekil 78. Durum 5'te kamyonların köprü üzerindeki hareketi

Durum 6: Durum 6 için köprü dört kamyonla yüklenecektir. İlk kamyon Şerit 1'de 25 m/sn hızla harekete başladıktan 5 sn sonra ikinci kamyon, Şerit 2'de köprü'nün diğer ucundan 25 m/sn hızla başlayacaktır. Üçüncü kamyon Şerit 1 üzerinde ilk kamyondan 5 sn sonra 25 m/sn hızla, dördüncü kamyon ise ikinci şeritten karşı yönden ilk kamyonun hareketinden 10 sn sonra karşı yönden 25 m/sn hızla harekete başlayacaktır. Hareketin toplam süresi 20 sn olacaktır. **Discretize Load every** kısmına 0,2 yazılarak 20 sn'lik süre 0,1 sn aralıklara bölünüp 100 tane hareket elde edilir (Şekil 79).

Multi Step Bridge Live Load Pattern Generation

Vehicle	Lane	Start Dist	Start Time	Direction	Speed
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE1	0,	0,	Forward	25,
HSn-44	LANE2	250,	5,	Backward	25,
HSn-44	LANE1	0,	5,	Forward	25,
HSn-44	LANE2	250,	10,	Backward	25,

Note: Vehicles that are defined using a uniform load will not be included in the program generated multi-step load case. Click this note to see a list of vehicles defined using uniform loads.

Load Pattern Discretization Information

Duration of Loading is seconds

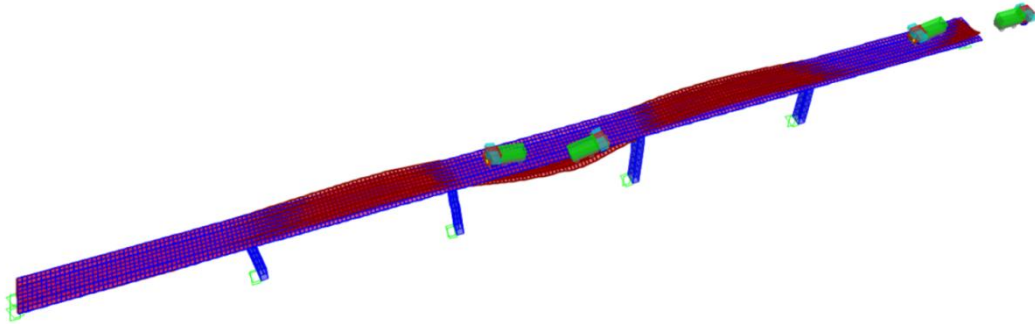
Discretize Load every seconds

Units:

OK Cancel

Şekil 79. Durum 6 için kamyon yüklemesi

CSiBridge 2016 Creating AVI File
 Filename: KK-2.allcases.bdb Case: TRUCK.CASE6 Step 54



Şekil 80. Durum 6'da kamyonların köprü üzerindeki hareketi








3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde, ele alınan 4 tip kutu kesitli köprü kirişinin serbest titreşim ve hareketli yük altında zorlanmış titreşimlerine ait bulgular sunulmuş ve irdelenmiştir.

3.1. Modal Analiz Sonuçları

Göz önüne alınan kutu kesitli köprü tipleri için modal analizden elde edilen doğal frekanslar, modal katkı faktörleri ve mod şekilleri Tablo 4-7’de sunulmuştur. Tablolardan görüleceği üzere, en büyük hâkim frekans değeri dikdörtgen en kesitli kutu kiriş (KK-1) için elde edilmekte, burulma rijitlikleri arttıkça hâkim frekanslar azalmaktadır. Tüm köprü tipleri için ilk hâkim mod eğilmeli-burulma titreşimlerine aittir. Şekil 81’de sadece KK-1 için köprünün ilk altı mod şekli görülmektedir. Görüleceği üzere köprüde hâkim mod şekilleri eğilme ve burulma şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Tablo 4. KK-1 kesitli köprünün doğal frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Şekli
		U_x (kNs ²)	U_y (kNs ²)	U_z (kNs ²)	R_x (kNms ²)	R_y (kNms ²)	R_z (kNms ²)	
1	1,265	0	44,085	0	87,610	0	0	
2	1,641	0	0	0	0	0	3197,93	
3	1,906	47,287	0	0	0	-667,405	0	
4	1,957	0	20,198	0	-61,283	0	0	
5	2,258	0	0	-7,557	0	0	0	
6	2,506	0	0	0	0	0	1132,927	
7	2,551	16,59	0	0	0	1288,565	0	






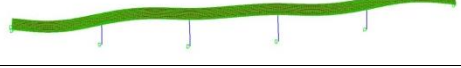



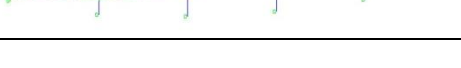
Tablo 4. (Devamı)

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Şekli
		U_x (kNs ²)	U_y (kNs ²)	U_z (kNs ²)	R_x (kNms ²)	R_y (kNms ²)	R_z (kNms ²)	
8	2,967	0	0	14,121	0	0	0	
9	3,530	0	1,225	0	-12,010	0	0	
10	3,579	4,805	0	0	0	2526,316	0	





Tablo 5. KK-2 kesitli köprünün frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri

Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Şekli
		U_x (kNs ²)	U_y (kNs ²)	U_z (kNs ²)	R_x (kNms ²)	R_y (kNms ²)	R_z (kNms ²)	
1	1,229	0	-45,127	0	99,209	0	0	
2	1,616	0	0	0	0	0	3211,634	
3	1,768	49,012	0	0	0	461,261	0	
4	1,943	0	14,974	0	61,342	0	0	
5	2,267	0	0	7,756	0	0	0	
6	2,529	11,369	0	0	0	1408,41	0	
7	2,551	0	0	0	0	0	917,118	
8	2,997	0	0	14,214	0	0	0	
9	3,611	0	0	0	19,183	0	0	
10	3,637	3,495	0	0	0	2526,26	0	

Tablo 6. KK-3 kesitli köprünün frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri

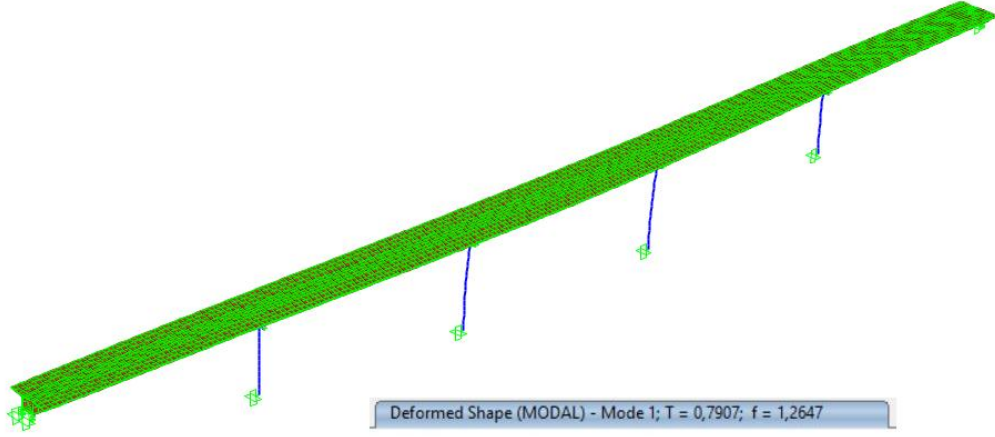
Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Şekli
		U_x (kNs ²)	U_y (kNs ²)	U_z (kNs ²)	R_x (kNms ²)	R_y (kNms ²)	R_z (kNms ²)	
1	1,211	0	45,002	0	112,624	0	0	
2	1,684	0	0	0	0	0	3208,012	
3	2,051	49,610	0	0	0	373,554	0	
4	2,145	0	9,504	0	-62,473	0	0	
5	2,287	0	0	7,894	0	0	0	
6	2,699	9,032	0	0	0	1454,321	0	
7	2,557	0	0	0	0	0	759,961	
8	2,956	0	0	14,317	0	0	0	
9	3,566	2,982	0	0	0	2534,864	0	
10	3,603	0	9,714	0	52,885	0	0	

Tablo 7. KK-4 kesitli köprünün frekansları (Hz) ve modal katkı faktörleri

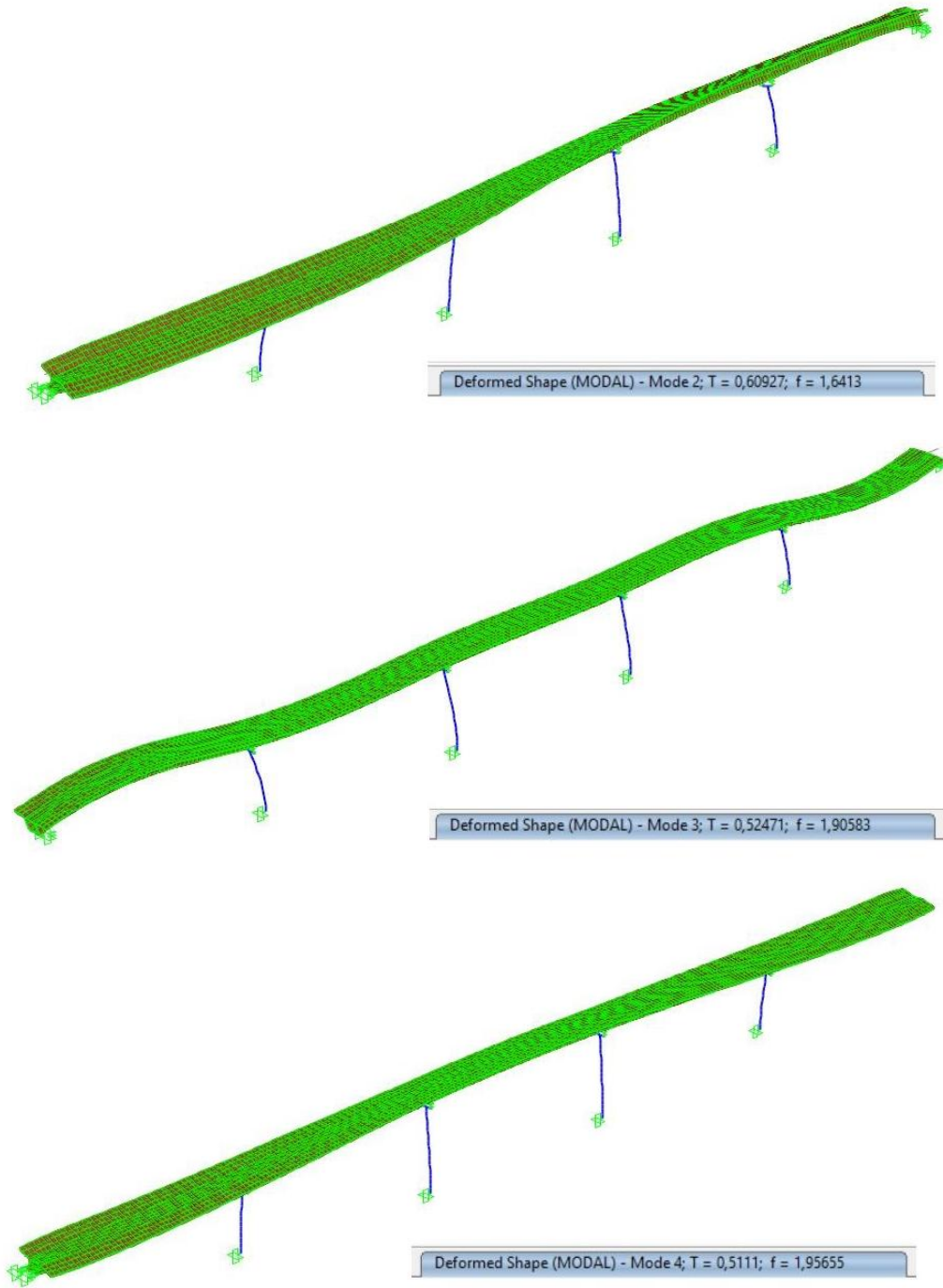
Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Şekli
		U_x (kNs ²)	U_y (kNs ²)	U_z (kNs ²)	R_x (kNms ²)	R_y (kNms ²)	R_z (kNms ²)	
1	1,105	0	43,376	0	130,342	0	0	
2	1,669	49,989	0	0	0	311,246	0	
3	1,979	0	0	0	0	0	3193,126	
4	2,052	0	1,833	0	62,389	0	0	

Tablo 7. (Devamı)

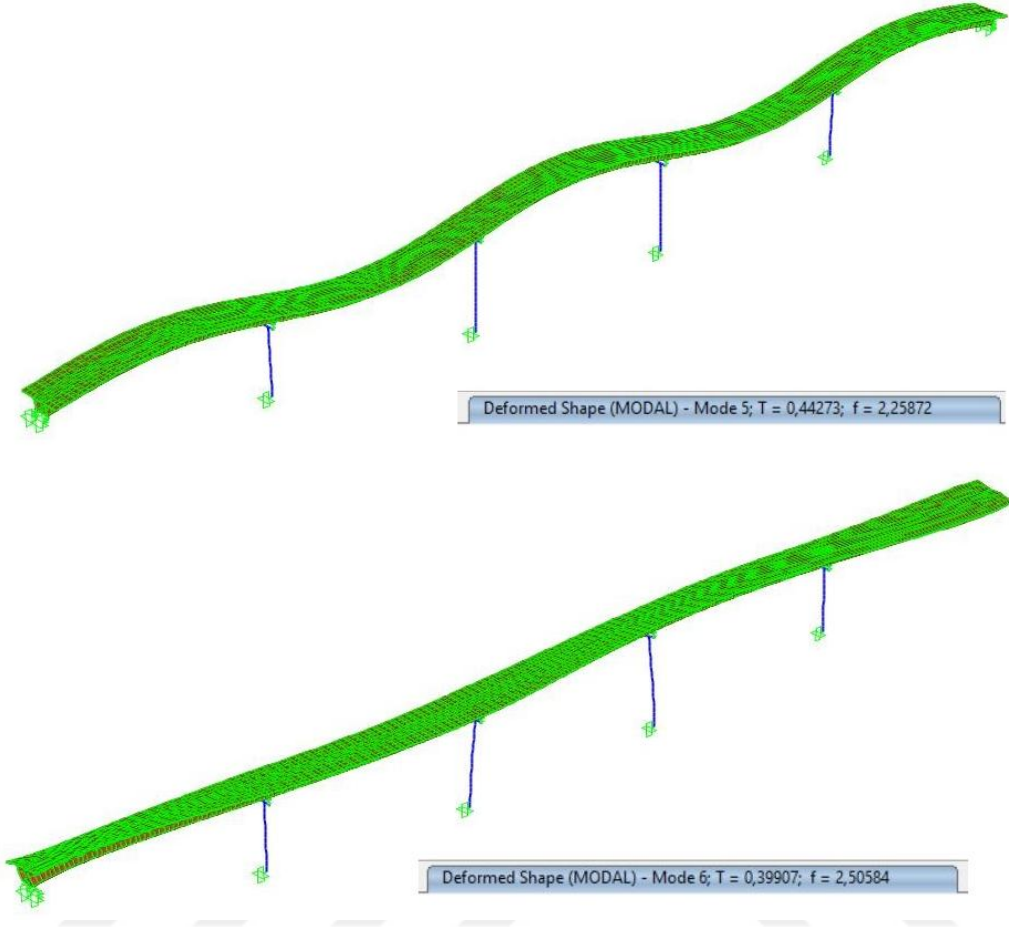
Mod No	f (Hz)	Modal Katkı Faktörleri						Mod Şekli
		U _x (kNs ²)	U _y (kNs ²)	U _z (kNs ²)	R _x (kNms ²)	R _y (kNms ²)	R _z (kNms ²)	
5	2,225	0	0	8,084	0	0	0	
6	2,561	7,314	0	0	0	1493,727	0	
7	2,550	0	0	0	0	0	581,783	
8	2,818	0	0	14,470	0	0	0	
9	3,120	0	25,656	0	83,700	0	0	
10	3,331	2,613	0	0	0	2543,910	0	



Şekil 81. KK-1 köprü modeli için ilk altı mod şekli



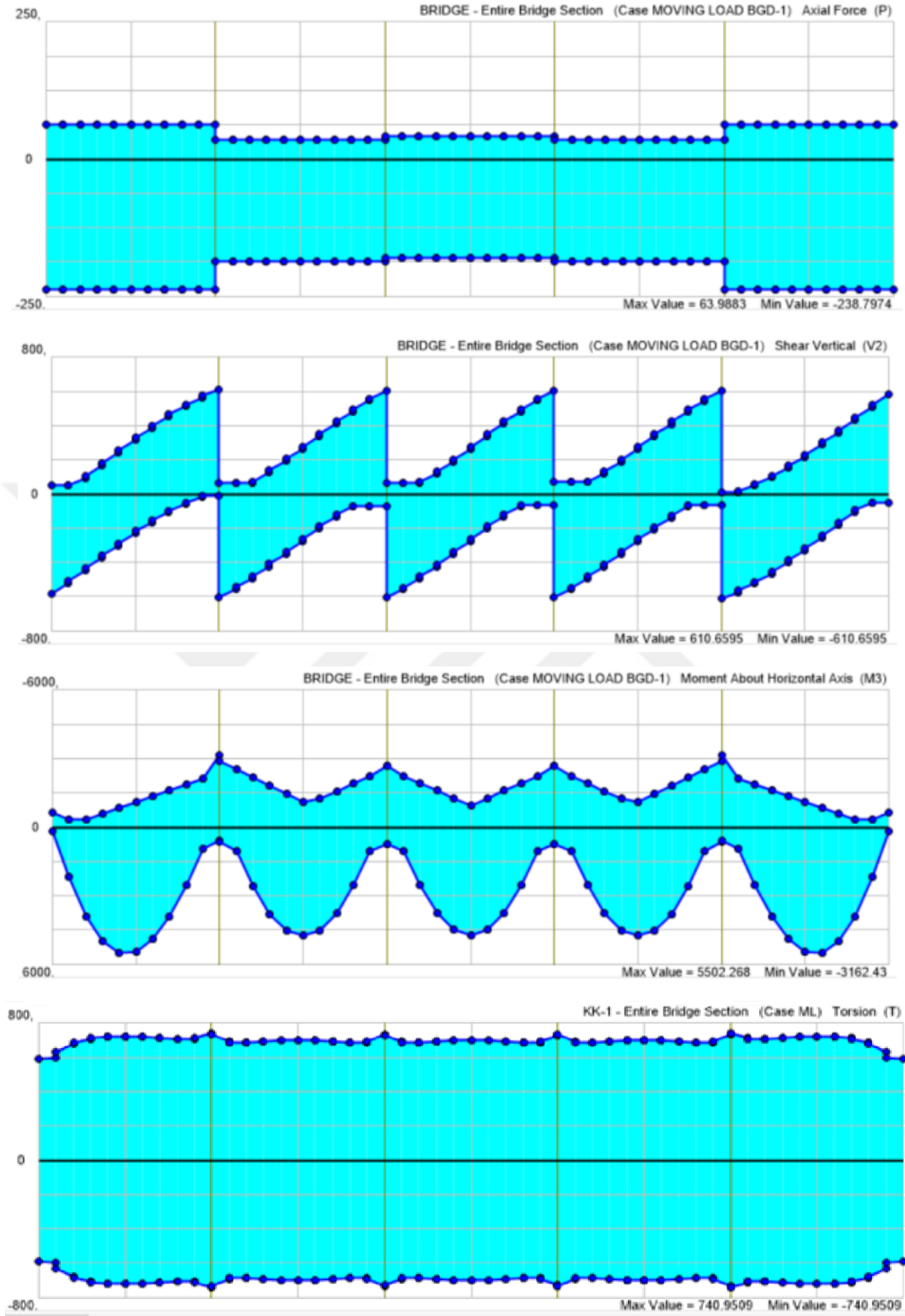
Şekil 81. (Devamı)



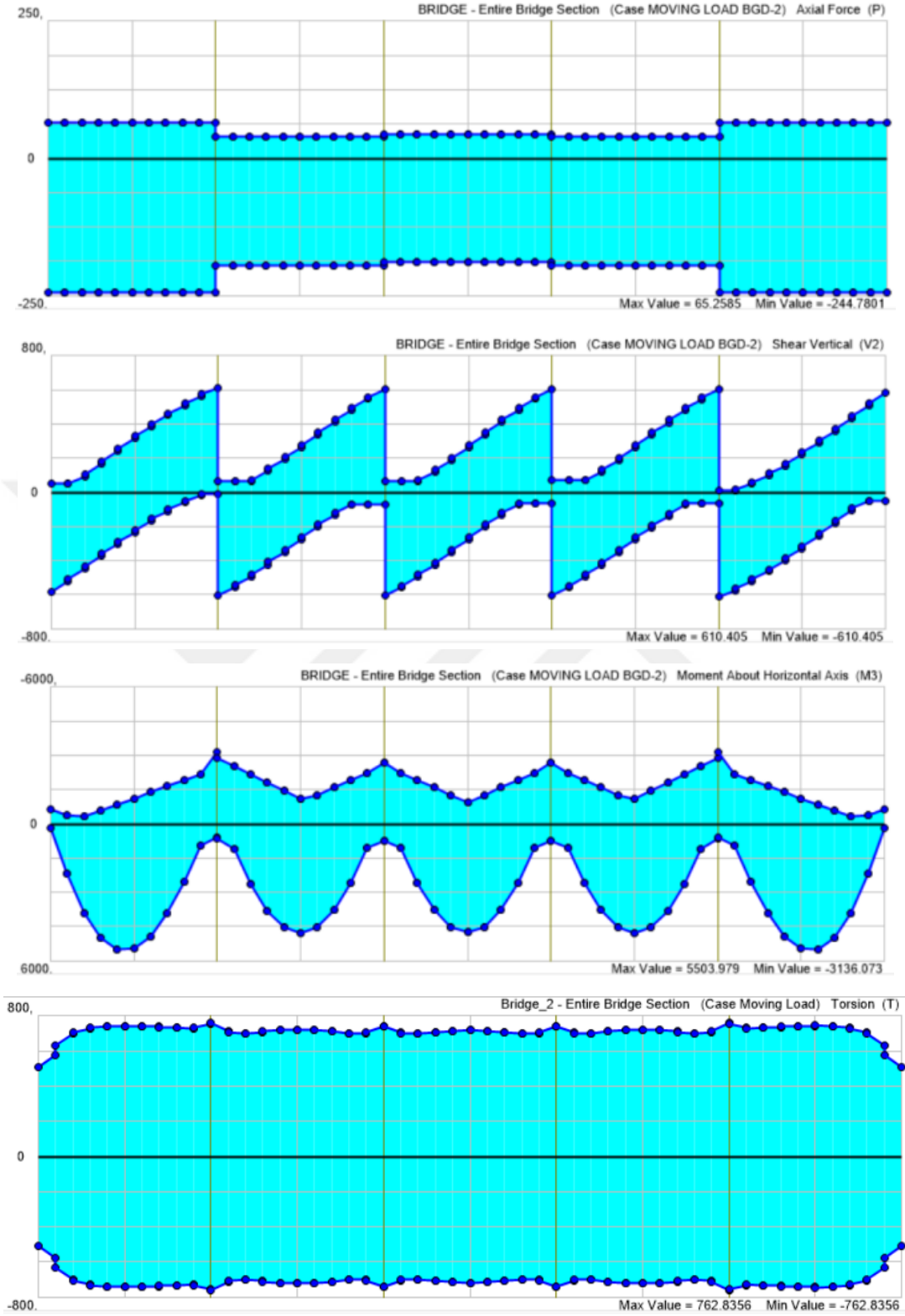
Şekil 81. (Devamı)

3.2. Hareketli Yük Altında Dinamik Davranışa Ait Sonuçlar

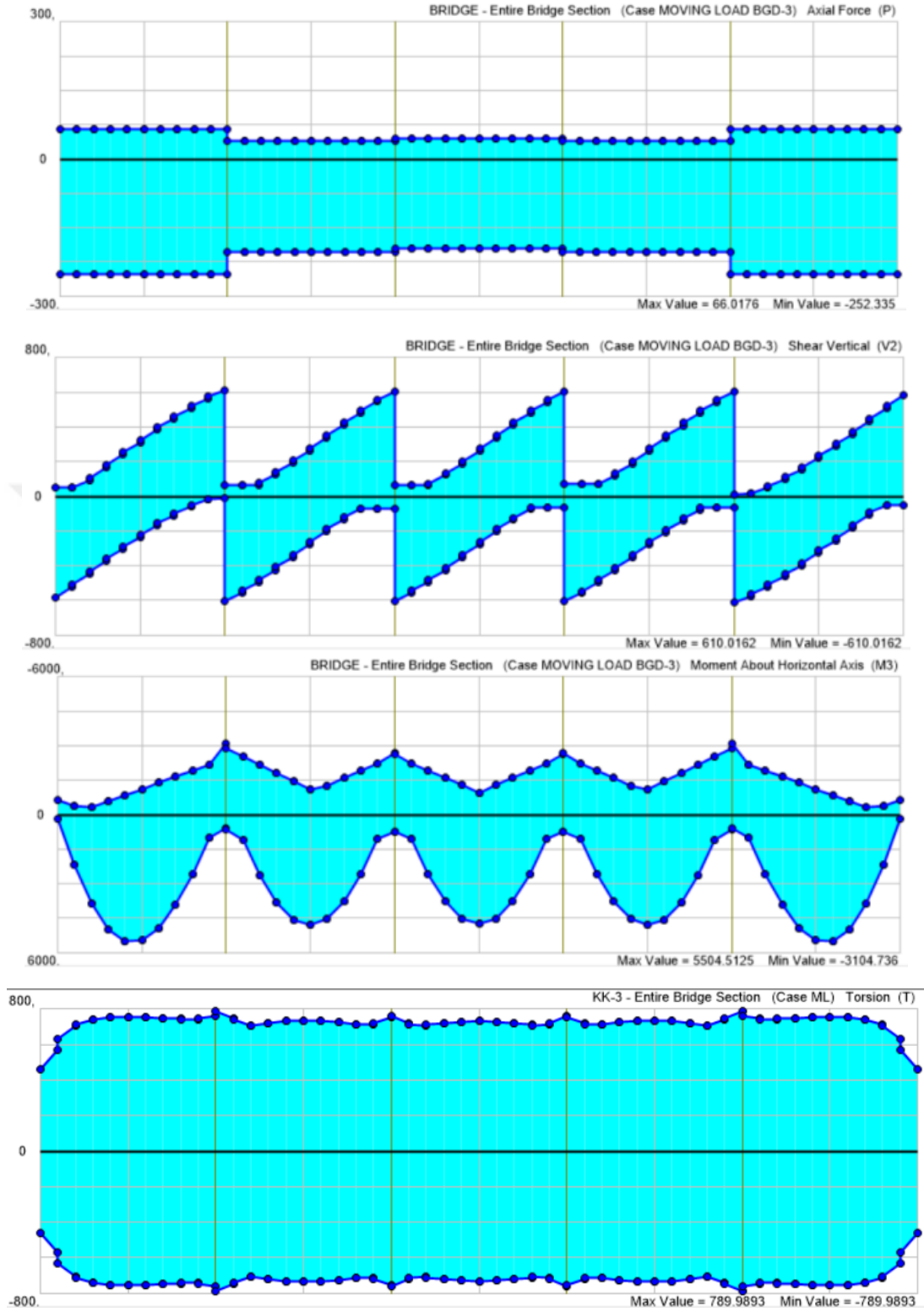
Şekil 82-85'te göz önüne alınan 4 köprü için tesir çizgileri ile elde edilen en büyük ve en küçük normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti ve burulma momenti grafikleri verilmiştir. Grafiklerde gözlemlenen sonuçlar, Tablo 8'de özetlenmiştir. Buna göre, örnek köprülerde kesme kuvveti değerlerinde neredeyse hiç değişim olmazken, diğer kesit tesirlerinde küçük de olsa bir miktar değişim görülmektedir.



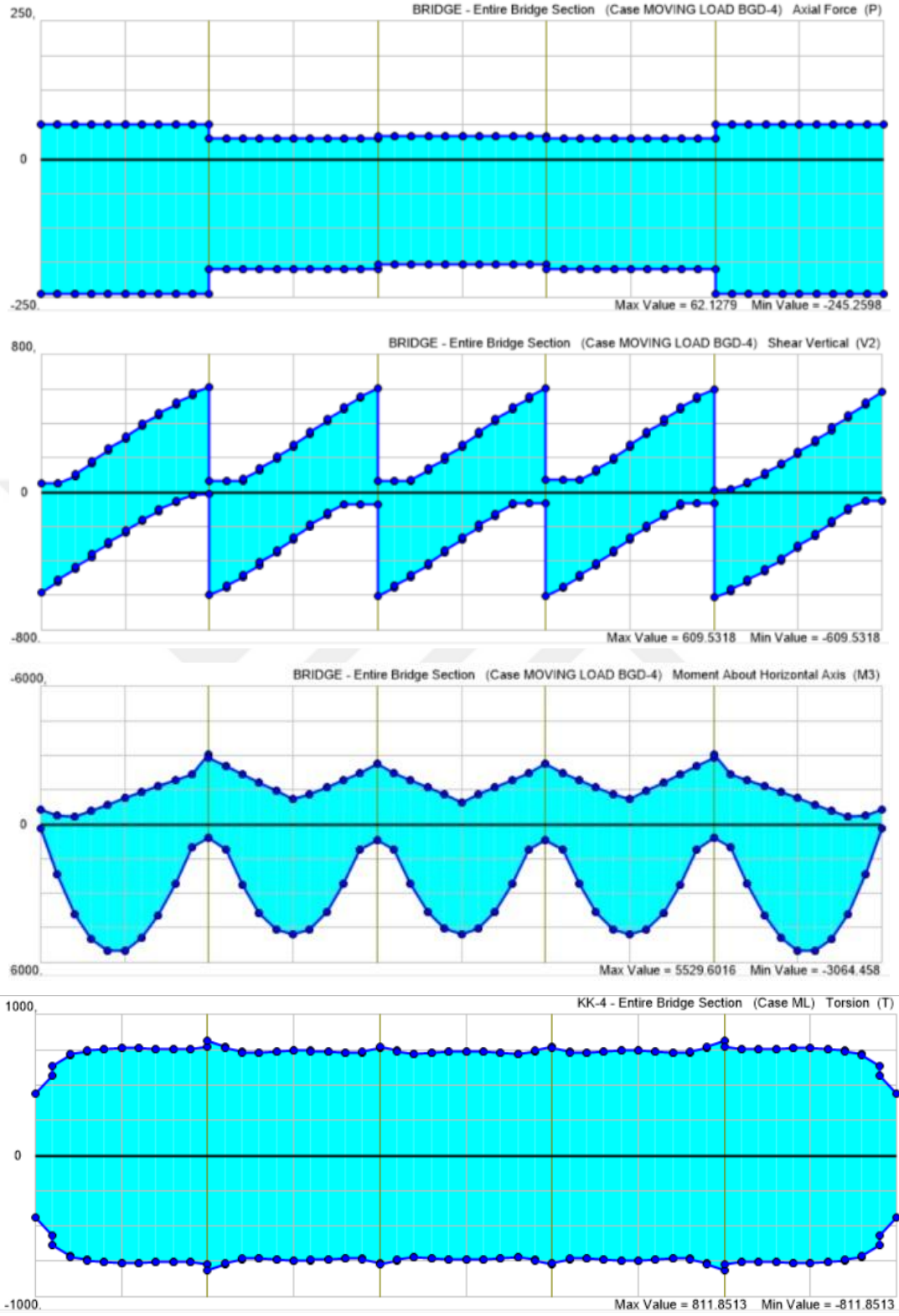
Şekil 82. KK-1 için normal kuvvet, kesme kuvveti eğilme ve burulma momenti diyagramları



Şekil 83. KK-2 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları



Şekil 84. KK-3 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları

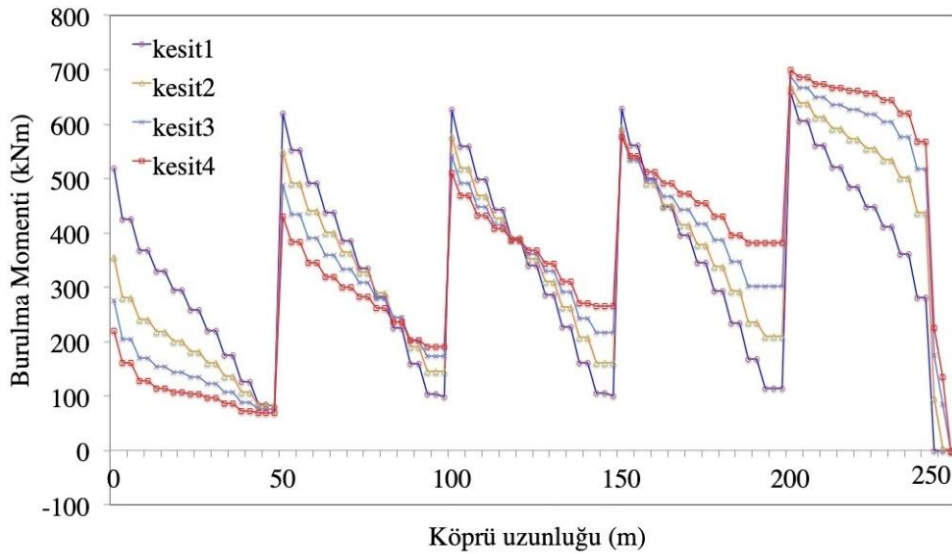


Şekil 85. KK-4 için normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti diyagramları

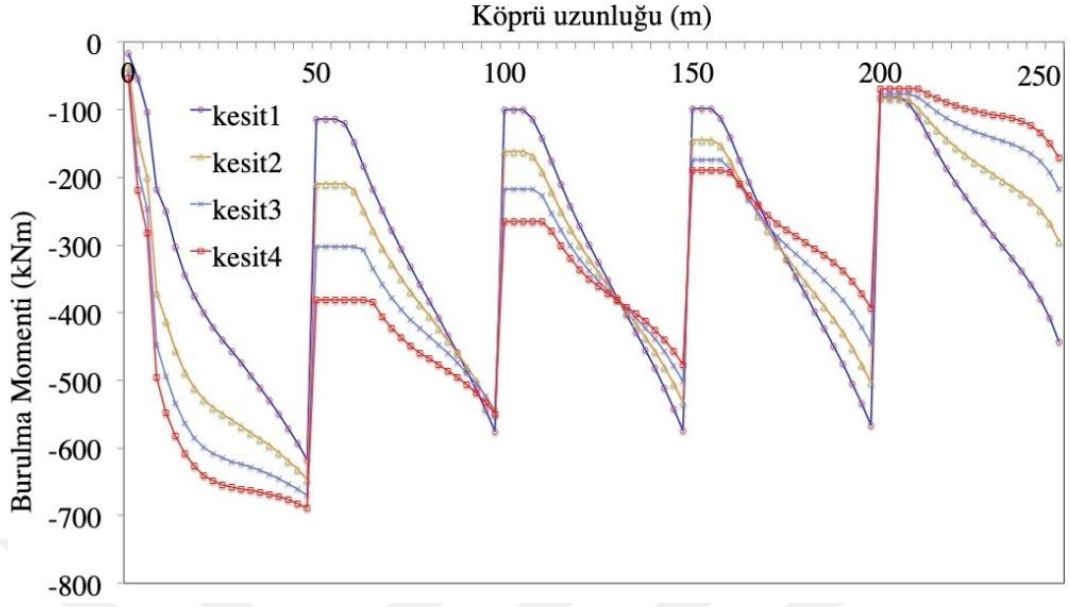
Tablo 8. Hareketli yük etkisiyle köprülerde meydana gelen en büyük ve en küçük normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti değerleri

Köprü	Normal Kuvvet		Kesme Kuvveti		Eğilme Momenti		Burulma Momenti	
	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.
KK-1	63,9	-238,7	610,6	-610,6	5502,2	-3162,4	740,9	-740,9
KK-2	65,2	-244,7	610,4	-610,4	5503,9	-3136,0	762,8	-762,8
KK-3	66,0	-252,3	610,0	-610,0	5504,5	-3104,7	789,9	-789,9
KK-4	62,1	-245,2	609,5	-609,5	5529,6	-3064,4	811,8	-811,8

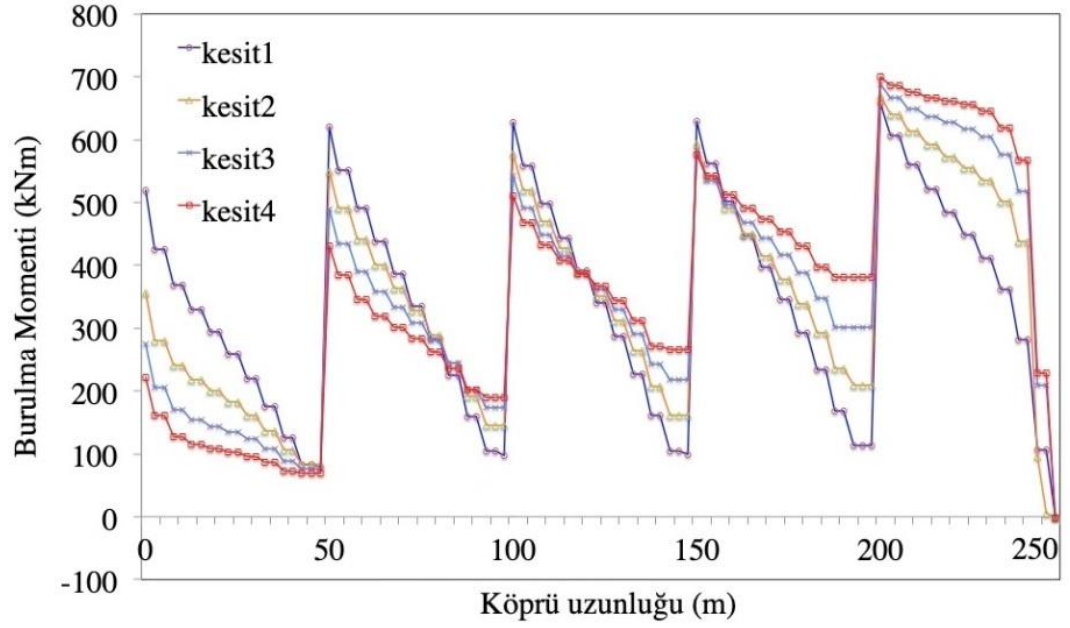
Aşağıdaki grafiklerde çalışmada ele alınan dört köprü modeli üzerinde altı farklı taşıt geçişi senaryosuna göre elde edilen burulma momentlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Daha önce de ifade edildiği üzere, ele alınan dört en kesit için kesit alanları ve kesit düzlemi içindeki eksenlere göre atalet momentleri yaklaşık olarak aynıdır. Dolayısıyla, kirişlerin eğilme davranışlarının yaklaşık olarak aynı olması beklenmektedir. Yukarıdaki grafiklerden de görüleceği üzere elde edilen sonuçlar bu beklentiyi desteklemektedir. Model en kesitlerde burulma rijitlikleri farklılaştırılmış olduğundan burulma davranışlarında farklılık olması beklenmektedir. Göz önüne alınan yük senaryoları da kirişte burulma etkisi doğuracak şekilde düşünülmüştür. Bu sebeple, aşağıdaki grafiklerde her bir durum için burulma momenti diyagramlarının karşılaştırılması verilmektedir. Görüleceği üzere, tüm dururlar için maksimum ve minimum burulma momenti değerleri (+800) – (-800) kNm aralığında kalmaktadır. Durum-1 ve Durum-2’de kamyon hareketi aynı şeritte gerçekleştiğinden anti-simetrik burulma momenti diyagramları da anti-simetriktir. Değerler, mesnetlere doğru artış göstermektedir.



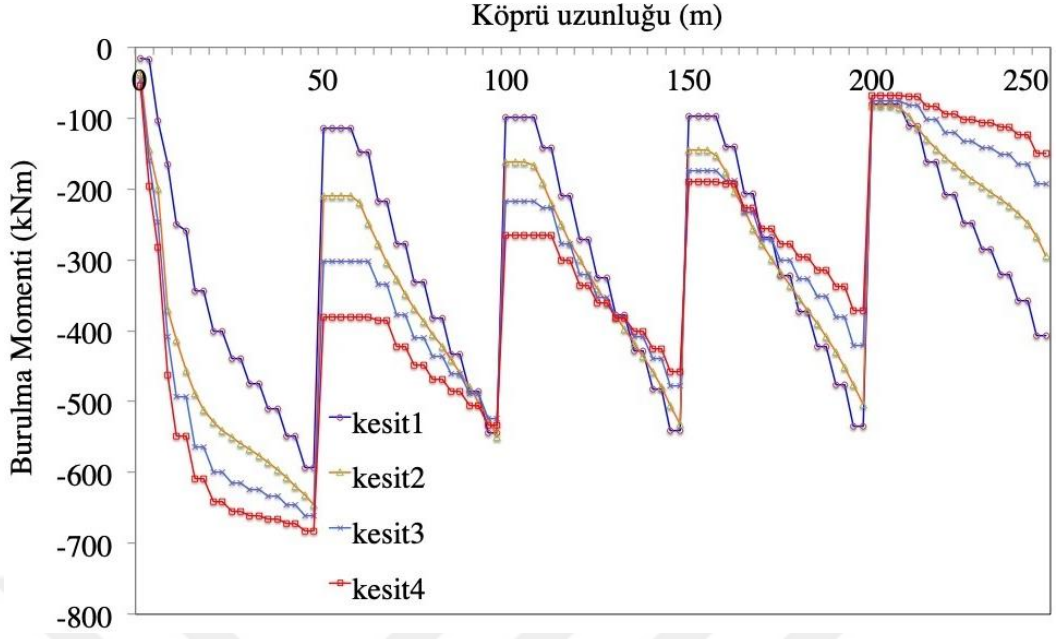
Şekil 86. Durum-1: Maksimum burulma momentleri



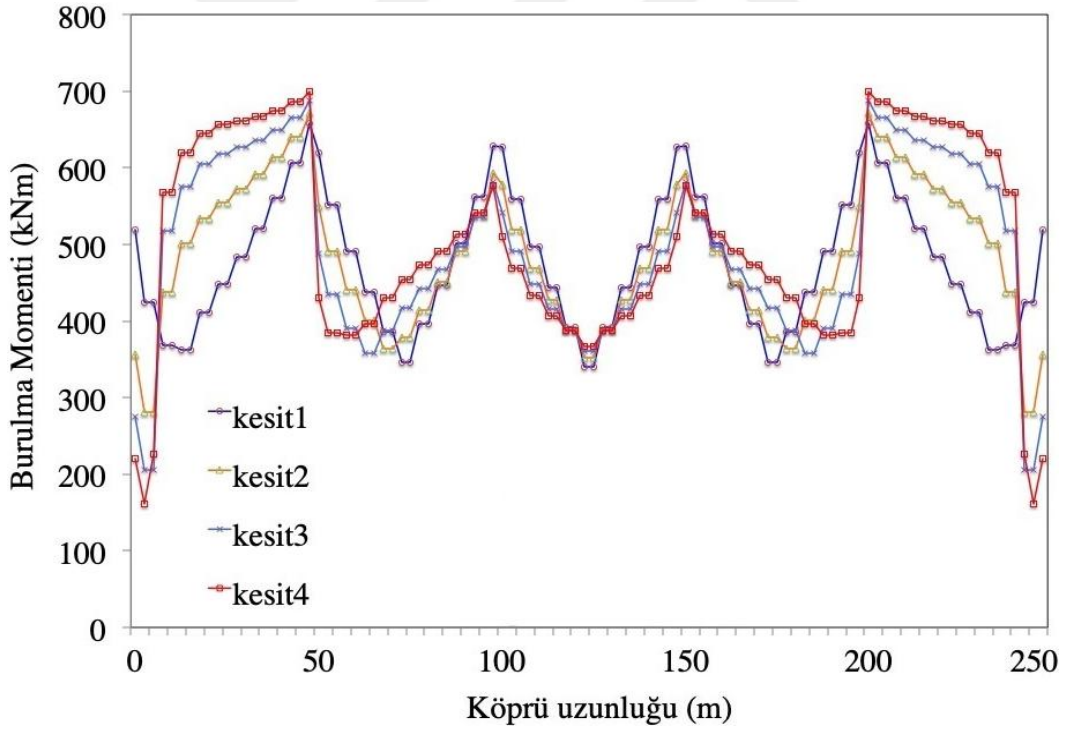
Şekil 87. Durum-1: Minimum burulma momentleri



Şekil 88. Durum 2: Maksimum burulma momentleri



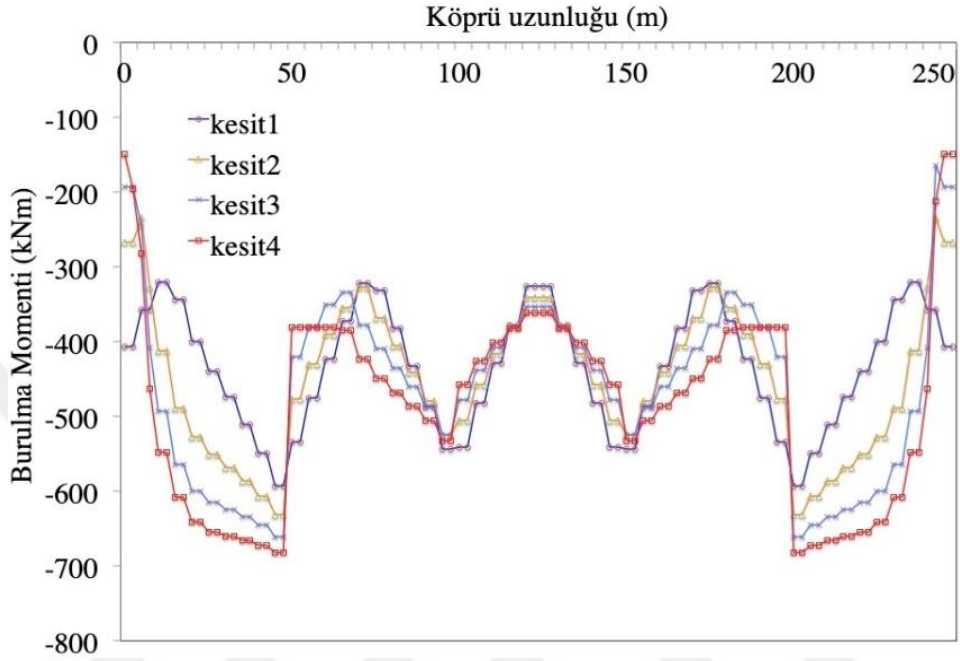
Şekil 89. Durum 2: Minimum burulma momentleri



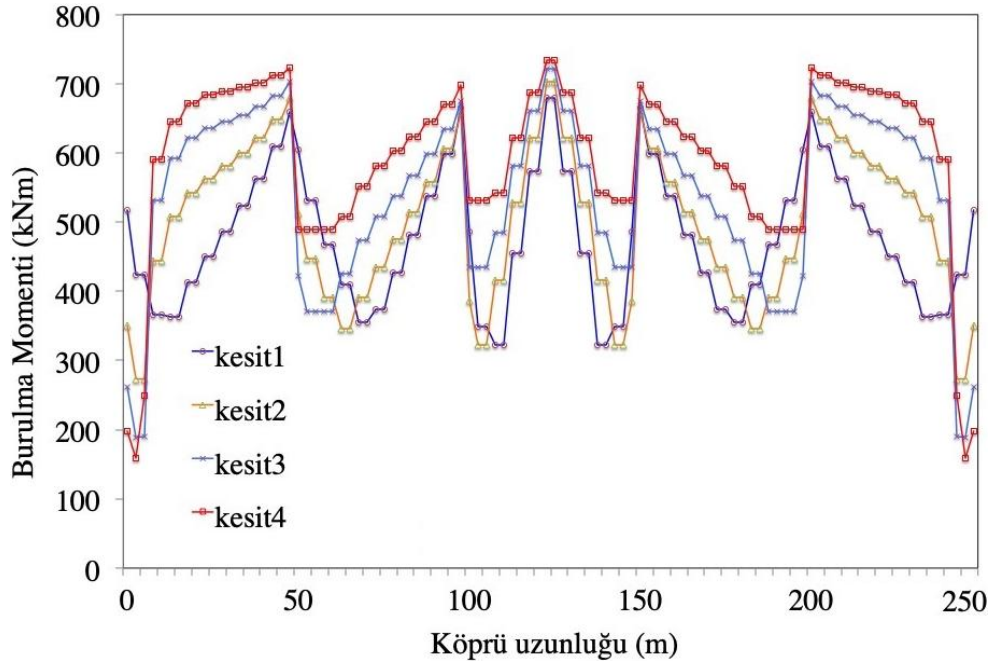
Şekil 90. Durum 3: Maksimum burulma momentleri

Kamyonların her iki şeritte karşılıklı hareket etmeleri durumlarında (Durum-3 ve Durum-4) burulma momenti diyagramları hemen hemen simetrik bir dağılım sergilemektedir. Önceki iki durumdan farklı olarak burada, orta açıklıkta da büyük

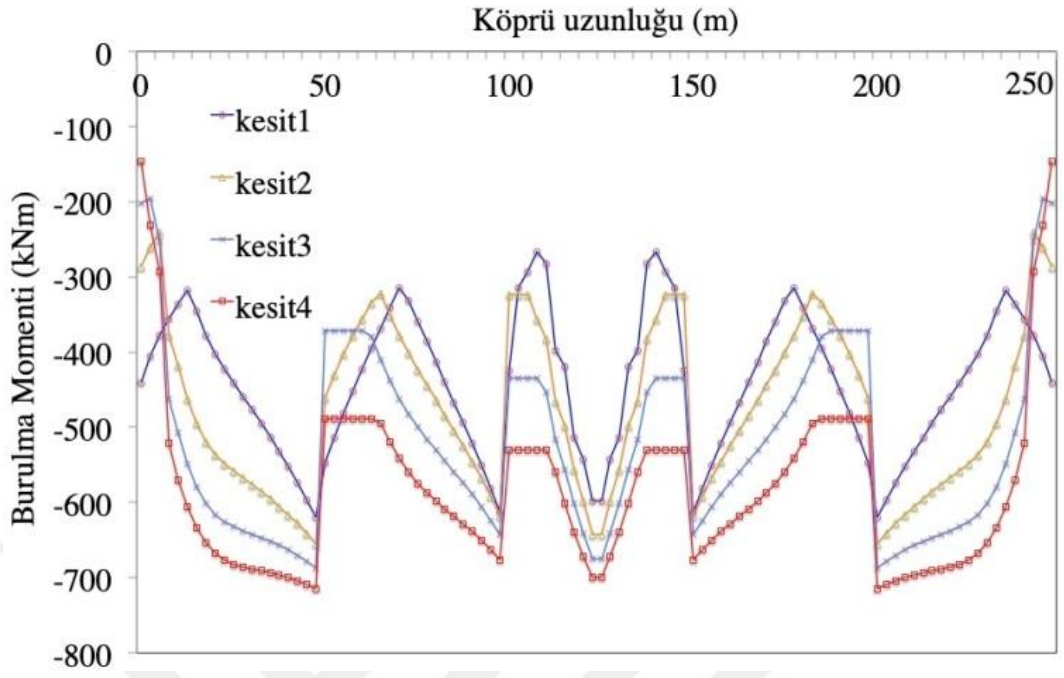
burulma momentleri oluşmaktadır. Benzer durum, Durum-5 için de söz konusudur. Yalnız burada, moment diyagramında simetri yoktur. Köprünün ikinci yarısında daha büyük burulma momentleri ortaya çıkmaktadır.



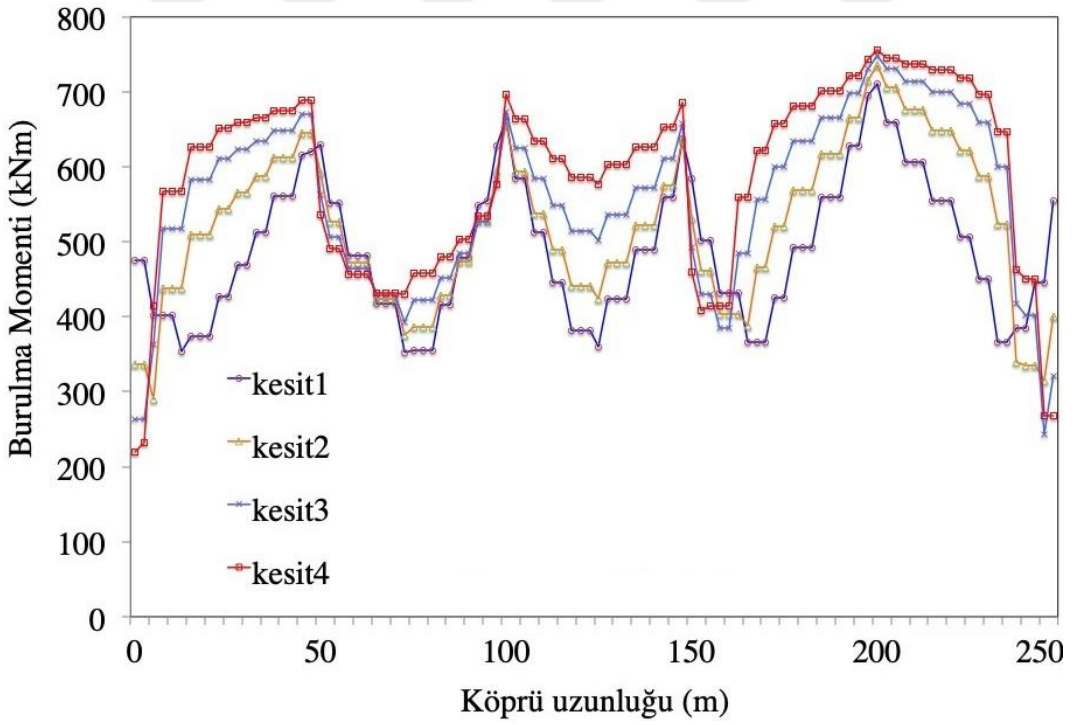
Şekil 91. Durum 3: Minimum burulma momentleri



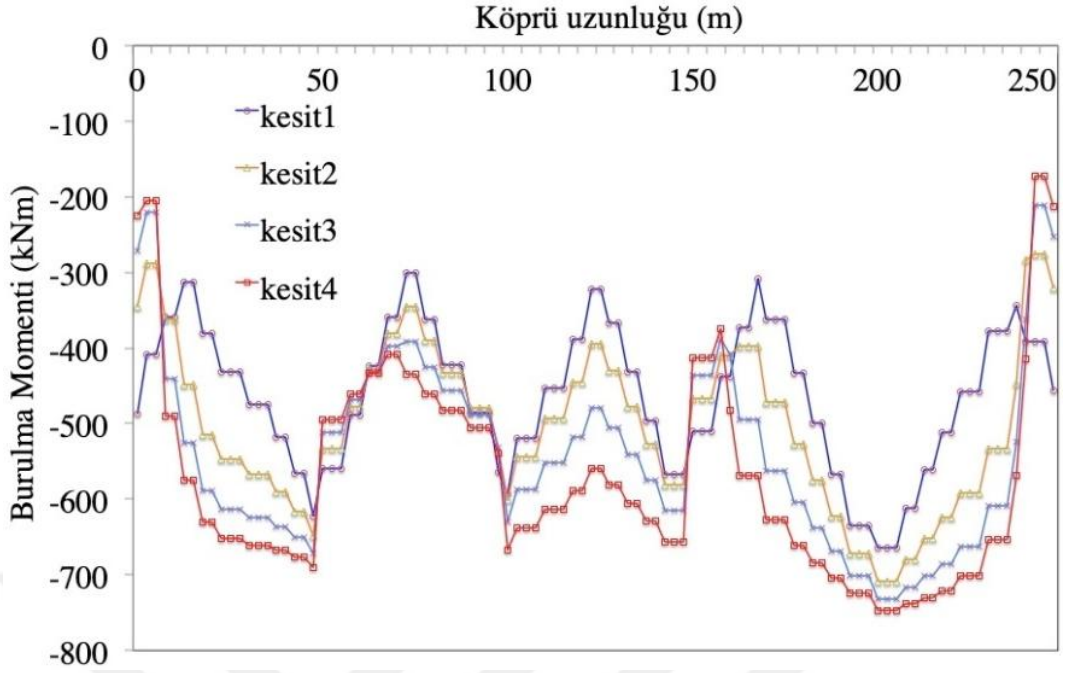
Şekil 92. Durum 4: Maksimum burulma momentleri



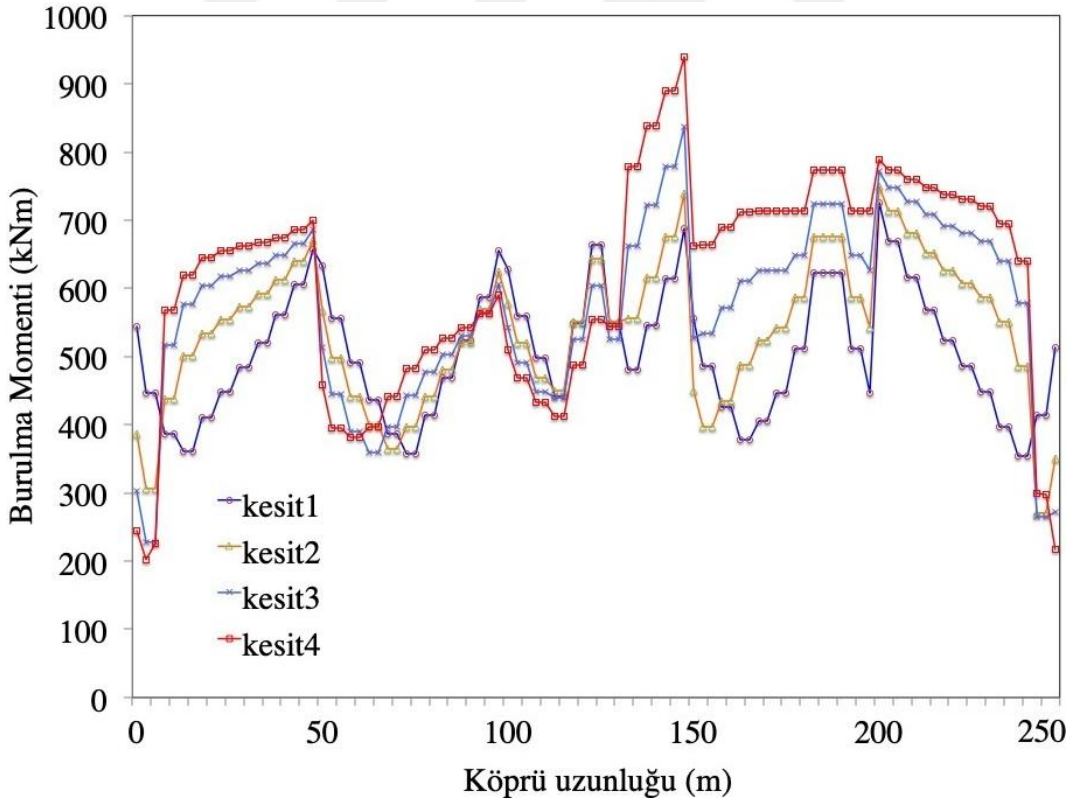
Şekil 93. Durum 4: Minimum burulma momentleri



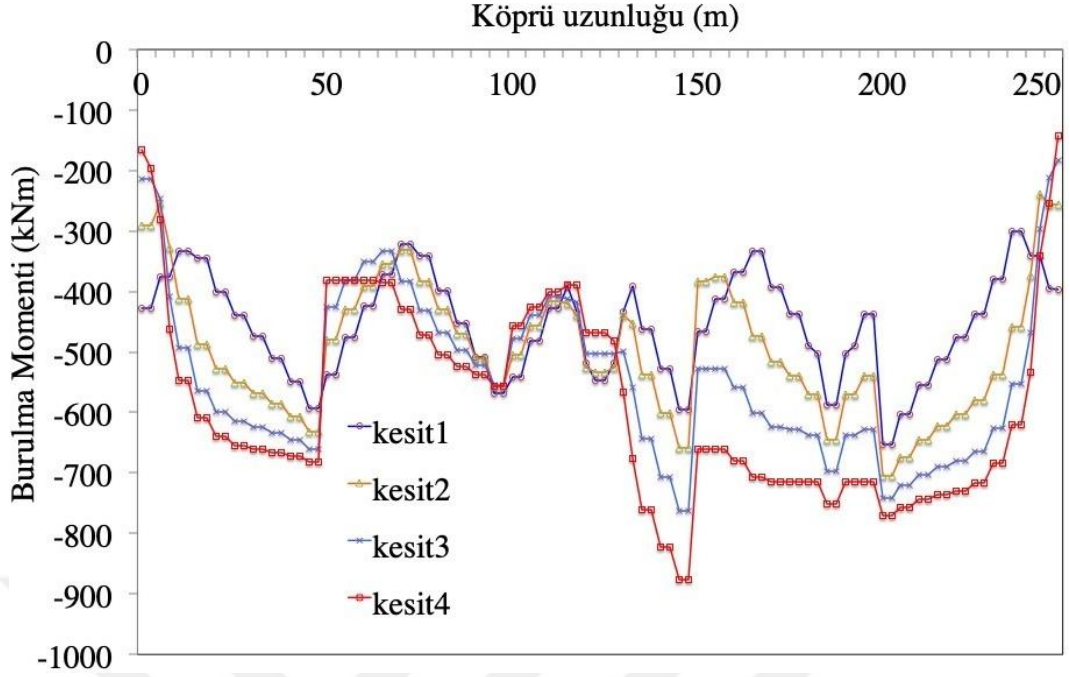
Şekil 94. Durum 5: Maksimum burulma momentleri



Şekil 95. Durum 5: Minimum burulma momentleri



Şekil 96. Durum 6: Maksimum burulma momentleri



Şekil 97. Durum 6: Minimum burulma momentleri

Durum-6'da diyagramlarda simetri yoktur. Köprü'nün ikinci yarısında daha büyük burulma momenti değerleri elde edilmektedir. 150. m'deki orta ayak üzerinde en büyük burulma momentlerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum, göz önüne alınan taşıt geçişi senaryosunda büyük etkilerin bu ayak çevresinde oluştuğunu göstermektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kutu kesitli karayolu köprülerinde en kesit şeklinin köprünün dinamik davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, dört farklı en kesit şekline sahip 250 m uzunluğunda 5 açıklıklı karayolu köprüsü CSiBridge programında modellenmiştir. Analizlerde hareketli yükler iki şekilde göz önüne alınmıştır. Birinci yöntemde, köprü üzerinde yük katarı hareket ettirilerek tesir çizgileri ile en elverişsiz durumlar elde edilmiştir. İkinci yöntemde ise standart bir kamyon yüklemesi için adım adım analiz yapılmıştır. İkinci çözümde altı farklı taşıt geçişi senaryosu düşünülmüştür. Özellikle burulma rijitliğinin sonuçlara etkisi irdelenmiştir.

Çalışmadan çıkarılacak sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Göz önüne alınan en kesit şekillerine sahip köprülerde hâkim mod eğilmeli burulma modu olarak ortaya çıkmıştır. Burulma rijitliği arttıkça, doğal frekanslar azalmaktadır.
2. Yük katarı ile taşıt modellemesinde elde edilen sonuçlarda kesme kuvvetinin tüm kesitlerde aynı kaldığı, diğer kesit etkilerinin ise az miktarda değiştiği görülmüştür.
3. Öngörme etkisiyle en büyük eğime momenti KK-1 (dikdörtgen kutu kesit) kesitli köprüde kenar açıklıklarda meydana gelmektedir. Tüm kesitlerde orta açıklıklarda öngörmenin sebep olduğu eğilme momentleri çok fazla değişmemektedir.
4. Kamyon yüklemesi durumunda burulma momentleri genelde mesnetler üzerinde büyük değerler almaktadır. Ancak, karşılıklı geçişlerde orta açıklıkta da burulma momentinin büyük değerler aldığı görülmüştür.
5. Köprünün dinamik davranışı üzerinde araçların köprüye giriş zamanları, köprü üzerinde kalma zamanları ve araç hızları etkili olmaktadır.

Bu çalışmanın devamı olarak;

1. Bir araç-köprü etkileşim modeli için çalışma analitik yöntemler göz önüne alınarak tekrarlanabilir. Böylece daha kapsamlı parametrik incelemeler yapılabilir.
2. Köprü-zemin birlikte modellenerek çalışma tekrarlanabilir. Burada karayolu köprüsü yerine demiryolu köprüsü düşünülerek, yüksek hızlarda araç-köprü-zemin etkileşimi incelenebilir.
3. Araç geçişlerine ek olarak yer hareketlerinin etkisi göz önüne alınabilir.

5. KAYNAKLAR

- Anagnostopoulou, M., Filiatrault, A. ve Aref, A., 2009, Seismic Design and Analysis of Precast Segmental Concrete Bridge Superstructure, Master Thesis, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Università degli Studi di Pavia, Pavia
- Androus, A., 2003, Experimental and Theoretical Studies of Composite Multiple-Box Girder Bridges, Master Thesis, Ryerson University, Toronto, Ontario
- Altunışık, A.C., 2010, Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
- Ateş, Ş., 2011, Numerical Modelling of Continuous Concrete Box Girder Bridges Considering Construction Stages, Journal of Applied Mathematical Modelling 35 (2011) 3809–3820
- Batmaz, M.E., Kutu Kesitli Öngerilmeli Prefabrike Kirişli Viyadük Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2002
- Choi, Y.C. ve Oh, B.H., 2013, Transverse Modeling of Concrete Box-Girder Bridges for Prediction of Deck Slab Ultimate Load Capacity, Journal of Bridge Engineering Vol. 18, Issue 12
- CSI Analysis Reference Manual for SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®, ISO# GEN062708M1 Rev.15 Berkeley, California, USA, 2016
- Garg, C. ve Kumar, S.M.V.N., 2014, Prestressed Tendons System in a Box Girder Bridge, International Journal of Civil Engineering (IJCE) ISSN(P): 2278-9987; ISSN(E): 2278-9995 Vol. 3, Issue 3, May 2014, 1-8
- Godden, W., 1979, Seismic Model Studies of Long-Span Curved Bridges, *Proceedings of a Workshop on Earthquake Resistance of Highway Bridges*, University of California, Berkeley, January 29-31, 409-415.
- Gouda, L.P., 2013, Study on Parametric Behavior of Single Cell Box Girder under Different Radius Of Curvature, Master Thesis, Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela, Orissa
- Gülhan, İ.E., 2005, Öngerilmeli Betondan Sandık Kesitli Köprülerin Yapay Sinir Ağları İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi
- Hassan, W.I.H., 2005, Shear Distribution in Curved Composite Multiple Box Girder Bridges, Master Thesis, B.Sc. Alexandria University, Toronto, Ontario

- Huang, D., 2004, Field Test of a Curved Steel Box Girder Bridge, Master Thesis, Ryerson University, Toronto
- Huang, D., 1995, Wang, T.L., Shahawy, M., Vibration of Thin-Walled Box -Girder Bridges Excited by Vehicles, *Journal of the Structural Engineering*, 121(9), September, 1330-1337.
- LRFD- Chapter 4 - Structural Modeling and Analysis, Bridge Design Practice, 2015
- Najm, M.A., Modelling and Analysis of Interface in Composite Box Girder Bridges, Ph.D. Thesis, University of Gaziantep, Gaziantep, 2015
- Pindado, S., Meseguer, J., Franchini, S., IDR/UPM, E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, E-28040, Madrid, Spain, 2005
- Sarıtaş, F., 2007, Kutu Kirişli Köprülerin Stokastik Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi
- Veletzos, M.J., 2007, The Seismic Response of Precast Segmental Bridge Superstructures with Bonded Tendons, Ph.D. Thesis, University of California
- Yu, Y., Deng, L., Wang, W. ve Cai, C.S., 2015, Local Impact Analysis for Deck Slabs of Prestressed Concrete Box-Girder Bridges Subject to Vehicle Loading, Journal of Vibration and Control 2017, Vol. 23(1) 31–45

ÖZGEÇMİŞ

Sakine BOSTAN 1991 yılında Trabzon'un Çarşıbaşı ilçesinde doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Çarşıbaşı Gazi İlköğretim Okulu ve Beşikdüzü Anadolu Öğretmen Lisesi'nde 2009 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimini 2014 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2018-2019 arası Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü Trabzon'da İnşaat Mühendisi olarak görev yapmıştır. İyi derecede İngilizce bilmekte olan Sakine BOSTAN, 2019 senesinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nda müfettiş yardımcısı olarak göreve başlamış ve halen bu göreve devam etmektedir.