

**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU OLARAK MODELLENEN
KABLOLU KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

Abdurrahman ÇELİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2010

ANKARA

Abdurrahman ÇELİK tarafından hazırlanan İKİ VE ÜÇ BOYUTLU OLARAK MODELLENEN KABLOLU KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof.Dr. Mehmet Emin TUNA

Mimarlık Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof.Dr. Tekin GÜLTOP

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 25/05/2010

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Abdurrahman ÇELİK

**İKİ VE ÜÇ BOYUTLU OLARAK MODELLENEN
KABLOLU KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Abdurrahman ÇELİK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

May 2010

ÖZET

Bu tez çalışmasında, kablolu köprülerin modal ve dinamik analizlerinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu bilgisayar modellemelerinin doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması sonlu elemanlar yöntemi ile yapılarak, sonuçların gerçek yapı davranışına uyumluluğunun değerlendirilmesi planlanmıştır.

Gerçek bir yapı sistemi olan Quincy Bayview kablolu köprüsü model olarak alınmış, bu köprü, yapı elemanlarının kütle ve rijitlikleri göz önüne alınarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak modellenmiştir. İlk model, 2 boyutlu yapılmış olup diğer iki model 3 boyutlu olarak düşünülmüştür. 3 boyutlu modellerin ilkinde tabliye çerçeve elaman ve buna bağlı rijit elemanlarla tasarlanmış, diğerinde ise tabliye plak olarak modellenmiştir. Burada hem 2 boyutlu modellerle 3 boyutlu modellerin karşılaştırılması yapılmış, hem de 3 boyutlu modellerde kullanılan rijit elemanların modelleme sırasında yapı davranışını ne kadar yansıtabildiği irdelenmiştir. Modeller SAP2000 programında hazırlanmış olup, ADINA sonlu elemanlar programı ile hazırlanan 3 boyutlu model ile sonuçların doğruluğu sorgulanmıştır.

Çalışma sonucunda 2 ve 3 boyutlu modellerin yakın sonuçlar vermiş olduğu görülmüş olsa da, gelişen bilgisayar teknikleri ile 3 boyutlu modellemelerin daha etkin ve gerçek yapı davranışına yakın sonuçlar verebildiği gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 911.1.029
Anahtar Kelimeler : Kablolu Köprüler, Modal Analiz, Dinamik Analiz, 2 ve 3 Boyutlu Modelleme
Sayfa Adedi : 76
Tez Yöneticisi : Doç.Dr. Kurtuluş SOYLUK

**COMPARISON OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF CABLE-STAYED
BRIDGES WHICH ARE MODELLED AS 2 AND 3 DIMENSIONAL**

(M. Sc. Thesis)

Abdurrahman ÇELİK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2010

ABSTRACT

In this thesis, it is aimed to compare natural frequencies and mode shapes of cable stayed bridges obtained from modal analysis for 2 and 3 dimensional finite element computer models and to evaluate the closeness of the results to real life structural behavior.

Quincy Bayview Bridge is taken as a real life structure and 2 and 3 dimensional models are performed by considering the masses and rigidities of structural elements. First model is considered as 2 dimensional and the other two are modeled as 3 dimensional. While in the first model of 3 dimensional models, the deck is modeled by frame elements and connecting rigid links to reflect the deck behavior, in the other model the deck is defined by shell elements. In this thesis, not only comparison of 2 and 3 dimensional models are performed but also it is examined that how effectively the rigid links can reflect the real structural behavior. Models are analyzed with SAP2000 computer analysis program, and also an additional 3 dimensional model is prepared with ADINA finite element program for comparison of the results.

At the end of the study, even though the 2 dimensional and 3 dimensional models have yielded close results, it is observed that with the developing

computer technologies, 3 dimensional models yield more effective and close solutions to real life structural behavior.

Science Code : 911.1.029

Key Words : Cable Stayed Bridges, Modal Analysis, Dynamic Analysis, 2D and 3D Modeling

Page Number: 76

Adviser : Assoc.Prof.Dr. Kurtuluş SOYLUK

TEŞEKKÜR

Köprülerde hareketli yüklerin hızlarının dinamik etkilerinin analizi ve modellenmesi konulu çalışmaya beni yönlendiren, çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla ben yönlendiren Hocam Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK'a, bilgisayar modellemeleri konusunda tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Abdüssamet ARSLAN hocama ve çalışmalarım süresince beni sabırla destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KABLOLU KÖPRÜLER	2
2.1. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	8
2.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	13
2.3. Önemli Kablolü Köprüler	14
2.3.1. C.J. Loescher.....	14
2.3.2. Stonecutters Köprüsü	14
2.3.3. Sutong Köprüsü	15
2.3.4. Millau Viyadüğü	15
2.3.5. Tatara Köprüsü.....	16
2.3.6. Rion Antirion Köprüsü	17
2.4. Kablolü Köprü Tipleri ve Yapı Elemanları.....	19
2.4.1. Kablo Düzeni	19

Sayfa

2.4.2. Kablo - Kule Bağlantısı	20
2.4.3. Kule Tasarımları	21
2.4.4. Üstyapı Tabliye Kesitleri	22
2.4.5. Kablolar.....	24
2.5. Kablolü Köprülerde Analiz ve Modelleme Yöntemleri.....	25
2.5.1. Analiz Yöntemi.....	25
2.5.2. Modelleme Yöntemi	28
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR	31
3.1. Quincy Baywiew Köprüsü	31
3.2. Hesaplamalar ve Modelleme	35
3.2.1. Kule Elemanları	35
3.2.2. Kablolar.....	35
3.2.3. Tabliye	36
3.2.4. Sınır Şartları	37
3.3. Modeller	37
3.3.1. Model 1: 2 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	37
3.3.2. Model 2: 3 Boyutlu, Rijit Bağlantılı Tabliye	41
3.3.3. Model 3: 3 Boyutlu Plak Tabliye	42
3.3.4. ADINA ile Oluşturulan 3 Boyutlu Kontrol Modeli	43
4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	45
4.1. Model 1: 2 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli sonuçları.....	45
4.2. Model 2: 3 Boyutlu Rijit Bağlantılı Tabliye	49
4.3. Model 3: 3 Boyutlu Plak Tabliye	53

	Sayfa
4.4. Kontrol Modeli.....	59
4.5. Dinamik Analiz	64
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı önemli kablolu köprüler (1960 – 1990 yılları arası).....	3
Çizelge 2.2. Bazı önemli kablolu köprüler (1990 – 2000 yılları arası).....	4
Çizelge 2.3. Bazı önemli kablolu köprüler (2000 – 2010 yılları arası).....	5
Çizelge 3.1. Kablo kesit alanları	35
Çizelge 3.2. Kablo grupları	35
Çizelge 4.1. Model 1: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar	49
Çizelge 4.2. Model 2: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar	53
Çizelge 4.4. ADINA Kontrol Modeli: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar.....	63
Çizelge 4.5. Spektrum karakteristik periyotları (T_A , T_B).....	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Açıklığı 300 m. ve üzerindeki kablolu köprülerin özeti (1960-2010)	6
Şekil 2.2. Tekil düzlemde yerleşim.....	19
Şekil 2.3. İkili düzlemde yerleşim.....	20
Şekil 2.4. Üçlü düzlemde yerleşim	20
Şekil 2.5. Kablo - kule bağlantıları a) Yalpaze b) Paralel c) Radyal	21
Şekil 2.6. Kule tipleri	22
Şekil 2.7. Çelik tabliye tipleri	22
Şekil 2.8. Kutu kesitli çelik tabliye tipleri	23
Şekil 2.9. Beton Tabliye kesitleri.....	23
Şekil 2.10. (a) Çelik tel (b) Tel grubu (c) Çelik halat (Kablo).....	24
Şekil 2.11. Kablo sehim ve anlık elastisite modülü hesabı.....	27
Şekil 2.12. Elastomer mesnet ve köprü mesnedinde kullanılışı.....	29
Şekil 3.1. Quincy Bayview köprüsünün boyutları (m)	32
Şekil 3.2. Tabliye kesiti boyutları (cm).....	32
Şekil 3.3. Kule boyutları (m) ve kesitleri (cm)	33
Şekil 3.4. Kabloların numaralandırılması	34
Şekil 3.5. Modellerde kullanılacak olan tabliye kesitleri (cm)	36
Şekil 3.6. Model 1: 2 Boyutlu çerçeve elemanlar	38
Şekil 3.7. Kule ayaklarının eşdeğer atalet momentinin bulunması.....	38
Şekil 3.8. Model 1: 2 Boyutlu model, eşdeğer eleman kalınlıkları ile.....	39
Şekil 3.9. Batı Kulesi ve tabliye birleşim noktası detayı	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.10. Doğu Kulesi ve tabliye birleşim noktası detayı	40
Şekil 3.11. Model 2: 3 Boyutlu rijit bağlantılı tabliye modeli	41
Şekil 3.12. Tabliyenin payanda ve kule ile birleşimi	42
Şekil 3.13. Model 3: 3 Boyutlu plak tabliyeli model	43
Şekil 3.14. ADINA 3 Boyutlu model.....	44
Şekil 4.1. Model 1: Mod şekilleri.....	45
Şekil 4.1. (Devam) Model 1: Mod şekilleri	46
Şekil 4.1. (Devam) Model 1: Mod şekilleri	48
Şekil 4.2. Model 2: Mod şekilleri.....	50
Şekil 4.2. (Devam) Model 2: Mod şekilleri	51
Şekil 4.2. (Devam) Model 2: Mod şekilleri	52
Şekil 4.3. Model 3: Mod şekilleri.....	53
Şekil 4.3. (Devam) Model 3: Mod şekilleri	54
Şekil 4.3. (Devam) Model 3: Mod şekilleri	55
Şekil 4.3. (Devam) Model 3: Mod şekilleri	56
Şekil 4.4. Modların periyotlarının karşılaştırılması	58
Şekil 4.5. ADINA kontrol modeli, mod şekilleri.....	60
Şekil 4.5. (Devam) ADINA kontrol modeli, mod şekilleri.....	61
Şekil 4.5. (Devam) ADINA kontrol modeli, mod şekilleri.....	62
Şekil 4.6. ADINA Kontrol modelinin periyot değerlerinin karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.7. Dinamik analizde kullanılan tepki spektrumu.	65
Şekil 4.8. Model 1, Dinamik analiz (X Doğrultusunda)	65
Şekil 4.9. Model 2, Dinamik analiz (X Doğrultusunda)	66

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Model 3, Dinamik analiz (X Doğrultusunda)	66
Şekil 4.11. Model 2, Dinamik analiz (Y Doğrultusunda)	66
Şekil 4.12. Model 2, Dinamik analiz (Y Doğrultusunda)	66
Şekil 4.13. Model 3, Dinamik analiz (Y Doğrultusunda)	67
Şekil 4.14. Tabliye düşey deplasmanları – Tüm modeller (Dinamik analiz).....	67
Şekil 4.15. Kule yatay deplasmanları - Bütün modeller için (Dinamik analiz)	68

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. İlk kablolu köprü örneklerinden C.J Loescher tasarımı (Almanya)	14
Resim 2.2. Stonecutters Köprüsü (Hong Kong)	14
Resim 2.3. Sutong Köprüsü (Çin)	15
Resim 2.4. Millau Viyadüğü (Fransa)	16
Resim 2.5. Tatura Köprüsü (Japonya)	17
Resim 2.6. Rion Antirion Köprüsü (Yunanistan)	18
Resim 3.1. Quincy Bayview Köprüsü (A.B.D.)	31

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Kesit Alanı
d	Deformasyon
E	Elastiklik Katsayısı
I_{xx}	(x) Eksenine Atalet Momenti
K	Rijitlik matrisi
K_E	Elastik Rijitlik Matrisi
K_G	Geometrik Rijitlik Matrisi
L	Boy
MPa	Mega Pascal
P	Kuvvet
T	Çekme Gerilmesi
U_x	(x) Yönündeki deplasman
θ_y	(y) Yönündeki dönme
w	Birim Ağırlık

Kısaltmalar	Açıklama
ASCE	American Society of Civil Engineers

1. GİRİŞ

Uzun açıklıkları en az sayıda ayak ile geçmek amacıyla inşa edilen ve estetik açıdan güzel tasarımlar sunabilen kablolu köprülerin ilk örnekleri 1950'lerde görülmüş olup günümüzde 1 km.'ye yaklaşan açıklıklarda ve çok daha fazla sayıda inşa edilmektedir. İnşasının nisbeten kolay ve hızlı olmasıyla tercih edilen kablolu köprülerin statik olduğu kadar dinamik davranışlarının incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, günümüzde, bahsedilen kablolu köprülerin bilgisayar destekli olarak modelleri üretilerek, gerçek davranışının ortaya konulabilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

Bu modellemelerde, aşırı deplasmanlar gösteren kablolar nedeniyle lineer olmayan analize ihtiyaç duyulmakta, mesnet şartlarının modelde yansıtılabilmesi için uygun matematiksel ve analitik benzeştirmeler yapılması gerekmektedir. Günümüzdeki gibi gelişmiş bilgi işlem kapasiteleri bulunan bilgisayarların yaygın olmadığı dönemlerde, bu tip modeller, yapıyı 2 boyuta indirgeme veya bazı elemanların eşdeğer elemanlar şekline dönüştürülmesiyle daha kolay hesaplanabilir düzeye getirilmekteydi.

Bu tezde bilgisayar destekli modellemelerden 2 ve 3 boyutlu modeller ele alınacak olup, yapılan yaklaşımların doğruluğu sorgulanacaktır.

2. KABLOLU KÖPRÜLER

Taşıyıcı sistemi kablolarla desteklenen köprü sistemleri genel olarak asma köprüler ve kablolu köprüler diye iki gruba ayrılır. Köprü tabliyesindeki düşey yükler kablolar yardımıyla bir veya birden fazla ayağa aktarılarak taşınır. Asma köprülerde yük aktarımı, tabliyeyi taşıyan belirli aralıklardaki dikey kabloların, iki veya daha fazla ayak arasına gerilen bir ana kabloya bağlanmasıyla yapılır. Kablolu köprülerde ise tabliyeyi taşıyan kablolar, yatayla belirli açılarla ayaklara direkt bağlanarak yük aktarımı sağlanır. Kablolu köprüler, uzun açıklıkları geçebilmesi nedeniyle, köprü yapılacak yerin ayak yapımına elverişli olmaması durumunda tercih edilir. Ayrıca ayak yapımına uygun olmayan geniş vadilerde inşa edilecek otoyol geçişlerinde, deniz trafiği yapılan yerlerde, köprü ayaklarıyla geçişleri engellemek amacıyla, su düzeyinin ayak yapımını zorlaştırdığı geniş nehir geçişlerinde kablolu köprüler uygun çözümler sunabilmektedir.

Geçmiş 18. yy.a uzanan kablolu köprüler, uzun açıklıkları geçmedeki etkinliğiyle son 50 yılda daha fazla tercih edilmiş ve daha geniş açıklıklı köprüler yapılmıştır. 1784 yılında Alman ahşap ustası C.J. Loescher kablolu köprülerin ilk örneklerinden sayılabilecek 32 m açıklıklı ahşap köprüyü inşa etmiştir. İlk inşa edilen kablolu köprüler, asma köprülere benzer melez köprüler şeklinde imal edilmiş olup sonraları farklı bir tasarım olarak asma köprülerden ayrılmıştır. İlk zamanlarda kablolu köprülerin yüksek hiperstatikliğinden dolayı yapı davranışı tam olarak irdelenememiş ve yıkılan örnekler olmuştur. Analiz yöntemlerinin kısıtlılığından ve yanlış malzeme kullanımından kaynaklanan bu yıkımlar, mühendisleri kablolu köprülerin inşasından uzaklaşma yoluna götürmüştür. Kablolu köprü mantığına ters bir biçimde kablo amacıyla kullanılan demir çubuk veya zincirler daha sonraları yerini gerginleştirilmiş çelik kablolarla bırakarak, yapının gerçek davranışına uygun bir hale gelmesini sağlamıştır. Bu aşamada kablolu köprüler üzerinde çalışan Navier, asma köprü yapımını önererek köprülerde kablo kullanımının tekrar yaygınlaşmasına önayak olmuştur. Tasarımcıları kablolu köprü yapımına iten diğer sebepler; bu köprülerin estetik açıdan hoş görünmesi, yapım kolaylığı ve ekonomik açıdan daha uygun oluşudur. Modern kablolu köprüler ilk olarak Alman mühendisler tarafından

2. Dünya Savaşı sonrası ekonomik ve nispeten kolay inşasıyla sosyal ihtiyaçları karşılaması amacıyla tercih edilmiş daha sonra diğer ülkelerde de yapılmaya başlanmıştır. Tasarım ve yapım tekniklerinin gelişmesi ile 1955’lerden sonra kablolu köprü yapımı hız kazanmıştır.

Çizelge 2.1. Bazı önemli kablolu köprüler (1960 – 1990 yılları arası)

Yıl	Köprü Adı	Bulunduğu Ülke	Açıklık m	Açıklık Adedi
1961	Severinsbrücke	Almanya	302	1
1969	Rheinkniebrücke	Almanya	319	1
1970	Duisburg-Neuenkamp	Almanya	350	2
1971	Ersine	İngiltere	305	2
1972	Nový Most	Slovakya	303	1
1974	Köhlbrandbrücke	Almanya	325	2
1977	Brotonne	Fransa	320	2
1978	Rande	İspanya	400	2
	West Gate	Avustralya	336	2
	Zárate-Brazo Largo 1	Arjantin	330	2
	Zárate-Brazo Largo 2	Arjantin	330	2
1979	Flehe	Almanya	368	1
1981	Tjörn	İsveç	386	2
	Shroud	Litvanya	312	1
1983	Carlos Fernández Casado	İspanya	440	2
	Luling	A.B.D.	376	2
1985	Meiko Nishi	Japonya	406	2
1986	Alex Fraser	Kanada	465	2
1987	Rama IX	Tayland	450	2
	Sunshine Skyway	A.B.D.	365.8	2
1988	Hitsuishijima	Japonya	420	2
	Iwakurojima	Japonya	420	2
	Tampico	Meksika	360	2
1989	Yokohama	Japonya	460	2
	Dames Point	A.B.D.	396	2
1990	Sky	Kanada	340	2
	Talmdge Memorial	A.B.D.	335	2
	San Roque González	Arjantin-Paraguay	330	2
	Beeckenwerther Brücke	Almanya	310	2

Daha önceleri ortalama 300 ila 500 m açıklıklar için tasarlanan bu köprüler son yıllarda gelişen bilgisayar teknikleri ile yapı davranışına daha uygun modellemelerin yapılması ve yapı malzemelerinin özellikle kullanışlı çelik kabloların üretilmesiyle

daha uzun açıklıklara uygun köprüler inşa edilmeye başlanmıştır. 1960'lı yıllarda açıklığı 300 m'yi geçen kablolu köprü sayısı 2-3 civarındayken, 1970'lerde 10'larcası inşa edilmiş daha sonraki yıllarda artarak devam etmiştir. (Çizelge 2.1.)

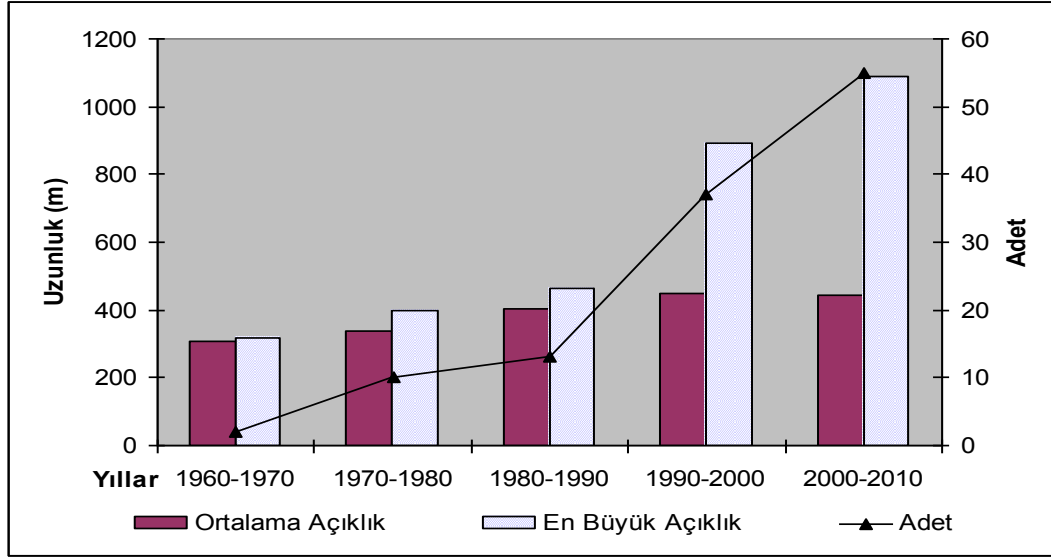
Çizelge 2.2. Bazı önemli kablolu köprüler (1990 – 2000 yılları arası)

Yıl	Köprü Adı	Bulunduğu Ülke	Açıklık	Açıklık Adedi
			m	
1991	Skarnsund	Norveç	530	2
	Ikuchi	Japonya	490	2
	Queen Elizabeth II	İngiltere	450	2
	Helgeland	Norveç	425	2
	Nanpu	Çin	423	2
	Guadiana International	İspanya-Portekiz	324	2
1992	Higashi Kobe	Japonya	485	2
	Vidyasagar Setu	Hindistan	457.2	2
1993	Yangpu	Çin	602	2
	Karnali River	Nepal	325	2
	Mezcala	Meksika	311	3
1994	Tsurumi Tsubasa	Japonya	510	2
	Yunyang	Çin	414	2
1995	Pont de Normandie	Fransa	856	2
	Chongqing 2. Yangtze	Çin	444	2
	Tongling	Çin	432	2
	2. Wuhan Yangtze	Çin	400	2
	Fred Hartman	A.B.D.	381	2
1996	2. Severn	İngiltere	456	2
	ANZAC	Avustralya	345	2
	Grenland	Norveç	305	1
1997	Xupu	Çin	590	2
	Kap Shui Mun	Hong Kong	430	2
	Meiko Nishi	Japonya	405	2
	Batam-Tonton	Endonezya	350	2
1998	Meiko-Chuo	Japonya	590	2
	Ting Kau	Hong Kong	475	3
	Vasco da Gama	Portekiz	420	2
	Panyu	Çin	380	2
1999	Qiao	Çin	320	2
	Tatara	Japonya	890	2
	Queshi	Çin	518	2
	Øresund	Danimarka-İsveç	490	2
2000	Baishazhou	Çin	618	2
	Seohae	Güney Kore	470	2
	Uddevalla	İsveç	414	2
	Surgut	Rusya	408	2
	Wadi Laban	Suudi Arabistan	405	2
	Mỹ Thuận	Vietnam	350	2
	Wuhu Yangtze	Çin	312	2

Çizelge 2.3. Bazı önemli kablolu köprüler (2000 – 2010 yılları arası)

Yıl	Köprü Adı	Bulunduğu Ülke	Açıklık m	Açıklık Adedi
2001	2. Nanjing Yangtze	Çin	628	2
	Qingzhou	Çin	605	2
	Suez Canal	Mısır	440	2
	Masangxi	Çin	360	2
	Yiling	Çin	348	2
2002	Jingzhou Yangtze River	Çin	500	2
	Ehuang	Çin	480	2
	William H. Natcher	A.B.D.	366	2
	Rio Guamà	Brezilya	320	2
	Dongting Lake	Çin	310	2
	Dubrovnik	Hırvatistan	304	1
	Rama VIII	Tayland	300	1
2003	Taoyaoen	Çin	560	2
	Sidney Lanier	A.B.D.	381	2
	Bill Emerson Memorial	A.B.D.	350.2	2
	Rosario-Victoria	Arjantin	330	2
2004	Rio-Antirio	Yunanistan	560	4
	Badong	Çin	388	2
	Big Obukhovsky	Rusya	382	2
	Millau	Fransa	342	7
	Centennial	Panama	320	2
2005	Third Nanjing Yangtze	Çin	648	2
	Anqing	Çin	510	2
	Arthur Ravenel Jr.	A.B.D.	471.2	2
	Yahagigawa	Japonya	470	2
	Donghai	Çin	420	2
	North Runyang	Çin	406	2
	Solidarity	Polonya	375	2
	Liberty	Sırbistan	351	2
2006	Megami	Japonya	480	2
	Zhanjiang Bay	Çin	480	2
	Bai Chay	Vietnam	435	2
	Mega (II)	Tayland	398	2
	Penobscot Narrows	A.B.D.	354	2
	Mega (I)	Tayland	326	2
2007	Kanchanaphisek	Tayland	500	2
	Fuling	Çin	450	2
	Fourth Xiangtan	Çin	400	2
	Mauricio Báez	Dominik Cumh.	390	2
2008	Hangzhou Bay	Çin	448	2
	Huangpu	Çin	383	2
	Sutong	Çin	1088	2
	Megyeri	Macaristan	300	2
2009	Stonecutters	Hong Kong	1018	2
	Bandra-Worli Sea Link	Hindistan	600	2
	Suramadu	Endonezya	434	2

90'lar ve 2000'li yıllarda ise kablolu köprülerde hem adet olarak hem de açıklık uzunluğu olarak artış gözlenmiştir. (Çizelge 2.2, 2.3) Açıklık uzunluğu 300 m'nin üzerinde olan önemli köprülerin listelendiği yukarıdaki listelerin özeti Şekil 2.1'de özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Açıklığı 300 m. ve üzerindeki kablolu köprülerin özeti (1960-2010)

Şekil 2.1'deki özet grafikten anlaşılabacağı gibi 1980lerden sonra kablolu köprü yapımı hızla artmış, gelişen yapım tekniklerine bağlı olarak ortalama açıklıklar artmış, hatta ortalamaların çok üstünde köprülerin yapımına gidilmiştir.

Kablolu köprülerin tercih edilmesindeki ana etmenler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Hızlı ve kolay bir yapım imkânı sağlaması: Diğer köprü tiplerinde yapım esnasına köprü son halini alana kadar geçici yapım elemanlarına ihtiyaç duyar. Kablolu köprülerde bu ihtiyaç ekstra kullanılan birkaç gergi kablosundan ibarettir. Yani köprü yapılırken nasılsa son hali de buna yakındır.
- Yapı malzemelerinin çoğunun etkin olarak kullanılması: Kablolu köprülerin daha sonra detaylı açıklanacak olan yapı elemanları; yüksek dayanımlı çelik kablolar, beton veya çelikten üretilmiş kuleler ve tabliye şeklindedir. Tabliyede öngermeli çelik halat kullanımına da uygundur. Görüldüğü üzere

çok geniş yapı malzemesi ve yapım imkânı sunması açısından kablolu köprüler tasarımcılara çok çeşitli seçenekler sunar

- Asma köprülerden daha yüksek dayanım sağlamak: Kablo destekli köprüler göz önüne alındığında kablolu köprülerin tabliyesi kablolar yardımıyla direkt kulelere bağlandığından daha az kablo deformasyonu ile tabliyeye daha yüksek bir dayanım sağlar.
- Estetik yapı: Asma köprüler, narin yapı elemanları ve değişik kablo düzeni, kule tipi seçimiyle elde edilebilecek geniş yapım şekilleri ile yapıldığı ortama tam uyum sağlayabilen estetik bir görüntü sağlarlar.
- Nispeten narin kesitli yapı elemanlarına ihtiyaç duyması: Narin yapı elemanlarına ihtiyaç duymasının yanı sıra, asma köprülerde olduğu gibi yatay kuvvetleri köprü uçlarında zemine ankrajlama ihtiyacı olmadığından fazladan büyük temel yapılarına ihtiyaç duymazlar.

Yapılan çalışmalara göre, kablolu köprülerin yapımının ekonomik olması açısından açıklıkların kule yüksekliğine oranı ve kablo adedi arasında belli etkileşimler olduğu gözlenmiştir. 3 açıklıklı simetrik köprülerde merkez açıklığın toplam uzunluğa oranının %55 olduğu, simetrik olmayan 2 açıklıklı köprülerde ise büyük açıklığın küçük açıklığa oranının, toplam uzunluğun %60-70'i civarında olduğu sonucuna varılmıştır.

Günümüzde yüksek hiperstatiklik derecesinde olan kablolu köprülerin çözümünün kolaylaşması ve yüksek dayanımlı çelik kabloların üretilmesiyle, istenen sayı ve şekillerde kablo kullanımına imkân sağlanmış, tabliyelerdeki trafik ve çevresel yükleri karşılayabilecek tasarımlar yapılabildiği için açıklıklar artmıştır. Bu artan açıklık çoklu kablo kullanımı ile sağlandığından daha düşük tabliye derinlikleri kullanılabilmiştir. Bu yönelim, tasarım esnasında çevresel dinamik yüklerin yani tabliyelerdeki trafik yükleri, rüzgâr ve deprem yüklerinin önemimi artırmıştır. Kablolu köprüler bu şekilleriyle diğer yapılardan farklı bir dinamik etkileşim sınıfı oluşturduğu için bu etkileşimin en doğru bir şekilde algılanıp, en uygun analiz prosedürleri ve gerçeğe en yakın matematiksel modellerle çalışılması gerekmektedir.

2.1. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Literatür taraması yapıldığında kablolu köprüler hakkında birçok çalışma yapıldığı gözlenmiştir. Kablolu köprülerin analizinin tarihsel gelişimi incelenmiş, kablolarda, ankraj yöntemlerinde, çelik tabliye ve öngerilmeli beton kullanımındaki teknik gelişmelerin kablolu köprü yapımında etkili olduğu belirlenmiştir. Bu köprülerin yapımında en etkili 3 faktörün; ekonomi, yapım/servis performansı ve estetik olduğu görüşü dile getirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Quincy Bayview köprüsünün yapımında, kablolar, I kesitli çelik kirişler ve öndöküm ardgermeli beton tabliye elemanlarını bir arada barındıran A.B.D'de inşa edilen ilk köprü olduğu vurgulanmıştır [1, 2].

Benzer şekilde Troitsky, yüksek dayanımlı çelik kablolar, ortotropik tabliye, kaynak teknolojisi ve yapısal analizdeki gelişmelerin son dönem kablolu köprülerin yapımına çok büyük etkisi olduğu görüşündedir. Ayrıca kablolu köprülerdeki lineer olmayan davranışın, kablolar ve kulelerden kaynaklandığını söylemiştir. Kablolardaki lineer olmayan davranışın, kablonun tabliye yükünü almasıyla birlikte ilk yaptığı sehimin azalması ve kabloda görülen uzama ile buna bağlı olan çekme gerilmesinin etkili olduğunu belirtmiştir. Bu davranışı analizlere yansıtabilmek için, kablonun elastiklik katsayı ile eksenel yükü beraber ele alan eşdeğer elastisite modülü kullanımını önermiştir [3].

Bir çalışmaya göre Heins, 183 m'lik orta açıklık ve 74,7 m'lik iki yan açıklığa sahip modern anlamdaki ilk kablolu köprünün 1955 yılında Alman mühendisler tarafından İsveç Stromsund'da yapıldığını belirlemiştir [4]. Başka bir çalışmada ise kablolu köprülerin çoğunlukla 250m ile 1500 m arasında inşa edildiği, bu aralığın da bütün köprü tipleri içindeki açıklıkların 5/6'sına karşılık geldiği belirlenmiştir [5].

Günümüz itibariyle kablolu köprülerde normal yüklere karşı makul tasarımlar yapılabilmeyle birlikte, henüz çok büyük depremlerle karşılaşmadığı için depremde yapının nasıl davranacağı konusunda çok detaylı bilgiler bulunmamaktadır. Bu yüzden gerçeğe yakın modellerin tasarlanarak olası büyük depremlerin en az hasarla

atlatılmaya çalışılması gerekmektedir. Depreme dayanıklı tasarım çalışmaları depreme karşı olduğu kadar, ileride yapımı düşünülen daha uzun açıklıkların tasarımı için de gereklidir. Çok yönlü depreme tasarım ilkelerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda, uzun açıklıklı köprülerin dinamik karakteristiğiyle ilgili belirlenen aşağıdaki bilgiler göz önünde bulundurulmalıdır.

- Uzun açıklıklı kablolu köprülerin temel salınım periyodu genellikle 2 ila 5 saniye arasında değişir. Bu nispeten uzun periyotlar köprü yapılarının yüklemeler altında yüksek deformasyonlar yapabildiğini gösterir.
- Uzun açıklıklı kablolu köprüler, genelde yumuşak zeminler üzerinde inşa edilir. Zeminin doğal periyodunun yapının doğal periyoduna yakın olması durumunda, zemin ve yapı arasındaki dinamik etkileşimin ayrıca ele alınması gerekir.
- Sönümlenme katsayısı kablolu köprülerde diğer köprülere nispeten az olan %1-2 civarındadır [6,7].
- Kablolu köprüler, her biri farklı bir salınım karakteristiği olan kuleler, kablolar ve asılı bir tabliyeden oluşur. Bütün bir yapının deprem etkisiyle yaptığı salınım ise bütün bu elemanların salınımlarının bileşimi şeklindedir.

ASCE (American Society of Civil Engineers) Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu'nun kablolu köprüler üzerinde yaptığı araştırmalar sonucu, hem kulelerin hem de tabliyenin basınca çalışan elemanlar olduğu, bunun yanında bu elemanların önemli ölçüde eğilme gerilmelerine sahip olduğu ifade edilmiştir. Bu iki gerilme tipi P-Delta (Δ) etkisi denilen geometrik lineer olmayan davranış şeklinde ekstra gerilmelere sebep olmaktadır. Wang, bu lineer olmayan davranışların, kolon-kiriş etkisi, kablo sehim ve elemanlardaki büyük yer değiştirmelerden kaynaklandığını ortaya koymuştur [8].

Kindmann, yaptığı çalışma sonucu, önceleri asma köprü şeklinde tasarlanan açıklıkların günümüzde etkin olarak kablolu köprü şeklinde yapıldığını ifade etmiştir. Günümüzde teknik ve ekonomik olarak kablolu köprülerin 1500 m açıklıklarda inşa edilmesi uygun görülmektedir [9].

Nazmy, ise bu konuda, orta açıklığı 450 m'ye kadar olan köprülerde lineer dinamik analiz yeterli olduğu halde, bu açıklığın üstündeki yapılarda, şiddetli sarsıntılarda ortaya çıkacak olan büyük deplasmanların etkisini hesaplayabilmek için lineer olmayan dinamik analiz yapısı gerektiğini belirtmiştir [10].

Kablolu köprülerin analizi konusunda çalışma yapan Kawashima, yapının kütle ve rijitliğinin uygun olarak dağılımı yapıldığında, lineer analizle, doğal frekans ve mod şekillerinin, kabul edilebilir doğrulukta hesaplanabildiğini söylemiştir. Ayrıca kablolu köprülerin sismik hareketlere tepkisinin çoğunlukla sönümlenme oranına bağlı olduğunu ve hesabın doğruluğunun sönümlenme oranının doğru ele alınmasına bağlı olduğunu ifade etmiştir [11].

Son yıllarda yapılan çalışmaların önemli bir kısmı kablolu köprülerde trafik yüküne bağlı dinamik etkiler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu kirişli plak köprüler üzerinde yapılmış olup, çok azı ise araçların köprüye çarpması konusu üzerine olmuştur [12].

Wilson, tarafından yapılan çalışmada, rüzgâr ve trafik yükleri gibi düşük seviye dinamik etkilerle karşılaştırıldığında, lineer elastik sonlu elemanlar yönteminin, yapının karmaşık dinamik davranışını büyük bir ölçüde ortaya koyabildiğinin görüldüğü belirtilmiştir [13].

Kablolar üzerinde yapılan çalışmaya göre, kablolu köprülerde açıklıkların artmasıyla yüksek dayanımlı ve büyük çaplarda kabloların kaçınılmaz olacağı, buna rağmen çoğu kablolu köprünün çoklu kablo sistemiyle inşa edildiği belirtilmiştir [14].

Kablolu köprülerin konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkileri açıklamak amacıyla Diri, LARSA 2000 sonlu eleman programı ile lineer olmayan analiz yaparak, çevresel etkenlerin, yerdeğiştirmeler açısından yapıya etkisinin mertebesinin ortalama %18 olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca analizlerde kullanılan farklı modellerden, çubuk elemanlar yöntemi ile oluşturulan tabliyeden

yeterli sonuçlar alınabildiğini göstermiş, bununla birlikte, farklı modellemelerin dinamik analizlerdeki etkinliğinin gösterilmesi gerektiğini belirtmiştir [15].

Kablolu köprülerin lineer olmayan dinamik analizi üzerine çalışan Nazmy, köprünün kendi ağırlığı altındaki statik analizi ile deprem etkisini köprü mesnetlerindeki yerdeğiştirmeler olarak modelleyerek dinamik analiz gerçekleştirmiştir. Kablolu köprülerin, geometrisindeki büyük değişimler nedeniyle lineer olmayan bir analiz gerektirdiğini belirtmiş ve bu hesaplamalarda tanjant elatisite modülünü kullanmıştır. Analizler sırasında düzgün bir deprem etkisi yanında mesnetlerde farklı yerdeğiştirmelere neden olan hareket eden deprem dalgasının getirdiğı faz farkını incelemiştir. Statik analiz sonuçlarını kullanarak gerçekleştirdiğı dinamik analizdeki P-Delta etkisinin analizlerde ele almanın önemini dile getirmiştir. Özellikle kablolu köprülerde kullanılan 2 boyutlu modellemelerin güçlü bir biçimde ortaya çıkan 3. boyut etkilerini gösterememesi açısından uygun olmadığını söylemiştir. Köprü tabliyesinin kulelerden bağımsız hareket etmesinin deprem etkilerini önemli ölçülerde azalttığını ortaya koymuş ancak normal zamanlarda aşırı yerdeğiştirmelerin önlenmesi için elastomer mesnetlerin kullanımını önermiştir [16].

Kablolu köprülerin dinamik karakteristiğinin matematiksel modelleme ile Jindo Köprüsü örneğinde incelendiğı bir çalışmada, Garevski, Dumanoglu ve Severn, modal analiz sonucunda bazı modlarda kulelerin, kabloların ve tabliyenin bütünüyle bir etkileşim içinde çalışmasından dolayı kablolu köprülerin kompleks bir analiz gerektirdiğini ve her ne kadar 2 boyutlu modellemeler periyotlar yakın sonuçlar vermiş olsa bile her düğüm noktasındaki serbestlik derecelerinin (yatay ve düşey ötelenme ile yatay dönme) özenle modellenmesi gerektiğini söylemişlerdir [17].

Kablolu köprülerin matematiksel modellemesinin incelendiğı başka bir çalışmada Nukulchai, Yiu ve Brotton, fizibilite çalışması için yapılacak model için ön tasarımın yeterli olabileceğini detaylı modelin kesin tasarım esnasında yapılmasının daha ekonomik olduğunu söylemişlerdir. Detaylı model oluşturulurken kütle dağılımı ve yapının sönümlenme karakteristiğinin gerçeğe yakın modellenmesinin önemli olduğunu, kablolu köprülerin uygun bir bilgisayar programı ile dış etkiler ve kütleler

düğüm noktalarında tanımlanmış, kütsesiz, prizmatik ve sabit kesit özelliklerin sahip elemanlar ile modellenebileceğini belirtmişlerdir [18].

Troitsky, kablolu köprülerin teorisi ve tasarımı hakkında yazdığı kitapta, [19]. kablolu köprülerin matematiksel modelleme ile yapılacak olan analizlerinde kullanılmak üzere, sınır şartları, mesnetler ve bağlantı noktaları için gerekli modelleme tekniklerini özetlemiştir. Troitsky, 7 farklı sistemde, kabloların kuleye ve tabliyeğe bağlantılarının moment iletmeyecek şekilde oluşturulması, tabliye uç mesnetlerinin deprem etkilerini alabilmesi, tabliyenin kendi doğrultusunda kuleden bağımsız hareketi ile birleşim noktasındaki dönme hareketinin sağlanması, kule ayaklarındaki mesnetlerin davranışa uygun bir biçimde modellenebilmesi için gerekli tekniklerini ortaya koymuştur.

Başka bir çalışmada Wilson ve Gravelle, bu tezde de örnek olarak alınan Quincy Bayview köprüsünün, lineer elastik sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik analizi için detaylı bir çalışma yapmışlardır. Köprünün geometrisini tam olarak yansıtmaya çalışarak, köprüde modelleme esnasında öteleme ve dönme hareketleri için gerekli kütlelerin düğüm noktalarına atanması, kule, kablolar ve bunların bağlantıları ile elastik mesnetlerin kullanımını detaylandırmışlardır. Yapılan dinamik ve modal analizler sonucunda ilk iki modun periyot değerlerini 2,695 ve 1,733 saniye olarak belirlemişlerdir. Bu değerler bu tezin sonucunda çıkacak olan periyot değerleri ile ayrıca karşılaştırılacaktır.

2.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, uzun açıklıklı kablolu köprülerin zati yükler altında oluşan doğal frekansları ve ilk 20 mod şekli incelenmiştir. Bu araştırma için SAP2000 programı kullanılarak köprünün 2 ve 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Bir adet 2 boyutlu ve 2 adet 3 boyutlu model ele alınarak doğal frekansları karşılaştırılmış ve her model için mod şekilleri ortaya konmuştur. 3 boyutlu modellerin ilki çerçeve tabliye elamanı ve rijit bağlantı elamanları ile oluşturulmuş, diğerinde ise tabliye plak olarak modellenmiştir. Frekanslar ve mod şekilleri açısından hem 2 boyutlu modeller ile 3 boyutlu modellerin karşılaştırılması yapılmış hem de eşdeğer rijit çerçeve elemanlar şeklinde tanımlanan tabliye ile plak olarak tanımlanan tabliyenin davranışının birbirine yakınlığı sorgulanmıştır. Son olarak modeller ADINA programı ile modellenerek frekans değerlerinin doğrulanması yoluna gidilmiştir.

Birinci bölümde kablolu köprülere ait genel bilgiler, tarihi süreç ve yapılan çalışmalar aktarılmış, günümüzden örnekler verilerek, kablolu köprülerin yapım elamanları ve genel kablolu köprü tipleri açıklanmıştır.

İkinci bölümde gerçek bir yapı olarak A.B.D.'de inşa edilmiş olan Quincy Bayview kablolu köprüsü ele alınmıştır. Bahsedilen modeller bu köprü üzerinde çalışılmıştır. Köprünün yapısal ve geometrik tanımından sonra modellemeye özgü detaylar açıklanmış, yapılan kabuller ve matematiksel hesaplar ortaya konmuştur.

Üçüncü bölümde 3 şekilde modellenen köprünün doğal frekansları ve ilk 30 mod şekilleri belirlenerek, frekansların yakınlığı ve modlar arasındaki uygunluk ve uyumsuzluklar irdelenmiştir. Başka bir program ile yapılan model sonuçların sağlaması olacak şekilde karşılaştırılmış ve yapının gerçek davranışına en yakın frekanslar veya mod şekillerinin hangisinin olacağı buna bağlı olarak hangi modellemenin daha doğru sonuçlar vereceği konusu tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde ise çıkan sonuçlar değerlendirilerek, bu sonuçlar ışığında yapının davranışına en uygun model belirlenmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

2.3. Önemli Kablolu Köprüler

2.3.1. C.J. Loescher

Kaynaklarda ilk kablolu köprü örneği sayılan bu köprü 1784 yılında Alman ahşap ustası C.J. Loescher tarafından yapılmıştır. Açıklığı 32 m olan bu köprü sadece yaya geçişi için tasarlanmış olup köprünün kablo görevi gören elemanları dahil tamamı ahşaptır. (Resim 2.1)



Resim 2.1. İlk kablolu köprü örneklerinden C.J Loescher tasarımı (Almanya)

2.3.2. Stonecutters Köprüsü

Stonecutters köprüsü, Hong Kong Stonecutters adası ile Tsing Yi adası arasında bulunan Rambler kanalı üzerindedir. Ana açıklığı 1018 m ile şu an en uzun açıklıklı kablolu köprüdür. Tek kolon kuleler üzerinde duran köprünün kule yükseklikleri 295 m'dir. Tabliye genişliği 50 m olup kulelerin iki tarafında kutu kesitler şeklindedir. İki kutu kesit birbirine yine kutu kesitli enlemeler yardımıyla bağlanmaktadır. Kablolar ise 2 sıra olarak tabliyenin en dışına bağlanmaktadır. (Resim 2.2)



Resim 2.2. Stonecutters Köprüsü (Hong Kong)

2.3.3. Sutong Köprüsü

Çin'in Jiangsu bölgesinde, Yangzte nehri üzerinde bulunan Sutong Köprüsü, 1088 m ana açıklığı ile dünyanın en uzun kablolu köprüleri arasındadır. Ayrıca 300 m'lik iki yan açıklık ve 4 adet küçük açıklıkları bulunmaktadır. Köprünün kuleleri 306 m olup dünyanın 2. en yüksek kulelerine sahiptir. Yapımına 2003'te başlanmış olup, 2007 yılında iki kuleden gelen köprü tabliyeleri birleştirilmiştir. 25 Mayıs 2008'de trafiğe açılan köprü yaklaşık 1.7 milyon dolara mal olmuştur. (Resim 2.3)



Resim 2.3. Sutong Köprüsü (Çin)

2.3.4. Millau Viyadüğü

Kule yükseklikleri ve tabliyenin yerden yüksekliği açısından dünyanın en yüksek köprüsü olan Millau viyadüğü, Fransa'nın güneyinde bulunan Millau yakınlarındaki Tam nehri üzerindedir. 7 adet kulenin yükseklikleri 94,5 m'den 245 m'ye kadar değişmektedir. Bu yükseklik ünlü Eiffel kulesinden biraz daha yüksektir. En uzun

açıklığı 350 m olan köprünün toplam uzunluğu ise 2460 m'dir. Tabliye, tekil kolon şeklindeki kulelere tek sıra kablolar ile tabliyenin ortasından bağlanmaktadır. Yapı ağırlığı olarak yaklaşık 36 bin ton civarında olan köprü 2004 Aralıkta trafiğe açıldı. Sadece taşıt trafiğine açık olan köprünün yaklaşık maliyeti 394 milyon avrodur. (Resim 2.4.)



Resim 2.4. Millau Viyadüğü (Fransa)

2.3.5. Tataru Köprüsü

Japonya'nın Seto iç denizinde bulunan Honshu ve Shikoku adalarını birleştiren Tataru köprüsü Nishiseto otoyolunun bir parçası olarak inşa edilmiştir. Orta açıklığı 890 m olan köprünün 164,5 m ve 257,5 m Olan iki adet yan açıklığı bulunmaktadır. Kuleleri Y şeklinde olup 220 m'dir. Gidiş geliş şeklinde 2'şer şerit vasıtalar için ve 1'er şerit de motosiklet, bisiklet ve yaya trafiği için ayrılmıştır. Tabliye su yüzeyinden 26 m yüksektedir. (Resim 2.5)

1973'te asma köprü olarak tasarlanan köprü, ankrajlar için büyük miktarlarda kazılar gerekeceğinden, çevresel zararlara sebebiyet vermemek için 1989 yılında kablolu köprü olarak tekrar tasarlanarak 1993'te başlanan inşaatı 1999 yılında tamamlanmıştır.



Resim 2.5. Tatara Köprüsü (Japonya)

2.3.6. Rion Antirion Köprüsü

Yunanistan'ın Rion ve Antirion bölgelerini birleştirmek amacıyla 1998'de yapımına başlanan köprünün kuleleri 2000 yılında, tabliyesi 2003 yılında tamamlanarak Mayıs 2004'te trafiğe açılmıştır. En uzun açıklığı 560 m olan köprünün toplam uzunluğu 2880 m'dir. Tabliye genişliği 26 m olup, gidiş geliş şeklinde 2'şer şerit taşıt ve 1'er şerit olarak yaya ve bisiklet trafiğine açıktır. 5 açıklık ve 4 kuleden oluşan köprünün en büyük kule yüksekliği 164m'yi bulmaktadır.

Su derinliği 65 m'yi bulan köprü inşa alanının, tektonik açıdan her yıl 30 mm yer değiştirmesi nedeniyle özel yapım teknikleri uygulanmıştır. Kuleler deniz tabanına gömülmemiş olup, deprem etkilerini absorbe etmesi açısından deniz tabanına yapılan çakıl yatağının üzerine oturtulmuştur. Kule ve tabliye birleşim yerlerinde özel sönümleyici mesnet elemanları kullanılmıştır. Günlük 11,000 taşıtın geçtiği köprünün maliyeti 630 milyon avroyu bulmuştur. (Resim 2.6)



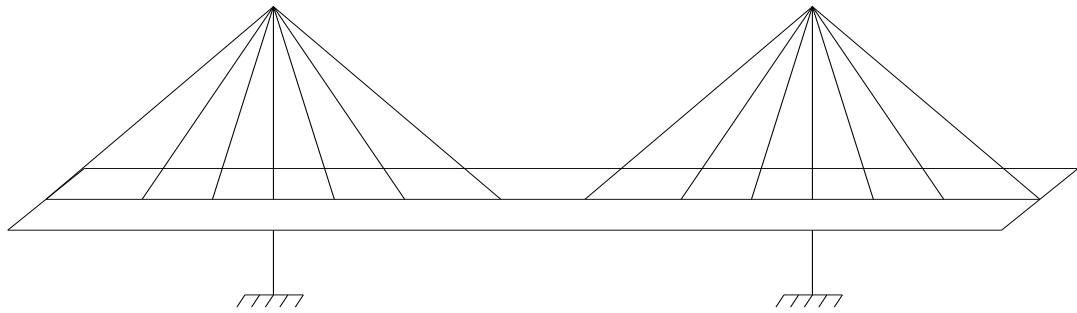
Resim 2.6. Rion Antirion Köprüsü (Yunanistan)

2.4. Kablolu Köprü Tipleri ve Yapı Elemanları

Kablolu köprüler diğer köprülere oranla, bulunduğu çevreye uyum sağlayabilen çok değişik şekillerde tasarlanmaya elverişli yapılardır. Kabloların yerleşimi, kule tipleri ve tabliye tipi açısından tasarımcıya çok değişik seçenekler sunmaktadır. Bu çeşitlilik, köprünün bulunduğu ortam, üzerindeki trafik yükü, yapım şartları, malzeme gereksinimi, ekonomik etkenler açısından yapımcıya en optimum kararı vermesinde kolaylık sağlar.

2.4.1. Kablo Düzeni

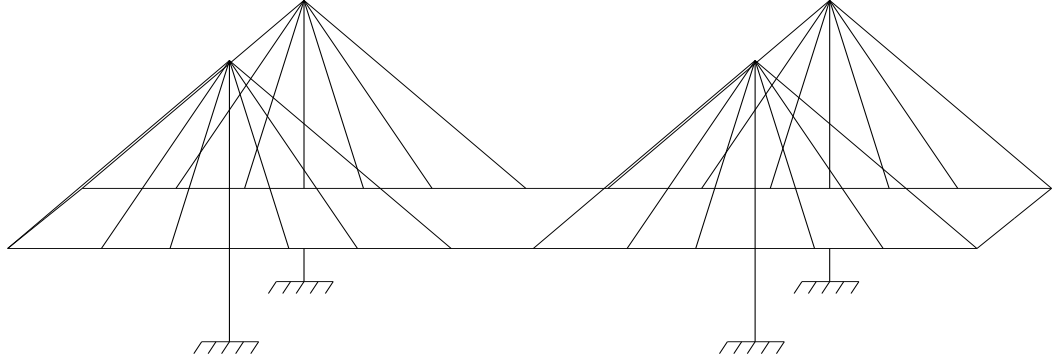
Kablolu köprüler, kabloların kulelere yerleşimine göre 3 şekilde tasarlanabilirler. Bunlardan ilki “Tek Düzlemde Yerleşim”dir. Kabloların kuleye olan bağlantısı tek bir düzlemde olup tabliyenin ortasına bağlanarak taşıma işlemini gerçekleştirirler. (Şekil 2.2) Tabliye tek bir nokta üzerinde taşındığı için, uç kısımlar konsol olarak çalışmakta, burulma gerilmeleri kritik olmakta ve bu da enleme kirişlerinin rijit olmasını gerektirmektedir.



Şekil 2.2. Tekil düzlemde yerleşim

Estetik açıdan güzel görünse de kabloların yerleşimi taşıtların görüş alanını kısıtlayabilmektedir.

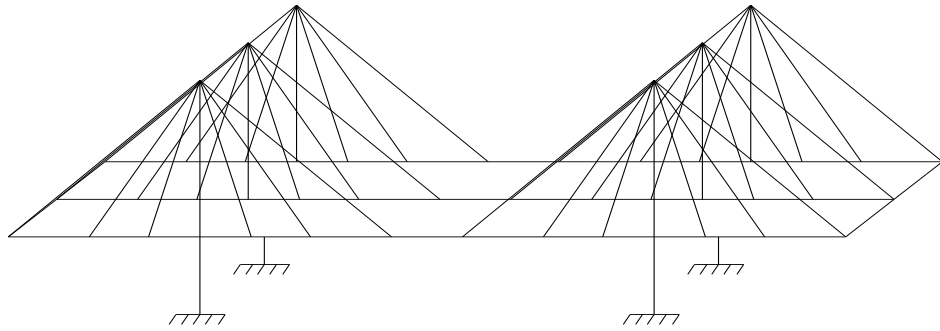
Diğer yerleşim türü ise “İkili Düzlemde Yerleşim”dir. Bu yerleşim sisteminde ise kablolar, kulelerden 2 düzlem halinde çıkarak, tabliyenin iki uç noktasına bağlanırlar. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3. İkili düzlemde yerleşim

Simetrik bir sistem olduğu için yapısal stabilitesi daha uygun yapılardır. Aerodinamik açıdan daha uygun bir performans sergilerler.

Yoğun trafik yüküne maruz kalacak bazı köprülerde şerit sayısının veya tabliye genişliğinin artırılması gerektiğinde “Üçlü Düzlemde Yerleşim” tipinde köprüler tasarlanabilir. Bu yerleşim sisteminde tabliye hem ortadan hem de yanlardan kablolar ile kulelere bağlanır. (Şekil 2.4) Bu tasarım şekli pek ekonomik olmamakla birlikte ihtiyaçlara göre tasarlanabilirler.



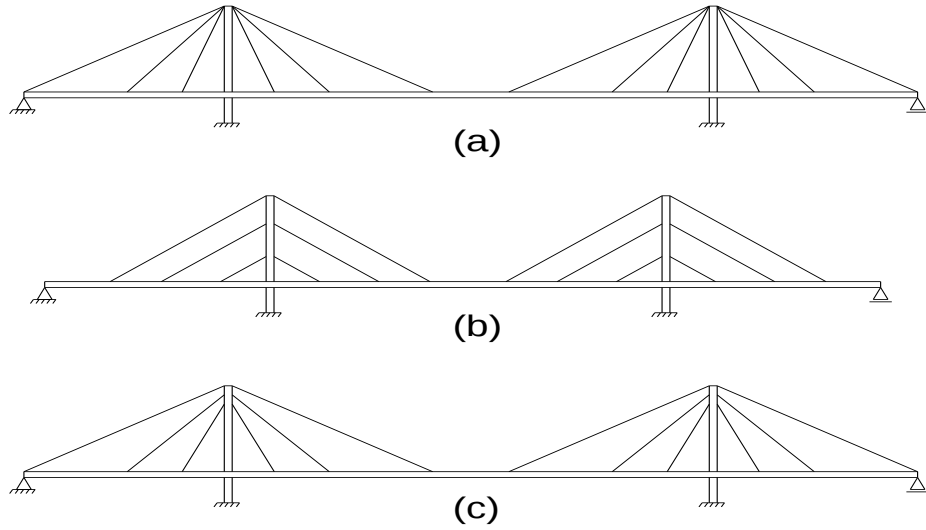
Şekil 2.4. Üçlü düzlemde yerleşim

2.4.2. Kablo - Kule Bağlantısı

Kabloların kule ile bağlandığı yerdeki kablo dizilişi değişik tipler ortaya koyar. Bunların ilki “Yelpaze Sistem” denilen, kabloların kulenin tepesinde tek noktada toplandıkları sistemdir. (Şekil 2.5a) Bu dizilişle kablolar köprü kirişlerinde

maksimum açılar oluşturarak döşemedeki eksenel kuvvetleri azaltmaktadır. Bunun yanında tek noktaya toplanan kabloların, kule tasarımında özel çözümler gerektirdiği de bir gerçektir.

Diğer bir sistem ise “Paralel Sistem”dir. Bu sistemde kablolar kulenin tepesinden aşağı doğru eşit mesafelerde ve aynı açılarda kuleden çıkarak tabliyeye bağlanırlar. (Şekil 2.5b) Bu diziliş estetik açıdan güzeldir. Kabloların eşit mesafelere konulması, kule tasarımını kolaylaştırmış, yapının inşasını kolaylaştırmıştır.



Şekil 2.5. Kablo - kule bağlantıları a) Yelpaze b) Paralel c) Radyal

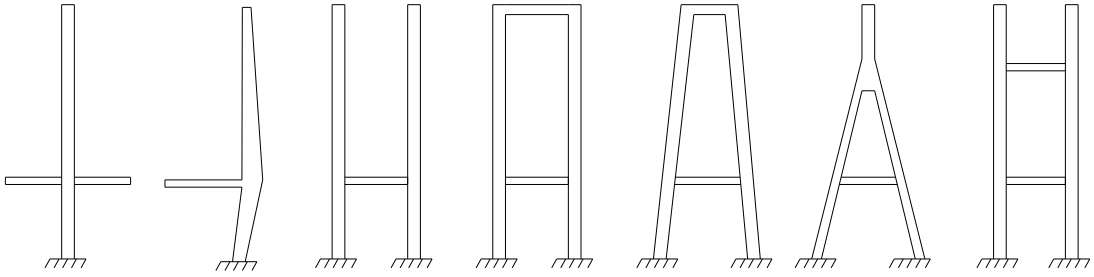
“Radyal Sistem” ise diğer iki sistemin kombinasyonu şeklinde olup hem değişik noktalardan hem de değişik açılarla kuleye bağlanarak diğer iki sistemi en etkin bir biçimde kullanmayı amaçlayan bir tasarımıdır. Bu tasarımda kule bağlantı detayları daha basittir. (Şekil 2.5c)

2.4.3. Kule Tasarımları

Kuleler, kablolu köprülerin çok geniş tasarım tiplerine bağlı olarak farklı şekillerde tasarlanabilirler. Malzeme olarak, betonarme, çelik veya bunların birleşimi şeklinde olabilirler. Kule yüksekliklerini belirleyen genel etkenler; tabliye uzunluğu ve

tabliyenin taşıdığı yükü bağlatıdır. Leonhard'ın yaptığı bir çalışmaya göre kule yüksekliği merkez açıklığın % 20 ila % 25'i civarında olmalıdır [20].

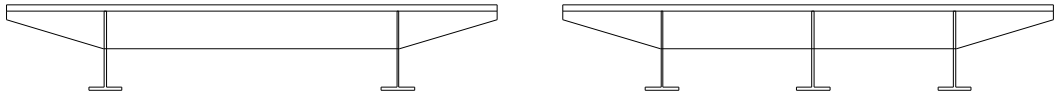
Kule tipinin seçiminde ise bölgeye uyum, estetik, kablo bağlantı tipi ve ekonomik etkenler göz önünde bulundurulur. Buna bağlı olarak kuleler, tek kolon, çift kolon, dikdörtgen veya eğik çerçeveler halinde veya üstten payandalı olarak tasarlanabilirler. (Şekil 2.6)



Şekil 2.6. Kule tipleri

2.4.4. Üstyapı Tabliye Kesitleri

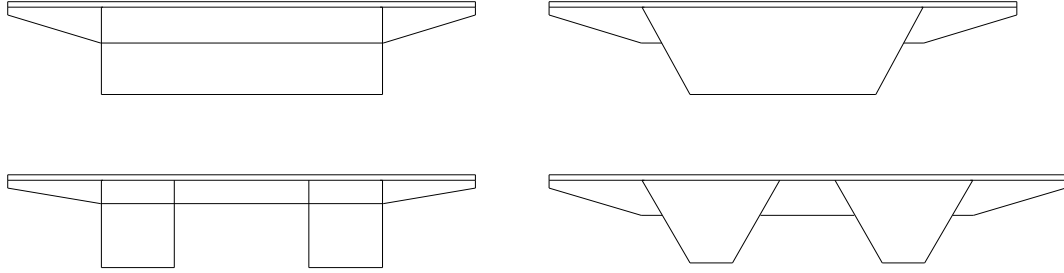
Üstyapı ve tabliye kesiti seçiminde, trafik yükleri, ekonomi ve yapım metotları etkilidir. Çelik ve betonarme elemanlar ile buların birleşimi şeklindeki kesitler çok değişik şekillerde kullanılabilmektedir.



Şekil 2.7. Çelik tabliye tipleri

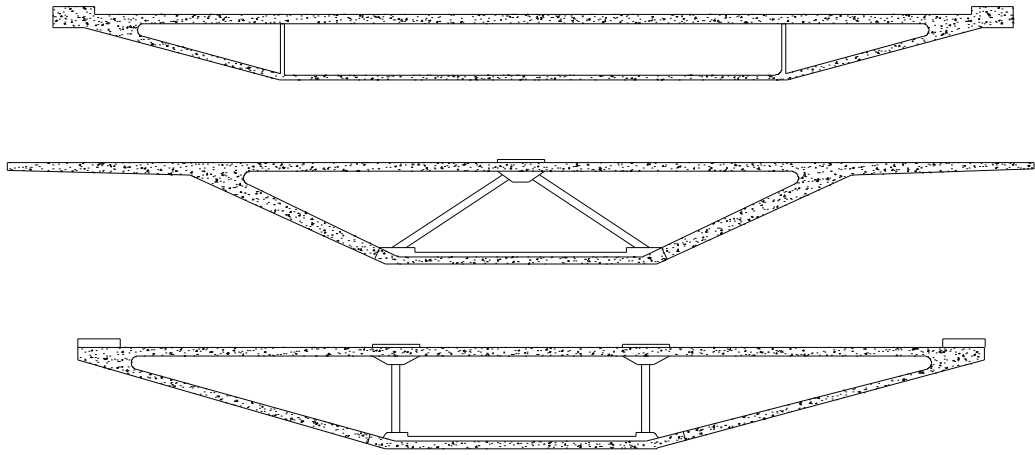
Şekil 2.7'de çelik ana kirişten oluşan tabliye kesiti görülmektedir. I kesitlerle desteklenmiş olan bu kesitler düşük burulma rijitliğine sahiptir.

Kablolu köprülerin tabliyelerinde, çelik malzemeden imal edilmiş kutu kesitler de kullanılmaktadır. Bunlar daha yaygın olarak kullanılmakta olup burulma rijitlikleri fazladır. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8. Kutu kesitli çelik tabliye tipleri

Bunların yanında kablolu köprülerde daha sık kullanılan kesitler ise betonarme kesitlerdir. (Şekil 2.9)



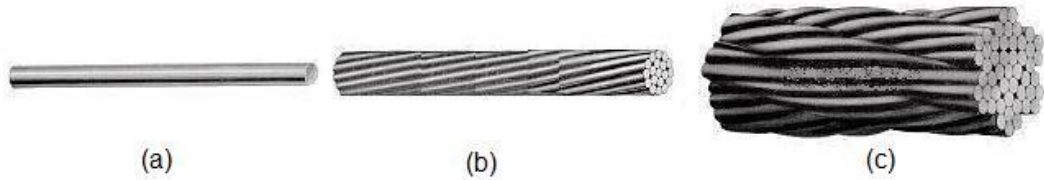
Şekil 2.9. Beton Tabliye kesitleri

Kablolu köprülerin tabliyeleri, çekme gerilmeleri kablolar ile azaltılmış tabliyeler olduğundan çekme gerilmesine daha uygun olan betonarme elemanların kullanımı daha yararlı olacaktır. Segmentler halinde üretilen bu betonarme tabliyeleri çoğunlukla prefabrik olmakla birlikte yerinde döküm tekniği ile imal edilebilirler.

Tabliye üretiminde diğer bir yapım tekniği ise çelik ve betonarme elemanların beraber kullanıldığı kompozit kesit kullanımıdır. Betonarme olan üstyapının çelik boyuna kirişlerle desteklenmesi veya beton-çelik birleşimi elemanların kullanılması şeklinde üretilmektedir. Bu tezde örnek olarak çalışacağımız Quincy Bayview köprüsü kompozit kesitli bir kiriş olup detayları verilecektir.

2.4.5. Kablolar

Tabliyeye belirli aralıklarla açılı olarak bağlanarak tabliyenin ağırlığını kulelere aktaran, tamamen çekmeye çalışan elemanlara kablo denir. Esnek olan bu elemanlar sıcakta haddelenen yüksek karbonlu çelikten imal edilen tellerin soğukta çekilmesiyle üretilirler. (Şekil 2.10 (a)) Teller bir merkez etrafında helisel olarak sarılarak yüksek dayanımlı tel gruplarını oluştururlar. (Şekil 2.10 (b)) Dayanımı daha da artırmak için bu tel grupları da istenen dayanıma göre yeterli adette benzer yöntemle sarılarak çelik halatları yani kabloları oluştururlar (Şekil 2.10 (c))



Şekil 2.10. (a) Çelik tel (b) Tel grubu (c) Çelik halat (Kablo)

Kablolar bazen tellerin helisel değil paralel sarılmasından da üretilir.

2.5. Kablolu Köprülerde Analiz ve Modelleme Yöntemleri

İlk yapılan kablolu köprülerde, yapının davranışı iyi anlaşılamadığı için ve yeterli analiz imkânları olmadığından, bazı köprülerde göçmeler yaşanmıştır. Günümüzde bu yapılar için elimizde yeterli bilgi ve gelişmiş bilgisayarlar yardımıyla detaylı analiz imkânları olduğundan gerçeğe çok yakın matematik ve analitik modeller yapılabilmekte ve analizi mümkün olmaktadır.

2.5.1. Analiz Yöntemi

Yük değerleri belli sınırlar içinde kalan ve yükleme esnasında büyük deformasyonlar göstermeyen yapılar lineer olarak analiz edilirler. Bu gibi durumlarda, kuvvet deformasyon arasındaki ilişki denklemi sabit olup, sistemin bütün elemanlarının rijitliklerini içeren yapının rijitlik matrisi ile hesaplanır. Bu bağıntı; “P” yapıya etkiyen kuvvetleri, “d” yapının deformasyonlarını ve “K” rijitliği ifade etmek üzere:

$$[P] = [K] \cdot [d] \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanır. Yapı yükleme sırasında, yapının hesaplanan rijitliğini bozacak deformasyonlar göstermediği sürece bu eşitlik geçerlidir. Normal şartlar altında yapıların büyük deformasyonlar yapmasına izin verilmez. Yalnız büyük yüklemeler altında, çok uzun veya geniş yapılarda bu tip deformasyonlar söz konusu olabilir. Kablolu köprüler de bu tip deformasyon gösterebilen yapılardır. Bu durumda yapının geometrisinde veya kesitlerde, yapının rijitliğinin değişmesine neden olan değişiklikler olur. Bu tip değişikliklerin olduğu durumda lineer analiz geçerliliğini yitirir. Değişiklik gösteren sisteme göre tekrar hesaplanan yapı rijitliği ile yeniden analiz yapılır. Lineer olmayan bu analizde hesaplamalar basamaklar halinde yapılarak yapı değişimleri gerçek şekliyle hesaplanmaya çalışılır.

Yükleme halinde değişen rijitlik matrisine geometrik rijitlik matrisi denir. Lineer olmayan analizde, yapının bilinen rijitlik matrisine, geometrik rijitlik matrisi eklenerek sistem rijitlik matrisi bulunur ve analize devam edilir [21]. Bu şekilde

yapılan lineer olmayan analize 2. mertebe hesabı veya geometrik olarak lineer olmayan analiz denir. (Aksoğan, 1986)

$$[K_{\text{sistem}}] = [K_E] + [K_G] \quad (2.2)$$

Burada K_E , yapının ilk elastik rijitlik matrisini, K_G ise geometrik rijitlik matrisini gösterir. Buradaki K_G sadece elemanın geometrisine bağlı olmayıp, başlangıçtaki iç kuvvetleri de içerebilir.

$$[K_E] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[K_G] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} \\ 0 & \frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & \frac{6F}{5L} & -\frac{F}{10} \\ 0 & \frac{F}{10} & -\frac{FL}{30} & 0 & -\frac{F}{10} & \frac{2FL}{15} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Kablolu köprülerde büyük deformasyonlar söz konusu olduğu için analizler yukarıda anlatılan lineer olmayan yöntemler ile yapılır.

Kablolu köprülerde kabloların kendi ağırlığı altında elastik olarak uzaması ve yaptığı sehimden dolayı uç noktasında bir ilk uzama meydana gelir. Yükleme altında ise bu sehimlerde azalma görülür. Bu da kablounun eksenel rijiditesini, çekme gerilmesine bağılı lineer olmayan bir şekilde etkileyen bir durumdur. Kablounun bu durumu göz önüne alındığında eşdeğer bir elastisite modülü hesaplanması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu fikri ilk Ernst ortaya atmıştır [22]. Daha sonraları değişik araştırmacılar tarafından da doğrulanmıştır [23-27]. Buna göre kablolar için analizlerde kullanılan eşdeğer elastisite modülü;

$$Eeş = \frac{E}{1 + \left[\frac{wL^3}{12T^3} \right] \frac{AE}{L^3}} \quad (2.5)$$

Burada;

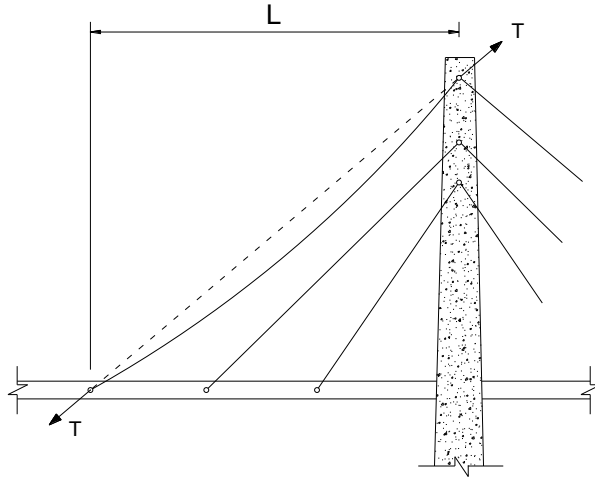
E: Kablounun ilk elastisite modülü

L: Kablounun yatay izdüşüm uzunluğu

w: Kablounun birim ağırlığı

A: Kablounun kesit alanı

T: Kablodaki çekme gerilmesidir (Şekil 2.11)



Şekil 2.11. Kablo sehim ve anlık elastisite modülü hesabı

Burada tanımlanan eşdeğer elastisite modülü, kablonun T çekme gerilmesine karşılık gelen tanjant veya anlık elastisite modülü olarak tanımlanır.

2.5.2. Modelleme Yöntemi

Kablolu köprülerin davranışını matematiksel olarak gerçeğe en uygun olarak modelleyebilmek için, köprü elemanları, bağlantılar ve sınır şartları, bilgisayar analiz programlarına çeşitli kabullerle aktarılmıştır. Gerçek duruma en uygun sonucu alabilmek için bu modeller, değişik şekillerde denenerek en optimum çözümün bulunması için çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde ele alınan köprü 2 ve 3 boyutlu olarak modellenerek, elemanların kolay hesaplanabilir eşdeğer davranış sergileyen modelleri ile gerçek hali farklı analiz edilip aradaki sonuçlar değerlendirilmiştir. Tabliye kule bağlantıları ile mesnet sınır şartlarının modellerinin gerçek davranışa yakınlığı test edilmiştir. Burada yapılan kabuller aşağıda özetlendiği gibidir.

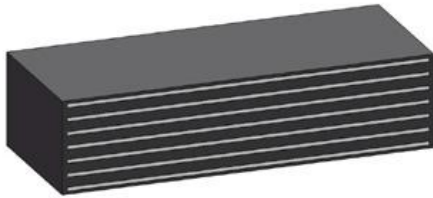
Kablolu köprülerin modellenmesi gereken ana elemanları; kuleler, kablolar, tabliye, ve uç mesnetlerdir. Bu elemanlar, kullanılan bilgisayar analiz programlarına gerçek boyutlarıyla ve gerçek malzeme özellikleriyle (birim ağırlığı, rijitliği, elastisite modülü vs.) girilebilmekte ve analiz edilebilmektedir. Bu noktada kritik olan konu, bu elemanların birbirine bağlantı noktalarının gerçek davranışa uygun olarak modellenebilmesidir.

Kablolu köprülerde genel olarak tabliyenin üst kısmı olan kule ve tabliyenin alt kısmından zemine kadar uzanan ayaklar, hem birbirine hem de yere ankastre bağlantıyla sabitlenmektedir. Kabloların kuleye ve tabliyeye bağlantı noktaları hiçbir moment iletmeyecek şekilde dönen mesnetlerle sağlanmıştır. Tabliyenin zemine oturan uç noktalarındaki mesnetlerde, tasarıma uygun olarak sabit veya kayıcı mesnet tanımlanabilmektedir. Dinamik etkiler göz önüne alındığında en kritik olan nokta tabliye ile kule bağlantısıdır.

Yapılan çalışmalar, tabliye ve kulelerin bağlantısının, beklenmeyen dinamik etkilere karşı özel mesnet tipleri ile kontrollü olarak sağlanmasının önemli olduğunu

göstermiştir. Deprem, rüzgâr yükü ve sıcaklık değişimlerinden gelen etkilerin kulelere iletilirken sönümlenmesinin, kule ve kule temeli tasarımlarını önemli düzeyde rahatlattığı belirlenmiştir [27-31]. Kablolu köprülerde yeni yaklaşım tabliyenin kulelere ankastre bağlantılar yapmaması ve boyuna doğrultuda sadece kablolar yardımıyla ve elastik bağlantı elemanları ile bağlanması yönündedir. Bu şekilde tabliyenin dinamik etkilerle boyuna ve enine doğrultuda yapacağı büyük deplasmanların dolayısıyla kuvvetlerin kuleye aktarılması önlenir. Bu ayrıca köprünün doğal periyodunun kontrol altında olmasını da sağlar. Bu serbestlik tabliyeye sadece dinamik etkiler altındaki büyük deplasmanların aktarılmasını önlemek amacıyla sağlanmalıdır. Çünkü köprünün günlük kullanımında büyük deplasmanlar yapmadan uygun hizmet verebilmesi gereklidir.

Bunu sağlamak için özel üretim mekanik veya elastomer (elastik polimer) mesnetler kullanılmaktadır. Köprü tasarımını sırasında belirlenen mesnet serbestlik durumuna göre, stabiliteyi bozmadan yatay veya düşey ötelenme ile dönmeleri sağlayabilecek mesnetler kullanılır. Yaygın olarak kullanılan elastomer mesnetler kauçuktan elde edilen elastik polimer bileşimidir. Bu bileşik aralarına çelik tabakalar konmak suretiyle üst üste imal edilir. (Şekil 2.12)



Şekil 2.12. Elastomer mesnet ve köprü mesnedinde kullanılışı

Bu şekildeki mesnetleri, matematiksel olarak modellemek için ağırlıksız olarak tanımlanmış rijit bağlantı elemanları, yay sistemleri kullanılabilir. Kullanılan bu yöntemler 3. bölümde örnek modeller ile birlikte detaylı anlatılacaktır.

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tezde, kablolu köprü analizleri için gerekli olan matematik modelleme ve bilgisayarda yapılacak analiz detayları anlatılacaktır. Örnek çalışma olarak matematik modeli yapılmak üzere A.B.D’de bulunan Quincy Bayview köprüsü kullanılmıştır. Köprü önce 2 boyutlu olarak modellenecek olup daha sonra 2 adet 3 boyutlu modeller oluşturulacaktır. 3 Boyutlu modellerin ilkinde tabliye özelliklerine sahip çerçeve eleman ve kablo bağlantısının sağlamak için rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır. Diğerinde ise tabliye plak elemanlarla gerçek durumdaki gibi modellenerek analiz yapılmıştır. Bu üç analizin statik lineer modal analizi sonucu mod şekilleri ve mod frekanslarının karşılaştırılması yapılarak, modelleme yapılırken yapılan kabullerin doğruluğu, mesnet modellerinin gerçek davranışa uygunluğu sorgulanarak en uygun analiz yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır.

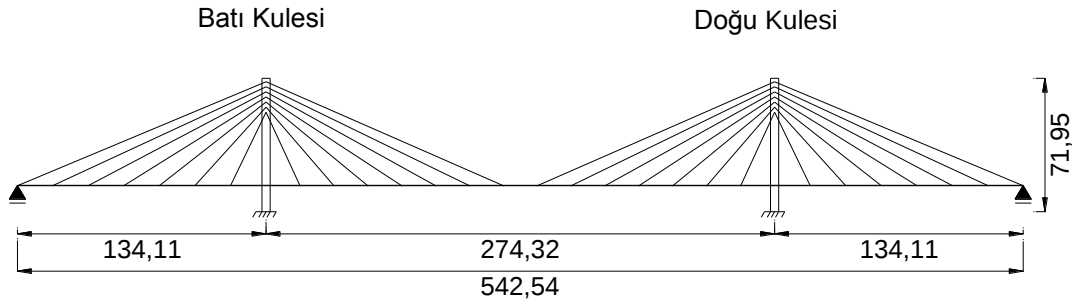
3.1. Quincy Bayview Köprüsü

Quincy Bayview köprüsü, Amerika Birleşik Devletleri, Mississippi nehri üzerinde olup, Missouri eyaletindeki Batı Quincy ile Illinois eyaletindeki Quincy şehirlerini birleştirir. (Resim 3.1.)



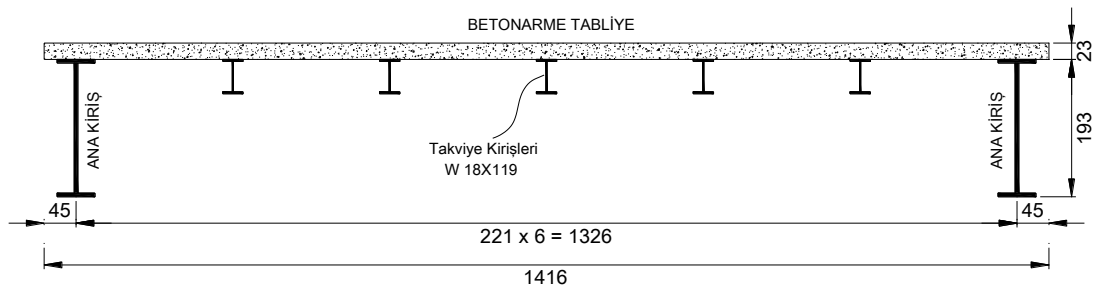
Resim 3.1. Quincy Bayview Köprüsü (A.B.D.)

Yapımına 1983 yılında başlanan köprü 1987 yılında tamamlanmış ve toplam 32 milyon dolara mal olmuştur. Köprü doğu ve batı kulesi olarak adlandırabileceğimiz 2 adet “H” şeklinde betonarme kule üzerinde bulunmaktadır. İkili düzlem sistemde her kulede 28’er adet toplam 56 adet kablo radyal olarak düzenlenmiştir. Tabliye betonarme olup çelik elemanlarla güçlendirilerek kompozit bir kesit oluşturulmuştur. Ana açıklık yaklaşık 274 m olup 2 yan açıklıkları yaklaşık 134 m’dir. Tabliye genişliği 14,16 m’dir. Kulelerin su düzeyinden yüksekliği ise yaklaşık 71 m’dir. (Şekil 3.1)

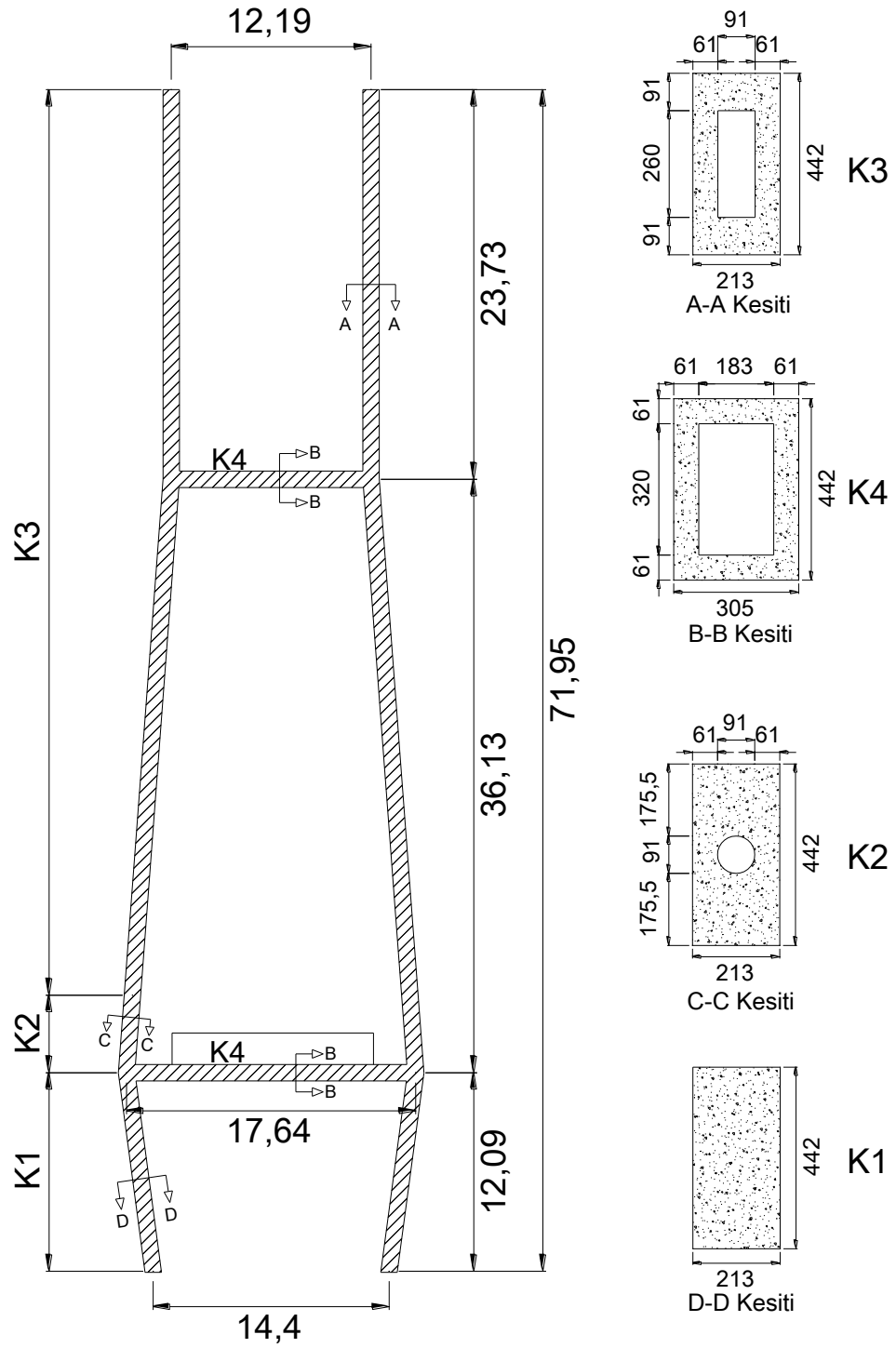


Şekil 3.1. Quincy Bayview köprüsünün boyutları (m)

Tabliye 23 cm betonarme olup iki yanda tabliye boyunca uzanan 193 cm’lik çelik “I” profil ve ortada 5 adet W 18x119 profil çelik kirişler ile desteklenmiştir. (Şekil 3.2)



Şekil 3.2. Tabliye kesiti boyutları (cm)



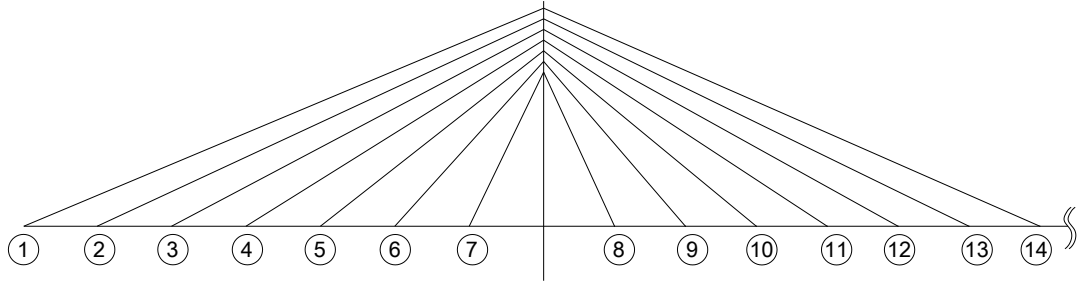
Şekil 3.3. Kule boyutları (m) ve kesitleri (cm)

Şekil 3.3’de de görüldüğü gibi kule 3 farklı kesitten oluşmaktadır. Tabliyenin alt kısmında kule ayaklarının kesiti 442x213 cm dolu betonarme kesit (K1) olup arası

122 cm kalınlığında beton ile sağlamlaştırılmıştır. Kule kesiti, tabliye kotundan itibaren yaklaşık 4,72 m yüksekliğe kadar merkezinde 90 cm dairesel bir boşlukla (K2) devam etmiştir. Bu noktadan sonra kesitin dış boyutlar aynı devam ederken içte 91x260 cm boyutlarında bir boşlukla kutu kesit (K3) olarak tamamlamıştır. Tabliyeyi taşıyan ve kabloların alt kısmındaki kirişlerin kesitinin dış boyutları 442x305 olup, içte 183x320 boyutlarındaki boşlukla kutu kesit (K4) şeklindedir.

Tabliye kuleye çelik mesnetler yardımıyla oturur. Bu çelik mesnetler yatay hareketlere izin verecek şekilde düzenlenmiştir. Fazla deplasmanları önlemek amacıyla da kule ile tabliye arasına elastomer mesnetler yerleştirilmiştir.

Kablolar 6.4 mm yüksek dayanımlı çelik tellerden sarılmış olan tel gruplarından oluşur. Bu tellerin dayanımı 1600 MPa'dır. Tel grupları helisel olarak sarılmış olup kabloların toplam alanı, 26 cm² ile 90 cm² arasında değişmektedir. Şekil 3.4, köprünün batı ayağındaki kabloların numaralandırılmasını göstermekte olup, batı ayağındaki kablolar simetrik olarak dizilip numaralandırılmışlardır.



Şekil 3.4. Kabloların numaralandırılması

Bu numaralandırmaya göre kabloların kesit alanları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Buna göre yakın mesafeye uzanan kabloların kesit alanı, diğerlerine oranla daha küçük olduğu görülmektedir. Aynı mesafeye uzanan kablolardan orta açıklığa uzanan kablonun kesit alanı yan açıklıklara uzanan kablolardan daha büyüktür.

Çizelge 3.1. Kablo kesit alanları

Kule	K a b l o N o / K e s i t A l a n l a r ı													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Batı (cm²)	89,6	89,6	73,8	65,6	43,7	36,4	28,2	26,3	32,9	41,8	50,7	56,7	64,9	67,8
Doğu (cm²)	89,6	89,6	72,8	64,6	43,4	35,4	27,9	26,6	33,3	42,4	51,3	57,6	65,6	68,1

3.2. Hesaplamalar ve Modelleme

Analiz için kullanılacak olan köprü elemanları modellenirken çeşitli kabuller ve yaklaşımlar yapılmıştır. Takip eden bölümlerde her eleman için yapılan yaklaşımlar ele alınacaktır

3.2.1. Kule Elemanları

Oluşturulacak köprü modellerinde kule elemanları, gerçek boyutlarıyla, beton malzeme özellikleri ve rijitliği dikkate alınarak, 2 ve 3 boyutta kuvvet ve moment alabilen kirişler olarak modellenmişlerdir.

3.2.2. Kablolar

Kablolar modellenirken kesit alanları birbirine yakın olduğu için, 4 ana grup altında toplanmıştır. (Çizelge 3.2)

Çizelge 3.2. Kablo grupları

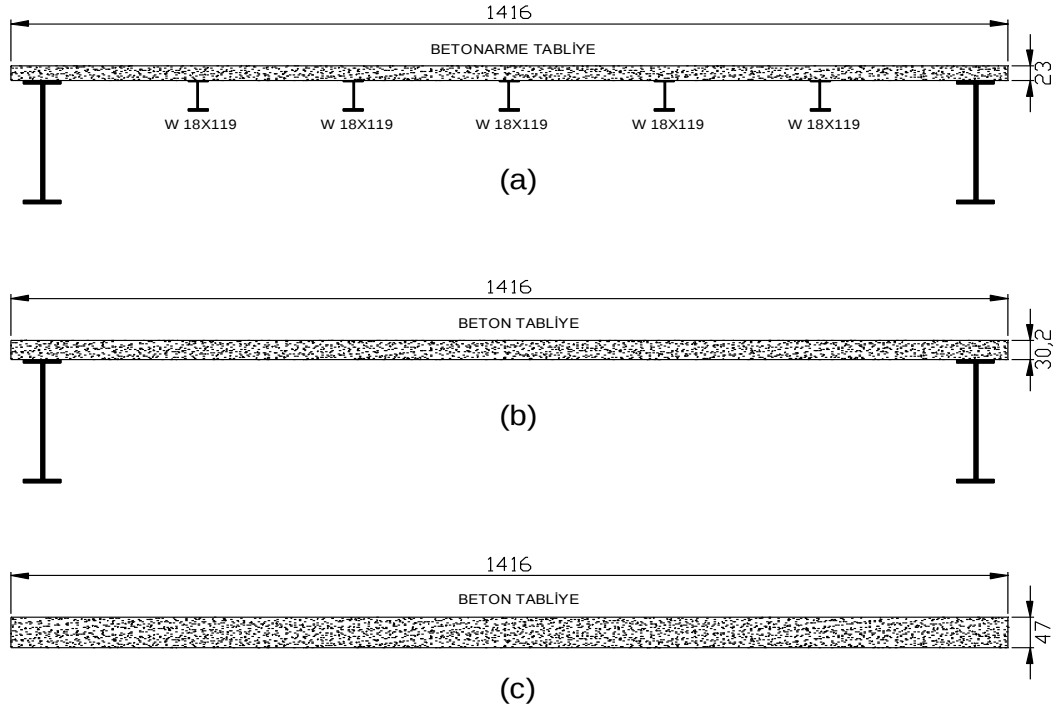
Kablo Grup No	Kesit Alanı cm ²	Kablolar
1	90	1, 2
2	70	3, 4, 13, 14
3	50	11, 12
4	35	5, 6, 7, 8, 9, 10

Kablolar sadece çekmeye çalışan elemanlar olduğu için moment taşımayan kafes elemanlar olarak modellenmiştir.

3.2.3. Tabliye

Tabliyenin modellenmesinde çelik elemanlar, hesaplamalar sonucu eşdeğer beton elemanlar haline dönüştürülerek kesitin tek bir malzeme yapısında olması sağlanmıştır. Çelik ve betonun elastisite modülü dikkate alınarak yapılan bu dönüşümlerde; ilk modelde kullanılacak olan tip için, takviye kirişlerinin betona dönüştürülerek, 30,2 cm kalınlığında tabliye ve ana kirişlerden oluşan bir kesit elde edilmiştir. (Şekil 3.5b)

Diğer modelde kullanılacak kesit için ana kirişler de beton elemana katılarak, 47 cm derinliğinde, tamamen beton bir kesit elde edilmiştir. (Şekil 3.5c) Bu dönüşümler sırasında tabliyenin genişliği korunmuştur.



Şekil 3.5. Modellerde kullanılacak olan tabliye kesitleri (cm)

a) Orijinal tabliye b) Eşdeğer tabliye – 1 c) Eşdeğer tabliye – 2

3.2.4. Sınır Şartları

Modelde tanımlanması gereken diğer noktalar ise sınır şartlarıdır. Kuleler zemine ankastre olarak bağlanmışlardır. Kablolar kuleye ve tabliyeye moment almayacak şekilde bağlanmıştır. Kule tabliye bağlantısı, doğu köprüsünde (y) eksenini etrafında dönmeye ve tabliye doğrultusu boyunca ötelenmeye izin verecek şekilde düzenlenmiştir. Batı köprüsünde ise ötelenme tutulmuş, sadece (y) eksenini etrafında dönmeye izin verilmiştir. Tabliyenin uç noktaları ise hem dönmeye hem de ötelenmeye izin verecek şekilde tasarlanmıştır.

3.3. Modeller

Modellemeler için SAP2000 programı kullanılmış olup, analiz için düşünülen modellerin ilki 2 boyutlu çerçeve elemanlar olarak düşünülmüştür. Diğer ikisi 3 boyutlu tasarlanmış olup ilkinde tabliye, çerçeve elemanlar ve rijit bağlantı elemanları şeklinde, diğerinde ise tabliye plak olarak modellenmiştir. Modellerden elde edilen sonuçların doğruluğunun sorgulanması için, sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) programı ile gerçek eleman boyutlarıyla, 3 boyutlu bir model daha oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modellerin detayları takip eden bölümlerde incelenecektir.

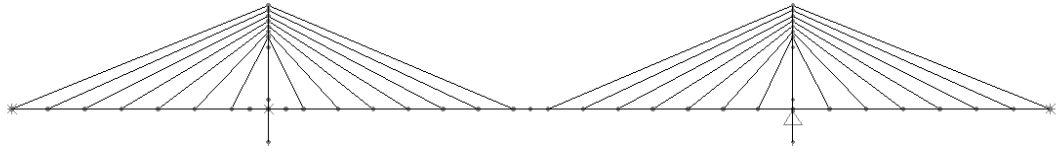
3.3.1. Model 1: 2 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Bu modelde bütün elemanlar, yatayda (x) ve düşeyde (z) eksenini kullanılarak 2 boyuta indirgenmiş, hesap kolaylığı açısından bu tip bir modelin geçerliliği incelenmiştir. Tabliye ortasından boyuna geçen eksen (x) eksenini ve ona dik çıkan eksen de (z) eksenini olarak belirlenmiştir. Elemanları 2 boyuta indirmek üzere, eleman rijitlikleri düşünülerek çeşitli kabuller yapılmıştır.

Tabliye, zaten (x) eksenini boyunca uzandığı için rijitliği ve birim ağırlığı denk olan çerçeve eleman şeklinde modellenmiştir. Normalde 14,16x0,23 m boyutlarında olan betonarme tabliye, bölüm 3.2.3'te anlatıldığı gibi, çelik kirişlerin beton davranışına

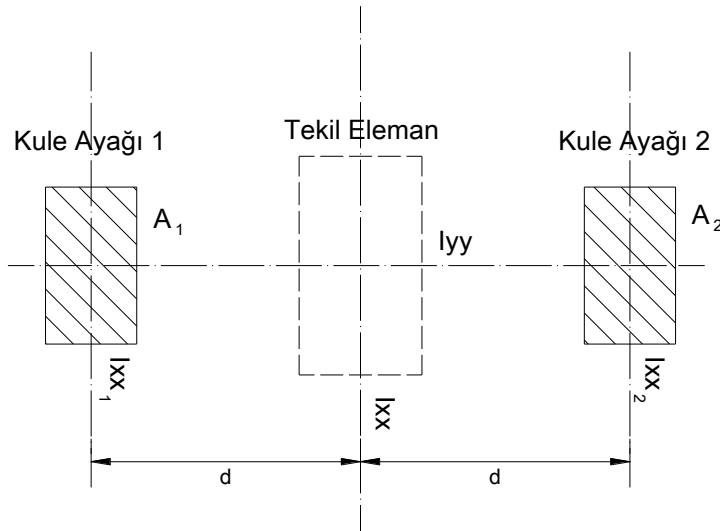
benzetilerek kesite katılmasıyla, genişliği 14,16 m ve derinliği 0,47 m olan beton çerçeve eleman tanımlanmıştır. (Şekil 3.6)

İkili düzlemde yerleşmiş olan kabloların rijitliğini benzeştirmek için, 2 kablo alanına sahip yeni çapta kablolar tasarlanmıştır.



Şekil 3.6. Model 1: 2 Boyutlu çerçeve elemanlar

Çift ayak üzerinde yükselen kuleyi, rijitliğini göz önünde bulundurarak tek çerçeve eleman olarak modelleyebilmek için ayakların orta yerinde eşdeğer I_{xx} ve I_{yy} atalet momentine sahip yeni bir eleman modellenmiştir. (Şekil 3.7)

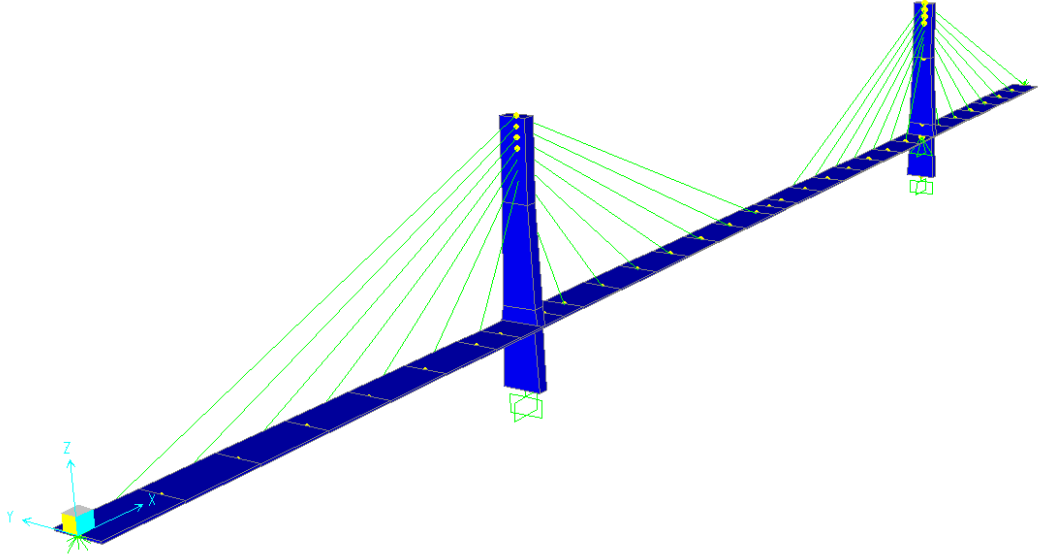


Şekil 3.7. Kule ayaklarının eşdeğer atalet momentinin bulunması

Bu hesaplama için ;

$$I_{xx} = I_{xx_1} + A_1 \times d^2 + I_{xx_2} + A_2 \times d^2 \text{ formülü kullanılır}$$

Bu şekilde oluşturulan modelin, eleman rijitlikleri göz önüne alınarak oluşturulan görüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir.



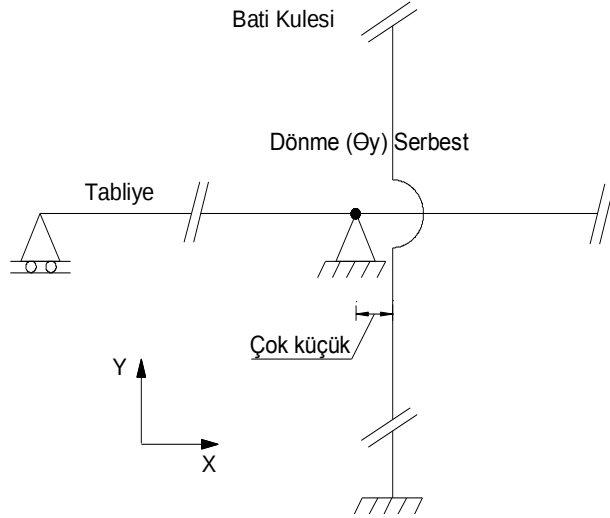
Şekil 3.8. Model 1: 2 Boyutlu model, eşdeğer eleman kalınlıkları ile

Bu modelde kuleler zemine ankastre bağlı, kablolar kuleye ve tabliyeye moment taşımayacak şekilde bağlanmıştır. Tabliye uçlarında (x) yönündeki ötelenme ve (y) eksenindeki dönme serbest bırakılmış durumdadır.

Modelde kule tabliye birleşim noktalarında tek düğüm noktası kullanılması durumunda, kule ve tabliye beraber hareket etmekte ve gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Bu noktalarda tabliyenin kuleden bağımsız ötelenme hareketini ve dönmesini yapabilmesi için özel düğüm noktaları oluşturulmuştur. Batı kulesi, tabliye birleşim noktasına çok yakın bir mesafede oluşturulan, istenen dönme serbestliğine sahip bu yeni mesnedin şematik gösterimi Şekil 3.9’da olduğu gibidir.

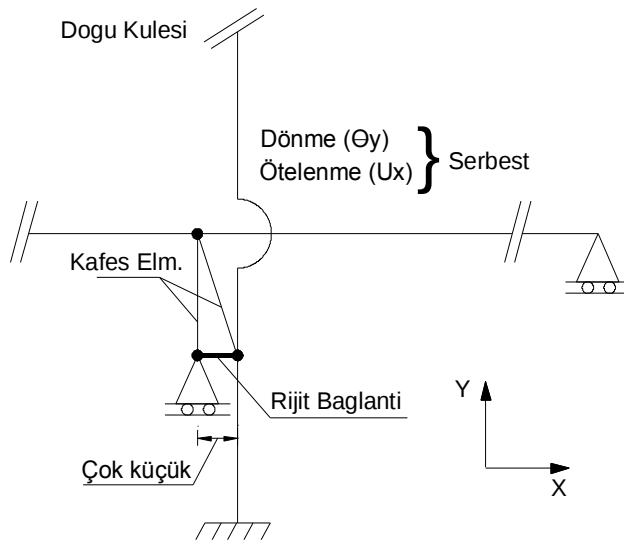
Doğu kulesinde ise hem (y) eksenini etrafındaki dönme ve hem de (x) eksenini boyunca olan ötelenme serbest bırakılmıştır. İstenen bu serbestliği sağlamak için kuleye çok yakın ve tabliyenin hemen altında tanımlanan yeni bir mesnet kullanılmıştır. Bu mesnet kuleye rijit bir bağlantı ile bağlanmıştır. Mesnetten tabliyeye ve tabliyeye

bağlandığı noktadan çapraz olarak rijit linkin kuleye bağlandığı noktaya 2 adet küçük alanlı kafes eleman yerleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Batı Kulesi ve tabliye birleşim noktası detayı

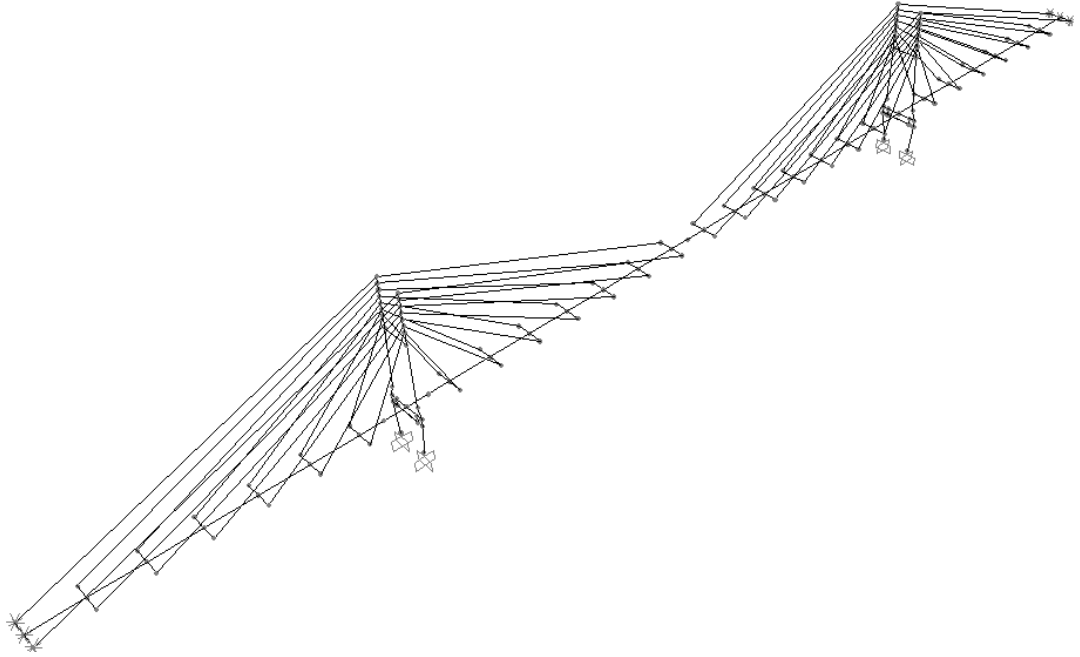
Bu şekilde o noktada tabliyenin serbestçe ötelenmesi ve dönmesine olanak sağlanmıştır. (Şekil 3.10)



Şekil 3.10. Doğu Kulesi ve tabliye birleşim noktası detayı

3.3.2. Model 2: 3 Boyutlu, Rijit Bağlantılı Tabliye

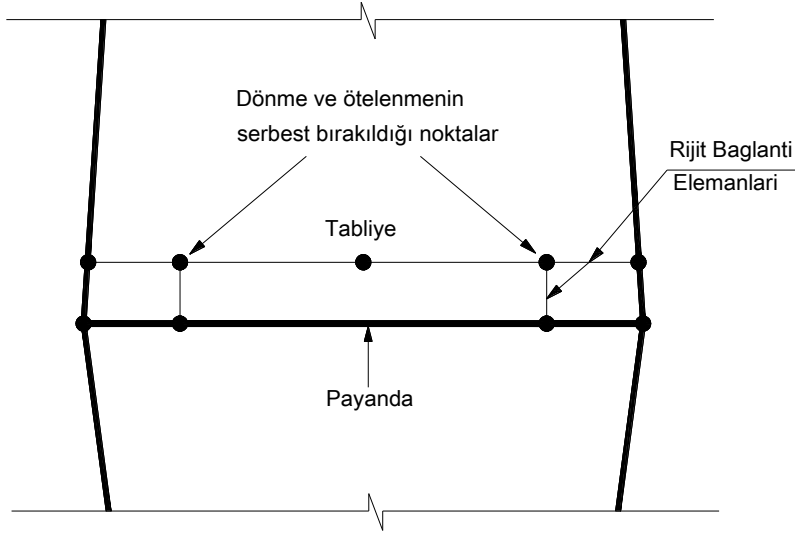
Bu modelde kablo ve kule elemanları gerçek boyut, malzeme özellikleri ve rijitlikleri ile girilebilmiştir. Burada tabliye, 2 boyutlu modelde kullanılan 47 cm derinlikteki beton çerçeve eleman olarak modellenmiş fakat 2 boyutlu modelden farklı olarak burada kabloların tabliyeye bağlanması gereken noktaları birleştiren rijit bağlantı elemanları kullanılarak tabliye bağlantısı sağlanmıştır (Şekil 3.11) Bu şekilde tabliye için daha kompleks olan plak çözümü çerçeve eleman çözümüne indirgenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.11. Model 2: 3 Boyutlu rijit bağlantılı tabliye modeli

Bu modelde kuleler zemine ankastre bağlı, kablolar kuleye ve tabliyeye moment taşımayacak şekilde bağlanmıştır. Tabliye uçlarında (x) yönündeki ötelenme ve (y) eksenindeki dönme serbest bırakılmış durumdadır.

Kule tabliye bağlantı noktalarındaki serbestliklerin 2 boyutlu modeldeki serbestliklerle aynı olması için, kulelerde tabliyenin oturduğu yerin kuleye bağlandığı noktalarda, ağırlıksız olarak tanımlanan rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır. (Şekil 3.12)



Şekil 3.12. Tabliyenin payanda ve kule ile birleşimi

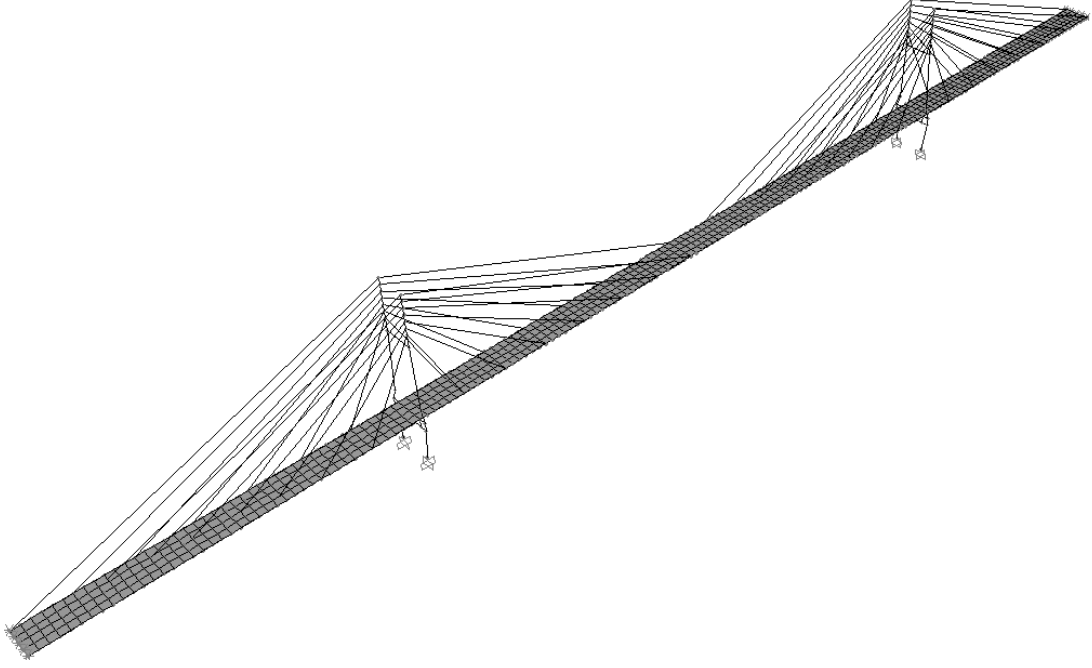
Bu birleşimde tabliye rijit elemanlarla hem payandaya hem de kuleye bağlanmıştır. Tabliyenin serbestliklerinin sağlanması için Şekil 2.12’de gösterilen düğüm noktalarının X yönündeki hareketi ve Y eksenini etrafındaki dönme hareketi serbest bırakılır.

3.3.3. Model 3: 3 Boyutlu Plak Tabliye

Bu model, “Model 2” gibi 3 boyutlu olup, 2. modelden farklı olarak tabliye plak elemanlarla tanımlanmıştır. Bu şekliyle 3. model eleman tanımları açısından gerçeğe en yakın modeldir. Plak kalınlığı için bölüm 2.2.3’te anlatılan 30,2 cm kalınlığındaki tabliye kullanılmıştır. Bu tabliyede takviye kirişleri beton tabliyeye katılmış, çelik ana kirişler ise orijinal şekliyle modele dahil edilmiştir. (Şekil 3.13)

Bu modelde önceki modelde olduğu gibi kuleler zemine ankastre bağlı, kablolar kuleye ve tabliyeye moment taşımayacak şekilde bağlanmıştır. Tabliye uçlarında (x) yönündeki ötelenme ve (y) eksenindeki dönme serbest bırakılmış durumdadır.

Kule tabliye bağlantı noktalarındaki serbestliklerin 2 boyutlu modeldeki serbestliklerle aynı olması için, tabliyenin oturduğu yerin kuleye bağlandığı noktalarda, ağırlıksız olarak tanımlanan rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır.



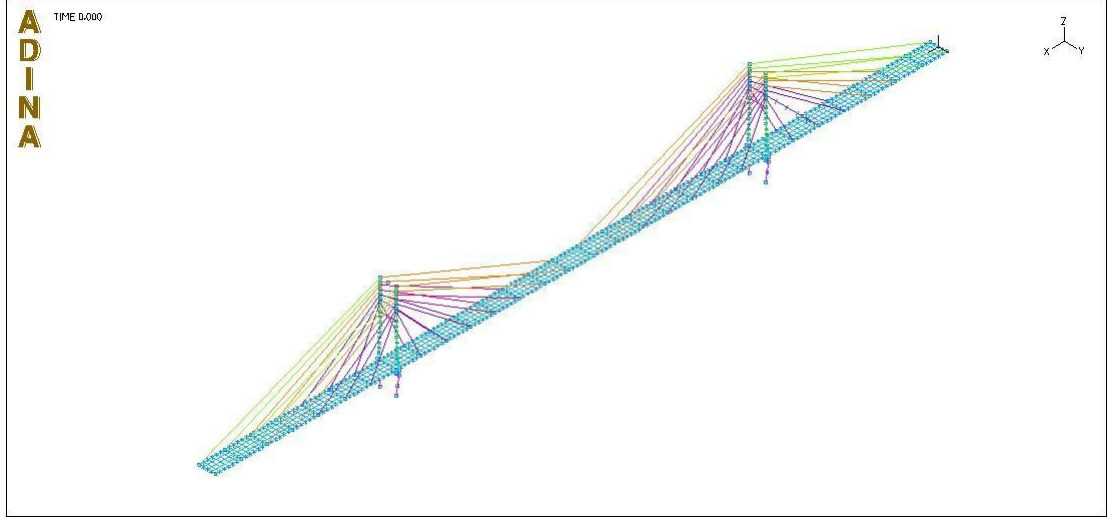
Şekil 3.13. Model 3: 3 Boyutlu plak tabliyeli model

3.3.4. ADINA ile Oluşturulan 3 Boyutlu Kontrol Modeli

Oluşturulan 3 modelin sonuçları kendi aralarında karşılaştırıldıktan sonra, sonuçların gerçek davranışa yakınlığının sorgulanması için daha detaylı sonlu elemanlar analizi yapan ADINA programı ile gerçek eleman boyutlarıyla 3 boyutlu farklı bir model daha oluşturulmuştur. (Şekil 3.14)

Bu modelde olabildiğince yaklaşım yapmaktan kaçınarak en doğru sonucun elde edilmesine çalışılmıştır. Bu şekilde diğer modelde yaptığımız yaklaşımların doğruluğunun sorgulanması söz konusu olabilecektir. Bu modeldeki eleman boyutları ve şekilleri yapının gerçek haline uygun ve 3. modeldeki gibi olup gerçeğe en uygun model olarak tasarlanmıştır.

Tabliye plak elemanlar olarak tasarlanmış olup, gerçek halinde var olan I kesitli buyk ana kirişler de olduğu gibi modellenmiştir.



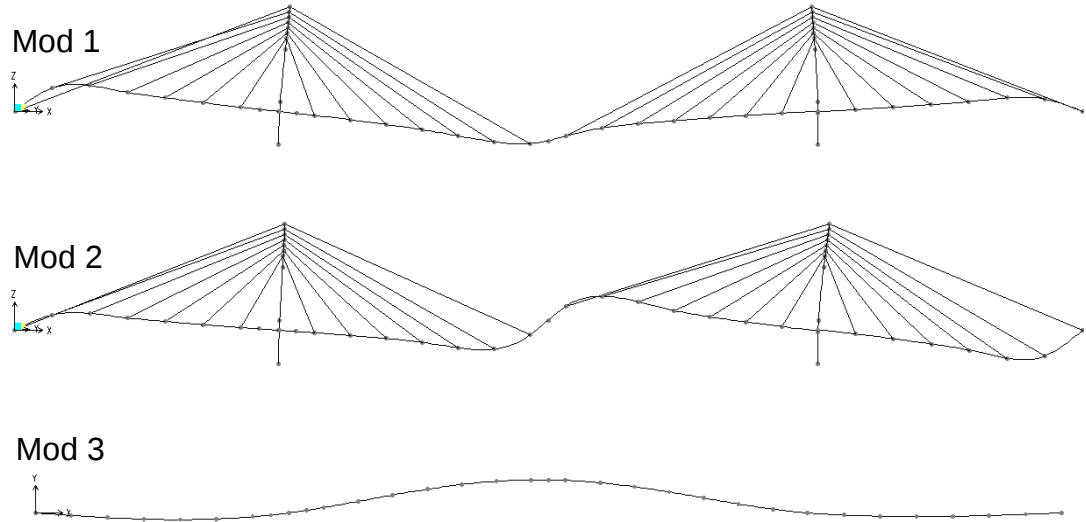
şekil 3.14. ADINA 3 Boyutlu model

4. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

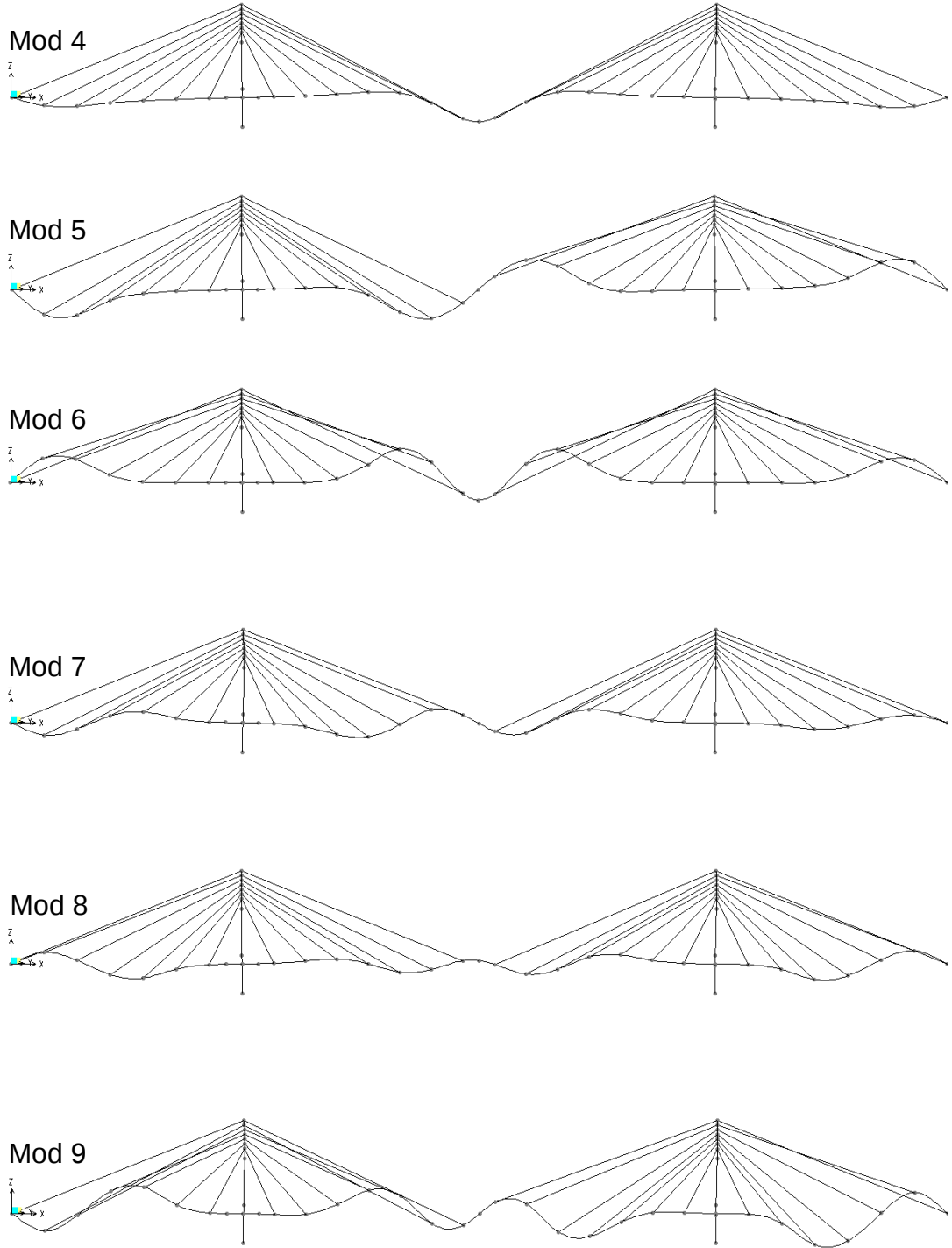
Kablolu köprü dinamik analizi için seçilen Quincy Bayview köprüsü, önceki bölümlerde anlatıldığı gibi 3 şekilde modellenerek, sonlu elemanlar yöntemi ile SAP2000 programında modal analizi yapılarak sonuçlar alınmıştır. Sonuçların incelenmesi amacıyla, ilk 20 mod şekli ve periyotları dikkate alınmıştır. Sonuçlar aynı köprü üzerinde önceden yapılan bir çalışma ile karşılaştırılarak, [31]. modellerin kendi içinde karşılaştırılmalarıyla gerçek davranışa en uygun modellemenin hangisi olacağı konusu irdelenmiştir.

4.1. Model 1: 2 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli sonuçları

SAP2000 programı ile yapılan 2 boyutlu analiz sonucu oluşan mod şekilleri ve periyotlar Şekil 4.1'de gösterilmiş ve mod şekilleri karakteristik olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 4.1. Model 1: Mod şekilleri

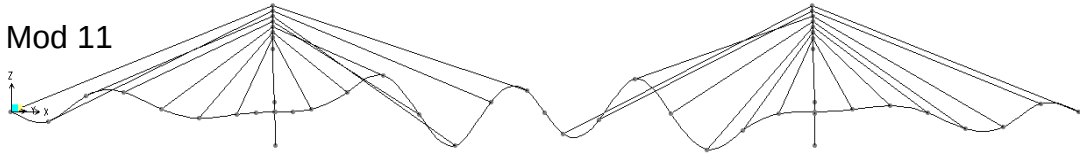


Şekil 4.1. (Devam) Model 1: Mod şekilleri

Mod 10



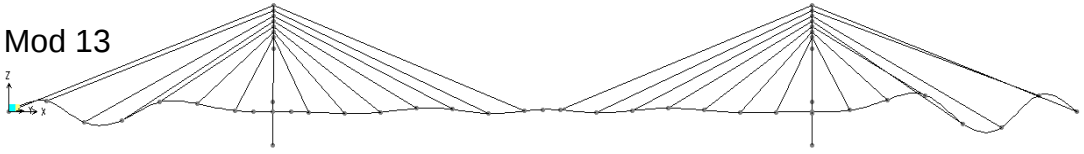
Mod 11



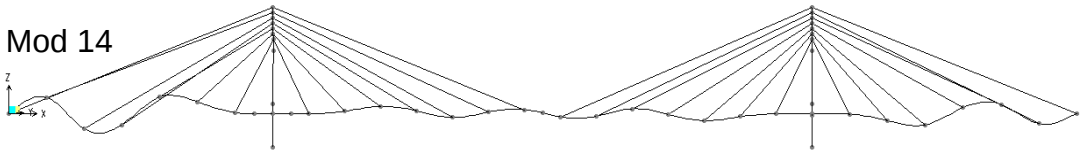
Mod 12



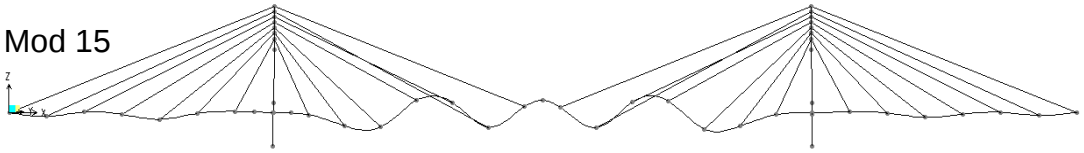
Mod 13



Mod 14



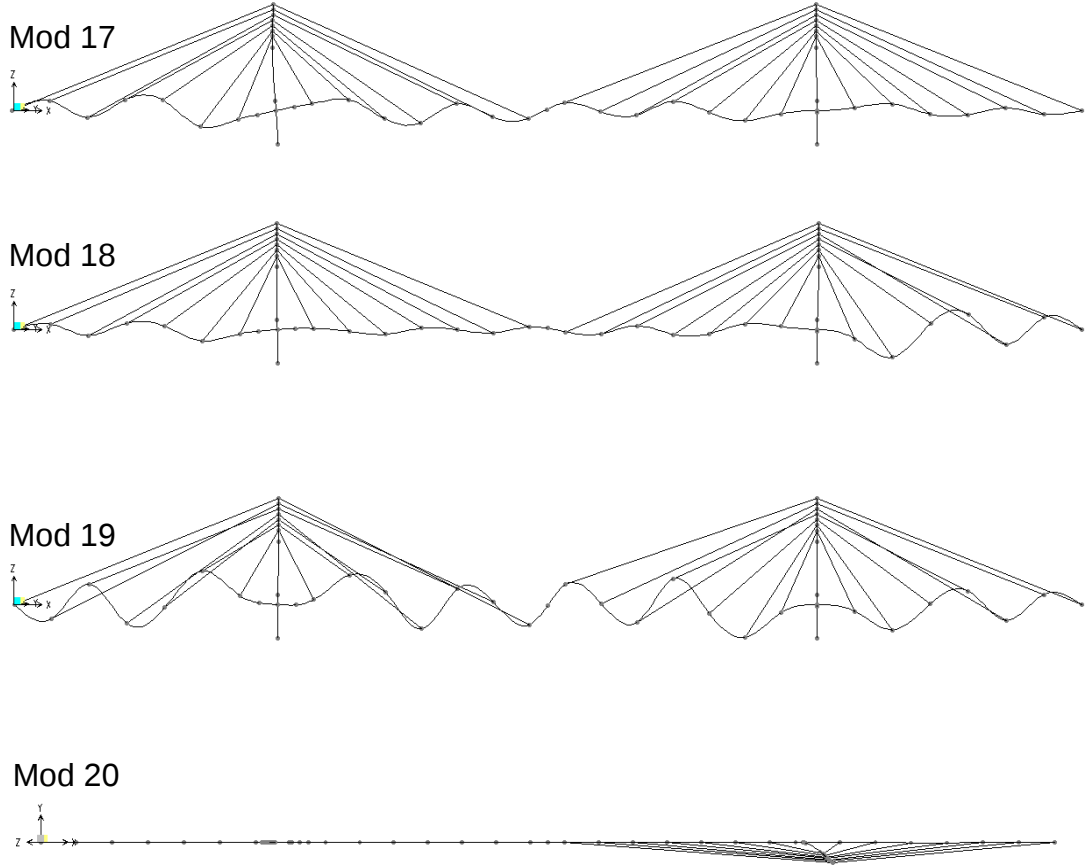
Mod 15



Mod 16



Şekil 4.1. (Devam) Model 1: Mod şekilleri



Şekil 4.1. (Devam) Model 1: Mod şekilleri

Mod şekillerinden görüldüğü gibi köprünün tabliye ve kuleleri, hem yatay hem de düşeyde çeşitli şekillerde salınım göstermektedir. Elde edilen bu mod şekillerine, diğer modellerle karşılaştırma yapabilmek için karakteristik isimler verilmiştir. (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1. Model 1: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar

Model 1				
Mod No.	Salının Bölgesi	Salınım	Alt Mod No.	Periyot (sn)
1	Tabliye	Düşey	1	2,90654
2	Tabliye	Düşey	2	2,47169
3	Tabliye	Yatay	1	1,94463
4	Tabliye	Düşey	3	1,3633
5	Tabliye	Düşey	4	1,24244
6	Tabliye	Düşey	5	1,17716
7	Tabliye	Düşey	6	1,0598
8	Tabliye	Düşey	7	1,01504
9	Tabliye	Düşey	8	0,99515
10	Tabliye	Düşey	9	0,94085
11	Tabliye	Düşey	10	0,87363
12	Kule	Batı Kule Tekil	3	0,83304
13	Tabliye	Düşey	11	0,83261
14	Tabliye	Düşey	12	0,82988
15	Tabliye	Düşey	13	0,76366
16	Tabliye	Yatay	2	0,75756
17	Tabliye	Düşey	14	0,69081
18	Tabliye	Düşey	15	0,66928
19	Tabliye	Düşey	16	0,6654
20	Kule	Doğu Kule Tekil	4	0,65534

Çizelge 4.1’de her moda ait “salınım bölgesi” salınının baskın olduğu bölgeyi belirtmek üzere, “tabliye”, “kule” şeklinde ayrılmış olup, salınının tipleri ise “Salınım” kolonunda, yatay, düşey, kule ve burulma şeklinde gruplanarak her grup kendi içinde alt mod numarası ile numaralandırılmıştır.

Modlar ağırlıklı olarak tabliyenin düşey salınınının farklı şekillerde ortaya çıkmasından oluşmakta olup, tabliyenin yatay salınımları ve kule salınımları da farklı modlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Tabliye yatay salınım modları çizelgelerde gri renkte, kule salınımları mavi renkte ve burulma modları ise turuncu renkte boyanmıştır.

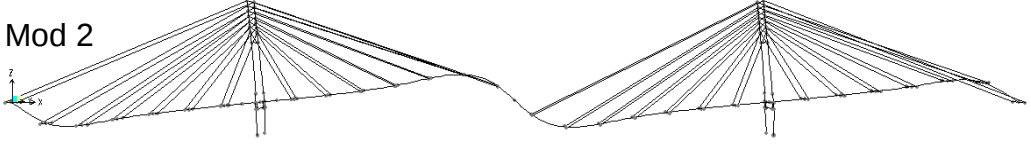
4.2. Model 2: 3 Boyutlu Rijit Bağlantılı Tabliye

SAP2000 programı ile yapılan 3 boyutlu analiz sonucu oluşan mod şekilleri ve periyotlar Şekil 4.2’de gösterilmiş ve mod şekilleri karakteristik olarak isimlendirilmiştir.

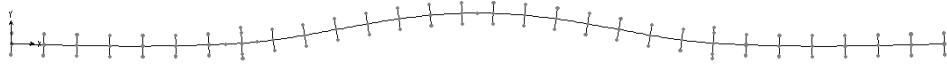
Mod 1



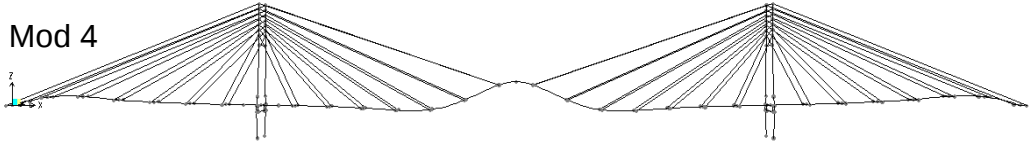
Mod 2



Mod 3



Mod 4



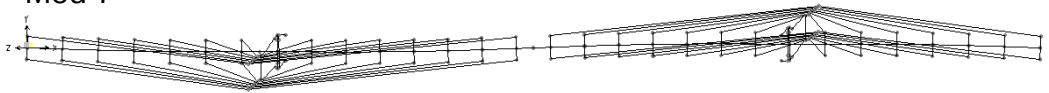
Mod 5



Mod 6

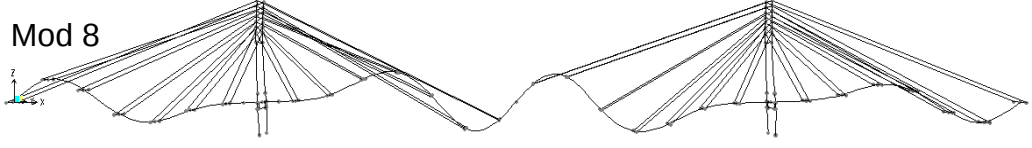


Mod 7

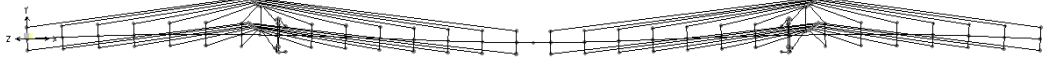


Şekil 4.2. Model 2: Mod şekilleri

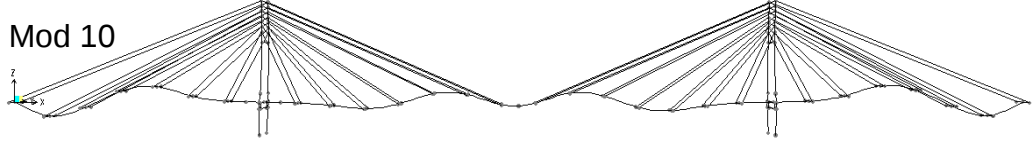
Mod 8



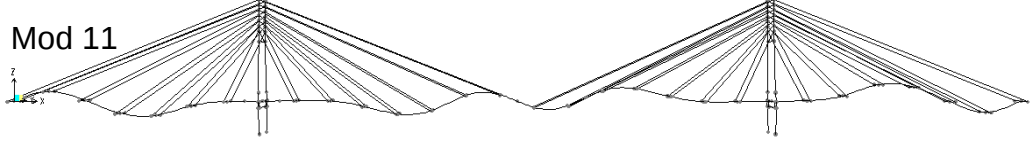
Mod 9



Mod 10



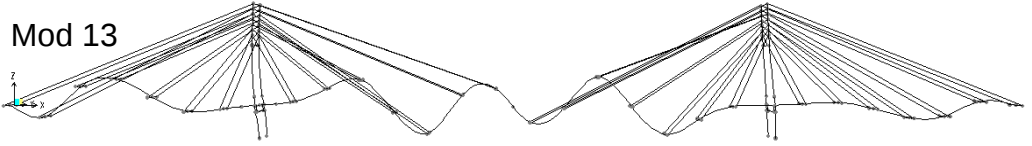
Mod 11



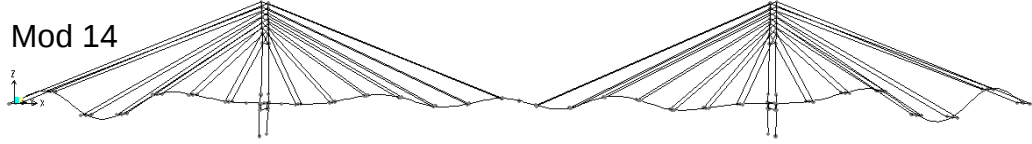
Mod 12



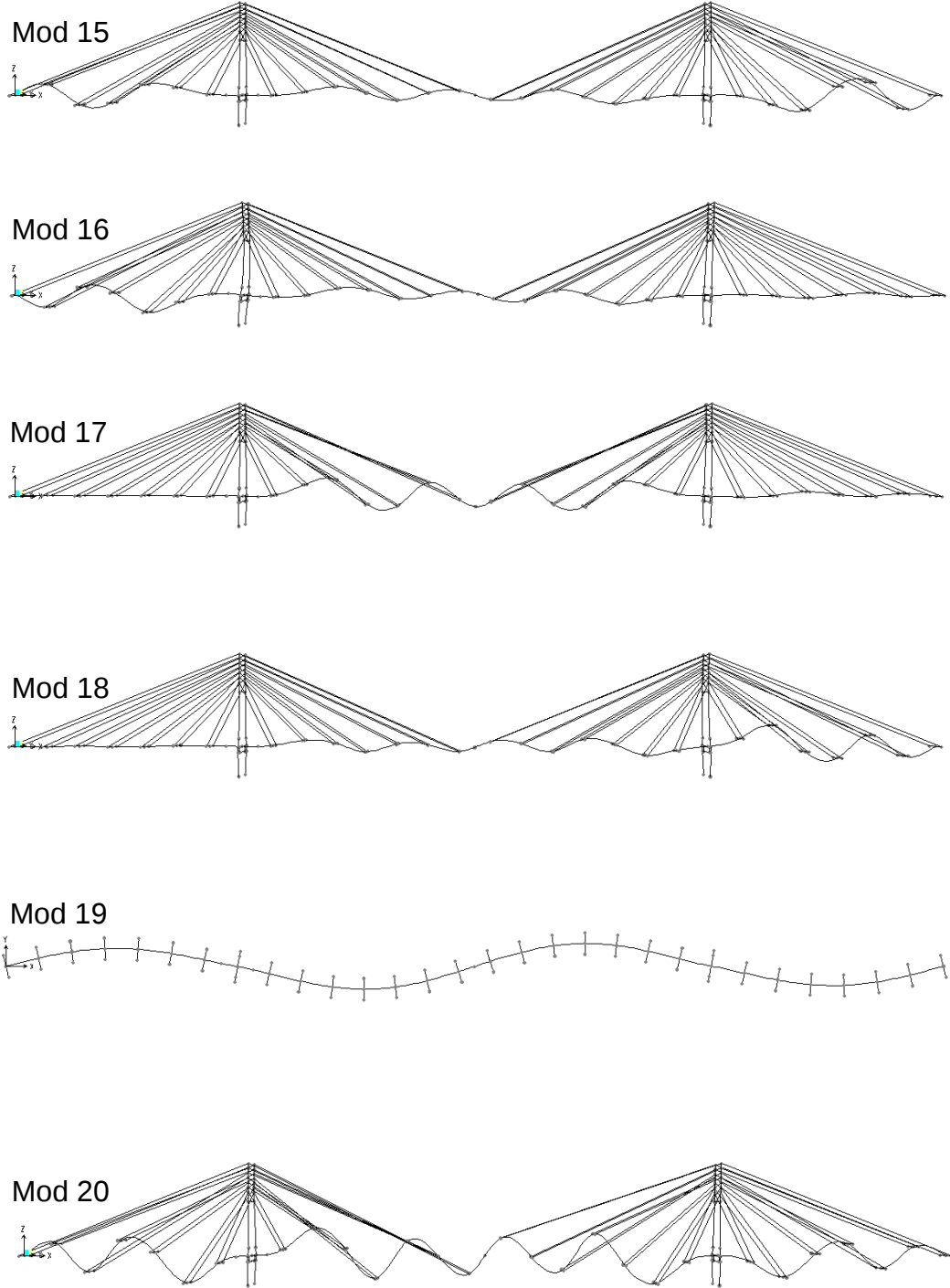
Mod 13



Mod 14



Şekil 4.2. (Devam) Model 2: Mod şekilleri



Şekil 4.2. (Devam) Model 2: Mod şekilleri

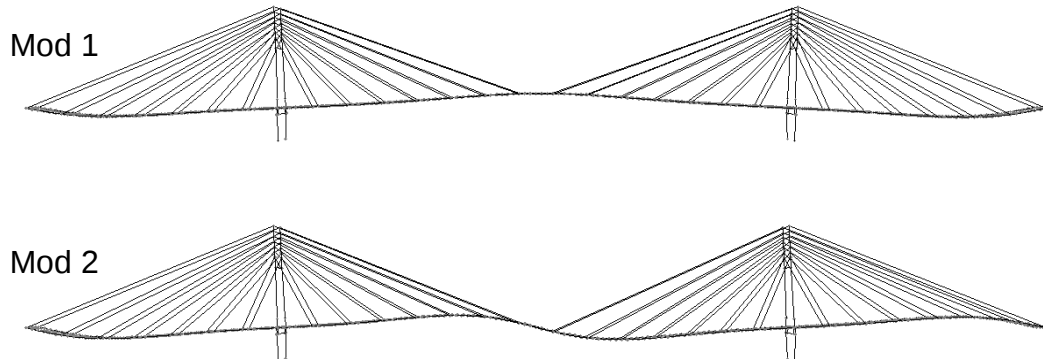
Model 2'nin mod şekilleri Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Model 2: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar

Model 2				
Mod No.	Salının Bölgesi	Salınım	Alt Mod No.	Periyot (sn)
1	Tabliye	Düşey	1	2,9353
2	Tabliye	Düşey	2	2,5078
3	Tabliye	Yatay	1	1,7305
4	Tabliye	Düşey	3	1,3684
5	Tabliye	Düşey	4	1,2435
6	Tabliye	Düşey	5	1,1778
7	Kule	İki yöne	1	1,0588
8	Tabliye	Düşey	6	1,0494
9	Kule	Aynı Yöne	2	1,0407
10	Tabliye	Düşey	7	1,0214
11	Tabliye	Düşey	8	0,9965
12	Tabliye	Düşey	9	0,9414
13	Tabliye	Düşey	10	0,8802
14	Tabliye	Düşey	11	0,8381
15	Tabliye	Düşey	12	0,8317
16	Tabliye	Düşey	15	0,8130
17	Tabliye	Düşey	13	0,7596
18	Tabliye	Düşey	14	0,6796
19	Tabliye	Yatay	2	0,6672
20	Tabliye	Düşey	16	0,6654

4.3. Model 3: 3 Boyutlu Plak Tabliye

SAP2000 programı ile yapılan 3 boyutlu analiz sonucu oluşan mod şekilleri Şekil 4.3'de gösterilmiş ve mod şekilleri karakteristik olarak isimlendirilmiştir.

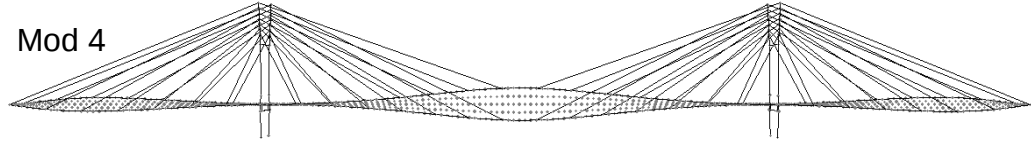


Şekil 4.3. Model 3: Mod şekilleri

Mod 3



Mod 4



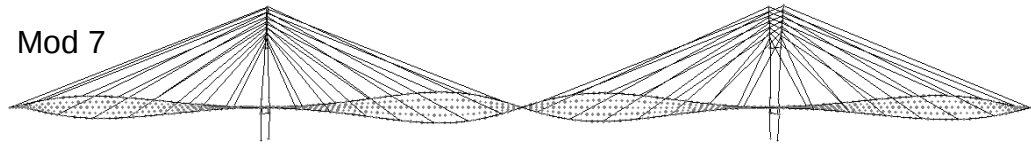
Mod 5



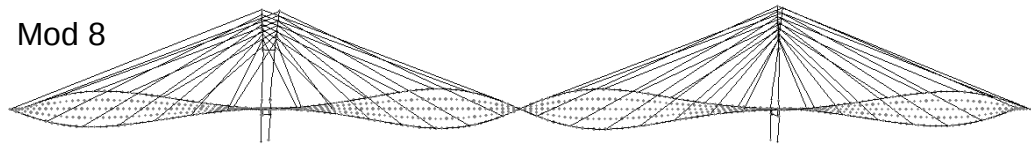
Mod 6



Mod 7



Mod 8



Şekil 4.3. (Devam) Model 3: Mod şekilleri

Mod 9



Mod 10



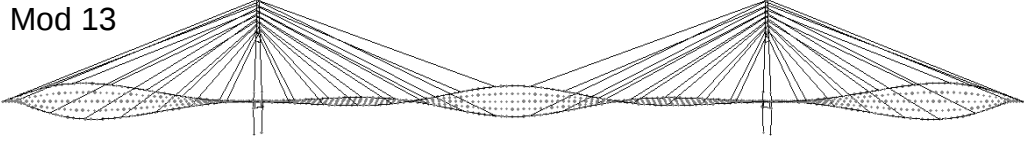
Mod 11



Mod 12



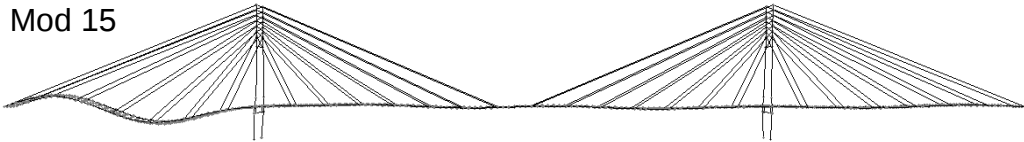
Mod 13



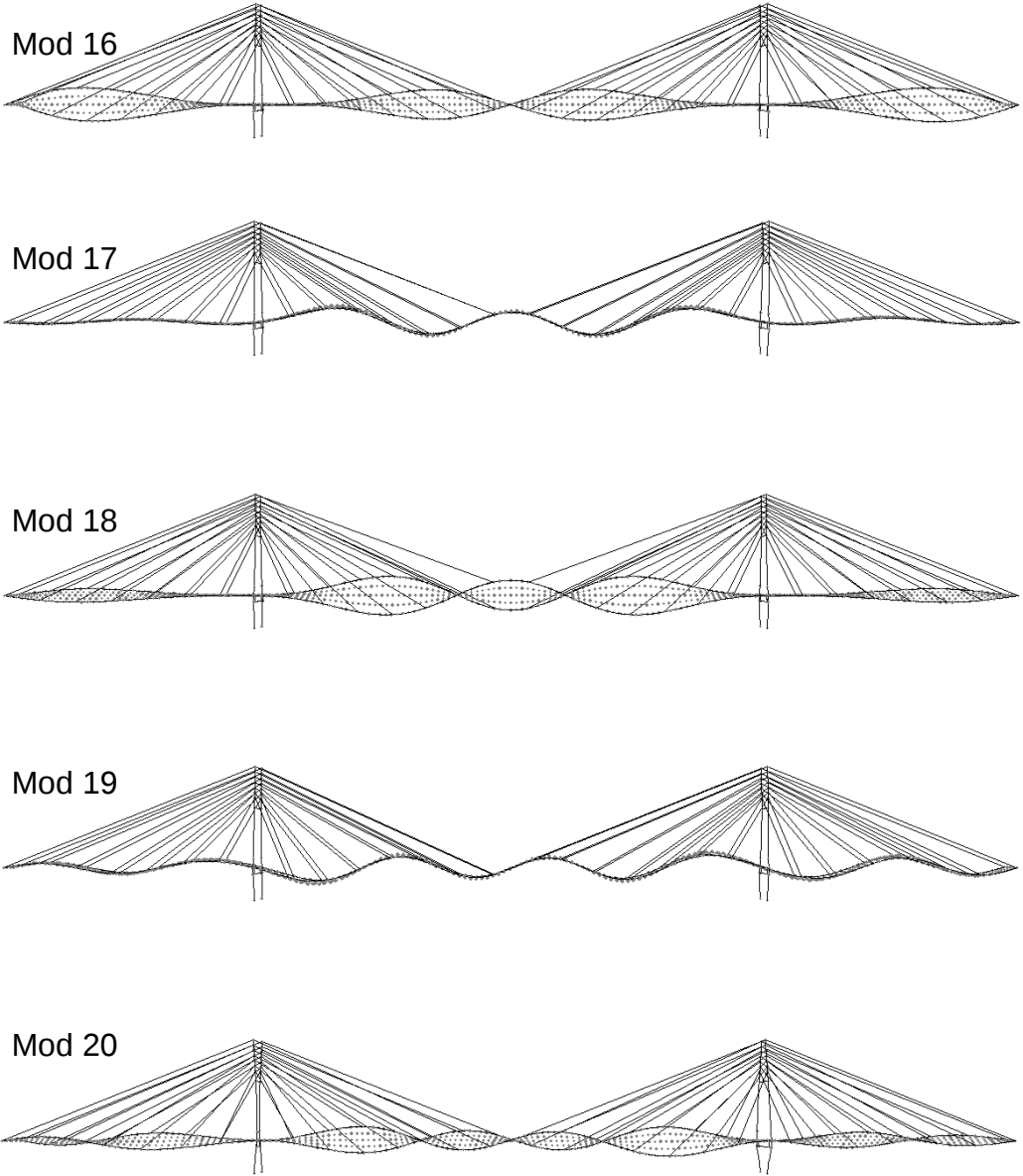
Mod 14



Mod 15



Şekil 4.3. (Devam) Model 3: Mod şekilleri



Şekil 4.3. (Devam) Model 3: Mod şekilleri

Tabliyenin plak olarak modellendiği bu modelde farklı olarak tabliyenin burulma modu sıkça ortaya çıkmaktadır. Diğer modellerde olduğu gibi mod şekilleri ve periyotlar Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. Model 3: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar

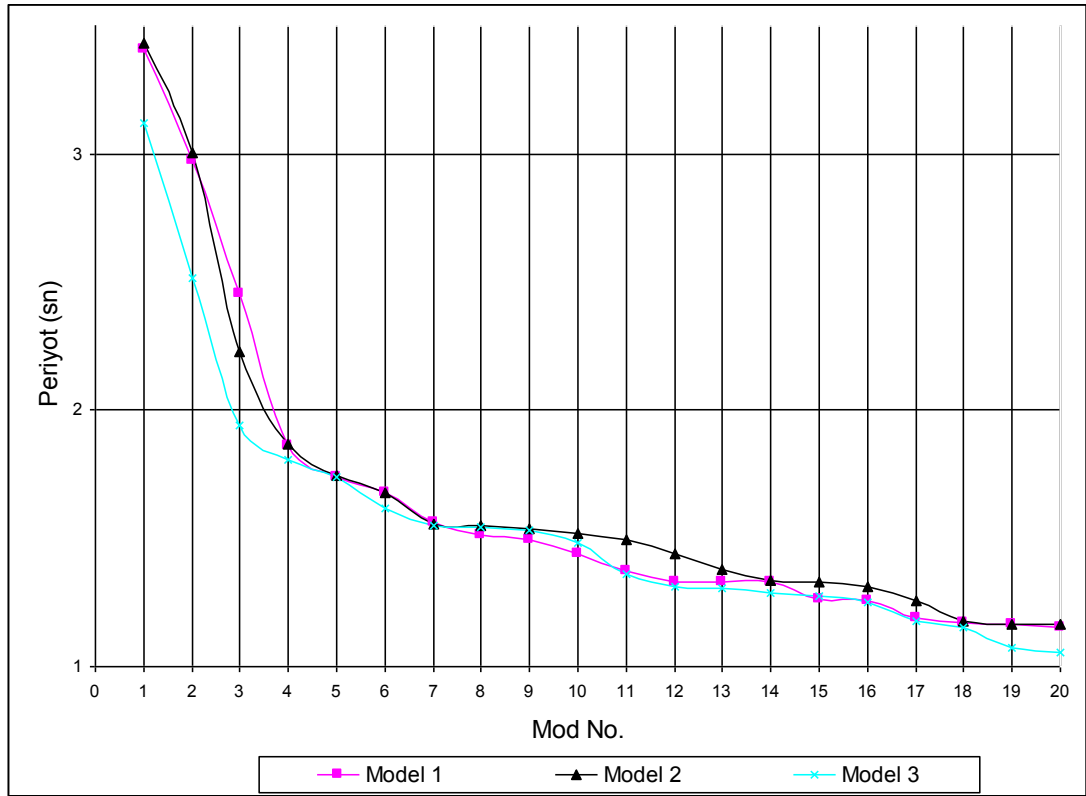
Model 3				
Mod No.	Salının Bölgesi	Salınım	Alt Mod No.	Periyot (sn)
1	Tabliye	Düşey	1	2,6190
2	Tabliye	Düşey	2	2,0173
3	Tabliye	Yatay	1	1,4417
4	Tabliye	Burulma	1	1,3076
5	Tabliye	Düşey	3	1,2411
6	Tabliye	Düşey	4	1,1166
7	Tabliye	Burulma	2	1,0481
8	Tabliye	Burulma	3	1,0440
9	Kule	Aynı Yöne	2	1,0313
10	Tabliye	Düşey	5	0,9846
11	Tabliye	Düşey	6	0,8581
12	Tabliye	Düşey	7	0,8110
13	Tabliye	Burulma	4	0,8072
14	Tabliye	Düşey	8	0,7859
15	Tabliye	Düşey	9	0,7761
16	Tabliye	Burulma	5	0,7509
17	Tabliye	Düşey	10	0,6766
18	Tabliye	Burulma	6	0,6536
19	Tabliye	Düşey	11	0,5743
20	Kule	Burulma	7	0,5574

İlk 20 modda görüldüğü üzere, depremde köprünün yapabileceği salınımlar, modlar arası kayma söz konusu olsa da 3 modelde de benzer durumdadır. Mod şekillerinde genelde tabliyenin düşeyde yaptığı farklı salınımlar baskın görünmektedir. Bu modların arasında ise tabliyenin yatay salınımları ve kule salınımları bulunmaktadır.

Salınımların özetlendiği çizelgelerde modlar numaralarına göre dizilmiş olup, baskın salınının olduğu yer “Salının Bölgesi” kolonunda, salınının şekli “Salınım” kolonunda belirtilmiştir. Salınım şekilleri de kendi içinde farklı şekillerde ortaya çıktığı için alt mod numaraları verilmiştir. Yani, tabliye düşey salınımları, tabliye yatay salınımları, tabliye burulmaları ve kule salınımları kendi içinde ayrıca numaralandırılmıştır.

Çizelgelerde modlar sıralandığı zaman, yatay salınının veya kule salınınının görüldüğü modlar yer değiştirmiş olsa bile tabliye düşey modlarının sırası aynı

kalmaktadır. Düşey modlar yataydan bakıldığında tabliyede görülen bir dalga hareketi olarak tanımlanabilir. Bu salınımlar ilk modlarda az dalgalı bir yapı gösteriyor olup, ilerleyen modlarda dalga sayıları artış göstermektedir. Düşey salınımlarda dikkat çeken başka bir konu ise modların bir simetrik, bir simetrik olmayan şeklinde sıralanmış olmasıdır. Mod periyotları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Modların periyotlarının karşılaştırılması

Model 1'de hiç burulma modu görülmeyip, baskın olarak tabliye düşey salınımları görülmüştür. Tabliye yatay salınımlarının birincisi 3. modda görülmüş ve ikinci yatay salınım 16. modda görülmüştür. Kule salınımları ise; batı kulesinin tekil salınımları 12. ve doğu kulesinin tekil salınımları 20. modda olmak üzere 2 adet görülmüştür. Kule salınımlarının tekil olmasının nedeni olarak, modelin 2 boyutlu olmasından dolayı kuleler arasında salınımları aktaracak elemanların olmaması olarak açıklanabileceği düşünülmüştür.

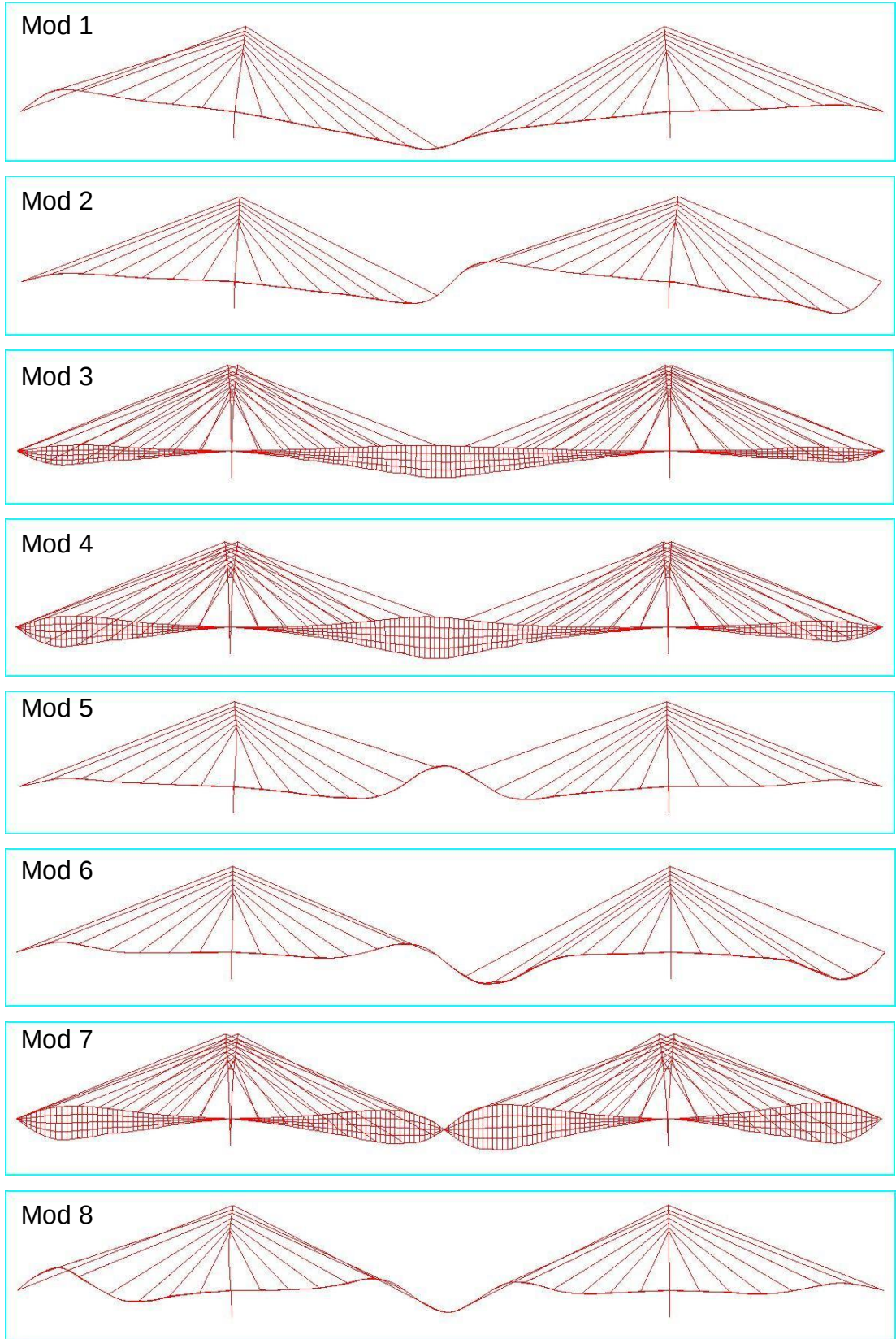
Model 2, mod şekilleri olarak Model 1'e yakındır. Bu modelde kule salınımları daha erken modlarda görülmekte olup kulelerin ikisinin birden, aynı veya farklı yönde salınması şeklinde ortaya çıkmıştır. 3 Boyutlu bir model olmasından dolayı buradaki kule salınımlarının gerçeğe daha uygun olduğu düşünülmektedir. Yatay tabliye salınımlarının ilki 1. modelde olduğu gibi 3. modda ortaya çıkmış diğeri ise 19. modda görülmüştür. Özetle 1. ve 2. modellerde mod şekilleri, 2'şer adet görülen tabliye yatay ve kule salınımlarından başka hepsi tabliyenin düşeyde yaptığı salınımlardan oluşmaktadır.

Model 3'te ise köprü 3 boyutlu düşünülmüş olup tabliyesi plak olarak modellenmiştir. Diğer modellerde olmayan tabliye burulması modları bu modelde ortaya çıkmaktadır. İlk 20 modda 6 adet tabliye burulması modu görülmekte olup, bu durumun gerçek davranışa daha uygun olduğu düşünülmektedir. Tabliye yatay salınımı diğer modellerdeki gibi 3. modda ortaya çıkmakta ve ilk 20 modda başka yatay salınım modu görülmemektedir. Kule salınımı olan mod 9. modda ortaya çıkmakta ve iki kulenin aynı yöne salınımı şeklinde olmaktadır.

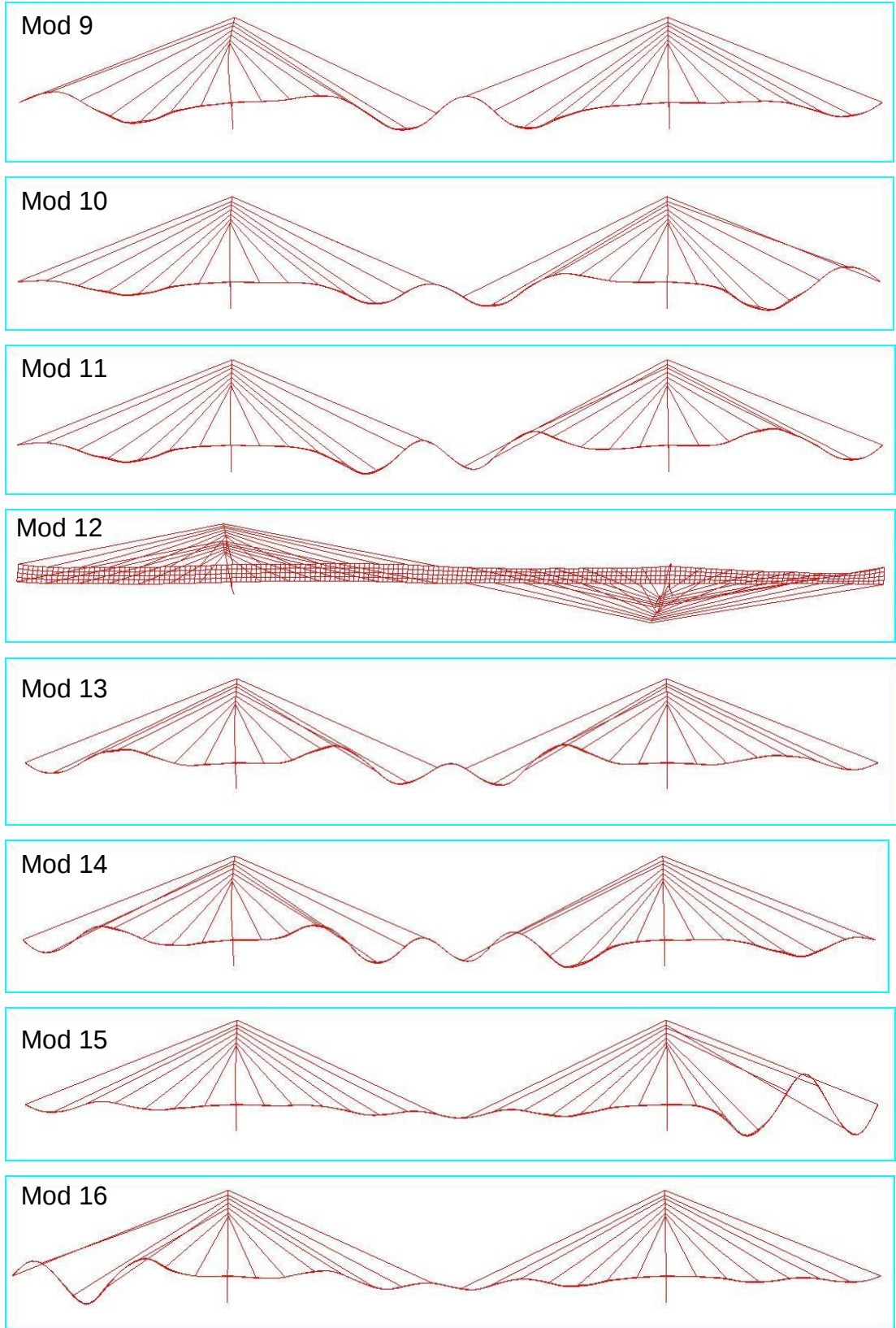
Şekil 4.1'deki grafikte görüldüğü üzere, 1 ve 2. modelin periyotları başlangıçta yakın olup 3. modelin periyotları daha düşüktür. 4 ve 9. modlar arası bütün modellerde periyot değerleri birbirine yakındır. Bazı modlarda birleşip bazılarında farklı periyotlar verseler de genelde 3 modelin periyot değerleri paralellik arz etmektedir.

4.4. Kontrol Modeli

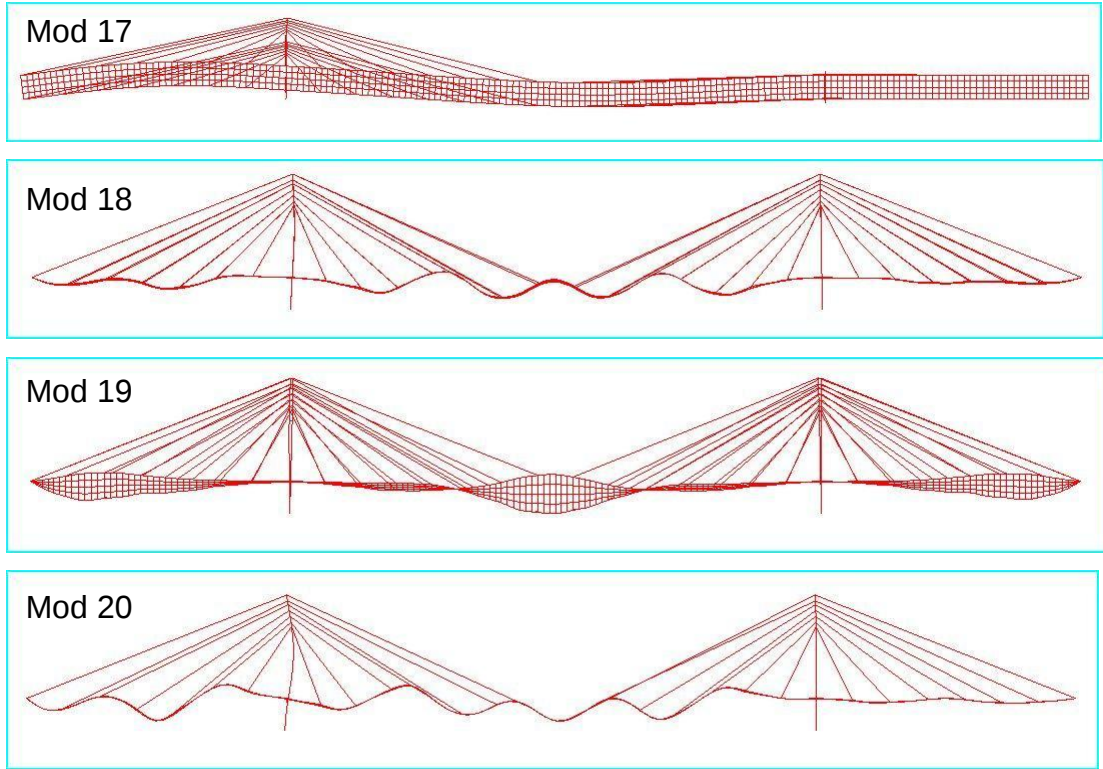
Mod şekilleri ve periyotların irdelendiği 3 modelin sonuçlarının birbirine yakın çıkmasıyla, modellerin sonuçlarının gerçek davranışa uygun sonuçlar verip vermediğinin sorgulanması amacıyla ADINA programı ile 3 boyutlu ayrı bir model oluşturulmuştur. Benzer şekilde ilk 20 mod şekli (Şekil 4.5) ve periyotları belirlenmiştir. (Çizelge 4.4)



Şekil 4.5. ADINA kontrol modeli, mod şekilleri



Şekil 4.5. (Devam) ADINA kontrol modeli, mod şekilleri



Şekil 4.5. (Devam) ADINA kontrol modeli, mod şekilleri

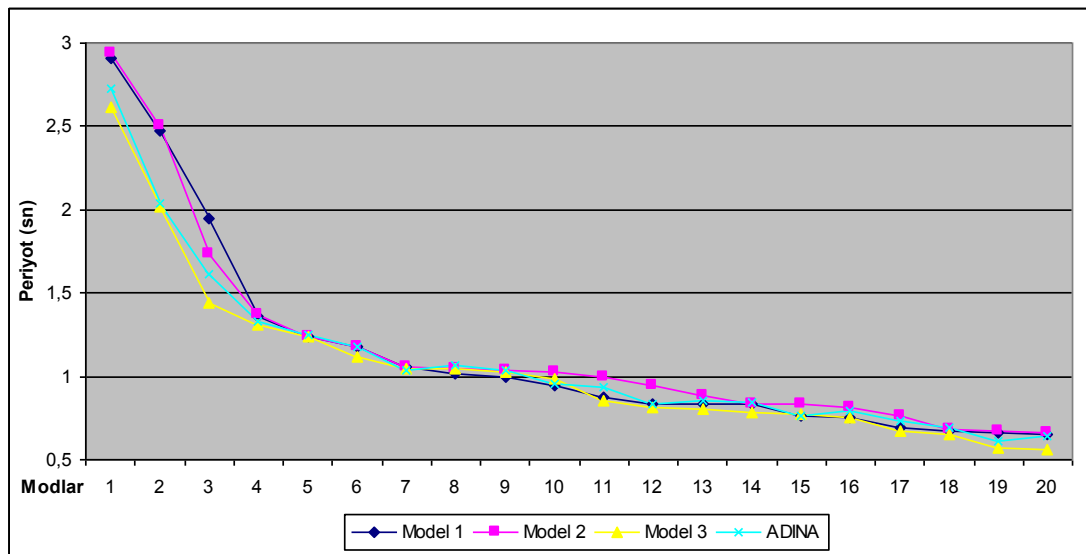
ADINA programı ile elde edilen modelin mod şekilleri karakteristik olarak diğer modellere benzer çıkmış olup, burulma modlarını da içermesiyle “Model 3”e benzerliği fark edilmektedir.

ADINA kontrol modeli sonuçları incelendiğinde periyotların diğer 3 modelle paralellik arz ettiği görülmektedir. Farklı bir programla benzer sonuçları elde edildiğinden modelimizin sayısal sonuçlarının kabul edilebilir ölçüde olduğunu göstermektedir. Mod şekilleri olarak da karakteristik olarak beklenen şekiller görülmüştür. Diğer modellerde olduğu gibi baskın mod şekli tabliyenin düşey yönde yaptığı salınımlardır. Kontrol modeli 3 boyutlu ve tabliye plak olarak modellendiğinden 3. modelle benzer mod şekilleri ortaya çıkmaktadır. Sadece 3. modelde görülen tabliye burulma modelleri bu modelde de ortaya çıkmaktadır. 12. ve 17. modlar kule salınım modları olup, 17. modda tabliyenin yatay hareketi de görülmekte olup 2 modun birleşimi şeklindedir.

Çizelge 4.4. ADINA Kontrol Modeli: Analiz sonucu mod tablosu ve periyotlar

ADINA Kontrol Modeli				
Mod No.	Salının Bölgesi	Salınım	Alt Mod No.	Periyot (sn)
1	Tabliye	Düşey	1	2,72348
2	Tabliye	Düşey	2	2,03576
3	Tabliye	Burulma	1	1,61341
4	Tabliye	Burulma	2	1,32976
5	Tabliye	Düşey	3	1,25108
6	Tabliye	Düşey	4	1,17627
7	Tabliye	Burulma	3	1,03596
8	Tabliye	Düşey	5	1,06337
9	Tabliye	Düşey	6	1,03428
10	Tabliye	Düşey	7	0,95307
11	Tabliye	Düşey	8	0,93726
12	Doğu Kule	Tekil	1	0,83369
13	Tabliye	Düşey	9	0,85456
14	Tabliye	Düşey	10	0,84702
15	Tabliye	Düşey	11	0,76617
16	Tabliye	Düşey	12	0,79228
17	Batı Kule	Tekil	2	0,72831
18	Tabliye	Düşey	13	0,69652
19	Tabliye	Burulma	4	0,61117
20	Tabliye	Düşey	14	0,64023

Çizelge 4.4.te verilen ADINA kontrol modelinin periyot değerlerinin diğer modellerle birlikte hazırlanan grafik gösterimi Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. ADINA Kontrol modelinin periyot değerlerinin karşılaştırılması

Modellerin farklı bir sistematikte kontrolü için oluşturulan bu model, sayısal sonuçları ve mod şekilleri açısından diğerleri ile paralellik göstermesiyle yapım amacına uygun sonuçlar vermiş ve modellerin gerçek dışı sonuçlar vermediği doğrulanmıştır.

4.5. Dinamik Analiz

Kablolu köprülerin dinamik davranışının farklı modeller üzerinden değerlendirilmesinin yapıldığı bu çalışmada modal analizlerin yanı sıra tepki spektrumu yöntemiyle dinamik analizler de yapılmıştır. SAP2000 programında yapılan dinamik analiz için tepki spektrum katsayısı $S(T)$, yerel zemin koşullarına ve bina doğal periyodu T 'ye bağlı olarak “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Olan Binalar Hakkında Yönetmelik” gereği, aşağıdaki gibi tanımlanır [32].

$$S(T) = 1 + 1.5 \frac{T}{T_A} \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad (4.1)$$

$$S(T) = 2.5 \quad (T_A < T \leq T_B) \quad (4.2)$$

$$S(T) = 2.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{0.8} \quad (T_B < T) \quad (4.3)$$

$S(T)$: Spektrum katsayısı

T : Yapının doğal periyodu

T_A : Spektrum 1. karakteristik periyodu

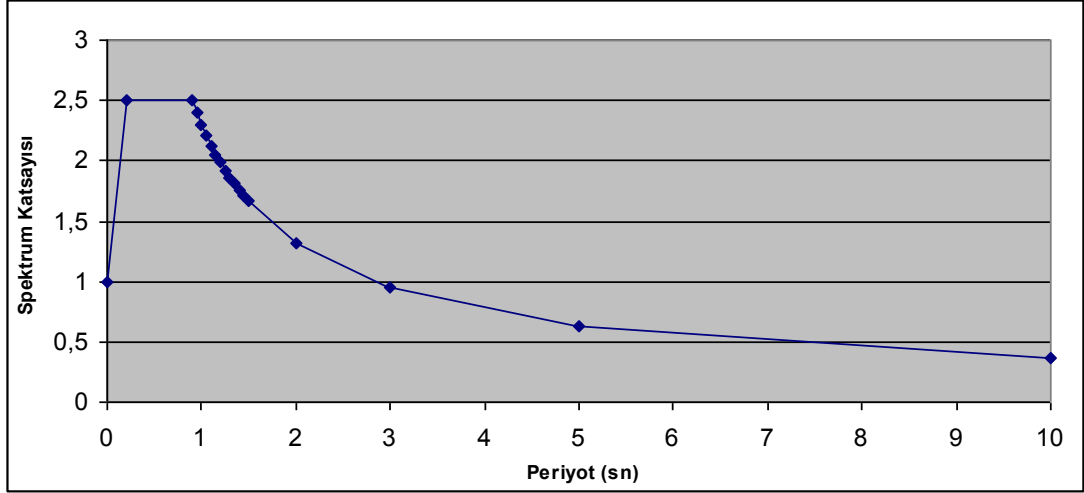
T_B : Spektrum 2. karakteristik periyodu

Bu denklemlerdeki spektrum karakteristik periyotları yönetmelik gereği Çizelge 4.5'teki değerler kullanılır.

Çizelge 4.5. Spektrum karakteristik periyotları (T_A , T_B)

<i>Yerel Zemin Sınıfı</i>	T_A (saniye)	T_B (saniye)
Z1	0,10	0,30
Z2	0,15	0,40
Z3	0,15	0,60
Z4	0,20	0,90

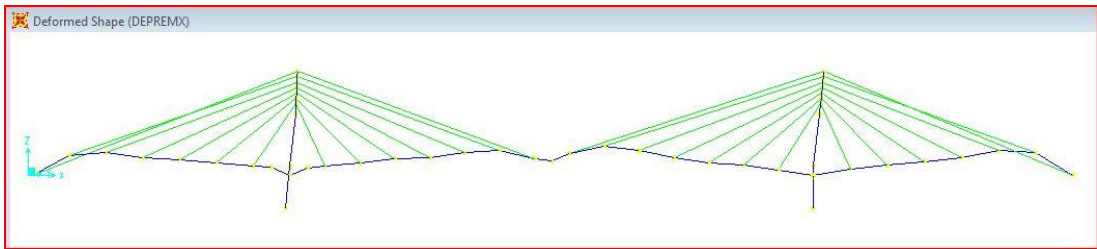
Yapılan analizde zemin sınıfı olarak en kritik durum olan Z4 seçilmiş, karakteristik periyotlar $T_A = 0,2$ ve $T_B = 0,9$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler doğrultusunda SAP2000 programında yapılan bu analiz için Şekil 4.7’de grafiği verilen tepki spektrumu oluşturulmuştur.



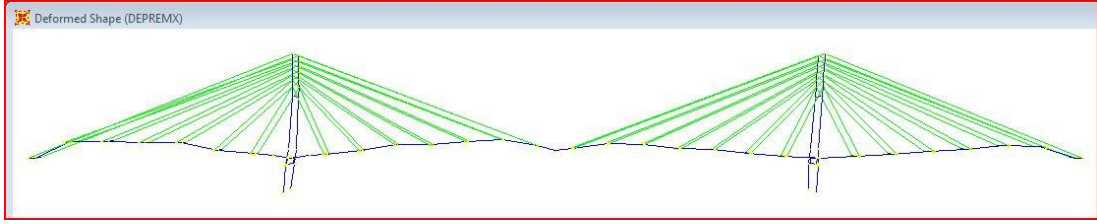
Şekil 4.7. Dinamik analizde kullanılan tepki spektrumu.

Analizde kullanılan tepki spektrumu Afet Yönetmeliğine uygun olarak oluşturulmuş tasarım spektrumudur. Dinamik analiz sonucunda, köprünün davranışını ifade etmesi açısından her model için, X ve Y doğrultularında tepki spektrumu aynı olan depremin oluşturduğu deplasman şekilleri ayrı ayrı verilmiştir.

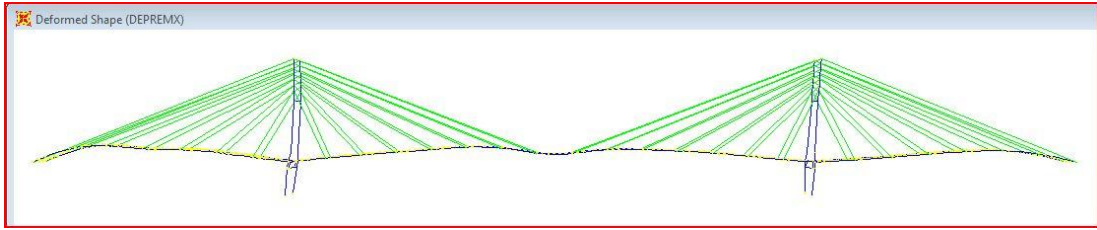
X doğrultusundaki deprem hareketine ait dinamik analiz sonucunda her 3 modelden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.8. Model 1, Dinamik analiz (X Doğrultusunda)

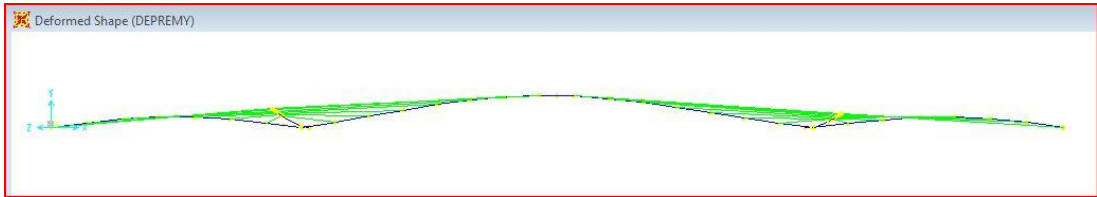


Şekil 4.9. Model 2, Dinamik analiz (X Doğrultusunda)



Şekil 4.10. Model 3, Dinamik analiz (X Doğrultusunda)

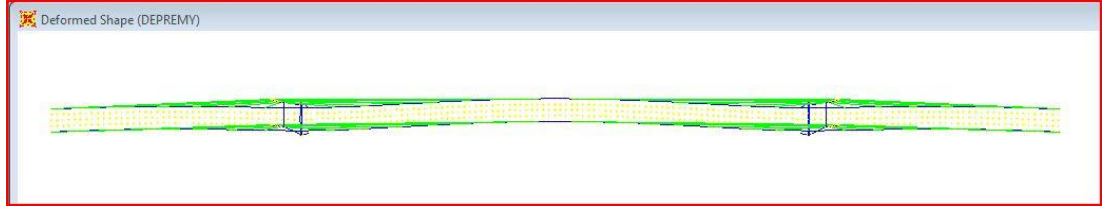
Elde edilen şekillerin karşılaştırılması yapıldığında; depremin etkisiyle oluşan deplasman şekillerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bütün modeller için, X doğrultusundaki depremin etkisiyle tabliye, düşey yönde deplasman göstermiş olup, oluşan simetrik dalga şeklindeki görüntü, her 3 modelde de aynıdır. Buna bağlı olarak kulelerin deplasmanı ve eğilmeleri söz konusudur. Y doğrultusundaki deprem hareketine ait dinamik analiz sonucunda her 3 modelden elde edilen sonuçlar Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.11. Model 2, Dinamik analiz (Y Doğrultusunda)



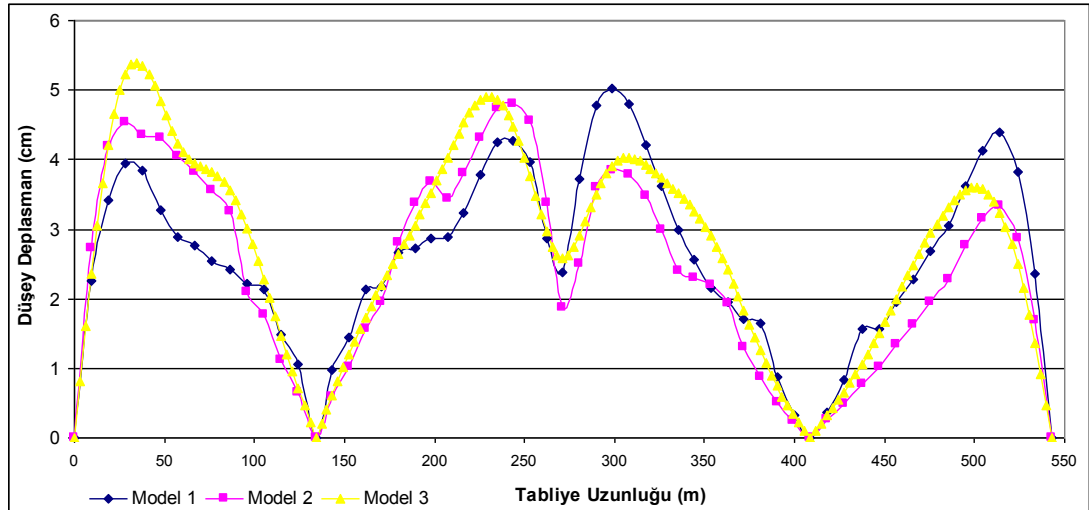
Şekil 4.12. Model 2, Dinamik analiz (Y Doğrultusunda)



Şekil 4.13. Model 3, Dinamik analiz (Y Doğrultusunda)

Y doğrultusundaki deprem etkisiyle oluşan deplasman şekli ise modal analizlerde oluşan ilk yatay salınıma benzer olup her 3 modelde de aynıdır. Bu yöndeki depremde kulelerin hareketi ise tabliye ile aynı yönde salınım göstermeleri şeklinde ortaya çıkmıştır.

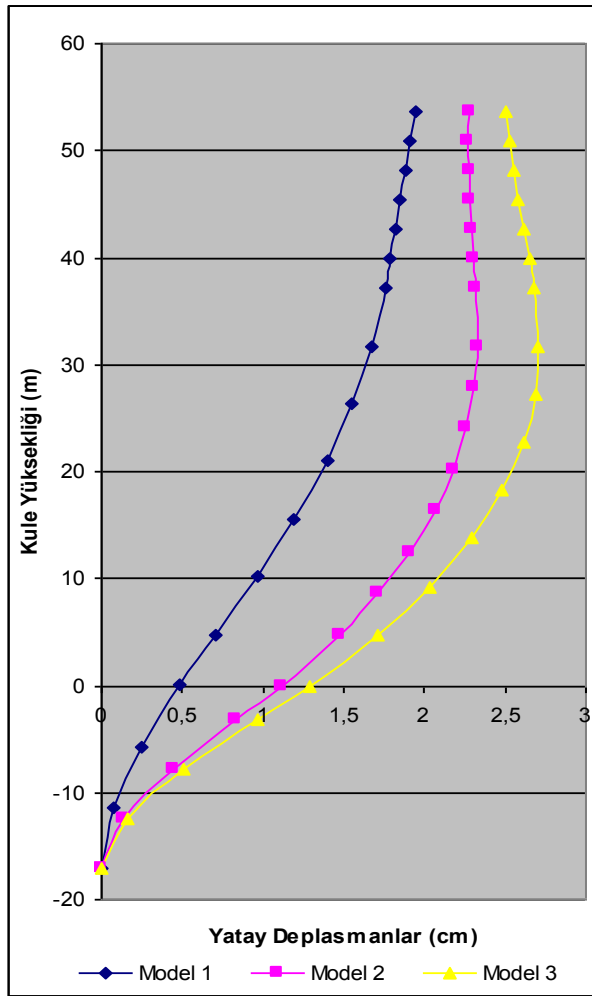
Ayrıca dinamik analiz sonucu oluşan deplasmanların sayısal olarak karşılaştırılması amacıyla, her model için tabliyedeki düşey deplasmanlar ve kuledeki yatay deplasmanlar karşılaştırılmıştır. (Şekil 4.14)



Şekil 4.14. Tabliye düşey deplasmanları – Tüm modeller (Dinamik analiz)

Dinamik analiz sonucu oluşan deplasman değerleri karşılaştırıldığında her 3 modelde de yakın değerlerin olduğu gözlenirse de en büyük deplasmanların tabliyenin plak olarak modellendiği Model 3’de görülmektedir. X Yönünden gelen deprem etkisine karşın köprü tabliyesi dalga hareketi yaparak, statik durumda aşağı yönlü oluşan

deplasmanlar bu durumda yukarı yönlü olmasına neden olmuştur. Tabliye ağırlığının etkisiyle yukarı yöndeki bu deplasmanların mertebesi 5 cm. civarında olmuştur. Yine bu sebeple kabloların etkisiyle yukarı doğru hareket eden tabliyenin orta noktası ağırlığın etkisiyle aşağı yönde deplasman göstermiştir. Oluşan deplasmanlar modeller arasında karşılaştırıldığında ise, benzer noktalarda en yüksek ve en düşük değerleri vermesiyle birbirine benzeşmiştir. Kulelerdeki yatay deplasmanlar ise bütün modeller için aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. (Şekil 4.15)



Şekil 4.15. Kule yatay deplasmanları - Bütün modeller için (Dinamik analiz)

Bu grafik incelendiğinde, köprü tabliyesine göre çok rijit olan kulede oluşan deplasmanların daha düşük seviyelerde ortaya çıktığı görülmektedir. Tabliyele ile kule birleşim noktalarında kuleye aktarılan yatay deplasmanların kulenin yataydaki

hareketini etkilediği, tabliye deplasmanı çok olan Model 3'te buna bağlı olarak kule deplasmanının da yüksek olduğu gözlenmektedir. Kulelerde yatay yönde sağ tarafa doğru olan deplasmanların kabloların etkisiyle sola doğru döndüğu görölmektedir.

Dinamik etki altında gözlenen modellerden 3 boyutlu olanların yakın değerler vermesi, gerçek davranışa daha yakın sonuçlar verdiğini düşöndürmüştür. 2 boyutlu analiz sonuçları ise diğer 2 modele uzak olmayan paralel sonuçlar vermiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gerçek bir yapı olan Quincy Bayview kablolu köprüsünün, 3 farklı modeli hazırlanarak, dinamik davranışlarının karşılaştırılması amacıyla modal ve dinamik analizleri yapılmıştır. Bahsi geçen modellerin ilki 2 boyutlu olup köprü çerçeve elemanlar şeklinde modellenmiştir. 2. model yine çerçeve elemanlar olarak fakat 3 boyutlu olarak modellenmiştir. 2. modelde tabliye, boyuna tek çerçeve elemanla tanımlanmış olup, rijit bağlantılar yardımıyla kablolarla bağlanmıştır. Son model ise yine 3 boyutlu olup, tabliye plak elemanlarla modellenmiştir. Burada teorik olarak gerçeğe en yakın modelin 3. model olduğu düşünülmektedir.

Modal analiz sonuçlarına bakılınca, 3 modelin de mod şekilleri olarak paralellik arz ettiği gözlenmiştir. Modellerin 3'ünde de karakteristik 4 tip salınımın varyasyonları söz konusu olmuştur. Bunlar; tabliyenin düşey salınımı, tabliyenin yatay salınımı, kule salınımı ve tabliye burulması şeklindedir. Tabliye yatay salınımı ilk 20 modda 1 veya 2 defa görülmüştür. Her 3 modelde de ilk yatay salınımın 3. modda ortaya çıkması, bu salınımın en olası tabliye yatay salınımı olduğunu ortaya koymaktadır. Kule salınımı açısından, 2 boyutlu modelde kulelerin teker teker ve ayrı modlarda salınmasının ilk modlarda görülmesi pek olası görülmemiş olup bu tip salınımların irdelenmesinde 3 boyutlu analizlerin daha etkin olduğu düşünülmüştür. Kule salınımlarının olduğu modlarda, tabliyede nispeten küçük deplasmanlar gözlenmemiştir.

Tabliyenin burulması şeklinde ortaya çıkan karakteristik salınım ise sadece 3. Model olan 3 boyutlu ve plak tabliyeli modelde gözlenmiştir. Bu nedenle tabliyede oluşacak burulmaların irdelenebilmesi için sadece 3 boyutlu modellemenin yeterli olmadığı, rijit bağlantı elemanları ile oluşturulan tabliyenin burulma hareketini ortaya çıkaramadığı görülmüştür. Burulmanın görüldüğü plak tabliyeli modelde ilk 20 modda 7 adet gibi azımsanamayacak adette burulma modunun görülmesi, gerçekte bu salınımın baskın olduğu ve dikkate alınması gerektiğini düşündürmüştür. Burulma modları da tabliyenin düşey salınım modlarında olduğu gibi dalga görünümünde olup ilerleyen modlarda dalga sayısının artması şeklinde ortaya çıkmaktadır.

En baskın tip olan tabliyenin düşey salınımlarının olduğu modlar, farklı modellerde farklı sırada ortaya çıkan diğer karakteristik modlar düşünülmediği takdirde, her modelde hep aynı sırayı takip ettiği gözlenmiştir. Salınım dalgasının artması şeklinde ilerleyen modlar, yataydan bakıldığında bir simetrik, bir simetrik olmayan şeklinde sıralanmıştır.

Elde edilen sonuçların doğruluğunun bağımsız farklı bir programla sorgulanması açısından kullanılan ADINA sonlu elemanlar programı, sayısal değerler ve mod şekilleri açısından paralellik göstermiş olup, modellerin gerçek davranışa uygun sonuçlar verdiğini doğrulamıştır.

Son olarak modellerin birbiriyle karşılaştırılması amacıyla, tepki spektrumu kullanılarak yapılan dinamik analizlerde oluşan şekillerin neredeyse birebir aynı olması bu modeller oluşturulurken yapılan, 2 boyuta indirgemek veya rijit bağlantı elemanları kullanmak gibi teorik yaklaşımların doğru olduğuna işaret etmektedir.

Kablolu köprülerin yapı davranışının en iyi şekilde anlaşılabilmesi için bu karakteristik modların detaylı bir şekilde incelenerek depremde yapının yapacağı hareketleri önceden bilmek ve zorlanacağı noktaları görerek tasarım yapmak gerekmektedir. Her ne kadar sonuçlar paralellik göstermiş olsa da, modelleme sırasında yapılacak her yaklaşım, analize farklı bilinmeyenlerin katılması anlamını taşımakta olup gerçek davranışı yansıtıp yansıtmadığı kontrol edilmelidir. Bu çalışmada farklı modellerde benzer sonuçlar elde edilmiş olmasına karşın, tabliye burulması gibi birebir modellenmeden görülemeyecek davranışların olması nedeniyle, gelişen bilgisayar teknolojilerinin işlem kapasitesini artırması ve etkin analiz programları da göz önüne alınarak, birebir modellemelere yönelmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, kablolu köprülerin dinamik davranışının ortaya konması için, oluşturulan farklı modellerle karakteristik mod şekilleri ile dinamik davranış incelenmiş olup, bu konu üzerinde farklı açıklıklara sahip ve farklı şekillerde

tasarlanmış kablolu köprüler göz önüne alınarak, başka çalışmaların yapılmasına gerek olduğu düşünülmektedir. Yapılacak yeni çalışmalarda, kablolu köprülerin kuleleri, tabliyeleri ve kablolarının tasarımı için gerekli veriler olan gerilmelerin incelenmesi, tasarımcılara yönelik kullanılabilir veriler sunarak tasarım kriterlerinin oluşturulmasında yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Grazia, M., "History and Aesthetics of Cable Stayed Bridges", ***Journal of Structural Engineering***, 119 (1): 352-353 (1993).
2. Billington, D. P., Nazmy, A., "History and Aesthetics of Cable-Stayed Bridges," ***Journal of Structural Engineering***, ASCE, 117(10): 3103-3134 (1991).
3. Troitsky, M.S., "Cable Stayed Bridges an Approach to Modern Bridge Design" ***Van Nostrand Reinhold***, 84-107 (1988).
4. Heins, C.P. "Design of Modern Steel Highway Bridges", ***John Wiley and Sons***, 35-44 (1979).
5. Gimsing, N.J. "Cable Supported Bridges Concept and Design", ***Wiley Interscience***, Chicester, 52-58 (1983).
6. Tada, H. "Recent Trend of Cable Stayed Bridge Construction Technology", ***Public Works Research Institute, Bridge Division***, Tsukuba, Japonya, 3-8 (1986).
7. Public Works Research Institute, "Seismic Design Procedure of Cable Stayed Bridges", ***Public Works Research Institute***, Tsukuba, Japonya, 21-24 (1986).
8. Wang, P.H., Tseng, T.C., Yang, C.G., "Initial Shape of Cable Stayed Bridges", ***International Journal of Computers and Structures***, 47 (1): 111-123 (1993).
9. Kindmann, R., "Wide Span Cable Bridges Instead of Suspension Bridges", ***13th Congress, International Association for Bridge and Structural Engineering***, 4-8 (1988).
10. Nazmy, A.S., Abdel-Ghaffar, A.M., "Effects of Ground Motion Spatial Variability on the Response of Cable Stayed Bridges", ***International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics***, 21: 1-20 (1992).
11. Kawashima, K., Unjoh, S., Tunomoto, M., "Estimation of Damping Ratio of Cable Stayed Bridges for Seismic Design", ***Journal of Structural Engineering***, 119 (4): 1015-1031 (1993).
12. Wang, T.L., Huang, D., "Cable Stayed Bridge Vibration Due To Road Surface Roughness", ***Journal of Structural Engineering***, 118 (5): 1354-1374 (1992).
13. Wilson, J.C., Liu, T., "Ambient Vibration Measurements on a Cable Stayed Bridge", ***Earthquake Engineering and Structural Dynamics***, 20: 723-747 (1991).

14. Tanabe, S., Hosakawa, H., “Durability of Cable Stays for Cable Stayed Bridges”, ***Structural Engineering International***, 1 (1): 60-62 (1991).
15. Diri, T.G., “Zamana Bağlı Çevresel Etkiler İçin Konsol Dilimler Halinde İnşa Edilen Kablo Köprülerin Lineer Olmayan Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 17-22, 38-45 (2009).
16. Nazmy, A.S., “Nonlinear Earthquake – Response Analysis of Cable – Stayed Bridges Subjected to Multiple – Support Excitations”, Doktora Tezi, ***Princeton Üniversitesi***, New Jersey, 90-95, 368-375 (1987).
17. Garevski, M., Dumanoglu, A.A., Severn, R.T., “Dynamic Characteristics and Seismic Behaviour of Jindo Bridge, South Korea”, ***Structural Engineering Review***, 1, 141-149 (1988).
18. Nukulchai, W.K., Yiu, P.K.A., Brotton, D.M., “Mathematical Modelling of Cable-Stayed Bridges”, ***Structural Engineering Review***, 2, 108-113 (1992).
19. Troitsky, M.S., “Cable-Stayed Bridges Theory and Design”, ***Crosby Lockwood Staples***, London, 311-316 (1977).
20. “Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges Design”, ***Proc. Instn. Civ. Engrs.***, 78:1281-1300 (1985).
21. Premieniecki, J.S., “Theory of Matrix Structural Analysis”, 1st edition, ***McGraw Hill Inc.***, New York, 110-145 (1986).
22. Ernst, H.J., “Der E-Modul von Seilen Unter Berücksichtigung des Durchhangs”, ***Der Bauingenieur***, 40 (2): 52-75 (1965).
23. Leonhardt, F., Zellner, W., “Cable Stayed Bridges: Report on Latest Developments”, ***Canadian Structural Engineering Conf.***, Toronto, Ontario, Kanada, 10-14 (1970).
24. Gimsing, N.J., “Anchored and Partially Anchored Cable Stayed Bridges” ***Proc. Of the International Symposium on Suspension Bridges, Laboratoria Nacional De Engenharia Civil***, Lizbon, Portekiz, 4-6(1966).
25. Podolny, W. Jr., “Static Analysis of Cable Stayed Bridges”, ***Doktora Tezi, Pittsburgh Üniversitesi***, Pittsburgh 18-24, 30-37 (1971).
26. Tung, D.H.H., Kudder, R. J., “Analysis of Cables as Equivalent Two-Force Members”, ***Engineering Journal***, American Institute of Steel Construction, 257-271 (1968).

27. Abdel-Ghaffar, A.M., Scanlan, R.H., Nazmy, A.S., “Earthquake Resistant Analysis of the Talmadge Memorial Bridge – Savannah Cable Stayed Bridge – Concrete Alternate”, **Report prepared for the DRC Consultants Inc.**, Flushing, New York, 3-5 (1986).
28. Tada, H., “Recent Trend of Cable Stayed Bridge Construction Technology”, **Public Works Research Institute**, Bridge Division Tsukuba, Japonya 18-22 (1986).
29. “Seismic Design Procedure of Cable Stayed Bridges: Bölüm 1 Dynamic Characteristics of Cable Stayed Bridges Based on Field Vibration Test Results”, **Public Works Research Institute (P.W.R.I.)**, Tsukuba, Japonya, 4-8 (1986).
30. Kitazawa, Masahiko, Earthquake Resistant Design for Cable Stayed Bridge – East Kobe Bridge”, **Proc. of the 2. US – Japan Bridge Engineering Workshop**, 10-13 (1985).
31. Wilson, J.C., Gravelle, W. “Modelling of a Cable Stayed Bridge For Dynamic Analysis”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 20: 707-721 (1991).
32. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, **Resmi Gazete** 06.03.2006/26100.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇELİK Abdurrahman
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.10.1977 Elazığ
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (507) 940 17 55
 Faks : -
 e-mail : acelik55@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	ODTÜ/İnşaat Mühendisliği Bölümü	1999
Lise	Malatya Fen Lisesi	1995

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009 - ...	Kültür Bakanlığı	Uzman Yardımcısı
2007-2009	MNG Günel İnşaat	İnşaat Mühendisi
2006-2007	Alarko Taahhüt Grubu	İnşaat Mühendisi
2004-2006	GAMA Endüstri	İnşaat Mühendisi
2003-2004	Altyapı Mühendislik	Proje Mühendisi
2001-2002	Technovision Mühendislik	Proje Mühendisi
1999-2000	J.Laing-O.Williams Müşavirlik	Proje Mühendisi

Yabancı Dil : İngilizce – Çok İyi , Almanca – Orta

Hobiler

Kitap okumak, Bilgisayar teknolojileri, Sinema, Seyahat, Futbol,