T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN KESİTLİ SÜREKLİ KÖPRÜLERDE SERBEST DOĞAL FREKANS TAHMİNİ

HÜSEYİN SAĞLIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. BİLGE DORAN

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN KESİTLİ SÜREKLİ KÖPRÜLERDE SERBEST DOĞAL FREKANS TAHMİNİ

Hüseyin SAĞLIK tarafından hazırlanan tez çalışması 12.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Prof. Dr. Can BALKAYA

Nişantaşı Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Tevfik Naci YÜCEFER

Nişantaşı Üniversitesi _____

Doç. Dr. Barış SEVİM

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Çalışmanın her aşamasında beni tecrübeleri ve bilgileriyle destekleyen, zamanlarını ayıran ve tüm sorunlarıma eğilen danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Bilge DORAN ve Sayın Prof. Dr. Can BALKAYA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tezim sırasında sorularımı yanıtsız bırakmayan ve önerileriyle yolumu açan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Ali ETEMADİ ile çalışmalarım sırasında zaman zaman benim üzerimdeki yükü kendileri sırtlanan değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan sevgili aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

Haziran, 2018

Hüseyin SAĞLIK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Hipotez 7

BÖLÜM 2

DOĞAL EĞİLME FREKANSI 8

BÖLÜM 3

SAYISAL UYGULAMA 16

3.1 Kullanılan Yazılım ve sayısal model verifikasyonu 16
3.2 Değişken Kesitli Köprü Modeli 21

BÖLÜM 4

YÖNTEM VE PARAMETRELER 24

4.1 Kullanılan Parametreler ve Değişken Kesitli Köprü Özellikleri 24
4.2 Değişkenler 35

BÖLÜM 5

VERİ ANALİZİ 39

5.1 Serbest Titreşim Analizi Sonuçlarına Bağlı Olarak Değişkenlerin Doğal Frekans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi 41

BÖLÜM 6

REGRESYON ANALİZİ 52

6.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Regresyon 52
6.2 Önerilen Formül 53

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 58

KAYNAKLAR 60

EK-A

KULLANILAN MODEL GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ 63

EK-B

KÖPRÜ ENKESİT HESAPLARI 71

EK-C

DOĞAL FREKANSLAR VE MESNET ETKİSİ 77

EK-D

ÖNERİLEN FORMÜLASYON VE HATA YÜZDELERİ 82

ÖZGEÇMİŞ 86

SİMGE LİSTESİ

b_f	I-tipi çelik kirişin başlık genişliği
D	Çelik kiriş derinliği
	dik eksene göre tanımlı atalet momenti
	düzlemine dik eksene göre tanımlı atalet momentini
E	Elastisite modülü
EI(x)	Eğilme rijitliği
f	Doğal eğilme frekansı
f_{analiz}	Sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan doğal eğilme frekans değeri
$f_{formül}$	Regrasyon analizi ile elde edilen, doğal eğilme frekansı
f_{sb}	Basit kiriş için doğal frekans
H	Açıklık ortasındaki kiriş derinliği
I	Eğilme atalet momenti
I_c	Kompozit kesidin eğilme atalet momenti
I_{yc}	I-tipi çelik kiriş kesidinde basıncın meydana geldiği başlıktaki gövde düzlemine
I_{yt}	I-tipi çelik kiriş kesidinde çekmenin meydana geldiği başlıktaki gövde
k	Kenar açıklığın orta açıklığa oranı
L	Hesap açıklığı
L_m	Orta açıklık uzunluğu
L_{max}	Maksimum hesap açıklığı
L_s	Kenar açıklık uzunluğu
m(x)	Kütlenin konuma bağlı fonksiyonu
M(x,t)	Eğilme momenti
n	Açıklık sayısı
p(x,t)	Dış yük
q(t)	Mod koornidatı
r	Açıklık ortasındaki kiriş derinliğinin mesnet noktasındaki kiriş derinliğine oranı
t_f	I-tipi çelik kirişin başlık kalınlığı
t_w	I-tipi çelik kirişin gövde kalınlığı
u(x,t)	Dış yükten meydana gelen düşey ötelenme
V(x,t)	Kesme Kuvveti
w	Birim uzunluktaki ağırlık
X_i	Regresyon modeline ait bağımsız değişken
Y_i	Regresyon modeline ait fonksiyon

$\emptyset(x)$	Modal şekil değişimi biçimi
α	Değişken kesit uzunluğunun açıklık uzunluğuna oranı
β_i	Regresyon modeline ait parametre
γ	Kenar açıklığın orta açıklığa oranı
ω	Açısal frekans

KISALTMA LİSTESİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
EMPA	Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research
OHBDC	Ontario Highway Bridge Design Code

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 İlk doğal eğilme frekansına karşılık gelen statik yer değiştirmeler [22]……..9
Şekil 2.2 Çeşitli ülkelere ait dinamik etki katsayısının açıklık uzunluğu ile değişimi [5]……10
Şekil 2.3 Australian Code (a) ve OHBDC'den alınan (b) dinamik etki katsayısı ile ilk doğal eğilme frekansı arasındaki ilişkiler [2][23]……..10
Şekil 2.4 U.S. Sacremento Nehri üzerine inşa edilmiş değişken kesitli çelik sürekli köprü [25]……...11
Şekil 2.5 Yayılı kütleli sistem: (a) dış yükler; (b) elastik eğri; (c) diferansiyel elemanda kuvvetler [26]……..12
Şekil 2.6 Basit mesnetli sabit kesitli kiriş için ilk 3 doğal titreşim modu ve frekansları [33]……15
Şekil 3.1 ''I'' keside sahip bir frame elemanına ilişkin lokal koordinat sistemi [28]….17
Şekil 3.2 Shell elemanlar için lokal koordinatlar ……17
Şekil 3.3 Colquitz River köprüsü görüntüleri [7]……..18
Şekil 3.4 Colquitz River köprüsüne ait enkesit [14]……..19
Şekil 3.5 Sayısal model a) boykesit b) enkesit c) 3 boyutlu ……..20
Şekil 3.6 İlk eğilme modu (6.08 Hz)……...21
Şekil 3.7 İrdelemede kullanılan köprü boykesidi ……..22
Şekil 3.8 Tek açıklıklı köprü modeli a) otomatik bölme işlemi b) elle bölme işlemi….23
Şekil 4.1 Değişken kesitli sürekli köprülere ait genel geometri ve parametreler …….25
Şekil 4.2 Doğrusal değişen değişken kesit uzunluğu [31]……27
Şekil 4.3 Değişken kesitli köprüler için derinliğin açıklığa oranı [25]……27
Şekil 4.4 Açıklık ortasına ait tipik köprü enkesiti ……28
Şekil 4.5 a)V tipi diyafram; b)X tipi diyafram; c)Tekil kiriş diyafram……30
Şekil 4.6 Kompozit I-kiriş köprü elemanları ……31
Şekil 4.7 Örnek köprü boykesiti ……33
Şekil 4.8 "I" tip profile ait boyut adlandırmaları ……33
Şekil 4.9 Örnek köprü modeline ait CSIBridge programından alınan enkesit ve boykesitler ……35
Şekil 4.10 Orta açıklıklardan alınan kompozit köprü enkesitleri ……36
Şekil 5.1 CSIBridge programından alınan enkesit ve boykesitler ……40
Şekil 5.2 CSIBridge programından elde edilen 1. doğal eğilme mod şekli ……40
Şekil 5.3 Sabit "α" oranları için doğal frekans –" r" oranı eğrileri ……42
Şekil 5.4 Sabit "r" oranları için doğal frekans – "α" oranı eğrileri ……45

Şekil 5.5 Açıklıklara bağlı olarak L_{max} – doğal eğilme frekansı değişimi ……47
Şekil 5.6 Her bir açıklık sayısına bağlı olarak L_{max} – doğal eğilme frekansı (f) değişimi……..48
Şekil 5.7 Her bir açıklık sayısına bağlı olarak ɣ – doğal eğilme frekansı (f) değişimi ……49
Şekil 5.8 Başlangıç ve bitiş noktalarında sabit mesnet kullanılmış çok açıklıklı köprü modellerinin genel boykesitleri ……50
Şekil 6.1 Önerilen formülasyon ve serbest titreşim analizi sonuçlarının açıklık sayılarına göre karşılaştırılması ……55
Şekil 6.2 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 2 açıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.99)……55
Şekil 6.3 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 3 açıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.94)……56
Şekil 6.4 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 4 açıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.98)……56
Şekil 6.5 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 5 açıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.97)……57
Şekil 6.6 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 6 açıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.99)……57
Şekil A.1 Değişken kesitli sürekli köprülere ait genel geometri ve parametreler)……63
Şekil B.1 “I” tip profile ait boyut adlandırmaları……71
Şekil C.1 Kullanılan mesnet şartları ……77

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 Sürekli köprü örnekleri……..26
Çizelge 4.2 Değişken kesitli sürekli köprülere ait malzeme özellikleri.....32
Çizelge 4.3 Örnek modelin kesit kontrolü.....34
Çizelge 4.4 Göz önüne alınan değişkenler ve sayısal karşılıkları……..37
Çizelge 5.1 Sabit "α" oranları altında değişen "r" oranlarına göre doğal frekans farkları……43
Çizelge 5.2 Sabit "r" oranları altında değişen "α" oranlarına göre doğal frekans farkları……46
Çizelge 6.1 Boyutsuz parametreler ……..54
Çizelge A.1 Değişken kesitli sürekli köprülere ait genel geometri ve parametreler…..63
Çizelge B.1 Köprü enkesit kontrolleri ……..71
Çizelge C.1 Mesnet şartlarına göre doğal frekans değerleri ……..77
Çizelge D.1 Boyutsuz parametreler ……..82
Çizelge D.2 Detaylı doğal frekans hesabı ve hata oranları ……..83

ÖZET

DEĞİŞKEN KESİTLİ SÜREKLİ KÖPRÜLERDE SERBEST DOĞAL FREKANS TAHMİNİ

Hüseyin SAĞLIK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Bilge DORAN

Eş Danışman: Prof. Dr. Can BALKAYA

Bu çalışma temel olarak değişken kesitli kompozit çelik I tipi kirişlere sahip farklı geometriye sahip sürekli köprülerin doğal frekansları sayısal olarak araştırılmıştır. Bu bağlamda, CSIBridge programı yardımıyla 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile değişken kesitli köprülerin dinamik davranışı belirlenmiştir. Köprü taşıyıcı sistem elemanları AASHTO LRFD Standartlarına (2014) göre tasarlanmıştır.

Hesap açıklığı, değişken kesit derinliğinin açıklık ortasındaki kiriş derinliğine oranı (r), değişken kesidin uzunluğunun açıklık uzunluğuna oranı (α), açıklık düzenlemeleri ve çelik ana kiriş düzenlemesi gibi parametrelerin doğal köprü frekansı üzerine etkisi, sayısal olarak yüz elli üç köprü modeli ile değerlendirilmiştir. “r” ve “α” oranları sırasıyla 0.5-2.0 ve 0.1-0.5 aralığında seçilmiştir. Değişken kesitli sürekli köprülerin doğal frekansları için analiz sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

Son olarak, değişken kesitli kompozit çelik I-kirişli sürekli köprülerin ilk doğal frekansını tahmin etmek için doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizine dayanarak pratik bir denklem de önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit çelik köprüler, doğal frekans tahmini, sonlu elemanlar analizi, değişken kesit

ABSTRACT

THE ESTIMATION OF FREE NATURAL FREQUENCY OF CONTINUOUS BRIDGES WITH VARIABLE CROSS-SECTION

Hüseyin SAĞLIK

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Bilge DORAN

Co-Adviser: Prof. Dr.Can BALKAYA

This study numerically investigates the natural frequencies of composite steel I-girder continuous-span bridges with straight haunched sections. In this context, three dimensional finite element analysis is performed to model dynamic behaviour of bridges by using CSIBridge package. Structural elements of bridge load-bearing system have been designed according to AASHTO LRFD Standards (2014).

Effect of various parameters such as span length, the depth ratios between haunched cross-section to mid-span cross-section (r), the length ratio between haunched section to span (α), span configuration and steel girder arrangement on natural frequencies have been investigated numerically with one hundred fifty three bridge models. “r” and “α” values are set to be 0.5 - 2.0 and 0.1 - 0.5. The analysis results have been given and discussed for the natural frequency of continuous-span composite steel bridges with straight haunched section.

Finally, non-linear regression analysis has been conducted to predict the first natural flexural frequency of composite steel I-girder continuous-span bridges with straight haunched sections. Based on regression analysis, a practical equation is also proposed.

Keywords: Composite steel bridges, natural frequency estimation, finite element analysis, straight haunched, non-prismatic cross-section

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bu çalışmada köprüler için önemli bir parametre olan doğal frekans kavramı, değişken kesitli sürekli köprüler için sayısal olarak araştırılmıştır. Köprülerin doğal frekansı, birçok şartnamede [1, 2] istenmeyen köprü titreşimlerinin engellenmesi için, hareketli yükten dolayı oluşan yer değişimlerini sınırlamada kullanılmaktadır. Yine birçok şartname [1, 2] hareket halindeki taşıtların dinamik etkilerini köprü tasarımında göz önüne almak için kullanılan dinamik etki katsayısını, köprülerin doğal frekansı cinsinden ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında toplamda 153 adet değişik geometride ve açıklıkta sürekli köprülerin doğal frekansları incelenmiştir. İnceleme sonucunda değişken kesitli kompozit çelik I-kirişli sürekli köprülerin ilk doğal frekansını tahmin etmek için doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmış ve analiz sonucunda doğal frekans tahmini için pratik bir denklem önerilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde, köprülerin doğal frekans tahmini üzerine yapılan çalışmalar geçmişten günümüze kadar bir özet şeklinde verilmiştir.

Biggs J.M. (1964)'te yayınladığı 'Introduction to Structural Dynamics' kitabında bir ucu sabit, diğer ucu kayıcı mesnet şartlarına sahip basit kirişlerin doğal frekansının belirlenmesinde, (1.1) eşitliğini geliştirmiştir [3].

$$f_{sb} = \frac{n^2\pi}{2L^2}\sqrt{\frac{EIg}{w}} \tag{1.1}$$

Burada n sırasıyla 1., 2. ve 3. modun tahmini için 1,2 ve 3 alınacaktır. Ayrıca L, hesap açıklığı, EI, eğilme rijitliği, w ise birim uzunluğa karşılık gelen ağırlıktır. (1.1) eşitliği ayrıca kompozit sistemlere de uygulanabilmektedir. Kompozit kiriş için EI eğilme rijitliği; kompozit kesitin eğilme rijitliği olarak alınmaktadır. Biggs 2,3 ve 4 açıklıklı sabit kesitli sürekli kesitler içinde 3 ayrı denklem geliştirmiştir. Çalışmasında ayrıca değişken kesitli basit kirişlerin doğal periyodunun çözümünde Rayleigh methodunu kullanmıştır.

Cantieni R., [4] 1983 yılında 1958-1981 yılları arasında EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) tarafından 226 köprü üzerinde (205 adedi öngerilmeli betonarme, 5 adedi betonarme ve 14 adedi çelik betonarme kompozit sistemler) gerçekleştirilen dinamik test sonuçlarından yararlanarak köprü hakim periyodunu formülle etmişlerdir (1.2). Çalışmada, ölçümlerin hangi yöntemlerle yapıldığı ve bulunan değerlere yer verilmiştir. Formulasyondaki L_{max} maksimum hesap açıklığıdır ve metre cinsindendir.

$$f = \frac{100}{L_{max}} + 0.6 \tag{1.2}$$

Billing J. R. ve Green R., [5] 1984 yılında deneysel çalışmalardaki verilerin, maksimum açıklık oranlarıyla olan ilişkisini göz önüne alarak (1.3) eşitliğini sunmuşlardır.

$$f = \frac{110}{L_{max}} \tag{1.3}$$

Burada L_{max} maksimum hesap açıklığıdır ve metre cinsindendir. Göz önüne alınan deneysel çalışmada 27 adet köprüde (14 adet çelik) frekans ölçümleri yapılmıştır.

Memory vd., [6] 1995 yılındaki çalışmada, köprülerin baskın periyodunu saha ölçümleri ile Rayleigh method arasındaki veriler aracılığıyla karşılaştırmıştır. Kütle ve rijitlikleri ortalama üniform dağılan, sabit kesitli ve eğimsiz köprüler için (1.1) eşitliği ile verilen formülün %5 oranında saha ölçümlerinden farklı çıkmasına rağmen dizayn aşamasında kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Yine sabit kesitli ve köprü boyunca simetrik açıklıklara sahip köprüler için Billing J.R. (1979) da önerdiği katsayının (1.1) eşitliği ile kullanılması halinde saha ölçümleriyle %10 luk bir fark yarattığını; fakat bunun kabul edilebilir olduğunu belirtmiştir. Ayrıca asimetrik ya da eğimli, sürekli köprülerde (1.1) eşitliğinin kullanılamayacağını ve eigenvalue analizin kullanılması gerektiğini önermiştir.

1996'da Ventura vd.[7] , Colquitz nehri köprüsü üzerinden yapılan frekans ölçümleri ile sonlu elemanlar metoduyla oluşturulan model üzerinden sonuçları karşılaştırmıştır. Geliştirilen modelde köprü tabliyesi alan elemanlar (Shell elemanlar) yardımı ile, çelik ana köprü kirişleri ile diyafram kirişleri de 3D eğilme kiriş elemanları ile modellenmiştir. Parapet ve tretuvarlar modellenmemiş; bunun yerine kütleleri ve rijitlik katkıları dış kirişlere dışardan verilmiştir. Analiz sonucunda deneysel veriler ve sonlu elemanlar modeli arasında %3.5'lik bir fark görülmüştür.

Wolek vd. (1996) deneysel saha çalışmaları ile sonlu elemanlar yöntemiyle geliştirilen modeller arasında doğal frekansı karşılaştırmıştır[8]. Çalışmada kullanılan köprü 3 açıklığa sahip olsa da her biri köprü kolonlarına basit bağlanmıştır ve sürekli değildirler. Bu sebeple sadece orta açıklık incelenmiştir. Çalışmada bütün köprü elemanları, alan elemanlar (Shell elemanlar) olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde kiriş üst başlığı modellenmemiş ve kiriş gövdesi doğrudan betonarme alan elemana bağlanmış ve üst başlığın oluşturduğu rijitliği göz önüne almak için alan elemanların elastisite modülleri kısmen arttırılmıştır. Çalışma sonucunda ilk 5 mod için yakın sonuçlar bulunmuş ve diyafram elemanlarının burulma moduna olan etkisi belirtilmiştir.

Jine-Wen Kou ve John T. DeWolf (1997), yaptıkları çalışmada köprü dinamik davranışının hangi etmenlere bağlı olduğunu incelemişlerdir[9]. Sonlu elemanlar modelinde ve saha ölçüm çalışmalarında kullanılan köprü, 4 açıklığa sahip, 3 ana değişken kesitli sürekli çelik kirişten ve betonarme tabliyeden oluşmaktadır. Sadece orta mesnet uzun doğrultuda hareketi engellerken, diğer mesnetler kayıcıdır. Betonarme tabliyesi alan eleman olarak modellenirken; ana ve diyafram kirişler kiriş elemanı olarak modellenmiştir. Köprü baskın periyodu burulma olarak bulunmuştur.

1998'de Dusseau R.A. [10] toplamda 25 açıklığa sahip 12 karayolu köprüsü üzerinde yapılan deney çalışmalarından (1.4) eşitliğini vermişlerdir. Verilen ampirik formül birim boydaki ağırlığın sabit kesitli sürekli çelik kirişlerin derinliği ile açıklık uzunluğuna bağlılığından dolayı bu parametrelerle ifade edilmiştir. Geliştirilen formül deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, formülün ancak kısmi olarak yakın bir frekans fonksiyonu olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin sürekli kirişlerden meydana gelen köprülerde

bırakılan genleşme derzleri ve komşu açıklıkların düşey yükler altında göreceli olarak etkisinin daha fazla olması gösterilmektedir.

$$f = 588.2 L_s^{-1.45} D^{-0.4} \quad (1.4)$$

Burada L_s hesap açıklığı, D ise çelik kiriş derinliğini gösterirken, iki ifade de metre cinsinden ifade edilmiştir.

1998'de Fafard vd. [11], 1938 yılında Kanada'da inşa edilmiş, 3 açıklıklı, sürekli ve değişken kesitli betonarme kirişlerden oluşan köprü üzerinden dinamik etki katsayısını çalışmışlardır. Köprü mesnetlerinin kısa doğrultuda hareketi ve dönmesi kısıtlanmış; uzun doğrultuda ise sadece tek bir yerden hareket engellenerek diğer mesnetler kayıcı olarak sonlu elemanlar modeline tanıtılmıştır. Tüm betonarme kiriş ve köprü tabliyesi alan elemanlar (Shell eleman) ile oluşturulmuş; tretuvar, parapet ve diyafram kirişleri kiriş elemanı olarak modellenmiştir. Doğal periyodun belirlenmesi için yapılan saha çalışmaları ile sonlu elemanlar yöntemi ile geliştirilmiş model karşılaştırıldığında, doğal periyot farklarının ilk 3 mod için %2 olduğu gözlemlenmiştir.

Martin vd. (2000) köprülerde değişik parametrelerin doğal frekansı nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir[12]. Sonlu elemanlar programıyla modellenen köprüde kirişler 3D-kiriş elemanlardan; tabliye ise alan elemanlardan (Shell elemanlar) oluşturulmuştur. Kompozitlik, rijit elemanlar yardımıyla sağlanmıştır.

Karl E. Barth ve HaiyongWu (2007), yaptıkları çalışmalarda "I'' keside sahip sürekli köprü kirişlerinden oluşan; kompozit köprüler için geliştirilmiş doğal frekans denklemini (1.5) ile ifade etmişlerdir [13].

$$f = a \frac{I^c}{L_{max}^b} f_{sb} \quad (1.5)$$

Burada f_{sb} basit kiriş için elde edilen doğal frekans denklemi (1.1), L_{max} metre cinsinden en büyük hesap açıklığı, I, m^4 cinsinden kompozit kesit ortalama atalet momentini ifade etmektedir. Ayrıca, a, b ve c değerleri iki açıklıklı köprülerde sırasıyla 1.44, 0.046 ve 0.032; üç ya da daha çok açıklıklı köprüler için sırasıyla 1.49, -0.033 ve 0.033 değerlerini almaktadır.

Geliştirdikleri sonlu elemanlar modelleriyle (ABAQUS) açıklık uzunluğu, kullanılan malzeme mekanik özellikleri ve kesitlerinin doğal frekansa olan etkisini incelemişlerdir. Bunun yanında parapet özelliklerinin de doğal frekans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle bulunmuş olan doğal frekans sonuçları basit kiriş dinamik denklemi ve daha önceki çalışmalardan elde edilen formülasyonlar ile tek-iki ve üç açıklıklı modeller üzerinden karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak daha önceki çalışmalardan daha geçerli ve daha yakın sonuç veren katsayı geliştirilmiştir.

Warren vd. [14] 2009'da köprülerin mod şekillerini ve frekanslarını belirlemede etkili ve yeterli olacak modelleme teknikleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada Colquitz nehri köprüsü kullanılmıştır. Köprü çelik ana kirişler ile beton köprü tabliyesinden oluşmaktadır. Köprü modellenirken sadece üst yapı dikkate alınmış, tek nokta hariç diğer mesnetler kayıcı mesnet olarak modellenmiştir. Çalışmada kiriş elemanlar ile alan elemanların (Shell elemanların) kombinasyonlarından yararlanılarak dört farklı modelleme göz önüne alınmıştır. Bulunan doğal periyot değerleri, saha ölçümleriyle karşılaştırıldığında; alan elemanlardan oluşan köprü tabliyesi ile kiriş eleman olarak modellenmiş ve rijit eleman ile arasındaki bağlantı sağlanmış olan model tavsiye edilmiştir.

Qingfei vd. (2012), çalışmalarında sabit kesitli sürekli kirişlerin doğal frekansının tahmini için, (1.1) eşitliğine çarpım katsayısı önermişlerdir[15]. ANSYS programı kullanılarak modellenen sürekli köprülerde; eşit açıklık ve sabit kesit kullanılması halinde etkin doğal frekanslarının (1.1) yolu ile bulunabileceğini belirtmişlerdir. Başka bir açıklama ile; eşit açıklığa sahip köprülerin açıklık sayılarının etkin doğal frekansı değiştirmediğini belirtmişlerdir. Fakat kenar açıklıklar ve orta açıklığın farklı olması hali için (1.1) eşitliğine çarpan olarak giren katsayı, istatistiksel yollarla belirlenmiş ve eşitlik (1.6) sunulmuştur. Bu katsayı doğrudan, aşağıda da ifade edildiği gibi kenar açıklıkların orta açıklığa olan oranına bağlıdır.

$$f = \lambda_1 . f_{sb} \tag{1.6}$$

Burada λ_1 değeri:

λ_1=-0.675k^2-0.113k+1.787 (0<k≤1)'ne eşittir. İfadedeki k değeri kenar açıklıkları ve orta açıklık oranına eşittir.

Qingfei vd. (2013), yaptıkları çalışmada teorik analiz ve nümerik simülasyon kullanılarak, değişken kesitli köprü kirişleri için; (1.6) eşitliğine düzeltme katsayısı önermişlerdir[16]. Düzeltme katsayısının türetilmesinde, (1.7) eşitliğinden de görüleceği gibi köprü kenar açıklığı ve orta açıklığının oranı ile değişken kesit derinliğinin oranlarından yararlanılmıştır. Değişken kesit olarak parabolik değişimden yararlanmışlardır.

$$f = \lambda_1 \lambda_2 f_{sb} \tag{1.7}$$

Burada λ_2 değeri:

λ_2=-1.172r+1.912' ne eşittir. İfadedeki r değeri açıklık ortasındaki kiriş derinliğinin, mesnet noktasındaki kiriş derinliğine oranı olarak ifade edilmiştir. λ_1 değeri (1.6) da kullanılan değerdir. λ_1 ile sabit kesitli sürekli köprüler için elde edilen ifadeye λ_2 çarpanı eklemek suretiyle değişken kesitli köprüler için frekans değerini elde etmişlerdir.

Mohseni ve A. R. Khalim (2014) [17]; çalışmalarında çoklu kutu kesit taşıyıcılara sahip sürekli köprü kirişleri için tahmini etkin doğal periyot denklemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında hem teorik yöntem hem de analitik simülasyon (CSI Bridge) kullanmışlardır. Bulunan formülasyon, BS EN 2003; UIC 1979 gibi şartnameler ile ilgili önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Qingfei vd. (2015), yaptıkları çalışmalarda kolonlara moment aktarır şekilde bağlı (çerçeve) sürekli köprü kirişlerinin etkin doğal frekansını araştırmışlardır[18]. Öncelikle basit kirişlerin (1.1) denklemiyle elde edilen doğal frekans formüllerine çarpım katsayısı uygulayarak sürekli kirişler için aşağıdaki şekilde güncellemişlerdir. Bulunan formül yardımıyla çerçeve sisteme sahip köprülerin doğal periyoduna doğrudan etki eden iki parametre üzerinde durulmuştur: kiriş açıklık oranı ve üst yapı ile taşıyıcı kolonlar arasındaki rijitlik oranları. Tahmini doğal frekans denklemi bu iki parametre ile elde edilmiş ve çerçeve sisteme sahip köprüler için geliştirilmiştir. Sonuç olarak üst yapı ile taşıyıcı kolonların rijitlik oranları 10'dan daha büyük olan çerçeve köprüler için ilk periyodun üst yapıdan daha çok kolona bağlı olduğu görülmüştür.

$$f = [(1.322\, ln(n) - 2.429)\gamma + (-1.330\, ln(n) + 3.489)]f_{sb} \quad (1.8)$$

(1.8) eşitliğinde; ”γ”, kenar açıklığın orta açıklığa oranı olarak belirtilmiştir. Yine ifadede yer alan ”n” ile açıklık sayısı belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Uluslararası şartnameler ve çalışmalar incelendiğinde; çok açıklıklı sürekli değişken kesitli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu gözlemlenmiştir. Köprülerdeki doğal titreşim frekansının önemi göz önüne alındığında, bu eksikliği giderecek ve ön tasarım için geliştirilecek ampirik formüllerin kullanılması önem kazanacaktır.

1.3 Hipotez

Köprü dinamik hesabının bir parçası olan statik analizde göz önüne alınan en önemli parametrelerden birisi yapının ilk doğal titreşim frekansıdır. Ayrıca köprü doğal frekansının, uygulanan trafik yükü gibi dinamik etkiye sahip yük etkileşimlerinden kaynaklanacak rezonansı engellemek için geçerli köprü tasarım şartnameleri, köprü hâkim periyodunu sınırlamıştır. Hareket halindeki araçlardan kaynaklanan dinamik etki, çoğu tasarım şartnamesinde statik yükün dinamik etki katsayısı ile artırılmasıyla göz önüne alınmaktadır. Bazı şartnameler dinamik etki katsayısını köprü doğal titreşim frekansına bağlı olarak göz önüne almaktadırlar.

Bu nedenlerle köprünün doğal titreşim frekansının ilk tahmini önem kazanmaktadır. Bu tez kapsamında değişken kesitli kirişlere sahip köprülerin frekans değerleri sonlu elemanlar yöntemi yardımı ve serbest titreşim analizi ile belirlenecek, tasarım mühendisleri tarafından tercih edilecek pratik bir bağıntı üzerinde çalışılacaktır.

BÖLÜM 2

DOĞAL EĞİLME FREKANSI

Dinamik tepki, köprü işletim ömrü ve güvenliğini etkileyen en önemli etmenlerden biri olarak kabul edilmektedir [8]. Köprülerin doğal frekansı da bu açıdan, dinamik tepkinin belirlenmesindeki en önemli unsurlardan biridir.

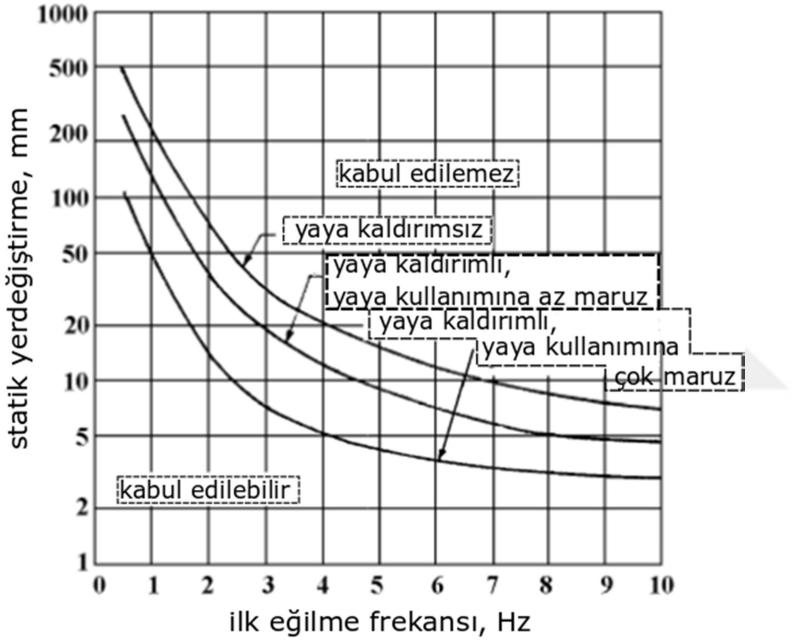
Rezonans teorisine göre; hareketli araç yüküne maruz köprülerin doğal frekansları, genel hareketli araçların doğal frekansı olan 1.5-4.5 Hz'den uzak olarak ayarlanır. Ayrıca tek açıklıklı basit körpülerin rijitlik kontrolü için, doğal frekans Çin'de 3 Hz, eski Sovyetler Birliğinde 3.32 Hz ve Amerika'de 3.5 Hz'den büyük olmalıdır [18].

Köprülerdeki hareketli yükten dolayı oluşan yer değiştirme sınırlaması temel olarak istenmeyen köprü titreşimini kontrol amaçlıdır. Farklı yönetmelikler dinamik köprü titreşiminin olumsuz etkilerini kontrol etmek için farklı yöntemler uygulamaktadırlar. Bunlardan birkaçından bahsedilecektir.

2002 tarihli AASHTO standardı [19] ve AASHTO LRFD standart eki [20,21] hareketli yükten dolayı meydana gelen deplesmanı açıklıkla ilişkilendirerek sınırlamaktadırlar. Aynı standart [19] hareketli yükler için maksimum yer değiştirmeyi sıradan köprüler için L/800 ile sınırlandırırken, şehirlerdeki ve yaya trafiğine de maruz kalan köprüler için L/1000 ile sınırlamaktadır. Bunun yanında AASHTO LRFD standart eki [20,21] hareketli yükler için opsiyonel yer değiştirme sınır değerleri ön görmektedir [13]. Roeder vd. [22], AASHTO'de verilen sınırlamalara ait gerekçelerinin net biçimde tanımlanmadığını göstermiştir. Azaltılan köprü yer değiştirmeleri ile artan rijitlik, köprü serbest titreşimini azaltmakla beraber, köprü titreşimini kontrol etmenin en iyi yolu değildir. Köprü

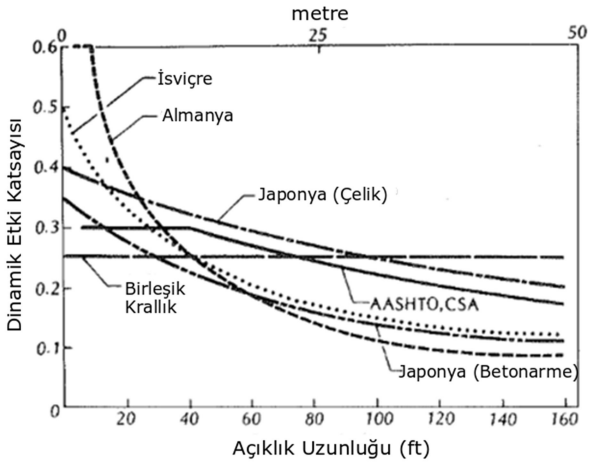
titreşim kontrolünün genel amacı insan algısını rahatsız eden titreşimleri engellemek üzerinedir. İnsan algısı ise maksimum yer değiştirme, ivme ve tepki frekansının kombinasyonuna bağlıdır [22].

OHBDC (Ontario Highway Bridge Design Code,1991) [1] ve 1992 tarihli Avusturalya Yönetmeliği [2] hareketli yükler için yer değiştirmelerin sınır durumunu köprü açıklığı ile değil; köprünün ilk doğal eğilme frekansı ile hareketli yük sınır yer değiştirmeleri arasındaki ilişkiden yola çıkarak açıklamaktadırlar [13,22]. Roeder vd. [22]'den alınan OHBDC'ye ait ilk doğal eğilme frekansı ile yer değiştirme sınır değerleri arasındaki ilişki Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



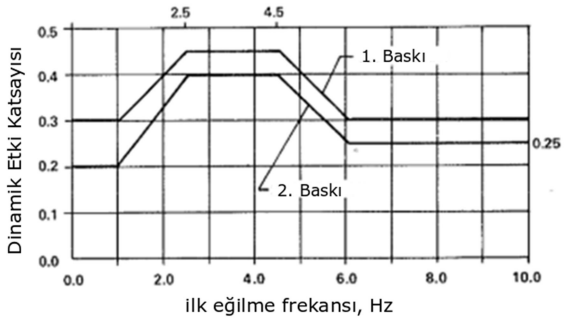
Şekil.2.1 İlk doğal eğilme frekansına karşılık gelen statik yer değiştirmeler [22]

Ayrıca hareket halindeki taşıtların dinamik etkilerini köprü tasarımında göz önüne almak için dinamik etki katsayısı ile artırılmış statik yükler kullanılmaktadır. Dinamik etki katsayısı farklı yönetmeliklerde farklı biçimlerde tanımlanmıştır. Dinamik etki katsayısının farklı ülkeler için, açıklık uzuluğa göre değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir.

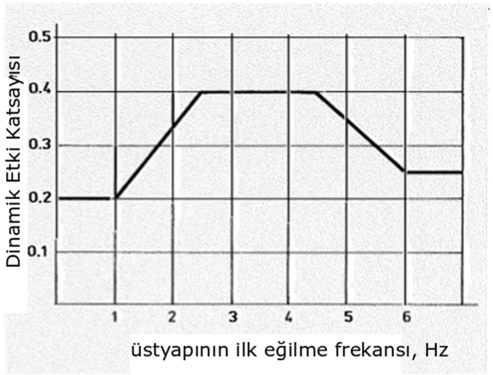


Şekil 2. 2 Çeşitli ülkelere ait dinamik etki katsayısının açıklık uzunluğu ile değişimi [5]

OHBDC ve Avustralya Yönetmeliği, dinamik etki katsayısını ilk doğal eğilme frekansları cinsinden ifade etmektedirler. Darton ve Barth [23] OHBDC'nin ilk ve 2. baskısında kullanılan dinamik yük katsayılarını Şekil 2.3a'daki gibi göstermişlerdir. Aynı zamanda Avustralya Yönetmeliği [2]'ne ait dinamik etki katsayısının doğal eğilme frekansı ile ilişkisi Şekil 2.3b'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.3 Australian Code (a) ve OHBDC'den alınan (b) dinamik etki katsayısı ile ilk doğal eğilme frekansı arasındaki ilişkiler [2][23]

Ön tasarımın doğru yapılabilmesi, köprü taşıyıcı sistem elemanları için uygun ön boyut belirlenmesi açısından köprü dinamiğinin iyi anlaşılması önemlidir. Köprülerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve analizi üzerine analitik ve deneysel olarak birçok çalışma olmasına rağmen çalışmalar sabit keside sahip basit yada sürekli köprüler üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Mesnette oluşan moment artışlarından dolayı; değişken kesitli sürekli köprülerde genel olarak değişken kesit, köprü kirişlerinin mesnet yakınında oluşturulmaktadır [24]. Değişken kesit kullanımı daha çok sürekli köprülerde malzeme tasarrufu için kullanılmaktadır [25]. Şekil 2.4'e örnek bir değişken kesitli sürekli köprü gösterilmiştir.



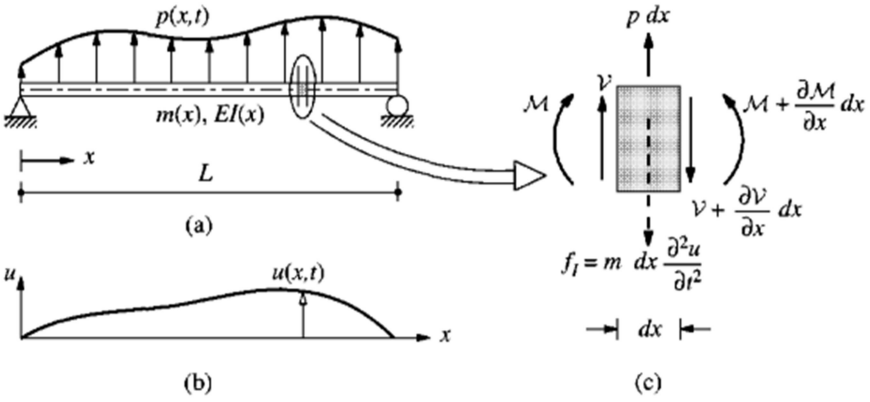
Şekil 2.4 U.S. Sacremento Nehri üzerine inşa edilmiş değişken kesitli çelik sürekli köprü [25]

Doğal Eğilme Frekansı ve Modların Basit Kiriş için Bulunması

Sabit kesitli basit kirişin ilk doğal eğilme frekansının tahmini Bölüm 1'de verilen Denklem 1.1 ile yapılmıştır. Denklem 1.1 deki ifadeler tek açıklıklı bir kompozit kiriş için uygulanırsa, aynı formül ile basit bağlı, sabit keside sahip tek açıklıklı köprünün ilk doğal eğilme frekansı bulunabilir. Sabit kesitli sürekli köprüler ile tek açıklıklı köprüler arasındaki fark diğer açıklıkların statik ve dinamik açıdan olan katkılarıdır [18]. Söz konusu değişken kesitli sürekli köprüler olduğunda değişken kesidin uzunluğu, derinliği gibi ifadelerde doğal eğilme moduna katılacaklardır. Bu tez kapsamında değişken kesitli sürekli köprülerin doğal eğilme frekansına etki eden, maksimum açıklık uzunluğu, orta ve kenar açıklıklar arasındaki oran, değişken kesidin derinliği ve açıklık içeresindeki

uzunluğu, açıklık sayısı, mesnet koşulları, enkesit düzenlemesi gibi parametreler, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenecek, doğal eğilme frekansının tahmini için doğrusal olmayan regresyon analiziyle bir formül önerilecek ve formülün geçerliliği irdelenecektir. Önerilen formül Denklem 1.1'de kesit değişkenliğini ve köprü sürekliliğini göz önüne alacak düzeltme katsayıları şeklinde olacaktır.

Bu sebeple basit kirişlerin doğal eğilme frekansını veren ve aynı şekilde tek açıklıklı köprülere de uygulanabilen Denklem 1.1 türetilecektir.



Şekil 2. 5 Yayılı kütleli sistem: (a) dış yükler; (b) elastik eğri; (c) diferansiyel elemanda kuvvetler [26]

Şekil 2.5.a'da dış yük etkisindeki sönümsüz, sabit kesitli bir basit kiriş verilmiştir. Zamana ve konuma bağlı olarak tanımlanan p(x,t) yükünün kirişte yol açtığı düşey ötelenme u(x,t) ile gösterilmiştir. Kirişin eğilme rijitliği EI(x); birim boydaki kütlesi m(x) kadardır. Şekil 2.5.c'de kirişten dx mesafesinde alınmış bir diferansiyel elemana ait serbest cisim diyagramı, eylemsizlik kuvveti de dahil olmak üzere gösterilmiştir. V(x,t) kesme kuvveti, M(x,t) ise eğilme momentidir.

Y yönünde kuvvetler dengesinden aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = p(x,t) - m\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.1}$$

Eğilme momenti, kesme ve yer değiştirme ifadeleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$V = \frac{\partial M}{\partial x} \tag{2.2}$$

$$M = EI\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{2.3}$$

Denklem 2.2 ve Denklem 2.3, Denklem 2.1'de yerine yazılırsa Şekil 2.5'deki basit kirişin hareket denklemi elde edilir:

$$m(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[EI(x)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right] = p(x,t) \tag{2.4}$$

Şekil 2.5'deki basit kirişin doğal titreşim frekansları ve modlarını bulmak için serbest titreşim durumu (p(x,t)=0) Denklem 2.4'e uygulanırsa serbest titreşimin genel denklemi aşağıdaki gibi yazabilir:

$$m(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[EI(x)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right] = 0 \tag{2.5}$$

Burada;

$$u(x,t) = \emptyset(x)q(t) \tag{2.6}$$

Denklem 2.5'deki ifadede u(x,t) yi yerine yazabilmek için zamana (t) ve konuma (x) göre kısmi türev alındığında;

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \emptyset(x)\ddot{q}(t) \qquad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \emptyset"(x)q(t) \tag{2.7}$$

Burada herbir üst nokta zamana, herbir tırnak ise konuma göre türevi belirtmektedir. Bulunan kısmi türevler, Denklem 2.5'te yerine yazılırsa ve herbir ifade m(x)Ø(x)q(t) ye bölünmesiyle aşağıdaki ifade yazılır.

$$-\frac{\ddot{q}(t)}{q(t)} = \frac{[EI(x)\emptyset"(x)]"}{m(x)\emptyset(x)} \tag{2.8}$$

Eşitliğin sol tarafı yalnız t, sağ tarafı ise yalnız x değişkenine bağlıdır. Denklem 2.8'in her x ve t için geçerli olabilmesi ancak eşitliğin her iki tarafının doğal açısal frekansın karesi; ω^{2}'ye eşit olmasıyla mümkündür. Böylece Denklem 2.8'deki kısmi türevsel denklemden, biri zamana bağlı q(t), diğeri de konuma bağlı Ø(x) için olan iki bayağı türevsel denklem elde edilir [26]:

$$\ddot{q}(t) + \omega^2 q = 0 \tag{2.9}$$

$$[EI(x)\emptyset"(x)]" - \omega^2 m(x)\emptyset(x) = 0 \tag{2.10}$$

Denklem 2.9 doğal frekansı ω olan tek serbestlik dereceli bir sistemin serbest titreşiminin hareket denklemiyle aynı biçimdedir. Denklem 2.10 daki I(x) ve m(x) ler sabit kesitli kirişler için I ve m ile ifade edilebilir. Böylelikle;

$$EI\emptyset^{IV}(x) - \omega^2 m\emptyset(x) = 0 \qquad \text{ya da} \qquad \emptyset^{IV}(x) - \beta^4\emptyset(x) = 0 \tag{2.11}$$

$$\beta^4 = \frac{\omega^2 m}{EI} \tag{2.12}$$

Denklem 2.11'in genel çözümü aşağıdaki gibi bulunur:

$$\emptyset(x) = C_1 sin\,\beta x + C_2 cos\beta x + C_3 sin\,h\beta x + C_4 cosh\beta x \tag{2.13}$$

Yukarıdaki çözümde, bilinmeyen katsayılar C_1, C_2, C_3 ve C_4 yanında özdeğer değişkeni β da yer alır. Tek açıklıklı kirişin her iki ucundaki toplam dört adet sınır koşulu kullanarak β ve dolayısıyla doğal frekans *w* bulunur. Ayrıca Denklem 2.13' den doğal mod da elde edilir [26].

Bir ucu hareketli, diğer ucu sabit olan basit bir mesnet için sınır koşullarından yola çıkarak Denklem 2.13'de verilen katsayılar bulunacaktır. Basit bir kiriş için x=0 ve x=L için öteleme ve eğilme momentleri sıfırdır. x=0 için:

$$u(0,t) = 0 \;\rightarrow\; \emptyset(0) = 0 \;\rightarrow\; C_2 + C_4 = 0 \tag{2.14}$$

$$M(0,t) = 0 \;\rightarrow\; EI\emptyset"(0) = 0 \;\rightarrow\; \beta^2(-C_2 + C_4) = 0 \tag{2.15}$$

Bu bağıntılardan C_2=C_4=0 elde edileceğinden, genel sonuç :

$$\emptyset(x) = C_1 sin\,\beta x + C_3 sin\,h\beta x \tag{2.16}$$

x=L için:

$$u(L,t) = 0 \;\rightarrow\; \emptyset(L) = 0 \;\rightarrow\; C_1 sin\,\beta L + C_3 sin\,h\beta L = 0 \tag{2.17}$$

$$M(L,t) = 0 \;\rightarrow\; EI\emptyset"(L) = 0 \;\rightarrow\; \beta^2(-C_1 sin\,\beta L + C_3 sin\,h\beta L) = 0 \tag{2.18}$$

Denklemler toplanınca C_3sinhβx değeri sıfıra eşit çıkmaktadır. Sinhβx değeri sıfır olmaz (yoksa w değeri sıfıra eşit olur ve hiç titreşim olmayan çözüm elde edilir), dolayısıyla C_3 katsayısının sıfır olması gerekmektedir. Böylece frekans denklemine ulaşılır [26] :

$$C_1 sin\,\beta L = 0 \tag{2.19}$$

C1=0 için Ø(x)=0 biçimindeki hiç titreşim olmayan çözüm elde edilir. Hareketli çözüm için sinβL = 0 olmalıdır. Böylece aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$\beta L = n \quad ; n = 1, 2, 3, \ldots \tag{2.20}$$

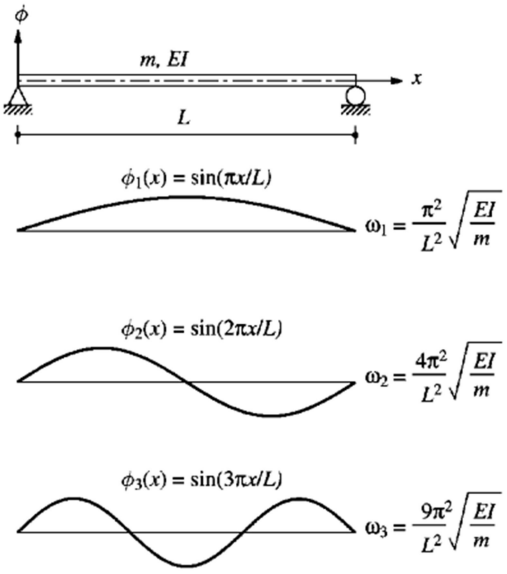
Böylece Denklem 2.11'den doğal titreşim frekansları bulunur :

$$\omega_n = \frac{n^2\pi^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{m}} \; ; n = 1, 2, 3, \ldots \tag{2.21}$$

w_n frekansına karşılık gelen titreşim modunu elde etmek için Denklem 2.20'yi Denklem 2.16 içinde kullanılacak olursa frekansa karşılık gelen titreşim modu elde edilir:

$$\emptyset_n(x) = C_1 sin\ \frac{n\pi x}{L} \tag{2.22}$$

C1, sıfırdan farklı herhangi bir değer olarak alınabilir. C1=1 olduğunda $\emptyset_n(x)$ modunun genliği 1 olur. Basit mesnetli sabit kesitli bir mesnet için ilk 3 doğal titreşim modu ve frekansı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Basit mesnetli sabit kesitli kiriş için ilk 3 doğal titreşim modu ve frekansları [33]

Denklem 1.1'te ilk eğilme frekansı için verilen frekans formülü doğal açısal frekansın 2π'ye bölünmesiyle elde edilmiştir:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{\pi}{2L^2}\sqrt{\frac{EI}{m}} \tag{2.23}$$

BÖLÜM 3

SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde değişken kesitli sürekli köprülerin analizinde yararlanılacak sonlu elemanlarla çözüm programı olan CSIBridge v.19 [27] programı tanıtılacak ve "Colquitz River" köprüsünün serbest titreşim analizi ile saha ölçümleri karşılaştırılarak modelin doğruluğu sorgulanacaktır.

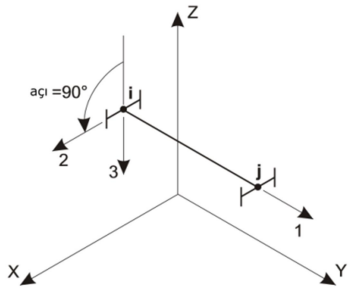
3.1 Kullanılan Yazılım ve sayısal model verifikasyonu

CSI Bridge programı, SAP2000, ETABS, SAFE ile birlikte Computers and Structures Inc.'in ürettiği model, analiz ve dizayn programlarından biridir. CSI Bridge'in kullanıcılara sunduğu referans kitapçığı [28] her ne kadar CSI Bridge için hazırlanmış olsa da SAP2000 ve Computers and Structures Inc'ın geliştirdiği diğer analiz programları için de geçerlidir [28].

Tez kapsamında, sayısal modeller oluşturulurken sonlu eleman tipleri olarak çerçeve çubuğu (eğilme ve eksenel kuvvet çubuğu) ile iki boyutlu yüzeysel elemanlar (alan elemanı)kullanılacaktır. Anılan yazılımda çubuk elemanlar "Frame Element-Çerçeve Eleman", alan elemanlar ise "Shell Element-Kabuk Eleman" olarak tanımlanmaktadır.

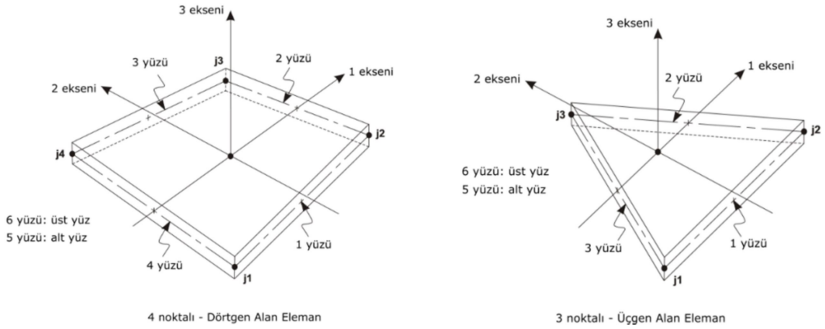
Frame elemanlar, kiriş, kolon, çapraz ve kafes elemanı yerine modellenebilen elemanlardır. Çift eksenli eğilme, burulma, eksenel şekil değiştirme ve çift eksenli kesme kuvvetini göz önüne alınarak çözüm yaparlar. Frame eleman, 2 noktayı birbirine bağlayan düz çubuklar olarak modellenirler ve yük, kesit tanımı gibi özellikler için herbirinin lokal koordinat sistemi vardır. Frame eleman için lokal koordinatlar

Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Çalışmada frame elemanlar diyafram kirişlerinin modellenmesinde kulanılmışlardır.



Şekil.3.1 ‘’I’’ keside sahip bir frame elemanına ilişkin lokal koordinat sistemi [28]

Alan elemanlar, membran, kabuk ve plak gibi yüzeysel taşıyıcıların modellenmesinde kullanılan iki boyutlu elemanlarıdır. Membran ve levha eğilmesini yansıtan formülasyonlarla işlem yaparlar. 3 veya 4 noktalı olarak modellenebilirler ve herbir Shell elemanının yük ve kesit özellikleri tanımı yapılmasını sağlayan, değiştirilebilir lokal koordinat sistemleri vardır. Shell elemanlar için lokal koordinat sistemi Şekil 3.2’de gösterilmişlerdir. Çalışmada “I” profile sahip çelik ana kirişler ve beton köprü tabliyesi modellenirken Shell elemanlardan yararlanılmıştır.

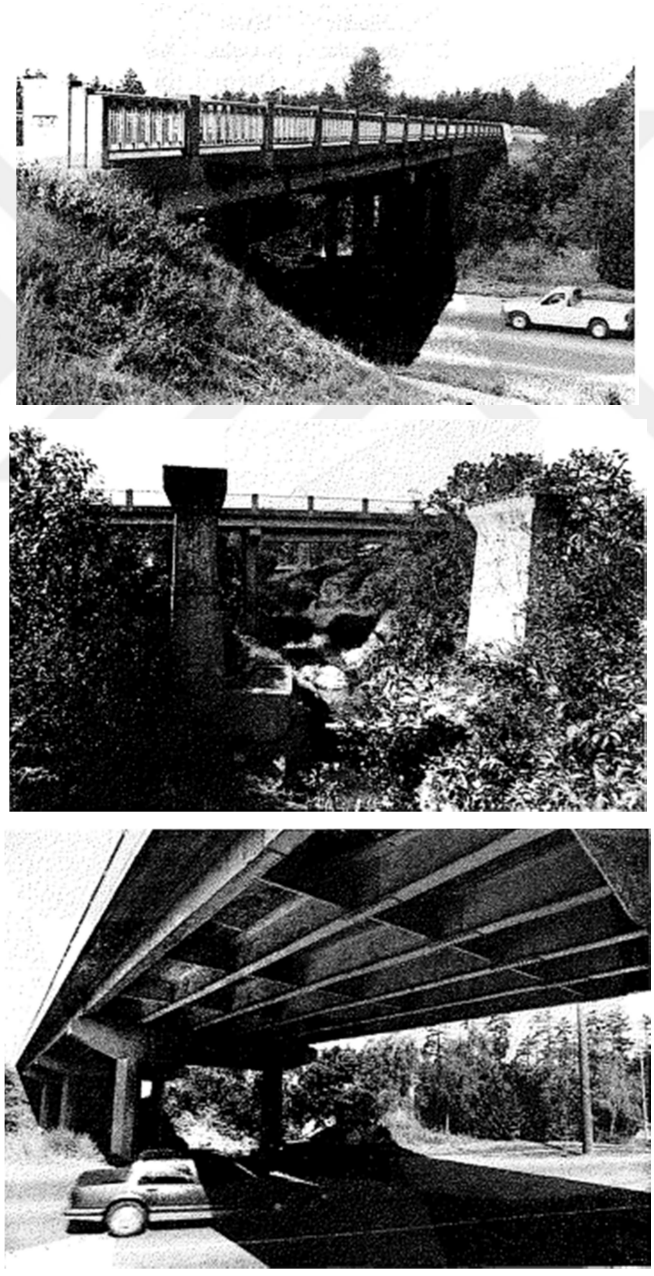


Şekil.3.2 Shell elemanlar için lokal koordinatlar

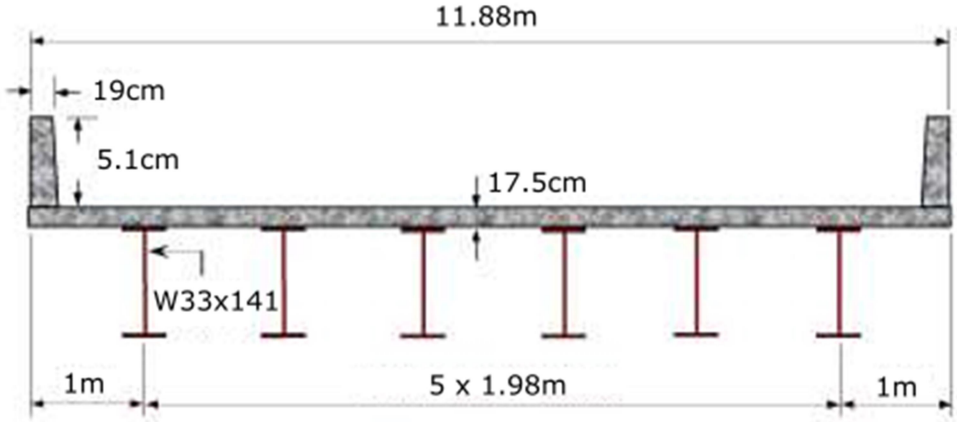
Önerilen Sayısal Modelin Verifikasyonu

Önerilen sayısal modelin doğruluğu, [7],[13] ve [14] kaynaklarından edinilen, Colquitz Nehri Köprüsü’ne (Şekil 3.3) ait deneysel doğal eğilme frekansları ile, sayısal model sonuçlarının karşılaştırılmasıyla sınanmıştır.

Köprüye ait geometrik büyüklükler ile malzeme karakteristiklerinin belirlenmesinde [7],[13] ve [14] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır. Taşıyıcı sistemi, 6 adet sabit kesitli sürekli devam eden W33x141 ebatındaki çelik kirişler ve kalınlığı ortalama 0.175 m olan beton tabliyeden meydana gelmektedir. 5 açıklığa sabit köprünün hesap açıklıkları sırasıyla 14 m., 18 m., 18.3 m., 18 m. ve 14 m.'dir. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi beton tabliye yaklaşık 12m genişliğinde ve herbir çelik kiriş arası yaklaşık 2 m.'dir. Herbir mesnet hizasında ve açıklık içersinde 3'er tane olmak üzere MC18x42.7 profilinde diyafram kirişleri mevcuttur.



Şekil.3.3 Colquitz River köprüsü görüntüleri [7]



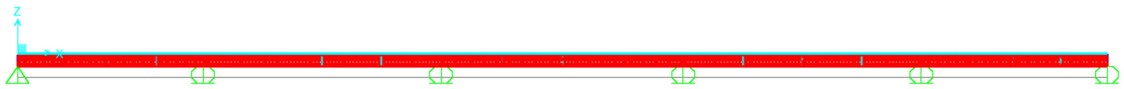
Şekil.3.4 Colquitz River köprüsüne ait enkesit [14]

Sayısal modellerde köprü ayakları modellenmemiş, bunun yerine köprü başlangıç noktasında 3 eksende yatay hareketi engelleyen sabit mesnetler, diğer köprü ayaklarının bulunduğu noktalarda ise köprünün kısa doğrultusunda ve düşey yer değiştirmeyi önleyen fakat uzun doğrultuda şekil değişimine izin veren kayıcı mesnet tipleri kullanılmıştır [14]. Ayrıca mesnetler Shell eleman olarak modellenen "I" tipi kirişlerin alt başlığında tanımlanmıştır.

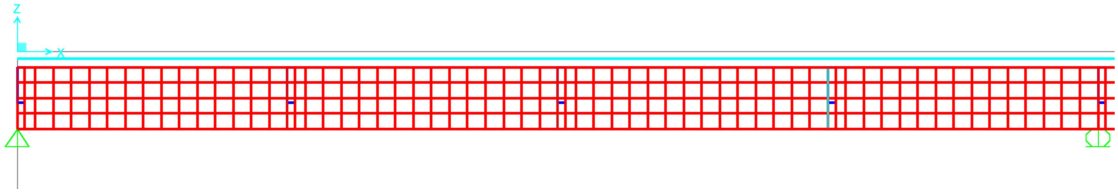
Diyafram elemanlar Shell eleman (alan elemanı) olarak modellenmiştir. Kiriş üst ve alt başlığı ile beton tabliyedeki alan elemanlarına program içerisinde kaçıklık (offset) verilerek modelin gerçek davranışa yakınsaması sağlanmıştır.

Taşıyıcı sistem olarak kompozit "I" tipi kirişler kullanılmıştır. AASHTO şartnameleri beton tabliye ile çelik profilin tam olarak kompozit davranışı yansıtmasını istemektedir [13]. Shell eleman olarak modellenen beton tabliye ve çelik "I" tipi kirişler, çelik "I" kirişin üst başlığının ortasındaki noktalar ile beton tabliye alt noktaları üst üste gelecek şekilde "rigid body-rijit cisim" yardımıyla bağlanmışlardır. Böylece beraber çalışmaları sağlanmıştır. Köprünün uzun doğrultusunda 0.25m arayla atanan rijit cisim, tasarımdaki "stud" çivilerini modellemek için kullanılmışlardır.

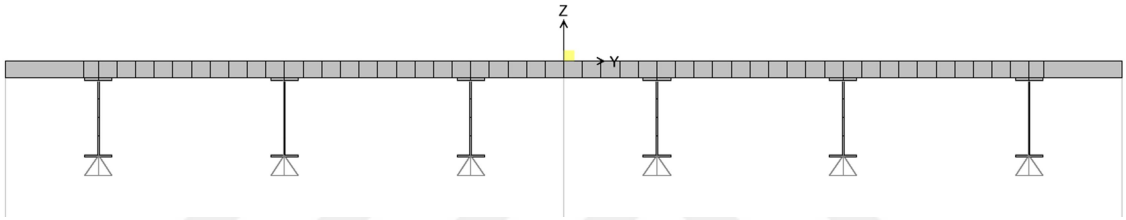
Tüm köprü ana kirişlerini oluşturan alan elemanlar köprünün uzun doğrultusu boyunca Şekil 3.5b'de gösterildiği gibi dikey olarak 0.25m aralıklarla bölünürken, yatay bölme işlemi de 0.2m aralıklarla yapılmıştır. Bahsedilen bölme işlemi beton tabliyesini oluşturan alan elemanlarda da kullanılmıştır. Böylece tüm köprü modeli yaklaşık olarak 1:1 oranlarda bölünen alan elemanlardan meydana getirilmiştir.



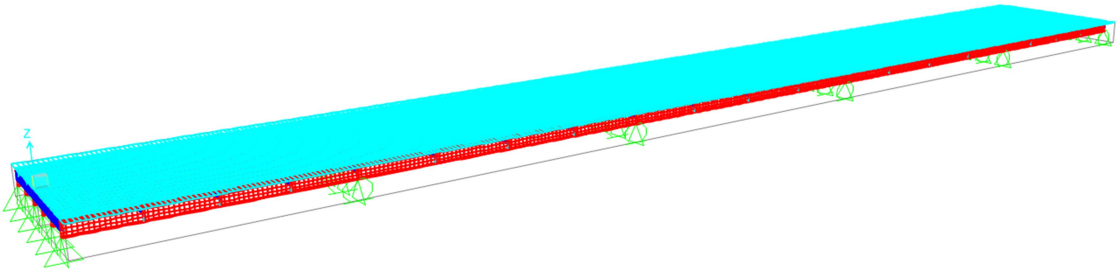
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil.3.5 Sayısal model a) boykesit b) enkesit c) 3 boyutlu

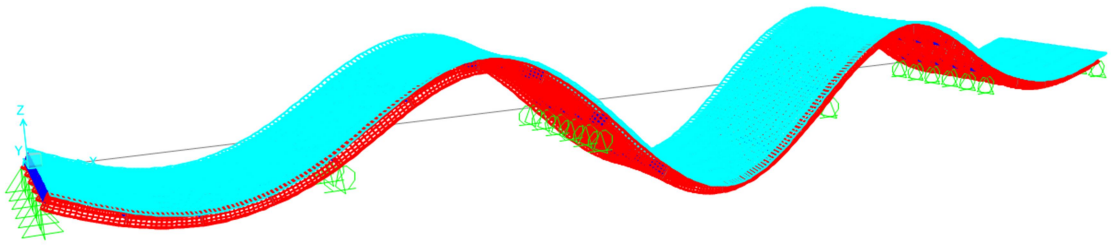
Kesitte görülen parapetler CSIBridge analiz programında modellenmemişlerdir. Parapetin dinamik etkiye olan etkisi üzerine yapılan çalışmalarda, parapetli ve parapetsiz modeller arasında ilk mod için %4.8'lik, ikinci mod için %2.6 ve üçüncü mod için %1.3 lük farkların oluştuğu gözlemlenmiştir [13]. Ayrıca [14] de belirtildiği üzere

parapetsiz modelde köprü dinamik özelliklerinin deneysel çalışmalarla karşılaştırıldığında daha ideal sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

AASHTO LRFD standart eki, Bölüm 4'te verilen serbest titreşimin formülündeki kütle, köprünün/yapının arttırılmamış ölü ağırlığının yer çekimi ivmesine bölünmesi ile ifade edilmektedir. Japon karayolu şartnamesi [29], verdiği serbest titreşim formülünde köprü üst yapısının ağırlığını kullanmaktadır. Benzer şekilde [30] no.lu referansta verilen tasarım örneklerinde köprü serbest titreşim hesaplarında da köprü ölü ağırlığı kullanılmaktadır. Dinamik karakteristikte etkin rol oynayan kütle kabulünde köprünün ölü ağırlığı dikkate alınmıştır.

Sayısal modelde beton için elastisite modülü 26.5 GPa, kayma modülü 11.1 GPa, çelik elemanlar için elastisite modülü 210 GPa, kayma modülü 80.8 GPa'dır [7].

Modelin doğruluğunun sorgulanmasında daha önce belirtilen [7]'deki deneysel verilerden yararlanılmıştır. Köprünün ilk eğilme frekansının 5.88 Hz olduğu görülmüştür. CSIBridge yazılımı ile gerçekleştirilen analizler sonucunda köprü ilk eğilme frekansı Şekil 3.6 da görüldüğü gibi, 6.08 Hz olarak bulunmuştur. İlk eğilme frekansındaki fark %3.3 tür.



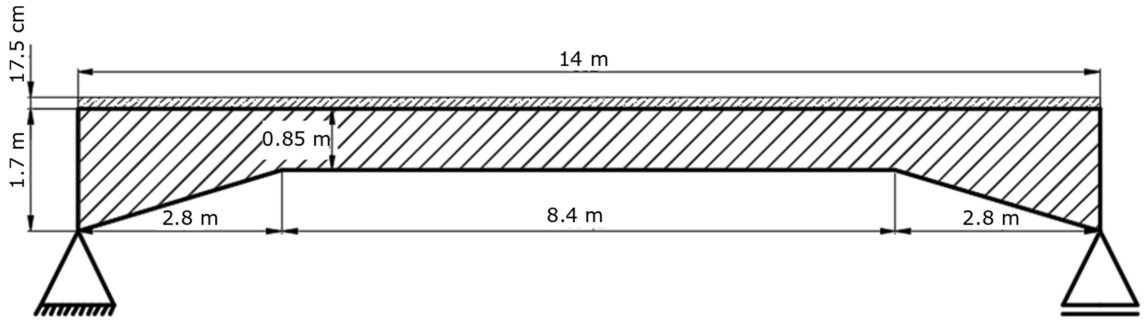
Şekil 3.6 İlk eğilme modu (6.08 Hz)

3.2 Değişken Kesitli Köprü Modeli

Değişken kesitli kompozit köprü modelini daha iyi anlamak ve alan elemanların dikey ve düşey doğrultuda daha küçük elemanlara bölünmesi için kullanılacak yöntemin irdelenmesi için basitleştirilmiş tek açıklıklı değişken kesitli kompozit köprü

modellemesi ile başlanmıştır. Modellenecek tek açıklıklı kompozit köprü için, Colquitz Nehri köprüsünün ilk açıklığı esas alınmıştır. Açıklık boyutunu sabit almak kaydı ile çözüm süresinin düşmesi ve daha az bilinmeyenli bir model ile çalışmak gibi avantajlar göz önünde bulundurularak, irdelemede sadece tek açıklık kullanılmıştır.

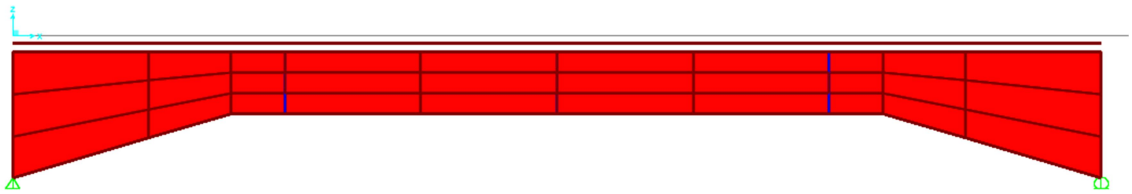
İrdelemede kullanılan ana kiriş kesidi, Colquitz Nehri köprüsündeki ile aynı olarak W33x141 I-profilinde modellenmiştir. Kullanılan tek açıklıklı köprü modeline ait boykesit Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



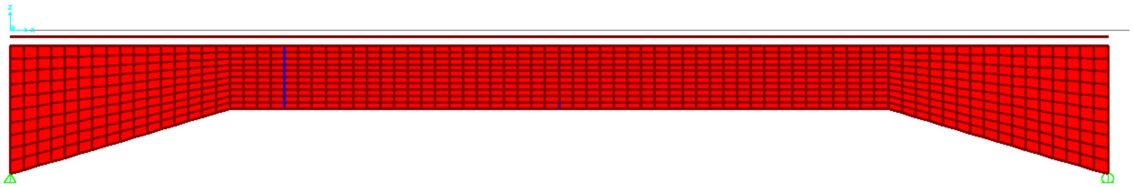
Şekil.3.7 İrdelemede kullanılan köprü boykesidi

Alan elemanların daha küçük elemanlara ayrılmasının, yapının doğal frekansı üzerindeki değişikliğini görmek için 2 farklı modelleme yapılmıştır. Modelde tek açıklıklı köprü kiriş elemanları, ilk olarak programın otomatik olarak böldüğü alan elemanların oluşturduğu köprü modeli (Şekil 3.8a) ile daha sonra elle bölünen alan elemanların oluşturduğu köprü modelinin (Şekil 3.8b) doğal frekansları karşılaştırılmıştır. Köprü ayakları modellenmemiş, bunun yerine bir uçta köprü uzun ve kısa doğrultusunda yer değiştirmeyi engelleyen sabit mesnetler kullanılırken diğer uçta kısa doğrultuda yer değiştirmeyi engelleyen fakat uzun doğrultuda yer değiştirmeyi izin veren hareketli mesnetler kullanılmıştır.

Elle bölme işleminde, tüm köprü ana kirişlerini ve tabliyeyi oluşturan alan elemanlar köprünün uzun doğrultusu boyunca dikey olarak 0.25m aralıklarla bölünürken, yatay bölme işlemi kesidin sabit kaldığı bölgeler için 0.08m aralıklarla yapılmıştır. Çelik ana kirişlerin derinliğinin değiştiği mesnet bölgelerinde 0.08m aralığı kesidin derinliğine göre artmaktadır. Böylece kesidin sabit kaldığı köprü açıklığında oran 1:3 iken, değişken kesit derinliğinde bu oran 1:1 şeklinde olmuştur.



(a)



(b)

Şekil.3.8 Tek açıklıklı köprü modeli a) otomatik bölme işlemi b) elle bölme işlemi

Otomatik bölme işlemi ile elle bölme işlemi gerçekleştirilmiş iki model arasındaki doğal frekans farkı %2 olarak gözlemlenmiştir. Tez kapsamında sürekli köprü modellerinden yararlanılacağı ve değişken kesit yüksekliğinin birçok modelde değişeceği göz önünde bulundurularak, tez kapsamındaki tüm modellerde elle bölme işlemi yapılmıştır.

Buna göre tez boyunca tüm ana kiriş ve beton tabliye alan elemanları, kesidin sabit olduğu bölgelerde 1:3 oranında bölünürken; kesidin değişkenlik gösterdiği bölgelerde 1:1 oranında bölünmüşlerdir.

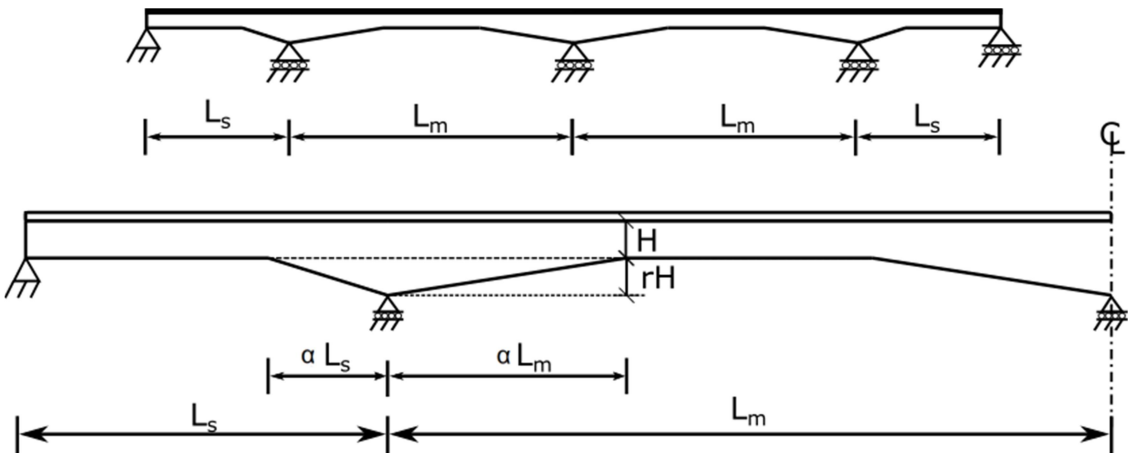
BÖLÜM 4

YÖNTEM VE PARAMETRELER

Bu bölümde, değişken kesitli köprülerin ilk doğal eğilme frekansını ifade edecek olan ampirik formülün türetilmesinde kullanılan yöntem ve çalışmanın odaklandığı değişken kesitli köprülerin geometrik parametreleri açıklanmıştır. İlk olarak köprü açıklık sayısı ve uzunlukları belirlenecek; bu belirlemeden yola çıkarak köprü enkesidi ve diyafram kiriş elemanları gibi boyutlar şartnamelerin, kitapların ve literatürdeki çalışmaların ışığında önerilen minimum ve/veya maksimum sınırlara göre belirlenecektir. Son olarak doğrusal olmayan regresyon analizinde kullanılacak analiz sayısı ile değişkenler açıklanacaktır.

4.1 Kullanılan Parametreler ve Değişken Kesitli Köprü Özellikleri

Araştırmanın konusu olan doğrusal değişken kesitli köprüler için Şekil 4.1'de gösterilen şematik şekilden yararlanılacaktır. Şekil 4.1'de gösterilen "L_s" kenar açıklık uzunluğunu, "L_m" orta açıklık uzunluğunu göstermektedir. "H" değeri açıklık ortasındaki kesit derinliğini, "r" ve "α" değerleri sırasıyla mesnet üstündeki değişken kesit derinliğinin kiriş ortasındaki "H" sabit kesit derinliğine ve değişken kesidin sahip olduğu uzunluğun açıklığa oranıdır. Örnek olarak hesap açıklıkları sırasıyla 15m-30m-30m-15m olan 4 açıklıklı değişken kesitli bir köprü için; L_s=15 m ve L_m=30 m'dir. Açıklık ortasındaki kiriş derinliğini 2.7 m olarak kabul edersek ve "r" ile "α" değerlerinin sırasıyla 1 ve 0.33 değerlerine eşit olduğu bir sürekli köprü örneğinde; mesnet üzerindeki toplam değişken kesit derinliği (H+rH) 5.4 m, kenar açıklıklarda değişken kesidin uzunluğu (α L_s) 4.95 m, orta açıklıklarda değişken kesit uzunluğu (α L_m) 9.9 m'dir.



Şekil 4.1 Değişken kesitli sürekli köprülere ait genel geometri ve parametreler

Çalışmanın tamamında kenar açıklıklar (L_s), orta açıklıklara (L_m) eşit ve/veya L_m uzunluğundan küçük değerde seçilmişlerdir. Seçilen kenar uzunluğun, orta açıklık uzunluğuna oranı (L_s/L_m) "ɣ" olarak adlandırılmıştır.

Literatür araştırması ve türetilen formüller, açıklık sayısı (n), maksimum açıklığın uzunluğu (L_{max}), kompozit kesidin atalet momenti (I_c), kenar açıklıkların orta açıklığa oranı (ɣ), "r" ve "α" oranlarının değişken kesitli sürekli köprülerin dinamik özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir.

Köprü açıklıklarının ve değişken kesitli köprüler için boykesit düzenlemesi

Köprü açıklıklarının belirlenmesinde sürekli köprüler için uygulanan hesap açıklıklarından yararlanılmıştır. Çizelge 4.1'de değişken kesitli ve sabit kesitli kirişlerden oluşan sürekli köprüler gösterilmiştir. Örnek olarak 4 açıklığa sahip *Tennessee* köprüsünün hesap açıklıkları sırasıyla 21 m- 27 m- 27 m- 21 m dir.

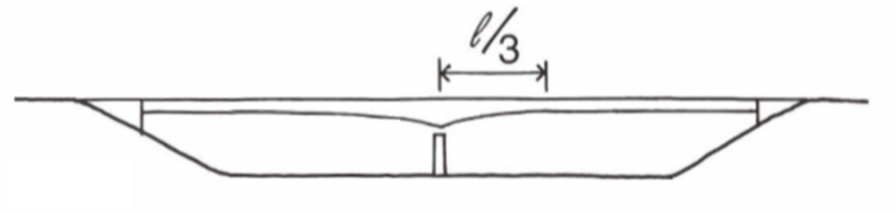
Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi uygulamadaki çoğu köprüde kenar açıklıklar L_s ve orta açıklıklar L_m kendi içersinde aynı uzunluğa sahip olarak tasarlanmışlardır. L_s uzunlukları, L_m uzunluklarından daha kısa ya da L_m uzunluğuna eşittir. Verilen köprü açıklıkları geniş bir skalada olmasına rağmen çalışmada göz önüne alınan açıklıklar 15 m, 30 m, 45 m, 60 m, 75 m ve 90 m olarak seçilmiştir.

Köprü modelleri, bahsi geçen hesap açıklıkları kullanılarak ɣ = 0.25'ten 1'e kadar geniş bir ölçekte analiz edilmişlerdir. Çalışmada 2, 3, 4, 5 ve 6 açıklıklı köprüler kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 Sürekli köprü örnekleri

Adet	Köprü İsimleri	Hesap açıklıkları [m]	Açıklık Sayıları
1	Highway 138, Portneuf	16.7-39.6-16.7	3
2	The Willis River Bridge	12.2x3	3
3	Route 220 over James River	55-82-55	3
4	Red Deer River Bridge	30.9-38.7-30.9	3
5	Route 265 over Dan River	37x4	4
6	Tennessee Bridge	21-27x2-21	4
7	Qigan Nen River West Bridge	75-125x2-75	4
8	Yilan Songhua River Bridge	94.6-160x3-94.6	5
9	Colquitz River Bridge	14-18x3-14	5
10	Skorsky Bridge	110x5	5
11	Qitai Nen River Bridge	85-128x3-85	5
12	Qiannen Nen River Bridge	40-70x3-40	5
13	Connecticut River Bridge	36.5x2-52x2-36.5x2	6
14	Qifu Nen River Bridge	41-65x6-41	8
15	Fusui Songhua River Bridge	85-150x6-85	8

Uygulamada açıklık içinde devam eden doğrusal değişen değişken kesit uzunluğu αL_s ve αL_m değişiklik gösterebilir. Fakat estetik açıdan ve uygulamada daha çok değişken kesit uzunluğu, devam eden açıklığın 3'te 1'i (α=0.33) olarak seçilmektedir[31]. Şekil 4.2'de "ℓ" ile açıklık uzunluğu gösterilmektedir.

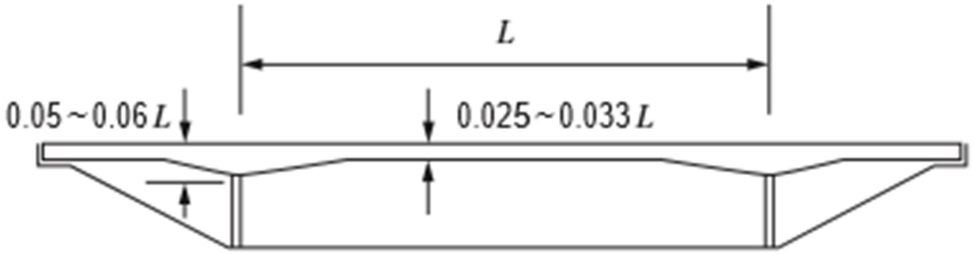


Şekil 4.2 Doğrusal değişen değişken kesit uzunluğu [31]

Yapılan çalışmada geniş bir aralığı tarayabilmek ve değişken α değerlerinin de formülasyonda dikkate alınması adına "α" değerleri, 0.1, 0.2, 0.3, 0.33, 0.4 ve 0.5 olarak seçilmiştir.

Çelik kiriş derinliği belirlenirken AASHTO LRFD [20][21] ve [25] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır. AASHTO LRFD, Tablo 2.5.2.6.3-1'de minimum çelik kiriş derinlik oranı, sürekli köprüler için 0.027L, beton tabliye ve çelik kirişin toplam derinliğinin minimum değeri ise 0.032L olarak verilmiştir.

Değişken kesitli çelik I-profil tipi kirişler için, kiriş derinliğinin açıklığa oranı genellikle mesnet üstünde ve açıklıkta sırasıyla 0.05-0.06 ile 0.025-0.033 olarak seçilmektedirler [24]. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde açıklık ortasındaki I-profil tipi çelik kiriş derinliği (H), maksimum açıklığın 0.03 katı olarak seçilmiştir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi "r" oranı 0.5 ile 1.5 arasında değişmektedir. Genellikle mesnet üstündeki kiriş derinliği, orta açıklıkta kesit derinliğinin 2 katı ile 0.75 katı arasındadır [22].



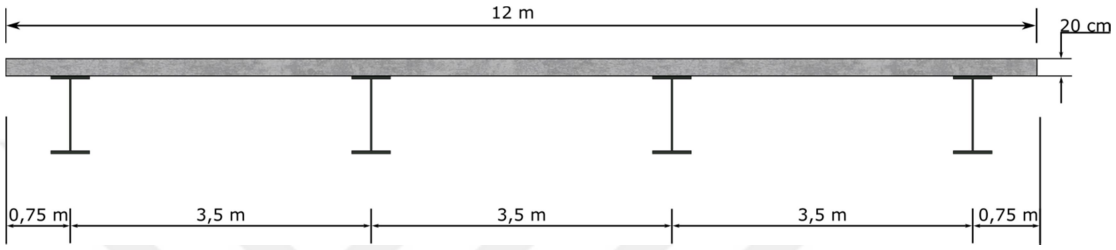
Şekil 4.3 Değişken kesitli köprüler için derinliğin açıklığa oranı [25]

Değişken kesitli betonarme köprü kullanılarak yapılan çalışmada [16], "r" oranının 0.83 ile 1.86 arasında değiştiği görülmektedir. "r" oranı ile doğal eğilme frekansı arasındaki ilişkiyi daha iyi yorumlamak için bu çalışma kapsamında "r" oranı, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ve 2 olarak göz önüne alınmıştır.

Bahsi geçen geometrik boyutlar detaylı olarak EK-A'da verilmiştir.

Enkesit özellikleri

Taşıyıcı sistem olarak kompozit "I" tipi kirişler kullanımıştır. AASHTO şartnameleri beton tabliye ile çelik profilin tam olarak kompozit davranışı yansıtmasını istemektedir [13]. Kullanılan I-profil kirişlerin tabliye betonuyla birlikte hareket etmesi daha önce de belirtildiği gibi "rijit cisim" kavramı kullanılarak sağlanmıştır. Açıklık ortasından alınan tipik köprü enkesidi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Açıklık ortasına ait tipik köprü enkesiti

Çalışmada kullanılacak olan çelik profil ebatları AASHTO LRFD [20] [21] ve kaynak [25]'te belirtilen sınır değerler gözetilerek tasarlanmıştır.

I-profil çelik kiriş gövdesi genellikle kesme mukavemetini sağlar. Aynı zamanda eğilme rijitliğine de katkıda bulunduğu için, gövde kalınlığı, [20] numaralı kaynakta belirtilen 6.10.2.1.2-1 sınır koşulunu sağlamalıdır;

$$D/t_w \leq 300 \tag{4.1}$$

Burada D, I-tipi çelik kirişin gövde yüksekliği, t_w ise gövde kalınlığıdır.

Yine aynı kaynakta (6.10.2.2-1; 6.10.2.2-2; 6.10.2.2-3 ve 6.10.2.2-4) başlıklardaki bölgesel burkulmayı önlemek için aşağıdaki sınır değerler verilmiştir:

$$b_f/2t_f \leq 12 \tag{4.2}$$

$$b_f \geq D/6 \tag{4.3}$$

$$t_f \geq 1.1t_w \tag{4.4}$$

$$0.1 \leq (\frac{I_{yc}}{I_{yt}}) \leq 10 \tag{4.5}$$

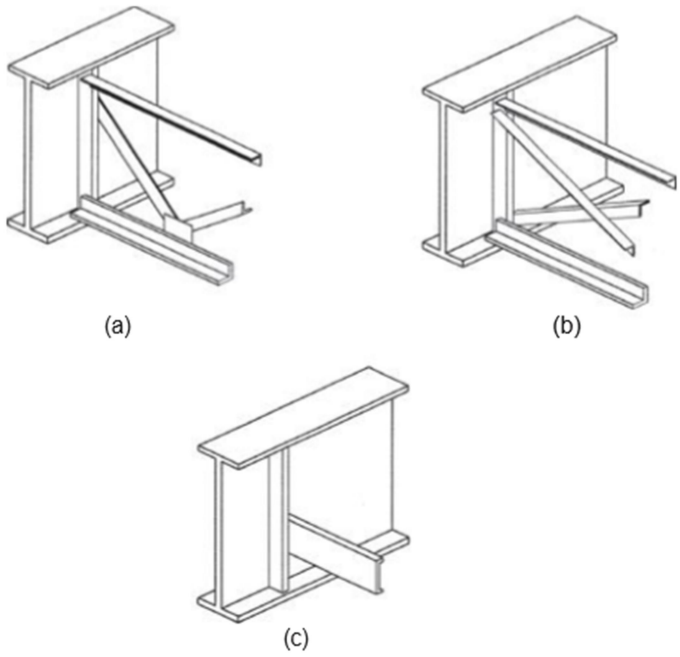
Burada b_f, t_f, I_{yc} ve I_{yt} ile sırasıyla başlık genişliği, başlık kalınlığı, kesitte basıncın meydana geldiği başlıktaki gövde düzlemine dik eksene göre tanımlı atalet momenti ve

kesitte çekmenin meydana geldiği başlıktaki gövde düzlemine dik eksene göre tanımlı atalet momentini ifade edilmektedir. Ayrıca doğrusal çelik kirişler için minimum başlık kalınlığı 19 mm, maksimum başlık kalınlığı ise 76 mm olmalıdır. Verilen sınır değerler kiriş başlığının gövde kaynağı sırasında aşırı şekil değiştirmesini önlediği gibi gövde burkulmasına karşı kirişi engeller [25].

Genel bir kural olarak, en ekonomik üst yapı dizaynı kiriş aralıklarını 3.35 m-4.27 m arasında seçerek ulaşılabilir. Hesap açıklığı ortalama 45 m'den daha küçük köprüler için 3m ile 3.65 m arasındaki kiriş aralıkları tercih edilmektedir. Hesap açıklığı 42.6 m'den daha büyük köprüler için bu değer 3.35 m ile 4.27 m arasında alınması tercih edilebilir. Metal tabliye panellerinin kullanılması halinde kirişler arasındaki mesafe 4.9 m ile sınırlanmıştır [25]. Çalışmadaki 149 köprü analizinde Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, 4 adet ana çelik kiriş kullanılmış ve çelik kiriş aralığı 3.5m olarak belirlenmiştir. 4 ana çelik kiriş kullanılması halinde 0.75 m genişliğinde, tabliyenin her iki yanında konsollar bırakılmıştır. 4 adet köprü analizinde taşıyıcı çelik kiriş aralıkları ve adetleri değiştirilerek köprü kesidinin, değişken kesitli sürekli köprülerin ilk eğilme doğal frekansları üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Kullanılan beton kalınlığı AASHTO LRFD [20]'te 9.7.7.1 böllümü içerisinde verilen minimum sınır (7 inch= 17.8cm) baz alınarak ve yine AASHTO LRFD [20] içerisindeki Tablo 2.5.2.6.3-1 deki sınıra değerler gözetilerek çalışmanın tamamında 20 cm olarak seçilmiştir. Tabliye genişliği örnek sayısal modeldeki 'Colquitz River' köprüsü ile aynı olacak şekilde 12 m olarak alınmıştır.

Şekil 4.5 genelde ''I'' tipi ana kirişlerde kullanılan diyafram kiriş ve çapraz diyafram elemanlarının şeklini göstermektedir. "V" ve "X" şeklindeki çapraz diyafram elemanlar genellikle üstte bir gergi elemanı kullanılarak Şekil 4.5'te gösterildiği gibi kullanılırlar. Kiriş ortasında kullanılan diyafram elemanları çelik kiriş basınç başlığının, montaj sırasında, beton tabliye elemanının yerleşimi ve bütün negatif moment oluşturabilecek kuvvetlere karşı yanal burulmalı burkulmasını önlemektedir. Mesnet noktalarında kullanılan diyafram elemanları rüzgar ve deprem gibi yatay kuvvetlerin mesnetlere iletimini sağlamaktadırlar [25].

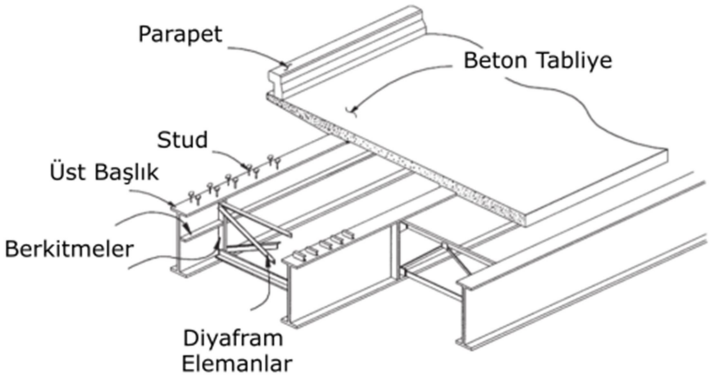


Şekil 4.5 a)V tipi diyafram; b)X tipi diyafram; c)Tekil kiriş diyafram

Çalışmada Şekil 4.5'deki "V" tipi diyafram elemanlar kullanılmıştır. Yine 'Colquitz River' köprüsünde kullanılan MC18x42.7 profiline yakın olacak şekilde, ülkemizde üretiminin olduğu UNP380 profil tipi kullanılmıştır.

Diyafram elemanları için AASHTO'da herhangi bir sınır değerden bahsedilmemiştir. Bunun yerine yapılacak tasarıma bağlı olarak gerektiği kadar aralıkta diyafram elemanları kullanılmaktadır. Ayrıca AASHTO Standard Design Specifications (2002) [19]'da keyfi olarak seçilmiş 7.6 m ye yer verilmiştir. Çalışmada yararlanılacak açıklık uzunlukları göz önüne alındığında ve bahsedilen değere yakınlığı açısından 7.5 m.'lik diyafram kiriş aralığı uygun görülmüştür. Böylece herbir mesnet hizasında da bir diyafram elemanı kullanımış ve hesap açıklıklarının tam bölünmesi sağlanmıştır.

Bahsi geçen kavramlar Şekil 4.6 'da ayrıntılı biçimde gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Kompozit I-kiriş köprü elemanları

Daha önce yapılan çalışmalarda [13][14], parapetin eğilme frekansı üzerine etkisinin ihmal edilebileceği gösterilmiştir. Parapetli ve parapetsiz olarak sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılan "Colquitz River" köprüsünde eğilme frekansındaki maksimum fark %4.8 olarak belirtilmiştir. Bu sebeple tüm modeller parapetsiz olarak dizayn edilmiştir.

Malzeme Seçimleri

Çalışma kapsamında kompozit olarak değerlendirilecek olan köprü modellerindeki çelik elemanlar ve beton için AASHTO LRFD [20],[25] ve T.C. Ulaştırma Bakanlığı; Demiryolları, Limanları, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğünün 'Köprü Tasarım Esasları' [32] şartnameleri ve kaynaklarından yararlanılmıştır.

[25]'e göre kullanılacak çelik sınıfları tablo 6.2.2.1-1'de gösterilmiştir. Uygun çelikler içerisinde S355 çelik sınıfı çalışma boyunca kullanılacaktır. Ayrıca [24]'te belirtildiği üzere, ASTM A 709 Grade 50 sınıfı çelik, her çeşit köprü elemanlarında genelde tercih edilen çelik sınıfıdır. Mekanik özellikleri incelendiğinde, bahsi geçen çelik sınıfının 345 MPa'lık akma ve 450 MPa'lık kopma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu açıdan seçilen çelik sınıfı olan S 355'in mekanik özelliklerine (355 MPa akma dayanımı ve 510 MPa'lık kopma dayanımı) çok yakın olduğu görülmektedir. Beton olarak C30 sınıfı beton kullanılmıştır. Kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

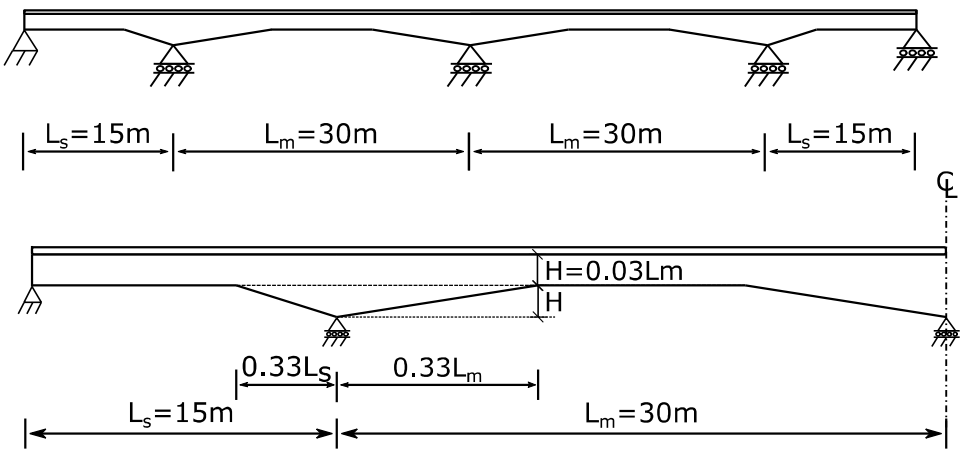
Çizelge 4.2 Değişken kesitli sürekli köprülere ait malzeme özellikleri

Elemanlar	Elastisite Modülü [GPa]	Kayma Modülü [GPa]	Minimum Akma/Kopma Dayanımları (F_y/F_u) [MPa]	Beton Basınç Dayanımı (F_c) [MPa]	Poisson Oranı	Kalınlık [m]
Beton Tabliye (Shell)	33	13.8	-	30	0.2	0.2
I-Profil Çelik Kirişler (Shell)	210	80.8	355/510	-	0.3	-
Diyafram Elemanları	210	80.8	355/510	-	0.3	-

Çalışmada, değişken kesitli çok açıklı sürekli köprülerin ilk eğilme frekansının tahminine çalışılan çalışmada, 153 adet geometrik özellikleri ve açıklık sayıları 2'den 6'ya değişen köprü analiz sonuçları, doğrusal olmayan regrasyon analizi ile değerlendirilerek bir formülasyon önerilmiştir. Bu bağlamda toplamda 153 değişken kesitli sürekli köprü için, AASHTO standartlarının ve kaynak kitapların sınırladığı/öngördüğü değerlerden yola çıkarak ön boyutlandırma hesapları yapılmıştır.

Modellerde köprü ayakları modellenmemiş, bunun yerine köprü başlangıç noktasında 3 eksende yatay hareketi engelleyen sabit mesnetler; diğer köprü ayaklarının bulunduğu noktalarda ise köprünün kısa doğrultusunda ve düşey yer değiştirmeyi önleyen fakat uzun doğrultuda şekil değişimine izin veren kayıcı mesnet tipleri kullanılmıştır. Tüm mesnet tipleri alan eleman olarak modellenen I-profil çelik köprü kirişlerinin alt başlığından sisteme bağlanmışlardır.

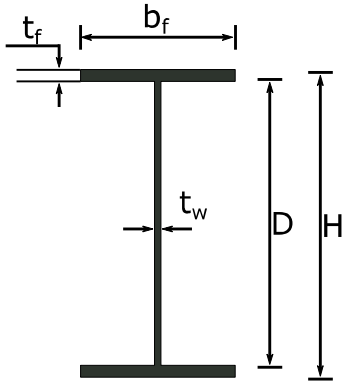
Örnek olarak 4 açıklıklı, maksimum açıklığı 30 m, α ve r oranları sırasıyla 0.33 ve 1 ve ɣ=0.5 değerleri için tasarımı yapılan değişken kesitli köprünün boy ve enkesit şekli ve hesap yöntemi verilmiştir;



Şekil 4.7 Örnek köprü boykesiti

Buna göre H=0.9 m, mesnet üstündeki değişken kesidin toplam derinliği (2H) 1.8 m bulunur. Kısa açıklıkta devam eden değişken kesit uzunluğu (0.33Ls) 4.95 m, uzun açıklık için benzer değer (0.33Lm) 9.9 m olarak bulunur. Bulunan değerler Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Köprü açıklık ortasından alınmış en kesit Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Tüm modellerde olduğu gibi diyafram elemanı olarak UNP380 profillerinden oluşan "V" şekli kullanılmıştır. Buna göre seçilen kesit değerleri daha önce verilen sınır şartları ile kesidin en derin olduğu mesnet bölgesi olan mesnet üstü için aşağıdaki şekilde kontrol edilmiştir;



Şekil 4.8 "I" tip profile ait boyut adlandırmaları

Çizelge 4.3 Örnek modelin kesit kontrolü

H	1800 mm
b_f	450 mm
t_w	18.5 mm
t_f	35 mm
D	1730 mm

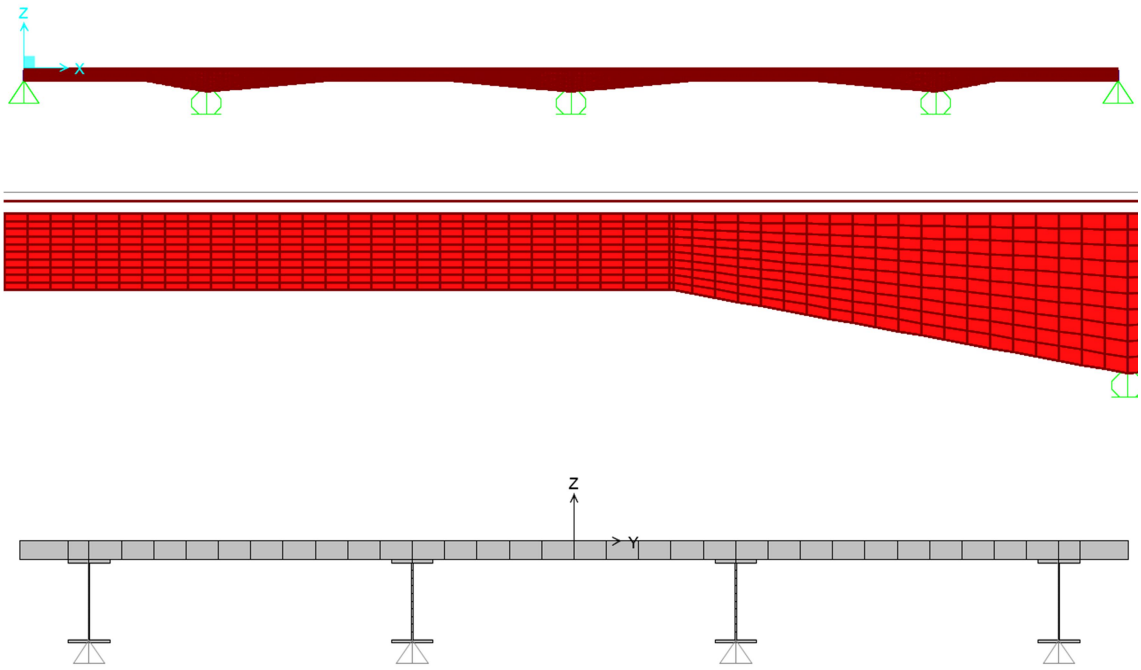
$b_f/2t_f \leq 12$	6.4	≤	12.0	Denklem 4.2
$b_f \geq (D/6)$	450.0	≥	288.3	Denklem 4.3
$t_f \geq 1{,}1t_w$	35.0	≥	20.4	Denklem 4.4
$D/t_w \leq 300$	93.5	≤	300.0	Denklem 4.1
$t_f \geq 19$mm	35	≥	19	
$t_f \leq 76$mm	35	≤	76	

Tanımlanan parametrelere göre her bir açıklığa bağlı olarak belirlenen kesitler EK-B de verilmiştir.

Tüm modellerde beton tabliye ve çelik ana kirişler alan eleman olarak modellenmişlerdir. Yine tüm modellerde alan elemanlar köprünün uzun doğrultusu boyunca dikey olarak 0.25m aralıklarla bölünürken, yatay bölme işlemi kesidin sabit kaldığı bölgelerde 0.08m aralıklarla yapılmıştır. Buna göre örnek modelde çelik ana kirişin sabit kesitte devam ettiği bölgelerde alan elemanlar Şekil 4.8'de görüldüğü gibi 10 adede bölünmüştür ((0.9m – 2x0.035m)/0.08m ≈ 10). Kesidin derinleştiği mesnet bölgelerinde derinlik örnek model için 1.8m ye kadar çıkmaktadır. Kesidin derinleştiği bölgelerde de yatay alan eleman bölme işlemi devam edeceği için, bu bölgelerde alan elemanın düşey kenar uzunluğu en fazla ((1.8m-2x0.035m)/10 ≈ 0.17m) 0.17m olmaktadır.

Sonuç olarak örnek modelde çelik ana kirişin sabit kesitte devam ettiği bölgelerde bölünmüş alan eleman ebatları 1:3 oranında olurken; kesidin derinleştiği mesnet bölgelerinde bölünmüş alan eleman ebatları yaklaşık 1:1 olmaktadır. Bahsedilen alan eleman bölme hesabı tüm modellere uygulanarak oranlar korunmaya çalışılmıştır.

Örnekte verilen değişken kesitli sürekli köprü modelinin CSIBridge sonlu elemanlar programıyla modellenmiş hali Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Örnek köprü modeline ait CSIBridge programından alınan enkesit ve boykesitler

4.2 Değişkenler

Bu kısımda, değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansının amprik formülünü verecek ifadeyi elde etmek için yapılan işlemlerden söz edilecektir.

Doğal eğilme frekansına etki eden ve modellenen köprülerde göz önünde bulundurulan parametreler aşağıdaki gibidir:

- "γ" Oranı
- "r" Oranı
- "α" Oranı
- L_{max} Uzunluğu
- Köprü Enkesidi
- Açıklık sayısı
- Mesnet koşulları

Basit kirişlerin ilk eğilme frekansını veren Denklem 1.1' e bakıldığında yapı elastisite modülü (E), kompozit kesidin eğilme düzlemine göre atalet momenti (I), yapı ağırlığı (w), ve açıklık uzunluğu (L) değerlerinin doğrudan formüle katılan ve eğilme frekansını etkileyen değerler olduğunu görmek mümkündür. 1. Bölümde verilen sürekli köprülerin eğilme frekansının tahmini üzerine yapılan çalışmalar göz önünde

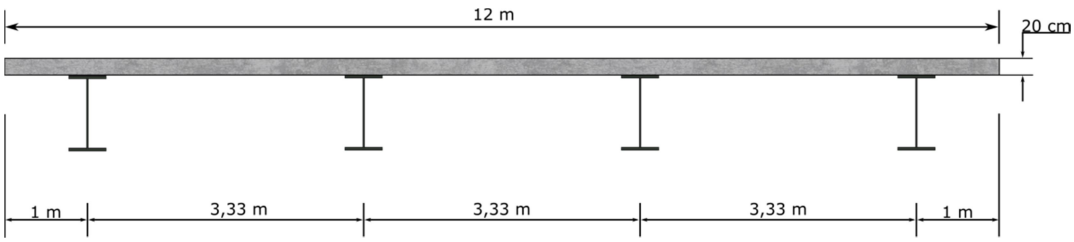
bulundurulduğunda komşu açıklığın orta açıklığa oranının da etkili olduğu görülmektedir [18]. Aynı şekilde açıklık sayısının da [13]'da etkisi görülmektedir.

Değişken kesitli köprüler göz önünde bulundurulduğunda "r" ve "α" oranlarının doğrudan kütle ve rijitlik üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

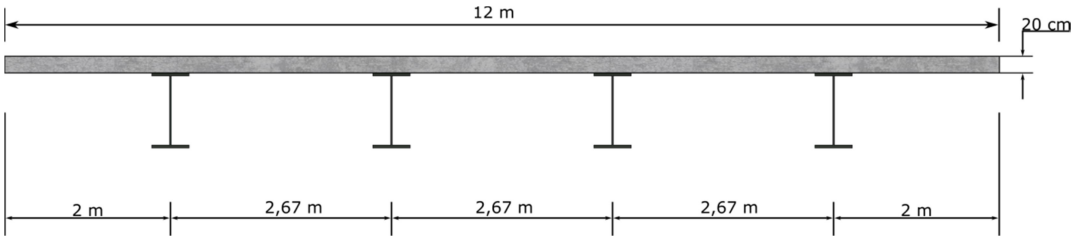
Kompozit köprü enkesitinin doğal eğilme frekansına etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.9'da gösterilen 5 farklı enkesit kullanılmıştır. Çelik enkesitler 5 farklı köprü için de aynıdır. Enkesit-3 ile gösterilen, köprü orta açıklığının ortasından alınan enkesit 150 model için aynen kullanılmıştır. Çelik ana kirişlerin enkesitleri açıklığa bağlı olarak değişse de, birbirlerine mesafe değeri olan 3.5 m korunmuştur.

Mesnet etkisini incelemek için ilk etapta köprü başlangıç noktasında 3 eksende yatay hareketi engelleyen sabit mesnetler, diğer köprü ayaklarının bulunduğu noktalarda ise köprünün kısa doğrultusunda ve düşey yer değiştirmeyi önleyen fakat uzun doğrultuda şekil değişimine izin veren kayıcı mesnet tipleri kullanılmıştır. İkinci olarak başlangıç ve bitiş noktalarında 3 eksende yatay hareketi engelleyen sabit mesnetler kullanılırken orta kısımlarda kayıcı mesnet tipleri kullanılarak herbir model ikişer defa çözülmüştür.

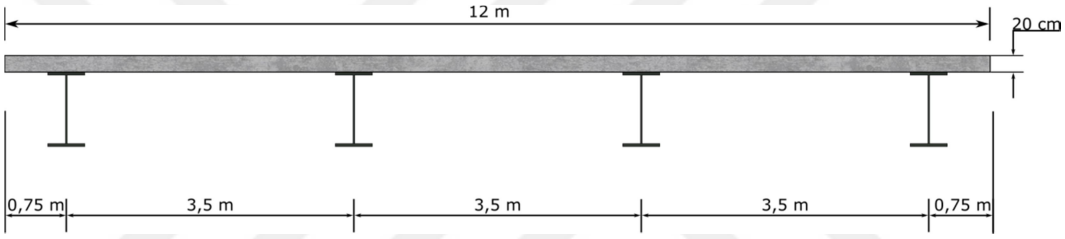
Sayısal analizlerde dikkate alınan 153 modelin değişkenleri Çizelge 4.3'te özet olarak gösterilmiştir.



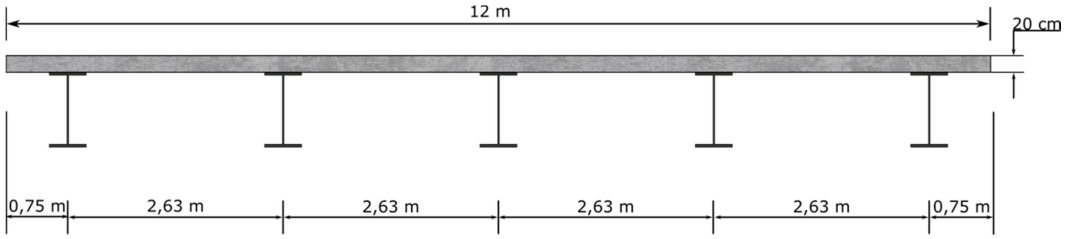
(a) Enkesit-1 (E-1)



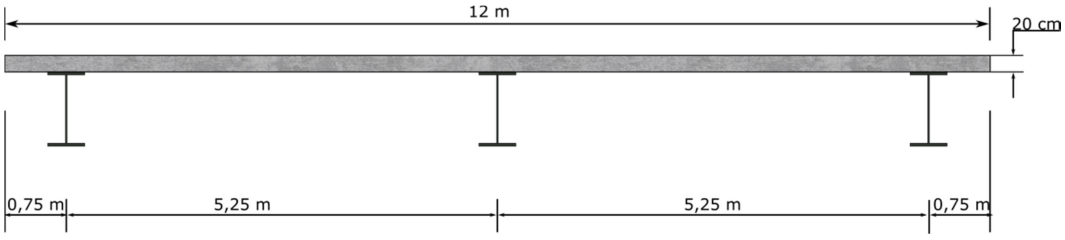
(b) Enkesit-2 (E-2)



(c) Enkesit-3 (E-3)



(d) Enkesit-4 (E-4)



(e) Enkesit-5 (E-5)

Şekil 4.10 Orta açıklıklardan alınan kompozit köprü enkesitleri

Çizelge 4.4 Gözönüne alınan değişkenler ve sayısal karşılıkları

Grup	Hesap açıklığı, L_m (m)	H/L_m Oranı	r Oranı	α Oranı	ɣ Oranı	Enkesit Tipi	Açıklık Sayısı
A	15, 30, 45, 60, 75, 90	0.03	1	0.33	-	E-3	Tek Açıklık
B	15, 30, 45, 60, 75, 90	0.03	1	0.33	1	E-3	2-Açıklık
C	30	0.03	0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0	0.1 0.2 0.3 0.33 0.4 0.5	0.5	E-3	4-Açıklık
D	15, 30, 45, 60, 75, 90	0.03	1	0.33	0.25 0.33 0.5 0.6 0.67 0.75 0.8 0.83 1	E-3	2-Açıklık 3-Açıklık 4-Açıklık 5-Açıklık 6-Açıklık
E	30	0.03	1	0.33	0.5	E-1, E-2, E-3, E-4, E-5	4-Açıklık

Buna göre:

A grubunda, Çizelge 4.3'te gösterilen oranlar kullanılarak tek açıklıklı; hesap açıklıkları 15 m'den 90 m'ye değişen 6 adet değişken kesitli köprü analiz edilmiştir.

B grubunda, değişken parametreleri verilen, 2 açıklıklı değişken kesitli köprüler iki açıklığı da eşit uzunluğa sahip olacak şekilde analiz edilmişlerdir. Bunun sonucunda da 6 adet değişken kesitli sürekli köprü analizi elde edilmiştir.

C grubunda "α" ve "r" oranlarının değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri 4 açıklıklı sürekli köprü kullanılarak incelenmiştir. Değişken kesitli köprü açıklıkları sırasıyla 15 m-30 m-30 m-15 m olan köprüden yararlanılmıştır. Böylelikle maksimum açıklık uzunluğu (L_{max}), ɣ oranı, açıklık sayısı, orta açıklıktan alınan enkesitin atalet momenti değeri gibi sürekli köprülerde ilk eğilme doğal frekansını doğrudan etkileyen etmenler sabit alınmıştır. "r" değeri 0.5'ten 2'ye kadar; "α" değerleri ise 0.1'den 0.5'e kadar geniş bir skalada göz önüne alınmıştır. Herbir "α" ve "r" değerleri diğer bütün değişkenler sabitken kullanılmışlardır. Örnek olarak r=0.5 ve diğer tüm parametreler sabitken "α" oranı 0.1'den 0.5'e kadar değiştirilerek kullanılmıştır. Bunun sonucunda 66 adet değişken kesitli sürekli köprünün serbest titreşim analizi yapılarak ilk doğal eğilme frekansları bulunmuştur.

D grubunda, Çizelge 4.3'te verilen parametreler kullanılarak "ɣ" oranının ve açıklık sayısının doğal eğilme frekansı üzerindeki etkileri görülmüştür.

E grubunda, 4 açıklıklı köprü modellemesi kullanılarak kompozit köprü enkesidinin ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 4.3'te verilen enkesit değerleri kullanılarak ve diğer tüm parametreler sabitken 5 adet değişken kesitli sürekli köprünün serbest titreşim analizi yapılmıştır.

Sonuç olarak toplamda 153 adet değişken kesitli sürekli köprü modeli kullanılan parametreleri ile EK-A'da detaylı olarak verilmiştir.

BÖLÜM 5

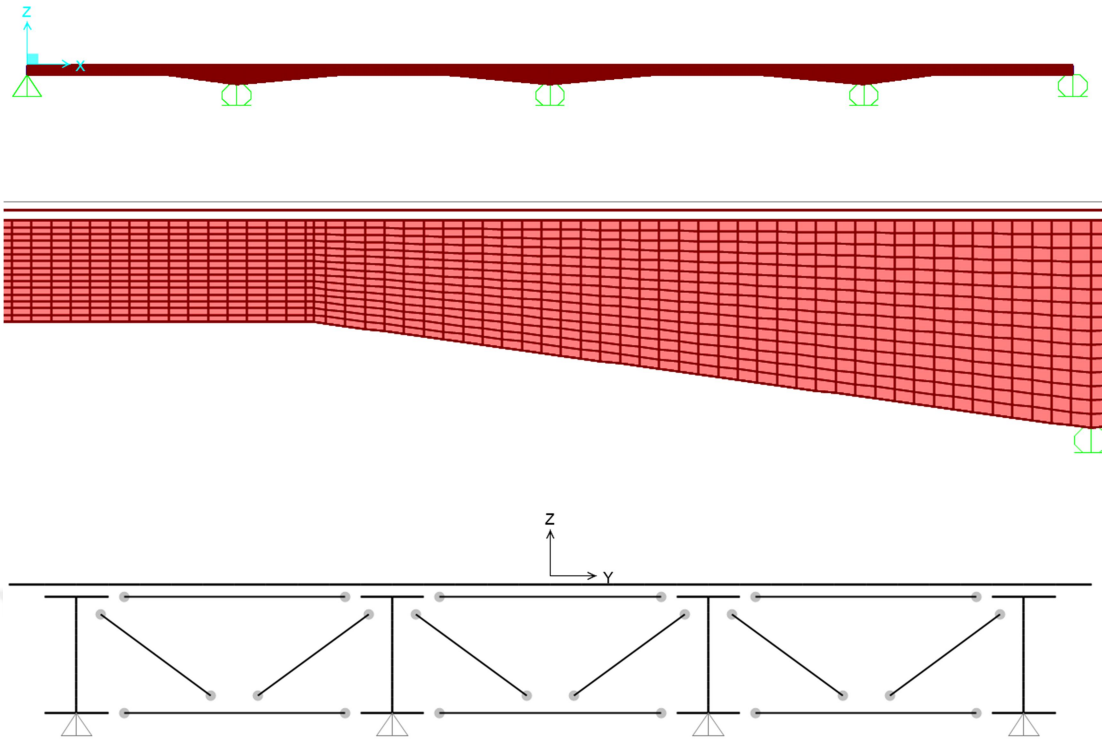
VERİ ANALİZİ

Bu bölümde değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansına etki eden etmenler ele alınacaktır. Analiz edilen 153 değişken kesitli sürekli köprüye ait veriler irdelenilerek, doğrusal olmayan regrasyon analizi ile bir araya getirilecek ve ilk doğal eğilme frekansını veren ifade araştırılacaktır.

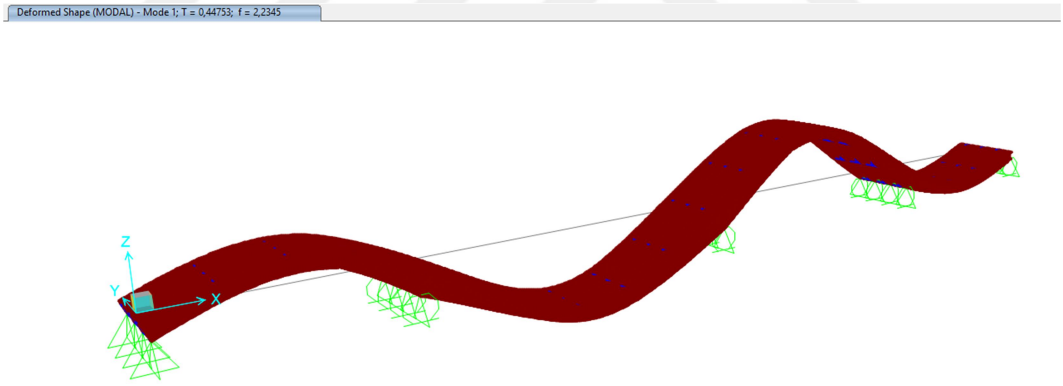
Çizelge 4.3 ve Bölüm 4'te bahsedilen temeller üzerine değişken kestli sürekli köprülerin serbest titreşim analizi yapılmıştır. 153 modele ait tüm tasarım ve analiz sonuçlarını tez kapsamında teker teker göstermek pratik olmadığı için örnek olarak EK-A'da verilen keyfi olarak seçilmiş, 71. Model üzerinde durulacaktır.

EK-A'da verilen 71. Model; hesap açıklıkları sırasıyla 30 m-45 m-45 m-30 m olan 4 açıklıklı, değişken kesitli sürekli bir köprüdür. "ɣ", "r" ve "α" oranları sırasıyla 0.5, 1 ve 0.33'tür. Şekil 4.9'da gösterilen Enkesit-3'te gösterilen mesafeler ve EK-A'da maksimum açıklık 45 m değeri için belirtilen I-profil çelik ana kiriş ölçüleri kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan köprüye ait CSIBridge programından alınan enkesit ve boykesitler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Analiz sonucunda 71. Model için; ağırlığı 13 118.5 kN, açıklık ortasındaki eğilme düzlemine göre atalet momenti 1.2571 m^4, ilk doğal eğilme frekansı 2.235 Hz olarak bulunmuştur. Serbest titreşim analiz sonucuna göre elde edilen ilk doğal eğilme modundaki hareketi Şekil 5.2'deki gibidir.



Şekil 5.1 CSIBridge programından alınan enkesit ve boykesitler



Şekil 5.2 CSIBridge programından elde edilen 1. doğal eğilme mod şekli

71. Model örneğinde gösterildiği gibi herbir değişken kesitli sürekli köprü için elde edilen ağırlık değerleri, açıklık ortasından alınan eğilme düzlemine göre atalet momentleri ve ilk doğal eğilme frekansları kaydedilerek EK-C ve EK-D'de verilmiştir.

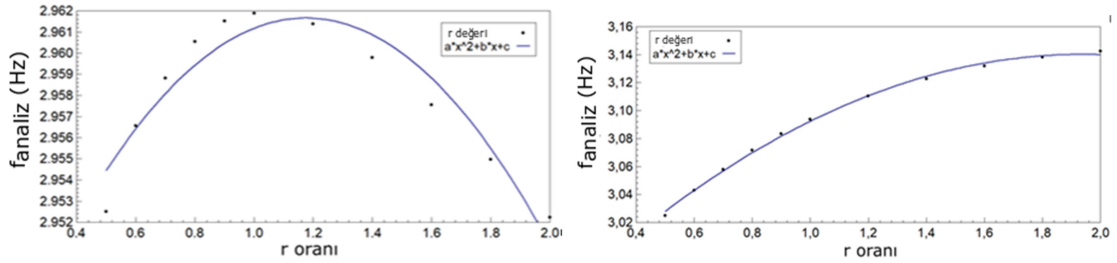
5.1 Serbest Titreşim Analizi Sonuçlarına Bağlı Olarak Değişkenlerin Doğal Frekans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Bu kısımda; maksimum açıklık uzunluğunun, enkesit düzenlemesinin, açıklık sayısının, "ɣ", "r" ve "α" oranlarının değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

r ve α Oranlarının Etkisi

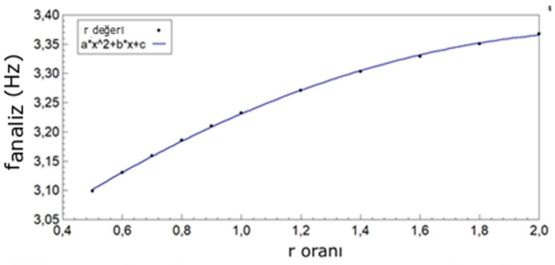
"r" ve "α" oranlarının ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisini incelemek için Çizelge 4.3'te verilen "C Grubu" verileri kullanılmıştır. İlk olarak sabit α değerleri altında değişen r değerleri ve sonra sabit r değerleri altında değişen α değerlerinin değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Şekil 5.3'te sabit α değerlerine karşılık değişen r değerinin serbest titreşim analizi ile elde edilen ilk doğal eğilme frekansları üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

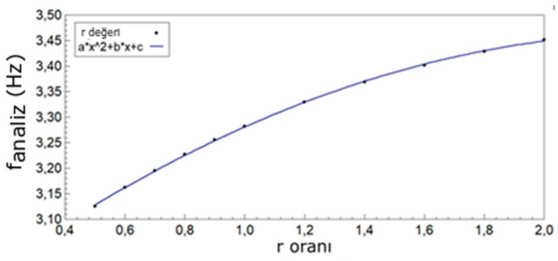


(a) α= 0.1

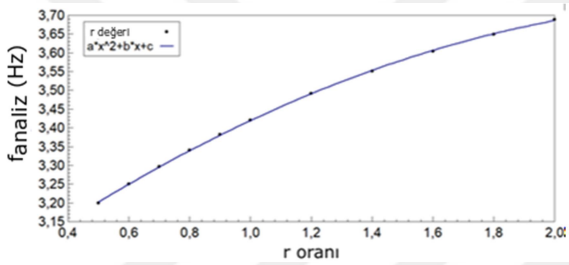
(b) α=0.2



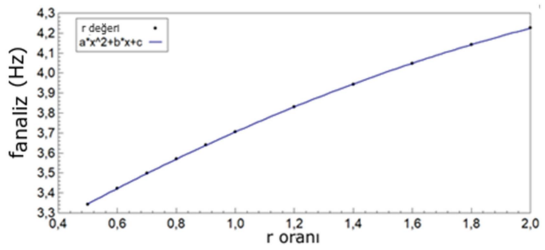
(c) α= 0.3



(d) α=0.33



(e) α= 0.4



(f) α=0.5

Şekil 5.3 Sabit "α" oranları için doğal frekans –" r" oranı eğrileri

Sabit "α " oranları için; "r" oranı artarken, değişken kesitli sürekli köprülerin de frekansının, doğrusal olmayan bir şekilde arttığı görülmektedir. Artış 2. dereceden bir eğriye yakınsamaktadır. Bahsi geçen artış Şekil 5.3.a'da r=1 değerine kadar geçerli iken, bu noktadan sonra frekansın yine doğrusal olmayan bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bunun temel sebebi kütle ile doğal eğilme frekansı arasındaki ilişkidir. α =0.1 için doğrusal değişen değişken kesit uzunluğu (α.L), çok dar bir aralıkta kalmaktadır. α =0.1 için r=1 değerinden sonra değişken kesit derinliği artarken rijitliğinde kütlesine oranla daha az bir artış olmuştur. Artan kütle ile birlikte doğal frekansta da bir düşme görülmektedir. Doğal eğilme frekansları arasındaki farklar Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Buna göre analiz edilen değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekanslarındaki en büyük değişim α=0.5 ve sırasıyla r=1 ve 1.2 arasındaki olmuştur.

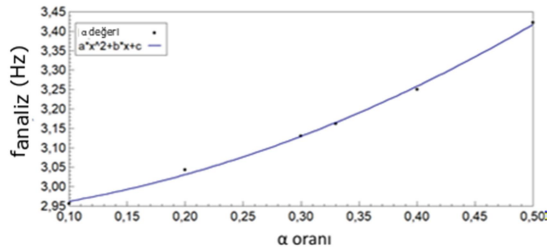
Çizelge 5.1 Sabit "α" oranları altında değişen "r" oranlarına göre doğal frekans farkları

No	r Oranı	α Oranı	Frekans Hz	D %*	No	r Oranı	α Oranı	Frekans Hz	D %*
1	0.5		2.953	**0.137**	34	0.5		3.125	1.178
2	0.6		2.957	0.076	35	0.6		3.162	1.058
3	0.7		2.959	0.05	36	0.7		3.195	0.981
4	0.8		2.96	0.041	37	0.8		3.227	0.895
5	0.9		2.962	0.012	38	0.9		3.256	0.816
6	1	0.1	2.962	0.033	39	1	0.33	3.282	**1.428**
7	1.2		2.961	0.038	40	1.2		3.329	1.184
8	1.4		2.96	0.075	41	1.4		3.369	0.979
9	1.6		2.958	0.087	42	1.6		3.402	0.806
10	1.8		2.955	0.093	43	1.8		3.429	0.661
11	2		2.952	-	44	2		3.452	-
12	0.5		3.025	**0.59**	45	0.5		3.199	1.58
13	0.6		3.043	0.497	46	0.6		3.25	1.44
14	0.7		3.058	0.445	47	0.7		3.297	1.344
15	0.8		3.072	0.386	48	0.8		3.341	1.24
16	0.9		3.083	0.334	49	0.9		3.382	1.145
17	1	0.2	3.094	0.539	50	1	0.4	3.421	**2.044**
18	1.2		3.11	0.398	51	1.2		3.491	1.74
19	1.4		3.123	0.288	52	1.4		3.552	1.481
20	1.6		3.132	0.202	53	1.6		3.604	1.258
21	1.8		3.138	0.135	54	1.8		3.65	1.067
22	2		3.142	-	55	2		3.689	-
23	0.5		3.099	1.028	56	0.5		3.343	2.372
24	0.6		3.13	0.916	57	0.6		3.422	2.202
25	0.7		3.159	0.844	58	0.7		3.498	2.078
26	0.8		3.186	0.765	59	0.8		3.57	1.948
27	0.9		3.21	0.692	60	0.9		3.64	1.827
28	1	0.3	3.232	**1.197**	61	1	0.5	3.706	**3.355**
29	1.2		3.271	0.977	62	1.2		3.831	2.961
30	1.4		3.303	0.795	63	1.4		3.944	2.617
31	1.6		3.329	0.643	64	1.6		4.047	2.316
32	1.8		3.351	0.516	65	1.8		4.141	2.051
33	2		3.368	-	66	2		4.226	-

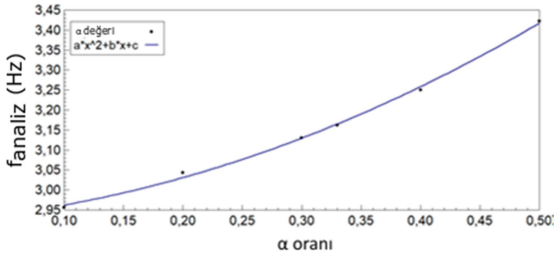
**r oranına bağlı olarak değişim; D % = [(f(xi+1)-f(xi))/ f(xi+1)]*100*

En büyük değişimler kalın rakamlarla gösterilmiştir.

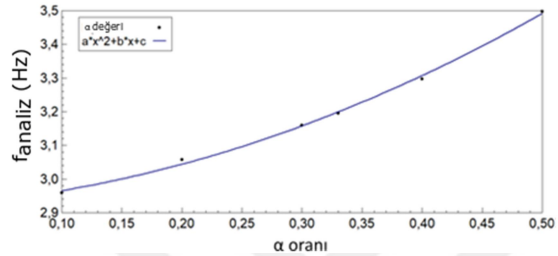
Şekil 5.4'te sabit r değerlerine karşılık değişen α değerinin serbest titreşim analizi ile elde edilen ilk doğal eğilme frekansları üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



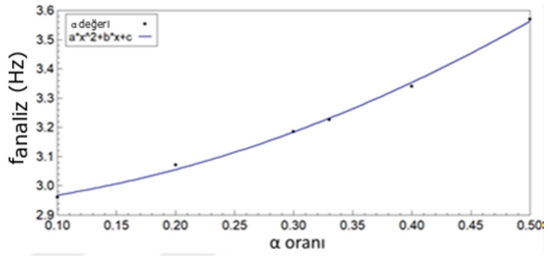
(a) r= 0.5



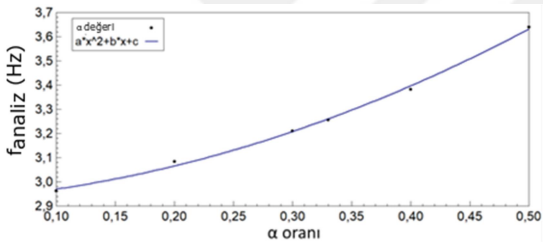
(b) r=0.6



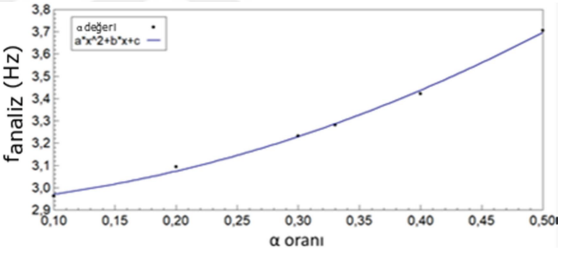
(c) r= 0.7



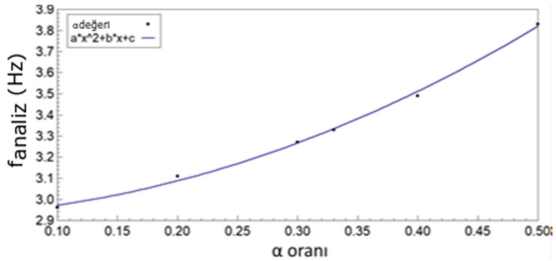
(d) r=0.8



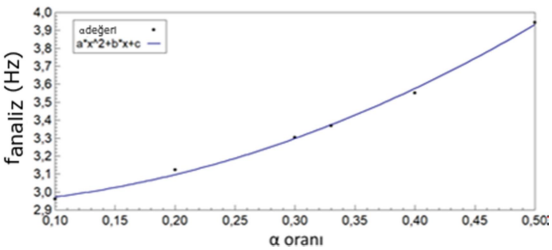
(e) r= 0.9



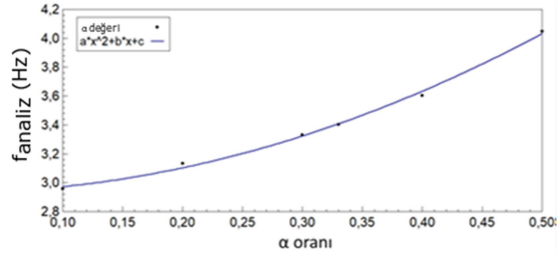
(f) r=1.0



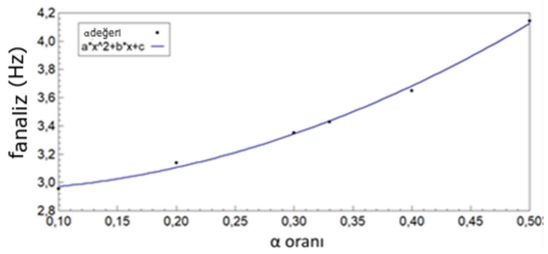
(g) r= 1.2



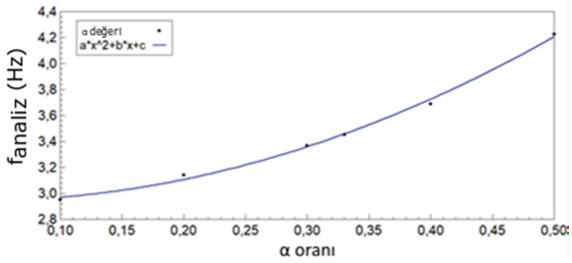
(h) r=1.4



(i) r= 1.6



(j) r=1.8



(k) r= 2.0

Şekil 5.4 Sabit “r” oranları için doğal frekans – “α” oranı eğrileri

Şekil 5.4’ten görüleceği gibi “r” ve diğer tüm değişkenler sabitken “α” oranının artmasıyla doğal eğilme frekansı da ikinci dereceden doğrulara yakınsayarak artış göstermektedir.

Doğal eğilme frekansları arasındaki farklar Çizelge 5.2de gösterilmiştir. Buna göre analiz edilen değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekanslarındaki en büyük değişim r=2.0 ve sırasıyla α =0.4 ve 1.2 arasındaki olmuştur. Bu iki durum arasındaki eğilme ilk doğal eğilme frekansları arasındaki fark %14.57 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.2 Sabit "r" oranları altında değişen "α" oranlarına göre doğal frekans farkları

No	r Oranı	α Oranı	Frekan Hz	D %*	No	r Oranı	α Oranı	Frekans Hz	D %*
1	0.5	0.1	2.953	2.455	37	1.2	0.1	2.961	5.050
2		0.2	3.025	2.433	38		0.2	3.110	5.165
3		0.3	3.099	0.858	39		0.3	3.271	1.774
4		0.33	3.125	2.368	40		0.33	3.329	4.861
5		0.4	3.199	**4.497**	41		0.4	3.491	**9.736**
6		0.5	3.343	-	42		0.5	3.831	-
7	0.6	0.1	2.957	2.918	43	1.4	0.1	2.960	5,507
8		0.2	3.043	2.879	44		0.2	3.123	5.773
9		0.3	3.130	1.008	45		0.3	3.303	1.982
10		0.33	3.162	2.775	46		0.33	3.369	5.437
11		0.4	3.250	**5.312**	47		0.4	3.552	**11.053**
12		0.5	3.422	-	48		0.5	3.944	-
13	0.7	0.1	2.959	3.351	49	1.6	0.1	2.958	5.891
14		0.2	3.058	3.308	50		0.2	3.132	6.307
15		0.3	3.159	1.151	51		0.3	3.329	2.168
16		0.33	3.195	3.164	52		0.33	3.402	5.961
17		0.4	3.297	**6.103**	53		0.4	3.604	**12.296**
18		0.5	3.498	-	54		0.5	4.047	
19	0.8	0.1	2.960	3.759	55	1.8	0.1	2.955	6.197
20		0.2	3.072	3.718	56		0.2	3.138	6.775
21		0.3	3.186	1.288	57		0.3	3.351	2.334
22		0.33	3.227	3.535	58		0.33	3.429	6.437
23		0.4	3.341	**6.871**	59		0.4	3.650	**13.469**
24		0.5	3.570	-	60		0.5	4.141	-
25	0.9	0.1	2.962	4.117	61	2.0	0.1	2.952	6.440
26		0.2	3.083	4.110	62		0.2	3.142	7.181
27		0.3	3.210	1.418	63		0.3	3.368	2.481
28		0.33	3.256	3.889	64		0.33	3.452	6.866
29		0.4	3.382	**7.618**	65		0.4	3.689	**14.574**
30		0.5	3.640	-	66		0.5	4.226	-
31	1.0	0.1	2.962	4.452					
32		0.2	3.094	4.481					
33		0.3	3.232	1.543					
34		0.33	3.282	4.228					
35		0.4	3.421	**8.344**					
36		0.5	3.706	-					

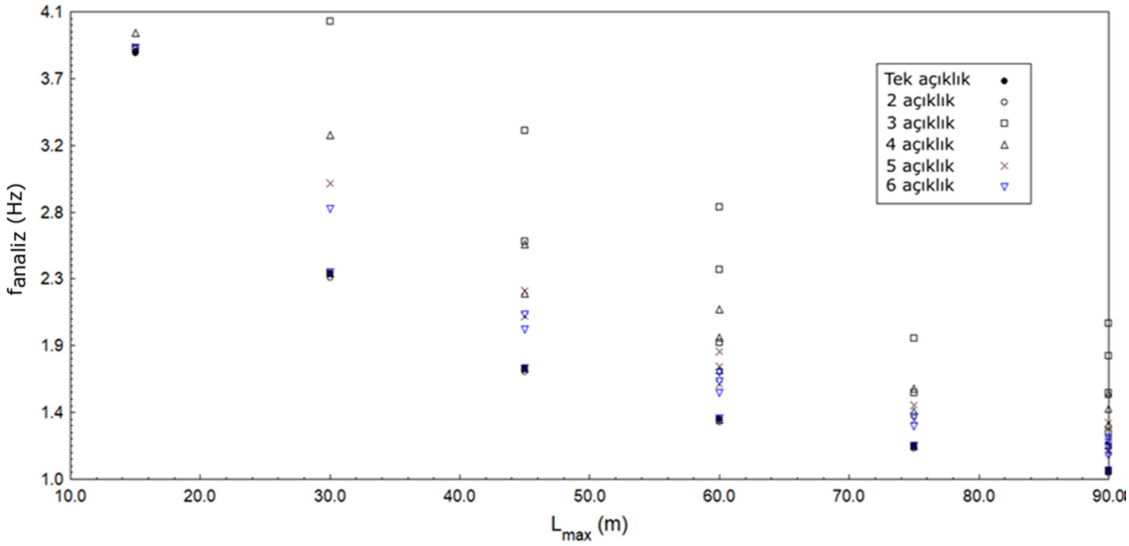
** α oranına bağlı olarak değişim;*

*D % = [(f(xi+1)-f(xi))/ f(xi+1)]*100*

En büyük değişimler kalın rakamlarla gösterilmiştir.

Maksimum Açıklık Uzunluğu (L_{max}) Etkisi

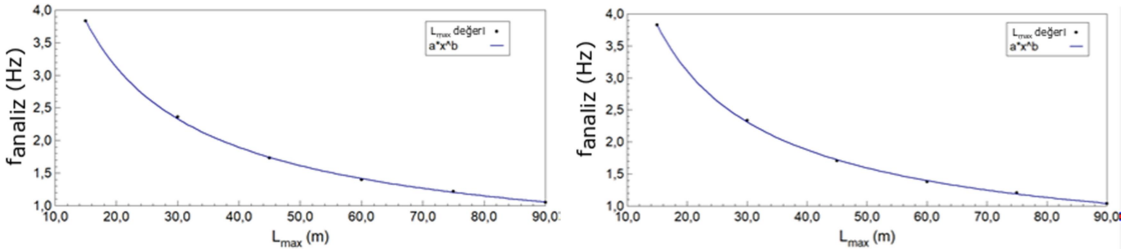
Maksimum açıklık uzunluğunun değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisini incelemek için Çizelge 4.3'te verilen Grup B ve D'den yararlanılmıştır. Buna göre 15 m, 30 m, 45 m, 60 m, 75 m ve 90 m maksimum hesap açıklığına sahip 2, 3, 4, 5 ve 6 açıklı köprülerden yararlanılmıştır. Şekil 5.5'te değişik açıklık sayılarına bağlı olarak Lmax değeriyle değişken kesitli sürekli kompozit köprülerin ilk doğal eğilme frekansı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Açıklıklara bağlı olarak L_{max} – doğal eğilme frekansı değişimi

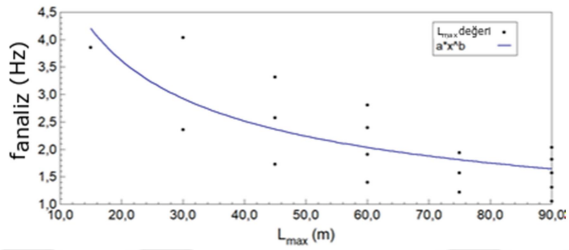
Şekil 5.5'te gösterildiği gibi L_{max} uzunluğu arttıkça, değişken kesitli sürekli kompozit köprülerin doğal eğilme frekansların belirgin bir şekilde düşüş görülmektedir. Açıklık sayısının doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisi Lmax değeri arttıkça azalmaktadır. Bir başka ifade ile L_{max} değeri arttıkça, doğal frekans değişimleri de birbirine yakınlaşmaktadır. Bu eğilim ayrıca Barth [13] tarafından da gözlemlenmiştir. Genel olarak, aynı maksimum açıklığa sahip değişken kesitli sürekli köprülerin eğilme frekansı, açıklık sayısı arttıkça azalmaktadır. Ancak Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, 3 açıklığa sahip değişken kesitli sürekli köprülerin doğal eğilme frekansı diğerlerinden daha yüksektir.

Açıklık sayılarına bağlı olarak L_{max}- doğal eğilme frekansı (f) Şekil 5.6'te gösterilmiştir.

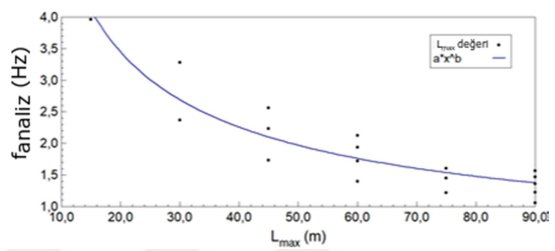


(a) Tek Açıklıklı

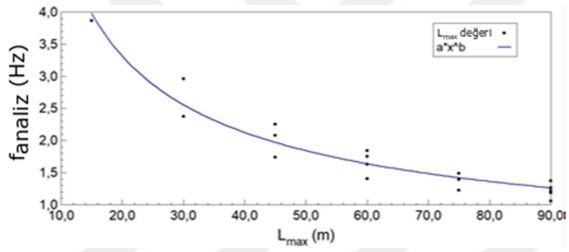
(b) 2 Açıklıklı



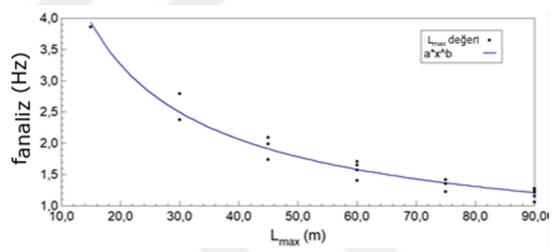
(c) 3 Açıklıklı



(d) 4 Açıklıklı



(e) 5 Açıklıklı



(f) 6 Açıklıklı

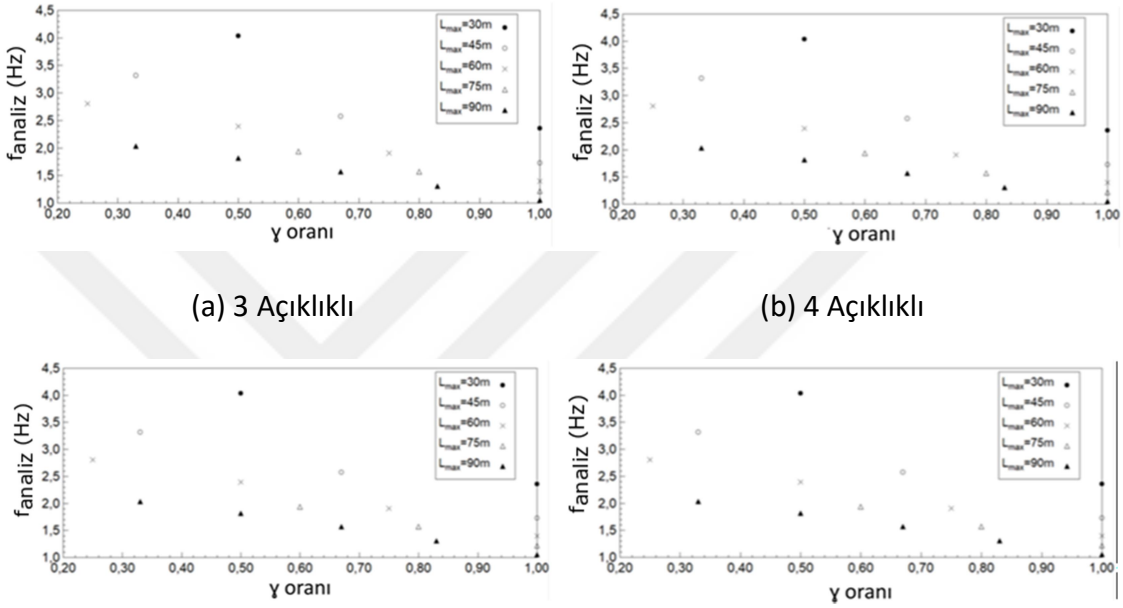
Şekil 5.6 Her bir açıklık sayısına bağlı olarak L_{max} – doğal eğilme frekansı (f) değişimi

Şekil 5.6'ya göre, L_{max} arttıkça değişken kesitli sürekli köprülerin doğal eğilme frekansları doğrusal olmayan bir eğriye yakınsayarak azalmaktadırlar. Söz konusu doğrusal olmayan eğri '$a.x^b$' şeklinde ifade edilebilir. Burada "a" ve "b" bir katsayı iken "x" değeri L_{max}'ı ifade etmektedir.

Özellikle 3 açıklıklı değişken kesitli sürekli köprülerin doğal eğilme frekansında, aynı maksimum açıklık değerine sahip olsalar bile bir dağılım olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi komşu hesap açıklıkları ile olan oran olduğu söylenebilir. "ɣ" oranı 0.25'ten 1'e geniş bir aralıkta göz önüne alındığından, maksimum açıklık olan orta açıklığın doğal eğilme frekansına katkısında değişikliğe sebep olmaktadırlar.

ɣ Oranının Etkisi

"ɣ" oranının değişken kesitli kompozit sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisini incelemek için Çizelge 4.3'te verilen Grup B ve D'den yararlanılmıştır. ɣ oranı 0.25'ten 1'e kadar geniş bir aralıkta incelenmiştir. Şekil 5.7'de ɣ oranı ve köprü doğal eğilme frekansı arasındaki ilişki 3, 4, 5 ve 6 açıklık için gösterilmiştir.



(a) 3 Açıklıklı (b) 4 Açıklıklı

(c) 5 Açıklıklı (d) 6 Açıklıklı

Şekil 5.7 Her bir açıklık sayısına bağlı olarak ɣ – doğal eğilme frekansı (f) değişimi

Şekil 5.7'ye göre, aynı maksimum açıklığa sahip değişken kesitli sürekli köprülerin ilk eğilme doğal frekansları; ɣ oranı arttıkça azalmaktadır. Genel olarak bu azalma miktarı doğrusaldır.

Enkesit Etkisi

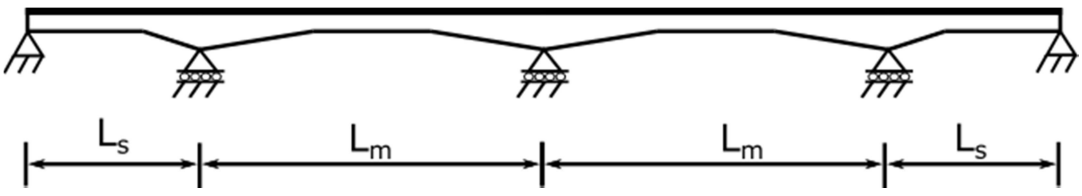
Değişken kesitli köprü açıklığının ortasından alınan enkesidin, köprü ilk doğal eğilme frekansına olan etkisini incelemek için Çizelge 4.3'teki E Grubu kullanılmıştır. Buna göre Şekil 4.9'da verilen enkesitler kullanılarak, aynı geometrik parametreler ile 5 adet köprü analizi yapılmıştır. Kullanılan çelik I-profil ebatları göz önüne alınan E Grubu için aynı seçilmiştir.

E-1, E-2, E-3 aynı sayıda ana çelik kirişe sahip oldukları halde, E-2 deki çelik kirişlerin aralığı E-1 ve E-3 ten daha küçüktür. Aynı şekilde E-2'de kullanılan diyafram kirişlerin boyları da diğer ikisine kıyasla daha kısa olacaktır. İncelenen 3 köprünün doğal eğilme frekansları arasında çok az farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. En büyük değişim %0.26 ile E-1 ve E-2 arasındadır. Bu küçük fark artan diyafram boyuyla doğru orantılı olarak artan kütle ve dolayısıyla azalan doğal frekans değişimidir.

Kullanılan ana kiriş sayısının köprü doğal frekansı üzerindeki etkisini incelemek için uçlardaki ana kirişlerin beton köşesine olan mesafelerinin aynı olduğu 3 adet değişken kesitli köprü enkesidinden yararlanılmıştır. Buna göre E-3, E-4 ve E-5 enkesitlerinden yararlanılmıştır. E-4'ün eğilme rijitliği daha fazla olacağından E-4 en büyük eğilme frekansına sahip olurken; E-5 en küçük eğilme frekansına sahip olmuştur. En büyük fark %18.5 ile 3 ana çelik I-profile sahip E-5 ile; 5 ana çelik I-profile sahip E-4 arasındadır.

Mesnet Koşulu Etkisi

Mesnet etkisinin değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisi 2, 3, 4, 5 ve 6 açıklıklı köprü modelleri üzerinden incelenmiştir. Çizelge 4.3'te verilen Grup B, C ve D kullanılmıştır. İlk aşamada köprü başlangıç noktasında 3 eksende yatay hareketi engelleyen sabit mesnetler; diğer köprü ayaklarının bulunduğu noktalarda ise köprünün kısa doğrultusunda ve düşey yer değiştirmeyi önleyen fakat uzun doğrultuda şekil değişimine izin veren kayıcı mesnet tipleri kullanılmıştır. İkinci olarak başlangıç ve bitiş noktalarında 3 eksende yatay hareketi engelleyen sabit mesnetler kullanılırken orta kısımlarda kayıcı mesnet tipleri kullanılarak her bir model ikişer defa çözülmüştür. İkinci aşama için kullanılan genel mesnet durumu Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8 Başlangıç ve bitiş noktalarında sabit mesnet kullanılmış çok açıklıklı köprü modellerinin genel boykesitleri

Başlangıç ve bitiş noktasında sabit mesnet kullanılan değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı, sadece başlangıç noktası sabit ve diğer mesnetleri hareketli olan modellere kıyasla daha küçüktür. Tüm analiz edilen modeller için doğal frekanstaki maksimum değer %15 olarak belirlenmiştir. Doğal eğilme frekansında oluşan farklar detaylı olarak EK-C'de verilmiştir.

BÖLÜM 6

REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi, herhangi bir değişkenin (bağımlı değişken) bir veya birden fazla değişken ile (bağımsız – açıklayıcı değişken) arasındaki ilişkinin matematik bir fonksiyon şeklinde yazılmasıdır. Elde edilen bu fonksiyona ise regresyon denklemi adı verilmektedir [33]. Regresyon denklemi elde edildiğinde, bağımsız değişkenlerin değerleri ile onlara bağlı olan bağımlı değişken tahmin edilebilmektedir.

Bağımlı değişken, bağımsız değişkenlerde tahmin edilen değişkendir. Bu çalışma için bağımlı değişken değişken kesitli sürekli köprülerin doğal frekansıdır. Doğal frekans, temel olarak köprü kütlesi ve eğilme rijitliğine bağlı olarak tahmin edilen bir değerdir. Kütle ve eğilme rijitliği ise Bölüm 4'te verilen bağımsız değişkenlere bağlıdır. Bağımsız değişkenlerin sayısına göre regresyon analizi basit ve çoklu regresyon analizi olarak ayrılmaktadır. Tek bağımsız değişken kullanılanlara basit regresyon, iki veya daha fazla bağımsız değişken kullanılanlara ise çoklu regresyon denilmektedir.

6.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Regresyon

Uygun olmayan regresyon yöntemlerinin kullanılması hatalı ve yanıltıcı sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir. Regresyon analizinde incelenen değişkenler sürekli ya da kesikli yapıda olabilmektedir ve bu veri yapısına bağlı olarak farklı regresyon modelleri kullanılabilmektedir [34]. Bir sürecin ön çalışmalarında veya tahminin birincil amaç olduğu durumlarda, modeller genellikle parametrelerde doğrusal olan model sınıfına girer. Yani, parametreler modele bağımsız değişkenlerin katsayıları olarak ya da bağımsız değişkenlerin fonksiyonu olarak girer. Bu tür modeller doğrusal modeller

olarak adlandırılır. Diğer taraftan, daha gerçekçi modeller genellikle parametrelerde doğrusal değildir [35].

Regresyon analizinde temel olarak üç bileşen vardır; matematiksel ilişki veya fonksiyon (Y_i), parametre (β_i) ve değişkenler (X_i).

Basit doğrusal regresyon modeli Denklem 6.1' de gösterilmiştir.

$$Yi = \beta 0 + \beta 1 Xi \tag{6.1}$$

Buradaki parametre değerlerinin fonksiyon içerisindeki matematiksel ifadelerine bağlı olarak fonksiyon, doğrusal ya da doğrusal olmayan olarak ayrılmaktadır. Doğrusal modellerde parametre değerleri sabit bir değer olarak kalırken, değişkenler üstel bir değer alabilmektedirler. Doğrusal olmayan regresyon modelleri, basitçe yukarıda verilen tanımı sağlamayan modellerdir. Parametreler üstel olarak ya da daha karmaşık yapılarda ifade edilebilirler.

Çalışma kapsamında birçok bağımsız değişken olması, Bölüm 5 te sunulduğu gibi bağımsız değişkenlerin frekans üzerindeki etkisinin incelenmesi sonucu ve sunulacak ifadenin karmaşıklığı açısından çalışmada *doğrusal olmayan regresyon analizi* tercih edilmiştir.

6.2 Önerilen Formül

Değişken kesitli sürekli kompozit köprülerin ilk doğal eğilme frekansının belirlenmesinde kullanılacak ifadenin çıkarımında, doğrusal olmayan regresyon analizi, DataFit [36] programı yardımıyla yapılmıştır.

Bölüm 1 içerisindeki literatür çalışmasında sunulduğu üzere birçok çalışmada Denklem 1.1 temel alınarak regresyon analizleri yapılmış ve Denklem 1.1 'e düzeltme katsayıları eklenmiştir. Bu çalışma kapsamında da aynı yöntem kullanılmıştır. Analizlerde, uygulamada kullanımın sınırlı ya da neredeyse olmadığı α=0.5 için elde edilen değişken kesitli kompozit köprü analizleri kullanılmamıştır.

Regresyon analizi sonucunda Denklem 6.2, değişken kesitli kompozit sürekli köprülerin ilk doğal frekanslarının tahmini için önerilmiştir.

$$f_{formül} = a \frac{\alpha^c b^{\gamma}}{r^d} f_{sb} \tag{6.2}$$

Buna göre “a”, ”c” ve “d” katsayıları 3, 4, 5 ve 6 açıklıklı köprüler için sırasıyla 2.240, 0.106 ve -0.068 bulunmuştur. “a” katsayısı 2 açıklıklı köprüler için 1.175; “c” ve “d” katsayısı 3, 4, 5 ve 6 açıklıklı köprüler ile aynıdır.

“b” katsayısı 2 açıklıklı sürekli köprüler için 0.966; 3 açıklık için 0.423; 4 açıklık için 0.538; 5 açıklık için 0.610; 6 açıklık için ise 0.646 olarak elde edilmiştir.

Denklem 1.1 ile ifade edilen ifade içerisindeki L (açıklık uzunluğu), denklem içersinde değişken kesitli sürekli köprüdeki maksimum açıklığı ifade etmektedir.

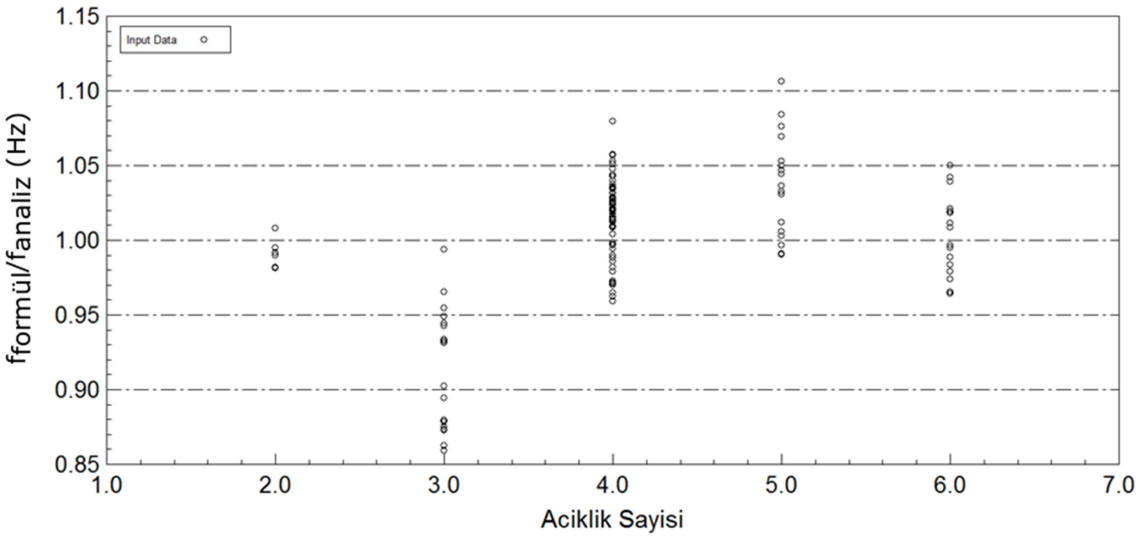
Çizelge 6.1 bahsi geçen katsayıların bir özetini vermektedir.

Çizelge 6.1 Boyutsuz parametreler

Açıklık Sayısı	**a**	**b**	**c**	**d**
2 Açıklıklı	1.175	0.966	0.106	-0.068
3 Açıklıklı	2,240	0.423		
4 Açıklıklı		0.538		
5 Açıklıklı		0.610		
6 Açıklıklı		0.646		

Formülasyondan elde edilen sonuçlar ($f_{formül}$) ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak serbest titreşim analizinden elde edilen sonuçlar (f_{analiz}) karşılaştırıldığında ortalama hata oranı %3.5 olarak bulunurken sadece 8 model %10 luk hata oranını geçmiştir. Maksimum hata oranı %14 ‘ tür.

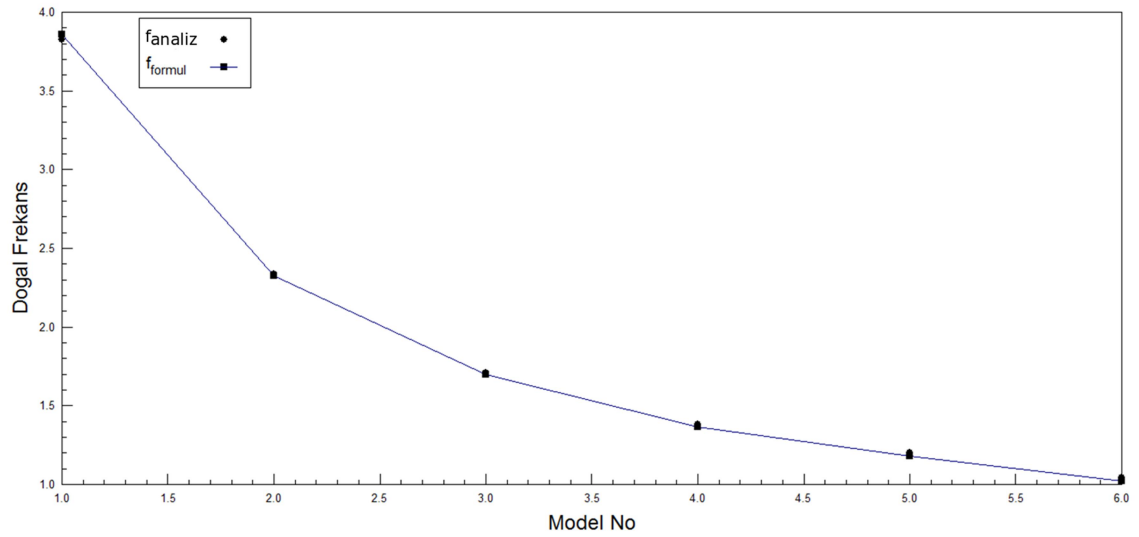
Formülasyon ile serbest tireşim analiz sonuçları ve hata oranları detaylı bir halde EK-D’de gösterilmiştir. Şekil 6.1 ’de açıklık sayılarına göre $f_{formül}/f_{analiz}$ sonuçları gösterilmiştir. Buna göre geliştirilen ifadeden elde edilen sonuçların %10 hata ile büyük çıkarken, 7 modelde geliştirilen ifade %10 hata oranı ile daha küçük frekans tahmini vermektedir.



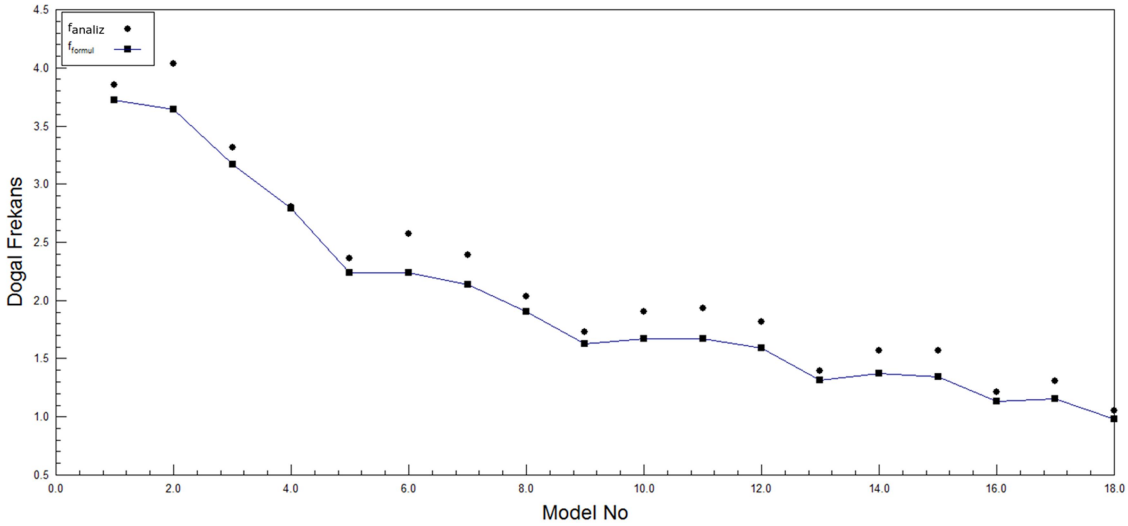
Şekil 6.1 Önerilen formülasyon ve serbest titreşim analizi sonuçlarının açıklık sayılarına göre karşılaştırılması

Verilen ifadenin, tahmindeki uyumunu belirlemenin yöntemlerinden biri de determinasyon (belirlilik) katsayısıdır. R^2 (determinasyon katsayısı) 0 ile 1 arasında bir değerdir ve birimizdir. Daha yüksek değerler, eğrinin verilere yaklaştığını gösterir. R^2, 0'a eşit olduğunda, X değerlerini bilmek, Y 'yi tahmin etmenize yardımcı olmaz. R^2 değeri 1'e eşit olduğunda, tüm Y noktaları tam olarak denklemin önerdiği eğri üzerine düşer. X 'i biliyorsanız, Y 'yi tam olarak hesaplayabilirsiniz [37].

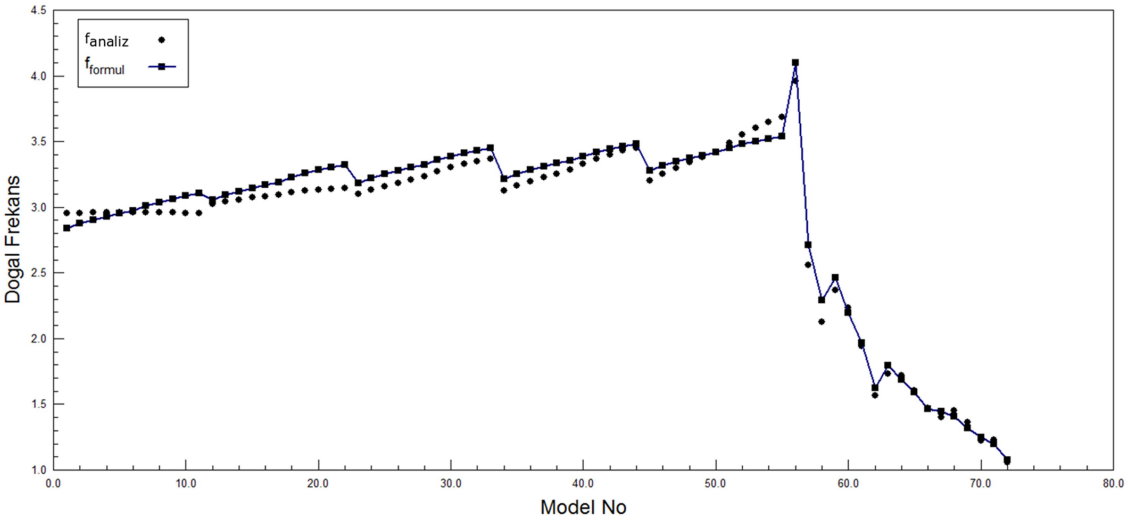
Önerilen ifadeye ait R^2 değerleri her bir açıklık için aşağıda verilmiştir.



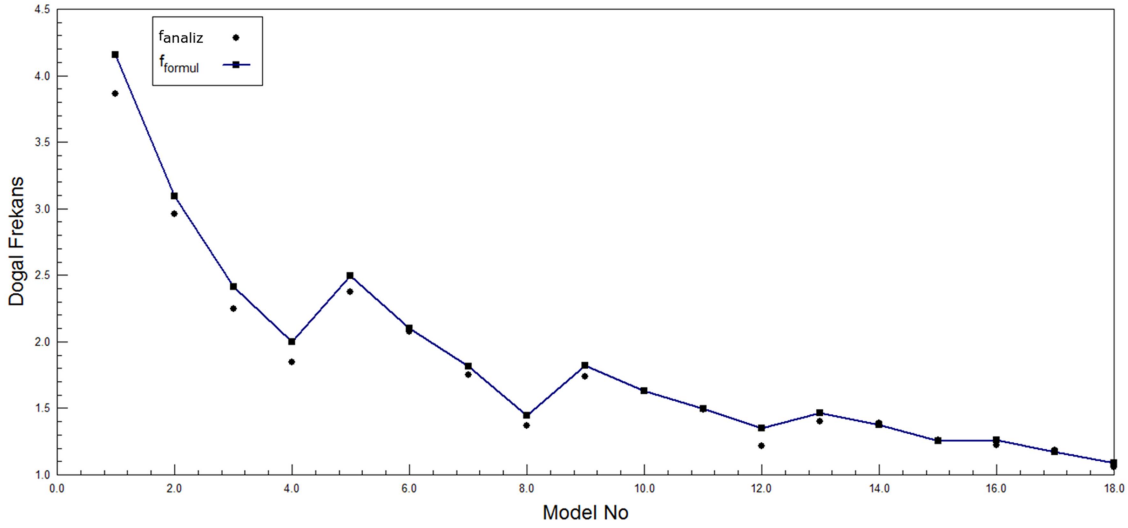
Şekil 6.2 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 2 açıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.99)



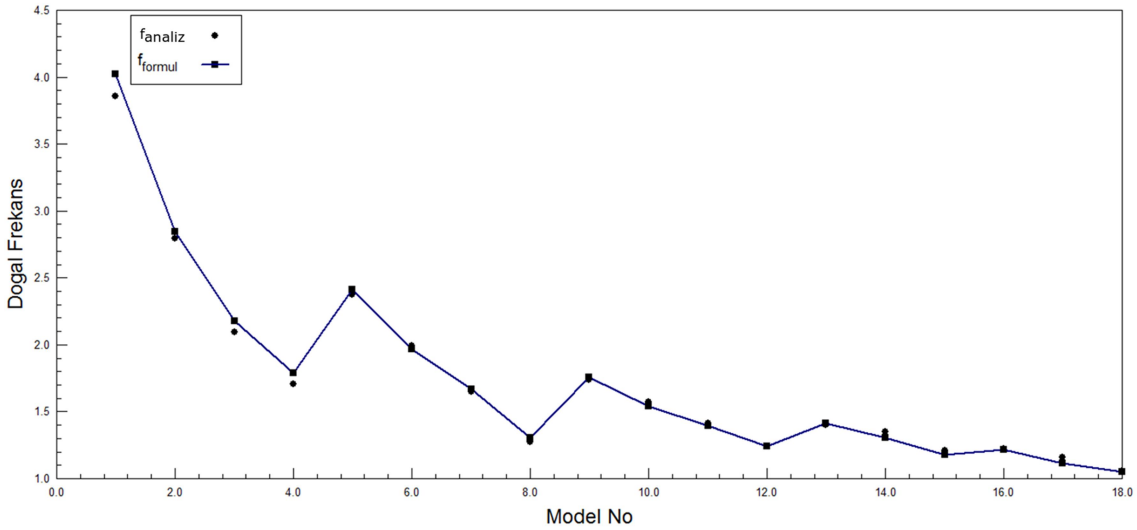
Şekil 6.3 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 3 açıklıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.94)



Şekil 6.4 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 4 açıklıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.98)



Şekil 6.5 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 5 açıklıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.97)



Şekil 6.6 Önerilen formül ile analiz sonuçlarının 6 açıklıklı köprüler için karşılaştırılması (R^2 = 0.99)

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansına etki eden birçok parametre üzerinde durulmuş ve ilk doğal eğilme frekansının tahmini için doğrusal olmayan regrasyon analiziyle bir formülasyon önerilmiştir. Bu kapsamda toplamda 153 sayısal model üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- Diğer parametreler sabitken "r" oranının artmasıyla ilk doğal frekans da artmaktadır. Aynı şekilde "α" oranının artmasıyla yine ilk doğal eğilme frekansında kayda değer artışlar olmuştur. Bahsi geçen artışlar arasındaki ilişki 2. dereceden bir polinom ile ifade edilebilecektir.; doğrusal değildir. Çizelge 5.1'de verildiği gibi, "α" oranı sabitken ve "r" oranlarının değişken olduğu durum için ilk doğal eğilme frekansları arasındaki en büyük fark %3 olmuştur. Diğer taraftan Çizelge 5.2'de gösterildiği gibi, "r" oranı sabitken ve "α" oranlarının değişken olduğu durum için ilk doğal eğilme frekansları arasındaki en büyük fark %15 olmuştur.

- Maksimum köprü açıklığının (L_{max}), sürekli köprülerin ilk doğal eğilme frekansı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak maksimum açıklığın artmasıyla köprülerin doğal eğilme frekansları doğrusal olmayan bir eğriye yakınsayarak azalmaktadırlar. bunu ifade edecek eğri "$a.x^b$ " şeklinde bir üstel fonksiyon olarak seçilebilir. Burada "a" ve "b" bir katsayı iken "x" değeri L_{max}'ı ifade etmektedir.

- Hesap açıklığı aynı olan sürekli köprülerin doğal frekansı," ɣ" oranı arttıkça doğrusal olarak azalmaktadır.

- Kompozit köprülerin doğal eğilme frekansı çelik ana kiriş sayısı ve yerleşimi ile değişmektedir. Çelik ana kiriş sayısının doğal frekans üzerine etkisi, kirişlerin enkesitteki yerleşim düzenlemesi yani kirişler arasındaki mesafenin değişiminden daha fazladır. Aynı sayıda çelik I-profil şeklinde ana kirişe sahip fakat kiriş aralıkları farklı köprülerdeki en büyük doğal eğilme frekans farkı %0.3 olarak belirlenmiştir. Çelik I-profil ana kiriş sayısı 5'ten 3'e düştüğünde ise fark %18.5 olarak bulunmuştur.
- Sürekli köprülerin mesnetlenme koşullarının doğal eğilme frekansı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, köprü baş ve sondaki mesnet şartları değiştirildiğinde en büyük fark %15 olarak görülmüştür. Hesap detayları EK-C'de gösterilmiştir.
- Değişken kesitli sürekli köprülerin ilk doğal frekansının tahmini için önerilen formül ile sayısal çözüm sonuçları karşılaştırıldığında ortalama hata oranı %3.5 olarak bulunurken, sadece 8 model %10 luk hata oranını geçmiştir. Maksimum hata oranı %14 'tür.

Çalışmada değişken kesitli kompozit çelik I-profilli sürekli köprülerin doğal frekansı incelenmiş ve doğal frekans tahmini için basit bir formülasyon önerilmiştir. Gelecek çalışmalarda kullanılan model sayısı arttırılarak daha detaylı bir denklem önerilebilirken, kompozit malzeme dışında betonarme gibi köprü yapılarında sıkça kullanılan malzeme türleri ile sismik izolatörlerin kullanıldığı köprüler için benzer çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Ministry of Transportation: Quality and Standards Division, (1991). Ontario Highway Bridge Design Code/Commentary, (3rd ed.). Toronto, Ontario, Canada.

[2] 92 Austroads bridge design code (1992). Section two- code design loads and its commentary. Austroads, Haymarket, Nsw, Australia.

[3] Biggs JM., (1964), Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill Book Company, Chapter 4.

[4] Cantieni R. , (1983). ''Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland'', EMPA, Switzerland 60 Years of Experiences of EMPA Report N.21, 141-148.

[5] Billing JR ve Green R (1984). "Design Provisions for Dynamic Loading of Highway Bridges", Transportation Research Record 950,Washington DC, 94-103.

[6] Memory TJ., Thambiratnam DP.,Brameld GH., (1995), ''Free Vibration Analysis of Bridges'', Engineering Structures, 17(10):705-13.

[7] Ventura CE, Felber AJ, Stiemer SF., (1996). ''Determination of Dynamic Characteristics of the Colquitz River Bridge by Full-Scale Testing'', Canadian Journal of Civil Engineering, 23:536-548.

[8] Wolek AL., Barton FW., Baber TT., Mckeel WT. Jr., (1996). ''Dynamic Field Testing of the Route 58 Meherrin River Bridge'', Final Report, Charlottesville (VA): Virginia Transportation Research Council.

[9] Jin-Wen Kou ve John T. DeWolf, (1997). ''Vibrational Behavior of Continuous Span Highway Bridge-Influencing Variables'', Journal of Structural Engineering, 123(3):333-344.

[10] Dusseau RA., (1998). ''Profiles of Design Dimensions and Fundamental Natural Frequencies for Steel Interstate Highway Bridges in Southeastern Missouri'', Transportation Research Record. Transportation Research board,1624, 82-92.

[11] Mario Farfard, Martin Laflamme, Marc Savard ve Mallikarjuna Bennur, (1998). ''Dynamic Analysis of Existing Continuous Bridge'', Journal of Bridge Engineering, 3(1):28-37.

[12] Martin TM., Barton FW., Mckeel WT Jr., Gomez JP., Massarelli PJ., (2000). ''Effect of Design Parameters on Dynamic Response of Bridges'', Final Report, VTRC 00-R23. Charlottesville (VA).

[13] Karl E. Barth ve Haiyong Wu, (2007). ''Development of Improved Natural Frequency Equations for Continuous Span Steel I-Girder Bridges'', Engineering Structure, 29: 3432-3442.

[14] J. Ashley Warren, Elisa D. Sotelino ve Thomas E. Cousins, (2009). ''Finite Element Model Efficiency for Modal Analysis of Slab-on-Girder Bridges'', Proceedings of IMAC-XXVII.

[15] Gao Qing-fei, Wang Zong-lin, Liu Yang ve Guo Bin-qiang, (2012). ''Modified Formula of Estimating Fundemental Frequency of Girder Bridge with Uniform Cross-section'', Advanced Engineering Forum, ISSN: 2234-991X, 5:177-182.

[16] Gao Qing-fei, Zonglin Wang ve Binqiang Guo, (2013). ''Modified Formula of Estimating Fundemental Frequency of Girder Bridge with Variable Cross-section'', Key Engineering Materials, 540: 99-106.

[17] Iman Mohseni, Abdul Khalim Abdul Rashid ve Junsunk Kang, (2014). ''A Simplified Method to Estimate the Fundamental Frequency of Skew Continuous Multicell Box-Girder Bridges'', Latin American Journal of Solids and Structures, 11(4):649-658.

[18] Qing-fei Gao, Zong-lin Wang, Xiao-heng Lv, Wei Zhang ve Li-hui Yin, (2015). ''Formulas for Natural Frequencies of Girder Bridge and Continuos Rigid Frame Bridge'', The IES Journal Part A:Civil & Structural Engineering, 8(3):155-164.

[19] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2002). Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition.

[20] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2012). LRFD Bridge Design Specifications.

[21] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2014).LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition.

[22] Roeder CW, Barth KB, Bergman A,(2002). ''Improved Live Load Deflection Criteria for Steel Bridges'', Final Report, NCHRP 20-07/133, Seattle (WA): University of Washington.

[23] Roger A. Dorton ve Baidar Bakht (1983). "The Ontario Bridge Code: Second Edition", Transportation Research Record, 88-93.

[24] El-Mezaini N., Balkaya Can and Citipitioglu E., (1991). "Analysis of Frames with Nonprismatic Members.", ASCE, Journal of Structural Engineering, 117(6): 1573-1592.

[25] Wai-Fah Chen and Lian Duan, (2014), Bridge Engineering Handbook, Second Edition; Superstructure Design, CRC Press.

[26] A.K. Chopra,(2013). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4. Edition.

[27] CSIBridge 2017, Integrated 3D Bridge Analysis Software, Computer and Structures Inc., Berkeley, California.

[28] CSI Analysis Reference Manual, Computer and Structures Inc., Berkeley, California.

[29] Design Specifications for Highway Bridges, (2002), Japan.

[30] Illinois Department of Transportation (2008). Design Guides.

[31] Department of Transportation-Minnesota, (1995). Aesthetic Guidelines for Bridge Design.

[32] Demiryolları Eki-Köprü Tasarım Esasları,(2007). T.C. Ulaştırma Bakanlığı; Demiryolları, Limanlar, Havameydanları İnşaat Genel Müdürlüğü (DLH).

[33] Orhunbilge N. (2000). Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi, 2.Baskı, İstanbul, 12.

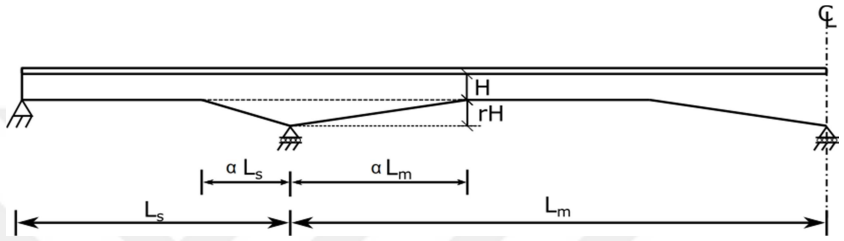
[34] Özarıcı, Ö. ,(1996). Farklı Not Sistemlerinde Öğrencinin Başarılı Olma Olasılığının Probit Regresyon Analiziyle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[35] John O. Rawlings, Sastry G. Pantula, David A. Dickey, (1998). Applied Regression Analysis : A Research Tool, Second edition.

[36] DataFit, Curve Fitting and Data Plotting Software, Oakdale Engineering, Oakdale, USA.

[37] Harvey Motulsky, Arthur Cristopoulos, (2003). Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression; A Practical Guide to Curve Fitting.

KULLANILAN MODEL GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ



Şekil A.1 Değişken kesitli sürekli köprülere ait genel geometri ve parametreler

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
1	4	15+30+30+15	900	1350	3	1.5	E-3	0.5	0.5	0.1	30	15
2			900	1440	3	1.5	E-3	0.5	0.6	0.1	30	15
3			900	1530	3	1.5	E-3	0.5	0.7	0.1	30	15
4			900	1620	3	1.5	E-3	0.5	0.8	0.1	30	15
5			900	1710	3	1.5	E-3	0.5	0.9	0.1	30	15
6			900	1800	3	1.5	E-3	0.5	1	0.1	30	15
7			900	1980	3	1.5	E-3	0.5	1.2	0.1	30	15
8			900	2160	3	1.5	E-3	0.5	1.4	0.1	30	15
9			900	2340	3	1.5	E-3	0.5	1.6	0.1	30	15
10			900	2520	3	1.5	E-3	0.5	1.8	0.1	30	15
11			900	2700	3	1.5	E-3	0.5	2	0.1	30	15
12			900	1350	6	3	E-3	0.5	0.5	0.2	30	15
13			900	1440	6	3	E-3	0.5	0.6	0.2	30	15

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
14	4	15+30+30+15	900	1530	6	3	E-3	0.5	0.7	0.2	30	15
15			900	1620	6	3	E-3	0.5	0.8	0.2	30	15
16			900	1710	6	3	E-3	0.5	0.9	0.2	30	15
17			900	1800	6	3	E-3	0.5	1	0.2	30	15
18			900	1980	6	3	E-3	0.5	1.2	0.2	30	15
19			900	2160	6	3	E-3	0.5	1.4	0.2	30	15
20			900	2340	6	3	E-3	0.5	1.6	0.2	30	15
21			900	2520	6	3	E-3	0.5	1.8	0.2	30	15
22			900	2700	6	3	E-3	0.5	2	0.2	30	15
23			900	1350	9	4.5	E-3	0.5	0.5	0.3	30	15
24			900	1440	9	4.5	E-3	0.5	0.6	0.3	30	15
25			900	1530	9	4.5	E-3	0.5	0.7	0.3	30	15
26			900	1620	9	4.5	E-3	0.5	0.8	0.3	30	15
27			900	1710	9	4.5	E-3	0.5	0.9	0.3	30	15
28			900	1800	9	4.5	E-3	0.5	1	0.3	30	15
29			900	1980	9	4.5	E-3	0.5	1.2	0.3	30	15
30			900	2160	9	4.5	E-3	0.5	1.4	0.3	30	15
31			900	2340	9	4.5	E-3	0.5	1.6	0.3	30	15
32			900	2520	9	4.5	E-3	0.5	1.8	0.3	30	15
33			900	2700	9	4.5	E-3	0.5	2	0.3	30	15
34			900	1350	9.9	4.95	E-3	0.5	0.5	0.33	30	15
35			900	1440	9.9	4.95	E-3	0.5	0.6	0.33	30	15

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
36	4	15+30+30+15	900	1530	9.9	4.95	E-3	0.5	0.7	0.33	30	15
37			900	1620	9.9	4.95	E-3	0.5	0.8	0.33	30	15
38			900	1710	9.9	4.95	E-3	0.5	0.9	0.33	30	15
39			900	1800	9.9	4.95	E-3	0.5	1	0.33	30	15
40			900	1980	9.9	4.95	E-3	0.5	1.2	0.33	30	15
41			900	2160	9.9	4.95	E-3	0.5	1.4	0.33	30	15
42			900	2340	9.9	4.95	E-3	0.5	1.6	0.33	30	15
43			900	2520	9.9	4.95	E-3	0.5	1.8	0.33	30	15
44			900	2700	9.9	4.95	E-3	0.5	2	0.33	30	15
45			900	1350	12	6	E-3	0.5	0.5	0.4	30	15
46			900	1440	12	6	E-3	0.5	0.6	0.4	30	15
47			900	1530	12	6	E-3	0.5	0.7	0.4	30	15
48			900	1620	12	6	E-3	0.5	0.8	0.4	30	15
49			900	1710	12	6	E-3	0.5	0.9	0.4	30	15
50			900	1800	12	6	E-3	0.5	1	0.4	30	15
51			900	1980	12	6	E-3	0.5	1.2	0.4	30	15
52			900	2160	12	6	E-3	0.5	1.4	0.4	30	15
53			900	2340	12	6	E-3	0.5	1.6	0.4	30	15
54			900	2520	12	6	E-3	0.5	1.8	0.4	30	15
55			900	2700	12	6	E-3	0.5	2	0.4	30	15
56			900	1350	15	7.5	E-3	0.5	0.5	0.5	30	15
57			900	1440	15	7.5	E-3	0.5	0.6	0.5	30	15

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
58	4	15+30+30+15	900	1530	15	7.5	E-3	0.5	0.7	0.5	30	15
59			900	1620	15	7.5	E-3	0.5	0.8	0.5	30	15
60			900	1710	15	7.5	E-3	0.5	0.9	0.5	30	15
61			900	1800	15	7.5	E-3	0.5	1	0.5	30	15
62			900	1980	15	7.5	E-3	0.5	1.2	0.5	30	15
63			900	2160	15	7.5	E-3	0.5	1.4	0.5	30	15
64			900	2340	15	7.5	E-3	0.5	1.6	0.5	30	15
65			900	2520	15	7.5	E-3	0.5	1.8	0.5	30	15
66			900	2700	15	7.5	E-3	0.5	2	0.5	30	15
67	4	15+15+15+15	450	900	4.95	4.95	E-3	1.00	1	0.33	15	15
68		15+45+45+15	1350	2700	14.85	4.95	E-3	0.33	1	0.33	45	15
69		15+60+60+15	1800	3600	19.8	4.95	E-3	0.25	1	0.33	60	15
70		30+30+30+30	900	1800	9.9	9.9	E-3	1.00	1	0.33	30	30
71		30+45+45+30	1350	2700	14.85	9.9	E-3	0.67	1	0.33	45	30
72		30+60+60+30	1800	3600	19.8	9.9	E-3	0.50	1	0.33	60	30
73		30+90+90+30	2700	5400	29.7	9.9	E-3	0.33	1	0.33	90	30
74		45+45+45+45	1350	2700	14.85	14.85	E-3	1.00	1	0.33	45	45
75		45+60+60+45	1800	3600	19.8	14.85	E-3	0.75	1	0.33	60	45
76		45+75+75+45	2250	4500	24.75	14.85	E-3	0.60	1	0.33	75	45
77		45+90+90+45	2700	5400	29.7	14.85	E-3	0.50	1	0.33	90	45
78		60+60+60+60	1800	3600	19.8	19.8	E-3	1.00	1	0.33	60	60

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
79	4	60+75+75+60	2250	4500	24.75	19.8	E-3	0.80	1	0.33	75	60
80		60+90+90+60	2700	5400	29.7	19.8	E-3	0.67	1	0.33	90	60
81		75+75+75+75	2250	4500	24.75	24.75	E-3	1.00	1	0.33	75	75
82		75+90+90+75	2700	5400	29.7	24.75	E-3	0.83	1	0.33	90	75
83		90+90+90+90	2700	5400	29.7	29.7	E-3	1.00	1	0.33	90	90
84	2	15+15	450	900	4.95	4.95	E-3	1.00	1	0.33	15	15
85		30+30	900	1800	9.9	9.9	E-3	1.00	1	0.33	30	30
86		45+45	1350	2700	14.85	14.85	E-3	1.00	1	0.33	45	45
87		60+60	1800	3600	19.8	19.8	E-3	1.00	1	0.33	60	60
88		75+75	2250	4500	24.75	24.75	E-3	1.00	1	0.33	75	75
89		90+90	2700	5400	29.7	29.7	E-3	1.00	1	0.33	90	90
90	3	15+15+15	450	900	4.95	4.95	E-3	1.00	1	0.33	15	15
91		15+30+15	900	1800	9.9	4.95	E-3	0.50	1	0.33	30	15
92		15+45+15	1350	2700	14.85	4.95	E-3	0.33	1	0.33	45	15
93		15+60+15	1800	3600	19.8	4.95	E-3	0.25	1	0.33	60	15
94		30+30+30	900	1800	9.9	9.9	E-3	1.00	1	0.33	30	30
95		30+45+30	1350	2700	14.85	9.9	E-3	0.67	1	0.33	45	30
96		30+60+30	1800	3600	19.8	9.9	E-3	0.50	1	0.33	60	30
97		30+90+30	2700	5400	29.7	9.9	E-3	0.33	1	0.33	90	30
98		45+45+45	1350	2700	14.85	14.85	E-3	1.00	1	0.33	45	45
99		45+60+45	1800	3600	19.8	14.85	E-3	0.75	1	0.33	60	45

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
100	3	45+75+45	2250	4500	24.75	14.85	E-3	0.60	1	0.33	75	45
101		45+90+45	2700	5400	29.7	14.85	E-3	0.50	1	0.33	90	45
102		60+60+60	1800	3600	19.8	19.8	E-3	1.00	1	0.33	60	60
103		60+75+60	2250	4500	24.75	19.8	E-3	0.80	1	0.33	75	60
104		60+90+60	2700	5400	29.7	19.8	E-3	0.67	1	0.33	90	60
105		75+75+75	2250	4500	24.75	24.75	E-3	1.00	1	0.33	75	75
106		75+90+75	2700	5400	29.7	24.75	E-3	0.83	1	0.33	90	75
107		90+90+90	2700	5400	29.7	29.7	E-3	1.00	1	0.33	90	90
108	5	15+15+15+15+15	450	900	4.95	4.95	E-3	1.00	1	0.33	15	15
109		15+30+30+30+15	900	1800	9.9	4.95	E-3	0.50	1	0.33	30	15
110		15+45+45+45+15	1350	2700	14.85	4.95	E-3	0.33	1	0.33	45	15
111		15+60+60+60+15	1800	3600	19.8	4.95	E-3	0.25	1	0.33	60	15
112		30+30+30+30+30	900	1800	9.9	9.9	E-3	1.00	1	0.33	30	30
113		30+45+45+45+30	1350	2700	14.85	9.9	E-3	0.67	1	0.33	45	30
114		30+60+60+60+30	1800	3600	19.8	9.9	E-3	0.50	1	0.33	60	30
115		30+90+90+90+30	2700	5400	29.7	9.9	E-3	0.33	1	0.33	90	30
116		45+45+45+45+45	1350	2700	14.85	14.85	E-3	1.00	1	0.33	45	45
117		45+60+60+60+45	1800	3600	19.8	14.85	E-3	0.75	1	0.33	60	45
118		45+75+75+75+45	2250	4500	24.75	14.85	E-3	0.60	1	0.33	75	45
119		45+90+90+90+45	2700	5400	29.7	14.85	E-3	0.50	1	0.33	90	45
120		60+60+60+60+60	1800	3600	19.8	19.8	E-3	1.00	1	0.33	60	60

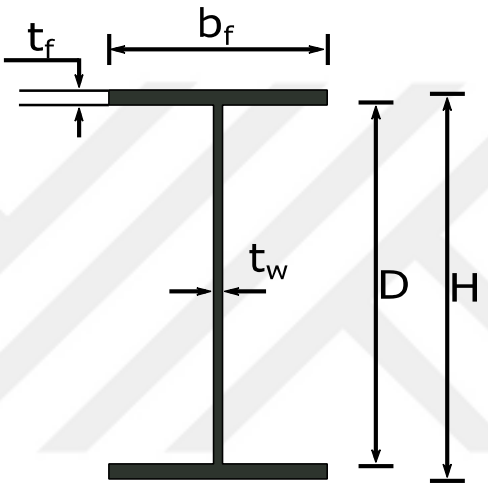
Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
121	5	60+75+75+75+60	2250	4500	24.75	19.8	E-3	0.80	1	0.33	75	60
122		60+90+90+90+60	2700	5400	29.7	19.8	E-3	0.67	1	0.33	90	60
123		75+75+75+75+75	2250	4500	24.75	24.75	E-3	1.00	1	0.33	75	75
124		75+90+90+90+75	2700	5400	29.7	24.75	E-3	0.83	1	0.33	90	75
125		90+90+90+90+90	2700	5400	29.7	29.7	E-3	1.00	1	0.33	90	90
126	6	15+15+15+15+15+15	450	900	4.95	4.95	E-3	1.00	1	0.33	15	15
127		15+30+30+30+30+15	900	1800	9.9	4.95	E-3	0.50	1	0.33	30	15
128		15+45+45+45+45+15	1350	2700	14.85	4.95	E-3	0.33	1	0.33	45	15
129		15+60+60+60+60+15	1800	3600	19.8	4.95	E-3	0.25	1	0.33	60	15
130		30+30+30+30+30+30	900	1800	9.9	9.9	E-3	1.00	1	0.33	30	30
131		30+45+45+45+45+30	1350	2700	14.85	9.9	E-3	0.67	1	0.33	45	30
132		30+60+60+60+60+30	1800	3600	19.8	9.9	E-3	0.50	1	0.33	60	30
133		30+90+90+90+90+30	2700	5400	29.7	9.9	E-3	0.33	1	0.33	90	30
134		45+45+45+45+45+45	1350	2700	14.85	14.85	E-3	1.00	1	0.33	45	45
135		45+60+60+60+60+45	1800	3600	19.8	14.85	E-3	0.75	1	0.33	60	45
136		45+75+75+75+75+45	2250	4500	24.75	14.85	E-3	0.60	1	0.33	75	45
137		45+90+90+90+90+45	2700	5400	29.7	14.85	E-3	0.50	1	0.33	90	45
138		60+60+60+60+60+60	1800	3600	19.8	19.8	E-3	1.00	1	0.33	60	60
139		60+75+75+75+75+60	2250	4500	24.75	19.8	E-3	0.80	1	0.33	75	60
140		60+90+90+90+90+60	2700	5400	29.7	19.8	E-3	0.67	1	0.33	90	60
141		75+75+75+75+75+75	2250	4500	24.75	24.75	E-3	1.00	1	0.33	75	75

Çizelge A.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

No.	Açıklık Sayısı	Açıklık Tanımı (m)	H (mm)	rH (mm)	αLm (m)	αLs (m)	En Kesit	ɣ	r	α	Lm (m)	Ls (m)
142	6	75+90+90+90+90+75	2700	5400	29.7	24.75	E-3	0.83	1	0.33	90	75
143		90+90+90+90+90+90	2700	5400	29.7	29.7	E-3	1.00	1	0.33	90	90
144	1	15	450	900	4.95	0	E-3		1	0.33	15	
145		30	900	1800	9.9	0	E-3		1	0.33	30	
146		45	1350	2700	14.85	0	E-3		1	0.33	45	
147		60	1800	3600	19.8	0	E-3		1	0.33	60	
148		75	2250	4500	24.75	0	E-3		1	0.33	75	
149		90	2700	5400	29.7	0	E-3		1	0.33	90	
150	4	15+30+30+30+15	900	1800	9.9	4.95	E-1	0.50	1	0.33	30	15
151			900	1800	9.9	4.95	E-2	0.50	1	0.33	30	15
152			900	1800	9.9	4.95	E-5	0.50	1	0.33	30	15
153			900	1800	9.9	4.95	E-4	0.50	1	0.33	30	15

KÖPRÜ ENKESİT HESAPLARI



Şekil B.2 "I" tip profile ait boyut adlandırmaları

Çizelge B.1 Köprü enkesit kontrolleri

Lm (m)	H (mm) (0.03L)	H+(rH) (mm)	r
15.0	450	675	***0.5***
	450	720	***0.6***
	450	765	***0.7***
	450	810	***0.8***
	450	855	***0.9***
	450	900	***1.0***
	450	990	***1.2***
	450	1080	***1.4***
	450	1170	***1.6***
	450	1260	***1.8***
	450	1350	***2.0***

	(mm)
H	1350.0
bf	300.0
tw	11.5
tf	21.0
D	1308.0
bf/2tf	7.1
D/6	218.0
1,1tw	12.7
D/tw	113.7

Çizelge B.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

7.1	≤	12.0	UYGUN	bf/2tf < 12	Denklem 4.2
300.0	≥	218.0	UYGUN	bf > (D/6)	Denklem 4.3
21.0	≥	12.7	UYGUN	tf > 1,1tw	Denklem 4.4
113.7	≤	300.0	UYGUN	D/tw < 300	Denklem 4.1
21.0	≥	19.0	UYGUN	$t_f \geq 19mm$	
21.0	≤	76.0	UYGUN	$t_f \leq 76mm$	

Lm (m)	**H (mm) (0.03L)**	**H+(rH) (mm)**	**r**
30.0	900	1350	***0.5***
	900	1440	***0.6***
	900	1530	***0.7***
	900	1620	***0.8***
	900	1710	***0.9***
	900	1800	***1.0***
	900	1980	***1.2***
	900	2160	***1.4***
	900	2340	***1.6***
	900	2520	***1.8***
	900	2700	***2.0***

	(mm)
H	2700.0
bf	450.0
tw	18.5
tf	35.0
D	2630.0
bf/2tf	6.4
D/6	438.3
1,1tw	20.4
D/tw	142.2

6.4	≤	12.0	UYGUN	bf/2tf < 12	Denklem 4.2
450.0	≥	438.3	UYGUN	bf > (D/6)	Denklem 4.3
35.0	≥	20.4	UYGUN	tf > 1,1tw	Denklem 4.4
142.2	≤	300.0	UYGUN	D/tw < 300	Denklem 4.1
35.0	≥	19.0	UYGUN	$t_f \geq 19mm$	
35.0	≤	76.0	UYGUN	$t_f \leq 76mm$	

Çizelge B.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

Lm (m)	H (mm) (0.03L)	H+(rH) (mm)	r
45.0	1350	2025	***0.5***
	1350	2160	***0.6***
	1350	2295	***0.7***
	1350	2430	***0.8***
	1350	2565	***0.9***
	1350	2700	***1.0***
	1350	2970	***1.2***
	1350	3240	***1.4***
	1350	3510	***1.6***
	1350	3780	***1.8***
	1350	4050	***2.0***

	(mm)
H	4050.0
bf	700.0
tw	18.5
tf	35.0
D	3980.0
bf/2tf	10.0
D/6	663.3
1,1tw	20.4
D/tw	215.1

10.0	<	12.0	UYGUN	bf/2tf < 12	Denklem 4.2
700.0	>	663.3	UYGUN	bf > (D/6)	Denklem 4.3
35.0	>	20.4	UYGUN	tf > 1,1tw	Denklem 4.4
215.1	<	300.0	UYGUN	D/tw < 300	Denklem 4.1
35.0	≥	19.0	UYGUN	$t_f \geq 19mm$	
35.0	≤	76.0	UYGUN	$t_f \leq 76mm$	

Çizelge B.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

Lm (m)	H (mm) (0.03L)	H+(rH) (mm)	r
60.0	1800	2700	***0.5***
	1800	2880	***0.6***
	1800	3060	***0.7***
	1800	3240	***0.8***
	1800	3420	***0.9***
	1800	3600	***1.0***
	1800	3960	***1.2***
	1800	4320	***1.4***
	1800	4680	***1.6***
	1800	5040	***1.8***
	1800	5400	***2.0***

	(mm)
H	5400.0
bf	900.0
tw	18.5
tf	40.0
D	5320.0
bf/2tf	11.3
D/6	886.7
1,1tw	20.4
D/tw	287.6

11.3	<	12.0	UYGUN	bf/2tf < 12	Denklem 4.2
900.0	>	886.7	UYGUN	bf > (D/6)	Denklem 4.3
40.0	>	20.4	UYGUN	tf > 1,1tw	Denklem 4.4
287.6	<	300.0	UYGUN	D/tw < 300	Denklem 4.1
40.0	≥	19.0	UYGUN	$t_f \geq 19mm$	
40.0	≤	76.0	UYGUN	$t_f \leq 76mm$	

Çizelge B.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

Lm (m)	H (mm) (0.03L)	H+(rH) (mm)	r
75.0	2250	3375	***0.5***
	2250	3600	***0.6***
	2250	3825	***0.7***
	2250	4050	***0.8***
	2250	4275	***0.9***
	2250	4500	***1.0***
	2250	4950	***1.2***
	2250	5400	***1.4***
	2250	5850	***1.6***
	2250	6300	***1.8***
	2250	6750	***2.0***

	(mm)
H	6750.0
bf	1200.0
tw	30.0
tf	50.0
D	6650.0
bf/2tf	12.0
D/6	1108.3
1,1tw	33.0
D/tw	221.7

12.0	≤	12.0	UYGUN	bf/2tf < 12	Denklem 4.2
1200.0	≥	1108.3	UYGUN	bf > (D/6)	Denklem 4.3
50.0	≥	33.0	UYGUN	tf > 1,1tw	Denklem 4.4
221.7	≤	300.0	UYGUN	D/tw < 300	Denklem 4.1
50.0	≥	19.0	UYGUN	$t_f \geq 19mm$	
50.0	≤	76.0	UYGUN	$t_f \leq 76mm$	

Çizelge B.1 Çalışmada kullanılan köprü modelleri (devamı)

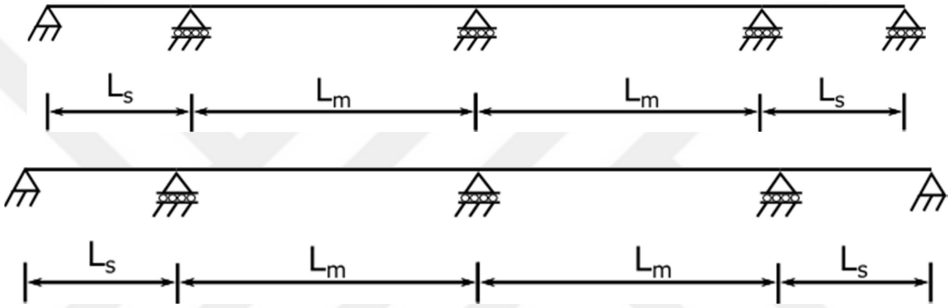
Lm (m)	H (mm) (0.03L)	H+(rH) (mm)	r
90.0	2700	4050	***0.5***
	2700	4320	***0.6***
	2700	4590	***0.7***
	2700	4860	***0.8***
	2700	5130	***0.9***
	2700	5400	***1.0***
	2700	5940	***1.2***
	2700	6480	***1.4***
	2700	7020	***1.6***
	2700	7560	***1.8***
	2700	8100	***2.0***

	(mm)
H	8100.0
bf	1350.0
tw	30.0
tf	60.0
D	7980.0
bf/2tf	11.3
D/6	1330.0
1,1tw	33.0
D/tw	266.0

11.3	<	12.0	UYGUN	bf/2tf < 12	Denklem 4.2
1350.0	>	1330.0	UYGUN	bf > (D/6)	Denklem 4.3
60.0	>	33.0	UYGUN	tf > 1,1tw	Denklem 4.4
266.0	<	300.0	UYGUN	D/tw < 300	Denklem 4.1
60.0	≥	19.0	UYGUN	$t_f \geq 19mm$	
60.0	≤	76.0	UYGUN	$t_f \leq 76mm$	

EK-C

DOĞAL FREKANSLAR VE MESNET ETKİSİ



Şekil C.3 Kullanılan mesnet şartları

Çizelge C.1 Mesnet şartlarına göre doğal frekans değerleri

Tek ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**
No.	Sn	Hz
1	0.339	2.953
2	0.338	2.957
3	0.338	2.959
4	0.338	2.961
5	0.338	2.962
6	0.338	2.962
7	0.338	2.961
8	0.338	2.960
9	0.338	2.958
10	0.338	2.955
11	0.339	2.952
12	0.331	3.025
13	0.329	3.043

İki ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**	**Değişim**
No.	Sn	Hz	%
1	0.339	2.953	0.009
2	0.338	2.957	0.009
3	0.338	2.959	0.009
4	0.338	2.961	0.009
5	0.338	2.962	0.009
6	0.338	2.962	0.010
7	0.338	2.962	0.010
8	0.338	2.960	0.010
9	0.338	2.958	0.010
10	0.338	2.955	0.010
11	0.339	2.953	0.010
12	0.331	3.025	0.011
13	0.329	3.043	0.011

Çizelge C.1 Mesnet şartlarına göre doğal frekans değerleri (devamı)

Tek ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**
No.	Sn	Hz
14	0.327	3.058
15	0.326	3.072
16	0.324	3.083
17	0.323	3.094
18	0.322	3.110
19	0.320	3.123
20	0.319	3.132
21	0.319	3.138
22	0.318	3.142
23	0.323	3.099
24	0.319	3.130
25	0.317	3.159
26	0.314	3.186
27	0.312	3.210
28	0.309	3.232
29	0.306	3.271
30	0.303	3.303
31	0.300	3.329
32	0.298	3.351
33	0.297	3.368
34	0.320	3.125
35	0.316	3.162
36	0.313	3.195
37	0.310	3.227
38	0.307	3.256
39	0.305	3.282
40	0.300	3.329
41	0.297	3.369
42	0.294	3.402
43	0.292	3.429
44	0.290	3.452
45	0.313	3.199
46	0.308	3.250
47	0.303	3.297
48	0.299	3.341
49	0.296	3.382
50	0.292	3.421
51	0.286	3.491

İki ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**	**Değişim**
No.	Sn	Hz	%
14	0.327	3.058	0.012
15	0.326	3.072	0.013
16	0.324	3.084	0.014
17	0.323	3.094	0.014
18	0.321	3.111	0.015
19	0.320	3.123	0.017
20	0.319	3.132	0.017
21	0.319	3.139	0.018
22	0.318	3.143	0.019
23	0.323	3.099	0.012
24	0.319	3.131	0.013
25	0.316	3.160	0.014
26	0.314	3.186	0.016
27	0.311	3.211	0.017
28	0.309	3.233	0.018
29	0.306	3.272	0.021
30	0.303	3.304	0.023
31	0.300	3.330	0.025
32	0.298	3.352	0.027
33	0.297	3.369	0.030
34	0.320	3.126	0.012
35	0.316	3.162	0.014
36	0.313	3.196	0.015
37	0.310	3.227	0.016
38	0.307	3.256	0.018
39	0.305	3.283	0.019
40	0.300	3.330	0.022
41	0.297	3.369	0.025
42	0.294	3.402	0.028
43	0.292	3.430	0.032
44	0.290	3.453	0.034
45	0.313	3.200	0.013
46	0.308	3.250	0.015
47	0.303	3.297	0.017
48	0.299	3.341	0.019
49	0.296	3.383	0.021
50	0.292	3.422	0.023
51	0.286	3.492	0.027

Çizelge C.1 Mesnet şartlarına göre doğal frekans değerleri (devamı)

Tek ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**
No.	Sn	Hz
52	0.282	3.552
53	0.277	3.604
54	0.274	3.650
55	0.271	3.689
56	0.299	3.343
57	0.292	3.422
58	0.286	3.498
59	0.280	3.570
60	0.275	3.640
61	0.270	3.706
62	0.261	3.831
63	0.254	3.944
64	0.247	4.047
65	0.241	4.141
66	0.237	4.226
67	0.253	3.959
68	0.391	2.560
69	0.471	2.124
70	0.422	2.368
71	0.448	2.234
72	0.515	1.941
73	0.639	1.565
74	0.577	1.734
75	0.581	1.721
76	0.624	1.603
77	0.681	1.468
78	0.714	1.400
79	0.689	1.452
80	0.735	1.361
81	0.820	1.220
82	0.816	1.226
83	0.947	1.056
84	0.262	3.824
85	0.428	2.336
86	0.585	1.710
87	0.724	1.380
88	0.831	1.203

İki ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**	**Değişim**
No.	Sn	Hz	%
52	0.281	3.553	0.032
53	0.277	3.606	0.037
54	0.274	3.651	0.042
55	0.271	3.690	0.046
56	0.299	3.344	0.015
57	0.292	3.423	0.018
58	0.286	3.498	0.021
59	0.280	3.571	0.024
60	0.275	3.641	0.027
61	0.270	3.708	0.030
62	0.261	3.832	0.038
63	0.253	3.946	0.047
64	0.247	4.050	0.058
65	0.241	4.144	0.069
66	0.236	4.230	0.082
67	0.252	3.969	0.244
68	0.391	2.560	0.005
69	0.471	2.124	0.002
70	0.422	2.371	0.124
71	0.447	2.235	0.037
72	0.515	1.941	0.013
73	0.639	1.565	0.002
74	0.576	1.736	0.103
75	0.581	1.722	0.045
76	0.615	1.627	1.478
77	0.681	1.468	0.009
78	0.714	1.401	0.088
79	0.688	1.453	0.045
80	0.735	1.361	0.022
81	0.819	1.221	0.071
82	0.815	1.227	0.045
83	0.940	1.064	0.793
84	0.261	3.826	0.070
85	0.428	2.336	0.030
86	0.585	1.710	0.023
87	0.724	1.381	0.019
88	0.831	1.204	0.016

Çizelge C.1 Mesnet şartlarına göre doğal frekans değerleri (devamı)

Tek ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**
No.	Sn	Hz
89	0.961	1.041
90	0.260	3.853
91	0.248	4.038
92	0.302	3.312
93	0.356	2.806
94	0.424	2.359
95	0.388	2.574
96	0.418	2.391
97	0.491	2.036
98	0.579	1.727
99	0.524	1.907
100	0.517	1.934
101	0.551	1.815
102	0.717	1.394
103	0.637	1.571
104	0.637	1.570
105	0.823	1.215
106	0.766	1.305
107	0.951	1.051
108	0.259	3.866
109	0.338	2.962
110	0.444	2.250
111	0.542	1.844
112	0.422	2.372
113	0.481	2.077
114	0.571	1.750
115	0.729	1.372
116	0.575	1.738
117	0.614	1.629
118	0.671	1.491
119	0.820	1.219
120	0.713	1.403
121	0.719	1.391
122	0.791	1.264
123	0.818	1.223
124	0.845	1.184

İki ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**	**Değişim**
No.	Sn	Hz	%
89	0.960	1.041	0.014
90	0.221	4.520	14.744
91	0.240	4.168	3.138
92	0.299	3.350	1.122
93	0.355	2.817	0.392
94	0.374	2.671	11.680
95	0.370	2.700	4.655
96	0.410	2.440	2.004
97	0.489	2.044	0.412
98	0.521	1.920	10.046
99	0.498	2.010	5.093
100	0.505	1.979	2.252
101	0.545	1.836	1.176
102	0.655	1.528	8.747
103	0.606	1.649	4.740
104	0.620	1.612	2.619
105	0.763	1.310	7.265
106	0.730	1.369	4.675
107	0.888	1.126	6.619
108	0.238	4.200	7.964
109	0.334	2.990	0.913
110	0.443	2.259	0.403
111	0.541	1.848	0.207
112	0.397	2.521	5.896
113	0.475	2.105	1.306
114	0.568	1.761	0.608
115	0.727	1.375	0.226
116	0.547	1.828	4.951
117	0.605	1.654	1.482
118	0.667	1.500	0.648
119	0.814	1.228	0.735
120	0.683	1.465	4.223
121	0.709	1.411	1.449
122	0.786	1.273	0.729
123	0.790	1.266	3.428
124	0.832	1.202	1.494

Çizelge C.1 Mesnet şartlarına göre doğal frekans değerleri (devamı)

Tek ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**
No.	Sn	Hz
125	0.945	1.058
126	0.259	3.859
127	0.358	2.794
128	0.478	2.093
129	0.587	1.704
130	0.422	2.372
131	0.503	1.990
132	0.606	1.650
133	0.785	1.274
134	0.575	1.738
135	0.635	1.575
136	0.706	1.417
137	0.803	1.245
138	0.713	1.403
139	0.739	1.353
140	0.827	1.210
141	0.817	1.224
142	0.864	1.157
143	0.944	1.059
150	0.304	3.288
151	0.305	3.280
152	0.338	2.963
153	0.285	3.509

İki ucu sabit mesnet	**Periyot**	**Frekans**	**Değişim**
No.	Sn	Hz	%
125	0.916	1.092	3.092
126	0.257	3.884	0.665
127	0.358	2.795	0.018
128	0.478	2.093	0.006
129	0.587	1.704	0.002
130	0.420	2.381	0.387
131	0.502	1.990	0.042
132	0.606	1.650	0.014
133	0.785	1.274	0.004
134	0.574	1.743	0.326
135	0.635	1.576	0.062
136	0.706	1.417	0.021
137	0.803	1.245	0.010
138	0.711	1.407	0.281
139	0.732	1.366	0.943
140	0.826	1.210	0.028
141	0.815	1.226	0.225
142	0.864	1.158	0.077
143	0.942	1.061	0.202
150	0.304	3.289	0.018
151	0.305	3.281	0.021
152	0.337	2.963	0.025
153	0.285	3.510	0.017

EK-D

ÖNERİLEN FORMÜLASYON VE HATA YÜZDELERİ

$$f_{formül} = a\frac{\alpha^c b^\gamma}{r^d} f_{sb}$$

$$f_{sb} = \frac{\pi}{2L_{max}^2}\sqrt{\frac{EIg}{w}}$$

Çizelge D.1 Boyutsuz parametreler

Açıklık Sayısı	**a**	**c**	**d**	**b**
2 Açıklıklı	1.175	0.106	-0.068	0.966
3 Açıklıklı	2,240			0.423
4 Açıklıklı				0.538
5 Açıklıklı				0.610
6 Açıklıklı				0.646

Çizelge D.2 Detaylı doğal frekans hesabı ve hata oranları

Açıklık Sayısı	Ls/Lm (γ)	r	α	Lm (m)	Ls (m)	Kompozit (m4)	Ağırlık (KN)	g (m/s2)	w (KN/m)	Ebeton (KN/m2)	Periyot (sn)	fanaliz (Hz)	fsb (Hz)	a	b	c	d	f formül	Hata %
2	1.00	1	0.33	15	15	0.064	2065.104	9.81	68.837	33000000	0.262	3.824	3.820	1.175	0.966	0.106	-0.068	3.854	0.797
	1.00	1	0.33	30	30	0.422	4698.273	9.81	78.305	33000000	0.428	2.336	2.304	1.175	0.966	0.106	-0.068	2.324	0.506
	1.00	1	0.33	45	45	1.257	7805.411	9.81	86.727	33000000	0.585	1.710	1.680	1.175	0.966	0.106	-0.068	1.695	0.868
	1.00	1	0.33	60	60	2.885	11624.988	9.81	96.875	33000000	0.724	1.380	1.355	1.175	0.966	0.106	-0.068	1.367	1.005
	1.00	1	0.33	75	75	6.721	18544.346	9.81	123.629	33000000	0.831	1.203	1.171	1.175	0.966	0.106	-0.068	1.182	1.813
	1.00	1	0.33	90	90	11.907	25454.597	9.81	141.414	33000000	0.961	1.041	1.012	1.175	0.966	0.106	-0.068	1.021	1.898
3	1.00	1	0.33	15	15	0.064	3092.179	9.81	51.536	33000000	0.260	3.853	4.415	2.240	0.423	0.106	-0.068	3.720	3.461
	0.50	1	0.33	30	15	0.422	4726.362	9.81	52.515	33000000	0.248	4.038	2.813	2.240	0.423	0.106	-0.068	3.644	9.748
	0.33	1	0.33	45	15	1.257	6572.763	9.81	54.773	33000000	0.302	3.312	2.114	2.240	0.423	0.106	-0.068	3.161	4.567
	0.25	1	0.33	60	15	2.885	8842.203	9.81	58.948	33000000	0.356	2.806	1.736	2.240	0.423	0.106	-0.068	2.789	0.602
	1.00	1	0.33	30	30	0.422	7064.329	9.81	58.869	33000000	0.424	2.359	2.657	2.240	0.423	0.106	-0.068	2.238	5.105
	0.67	1	0.33	45	30	1.257	9165.176	9.81	61.101	33000000	0.388	2.574	2.002	2.240	0.423	0.106	-0.068	2.247	12.723
	0.50	1	0.33	60	30	2.885	11737.899	9.81	65.211	33000000	0.418	2.391	1.651	2.240	0.423	0.106	-0.068	2.139	10.566
	0.33	1	0.33	90	30	11.907	21624.56	9.81	90.102	33000000	0.491	2.036	1.268	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.896	6.858
	1.00	1	0.33	45	45	1.257	11758.731	9.81	65.326	33000000	0.579	1.727	1.936	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.631	5.555
	0.75	1	0.33	60	45	2.885	14636.152	9.81	69.696	33000000	0.524	1.907	1.597	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.668	12.520
	0.60	1	0.33	75	45	6.721	20671.247	9.81	86.130	33000000	0.517	1.934	1.403	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.668	13.767
	0.50	1	0.33	90	45	11.907	25854.698	9.81	95.758	33000000	0.551	1.815	1.230	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.594	12.178
	1.00	1	0.33	60	60	2.885	17536.087	9.81	73.067	33000000	0.717	1.394	1.560	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.314	5.732
	0.80	1	0.33	75	60	6.721	24373.576	9.81	90.273	33000000	0.637	1.571	1.371	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.372	12.680
	0.67	1	0.33	90	60	11.907	30089.655	9.81	100.299	33000000	0.637	1.570	1.202	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.349	14.080
	1.00	1	0.33	75	75	6.721	28075.871	9.81	93.586	33000000	0.823	1.215	1.346	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.134	6.667
	0.83	1	0.33	90	75	11.907	34324.95	9.81	104.015	33000000	0.766	1.305	1.180	2.240	0.423	0.106	-0.068	1.148	12.039
	1.00	1	0.33	90	90	11.907	38560.623	9.81	107.113	33000000	0.951	1.051	1.163	2.240	0.423	0.106	-0.068	0.980	6.785
4	0.5	0.5	0.1	30	15	0.422	6979.733	9.81	77.553	33000000	0.339	2.953	2.315	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.842	3.734
	0.5	0.6	0.1	30	15	0.422	6984.735	9.81	77.608	33000000	0.338	2.957	2.314	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.877	2.703
	0.5	0.7	0.1	30	15	0.422	6992.438	9.81	77.694	33000000	0.338	2.959	2.313	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.905	1.808
	0.5	0.8	0.1	30	15	0.422	6997.677	9.81	77.752	33000000	0.338	2.961	2.312	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.931	1.009
	0.5	0.9	0.1	30	15	0.422	7003.025	9.81	77.811	33000000	0.338	2.962	2.311	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.953	0.284
	0.5	1	0.1	30	15	0.422	7008.476	9.81	77.872	33000000	0.338	2.962	2.310	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.973	0.380
	0.5	1.2	0.1	30	15	0.422	7019.665	9.81	77.996	33000000	0.338	2.961	2.308	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.008	1.567
	0.5	1.4	0.1	30	15	0.422	7031.204	9.81	78.124	33000000	0.338	2.960	2.306	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.037	2.607
	0.5	1.6	0.1	30	15	0.422	7043.057	9.81	78.256	33000000	0.338	2.958	2.304	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.062	3.533
	0.5	1.8	0.1	30	15	0.422	7055.189	9.81	78.391	33000000	0.338	2.955	2.302	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.084	4.365
	0.5	2	0.1	30	15	0.422	7067.57	9.81	78.529	33000000	0.339	2.952	2.300	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.103	5.120
	0.5	0.5	0.2	30	15	0.422	6998.318	9.81	77.759	33000000	0.331	3.025	2.312	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.055	0.977
	0.5	0.6	0.2	30	15	0.422	7006.892	9.81	77.854	33000000	0.329	3.043	2.310	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.091	1.573
	0.5	0.7	0.2	30	15	0.422	7018.125	9.81	77.979	33000000	0.327	3.058	2.308	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.121	2.053
	0.5	0.8	0.2	30	15	0.422	7026.855	9.81	78.076	33000000	0.326	3.072	2.307	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.147	2.462
	0.5	0.9	0.2	30	15	0.422	7035.657	9.81	78.174	33000000	0.324	3.083	2.305	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.171	2.824
	0.5	1	0.2	30	15	0.422	7044.527	9.81	78.273	33000000	0.323	3.094	2.304	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.191	3.152
	0.5	1.2	0.2	30	15	0.422	7062.466	9.81	78.472	33000000	0.322	3.110	2.301	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.227	3.745
	0.5	1.4	0.2	30	15	0.422	7080.656	9.81	78.674	33000000	0.320	3.123	2.298	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.257	4.288

Çizelge D.2 Detaylı doğal frekans hesabı ve hata oranları (devamı)

0.5	1.6	0.2	30	15	0.422	7099.081	9.81	78.879	33000000	0.319	*3.132*	2.295	2.240	0.538	0.106	-0.068	*3.282*	4.799
0.5	1.8	0.2	30	15	0.422	7117.727	9.81	79.086	33000000	0.319	*3.138*	2.292	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.304	5.290
0.5	2	0.2	30	15	0.422	7136.578	9.81	79.295	33000000	0.318	*3.142*	2.289	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.323	5.762
0.5	0.5	0.3	30	15	0.422	7017.815	9.81	77.976	33000000	0.323	*3.099*	2.308	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.184	2.758
0.5	0.6	0.3	30	15	0.422	7030.242	9.81	78.114	33000000	0.319	*3.130*	2.306	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.221	2.888
0.5	0.7	0.3	30	15	0.422	7045.319	9.81	78.281	33000000	0.317	*3.159*	2.304	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.251	2.918
0.5	0.8	0.3	30	15	0.422	7057.873	9.81	78.421	33000000	0.314	*3.186*	2.302	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.278	2.894
0.5	0.9	0.3	30	15	0.422	7070.484	9.81	78.561	33000000	0.312	*3.210*	2.300	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.301	2.841
0.5	1	0.3	30	15	0.422	7083.15	9.81	78.702	33000000	0.309	*3.232*	2.298	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.322	2.776
0.5	1.2	0.3	30	15	0.422	7108.64	9.81	78.985	33000000	0.306	*3.271*	2.294	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.357	2.640
0.5	1.4	0.3	30	15	0.422	7134.332	9.81	79.270	33000000	0.303	*3.303*	2.289	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.387	2.532
0.5	1.6	0.3	30	15	0.422	7160.214	9.81	79.558	33000000	0.300	*3.329*	2.285	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.411	2.464
0.5	1.8	0.3	30	15	0.422	7186.275	9.81	79.848	33000000	0.298	*3.351*	2.281	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.432	2.441
0.5	2	0.3	30	15	0.422	7212.506	9.81	80.139	33000000	0.297	*3.368*	2.277	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.451	2.460
0.5	0.5	0.33	30	15	0.422	7023.776	9.81	78.042	33000000	0.320	*3.125*	2.307	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.215	2.873
0.5	0.6	0.33	30	15	0.422	7037.39	9.81	78.193	33000000	0.316	*3.162*	2.305	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.252	2.842
0.5	0.7	0.33	30	15	0.422	7053.657	9.81	78.374	33000000	0.313	*3.195*	2.303	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.282	2.718
0.5	0.8	0.33	30	15	0.422	7067.395	9.81	78.527	33000000	0.310	*3.227*	2.300	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.309	2.547
0.5	0.9	0.33	30	15	0.422	7081.189	9.81	78.680	33000000	0.307	*3.256*	2.298	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.332	2.354
0.5	1	0.33	30	15	0.422	7095.036	9.81	78.834	33000000	0.305	*3.282*	2.296	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.353	2.154
0.5	1.2	0.33	30	15	0.422	7122.884	9.81	79.143	33000000	0.300	*3.329*	2.291	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.388	1.772
0.5	1.4	0.33	30	15	0.422	7150.928	9.81	79.455	33000000	0.297	*3.369*	2.287	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.417	1.440
0.5	1.6	0.33	30	15	0.422	7179.155	9.81	79.768	33000000	0.294	*3.402*	2.282	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.441	1.172
0.5	1.8	0.33	30	15	0.422	7207.556	9.81	80.084	33000000	0.292	*3.429*	2.278	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.462	0.970
0.5	2	0.33	30	15	0.422	7236.123	9.81	80.401	33000000	0.290	*3.452*	2.273	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.480	0.828
0.5	0.5	0.4	30	15	0.422	7037.589	9.81	78.195	33000000	0.313	*3.199*	2.305	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.278	2.459
0.5	0.6	0.4	30	15	0.422	7053.96	9.81	78.377	33000000	0.308	*3.250*	2.302	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.315	2.004
0.5	0.7	0.4	30	15	0.422	7072.988	9.81	78.589	33000000	0.303	*3.297*	2.299	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.345	1.477
0.5	0.8	0.4	30	15	0.422	7089.48	9.81	78.772	33000000	0.299	*3.341*	2.297	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.372	0.925
0.5	0.9	0.4	30	15	0.422	7106.026	9.81	78.956	33000000	0.296	*3.382*	2.294	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.395	0.373
0.5	1	0.4	30	15	0.422	7122.623	9.81	79.140	33000000	0.292	*3.421*	2.291	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.415	0.168
0.5	1.2	0.4	30	15	0.422	7155.965	9.81	79.511	33000000	0.286	*3.491*	2.286	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.450	1.179
0.5	1.4	0.4	30	15	0.422	7189.493	9.81	79.883	33000000	0.282	*3.552*	2.281	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.478	2.076
0.5	1.6	0.4	30	15	0.422	7223.196	9.81	80.258	33000000	0.277	*3.604*	2.275	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.501	2.854
0.5	1.8	0.4	30	15	0.422	7257.065	9.81	80.634	33000000	0.274	*3.650*	2.270	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.521	3.516
0.5	2	0.4	30	15	0.422	7291.091	9.81	81.012	33000000	0.271	*3.689*	2.265	2.240	0.538	0.106	-0.068	3.538	4.074
1.00	1	0.33	15	15	0.064	4119.255	9.81	68.654	33000000	0.253	*3.959*	3.826	2.240	0.538	0.106	-0.068	4.096	3.459
0.33	1	0.33	45	15	1.257	10526.083	9.81	87.717	33000000	0.391	*2.560*	1.671	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.706	5.693
0.25	1	0.33	60	15	2.885	14753.302	9.81	98.355	33000000	0.471	*2.124*	1.344	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.293	7.952
1.00	1	0.33	30	30	0.422	9433.793	9.81	78.615	33000000	0.422	*2.368*	2.299	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.462	3.963
0.67	1	0.33	45	30	1.257	13118.496	9.81	87.457	33000000	0.448	*2.234*	1.673	2.240	0.538	0.106	-0.068	2.203	1.398
0.50	1	0.33	60	30	2.885	17648.998	9.81	98.050	33000000	0.515	*1.941*	1.346	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.966	1.321
0.33	1	0.33	90	30	11.907	34730.586	9.81	144.711	33000000	0.639	*1.565*	1.001	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.621	3.570

Çizelge D.2 Detaylı doğal frekans hesabı ve hata oranları (devamı)

4	1.00	1	0.33	45	45	1.257	15712.051	9.81	87.289	33000000	0.577	*1.734*	1.675	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.793	3.413
	0.75	1	0.33	60	45	2.885	20547.251	9.81	97.844	33000000	0.581	*1.721*	1.348	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.686	2.086
	0.60	1	0.33	75	45	6.721	30202.773	9.81	125.845	33000000	0.624	*1.603*	1.161	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.593	0.585
	0.50	1	0.33	90	45	11.907	38960.724	9.81	144.299	33000000	0.681	*1.468*	1.002	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.464	0.315
	1.00	1	0.33	60	60	2.885	23447.185	9.81	97.697	33000000	0.714	*1.400*	1.349	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.444	3.192
	0.80	1	0.33	75	60	6.721	33905.101	9.81	125.574	33000000	0.689	*1.452*	1.162	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.409	2.986
	0.67	1	0.33	90	60	11.907	43195.68	9.81	143.986	33000000	0.735	*1.361*	1.003	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.321	2.900
	1.00	1	0.33	75	75	6.721	37607.397	9.81	125.358	33000000	0.820	*1.220*	1.163	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.246	2.082
	0.83	1	0.33	90	75	11.907	47430.976	9.81	143.730	33000000	0.816	*1.226*	1.004	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.192	2.737
	1.00	1	0.33	90	90	11.907	51666.649	9.81	143.518	33000000	0.947	*1.056*	1.005	2.240	0.538	0.106	-0.068	1.076	1.931
5	1.00	1	0.33	15	15	0.064	5146.331	9.81	85.772	33000000	0.259	3.866	3.423	2.240	0.610	0.106	-0.068	4.159	7.596
	0.50	1	0.33	30	15	0.422	9458.474	9.81	105.094	33000000	0.338	2.962	1.989	2.240	0.610	0.106	-0.068	3.094	4.441
	0.33	1	0.33	45	15	1.257	14479.403	9.81	120.662	33000000	0.444	2.250	1.425	2.240	0.610	0.106	-0.068	2.407	6.959
	0.25	1	0.33	60	15	2.885	20664.4	9.81	137.763	33000000	0.542	1.844	1.136	2.240	0.610	0.106	-0.068	2.000	8.432
	1.00	1	0.33	30	30	0.422	11800.659	9.81	98.339	33000000	0.422	2.372	2.056	2.240	0.610	0.106	-0.068	2.498	5.299
	0.67	1	0.33	45	30	1.257	17071.816	9.81	113.812	33000000	0.481	2.077	1.467	2.240	0.610	0.106	-0.068	2.102	1.166
	0.50	1	0.33	60	30	2.885	23560.096	9.81	130.889	33000000	0.571	1.750	1.166	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.813	3.616
	0.33	1	0.33	90	30	11.907	47836.612	9.81	199.319	33000000	0.729	1.372	0.853	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.441	5.013
	1.00	1	0.33	45	45	1.257	19665.371	9.81	109.252	33000000	0.575	1.738	1.497	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.819	4.685
	0.75	1	0.33	60	45	2.885	26458.349	9.81	125.992	33000000	0.614	1.629	1.188	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.633	0.261
	0.60	1	0.33	75	45	6.721	39734.298	9.81	165.560	33000000	0.671	1.491	1.012	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.499	0.564
	0.50	1	0.33	90	45	11.907	52066.749	9.81	192.840	33000000	0.820	1.219	0.867	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.349	10.627
	1.00	1	0.33	60	60	2.885	29358.284	9.81	122.326	33000000	0.713	1.403	1.206	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.465	4.430
	0.80	1	0.33	75	60	6.721	43436.626	9.81	160.876	33000000	0.719	1.391	1.027	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.377	0.942
	0.67	1	0.33	90	60	11.907	56301.706	9.81	187.672	33000000	0.791	1.264	0.879	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.259	0.364
	1.00	1	0.33	75	75	6.721	47138.922	9.81	157.130	33000000	0.818	1.223	1.039	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.263	3.231
	0.83	1	0.33	90	75	11.907	60537.002	9.81	183.445	33000000	0.845	1.184	0.889	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.173	0.908
	1.00	1	0.33	90	90	11.907	64772.675	9.81	179.924	33000000	0.945	1.058	0.898	2.240	0.610	0.106	-0.068	1.091	3.058
6	1.00	1	0.33	15	15	0.064	6173.407	9.81	102.890	33000000	0.259	3.859	3.125	2.240	0.646	0.106	-0.068	4.022	4.226
	0.50	1	0.33	30	15	0.422	11824.53	9.81	131.384	33000000	0.358	2.794	1.779	2.240	0.646	0.106	-0.068	2.848	1.919
	0.33	1	0.33	45	15	1.257	18432.723	9.81	153.606	33000000	0.478	2.093	1.263	2.240	0.646	0.106	-0.068	2.174	3.897
	0.25	1	0.33	60	15	2.885	26575.499	9.81	177.170	33000000	0.587	1.704	1.002	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.789	4.972
	1.00	1	0.33	30	30	0.422	14167.525	9.81	118.063	33000000	0.422	2.372	1.876	2.240	0.646	0.106	-0.068	2.414	1.791
	0.67	1	0.33	45	30	1.257	21025.136	9.81	140.168	33000000	0.503	1.980	1.322	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.967	1.113
	0.50	1	0.33	60	30	2.885	29471.195	9.81	163.729	33000000	0.606	1.650	1.042	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.668	1.134
	0.33	1	0.33	90	30	11.907	60942.638	9.81	253.928	33000000	0.785	1.274	0.756	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.301	2.120
	1.00	1	0.33	45	45	1.257	23618.691	9.81	131.215	33000000	0.575	1.738	1.366	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.758	1.151
	0.75	1	0.33	60	45	2.885	32369.448	9.81	154.140	33000000	0.635	1.575	1.074	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.542	2.121
	0.60	1	0.33	75	45	6.721	49265.823	9.81	205.274	33000000	0.706	1.417	0.909	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.393	1.658
	0.50	1	0.33	90	45	11.907	65172.775	9.81	241.381	33000000	0.803	1.245	0.775	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.241	0.334
	1.00	1	0.33	60	60	2.885	35269.382	9.81	146.956	33000000	0.713	1.403	1.100	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.415	0.875
	0.80	1	0.33	75	60	6.721	52968.152	9.81	196.178	33000000	0.739	1.353	0.930	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.306	3.477
	0.67	1	0.33	90	60	11.907	69407.732	9.81	231.359	33000000	0.827	1.210	0.792	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.178	2.597
	1.00	1	0.33	75	75	6.721	56670.447	9.81	188.901	33000000	0.817	1.224	0.948	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.219	0.341
	0.83	1	0.33	90	75	11.907	73643.028	9.81	223.161	33000000	0.864	1.157	0.806	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.115	3.599
	1.00	1	0.33	90	90	11.907	77878.7	9.81	216.330	33000000	0.944	1.059	0.819	2.240	0.646	0.106	-0.068	1.053	0.525

Ortalama	3.469
Maximum	14.080
Minimum	0.168

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin SAĞLIK

Doğum Tarihi ve Yeri : 22.07.1992, Ankara

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : huseyinsaglik20@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2014
Lise	Sayısal	Alparslan Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2017-Halen	Gelişim Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2015-2017	Gelişim Proje İnşaat	Proje Mühendisi
2015-2015	Mast Metal	Üretim Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Huseyin Saglik, Bilge Doran ve Can Balkaya, (2018).”Investigation of Natural Frequency for Continuous Steel Bridges with Variable Cross-sections by using Finite Element Method”, International Journal of Engineering Technologies, Accepted for 4(1).