

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
İnş. Müh. Hasan ALKASMOU Tarafından Hazırlanan**

**OSMANGAZİ ASMA KÖPRÜSÜ'NÜN YAPISAL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 09 / 2019 gün ve 1818 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Süleyman ADANUR**

**Üye : Doç. Dr. Özlem ÇAVDAR**

**Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜNAYDIN**

The image shows three handwritten signatures in blue ink, each placed above a horizontal dotted line. The first signature is for Prof. Dr. Süleyman Adanur, the second for Doç. Dr. Özlem Çavdar, and the third for Dr. Öğr. Üyesi Murat Günaydin.

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Osmangazi Asma Köprüsü'nün Yapısal Davranışının İncelenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, tezin her aşamasında maddi-manevi desteklerini benden esirgemeyen Hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜNAYDIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca çok büyük desteğini gördüğüm, bilgi ve deneyiminden faydalandığım Hocam Prof. Dr. Süleyman ADANUR'a teşekkürlerimi sunmayı büyük bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca üzerimde emeği bulunan tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız, en zor zamanlarımda hep yanımda olan değerli arkadaşım Abdul ALKARAZ'a şükranlarımı sunarım.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren anneme, babama, kardeşlerime minnettar olduğumu belirtmek ister, bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını temenni ederim.

Hasan ALKASMOU  
Trabzon 2019



## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Osmangazi Asma Köprüsü’nün Yapısal Davranışının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜNAYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

27/09/2019

Hasan ALKASMOU

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Asma Köprülerin Yapısal Davranışı ile İlgili Çalışmalar .....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği .....	8
1.4. Asma Köprüler .....	9
1.4.1. Asma Köprülerin Tarihçesi .....	9
1.4.2. Asma Köprülerin Türleri .....	11
1.4.3. Asma Köprü Elemanları .....	13
1.4.3.1. Kuleler .....	14
1.4.3.2. Kablolar .....	14
1.4.3.2.1. Tel Grupları .....	15
1.4.3.2.2. Çelik Halatlar.....	15
1.4.3.2.3. Paralel Tel Grupları .....	15
1.4.3.3. Tabliye .....	16
1.4.3.4. Ankrajlar .....	16
1.4.4. Asma Köprü İnşası .....	17
1.4.4.1. Kule, Ankraj İnşası ve İskelenin Kurulması.....	17
1.4.4.2. Ana Kabloların Gerilmesi.....	20
1.4.4.3. Tabliyenin Kurulması (Montajı).....	21
1.4.5. Asma Köprülerde Periyodik Bakım .....	22

1.4.6.	Türkiye’deki Asma Köprüler.....	24
1.5.	Asma Köprülerin Analitik Modellenmesi .....	25
1.6.	Asma Köprülerin Dinamik Analiz Formülasyonu.....	26
1.6.1.	Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Hareket Denklemleri.....	26
1.6.2.	Doğal Frekans ve Modların Hesabı .....	27
1.6.3.	Zaman Tanım Alanında Geometrik Olarak Lineer Olmayan Dinamik Analiz.....	31
1.7.	Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması.....	33
1.8.	Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması .....	34
1.8.1.	Basınç Dayanımı.....	34
1.8.2.	Betonun Yaşı .....	35
1.8.3.	Betonun Büzülmesi.....	35
1.8.4.	Betonun Sünmesi .....	37
1.8.5.	Çeliğin Relaksasyonu (Gevşemesi) .....	38
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	39
2.1.	Giriş .....	39
2.2.	Osmangazi Asma Köprüsü .....	39
2.3.	Osmangazi Asma Köprüsü’nün Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları..	40
2.3.1.	Kuleler .....	41
2.3.2.	Ana Kablolar.....	43
2.3.3.	Tabliye .....	46
2.3.4.	Ankraj Blokları .....	51
2.3.5.	Kule Temelleri .....	54
2.4.	Osmangazi Köprüsü’nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması .....	57
2.5.	Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması .....	58
2.6.	Modal ve Dinamik Davranışın Belirlenmesi .....	60
2.7.	Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	63
2.7.1.	Tabliye Davranışı .....	63
2.7.1.1.	Tabliye Yer Değiştirmeleri .....	63
2.7.1.2.	Tabliye Momentleri .....	66
2.7.2.	Kule Davranışı.....	67
2.7.2.1.	Kule Yer Değiştirmeleri .....	67
2.7.2.2.	Kule Momentleri.....	71
2.7.2.3.	Kule Normal Kuvvetleri .....	73

2.7.3.	Ana Kablo Eksenel Kuvvetleri .....	76
2.7.4.	Askı Eksenel Kuvvetler .....	78
2.8.	Statik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	79
2.8.1.	Tabliye Davranışı .....	79
2.8.1.1.	Yer Değiştirmeler .....	79
2.8.1.2.	Momentler .....	80
2.8.2.	Kule Davranışı .....	81
2.8.2.1.	Yatay Yer Değiştirmeler .....	81
2.8.2.2.	Momentler .....	81
2.8.2.3.	Normal Kuvvetler .....	82
2.8.2.4.	Kesme Kuvvetleri .....	83
2.8.3.	Ana Kablo Eksenel Kuvvetleri .....	83
2.8.4.	Askı Eksenel Kuvvetleri .....	83
2.9.	Yapım Aşamalı Analizi .....	85
2.9.1.	Osmangazi Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi .....	85
2.9.2.	Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları .....	87
2.9.3.	Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri .....	87
2.9.4.	Tabliye Davranışı .....	89
2.9.5.	Kule Davranışı .....	90
2.9.6.	Kablo Davranışı .....	92
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	94
4.	KAYNAKLAR .....	96

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

OSMANGAZİ ASMA KÖPRÜSÜ'NÜN YAPISAL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Hasan ALKASMOU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜNAYDIN  
2019, 101 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapısal davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; köprünün modal, statik ve dinamik analizleri sonlu eleman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda, köprünün yapısal davranışında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konu ile ilgili genel bilgiler, literatür çalışmaları ve gerçekleştirilen analizlere ait denklemler sunulmuştur. İkinci bölüm ise iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda, ilk olarak köprünün iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve literatürde sunulan veriler ile model doğrulanmıştır. Daha sonra köprünün iki boyutlu modelinden üç boyutlu sonlu eleman modeli üretilmiştir. İkinci kısımda ise; köprünün modal, statik ve dinamik davranışı belirlenmiştir. Ayrıca yapım aşamaları ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizler gerçekleştirilmiş ve bu etkilerin yapısal davranışa etkisi araştırılmıştır. Bu aşamada elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Üçüncü bölümde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Asma köprüler, Dinamik davranış, Osmangazi Asma Köprüsü, Sonlu eleman yöntemi, Statik analiz, Yapım aşaması, Zamana bağlı malzeme deformasyonu

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF STRUCTURAL BEHAVIOR OF OSMANGAZI  
SUSPENSION BRIDGE

Hasan ALKOSMOU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Program  
Supervisor: Dr. Murat GÜNAYDIN  
2019, 101 Pages

In this thesis, it is aimed to investigate the structural behavior of Osmangazi Suspension Bridge. For this purpose, modal, static and dynamic analyses of the bridge were carried out using finite element method. Also, the structural behavior of the bridge was determined considering construction stages and time dependent materials properties.

Three main sections were considered in this thesis. In the first section; general information, literature studies and equations of the analyzes were presented. The second section was divided into two parts. In the first part, first two-dimensional finite element model of the bridge was formed and was confirmed by the data presented in the literature. Then, three-dimensional model was formed using the two-dimensional model of the bridge. In the second part; the modal, static and dynamic behaviors of the bridge were determined. Also, two different finite element analyses with and without construction stages were carried out and results were compared to each other. Time dependent material properties were also considered in the analyses. In the third section of this thesis, conclusions and suggestions were presented. This section is followed by references and resume.

**Key Words:** Suspension bridges, Dynamic behavior, Osmangazi Suspension Bridge, Finite element method, Static analysis, Construction stage, Time dependent material properties

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Jacobs Creek Köprüsü .....	10
Şekil 1.2. Asma köprülerin ana açıklıklarına göre zamanla gelişimleri .....	11
Şekil 1.3. Asma köprü açıklık tipleri .....	12
Şekil 1.4. Tabliye süreklilik tipleri .....	12
Şekil 1.5. Ankraj tipleri.....	12
Şekil 1.6. Askı halatı tipleri .....	13
Şekil 1.7. Tipik bir asma köprü elemanları.....	13
Şekil 1.8. Asma köprülerde kullanılan kule tipleri .....	14
Şekil 1.9. Asma köprülerde kullanılan tel çeşitleri.....	15
Şekil 1.10. Asma köprülerde kullanılan çelik halat çeşitleri .....	15
Şekil 1.11. Asma köprülerde kullanılan paralel tel grupları .....	15
Şekil 1.12. Asma köprülerde kullanılan tabliye çeşitleri.....	16
Şekil 1.13. Örnek bir ankraj sistemi .....	17
Şekil 1.14. Golden Gate Köprüsü .....	18
Şekil 1.15. 15 Temmuz Şehitler (Boğaziçi) Köprüsü .....	19
Şekil 1.16. Xihoumen Köprüsü.....	19
Şekil 1.17. Kule tepelerine inşa edilen eyerler.....	19
Şekil 1.18. Ankraj inşası .....	20
Şekil 1.19. İskele sistemi inşası .....	20
Şekil 1.20. Ana Kabloların Gerilmesi.....	21
Şekil 1.21. Tabliye segmentinin yerine yerleştirilmesi.....	22
Şekil 1.22. Yavuz Sultan Selim Köprüsü .....	24
Şekil 1.23. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü.....	25
Şekil 1.24. 15 Temmuz Şehitler (Boğaziçi) Köprüsü .....	25
Şekil 2.1. Köprü inşasıyla birlikte kısalmış olan geçiş güzergah .....	39
Şekil 2.2. Köprü'nün genel (a) ve plan (b) görünüşleri.....	40
Şekil 2.3. Kule ön ve yan görünüşleri.....	41
Şekil 2.4. Osmangazi Köprüsü'nün kule yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	42

Şekil 2.5.	Osmangazi Köprüsü'nün ana kablo yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar ....	44
Şekil 2.6.	Osmangazi Köprüsü'nün tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	46
Şekil 2.7.	Köprünün güney ankraj bloğu .....	51
Şekil 2.8.	Köprünün kuzey ankraj bloğu .....	51
Şekil 2.9.	Osmangazi Köprüsü'nün ankraj bloklarının yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	52
Şekil 2.10.	Köprünün kule temelerine ait şematik resim .....	52
Şekil 2.11.	Osmangazi Köprüsü'nün kule temellerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	55
Şekil 2.12.	Osmangazi Asma Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli.....	57
Şekil 2.13.	Osmangazi Asma Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	57
Şekil 2.14.	Osmangazi Asma Köprüsü için çalışma kapsamında modellenen iki boyutlu sonlu eleman modelinden elde edilen ilk 9 mod şekli ve doğal frekans değerleri.....	59
Şekil 2.15.	Argentini vd., (2014) tarafından elde edilen ilk 9 mod şekli ve doğal frekans değerleri.....	59
Şekil 2.16.	Osmangazi Asma Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modelinin modal analizinden elde edilen ilk 20 mod şekli ve doğal frekans değerleri.....	60
Şekil 2.17.	1999 Kocaeli Depremi'nin Gebze İstasyonu'ndan alınan ivme kayıtları.....	62
Şekil 2.18.	Tabliye orta noktasına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi .....	64
Şekil 2.19.	Maksimum yer değiştirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi .....	65
Şekil 2.20.	Tabliye orta noktasındaki elemana ait eğilme momenti değerlerinin zamana bağlı değişimi .....	66
Şekil 2.21.	Maksimum eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi .....	67
Şekil 2.22.	Kuzey ve güney kulelerinin tepe noktalarına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi .....	68
Şekil 2.23.	Maksimum yer değiştirme değerlerinin kuzey ve güney kule yükseklikleri boyunca değişimi .....	70
Şekil 2.24.	Kuzey ve güney kule tabanındaki elemanlara ait eğilme momentlerin zamana bağlı değişimi .....	72
Şekil 2.25.	Maksimum eğilme momenti değerlerinin kuzey ve güney kule yükseklikleri boyunca değişimi .....	72
Şekil 2.26.	Kuzey ve güney kule tabanındaki elemanlara ait normal kuvvetlerin zamana bağlı değişimi .....	74
Şekil 2.27.	Maksimum normal kuvvet değerlerinin kuzey ve güney kule yükseklikleri boyunca değişimi .....	75
Şekil 2.28.	Kablo eyer noktasına ait eksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi .....	77



Şekil 2.29. Maksimum aksenal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	77
Şekil 2.30. Kule yakınındaki askıya ait aksenal kuvvetlerin zamana bağlı değişimi .....	78
Şekil 2.31. Askılarda meydana gelen maksimum aksenal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişime .....	79
Şekil 2.32. Düşey yer değiştirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	80
Şekil 2.33. Eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi .....	80
Şekil 2.34. Yatay yer değiştirme değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	81
Şekil 2.35. Eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi .....	82
Şekil 2.36. Normal kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi .....	82
Şekil 2.37. Kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi .....	83
Şekil 2.38. Ana kablo aksenal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi .....	84
Şekil 2.39. Askı aksenal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi .....	84
Şekil 2.40. Osmangazi Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modelleri.....	86
Şekil 2.41. Tabliye montaj aşamaları.....	87
Şekil 2.42. Öngerilmeli çelik için gerilme-şekil değiştirme (a) ve zamana bağlı malzeme özellikleri değişimi (b) diyagramları.....	87
Şekil 2.43. Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule ve tabliyeye ait yer değiştirme değerleri.....	88
Şekil 2.44. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yer değiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi .....	89
Şekil 2.45. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yer değiştirme değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi .....	90
Şekil 2.46. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi .....	91
Şekil 2.47. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi .....	92
Şekil 2.48. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen kablo aksenal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	93

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Bazı asma köprülerin açıklık ve yapım yılı (URL-2, 2019).....	11
Tablo 1.2. Türkiye’de bulunan asma köprüler (URL-16, 2019).....	24
Tablo 2.1. Kesit özellikleri.....	58
Tablo 2.2. Malzeme özellikleri .....	58
Tablo 2.3. Osmangazi Asma Köprüsü'nün periyot-doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve kütle katılım oranları.....	61

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_c$	Kesit alanı
$E$	Elastisite modülü
$E_{ci}(t)$	$t$ günlük betonun elastisite modülü
$E_{ci}$	Betonun 28 günlük elastisite modülü
$f_{cm}(t)$	$t$ günlük bir betonun basınç dayanımı
$f_{cm}$	Betonun 28 günlük basınç dayanımı
$[I]$	Birim matris
$[K]$	Sistem rijitlik matrisi
$[K_L]$	Lineer olmayan bağlantı elemanları hariç lineer elastik elemanların rijitlik matrisi
$[K_N]$	Bütün lineer olmayan serbestlik dereceleri için lineer efektif rijitlik matrisi
$[M]$	Sistem kütle matrisi
$\{P\}$	Dış yük vektörü
RH	% olarak atmosferdeki nem oranı
$t$	Zaman
$t_0$	Yükleme anındaki betonun yaşı
$\alpha$	Faz açısı
$\{U\}$	Sistemin yer değiştirme vektörü
$\{\dot{U}\}$	Sistem hız vektörü
$\{\ddot{U}\}$	Sistemin ivme vektörü
$[C]$	Sistem sönüm matrisi
$[\Phi]$	Normalleştirilmiş modal matris
$\beta_{cc}(t)$	Betonun yaşına bağlı bir katsayı
$\beta_c$	Yüklemeden sonra devam eden sünme
$\beta_s$	Zamana bağlı devam eden büzülme gösteren bir katsayı
$\beta_{sc}$	Çimento tipine bağlı olarak değişen bir katsayı
$\sigma_c(t_0)$	$t_0$ anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilme
$\phi(t, t_0)$	Sünme katsayısı

$\rho_t$	t saat sonraki relaksasyon
$\{\varphi\}$	Hareketin genlik vektörü
$\{\varphi\}_i$	Titreşim modu
$\{\Phi\}_r$	Normalleştirilmiş mod
$\omega_i$	Doğal frekans
$\omega_n$	Açısal frekans
$\omega_r$	r. titreşim moduna karşılık gelen açısal frekans



# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Köprüler farklı malzemelerle ve açıklıklarda ya da farklı taşıyıcı sistemlerle geçmişten günümüze inşa edilen önemli mühendislik yapılarıdır. Bir köprünün temel amacı, doğadaki bir açıklık (vadi, akarsu, körfez, hatta kıta) üzerinde ulaşımı sağlamaktır. Bu amaçla bir köprü yaya ve araçların ulaşımında veya boru ve su ulaştırma hatlarında kullanılabilir. Dolayısıyla köprünün kullanım amacı aynı zamanda işlevselliğiyle de bağlantılı olmaktadır. Köprülerin tasarımı ancak işlevi tanımlandıktan sonra başlar. Bu nedenle, köprülerin inşası sadece köprü mühendisleri tarafından yapılamaz. Köprüler de; yollar, drenaj sistemleri gibi şehirlerin altyapı sistemlerinin bir parçasıdır. Ulaşım sistemleri ise şehirlerin mevcut ve gelecek planlanma çabalarıyla doğrudan ilişkilidir (Chen, 1999). Bu kapsamda köprüler hem ulaştırmada hem de konforlu şehirler tasarımında oldukça önemli bir yer tutar.

Günümüzde; geniş, büyük açıklıklı ve ağır araç trafiklerini taşıyabilecek betonarme veya çelik köprüler inşa edilebilmektedir. Son yirmi yılda asma köprüler, özellikle hem uzun açıklıkları geçmek (550 m) hem de köprü altındaki alanın kullanılabilir olmasından önemli bir tercih nedenidir. Bu köprüler lojistik avantajlarından ve yapım maliyetlerinden dolayı oldukça önemlidir. Bu nedenle bu köprülerin yapısal davranışları gerek projelendirme aşamasında gerekse hizmet ömrü boyunca kapsamlıca irdelenmelidir.

Birçok mühendislik yapısında olduğu gibi asma köprülerin yapısal davranışları da sonlu eleman yöntemiyle belirlenmektedir. Bu yöntem ile köprünün statik ve dinamik yükler etkisindeki yapısal davranışı (statik, dinamik, yorulma gibi) belirlenebilmektedir. Sonlu eleman yönteminde yapısal davranış belirlenirken bazı kabuller dikkate alınır. Bu kabullerin başında, yapıların sanki bir anda inşa edildiği, yüklendiği ve malzeme özelliklerinin inşa süresince değişmediği gelmektedir. Fakat asma köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının yapımı yıllar alabilmektedir. Bu nedenle bu tür köprülerin sonlu eleman analizleri sırasında köprünün yapım aşamalarının ve malzeme özelliklerindeki değişimlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Çözümlemeler sırasında bu tür etkilerin dikkate alındığı sistemlerde eleman yüklerinin ve kesit tesirlerinin %50 civarında fazla

elde edildiği görülmektedir (Altunışık vd., 2009a; Altunışık vd., 2009b; Karakaplan vd., 2009; Altunışık vd., 2010). Ayrıca, tekrarlı yükler (araç yükleri ve deprem gibi) etkisindeki elemanlarda yorulmalara bağlı hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu köprülerde servis yüklerinde zamanla değişmeler olabilmektedir. Bu nedenle asma köprülerin hizmet ömürleri boyunca yapısal davranışlarındaki değişmeler periyodik olarak takip edilmelidir. Bu kapsamda köprüyü temsil eden sonlu eleman modeli oluşturulmalı ve mevcut yapısal davranışları detaylıca incelenmelidir.

## 1.2. Asma Köprülerinin Yapısal Davranışı ile İlgili Çalışmalar

Bu kısımda, asma köprülerinin yapısal davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlendiği çalışmaların bazılarına yer verilmektedir. 1900 yılların başlarından itibaren yapıların yapısal davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. İlerleyen bilgisayar teknolojisi ve analiz yöntemlerini de dikkate alarak, günümüze kadar asma köprülerle ilgili yapılan birçok analitik çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu nedenle, tezin literatür kısmında genellikle son 25 yıl içerisinde yapılan bazı çalışmalara yer verilmektedir.

Asma köprülerinin yapısal davranışlarının analitik olarak belirlenmesi konusunda geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk dönemlerde yapılan çalışmalarda asma köprülerinin statik ve dinamik etkiler altındaki lineer davranışları çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra, lineer analiz sonuçlarının köprülerin yapısal davranışlarını daha gerçekçi bir şekilde yansıtması amacıyla sonlu eleman modellemelerinde yapı-zemin etkileşim problemi dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Özellikle 1990-1999 yılları arasında meydana gelen büyük depremler, köprülerin analizlerinde lineer olmayan davranışın dikkate alınmasının önemini ortaya çıkarmış ve bu durum araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Mesnetleri farklı dinamik etkilere maruz asma köprülerin yapısal davranışını irdeleyen çalışmalar da araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Asma köprüler gibi uzun açıklıklı köprülerin analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı malzemelerde meydana gelebilecek deformasyonların dikkate alındığı analitik çalışmalar da araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu köprülerin tekrarlı yükler etkisindeki yorulma davranışları araştırmacılar tarafından son zamanlarda araştırılmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere asma köprülerin yapısal davranışlarını farklı

açılardan irdeleyen farklı çalışmalar vardır. Bu çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmektedir.

Abdel Ghaffar ve Rubin (1983), Kaliforniya'daki Golden Gate Asma Köprüsü'nün dinamik davranışını, köprünün hem düşey hem de yatay deprem kuvvetlerine maruz kalması durumunda araştırmışlardır.

Dumanoğlu vd. (1992), Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsünün doğal frekanslar ve mod şekillerini sonlu elemanlar yöntemiyle elde etmiştir. Ayrıca, köprünün asinkronize davranışı çalışmada incelenmiştir.

Adanur (1997), İstanbul'da bulunan Boğaziçi Asma Köprüsü'nün lineer, geometrik olarak lineer olmayan, elastik zemin analojisi ile basitleştirilmiş ve zıt-fazlı yer hareketine maruz olması durumlarındaki dinamik analizlerini Zaman Süreci ve CQC yöntemlerini kullanarak gerçekleştirmiştir. Analizler sırasında dinamik dış etki olarak 1971 San Fernando depreminin S16E bileşeni ve 1992 Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşeni kullanılmıştır.

Ko vd., (1998), Hong-Kong'da bulunan ana açıklığı 1377 m ve toplam uzunluğu 2160 m olan Tsing Ma Asma Köprüsü'nün yapım aşamasında köprü tabliyesinin modal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, tabliyenin doğal frekansları ve mod şekilleri farklı yapım aşamalarında belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Memişoğlu (2002), İstanbul'da bulunan Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün dinamik davranışını incelemiştir. Çalışmada, köprünün sonlu elemanlar metodu ile hazırlanmış üç boyutlu matematik modeli ve serbest titreşim analizi yapılmıştır. Köprünün lineer ve lineer olmayan davranışları özel algoritmalar yardımıyla belirlenmiştir. SAP2000 Yapısal Analiz Programı kullanılarak köprünün sonlu elemanlar metodu ile 3 boyutlu modeli geliştirilmiştir. Köprünün ilk 50 titreşim şekli ve ilgili doğal titreşim frekansları belirlenmiştir. Asma köprülerin dinamik davranışlarının fiziksel ve analitik olarak anlaşılması, köprüye ait doğal titreşim frekanslarının, sönüm katsayısının ve titreşim şekillerinin yani dinamik parametrelerinin gerçek anlamda bilinmesine bağlı olduğu çalışmada ifade edilmiştir. Fatih Sultan Mehmet köprüsünün dinamik parametreleri Çevresel Titreşim Deneyi ve Global Pozisyon Belirleme yöntemleri yardımıyla belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen bu veriler sistem tanımlama olarak adlandırılan, hareket denklemindeki parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Köprü 1979 yılında Kaliforniya'da meydana gelmiş Imperial Valley depreminin üç yöndeki kayıtları kullanılarak analiz edilmiştir. Fatih Sultan Mehmet Köprüsünün deprem

analizleri 200 titreşim şekli için, köprünün İstanbul'da mevcut fay hattına göre konumu göz önüne alınarak en olumsuz şartlara göre yapılmıştır. Ayrıca çalışmada köprünün bir yakadan diğer yakaya seyahat eden depreme maruz kalması durumundaki deprem davranışı yapay bir deprem kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak en son teknolojinin kullanıldığı bir titreşim izleme sistemi, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü için tasarlanmış ve Kasım 2001 de Boğaziçi Üniversitesi ile Karayolları 17. Bölge Müdürlüğü'nce ortaklaşa oluşturulmuş bir ekip tarafından köprüye yerleştirilmiştir. Köprüye kurulan titreşim izleme sisteminden alınan kayıtlardan köprünün dinamik parametreleri hesaplanarak diğer metodlarla bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Adanur (2003), mesnetlerinden farklı dinamik etkilere maruz asma köprülerin deterministik ve stokastik analizlerini geometrik olarak lineer olmayan davranış dikkate alınarak incelenmektedir. Çalışmada, deterministik analizlerde yer hareketi olarak 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni ile 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kayıtları kullanılmaktadır. Stokastik analizlerde ise yer hareketi olarak Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli dikkate alınmaktadır.

Cho ve Kim (2008), bilgisayar yardımıyla simülasyon edilen bir asma köprünün yapım aşamaları esnasında olasılıksal risk değerlendirilmesini sonlu eleman analizlerine dayalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yapılan birçok çalışmanın yapımı tamamlanmış yapılar üzerine olduğu, yapım aşamaları esnasındaki belirsizliklerin ihmal edildiği ifade edilmiştir. Bu amaçla, hayali inşa edilen bir asma köprüdeki yapım aşamaları esnasında ana kablo halatlarındaki nihai limit durumlarında meydana gelebilecek kopmalar için risk değerlendirilmeleri irdelenmiştir.

Adanur ve Günaydın (2010), İstanbul'da bulunan Boğaziçi Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, yapım aşamalarının etkisini daha iyi belirlemek amacıyla analizler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı durum için de tekrarlanmış, tabliye uzunluğu ve kule yüksekliği boyunca elde edilen yer değiştirmeler ile kesit tesirleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, asma köprülerinin yapısal davranışlarının belirlenmesinde bu analiz yönteminin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Adanur vd., (2011), çalışmalarında basitleştirilmiş modeller kullanarak deprem yer hareketine maruz kalan bir asma köprünün sonlu eleman analizini gerçekleştirmiştir. Bu



amaçla, iki basitleştirilmiş model kullanılmıştır. Birinci modelde, elemanların tabliye, kablo ve askılardan oluştuğu varsayılmıştır. İkinci modelde ise, elastik zemin analoji yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Basitleştirilmiş ve genel köprü modellerinin deprem analizleri sonlu eleman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yer hareketi olarak, 17 Ağustos 1999'da meydana gelen Kocaeli depreminden elde edilen ivme kaydı kullanılmıştır. Sonuç olarak, basitleştirilmiş modellerden elde edilen sonuçların genel modelden elde edilenlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, basitleştirilmiş modellere göre köprü tasarımı yapılmasının güvenilir olduğu ifade edilmiştir.

Atabey (2011) lifli polimer malzemeden inşa edilmiş asma bir köprü üzerinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Bu amaçla Boğaziçi Asma Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Statik analizlerde köprü kendi ağırlığı altında doğrusal olmayan etkiler göz önünde bulundurularak analiz edilmiştir. Dinamik analizinde ise 1999 Kocaeli depremine ait bir ivme kaydı yer hareketi olarak uygulanmıştır. Köprünün çelik ve lifli polimer malzemeden inşa edilmesi durumunda elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Adanur vd., (2012), İngiltere'de bulunan Humber Asma Köprüsünün yapısal davranışında, yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının analizlerde dikkate alınması durumunda meydana gelecek farklılıkları araştırmışlardır. Çalışmada, köprü için bu etkilerin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar için SAP2000 programı kullanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki durum için köprü elemanlarında elde edilen kesit tesirleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda yapım aşamalarının ve malzeme deformasyonlarının analizlerde dikkate alınması durumunda daha güvenilir sonuçların elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Günaydın vd., (2012), İstanbul'da bulunan Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün yapım aşamalı analizlerini gerçekleştirmişler. Analizlerde yapım aşamalarının yanında zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisi de dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda analizlerde, yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonların dikkate alınmasının yapısal davranış üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır.

Argentini vd., (2013), Osmangazi Asma Köprüsü'nün aeroelastik stabilitesinin deneysel ve nümerik analizlerini yapmışlardır. Rüzgâr tüneli testini 1/220 ölçekli köprü modeli üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, köprünün ölçekli modelini kullanarak

tabliyenin farklı rüzgâr hızlarına gösterdiği tepkileri belirlemiş ve aerodinamik niteliklerini saptanmıştır.

Christensen (2013), geleneksel tasarım yaklaşımlarına kıyasla yerel analiz modellerini global analiz modeline dahil etmenin avantajlarını araştırmıştır. Bu kapsamda Osmangazi Asma Köprüsü örnek olarak kullanılmıştır. Tasarım sırasında sismik doğrusal olmayan zaman tanımlı analizler, tüm köprü elemanlarının ve kule kesonlarının davranışlarını doğru analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. Yerel modelleri global analiz modeline dahil etmenin birçok avantajının olacağı ifade edilmiştir.

Diana vd., (2013), Osmangazi Asma Köprüsü'nün üç farklı yapım aşamasını ve tamamlanmış durumunu dikkate alarak 1/220 ölçekteki deneysel modellerde gerçekleştirilen analizlerini karşılaştırmalı olarak çalışmalarında sunmuşlardır. Her bir yapım aşamasına ait mod şekillerini belirlenmiştir. Rüzgâr tüneli testleri pürüzsüz ve türbülanslı akım koşulları altında gerçekleştirilmiş ve köprünün aeroelastik stabilite ve titreşim davranışı incelenmiştir. Rüzgâr tüneli testlerinin sonucunda orta açıklıktaki yanal ötelenme ve eğilme momenti değerlerini belirlemişlerdir.

Lyngs vd., (2013), Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapı-zemin etkileşiminin modellenmesi üzerine çalışmışlardır.

Zhang ve Yao (2013), Osmangazi Köprüsü'nün doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal zemin tepkisi analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Zemin davranışının kapsamlı bir şekilde incelendiği çalışmada bir ve iki boyutlu doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin kombinasyonları ve bir boyutlu eşdeğer doğrusal yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Köprünün kuzey ve güney kule analizleri FLAC ve SHAKE programlarında gerçekleştirmişlerdir.

Diana vd., (2014), Osmangazi Köprüsü'nün rüzgar etkisi altında aeroelastik davranışının sayısal ve deneysel karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Kullanım ve yapım aşamasında yapının aeroelastik stabilitesi ve rüzgar etkisini araştırmak amacıyla hem pürüzsüz hem türbülanslı akış koşullarında Politecnico di Milano Rüzgar Tüneli'nde 1/220 ölçekli aeroelastik model üzerinde rüzgar tüneli testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar lineer aerodinamik kuvvet modeli kullanılarak elde edilen nümerik simülasyonların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Günaydın vd., (2014), İstanbul'da bulunan Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizlerini farklı zemin türleri için gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde P-Delta etkileri ve malzemelerin zamana bağlı deformasyonları dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda

yapım aşamaların analizlerde dikkate alınması durumunda elde edilen kesit tesirlerinin dikkate alınmaması durumuna göre değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca, yapım aşamalı analizlerin yanında yapı-zaman etkileşiminin de analizlerde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Materrazi ve Ubertini (2015), ana kablolarda hasar meydana gelmiş asma köprülerin düşey titreşimlerini açıklayan analitik bir model çalışmalarında sunmuşlardır. Hasar görmüş köprünün doğrusal denklem hareketi, serbest titreşim durumunda, köprünün öz frekansları ve mod şekillerinin elde edilmesiyle çözülmüştür. Çalışmada hasar ile birlikte simetrik ve antisimetrik modların ve bu modların frekans değerlerinde meydana gelen değişimler irdelenmiştir.

Mabuli (2016), Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün deprem ve taşıt yükleri altında yapısal davranışının belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Bu amaçla köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 sonlu elman programında oluşturulmuştur. Deprem analizleri, farklı sayıda deprem kaydı altında ve bu kayıtların ortalaması dikkate alınarak yapılmıştır. Hareketli taşıt yükleri her şeritte farklı sayı ve hızda araçların geçirilmesiyle temsil edilmiş ve zaman bağlı dinamik analizler yapılmıştır. Çalışmada, hem depremin hem de taşıt yüklerinin etkisinde, köprü temel elemanlarında elde edilen kesit etkileri ve yer değiştirmeleri grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

Kartal (2018), eşit merkez açıklığa sahip asma ve eğik kablo askılı köprülerin dinamik davranışının karşılaştırılması konusunda çalışmıştır. Bu amaçla, gerçekçi bir karşılaştırmanın yapılabilmesi için merkez açıklıkları 1000 m olan bir adet eğik kablo askılı köprü ile bir adet asma köprü tasarımı yapılmıştır. Köprülerin dinamik davranışlarını incelemek amacıyla köprülere; sert, orta sert ve yumuşak kaya üzere üç ayrı zemin grubuna ait deprem kayıtları kullanılarak oluşturulan üniform yer hareketi ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulanıp, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlarda zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde her iki köprü modeli için de köprü tabliyeleri, ana kuleleri ve kablolarında elde edilen yer değiştirmeler ve kesit tesirleri hesaplanmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, yapı-zemin etkileşiminin eğik kablo askılı ve asma köprülerin dinamik davranışı üzerinde önemli etkisinin olduğu ve köprü analizlerinde sadece üniform yer hareketi uygulanmasının yeterli olmadığı, her bir mesnette farklı yer hareketi uygulanarak da analizlerinin yapılması gerektiği ifade

edilmiştir. Ayrıca, özellikle asma köprülerin mesnetlerinden uygulanan farklı yer hareketlerine karşı daha duyarlı olduğu vurgulanmıştır.

Konovalov ve Pustovalova (2018), asma köprülerde kule tepelerine kurulmuş titreşim sönümleyicilerin köprü davranışındaki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla ANSYS sonlu eleman paket programında bir asma köprü modeli oluşturulmuştur. Çalışmada köprüde sönümleyicilerin olması ve olmaması durumunda gerilme-şekil değiştirme ve köprünün dinamik özelliklerinde meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Çalışma sonucunda asma köprülerin titreşim hareketlerinin kontrol edilmesinde titreşim sönümleyicilerin oldukça yararlı olduğu vurgulanmıştır.

Kavak (2019), asma köprülerin titreşim kayıtlarından sistem tanımlaması için alternatif bir yöntem sunmuştur. Köprünün modal özelliklerini belirlemek yerine, bu yöntem ana köprü elemanlarındaki kuvvetleri tanımlamayı amaçladığı ifade edilmiştir. Çalışmada bazı basitleştirici varsayımlara dayanarak öncelikle eleman kuvvetlerini, bu elemanın temel frekansı ile ilişkilendiren denklemler geliştirildi. Metodoloji, İstanbul'daki asma köprülerden Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün titreşim kayıtları kullanılarak test edilmiştir. Köprü, 44 kanallı ivme sensöründen oluşan gerçek zamanlı Yapısal Sağlığı İzleme sistemi ile izlenmektedir. Köprü elemanlarındaki kuvvetler bu çalışmada sunulan yöntem ile hesaplanmaktadır. Sonuçlar, önceki araştırmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve tutarlı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma ortam titreşim kayıtlarından tespit edilen elemanların temel frekanslarının, asma köprü elemanlarındaki kuvvetleri tayin etmenin basit bir yolunu sağladığını gösterdiği vurgulanmıştır.

### **1.3. Tezin Amacı ve İçeriği**

Yapılan literatür araştırmasında asma köprülerinin yapısal davranışının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen birçok analitik çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların en önemli amacı, inşaları sırasında çok büyük maddi kaynaklar harcanan ve buldukları bölgelerde önemli lojistik değer taşıyan asma köprülerinin yapısal davranışlarını en iyi şekilde temsil edecek analitik modeli ve analiz yöntemini geliştirmektir. Fakat bu çalışmalar sırasında oluşturulan analitik modellemelerde yapının sanki bir an içerisinde inşa edildiği ve yüklendiği kabul edilmektedir. Bu tür çözüm

yöntemleri her zaman güvenilir sonuçlar vermeyebilmektedir. Çünkü bu tür mühendislik yapılarının inşaları uzun zaman almakta ve maruz kaldıkları yükler yapım süresince devamlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, analizler sırasında yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, Osmangazi Asma Köprüsü'nün modal, statik ve dinamik analizleri sonlu eleman yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda, köprünün yapısal davranışında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; asma köprülerin yapısal davranışı ile ilgili yapılmış çalışmalar, asma köprülerin tarihçesi, asma köprü türleri, asma köprülerin elemanları, asma köprü inşası, yapım aşamalı analiz yöntemleri ile ilgili genel bilgiler ve bu yöntemlere ait formülasyonlar bu bölümde sunulmaktadır.

İkinci bölümde yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. Bu kapsamda, ilk olarak Osmangazi Asma Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve literatürde sunulan veriler ile model doğrulanmıştır. Daha sonra köprünün iki boyutlu modelinden üç boyutlu sonlu eleman modeli üretilmiştir. Bu model üzerinden köprünün modal, statik ve dinamik davranışı belirlenmiştir. Ayrıca yapım aşamaları ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizler gerçekleştirilmiş ve bu etkilerin yapısal davranışa etkisi araştırılmıştır. Bu aşamada elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

## **1.4. Asma Köprüler**

### **1.4.1. Asma Köprülerin Tarihçesi**

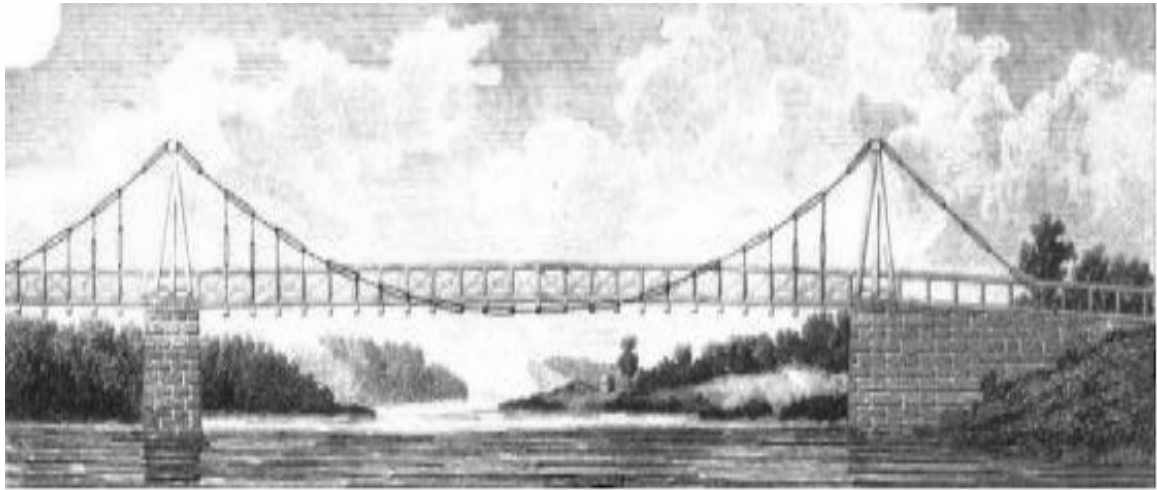
Asma köprünün kökeni eski yıllara dayanır. İlkel asma köprüler ya da basit geçiş düzenekleri, günümüzün modern asma köprü yapılarının atalarıdır. Asma köprüler 2000

yıldan uzun bir süre önce Çin’de demir zincir kablolarla inşa edilmiştir. Doğu’da ortaya çıktığı düşünülen demir asma köprüler, 16. yüzyılda Avrupa’da kullanılmış ve 18. yüzyılda geliştirilmiştir (Chen, 1999).

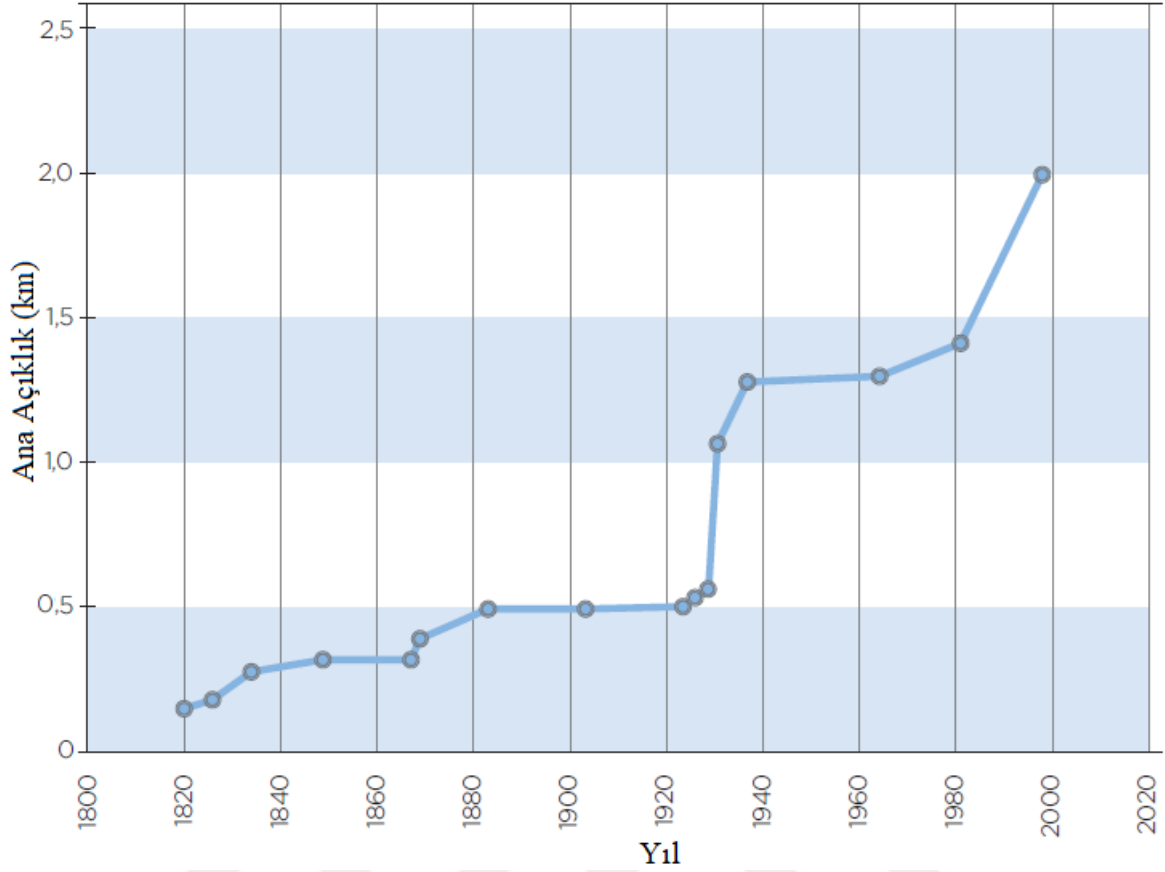
Batıda dövme demirinin kullanılmaya başlamasından sonra, asma köprüler zincirli olarak inşa edilmeye başlanmıştır. İlk zincir köprü, İngiltere’de 1741 yılında Middleton yakınlarında Tees Nehri üzerinde inşa edilen Winch Köprüsü’dür. Bu köprü 1802 yılında çökmüştür. Zincir yerine delikli çubukların kullanıldığı da olmuştur. İlk yapılan zincir köprülerin çoğu şiddetli rüzgârlarda salınımlardan zarar görmüşler ve çökmüşlerdir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Amerika’da inşa edilen ilk demir asma köprü, Pennsylvania’da 1796 yılında James Finley tarafından yapılan Jacobs Creek Köprüsü’dür (Şekil 1.1) (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Asma köprüler üzerine ilk kitap Navier tarafından 1823 yılında Paris’te basılan, “Memoires sur les ponts suspendus“ adlı eserdir. Bundan sonra sırayla David Gilbert ve Fuss taşıyıcı kabloların sahip olacağı zincir eğrisi, eşit mukavemetli zincir eğrisi ve parabol şekilleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981). Şekil 1.2’de asma köprülerin ana açıklıklarına göre zamanla gelişimi verilmiştir. Ayrıca bazı asma köprülerin açıklık ve yapım yılı Tablo 1.1’de verilmektedir.



Şekil 1.1. Jacobs Creek Köprüsü (URL-1, 2010).



Şekil 1.2. Asma köprülerin ana açıklıklarına göre zamanla gelişimleri (Myerscough, 2013).

Tablo 1.1. Bazı asma köprülerin açıklık ve yapım yılı (URL-2, 2019).

No	Köprü Adı	Ana Açıklık(m)	Yıl	Ülke
1	Akashi Kaikyō	1991	1998	Japonya
2	Xihoumen	1650	2009	Çin
3	Great Belt	1624	1998	Danimarka
4	Osmangazi	1550	2016	Türkiye
5	Yi Sun-sin	1545	2012	Güney Kore
6	Runyang	1490	2005	Çin
7	Dongting Lake	1480	2018	Çin

#### 1.4.2. Asma Köprülerin Türleri

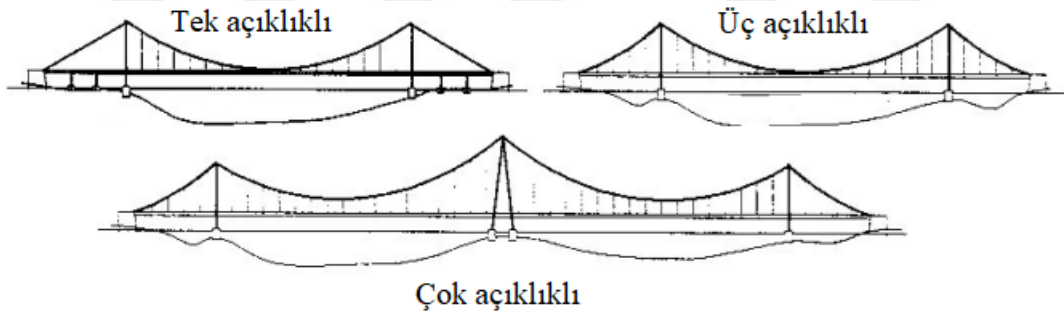
Asma köprüler; açıklık sayısına, tabliyenin sürekliliğine, askı tiplerine ve kablo ankraj tiplerine göre sınıflandırılabilir. Ayrıca bu köprüler iki kuleli tek açıklıklı, iki

açıklıklı ya da üç açıklıklı asma köprüler ve üç ya da daha fazla kuleli çok açıklıklı asma köprüler olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.3). En çok kullanılan ise üç açıklıklı asma köprülerdir. Çok açıklıklı asma köprülerde, kule tepelerinin yatay yer değiştirmesi yük koşulları nedeniyle artabilir ve bu yer değiştirmeyi kontrol etmek amacıyla ek önlemler gerekli olabilir (Chen, 1999).

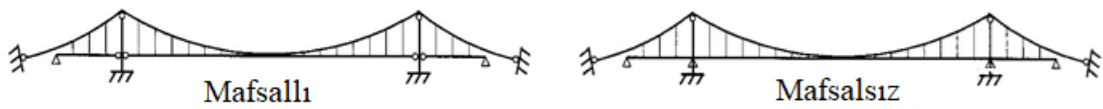
Tabliyeler tipik olarak iki mafsallı veya sürekli tipler olarak sınıflandırılır. İki mafsallı tabliye otoyol köprülerinde yaygın olarak kullanılır. Kombine karayolu-demiryolu köprülerinde trenin işlemlerini sağlamak amacıyla sürekli tabliye sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 1.4) (Chen, 1999).

Kablo ankrajları, harici ankrajlar (earth anchored) veya kendinden ankrajlı (self-anchored) şeklinde iki tür olarak sınıflandırılmaktadır. Harici ankraj tipi en yaygın kullanılanıdır. Kendinden ankrajlı sistemde, ana kablolar ankraj yerine tabliyeye sabitlenir, böylece aksenal basınç tabliyeye iletilir (Şekil 1.5) (Chen, 1999).

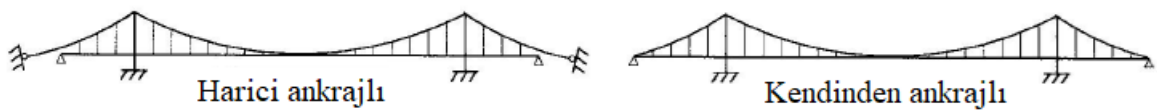
Askılar veya askı halatları düşey veya çapraz olarak inşa edilebilir. Genel olarak çoğu asma köprüde askıları düşeydir (Şekil 1.6) (Chen, 1999).



Şekil 1.3. Asma köprü açıklık tipleri (URL-3, 2019).

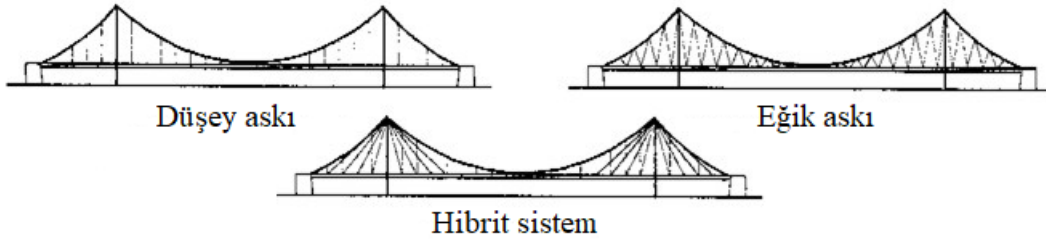


Şekil 1.4. Tabliye süreklilik tipleri (URL-3, 2019).



Şekil 1.5. Ankraj tipleri (URL-3, 2019).





Şekil 1.6. Askı halatı tipleri (URL-3, 2019).

### 1.4.3. Asma Köprü Elemanları

Bir asma köprünün temel yapısal elemanları dört'e ayrılabilir.

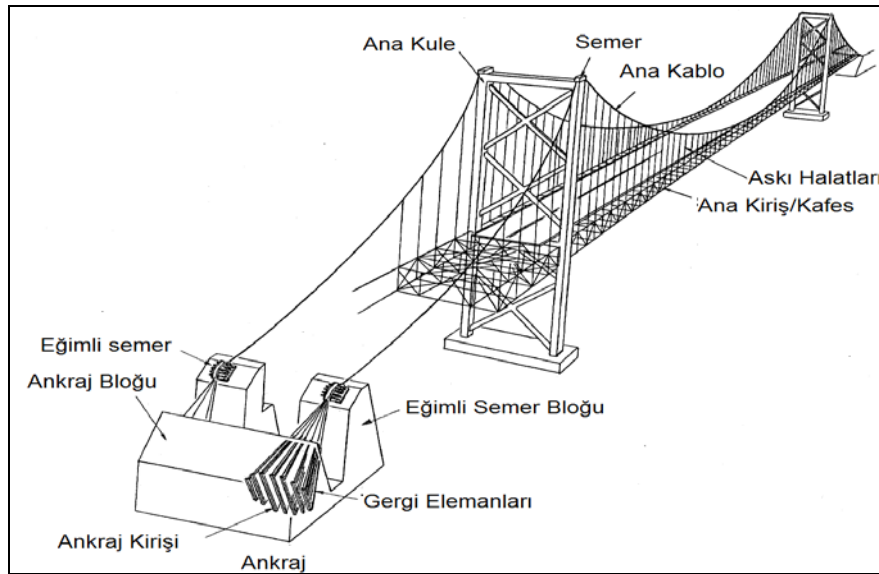
**Tabliye/makas kirişler:** Hareketli araç yüklerini destekleyen ve dağıtan, yanıl sistem için kiriş gibi davranan ve yapının aerodinamik kararlılığını güvence altına alan boyuna yapılarıdır.

**Ana kablolar:** Askı halatları ile takviye kirişlerini destekleyen ve yükleri kulelere aktaran paralel kablo gruplarıdır.

**Ana kuleler:** Ana kabloları destekleyen ve köprü yüklerini temellere taşıyan ara düşey yapılarıdır.

**Ankrajlar:** Ana kabloları sabitleyen ve köprünün uç destekleri gibi davranan masif beton bloklardır (Chen, 1999).

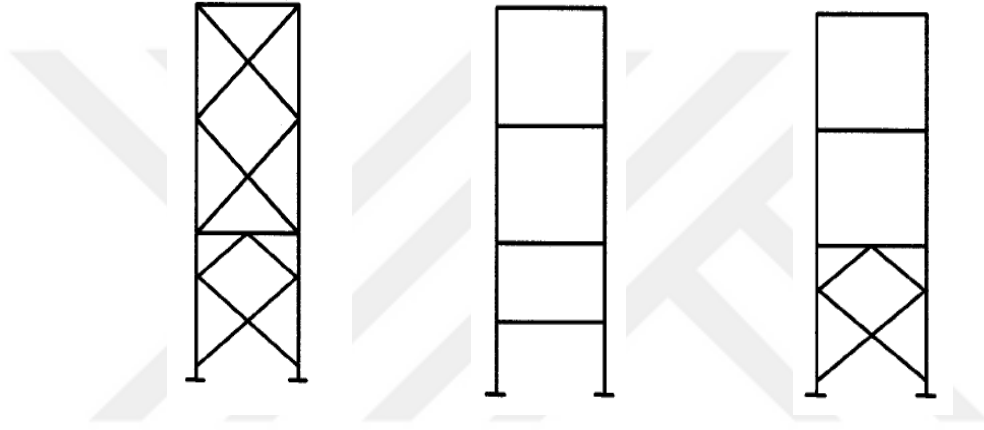
Şekil 1.7'de tipik bir asma köprüye ait elemanları verilmiştir.



Şekil 1.7. Tipik bir asma köprü elemanları (URL-4, 2010).

### 1.4.3.1. Kuleler

Kuleler, tepesine yerleştirilen eyerler ile ana kablolara mesnet görevi yaparlar. Büyük miktarda aksenal kuvvet ve eğilme momentine maruzdurlar. Çelik veya betonarme olabilen kuleler rijit veya eğilebilir olarak inşa edilirler. Her bir kule iki ayaktan oluşur ve bu ayaklar yatay veya diyagonal kirişlerle birbirine bağlanır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2015). Asma köprülerde kullanılan ana kule tipleri Şekil 1.8’de verilmektedir.



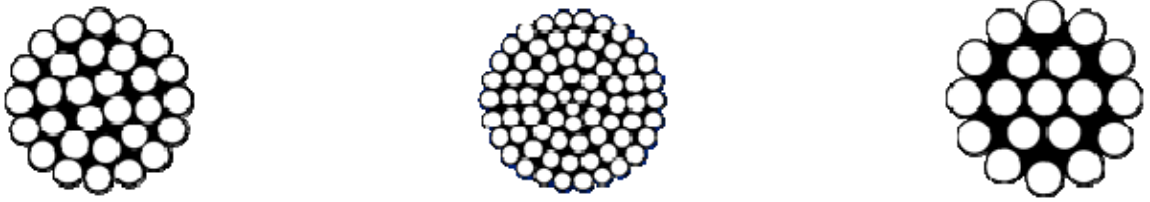
Şekil 1.8. Asma köprülerde kullanılan kule tipleri (URL-4, 2010).

### 1.4.3.2. Kablolar

İlk asma köprülerde ana kablolar için demir zincirler, gözlü demir çubuk zincirler veya başka malzemeler kullanılmıştır. Çelik halatlar ilk kez 19. yüzyılın ilk yarısında asma köprülerde kullanılmış ve 1854’te Niagara Şelaleleri Köprüsü’nde ilk kez paralel çelik halat uygulanmıştır. Soğuk çekilmiş ve galvanize çelik halatlar ilk kez 1883 yılında Brooklyn Köprüsü’nde uygulanmıştır. Bu tür neredeyse tüm modern uzun açıklıklı asma köprülerinde kullanılmıştır. Genellikle örgüler bir daire halinde toplanarak tek bir kablo ortaya çıkarılır. Askı halatları; çelik çubuklar, örgülü çelik halatlar, paralel çelik halatlar ve diğerlerinden üretilebilir. Örgülü çelik halat, modern asma köprülerde en sık kullanılan türdür. Akashi Kaikyo Köprüsü ve Kurushima Kaikyo Köprüsü’nde polietilen ile kaplı paralel halatlar kullanılmıştır (Chen, 1999).

### 1.4.3.2.1. Tel Grupları

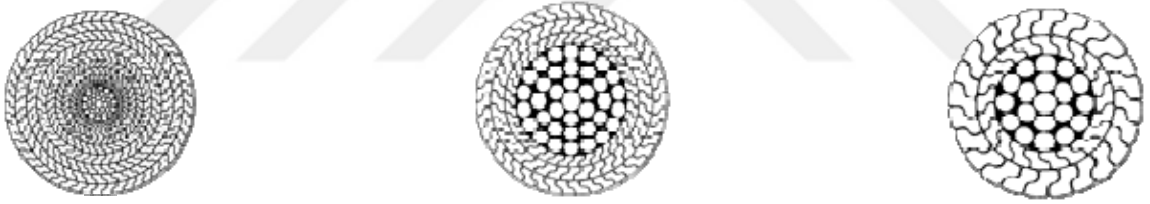
Bir merkez tel etrafında helisel olarak sarılan bir ya da daha çok tabakalı telden oluşur (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Asma köprülerde kullanılan tel çeşitleri (URL-5, 2010).

### 1.4.3.2.2. Çelik Halatlar

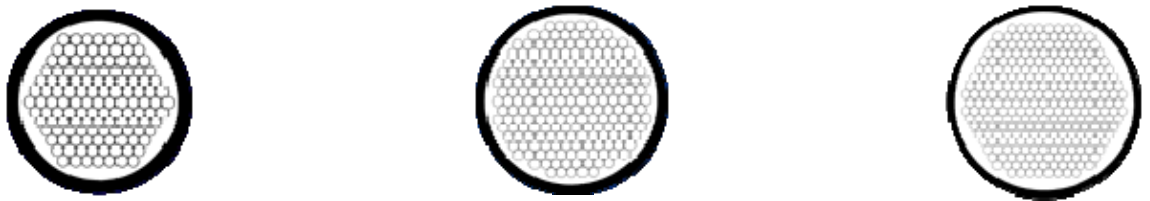
Tel gruplarının bir çekirdek etrafında helisel olarak elde edilirler (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Asma köprülerde kullanılan çelik halat çeşitleri (URL-5, 2010).

### 1.4.3.2.3. Paralel Tel Grupları

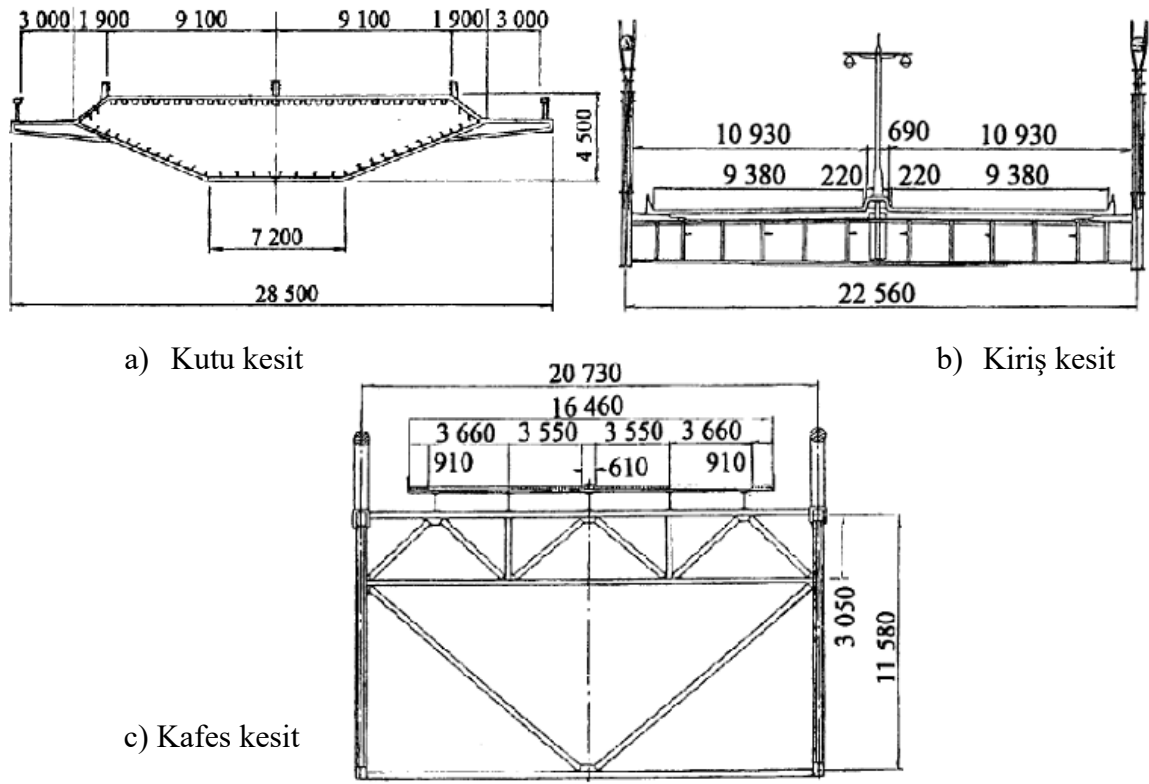
Tellerin helisel olarak sarılmayıp, paralel bir düzende bir araya gelmesiyle elde edilir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Asma köprülerde kullanılan paralel tel grupları (URL-5, 2010).

### 1.4.3.3. Tabliye

Tabliye hareketli araç yüklerini yayan ve taşıyan boyuna yapılardır. Yanal yönde de kirişler gibi davranır ve yapının aerodinamik stabilitesini sağlar. Kafes kirişli, (I) kirişli ve aerodinamik forma sahip kutu kesitli olmak üzere üç tip tabliye kullanılmaktadır (Şekil 1.12). Uzun açıklıklı asma köprülerde tipik olarak makaslar veya aerodinamik forma sahip kutu kesitli tabliyeler kullanılır. I-kirişler aerodinamik stabilite yüzünden dezavantajlıdır (Chen, 1999).

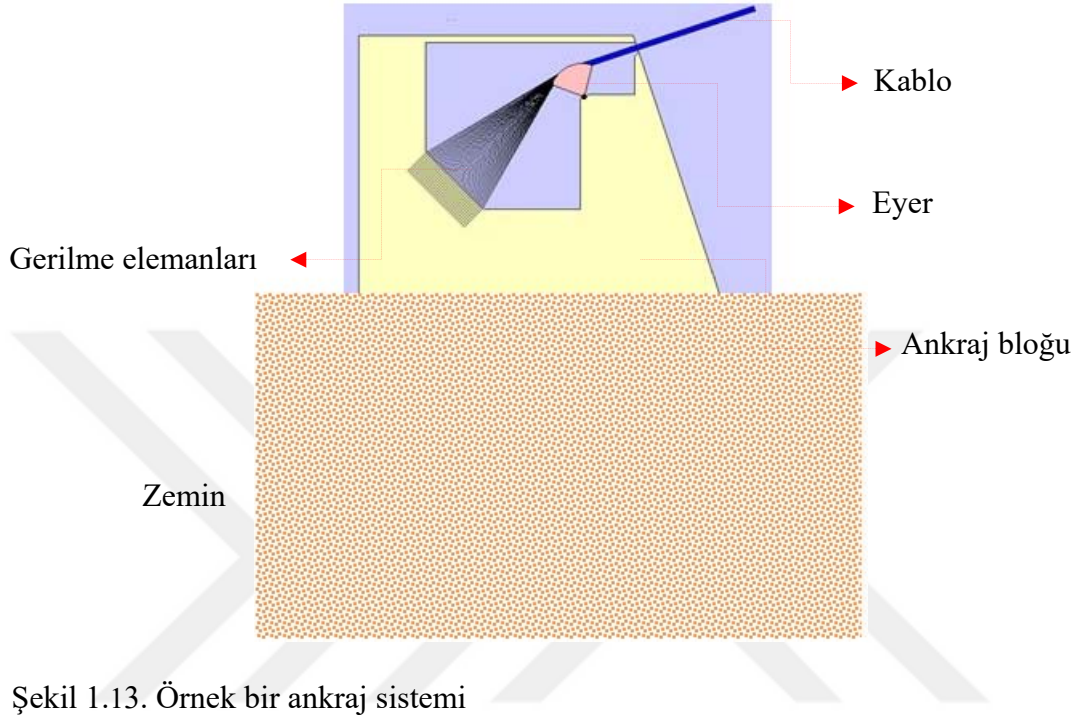


Şekil 1.12. Asma köprülerde kullanılan tabliye çeşitleri (URL-6, 2010).

### 1.4.3.4. Ankrajlar

Ankraj ana kablodan gelen yükleri zemine aktarır. Genel olarak ankraj yapısında; temel, ankraj bloğu, eğik blok, kablo ankraj çerçeveleri ve koruyucu mahafaza bulunmaktadır. Ankrajlar ağırlık veya tünel ankraj sistemi olarak sınıflandırılmaktadır. Ağırlık ankrajında ana kablodaki çekme kuvvetinin düşey bileşeni ankraj bloğun ağırlığı ile yatay bileşeni ise zemin ile ankraj bloğu arasındaki kesme kuvvetiyle dengelenir. Bu

tür birçok asma köprüde kullanılmıştır. Tünel ankrajı, ana kabloların gerilimini doğrudan toprağa aktarır. Yeterli geoteknik koşullar gereklidir (Chen, 1999). Şekil 1.13' örnek bir ankraj sistemi gösterilmektedir.



#### 1.4.4. Asma Köprü İnşası

Bu bölümde asma köprülerin inşasıyla ilgili bilgiler verilecektir. Asma köprülerin inşa yöntemi ve süreçleri köprü tasarımında önemli olmakla birlikte yapısal davranışın belirlenmesi aşamasında da önemlidir. Dolayısıyla bir asma köprünün tasarımı, inşa aşamaları ve yapısal analizleri birbiriyle ilişkilidir (Chen, 2015).

##### 1.4.4.1. Kule, Ankraj İnşası ve İskelenin Kurulması

Kuleler ve ankrajlar asma köprülerin en kritik bileşenleridir. Bir asma köprünün kuleleri yatay kuvvetlere dayanma açısından rijit veya esnek olarak tasarlanabilir. Uzun açıklıklı asma köprülerin kuleleri çoğu esnek olarak tasarlanmaktadır. Hem çelik hem de beton kule üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton kuleler, inşaat ve bakım maliyetleri açısından çelik kulelere karşı avantajlara sahiptir. Amerika'da inşa edilen

Golden Gate Köprüsü (Şekil 1.14) ve Türkiye’de inşa edilen 15 Temmuz Şehitler (Boğaziçi) Köprüsü (Şekil 1.15) kuleleri çelikten inşa edilmiş köprülere örnek gösterebilir. Çin Halk Cumhuriyeti’nde inşa edilen Xihoumen Köprüsü (Şekil 1.16) ise kuleleri betondan inşa edilmiş köprülere örnek gösterebilir. Tabliyenin montajı sırasında ve tabliye üzerindeki statik yükler nedeniyle, ana açıklık ve yan açıklıklardaki kablo kuvvetlerinin dengelenmemiş olması kuleleri ana açıklığa doğru eğecektir. Bu durumun engellenmesi için kule tepelerine eyerler inşa edilir (Chen, 2015) (Şekil 1.17).

Ankrajlar kablo kuvvetlerini toprağa aktaran elemanlardır. Çoğu asma köprüdeki ana kablolar dışarıdan ankrajlanmıştır. Bu köprülerin ankrajları ağırlık ankrajı ve tünel ankrajı olarak sınıflandırılabilir. Ağırlık ankrajı, kablo kuvvetlerini dengelemek için masif betondan üretilir (Şekil 1.18). Zemin jeolojisi uygun ise ana kayaya doğru eğimli bir tünel kazılabilir ve geri dolgulu beton ile ankraj kirişleri veya çubukları yere ankre edilebilir. Ana kablonun çelik halatlarının, ankrajın önündeki kablo eyerinden geçirilerek halat veya birkaç halattan oluşan bir grupta tutturulması gerekir. Kablo eyerinin ana işlevi, ankrajı kolaylaştırmak için kablo eğimini daha aşağıya doğru değiştirmektir. Kablo ucundaki eğim değişimi, kablo kuvvetlerinin bir kısmını eyere yayacağından ankraj kuvvetlerini doğrudan ankrajlara indirgeyecektir (Chen, 2015).

İskele sistemi, tabliye veya platformun doğrudan askıdaki kablolarla monte edildiği birkaç hafif kablo ile desteklenen sıradan bir asma köprüye benzer bir yapıdır. İskele sistemi, ana kablolarla aynı geometriye sahip ve ana kablolarla yakın kurulum. Yalnızca geçici bir yapı görevi görmekte ve köprü tamamlandıktan sonra kaldırılmaktadır (Chen, 2015) (Şekil 1.19).



Şekil 1.14. Golden Gate Köprüsü (URL-7, 2019).

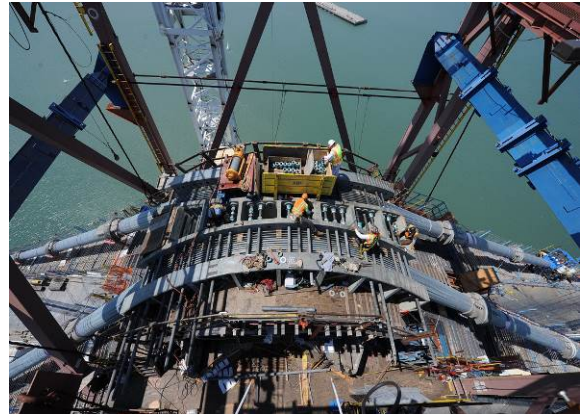




Şekil 1.15. 15 Temmuz Şehitler (Boğaziçi) Köprüsü (URL-8, 2019).



Şekil 1.16. Xihoumen Köprüsü (URL-9, 2019).



Şekil 1.17. Kule tepelerine inşa edilen eyerler (URL 10-11, 2019).



Şekil 1.18. Ankraj inşası (URL-12, 2019).



Şekil 1.19. İskele sistemi inşası (URL-13, 2019).

#### 1.4.4.2. Ana Kabloların Gerilmesi

Çelik halatlardan ana kabloların üretilmesi asma köprü inşasında önemli bir adımdır. Ana kabloları tekil çelik halatlardan üretmek için iki yöntem vardır: Bunlar; hava eğirme (AS) yöntemi ve prefabrik paralel çelik halatlar (PWS veya PPWS) yöntemleridir. AS metodu ilk olarak 19. yüzyılın ortalarında John A. Roebling tarafından geliştirilmiştir. AS yönteminde, önce ana kablo üzerinde ve ana kablo boyunca bir ankrajdan diğerine ilmekli bir hareketli kablo gerilir. İlmekli hareketli kablo modern asma teleferikler gibi çalışan bir döner tekerlek taşır. Her çelik halat, ankraja yakın



yerleştirilmiş kablo makaralarında tutulur ve buradan beslenir. İlk olarak, çıkık halat makaralarının yerleştirildiği uca yerleştirilir. Makaradan çıkarılmamış kablunun hareketli ucu, çıkıktan yukarıdan girecek ve aşağıdan çıkacak şekilde geçirilir. Hareketli uç daha sonra ankraj pabuçlarına bağlanır (Chen, 2015) (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Ana kabloların gerilmesi (URL-14, 2019).

#### 1.4.4.3. Tabliyenin Kurulması (Montajı)

Tabliyenin montajı, ana açıklığın ortasından veya yan açıklıklardan ya da kule hizasından başlayabilir. Askı açısının kablo kelepçelerine göre değişmesi göz önüne alındığında, ana açıklığın ortasından başlayan sıralama bu değişiklikler daha küçük olacağından daha kolay olacaktır. Özellikle, kulelere yakın son bölümler monte edildiğinde montaj ana açıklığın merkezinden kulelere doğru yapıldıysa kablunun deformasyonun çoğu gerçekleşmiş olacaktır. Fakat tabliyeleri kulelerden başlayarak montajlamak daha kolaydır. Hangi sıra tercih edilirse edilsin, tabliyenin montajı sırasında, askı yerlerindeki eğilme momentini en aza indirmek ortak hedef olmalıdır. İdeal durum, tüm tabliye ağırlığının kablolarla eşit şekilde dağılmış olmasıdır. Bunun için kablolar genellikle sadece tabliyenin üst kısmına bağlanır ve montaj sırasında taban kısmı bağlantısız olarak bırakılır. Bu bağlantılar, tüm tabliye parçaları kurulduktan ve askılar ayarlandıktan sonra rijit bağlantılarla değiştirilecektir. Eklem bağlantılardan rijit bağlantılara geçiş, tabliye yerleştirilmeden önce yapılır. Tabliyelere giderek daha fazla parça ekleneceği için, kulelerin dibinde eğilme momentleri ve kulelerin tepesinde eğilme miktarı artacaktır. Bu tabliye ağırlıkları esnek olarak tasarlanan kuleye dağıtılır. Kulelerin

tepesindeki eyerlerin yatay pozisyonu ayarlanarak moment açığa çıkarılmalıdır. İdeal olarak, kuleler tüm tabliye parçalarının montajından sonra sadece basınç altında kalır (Chen, 2015). Şekil 1.21’de bir tabliye segmentinin yerine yerleştirilmesi gösterilmektedir.



Şekil 1.21. Tabliye segmentinin yerine yerleştirilmesi (URL-15, 2019).

#### 1.4.5. Asma Köprülerde Periyodik Bakım

Asma köprülerde zincir halkalarına karşılık gelen elemanlar çelik kablolardır. Bu elemanların birinin ya da birkaçının kırılmaları ya da kopmaları köprüyü oluşturan diğer elemanlara öngörülmemiş fazla yüklerin aktarılması ile kısmi göçmelere hatta köprünün tamamen yıkılmasına sebep olabilirler. Bu durum 1967 yılının Aralık ayında Amerika Birleşik Devletleri'nin Virginia eyaletinde yaşanmıştır. Silver Bridge Asma köprüsü 1928 yılında inşa edilmiş ve 670 m açıklığında asma bir köprüdür. Köprün inşa tarihinden 40 yıl sonra yıkılmıştır. Yapılan araştırmalarda yıkılma sebebinin tekrarlı yükler altında meydana gelen yorulma ve kabloda meydana gelen korozyon olduğu tespit edilmiştir. Yıllar içinde bu iki olumsuz koşulun neden olduğu çatlaklar ilerlemiş, bağlantı elemanı kopmuş ve diğer köprü elemanları burkularak köprü çökmüştür. Çelik kablolar ve onların bağlantı elemanları göçmeyi tetikleyici unsurlar olmuştur. Asma köprülerde kopma açısından kritik elemanlar çekmeye maruz kalan ve kırılmaları durumunda köprünün göçmesine yol açabilecek eleman ya da eleman parçaları olarak tanımlanırlar. Asma köprülerde bu elemanlar taşıyıcı ana kablo ile köprü platformunu birbirine bağlayan ve

askılar olarak adlandırılan genelde düşey konumdaki kablolardır. Ancak köprü içindeki her çekme elemanı kopma açısından kritik eleman olarak düşünülmemelidir. Bir çekme elemanı koptuğunda yük diğer çekme elemanlarının kapasiteleri ile taşınabiliyorsa kırılan eleman kopma açısından kritik eleman sayılmaz. Tekrarlı ve titreşimli yükler altında köprüde çekmeye çalışan elemanlar (kablolar ve bunların mafsallı parçaları) zaman içinde metal yorulmasına maruz kalabilirler. Bu yorulma hali bazı mekanik ve metalurjik süreksizlik noktalarında çatlakların oluşmasını ve ilerlemesini tetikleyebilir. Asma köprülerde kopma açısından kritik elemanlar ve parçalar tespit edildikten sonra bir program dahilinde bunların denetimi yapılmalıdır. Denetim programı, yapılacak kontrollerin sıklığını ve bunlar ile ilgili süreçleri içermelidir. Her kontrolde iyice temizlenmiş şüpheli noktaların fotoğrafları çekilmeli ve bir sonraki kontrolde bu fotoğraflar ile karşılaştırılarak elemanların mevcut durumları kopma oluşumu açısından değerlendirilmelidir. Özellikle, mafsallı bağlantı noktalarındaki kaynaklarda ve çelik levha elemanlarında çatlak, aşınma ve korozyon oluşumu gözlenirse gerekli önlemler derhal alınmalıdır. Daha detaylı kontrol için tahribatsız testler yapılmalı ve özellikle çatlak oluşumu tespit edilirse kontrol eleman üzerinde yapılacak metal yorulması değerlendirme çalışmalarıyla desteklenmelidir. Bu çalışma ile elemanların kalan yorulma ömürleri ve çatlak ilerleme oranları hesaplanır ve alınması gerekli önlemler belirlenir. Silver Bridge olayı özellikle asma tipi çelik köprülerde periyodik kontrol ve bakım çalışmalarının önemini altını çizmiştir. Kritik noktalarda olası çatlakların tespiti ve önlem alınması ancak düzenli kontroller ile sağlanabilir. 1960'lı yıllar öncesi kontrol teknolojisi ile günümüz teknolojisi arasında büyük farklar olmasına karşın hangi teknoloji ile olursa olsun kontrol ve bakım düzenli aralıklarla ciddi bir şekilde yapılmazsa bu tip olayların yaşanması olasıdır. 22 Ocak 2004 günü İstanbul'da yaşanan şiddetli kar fırtınası sırasında İstanbul Boğaziçi Köprüsü'nde bir askı kablosunun tabliye ile bağlandığı levhada bir ayrılma meydana gelmiştir. "Asma köprünün bir kablosu koptu" şeklinde yayılan haber telaşa neden olmuştur. Oysa köprüde mevcut 272 askı elemanından sadece birinin birleşim levhasındaki ayrılma köprünün güvenliği bakımından önemli sayılmayabilir. Nitekim uzmanlar heyeti yaptığı inceleme sonunda köprünün sapsağlam olduğunu kamuoyuna açıklanmıştır. Ancak yukarıda da açıklandığı gibi bu olay vesilesiyle periyodik bakım programının önemi üzerinde durulmalı ve asma köprülerimizde gerekli kontroller zamanla yapılmalıdır (Karataş, 1979). Bu köprülerden günlük yaklaşık 200,000 araç yükü geçtiği düşünüldüğünde periyodik bakımın önemi

daha da belirgin olmaktadır. Günümüzde bu denli uzun açıklıklı birçok köprü gerçek zamanlı yapı sağlığı izleme sistemleri ile izlenmektedir. Bu sistemler köprülerin hizmet ömürleri boyunca bakım maliyetini düşürmek, ayrıca yıkıcı depremler ve kuvvetli rüzgârların neden olduğu aşırı yüklenme durumlarında yapısal güvenliğini değerlendirmek için faydalı olmaktadır.

#### 1.4.6. Türkiye’deki Asma Köprüler

Türkiye’de yapımı tamamlanan 4, inşası devam eden 1 uzun açıklıklı asma köprü vardır. Bu köprülere ait bazı teknik özellikler Tablo 1.2’de, bu köprülere ait bazı fotoğraflar ise sırasıyla Şekil 1.22-1.24’te verilmektedir.

Tablo 1.2. Türkiye’de bulunan asma köprüler (URL-16, 2019).

Köprü adı	Ana açıklık	Uzunluk	Yükseklik	Açılış tarihi
Yavuz Sultan Selim Köprüsü	1408 (m)	2164 (m)	320 (m)	2016
Osmangazi Köprüsü	1550 (m)	2682 (m)	234 (m)	2016
Fatih Sultan Mehmet Köprüsü	1090 (m)	1510 (m)	164 (m)	1988
15 Temmuz Şehitler Köprüsü	1070 (m)	1560 (m)	165 (m)	1973
Çanakkale 1915 Köprüsü	2023 (m)	3869 (m)	318 (m)	2023



Şekil 1.22. Yavuz Sultan Selim Köprüsü (URL-17, 2019).





Şekil 1.23. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü (URL-18, 2019).



Şekil 1.24. 15 Temmuz Şehitler (Boğaziçi) Köprüsü (URL-19, 2019).

### 1.5. Asma Köprülerin Analitik Modellenmesi

Köprüler eski zamanlardan beri kullanılan en önemli mühendislik yapılarının başında gelmektedir. Stratejik açıdan da çok önemli bir yeri olan köprülerin, değişik taşıyıcı sisteme ve malzeme özelliklerine sahip birçok uygulaması günümüzde mevcuttur. Uzun açıklıkların geçilmesi gereken yerlerde genel olarak asma köprüler, betonarme köprüler ve kablolu köprüler tercih edilmektedir. Bu tip yapılar arasında 550 m geçen asma köprüler gerek büyük açıklıkların geçilmesi gerekse köprü altında kalan alanların rahatça kullanılabilmesi için inşa edilen benzerlerinden daha ekonomik mühendislik yapılarıdır. Asma köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının değişen yükler altında

dinamik davranışlarının belirlenmesinde sonlu eleman analizlerinden yararlanılmaktadır. Fakat sonlu eleman analizlerine dayalı analitik çözümlerinde, yapıların sanki bir an içerisinde inşa edildiği ve yüklendiği kabul edilmektedir. Bu tür çözüm yöntemleri her zaman güvenilir sonuçlar vermeyebilmektedir. Çünkü köprü gibi önemli mühendislik yapılarının inşası uzun zaman almakta ve maruz kaldığı yükler yapım süresince devamlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla analizler sırasında yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Çözümler sırasında bu tür etkilerin dikkate alındığı sistemlerde eleman yüklerinin ve kesit tesirlerinin %50 civarında fazla elde edildiği görüldüğünde (Altunışık vd., 2009a; Altunışık vd., 2009b; Karakaplan vd., 2009; Altunışık vd., 2010) konunun önemi daha da iyi anlaşılmaktadır.

## 1.6. Asma Köprülerin Dinamik Analiz Formülasyonu

### 1.6.1. Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Hareket Denklemleri

Zaman tanım alanında analiz, zamana bağlı yükler altındaki yapının dinamik davranışını hesaplamada kullanılır. Bu analiz, statik, geçici (transient) ve harmonik yüklerin herhangi bir kombinasyonu sonucu, zamana bağlı olarak yapıda oluşan yer değiştirmeleri, şekil değiştirmeleri, gerilmeleri ve kuvvetleri hesaplamada kullanılabilir.

Atalet ve sönüm etkileri gibi yüklemenin zaman faktörlerinin dikkate alınması önemlidir. Bir sistemin dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (Clough ve Penzien 1993).

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} \quad (1.1)$$

Bu denklemde;

$[M]$  ; sistemin kütle matrisi,

$[C]$  ; sistemin sönüm matrisi,

$[K]$  ; sistemin rijitlik matrisi,

$\{U\}$  ; sistemin yer değiştirme vektörü,

$\{\dot{U}\}$  ; sistemin hız vektörü,

$\{\ddot{U}\}$  ; sistemin ivme vektörü,

$\{P\}$  ; dış yük vektörü

ifade etmektedir.

### 1.6.2. Doğal Frekans ve Modların Hesabı

Sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için (1.1)'deki hareket denklemi

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (1.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin çözümü

$$\{U\} = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (1.3)$$

şeklinindedir. Burada A ve B başlangıç şartlarından elde edilir. Bununla birlikte,  $\alpha$  faz açısı;  $\omega_n$  doğal açısal frekans ve  $\{\phi\}$  hareketin genlik vektörü olmak üzere, sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için çözüm

$$\{U\} = \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.4)$$

şeklinde yazılabilir. (1.4) denkleminde

$$\{\ddot{U}\} = -\omega_n^2 \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.5)$$

elde edilir. (1.4) ve (1.5) denklemleri (1.2) denkleminde yerine yazılırsa

$$-\omega_n^2 [M]\{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) + [K]\{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) = \{0\} \quad (1.6)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirse;





eden  $n$  tane bağımsız  $\{\phi\}$  vektörü vardır. Bu vektörler, “Doğal Titreşim Modları” veya “Doğal Titreşim Mod Şekilleri” olarak adlandırılmaktadır. Bu vektörler, ayrıca “Öz Vektörler, Karakteristik Vektörler veya Normal Modlar” olarak bilinmektedir.

(1.10) denkleminin bütün kökleri gerçektir ve pozitifdir. Sistemin doğal frekanslarının en küçüğüne “Temel Frekans” denir. Modal titreşim frekansları, büyüklüklerine göre sıralanarak aşağıdaki gibi belirlenir.

$$0 \leq \omega_1 \leq \omega_2 \leq \omega_3 \cdots \leq \omega_n \quad (1.11)$$

Her bir doğal açısal frekans için (1.7) denklemindeki katsayılar matrisi hesaplanıp  $i$ . modal frekansa karşılık gelen titreşimin genlikleri elde edilir. Her bir doğal açısal frekans için hesaplanan genlik vektörleri “Modal Vektör, Doğal Mod” veya kısaca “Mod” olarak adlandırılır. Ayrıca, titreşimin  $i$ . ve  $j$ . modları arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur.

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (1.12)$$

Maxwell-Betti teoremi ile kolayca elde edilebilen bu bağıntı “Titreşim Modlarının Ortogonalitesi” olarak adlandırılmaktadır. (1.12) denkleminin rijitlik ve sönüm matrisi içinde geçerlidir.

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (1.13)$$

$$\{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (1.14)$$

Mod vektörlerinin hesabında, elemanların oranı sabit kalmak üzere, değişik çözümler elde edilebilir. Mod şekilleri aynı olduğu halde farklı genlikler elde edilebilir. Bu keyfîlik bir normalleştirme işlemi ile ortadan kaldırılabilir. Hesap kolaylığı bakımında genellikle bütün genlikler en büyük genlik esas alınarak normalize edilir. Bununla birlikte, diğer bir normalleştirme işleminde ise, kütle matrisinin aynı mod vektörü ile sağ ve soldan çarpılarak sonucun birim olması sağlanır. Yani;

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = 1 \quad (1.15)$$

şeklindedir. Normalleştirilmiş modlar;

$$\Phi_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\sqrt{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j}} \quad (1.16)$$

şeklinde elde edilir. Böylece modlar normalleştirilir.

$$\{\phi\}_j = \begin{Bmatrix} \phi_{1j} \\ \phi_{2j} \\ \vdots \\ \phi_{ij} \\ \vdots \\ \phi_{nj} \end{Bmatrix} \Rightarrow \{\Phi\}_j = \begin{Bmatrix} \Phi_{1j} \\ \Phi_{2j} \\ \vdots \\ \Phi_{ij} \\ \vdots \\ \Phi_{nj} \end{Bmatrix}$$

j. mod vektörü j. normalleştirilmiş mod vektörü

Mod vektörlerinden oluşan matrise “Modal Matris”, normalleştirilmiş mod vektörlerinden oluşan matrise de “Normalleştirilmiş Modal Matris” adı verilir. n serbestlik dereceli bir sistem için modal matrisler aşağıdaki gibidir.

Modal matris	Normalleştirilmiş modal matris
$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1i} & \cdots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2i} & \cdots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{i1} & \phi_{i2} & \cdots & \phi_{ii} & \cdots & \phi_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdots & \phi_{ni} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}$	$[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1i} & \cdots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2i} & \cdots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{i1} & \Phi_{i2} & \cdots & \Phi_{ii} & \cdots & \Phi_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \cdots & \Phi_{ni} & \cdots & \Phi_{nn} \end{bmatrix}$
$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$	
1.mod   2.mod   i.mod   n.mod	

Normalleştirme işleminin doğruluğu

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [1] \quad (1.17)$$

bağıntısı ile kontrol edilebilir. Burada  $[I]$  birim matrisidir (Clough ve Penzien 1993; Chopra, 2012).

### 1.6.3. Zaman Tanım Alanında Geometrik Olarak Lineer Olmayan Dinamik Analiz

Yapılara etki eden kuvvetler belli bir düzeyin altında kaldıkları sürece yapı rijitliğine etkileri olmaz ve yapının rijitliğini bozmazlar. Ancak, yük belirli bir düzeye çıkınca malzemenin elastisite modülü ile yapı elemanının mesnetleniş şekli ve atalet momentlerine bağlı olarak yapı lineer olmayan davranış gösterebilir. Bu lineer olmama durumu, yapı elemanlarının ve sonuç olarak yapının rijitlik matrisinin yük düzeyine bağlı olarak değişmesinden kaynaklanır. Yapının bilinen lineer rijitlik matrisine gelen katkıya geometrik rijitlik matrisi ve lineer rijitlik matrisiyle toplamına da sistem rijitlik matrisi denir. Bu tür lineer olmama durumunun hesaplara katılmasıyla yapılan analize ikinci merteye hesaba veya geometrik olarak lineer olmayan analiz denir (Aksoğan, 1986).

Geometrik olarak lineer olmayan sistemlerin elemanlarının davranışı lineer olabilir. Fakat sistem geometrisinin büyük deformasyonlar sonucunda değişmesi, sistemde lineer olmayan davranışlar oluşturur. Asma köprülerin ve yükleme altında bazı elemanları, esnek burkulmaya maruz kalabilen yapıların davranışı bu duruma bir örnektir. Ters sarkaç modeline sahip yapılarda, salınım esnasında görülen ve yapı ölü ağırlığı  $P$  ile kütle ağırlık merkezi ve mesnet arasındaki  $\Delta$  deformasyonlardan oluşan  $P\Delta$  (P-Delta) mesnet momenti, bu gibi yapıların davranışındaki çok küçük deformasyonlar için olası lineerliliği ortadan kaldırır. Bu duruma  $P\Delta$  etkisi denir (Erdik vd. 1980).

Hem eğilmeye hem de normal kuvvete maruz taşıyıcı çubuklarda, normal kuvvetin eğilme üzerine etkisi bulunmaktadır. Bir elastik eğrinin diferansiyel denkleminin, normal kuvvet ile çok yakından ilgili olduğu, bu durumun da eğilme rijitliklerine tesir ettiğini ifade edilmiştir. Normal kuvvet; basınç ise eğilme rijitliğinde bir azalış, çekme ise eğilme rijitliğinde bir artış olur. Dolayısıyla, çubuğun eğilme momentleri, normal kuvvetlerin değeri ile ilgilidir (Tezcan, 1970).

Eğik kablo veya asma köprülerin statik ve dinamik davranışı ağırlık rijitliklerinden dolayı geometrik olarak lineer olmamaktadır. Fakat dinamik davranış genellikle rijitliğin, ölü yükün statik şekli gibi doğrusallaştırılarak basit bir şekilde incelenebilir. Fakat lineer

analiz ile bazı salınımlar için doğru sonuçlar elde edilemeyebilir (Brownjohn vd., 1994). Bunlardan bazıları şunlardır:

- ✓ Çok ağır araçların tabliyeden geçişi,
- ✓ Şiddetli rüzgârlardaki aerodinamik kararsızlık ve şok etkisi,
- ✓ Depremden dolayı mesnetlerin yer değiştirmesi

Asma köprülerde basınç yüklerini taşıyan askılar yapısal olarak büyük geometrik değişimler yapabilmektedir. Ayrıca kablolar küçük kesitli, uzun yapı elemanlarıdır. Bu elemanların taşıdığı normal kuvvetler ise çekme olup, eleman içinde oluşturduğu normal yer değiştirmeleri ihmal etmek mümkün değildir. Diğer olası lineer olmama durumları ise, askı ve kablodaki histerezis ve sürtünme etkileri ile tabliyenin birleşme noktalarındaki enerji kayıplarıdır (Brownjohn vd., 1994).

Lineer olmayan elemanlara sahip lineer elastik bir yapının dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K_L]\{U\} + \{P_N\} = \{P\} \quad (1.18)$$

Bu denklemde,

[M], kütle matrisi,

[C], sönüm matrisi,

[K<sub>L</sub>], lineer olmayan bağlantı elemanları hariç lineer elastik elemanların rijitlik matrisi,

{U}, sistemin yer değiştirme vektörü,

{ $\dot{U}$ }, sistemin hız vektörü,

{ $\ddot{U}$ }, sistemin ivme vektörü,

{P}, dış yük vektörüdür,

{P<sub>N</sub>}, lineer olmayan bağlantı elemanlarındaki lineer olmayan serbestlik derecesinden doğan yük vektörüdür.

Lineer olmayan elemanların her serbestlik derecesi için lineer bir efektif rijitlik tanımlanmıştır. Bu rijitlik değeri keyfi bir değerdir ancak, genellikle “0” ile maksimum lineer olmayan rijitlik arasında değişmektedir. Buna göre (1.18) denklemi tekrar yazılacak olursa;

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} - (\{P_N\} - [K_N]\{U\}) \quad (1.19)$$

elde edilir. Burada  $[K] = [K_L] + [K_N]$  şeklindedir.  $[K_L]$ , lineer olmayan bağlantı elemanların lineer serbestlik dereceleri için ve bütün lineer elastik elemanların rijitlik matrisidir.  $[K_N]$  ise bütün lineer olmayan serbestlik dereceleri için lineer efektif rijitlik matrisidir.

### 1.7. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması

Asma köprüler, genelde 550 m'den büyük açıklıkların geçilmesi için, iki ana kablonun kuleler arasında asılması ve kablo uçlarının bloklara ankrajlanmasıyla inşa edilen yapılardır (Merritt, 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2015). Bu köprüler; ankraj, ana kablo, kule, askı ve tabliye gibi elemanlardan oluşmaktadır.

Asma köprüler inşa edilirken önce kule ve ankraj sistemleri inşa edilir. Kule inşasından sonra ana kablo çekilir. Ana kablo çekildikten sonra askılar ana kabloya bağlanır ve bir vinç yardımıyla tabliye kademeli olarak ana açıklığın ortasından başlayarak iki uca doğru eşit sayıda monte edilmeye başlanır.

Yapım aşaması çözümlemesi, yapının bir anda inşa edilmesi ve yüklenmesi yerine sahada yüklenici firma yapmayı nasıl inşa ediyorsa, proje ofisinde bulunan mühendislerin bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmeleri demektir (Karakaplan vd., 2009). Çünkü köprü gibi önemli mühendislik yapılarının inşası uzun zaman almakta ve maruz kaldığı yükler yapım süresince devamlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla analizler sırasında yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınması gerekmektedir.

Köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının modellenmesi sırasında aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir:

- ✓ Bu tür köprülerin projelendirilme aşamalarından trafiğe açılma sürelerine kadar geçen süre içerisindeki bütün yapım aşamalarının ve detaylarının belirlenmesi gerekmektedir.
- ✓ Köprü taşıyıcı sisteminin (kuleler, tabliye, mesnetler, askılar) hangi yapım aşamaları izlenerek inşa edildiği ve bu aşamaların ne kadar sürdüğüne ait detaylı bir iş planı hazırlanmalıdır.
- ✓ Geometrik parametreler için "P-Delta Etkisi" dikkate alınmalıdır.

- ✓ Hazırlanan iş planına göre, sonlu eleman modeli yapım aşamaları dikkate alınarak adım adım modellenmeli ve her bir elemana değişik bir grup ismi atanmalıdır. Özellikle bu aşama, analizin ilerleyen bölümlerinde büyük bir kolaylık sağlamaktadır.
- ✓ Modellemeler sonrasında toplam yapım aşaması adımı ve süresi belirlenmeli, buna bağlı olarak her bir yapım aşaması süresince eklenen ve boşaltılan yüklemeler ilgili atama isimleri dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir.
- ✓ Her bir adımdan elde edilen verilerin bir sonraki adıma eklenmesi için ilgili modüller seçilmeli, böylelikle analizlerin doğru sonuçlar vermesi sağlanmalıdır.
- ✓ Lineer olmayan parametreler literatüre uygun olarak seçilmelidir (Günaydın 2011).

### **1.8. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması**

Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde, asma köprüler sahada yüklenici firma tarafından nasıl inşa ediyorsa, tasarım aşamasında yapılan analizlerde bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmelidirler. Bu aşamada zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü köprü yapımı sırasında betonun elastisite modülü, sünme ve rötre katsayıları iklim şartlarına bağlı olarak sürekli değişikliğe uğrayacaktır. Örnek vermek gerekir ise yeni dökülen bir beton yaştır ve sadece sisteme bir ağırlık getirmektedir. Bu beton 7 günlük, 28 günlük veya 1000 günlük iken dayanımı sürekli değişmektedir. Betonun yaş durumundan yapının ekonomik zamanını tamamlamasına kadar olan değişimler yapım aşaması çözümlemesinin içerisine eklenebilir ve bu sayede gelecekte olabilecek hatalar engellenmeye çalışılabilmektedir (Karakaplan vd., 2009).

#### **1.8.1. Basınç Dayanımı**

Betonun t yaşındaki basınç dayanımı çimento tipine, sıcaklığa ve kür şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Betonun herhangi bir yaştaki basınç dayanımı,

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada,  $\beta_{cc}(t)$  betonun yaşına bağlı bir katsayıdır ve aşağıdaki denklem yardımıyla hesap edilebilmektedir.

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1.21)$$

Burada,  $f_{cm}(t)$  t günlük bir betonun basınç dayanımı,  $f_{cm}$  betonun 28 günlük basınç dayanımı, t betonun gün cinsinden yaşını göstermektedir.  $t_1=1$  gündür ve s çimento tipine bağlı olarak değişen 0.20, 0.25 ve 0.38 gibi bir katsayıdır.

### 1.8.2. Betonun Yaşı

Betonun elastisite modülü zamanla birlikte değişmektedir. Elastisite modülü,

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (1.22)$$

şeklinde hesap edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada,  $E_{ci}(t)$  t günlük betonun elastisite modülünü,  $E_{ci}$  betonun 28 günlük elastisite modülünü,  $\beta_{cc}(t)$  ise betonun yaşına bağlı olarak belirlenen bir katsayıyı ifade etmektedir.

### 1.8.3. Betonun Büzülmesi

The CEB-FIP (1990) şartnamesine göre betonun toplam büzülme şekil değiştirmesi,

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_s) \quad (1.23)$$

denklemini ile hesap edilmektedir. Burada,  $\varepsilon_{cso}$  kavramsal büzülme katsayısını,  $\beta_s$  ise zamana bağlı devam eden büzülme gösteren bir katsayıyı ifade etmektedir. t betonun gün cinsinden yaşını,  $t_s$  ise beton için büzülmenin başladığı andan itibaren gün cinsinden

yaşını göstermektedir. Kavramsal büzülme katsayısı aşağıdaki bağıntılar ile hesap edilebilmektedir.

$$\varepsilon_{\text{cso}} = \varepsilon_s(f_{\text{cm}})\beta_{\text{RH}} \quad (1.24a)$$

$$\varepsilon_s(f_{\text{cm}}) = \left[ 160 + 10\beta_{\text{sc}} \left( 9 - \frac{f_{\text{cm}}}{f_{\text{cmo}}} \right) \right] \quad (1.24b)$$

Burada,  $f_{\text{cm}}$  MPa cinsinden betonun 28 günlük basınç dayanımını göstermektedir.  $f_{\text{cmo}}$  10MPa'dır.  $\beta_{\text{sc}}$  ise çimento tipine bağlı olarak 4 ve 8 arasında değişen bir katsayıyı ifade etmektedir.

$$\left. \begin{array}{l} \beta_{\text{RH}} = -1.55\beta_{\text{sRH}} \\ \beta_{\text{RH}} = 0.25 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 40\% \leq \text{RH} < 90\% \\ \text{RH} \geq 99\% \end{array} \quad (1.25)$$

Burada,

$$\beta_{\text{sRH}} = 1 - \left( \frac{\text{RH}}{\text{RH}_0} \right)^3 \quad (1.26)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, RH % olarak atmosferdeki nem oranını göstermektedir.  $\text{RH}_0$  100%'dür. Zamana bağlı olarak devam eden büzülme,

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0) + (t-t_s)/t_1}} \quad (1.27)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada, h mm cinsinden ifade edilen kavramsal bir boyuttur ve  $h = 2A_c/U$  ifadesi ile hesap edilmektedir.  $A_c$  kesit alanı, u ise atmosfer ile temas eden çevre uzunluğudur.  $h_0=100\text{mm}$  ve  $t_1=1$  gündür.



#### 1.8.4. Betonun Sünmesi

Sünme etkisi CEB-FIP (1990) şartnamesinde sünme modeli olarak adlandırılan bir yaklaşımla hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda,  $t_0$  anında sabit bir gerilme için,

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t, t_0) \quad (1.28)$$

ifadesi dikkate alınmaktadır. Burada,  $\sigma_c(t_0)$   $t_0$  anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilmeyi,  $\phi(t, t_0)$  ise sünme katsayısını göstermektedir. Bu katsayı,

$$\phi(t, t_0) = \beta_c(t - t_0) \phi_0 \quad (1.29)$$

ifadesi ile hesap edilmektedir. Burada,  $\beta_c$  yüklemeden sonra devam eden sünmeyi,  $t$  betonun gününü,  $t_0$  ise yükleme anındaki betonun yaşını göstermektedir. Sünme katsayısı,

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (1.30a)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)}{0.46 \left( \frac{h}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (1.30b)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}}} \quad (1.30c)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + \left( \frac{t_0}{t_1} \right)^{0.2}} \quad (1.30d)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki bütün parametreler yukarıda açıklanmaktadır. Zamana bağlı olarak devam eden sünme,

$$\beta_c(t-t_o) = \left[ \frac{(t-t_o)/t_1}{\beta_H + (t-t_o)/t_1} \right] \quad (1.31a)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_o} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_o} + 250 \leq 1500 \quad (1.31b)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $t_1=1$  gün;  $RH_o=100$  ve  $h_o=100\text{mm}$ 'dir.

### 1.8.5. Çeliğin Relaksasyonu (Gevşemesi)

CEB-FIP (1990) şartnamesine göre, öngerilemeli çeliğin gevşemesi 3 gruba ayrılmaktadır. Birinci grup, tel ve halat grupları için normal gevşeme; ikinci grup, tel ve halat grupları için gelişen ve devam eden gevşeme; son grup ise demir çubuklar ve donatılar için gevşemeyi göstermektedir.

30 yıla kadarki gevşeme tahmini,

$$\rho_t = \rho_{1000} \left( \frac{t}{1000} \right)^k \quad (1.32)$$

bağıntısı ile hesap edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada,  $\rho_t$  t saat sonraki relaksasyonu,  $\rho_{1000}$  ise 1000 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir.  $k \approx \log(\rho_{1000}/\rho_{100})$  yaklaşımında k 1. grup için 0.12, ikinci grup için 0.19 olarak dikkate alınmakta,  $\rho_{100}$  ise 100 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir. Normalde, relaksasyonun uzun süreli değerleri için uzun süreli testler yapılmaktadır. 50 yıl üzeri relaksasyon değerleri için 1000 saatlik relaksasyonun 3 katı dikkate alınmaktadır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapısal davranışının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla köprünün modal, statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca statik analizlerde, köprünün yapım aşamaların ve malzemede zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda yapısal davranışta meydana gelen değişiklikler incelenmiştir.

### 2.2. Osmangazi Asma Köprüsü

Osmangazi Asma Köprüsü İzmit Körfezi üzerinde inşa edilmiştir. Köprü 2682 m toplam uzunluğa ve 1550 m ana açıklığa sahiptir. Bu yönüyle dünyanın dördüncü büyük asma köprüsüdür. Köprü İstanbul'un 50 km doğusundadır. Türkiye'nin en büyük şehri olan İstanbul ile üçüncü büyük şehri İzmir'i birbirine bağlamaktadır. Bu sayede İzmit Körfezi'nin geçişi 1 saat 20 dakikadan 6 dakikaya indirilmiştir (Şekil 2.1).

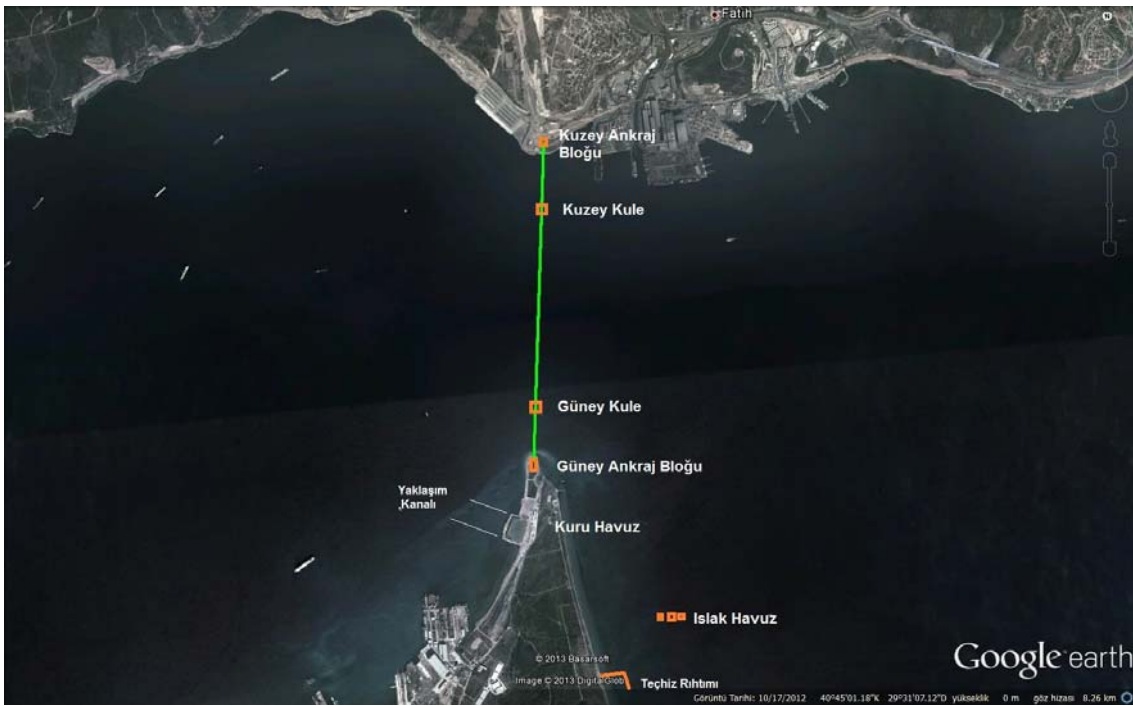


Şekil 2.1. Köprü inşasıyla birlikte kısalmış olan geçiş güzergahı (URL-20, 2019).

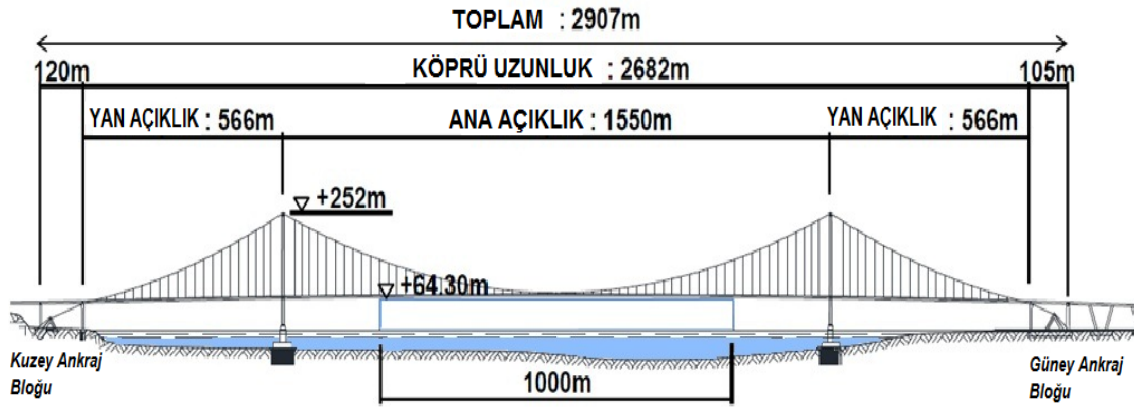
### 2.3. Osmangazi Asma Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri ve Yapım Aşamaları

Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapımına Ocak 2013'te başlanmış ve köprü 1 Temmuz 2016'da sadece 3,5 yıl içerisinde inşası tamamlanmıştır. Genel ve plan görünümü Şekil 2.2'de verilen köprü'nün; ana açıklığı 1550 m, kenar açıklıkları 566 m olup toplam uzunluğu 2862 m'dir.

Köprü inşasında 83.000 tondan fazla çelik kullanılmış ve toplamda 200.000 m<sup>3</sup> beton dökülmüştür.



(a)



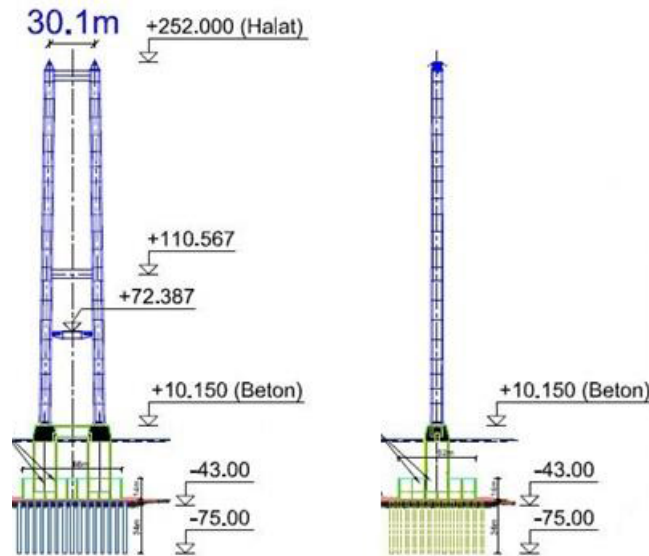
(b)

Şekil 2.2. Köprü'nün genel (a) ve plan (b) görünümüleri (URL-21, 2019).

### 2.3.1. Kuleler

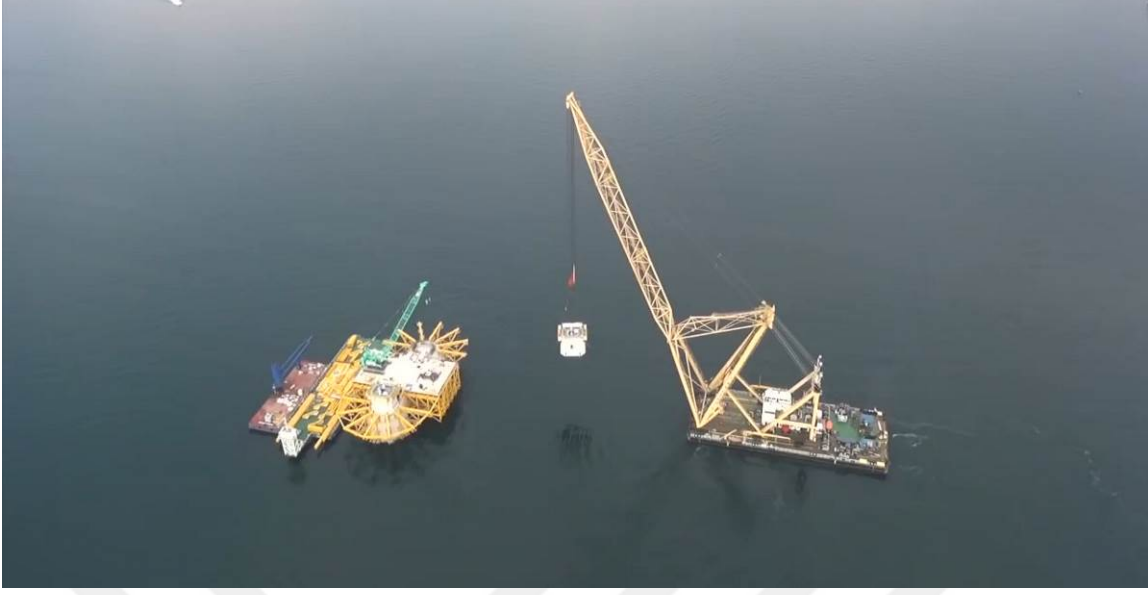
Çelik kuleler düşük ağırlık, yüksek esneklik ve hızlı inşa prensibiyle yapılmıştır. Kulelerin yüksekliği deniz seviyesinden 252 metredir. Prefabrik elemanlarla inşa edilen her kule 22 bloktan oluşmaktadır. Bloklar 8 m genişliğinde, 8 m uzunluğunda ve 8-13 m yüksekliğinde olup her bir blok ağırlığı 185 tondur. Toplam kule ağırlığı ise 17767 ton/köprü'dür. Kullanılan çelik sınıfları S460 ve S620'dir (URL-22, 2019). Şekil 2.3'te kulenin ön ve yan görünüşleri verilmektedir.

Çelik kule montajı, kuzeydoğu kule ayağının taban bölümünden montajı ile başlamıştır. Bu bölüm 8 m yükseklikte ve 340 ton ağırlığındadır. 1600 ton kapasiteli yüzer vinç ile taşınarak monte edilmiştir. İkinci kule ayağı parçası, yüzer vinç tarafından taşınmış ve taban segmenti üzerine yerleştirilmiştir. Aynı şekilde üç numaradan 11 numaraya kadar, tipik olarak 13 metre yüksekliğinde ve 260 ton ağırlığa sahip kule ayak bölümleri yüzer vinç kullanılarak taşınmış ve yerine yerleştirilmiştir. Alt kiriş yüzer vinç tarafından dikilmiştir. Daha sonra 46 ton kapasiteli kendiliğinden tırmanan vinç kuleye monte edilmiştir. Tipik olarak 9 m yüksekliğinde ve 140 ton ağırlığında 13-21 numaralı kule segmentleri kendiliğinden tırmanan vinç ile yerleştirilmiştir. 22 numaralı son segment ağırlığından dolayı parça parça monte edilmiştir. Bu segment kule eyerini destekler ve yapısal olarak çok daha karmaşıktır (URL-23, 2019). Osmangazi Köprüsü'nün kule yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.4'te verilmektedir.



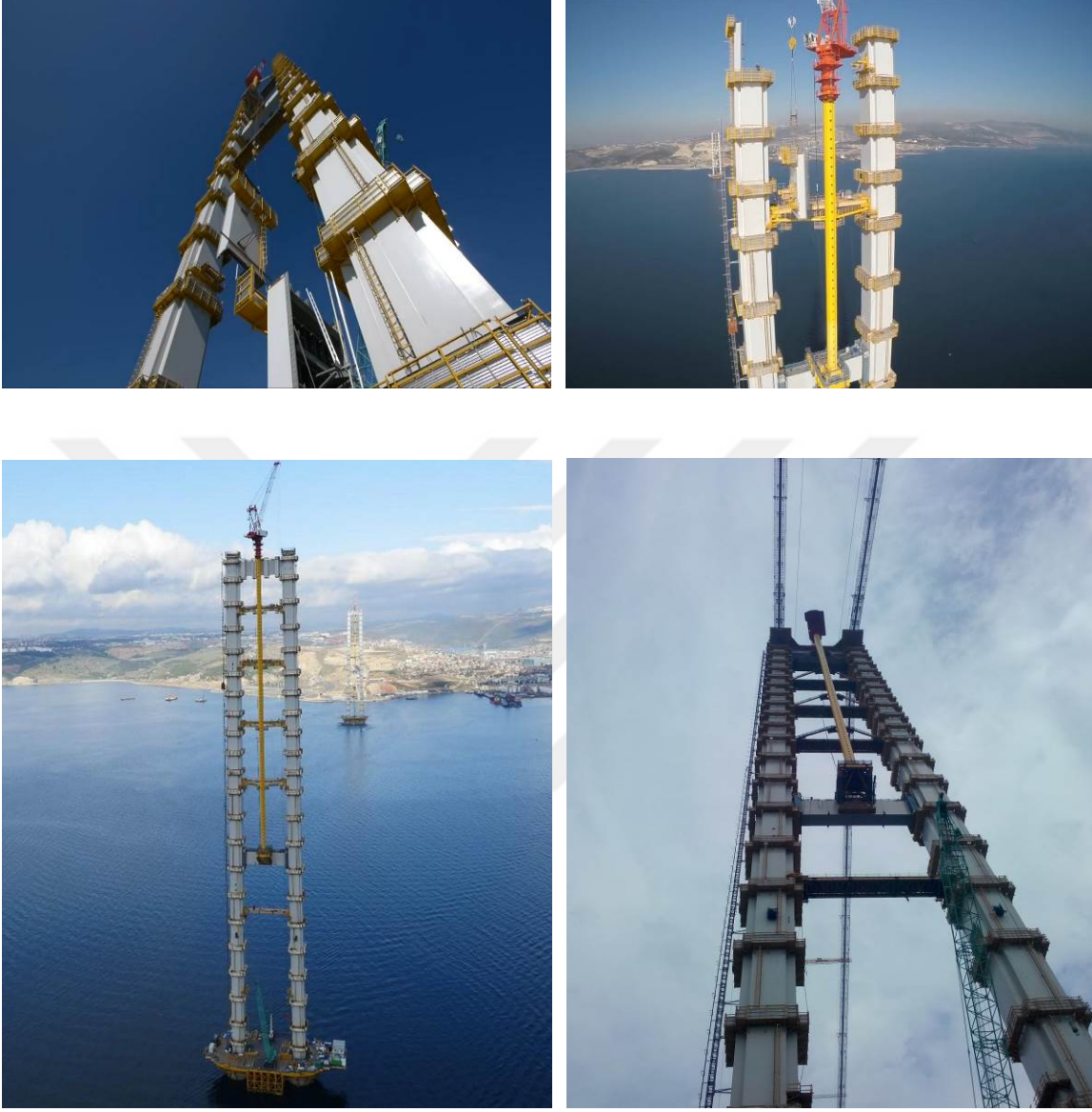
Şekil 2.3. Kule ön ve yan görünüşleri (URL-21, 2019)





Şekil 2.4. Osmangazi Köprüsü'nün kule yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-24, 2019).

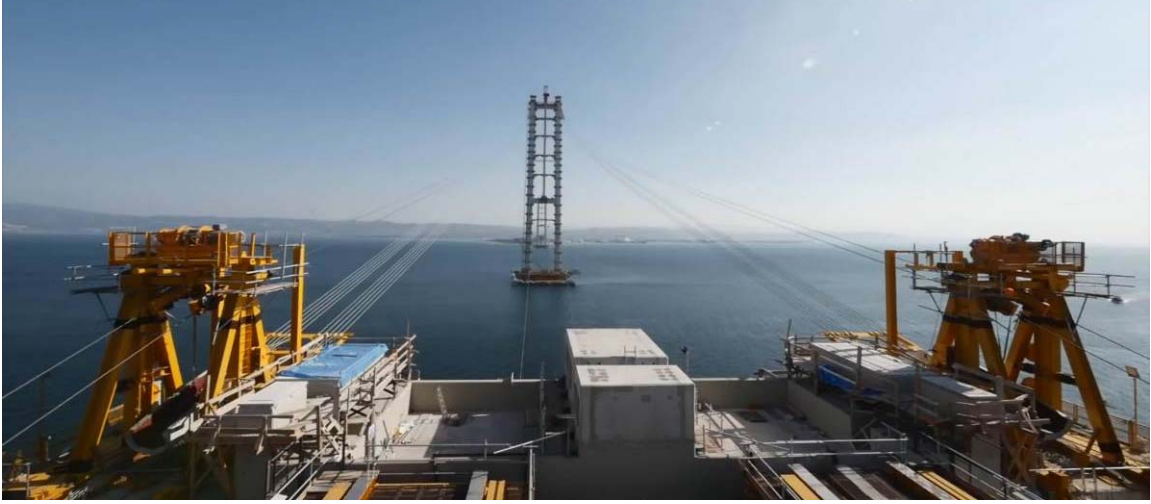
Şekil 2.4'ün devamı



### 2.3.2. Ana Kablolar

Ana kablolar paralel bağlı çelik büküm sistemden oluşmaktadır. Köprünün ana kablo; 3 km uzunluğunda, 18750 ton ağırlığında, 1.770 MPa dayanıma sahiptir. Kablo 127 adet 5.91 mm çapında tellerden oluşmaktadır. Ana kablo çapı 781 mm'dir (URL-22, 2019). Osmangazi Köprüsü'nün ana kablo yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.5'te verilmektedir.





Şekil 2.5. Osmangazi Köprüsü'nün ana kablo yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-24, 2019).



Şekil 2.5'in devamı



### 2.3.3. Tabliye

Tabliye 113 bloktan oluşmaktadır. Blok boyutları 36 m genişliğinde, 25 m uzunluğunda ve 4.75 m yüksekliğindedir. Tabliye döşemesi 14 mm ve 60 mm yüzey kaplamasından oluşmaktadır. Her segmentin ağırlığı 302 tondur. Toplam tabliye ağırlığı ise 33506 ton/köprü'dür. Tabliyede kullanılan çelik sınıfları S355, S420, ve S460'tır. Tabliyenin muayenesi ve bakımı için tabliye kenarlarında yollar mevcuttur (URL-22, 2019).

Asma tabliyenin montajına 1600 ton kapasiteli yüzer vinç kullanılarak başlanmıştır. Daha sonra 350 ton kapasiteli kaldırma kızakları ile devam edilmiştir. Tabliye tipik olarak 25 m aralıklarla yerleştirilen askı halatları ile desteklenmiştir. Bu yolla 25 m uzunluğunda ve 300 ton ağırlığında 113 parça monte edilmiştir. Fakat zamandan tasarruf etmek için parçaların 52 tanesi kaldırılmadan önce iki kat uzunluğa sahip bölmeler halinde eşleştirilmiş ve bunun sonucunda da ana açıklıktaki kaldırma sayısı 87'ye düşürülmüştür. Böylece kaldırmadan sonraki parça kaynağı sürecinde zaman tasarrufu sağlanmıştır (URL-23, 2019). Osmangazi Köprüsü'nün tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.6. Osmangazi Köprüsü'nün tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-24, 2019).

Şekil 2.6'nın devamı

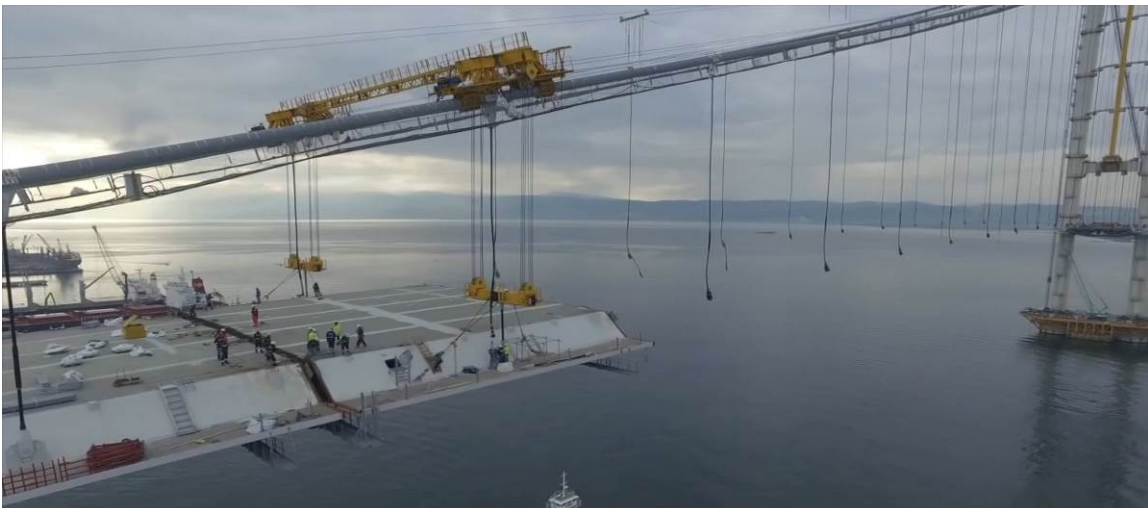




Şekil 2.6'nın devamı



Şekil 2.6'nın devamı





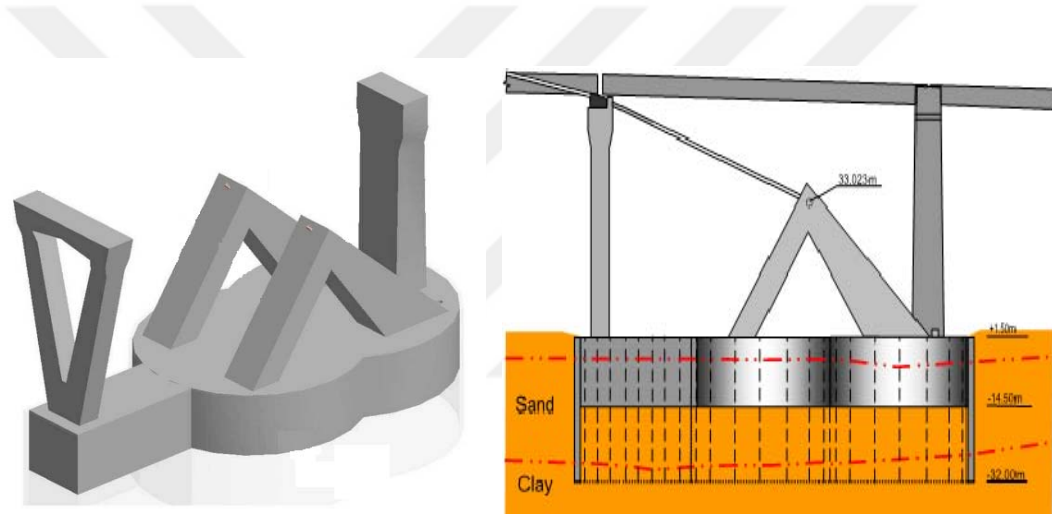
Şekil 2.6'nın devamı



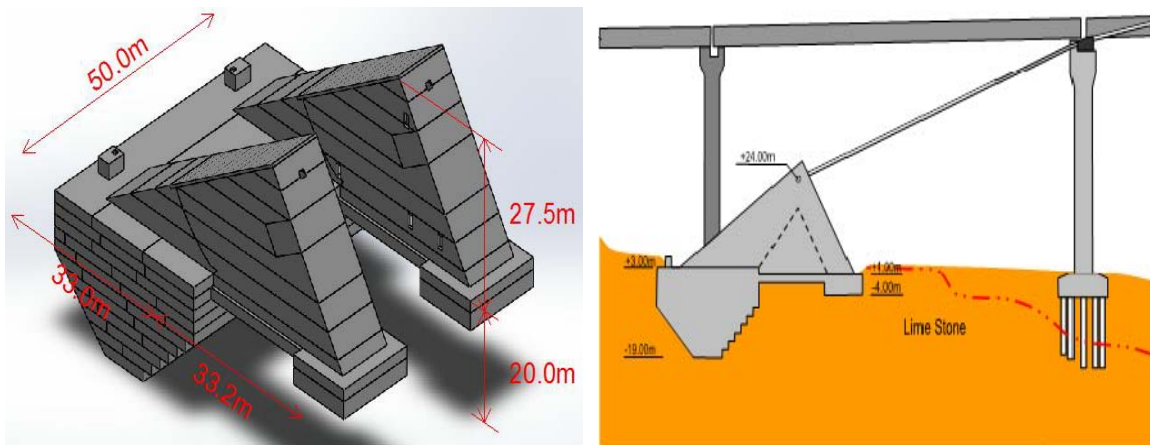
### 2.3.4. Ankraj Blokları

Güney ankraj bloğu; kütle beton, içi boş üçgenel elemanlar, diyafram duvarı ve eklemli ayaktan oluşmaktadır (Şekil 2.7). Temel çukuru 124x58x16 m'dir. Temele kazı stabilitesi sağlamak amacıyla gitar biçimi verilmiştir. Güney ankarajında 85330 m<sup>3</sup> C40 beton ve 10880 ton donatı kullanılmıştır (URL-22, 2019).

Kuzey ankraj bloğu; blok dolomitik kireçtaşı üzerine kurulmuştur (Şekil 2.8). Temel çukuru 50x66x22m'dir. Kuzey ankrajında 36150 m<sup>3</sup> C40 beton ve 4705 ton donatı kullanılmıştır (URL-22, 2019). Osmangazi Köprüsü'nün ankraj bloklarının yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.9'da verilmektedir.

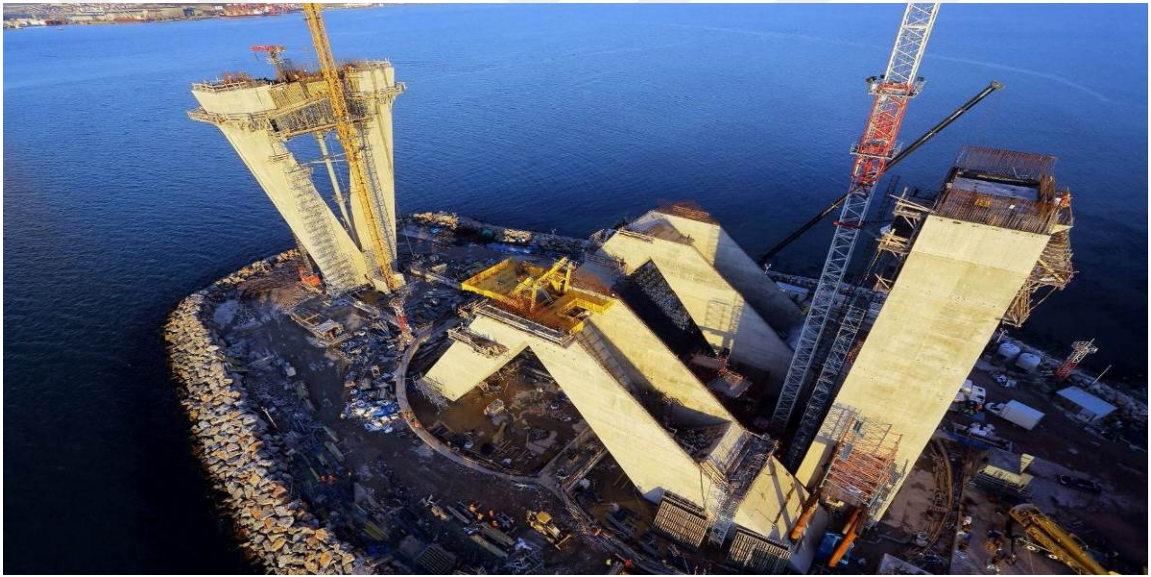


Şekil 2.7. Köprü'nün güney ankraj bloğu (URL-21, 2019).



Şekil 2.8. Köprü'nün kuzey ankraj bloğu (URL-21, 2019).





Şekil 2.9. Osmangazi Köprüsü'nün ankraj bloklarının yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-24, 2019).

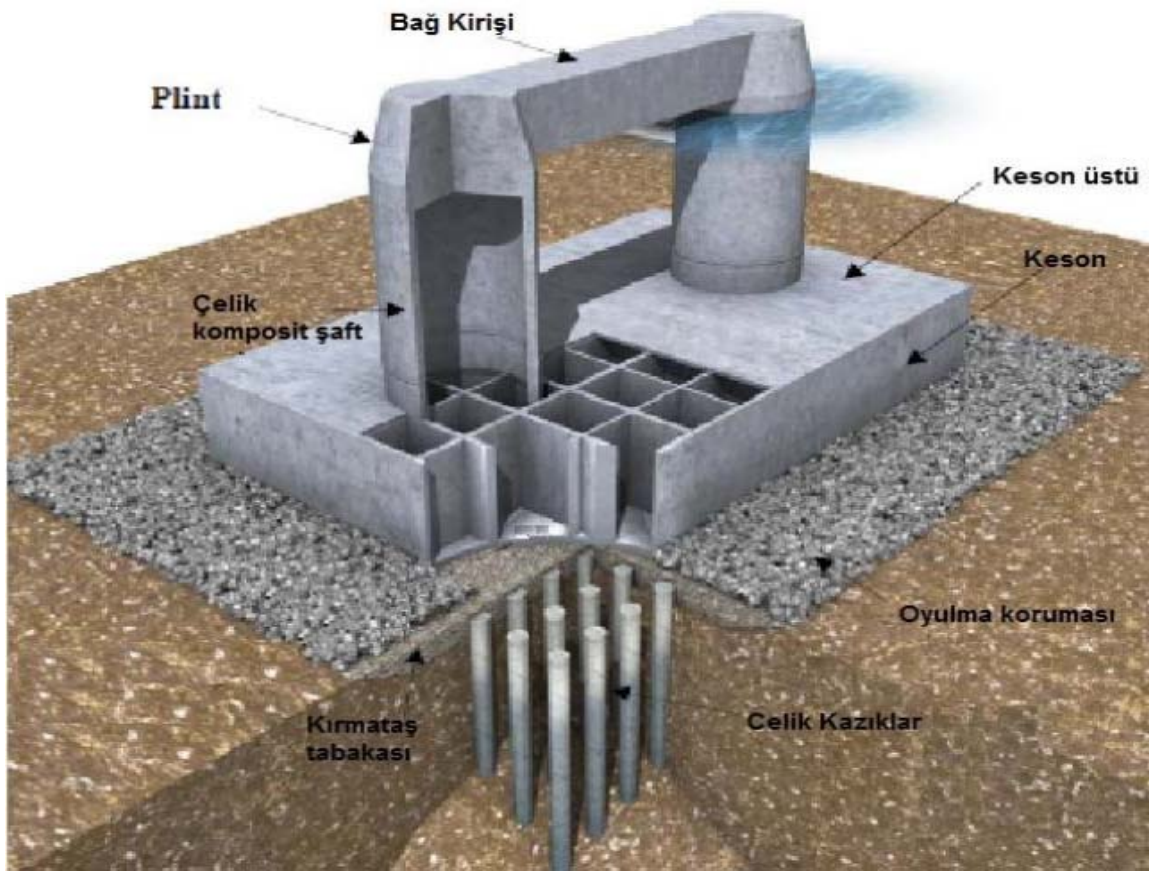


Şekil 2.9'un devamı



### 2.3.5. Kule Temelleri

Kuzey ve güney kulelerin temelleri, deprem sırasında keson temelin kaymasına izin verecek şekilde deniz yatağına yerleştirilmiştir (Şekil 2.10). Keson temelin boyutları 54x68x15 m'dir. Zemin 200 adet çelik (S355) temel kazıklarıyla güçlendirilmiştir. Şaftlar ise gemi çarpmasına karşı yüksek dayanıklılığa sahip çelik-beton malzemeden kompozit üretilmiştir (URL-22, 2019). Osmangazi Köprüsü'nün kule temellerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.10. Köprü'nün kule temellerine ait şematik resim (URL-21, 2019)





Şekil 2.11. Osmangazi Köprüsü'nün kule temellerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-24, 2019).

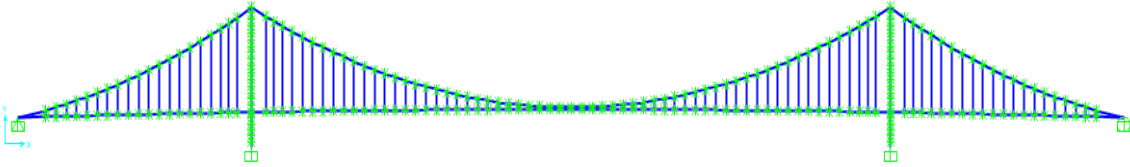
Şekil 2.11'in devamı



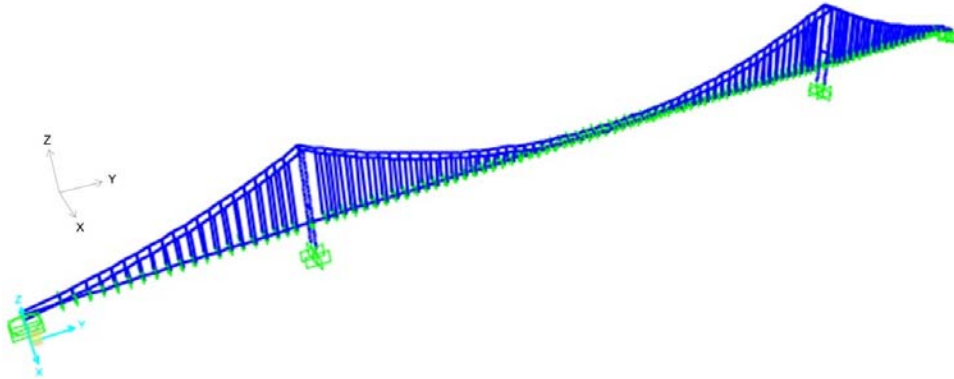
#### 2.4. Osmangazi Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Osmangazi Köprüsü'nün yapısal davranışını belirlemek amacıyla köprü'nün iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 programında (SAP2000 V17) oluşturulmuştur.

Osmangazi Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli; 257 düğüm noktası, 252 kiriş eleman ve 101 kafes elemandan oluşmaktadır. 252 kiriş elemanın; 104'ü tabliyeyi, 104'ü kabloları ve 44'ü ise kuleleri temsil etmektedir (Şekil 2.12). Üç boyutlu sonlu eleman modeli ise 613 düğüm noktası, 412 kiriş eleman ve 202 kafes elemandan oluşmaktadır. 412 kiriş elemanın; 104'ü tabliyeyi, 208'i kabloları, 100'ü kuleleri ve 4'ü ise enleme kirişleri (portal kiriş) temsil etmektedir (Şekil 2.13). Askı kabloları kafes eleman olarak tanımlanmaktadır. Her bir kule 24 elemandan oluşmaktadır. Kule tabliye bağlantısı X yönünde birlikte hareket edecek, diğer yöndeki ötelenmeler ve dönmeler ise serbest olacak şekilde düzenlenmiştir. Tabliyenin mesnetleri bir tarafta X ve Z doğrultusundaki ötelenmeleri tutulu, diğer tarafta her üç doğrultudaki ötelenmeler tutulu olarak modellenmiştir. Oluşturulan modelde elemanların kendi ağırlıkları program tarafından hesaplanmıştır. Osmangazi Köprüsü'nün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modellerinde kullanılan kesit ve malzeme özellikleri sırasıyla Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.12. Osmangazi Asma Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 2.13. Osmangazi Asma Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli



Tablo 2.1. Kesit özellikleri (Karşlıoğlu, 2016)

Eleman	Alan (m <sup>2</sup> )	I <sub>3-3</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>2-2</sub> (m <sup>4</sup> )	J (m <sup>4</sup> )
Tabliye	1.662	5.137	170.6	12.40
Kule	1.211	10.13	8.665	10.31
Enleme kirişi	0.7404	3.338	1.078	2.015
Ana Kablo	0.383	0.0117	0.0117	0.0233
Kenar Kablo	0.39	0.0121	0.0121	0,0242
Askı Halatı	8.12E-03	5.24E-06	5.24E-06	1.05E-05
Askı Halatı	5.12E-03	2.08E-06	2.08E-06	4.17E-06

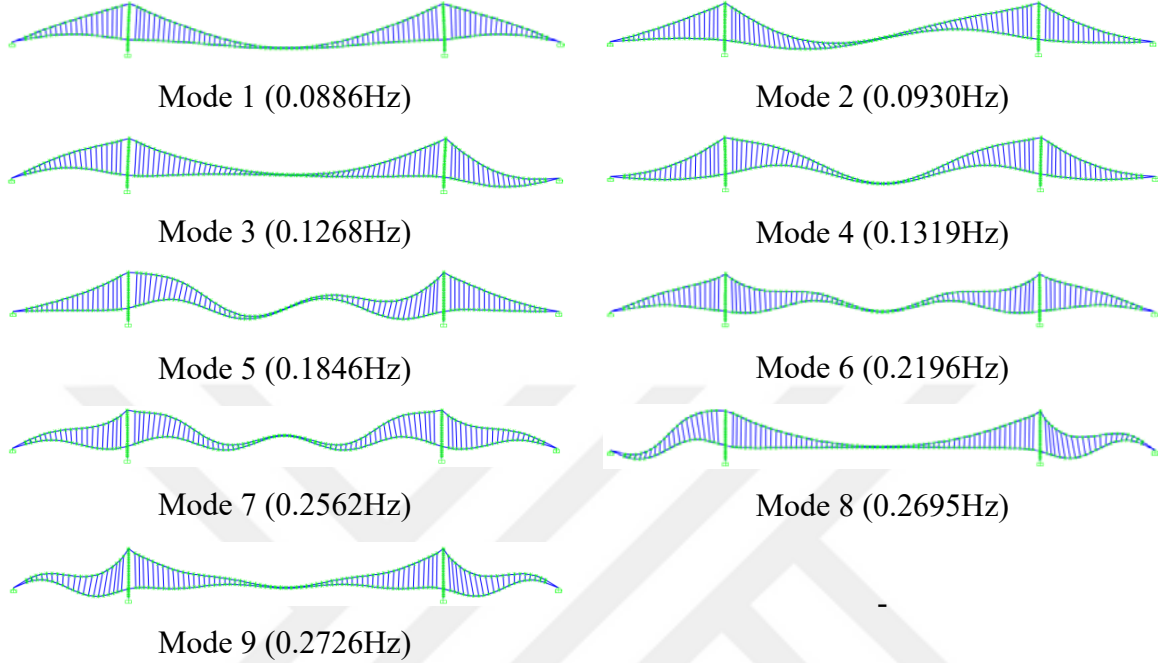
Tablo 2.2. Malzeme özellikleri

Eleman	E (kN/m <sup>2</sup> )	v (-)	ρ (kN/m <sup>3</sup> )
Tabliye	2.0500E8	0.30	72.23
Kule	2.0500E8	0.30	127.94
Enleme kirişi	2.0500E8	0.30	127.94
Ana Kablo	1.9300E8	0.30	83
Kenar Kablo	1.9300E8	0.30	83
Askı Halatı	1.4000E8	0.30	70
Askı Halatı	1.4000E8	0.30	70

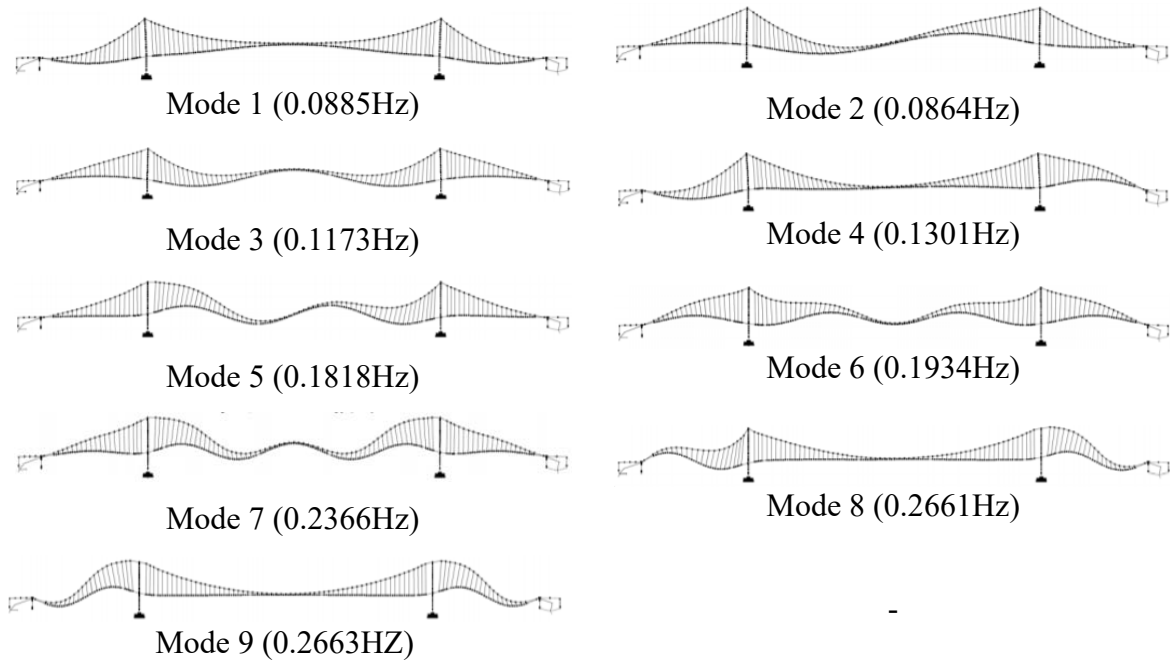
## 2.5. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Bu bölüm Osmangazi Köprüsü için oluşturulan sonlu eleman modelinin doğrulanmasını içermektedir. Köprünün iki boyutlu modeli üzerinden modal analiz gerçekleştirilerek elde edilen doğal frekans değerleri ve mod şekilleri literatürde sunulan değerler ile karşılaştırılmıştır. Argentini vd., (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Osmangazi Asma Köprüsü'nün ilk 9 moduna ait doğal frekans değerleri ve mod şekilleri analitik olarak sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında Osmangazi Asma Köprüsü'nün iki boyutlu modelinden elde edilen ilk 9 mod şekli ve doğal frekans değerleriyle, Argentini vd., (2014) tarafından elde edilen ilk 9 mod şekli ve doğal frekans değerleri sırasıyla Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te verilmektedir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 incelendiğinde, Osmangazi Asma Köprüsü için elde edilen doğal frekans değerleri ve mod şekilleri literatürde sunulanlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Osmangazi Asma Köprüsü için çalışma kapsamında oluşturulan iki boyutlu model daha kompleks modeller veya üç boyutlu modelin üretiminde

temel model olarak kullanılabilir. Buradan hareketle yukarıda sunulan köprünün üç boyutlu modeli (Şekil 2.13), literatüre göre doğrulanmış iki boyutlu modelden türetilmiştir.



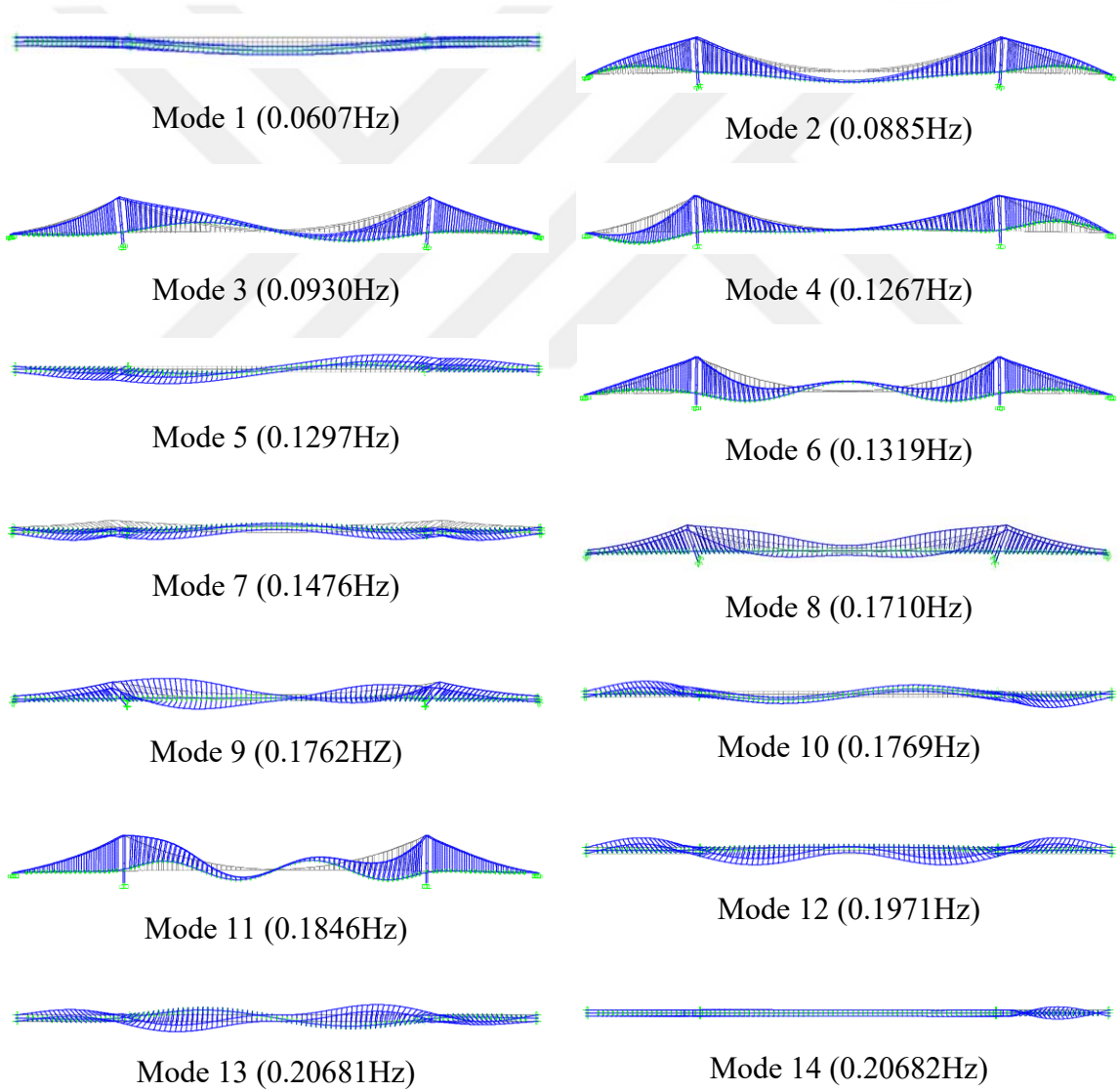
Şekil 2.14. Osmangazi Asma Köprüsü için çalışma kapsamında modellenen iki boyutlu sonlu eleman modelinden elde edilen ilk 9 mod şekli ve doğal frekans değerleri



Şekil 2.15. Argentini vd., (2014) tarafından elde edilen ilk 9 mod şekli ve doğal frekans değerleri

## 2.6. Modal ve Dinamik Davranışın Belirlenmesi

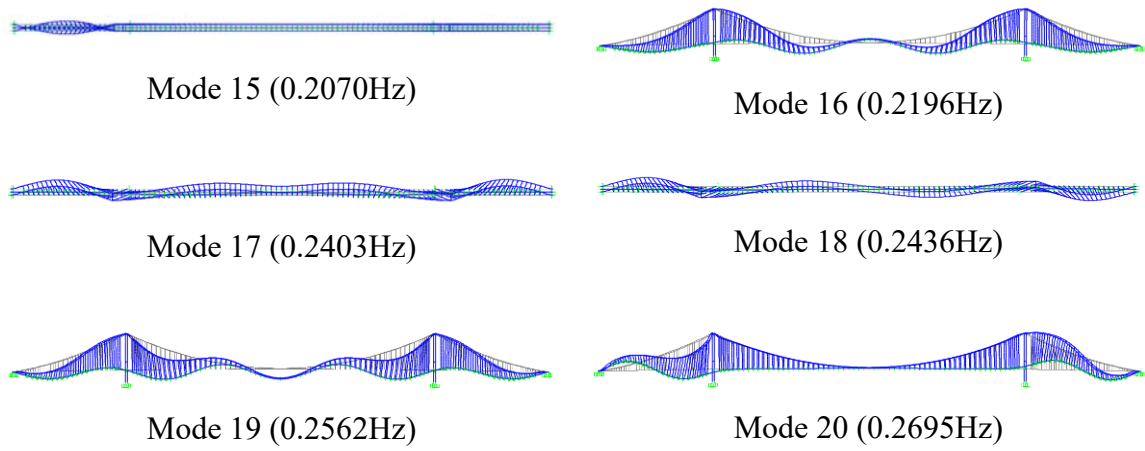
Bu bölümde Osmangazi Asma Köprüsü'nün modal ve dinamik davranışı sunulmaktadır. Bu amaçla köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Köprü'nün modal analizinden elde edilen ilk 20 mod şekli ve doğal frekans değerleri Şekil 2.16'da verilmektedir. Ayrıca ilk 20 moda ait frekans, periyot, mod şekli ve kütle katılım oranı değerleri Tablo 2.3'te verilmektedir. Köprü'nün modal ve dinamik analizlerinde 250 mod dikkate alınmıştır. Modal analizde; boyuna yönde kütle katılım oranı % 91, enine yönde % 95 ve düşey yönde % 72 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.16. Osmangazi Asma Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modelinin modal analizinden elde edilen ilk 20 mod şekli ve doğal frekans değerleri



Şekil 2.16'nın devamı

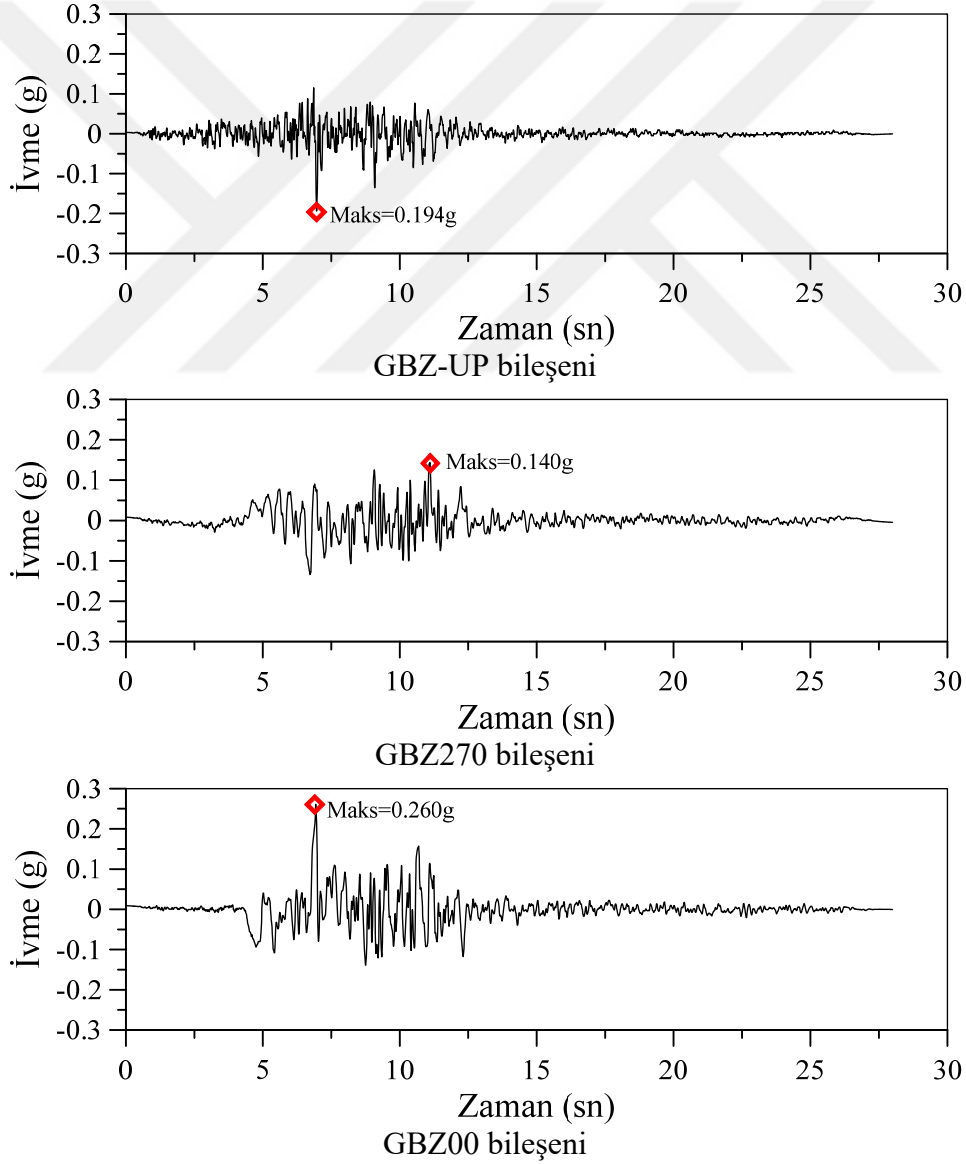


Tablo 2.3. Osmangazi Asma Köprüsü'nün periyot-doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve kütle katılım oranları

Mod	P (Sn)	F (Hz)	Mod Şekli	Kütle Katılım Oranları (%)		
				UX	UY	UZ
1	16.47	0.0607	Tabliye (Yanal-Simetrik)	0.40479	5.626E-14	1.104E-15
2	11.30	0.0885	Tabliye (Düşey-Simetrik)	1.553E-12	1.058E-05	0.01867
3	10.75	0.0930	Tabliye (Düşey-Antisimetrik)	2.09E-12	0.00501	9.125E-07
4	7.89	0.1267	Tabliye (Düşey-Antisimetrik)	1.146E-11	0.01233	3.983E-07
5	7.71	0.1297	Kule (Antisimetrik)	1.15E-07	1.078E-10	5.793E-11
6	7.58	0.1319	Tabliye (Düşey-Simetrik)	1.711E-12	5.99E-09	0.00097
7	6.78	0.1476	Kule (Simetrik)	0.23127	5.125E-11	2.258E-12
8	5.85	0.1710	Kablo (Simetrik)	1.469E-14	1.683E-10	1.359E-10
9	5.68	0.1762	Kablo (Antisimetrik)	1.184E-10	1.209E-11	2.8E-13
10	5.65	0.1769	Tabliye (Yanal-Antisimetrik)	3.443E-08	7.6E-10	1.263E-09
11	5.42	0.1846	Tabliye (Düşey-Simetrik)	1.565E-10	0.00317	1.98E-08
12	5.07	0.1971	Kablo (Simetrik)	0.0342	1.649E-09	2.081E-10
13	4.84	0.20681	Kablo (Antisimetrik)	2.327E-09	6.563E-09	3.329E-09
14	4.84	0.20682	Tabliye (Burulma)	8.432E-07	2.961E-09	1.998E-09
15	4.83	0.2070	Tabliye (Burulma)	2.518E-09	3.87E-09	4.455E-10
16	4.55	0.2196	Tabliye (Düşey-Simetrik)	2.791E-10	4.769E-05	0.24614
17	4.16	0.2403	Kule (Simetrik)	0.01944	1.889E-08	1.36E-09
18	4.11	0.2436	Kule (Antisimetrik)	1.047E-05	6.106E-09	1.089E-09
19	3.90	0.2562	Tabliye (Düşey-Simetrik)	1.933E-08	5.429E-05	0.23599
20	3.71	0.2695	Tabliye (Düşey-Antisimetrik)	3.942E-09	0.00026	7.383E-06

Osmangazi Asma Köprüsü'nün dinamik davranışının belirlenmesi için yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depreminden elde edilen ivme kayıtları kullanılmıştır (Şekil 2.17) (PEER, 2019). Deprem kaydı köprüye; boyuna, enine ve düşey yönde 0.005'lik zaman adımlarıyla uygulanmıştır. Geometrik olarak lineer olmama durumu (P-Delta) etkileri analizde dikkate alınmıştır. Dinamik analiz neticesinde; kuleler, tabliye, ana kablo ve askılarda meydana gelen yer değiştirme ve kesit tesirleri incelenmiştir.

Köprü'nün dinamik analizlerinde; boyuna yönde (Y eksen) Kocaeli Depreminin Gebze İstasyonundan elde edilen 270 bileşeni, enine yönde (X eksen) 00 bileşeni, düşey yönde ise (Z eksen) UP bileşeni kullanılmıştır.



Şekil 2.17. 1999 Kocaeli Depremi'nin Gebze İstasyonu'ndan alınan ivme kayıtları (PEER, 2019)

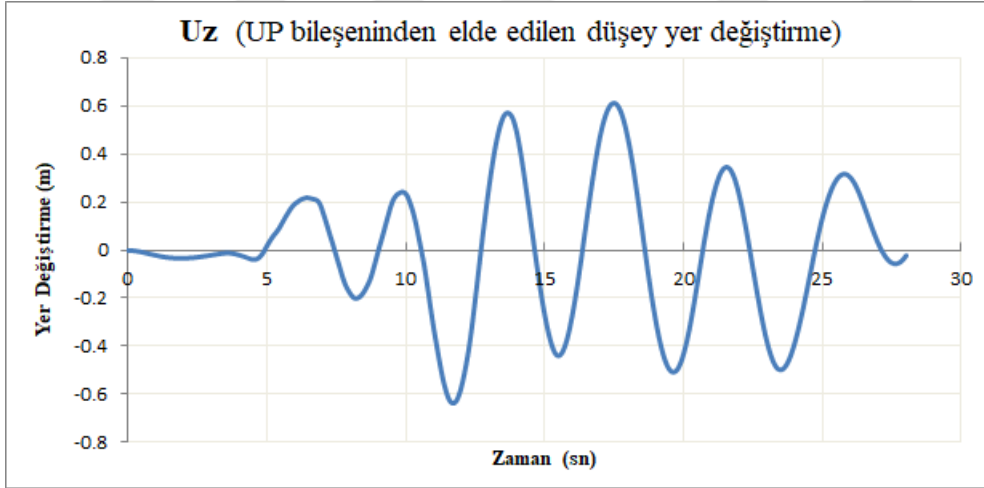
## 2.7. Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

### 2.7.1. Tabliye Davranışı

#### 2.7.1.1. Tabliye Yer Değiştirmeleri

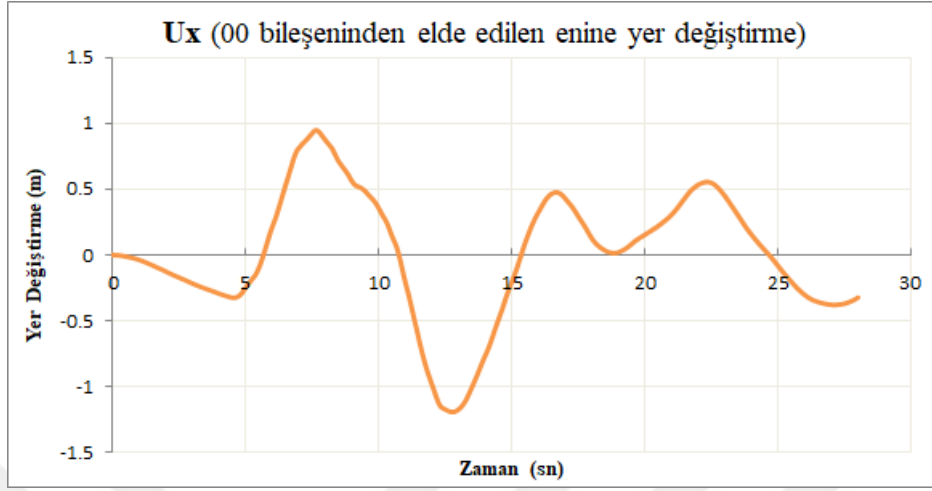
Dinamik analizlerden elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri incelendiğinde, yer değiştirmelerin tabliye orta noktasında maksimum olduğu görülmüştür. Bu nedenle dinamik analizlerde tabliye orta noktasına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum yer değiştirme değerleri; Uz 0.613 m, Ux 1.19 m ve Uy 0.10 m olarak elde edilmiştir. Uz tabliyenin düşey yer değiştirmesi, Ux tabliyenin enine yer değiştirmesi, Uy tabliyenin boyuna yer değiştirmesidir. Tabliye orta noktasına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.18’de verilmektedir.

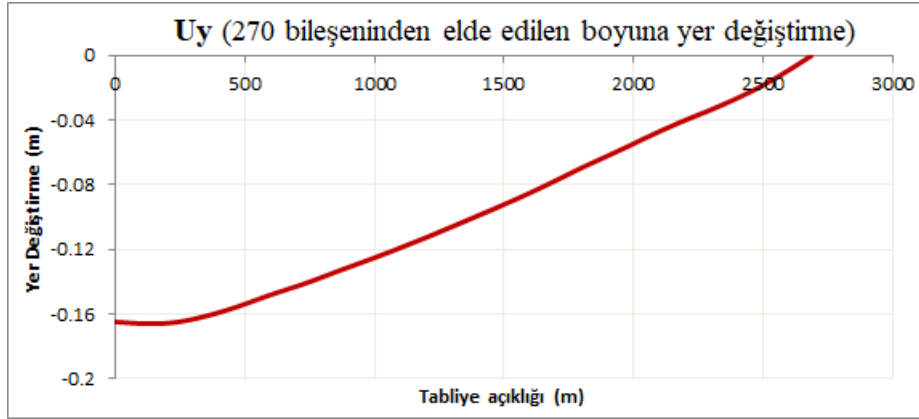
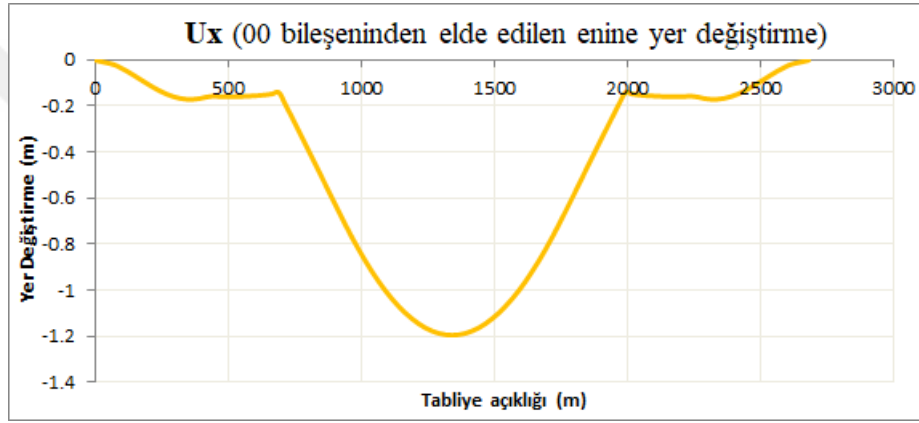
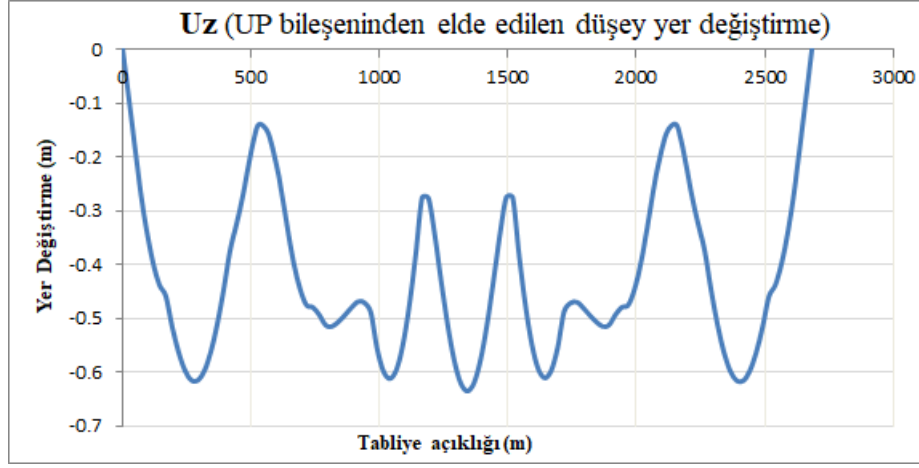
Dinamik analizler sonucunda maksimum yer değiştirme değerlerin tabliye boyunca değişimi ise Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.18. Tabliye orta noktasına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi

Şekil 2.18'in devamı



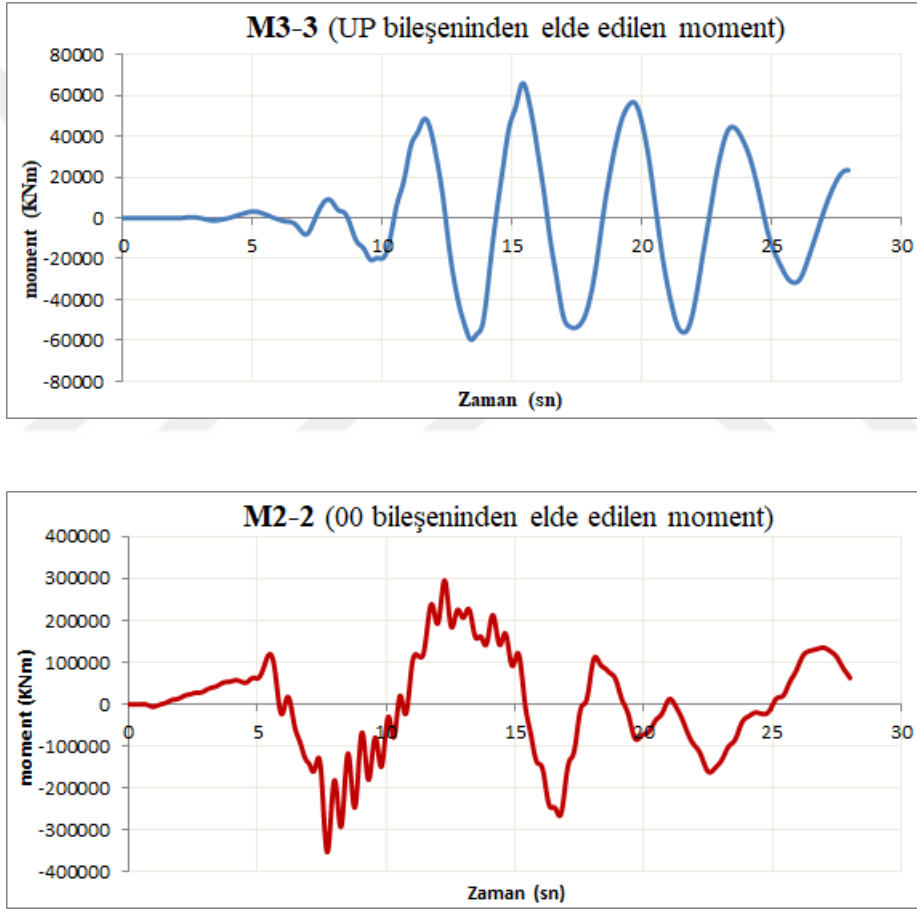


Şekil 2.19. Maksimum yer değiştirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi

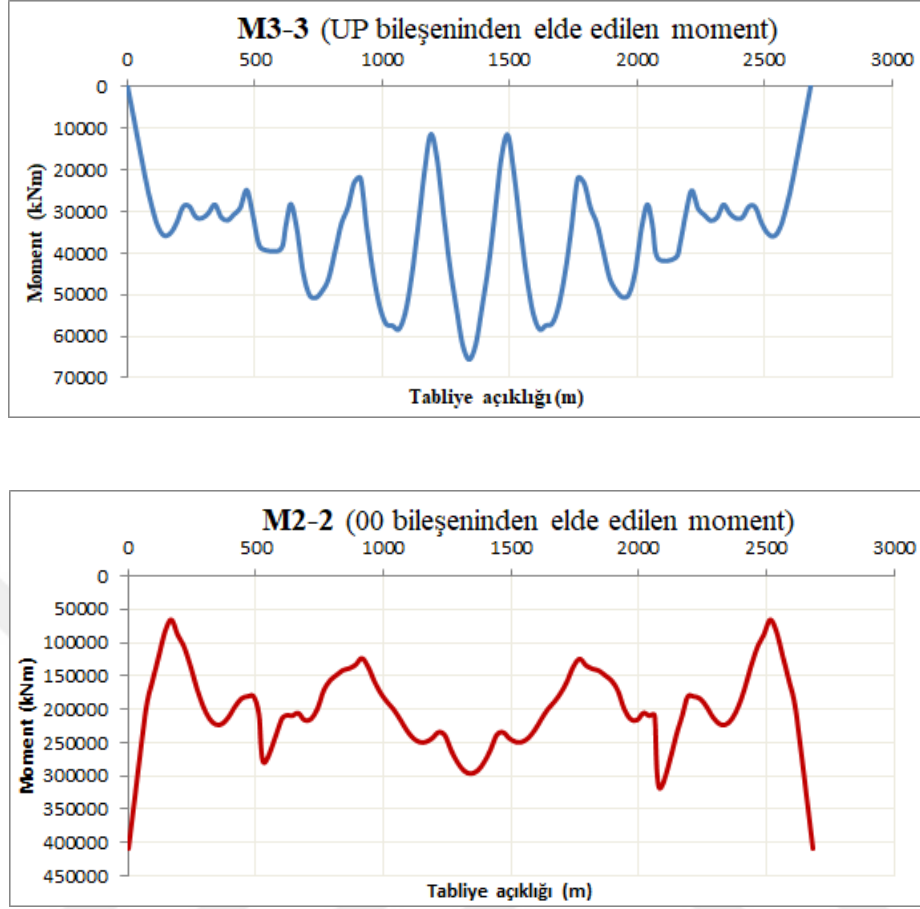
### 2.7.1.2. Tabliye Momentleri

Dinamik analizlerde tabliye orta noktasındaki elemana ait eğilme momentleri değerlerinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum eğilme momenti değerleri; M3-3 için 65679 kNm, M2-2 için 352915 kNm olarak elde edilmiştir. Tabliye orta noktasındaki elemana ait momentlerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.20’de verilmektedir.

Dinamik analizler sonucunda meydana gelen maksimum eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi ise Şekil 2.21’de ayrıca verilmiştir.



Şekil 2.20. Tabliye orta noktasındaki elemana ait eğilme momenti değerlerinin zamana bağlı değişimi

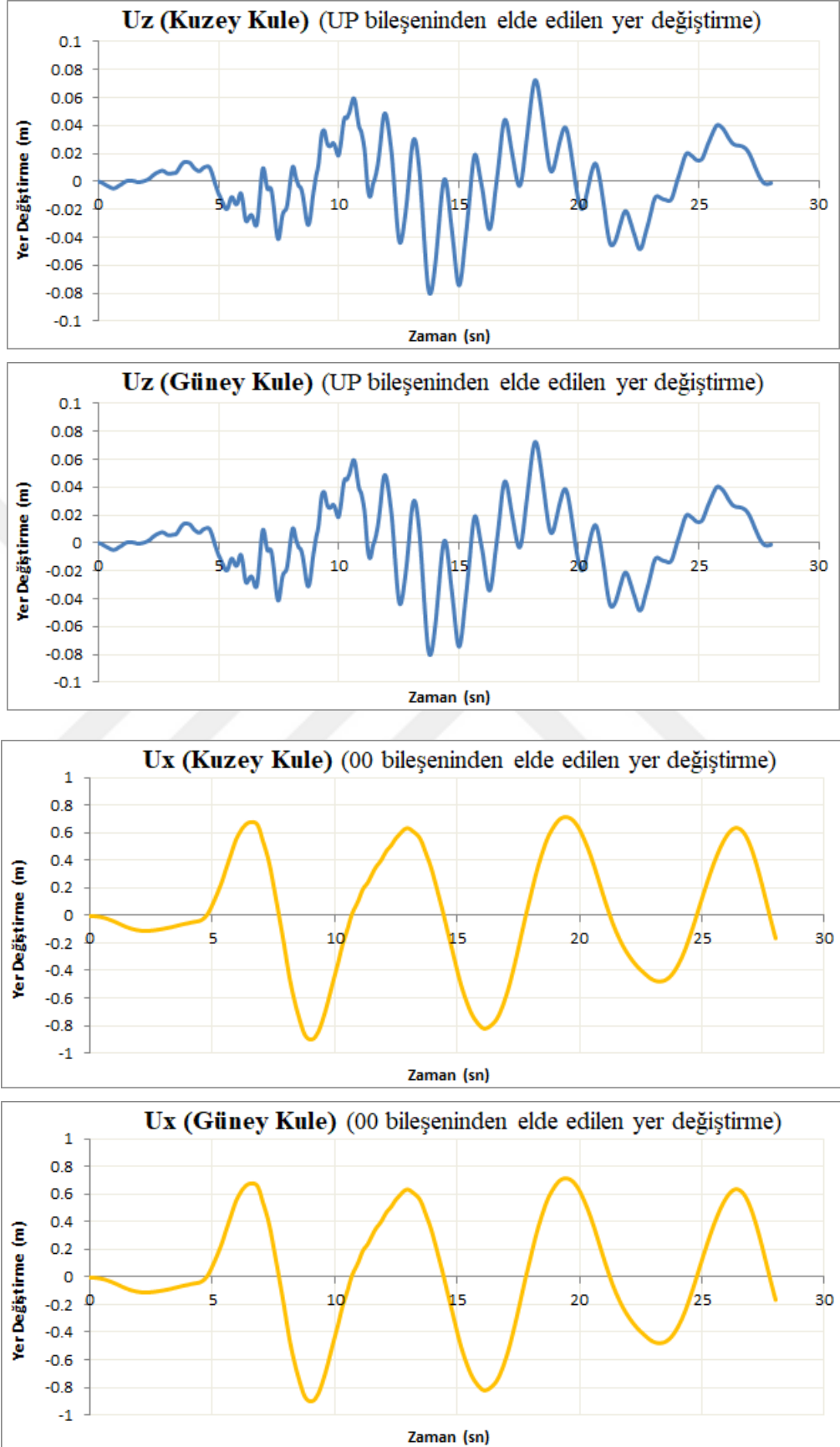


Şekil 2.21. Maksimum eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi

## 2.7.2. Kule Davranışı

### 2.7.2.1. Kule Yer Değiştirmeleri

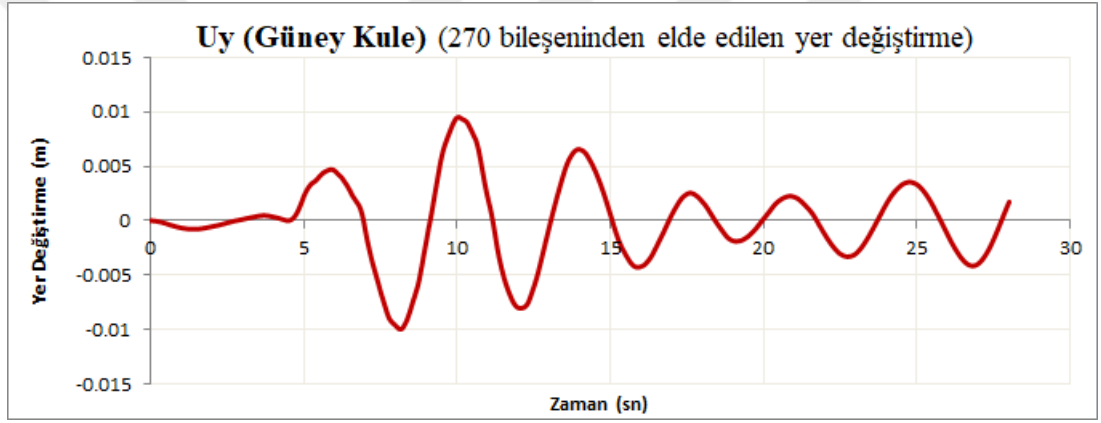
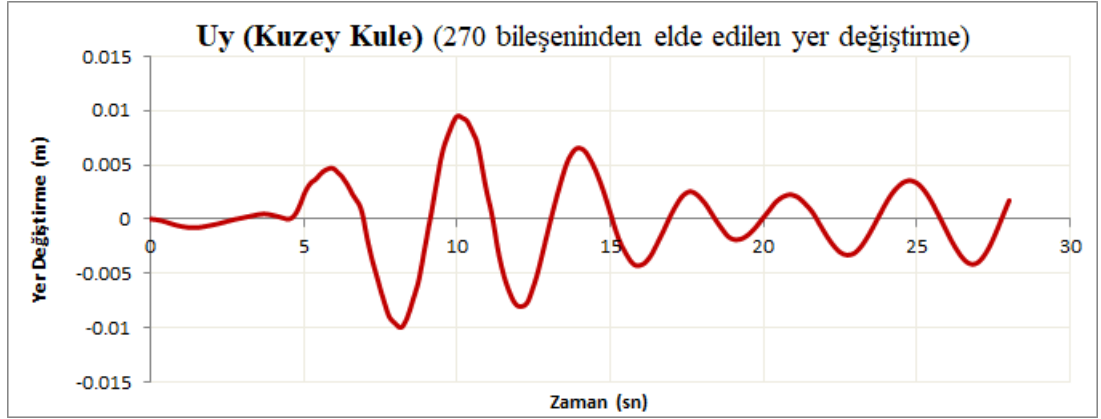
Kule tepe noktasında meydana gelen yer değiştirme değerleri aşağıda verilmiştir. Kuzey kulesinin dinamik analizler sonucunda tepe noktasında elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla Uz için 0.08 m, Ux için 0.90 m ve Uy için 0.01 m olarak elde edilmiştir. Güney kulesinde bu değerler sırasıyla Uz için 0.08 m, Ux için 0.89 m ve Uy için 0.01 m olarak elde edilmiştir. Uz kulenin düşey yer değiştirmesi, Ux kulenin enine yer değiştirmesi, Uy kulenin boyuna yer değiştirmesidir. Kuzey ve güney kulelerin tepe noktalarına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.22’de verilmektedir.



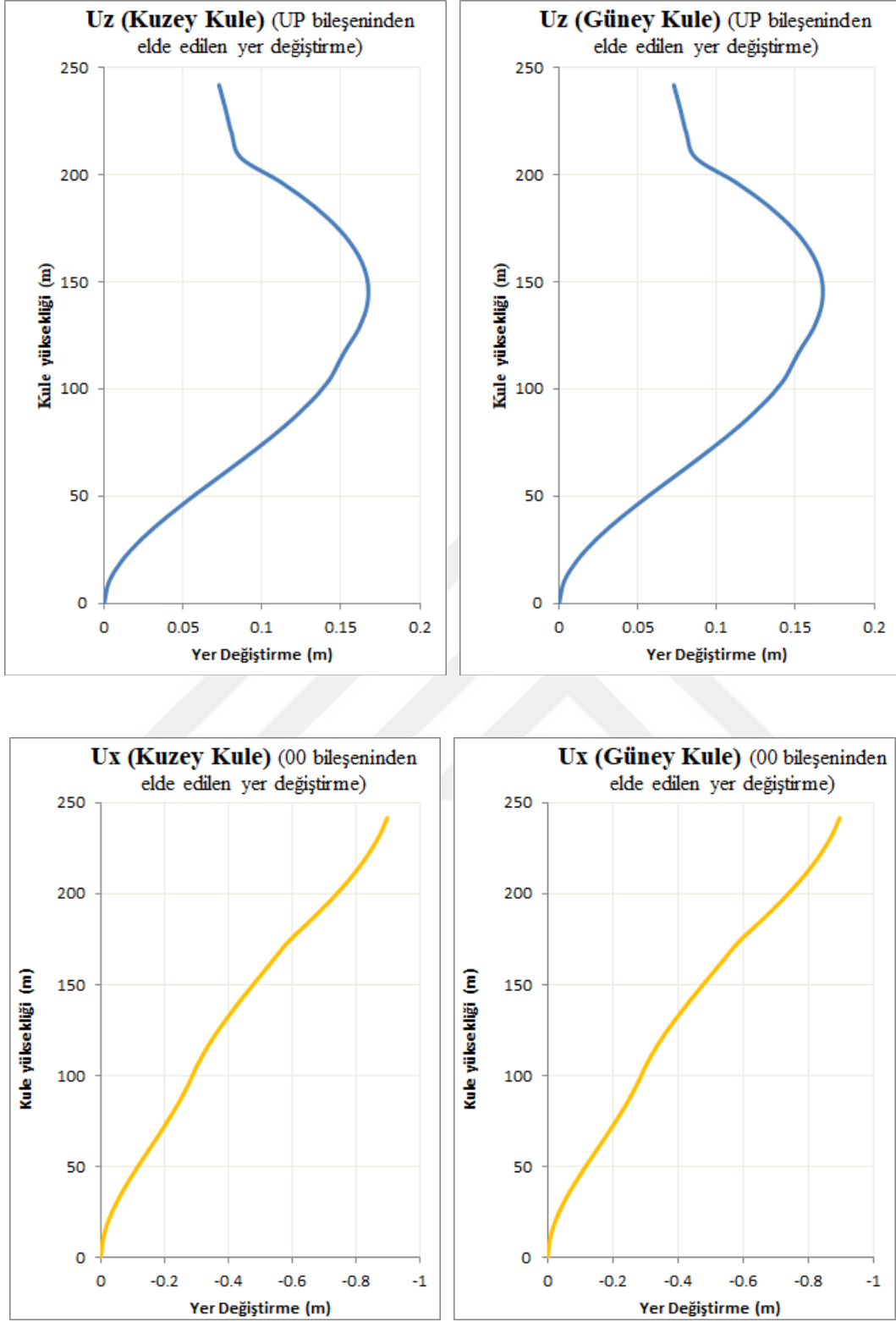
Şekil 2.22. Kuzey ve güney kulelerinin tepe noktalarına ait yer değiştirmelerin zamana bağlı değişimi



Şekil 2.22'nin devamı

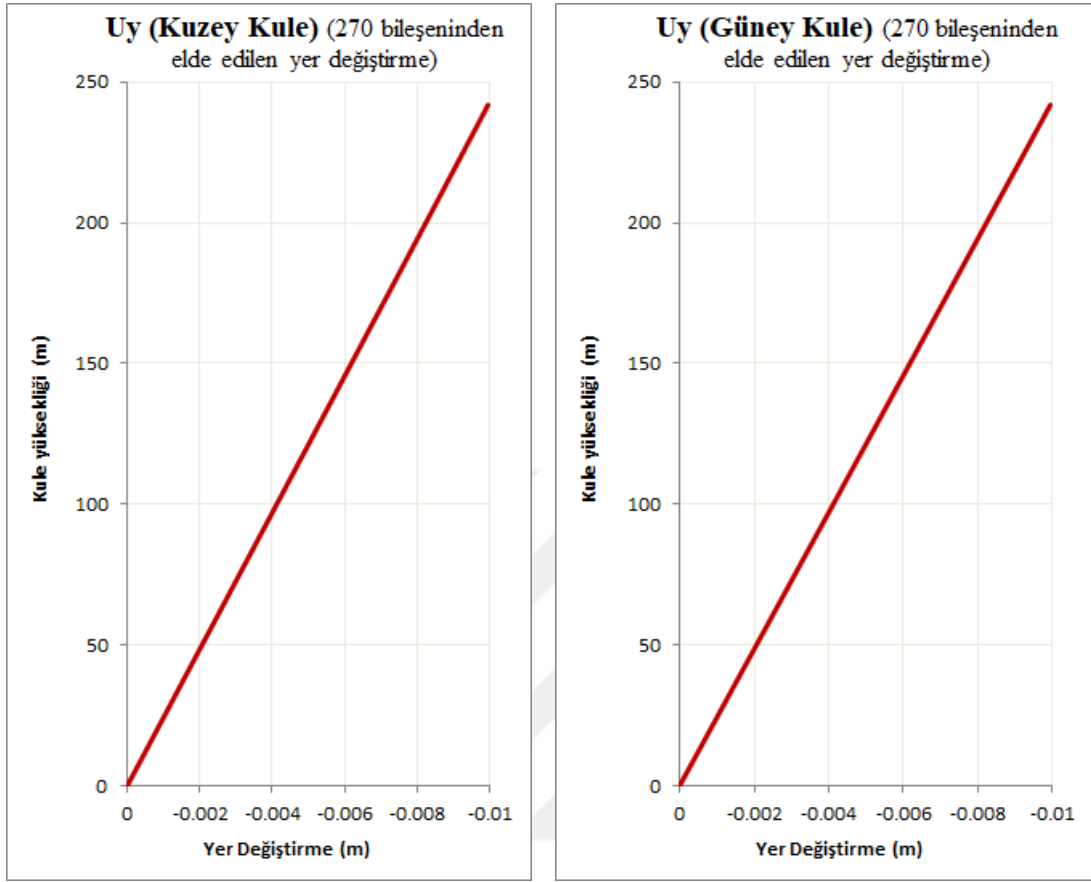


Ayrıca dinamik analizlerde meydana gelen maksimum yer değiştirme değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.23'de verilmiştir.



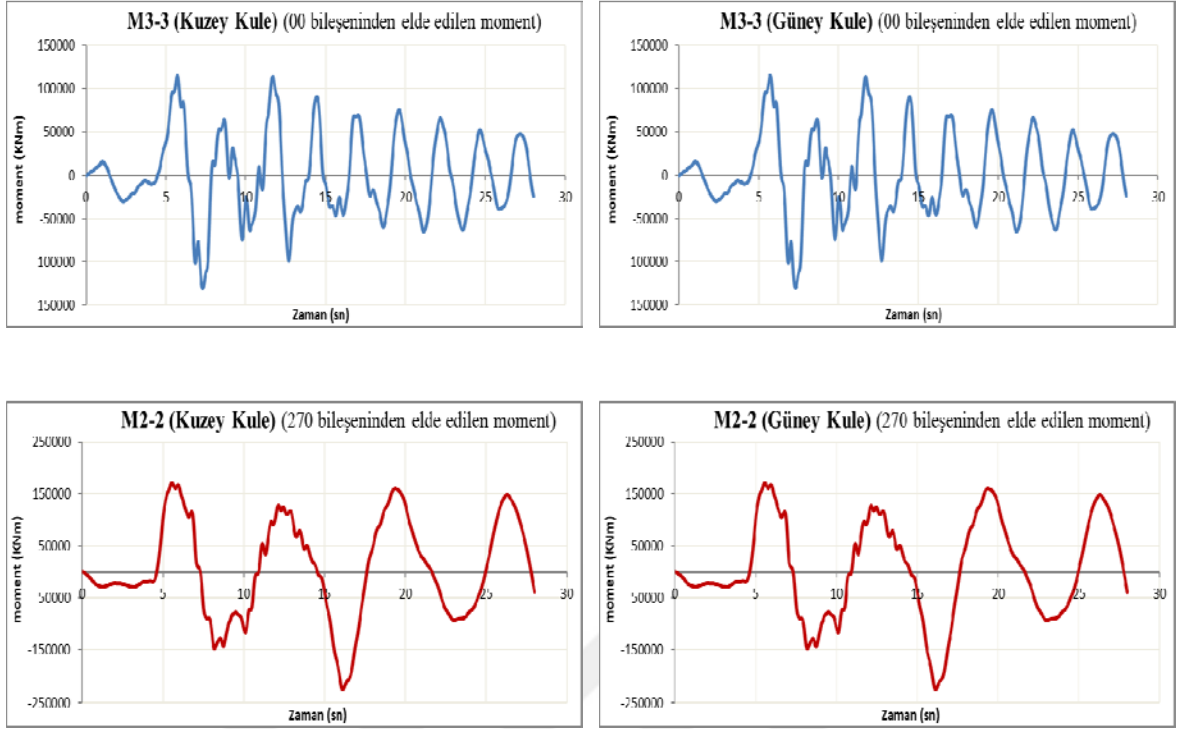
Şekil 2.23. Maksimum yer değiştirme değerlerinin kuzey ve güney kule yükseklikleri boyunca değişimi

Şekil 2.23'ün devamı

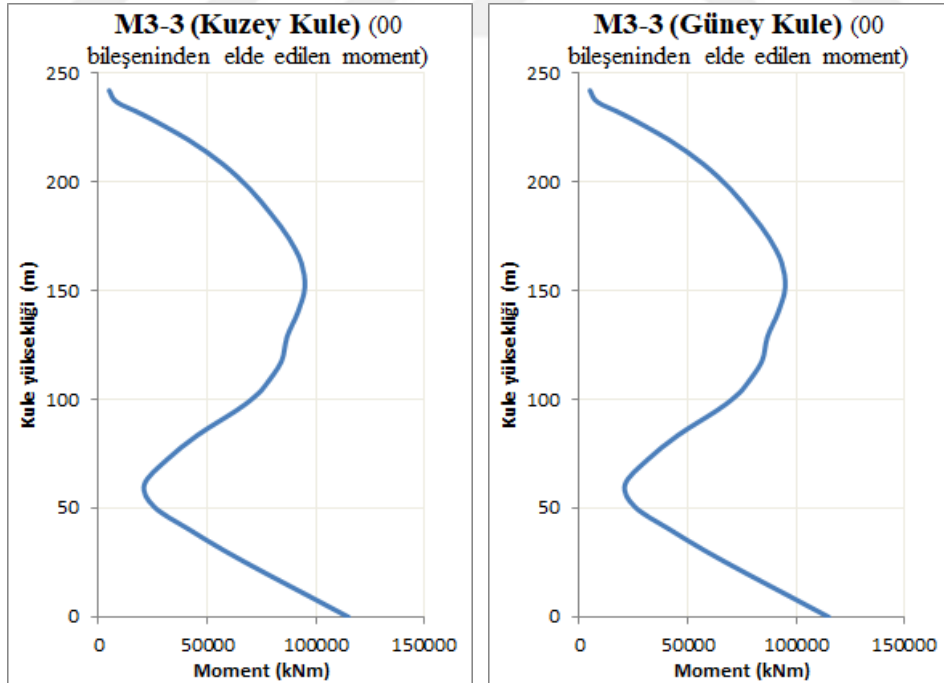


### 2.7.2.2. Kule Momentleri

Dinamik analizler sonucunda kulelerin taban bölgesindeki elemanlarına ait eğilme momentleri değerlerinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Kuzey kulenin maksimum eğilme momenti değerleri sırasıyla M3-3 için 130436 kNm, M2-2 için 225849 kNm olarak elde edilmiştir. Güney kulenin maksimum eğilme momenti değerleri ise M3-3 için 130095 kNm, M2-2 için 225970 kNm olarak elde edilmiştir. Kule tabanlarındaki elemanlara ait eğilme momentlerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.24'te, kuleler boyunca meydana gelen maksimum eğilme momentlerinin değişimi ise Şekil 2.25'te verilmiştir.

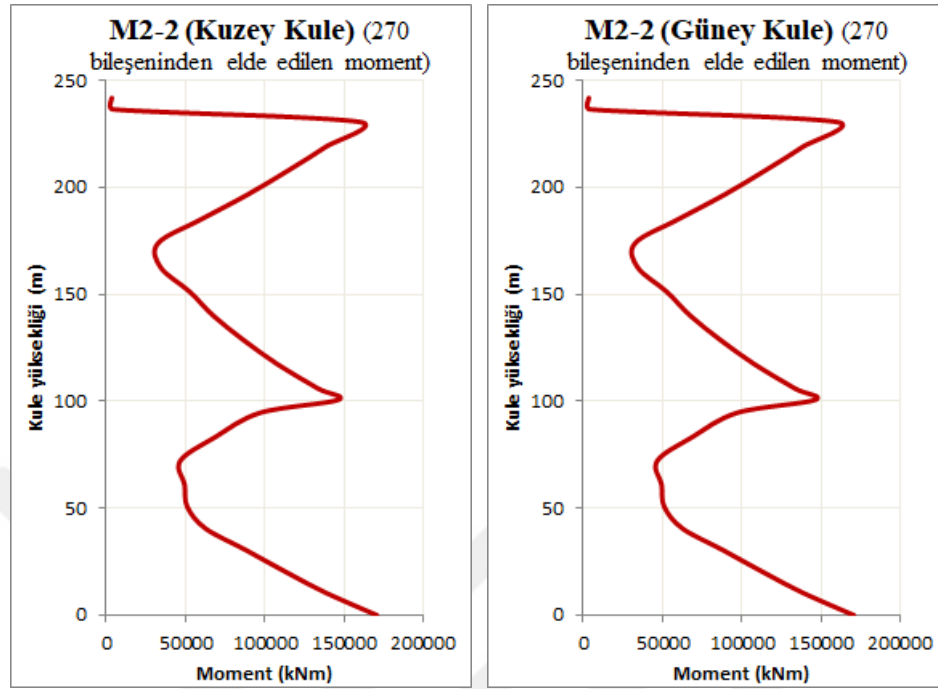


Şekil 2.24. Kuzey ve güney kule tabanındaki elemanlara ait eğilme momentlerin zamana bağlı değişimi



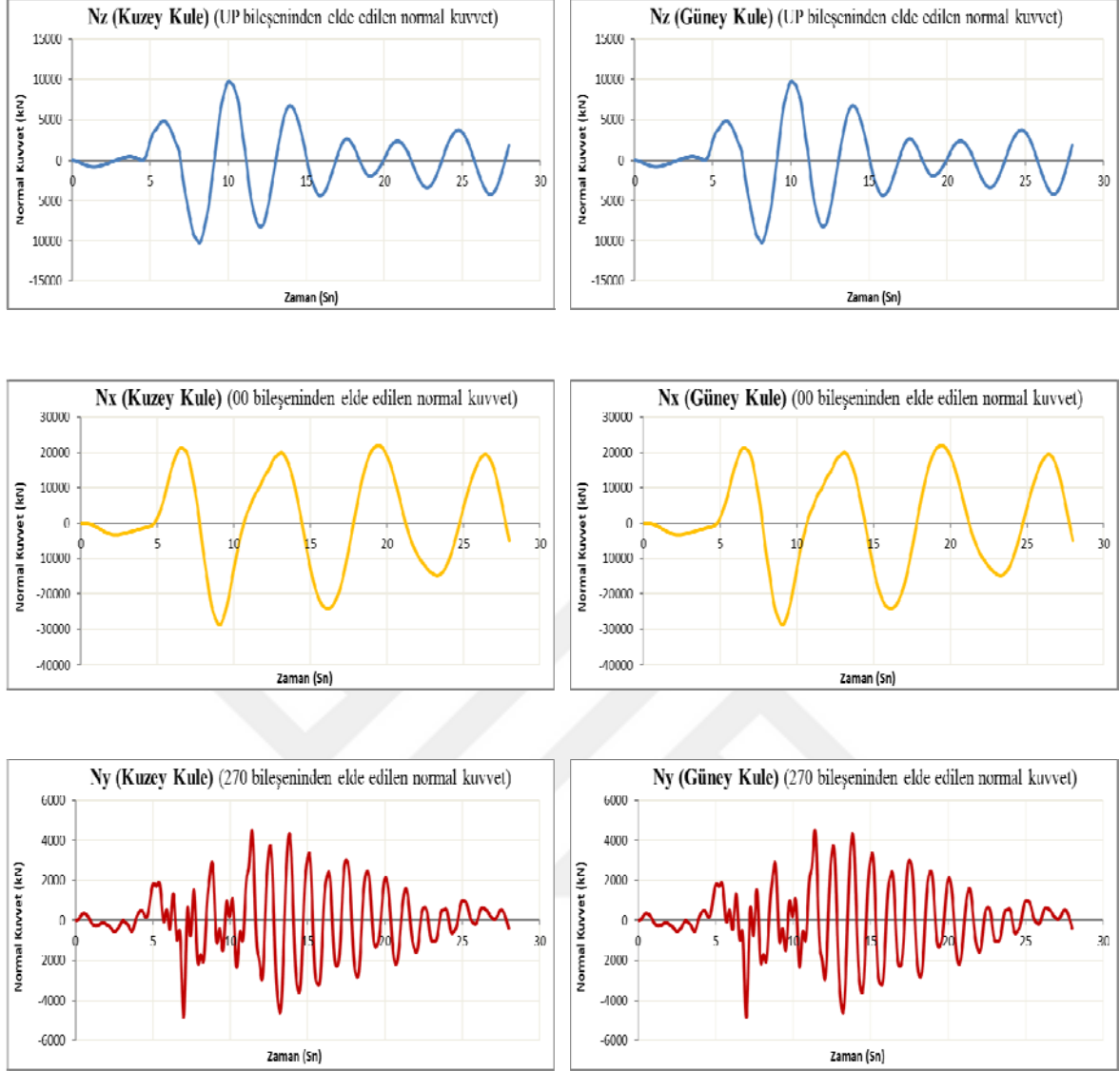
Şekil 2.25. Maksimum eğilme momenti değerlerinin kuzey ve güney kule yükseklikleri boyunca değişimi

Şekil 2.25'in devamı

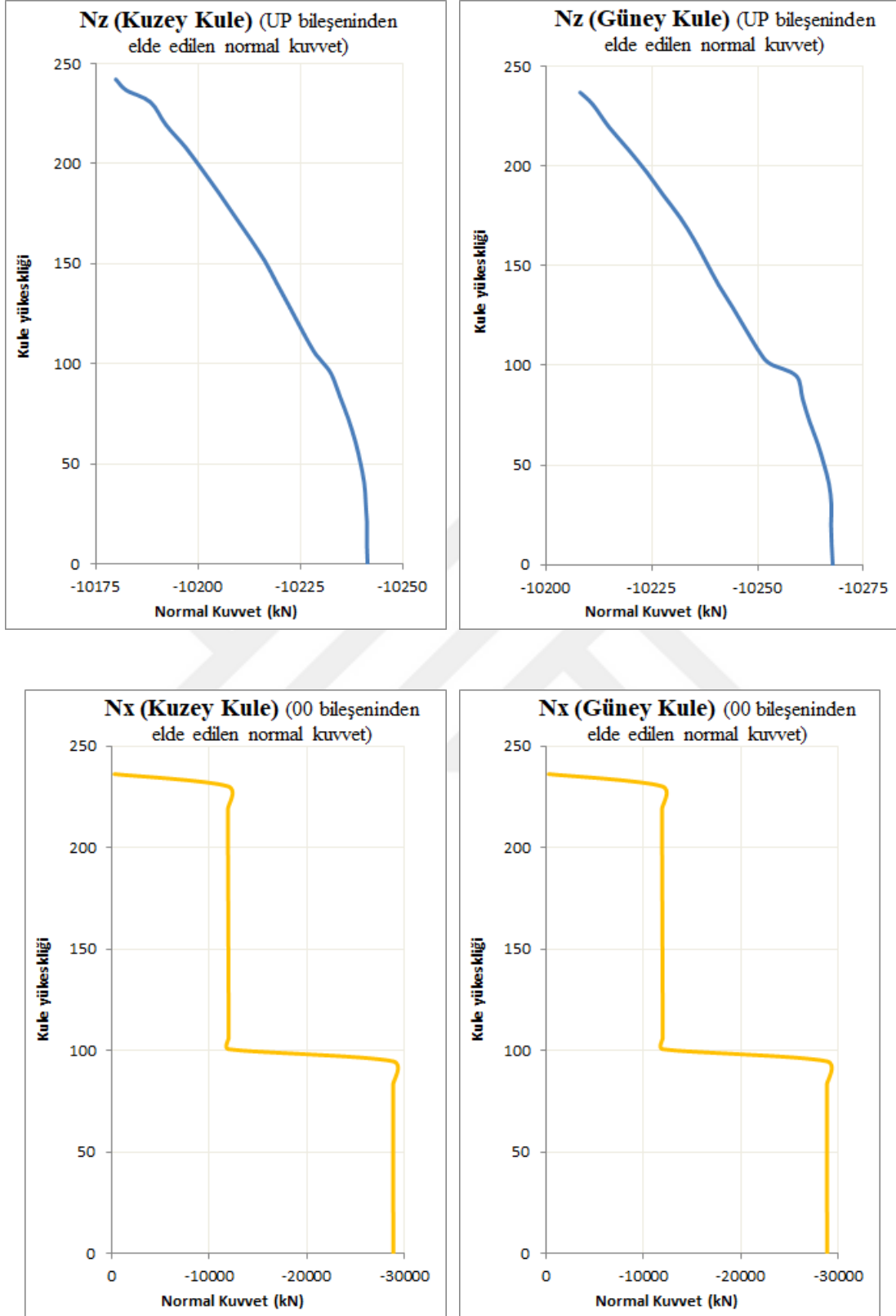


### 2.7.2.3. Kule Normal Kuvvetleri

Dinamik analizlerden elde edilen kule tabandaki elemanlara ait normal kuvvet değerleri bu bölümde sunulmuştur. Kuzey kuleden elde edilen maksimum normal kuvvet değerleri;  $N_z$  için 10241 kN,  $N_x$  için 28888 kN ve  $N_y$  için 4836 kN olarak elde edilmiştir. Güney kuleden elde edilen maksimum normal kuvveti değerleri ise;  $N_z$  için 10267 kN,  $N_x$  için 28897 kN ve  $N_y$  için 4402 kN olarak elde edilmiştir.  $N_z$ ; UP bileşenindeki (düşey) dinamik kuvvetten elde edilen normal kuvvet,  $N_x$ ; 00 bileşenindeki dinamik kuvvetten elde edilen normal kuvvet,  $N_y$  ise; 270 bileşenindeki dinamik kuvvetten elde edilen normal kuvvettir. Kule tabanlarındaki elemanlara ait normal kuvvetlerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.26'da, kulelerde meydana gelen maksimum normal kuvvetlerin kule yüksekliği boyunca değişimi ise Şekil 2.27'de verilmektedir.

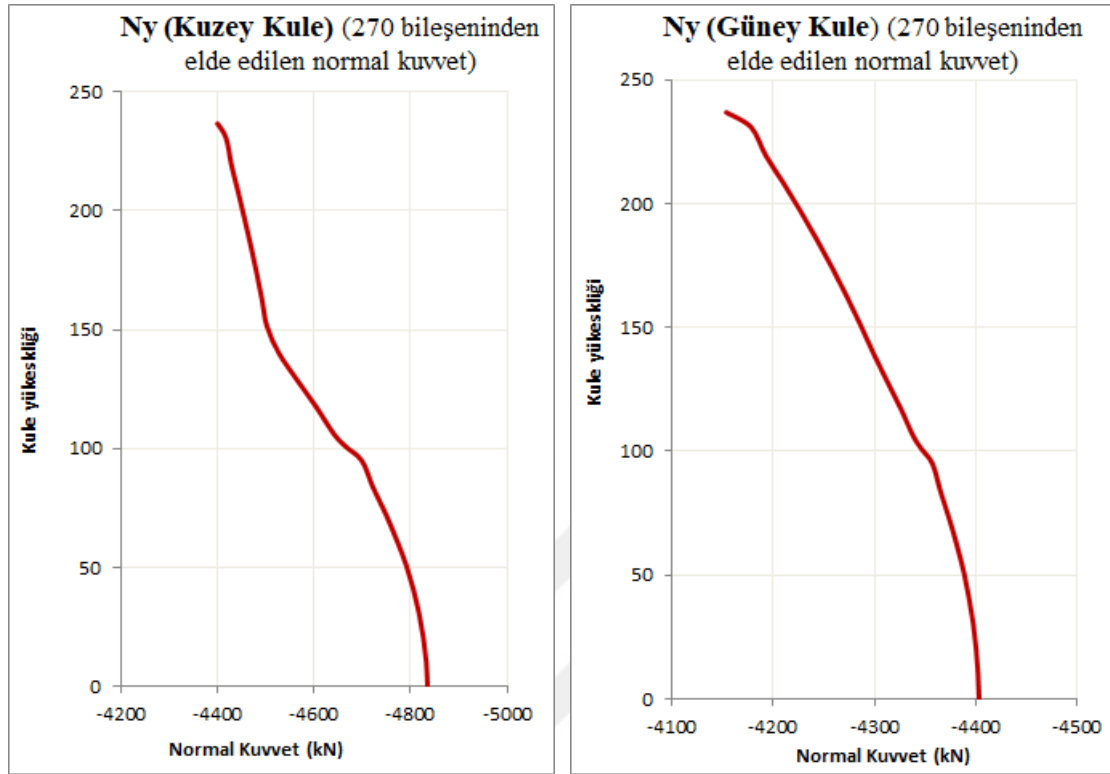


Şekil 2.26. Kuzey ve güney kule tabanındaki elemanlara ait normal kuvvetlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 2.27. Maksimum normal kuvvet değerlerinin kuzey ve güney kule yükseklikleri boyunca değişimi

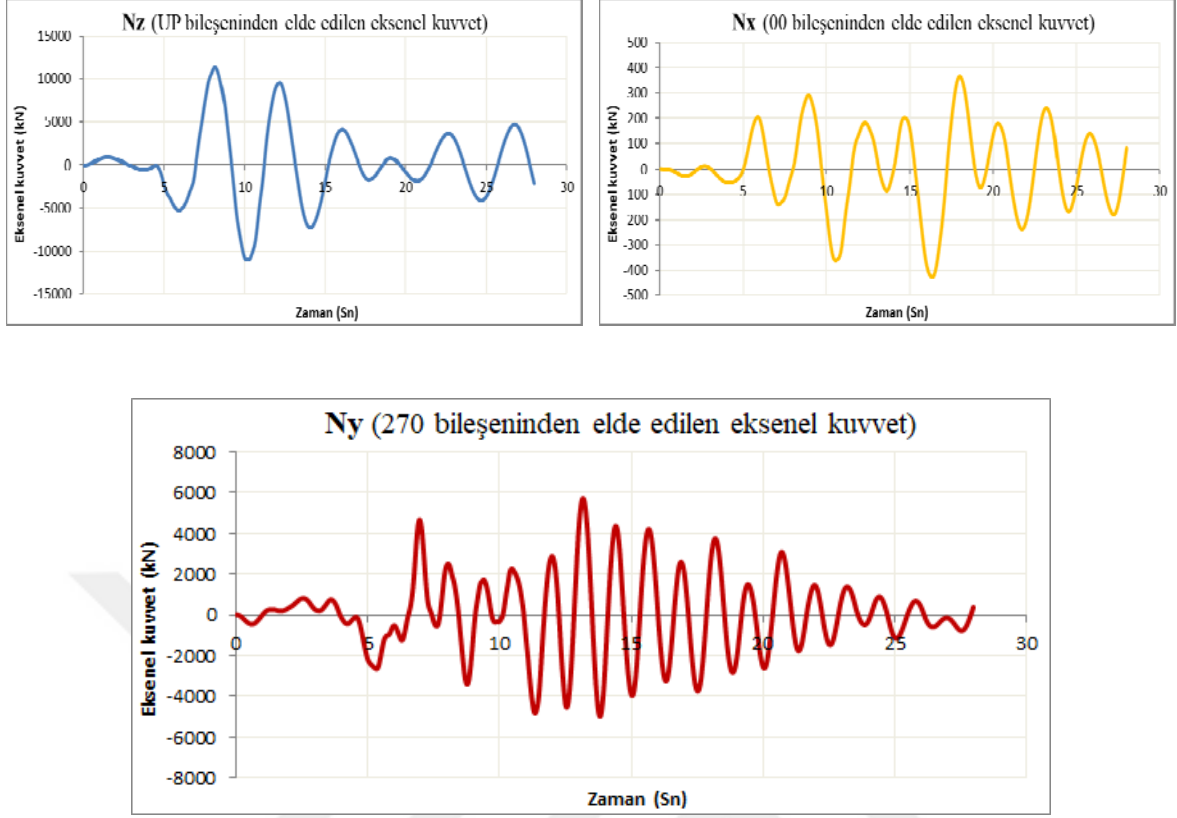
Şekil 2.27'nin devamı



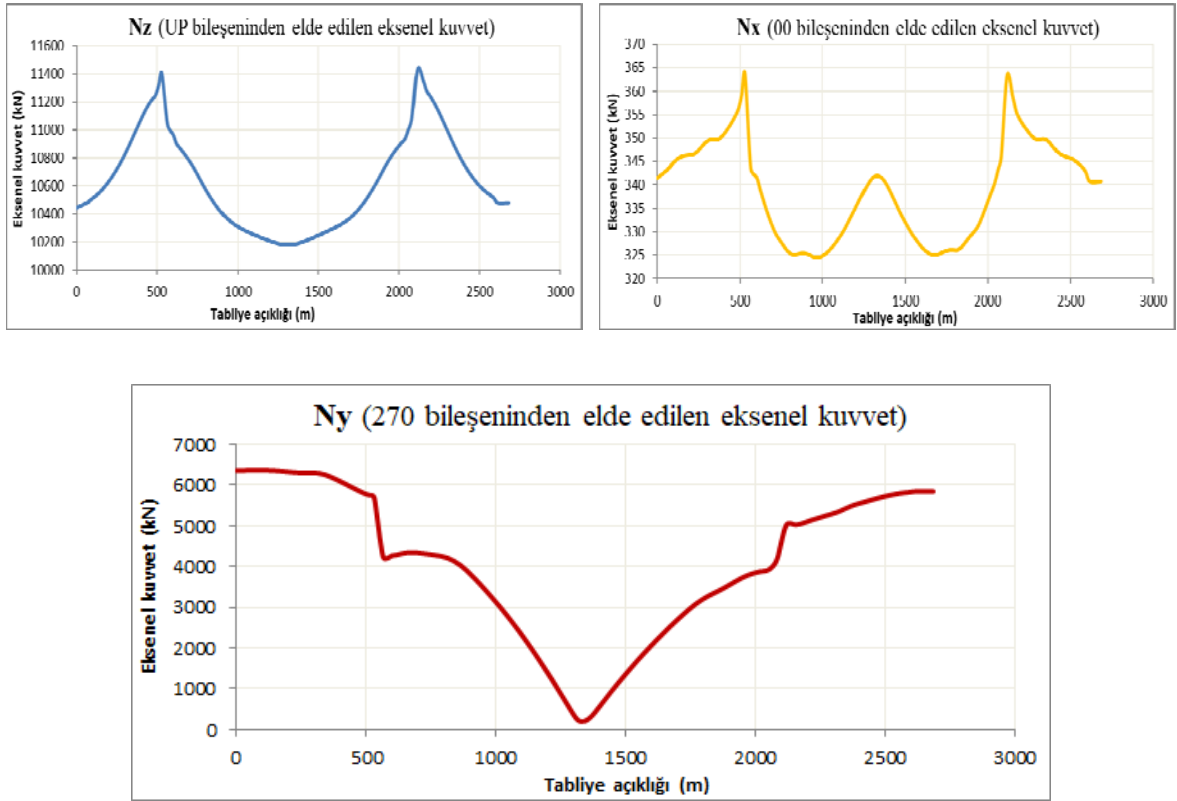
### 2.7.3. Ana Kablo Eksenel Kuvvetleri

Dinamik analizlerden elde edilen kablo eksenel kuvvet değerleri incelendiğinde, eksenel kuvvetlerin eyer noktasında maksimum olduğu görülmüştür. Bu nedenle, dinamik analizlerde eyer noktasına ait eksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum eksenel kuvvet değerleri; Nz için 11450 kN, Nx için 364 kN ve Ny için 6383 kN olarak elde edilmiştir. Nz; UP bileşenindeki (düşey) dinamik kuvvetten elde edilen eksenel kuvvet, Nx; 00 bileşenindeki dinamik kuvvetten elde edilen eksenel kuvvet, Ny ise 270 bileşenindeki dinamik kuvvetten elde edilen eksenel kuvvettir. Kablo eyer noktasına ait eksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.28'de verilmektedir. Ayrıca maksimum eksenel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.29'da verilmiştir.





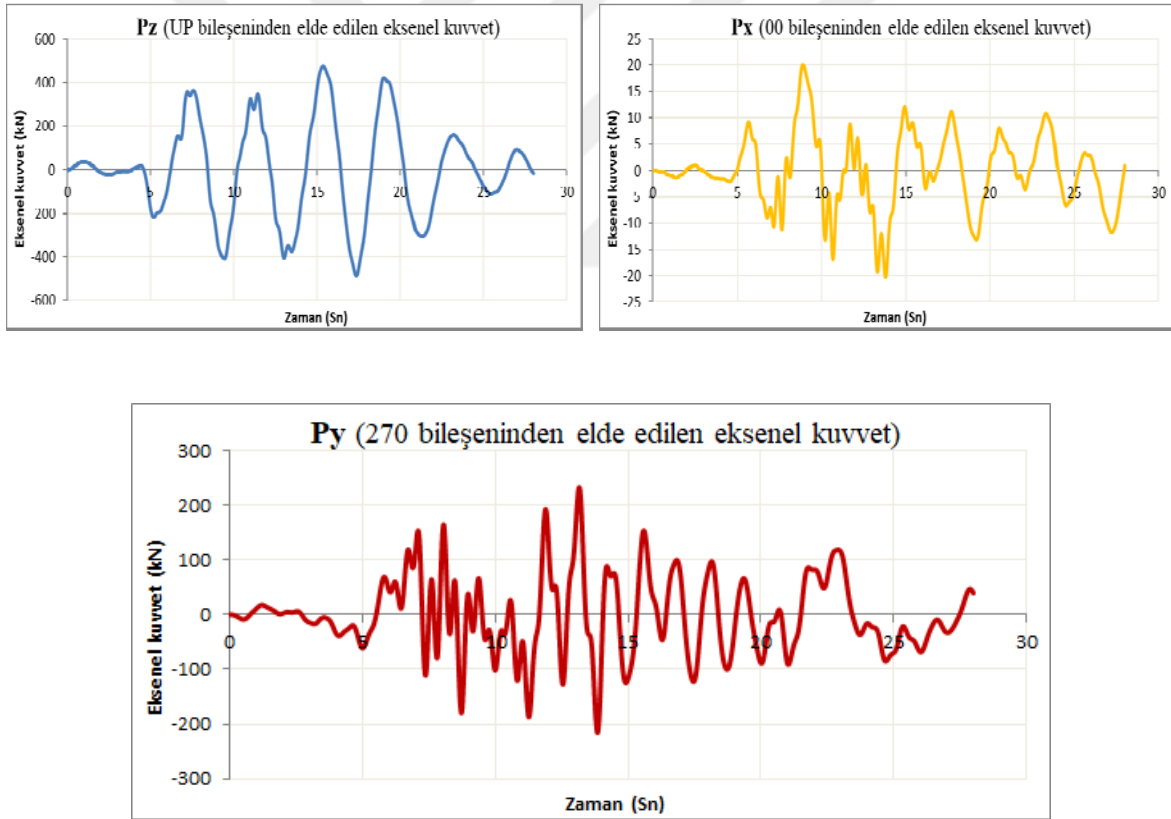
Şekil 2.28. Kablo eyer noktasına ait eksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi



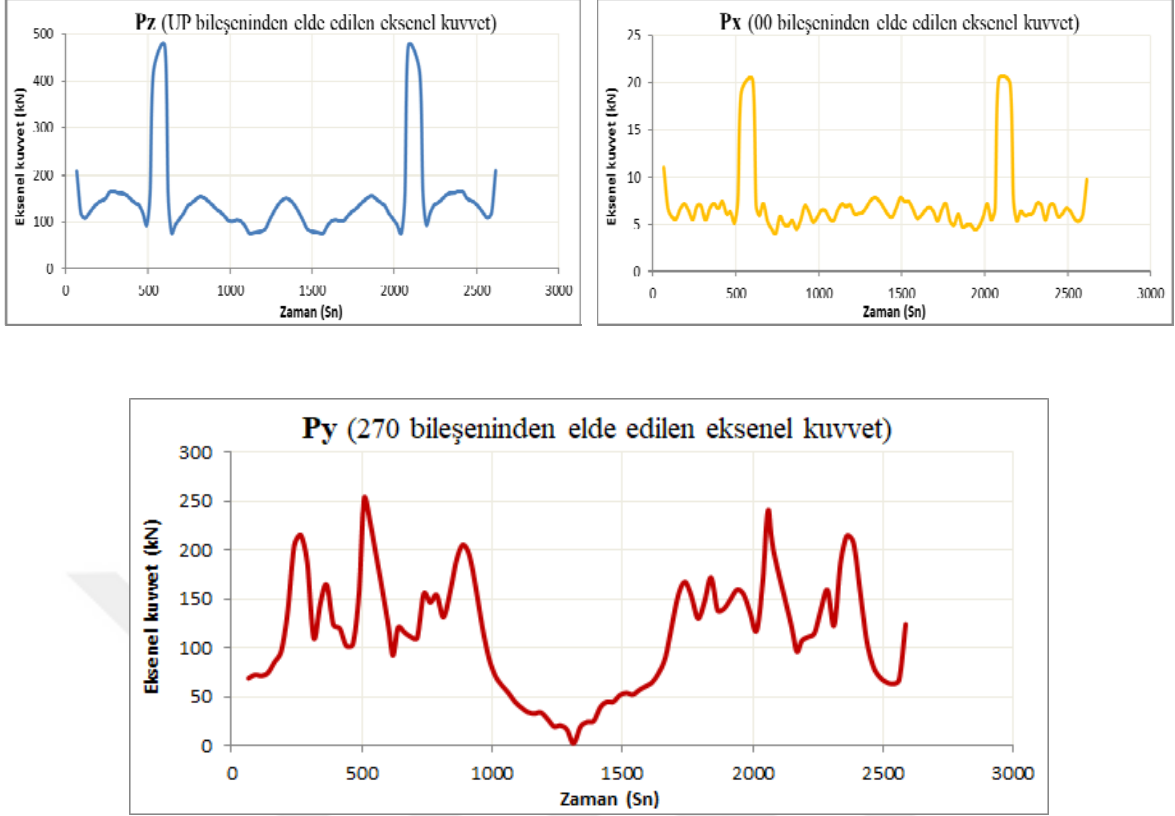
Şekil 2.29. Maksimum eksenel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi

### 2.7.4. Askı Eksenel Kuvvetleri

Dinamik analizler sonucunda aksenel kuvvet değerlerinin kule yakınındaki askılarda maksimum olduğu görülmüştür. Bu nedenle dinamik analizlerde kule yakınındaki askıya ait aksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum aksenel kuvvet değerleri;  $P_z$  için 473 kN,  $P_x$  için 20 kN ve  $P_y$  için 254 kN olarak elde edilmiştir.  $P_z$ ; UP bileşenindeki (düşey) dinamik kuvvetten elde edilen aksenel kuvveti,  $P_x$ ; 00 bileşenindeki dinamik kuvvetten elde edilen aksenel kuvveti,  $P_y$  ise 270 bileşenindeki dinamik kuvvetten elde edilen aksenel kuvvet değerlerini ifade etmektedir. Kule yakınındaki askıya ait aksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi Şekil 2.30'da, askılardaki maksimum aksenel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi ise Şekil 2.31'de verilmiştir.



Şekil 2.30. Kule yakınındaki askıya ait aksenel kuvvetlerin zamana bağlı değişimi



Şekil 2.31. Askılarda meydana gelen maksimum eksenel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişime

## 2.8. Statik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Osmangazi Asma Köprüsü'nün kendi ağırlığı altındaki yapısal davranışını belirlemek amacıyla, köprü'nün statik analizi gerçekleştirilmiştir. Statik analizlerde yapı elemanlarının kendi ağırlıkları program tarafından hesaplanmıştır. Ayrıca, ikinci mertebe teorisinden doğan geometrik olarak lineer olmama (P-Delta) durumu statik analizde de dikkate alınmıştır.

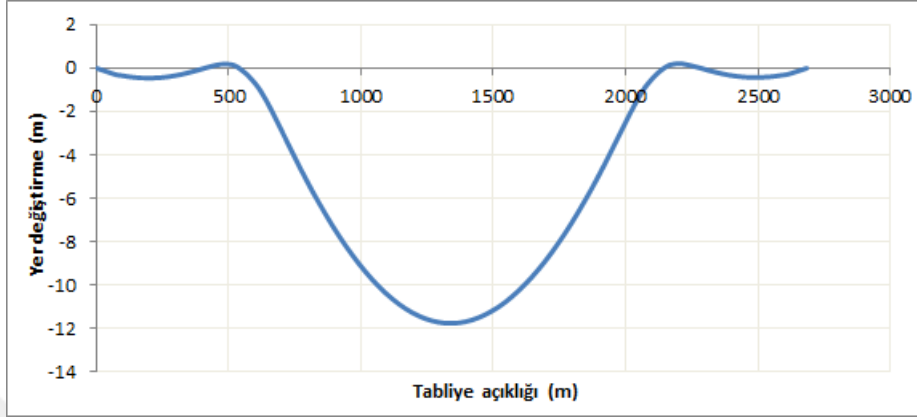
Statik analiz sonucunda; tabliye ve kule boyunca elde edilen yer değiştirmeler ve kesit tesirleri ile kablo ve askılarda meydana gelen eksenel kuvvetler incelenmiştir.

### 2.8.1. Tabliye Davranışı

#### 2.8.1.1. Yer Değiştirmeler

Tabliye boyunca elde edilen düşey yer değiştirme değerlerinin değişimi Şekil 2.32'de verilmektedir. Şekil 2.32'de görüleceği üzere maksimum yer değiştirme değeri tabliye orta

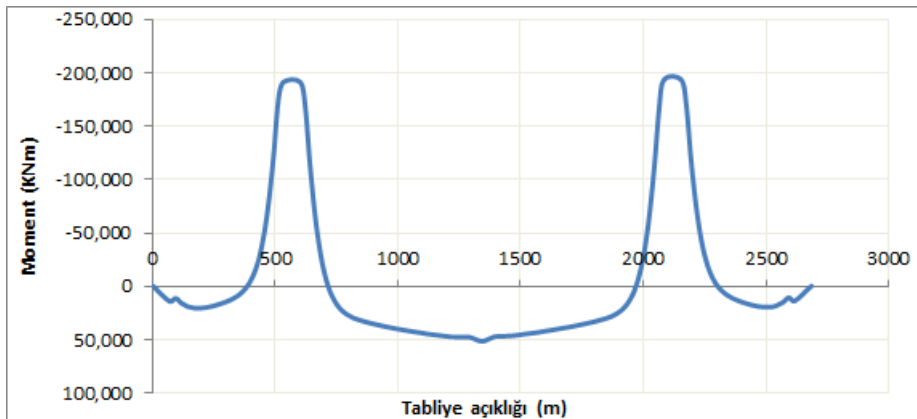
noktasında 11.8 m olarak elde edilmiştir. Belirtilmelidir ki; bu değer köprünün ilk hali yani montaja başlanmasıyla son hali arasında elde edilmiştir.



Şekil 2.32. Düşey yer değiştirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi

### 2.8.1.2. Momentler

Maksimum eğilme momenti değeri kule-tabliye birleşim noktasında 193000 kNm olarak elde edilmiştir. Eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.33'te verilmiştir.



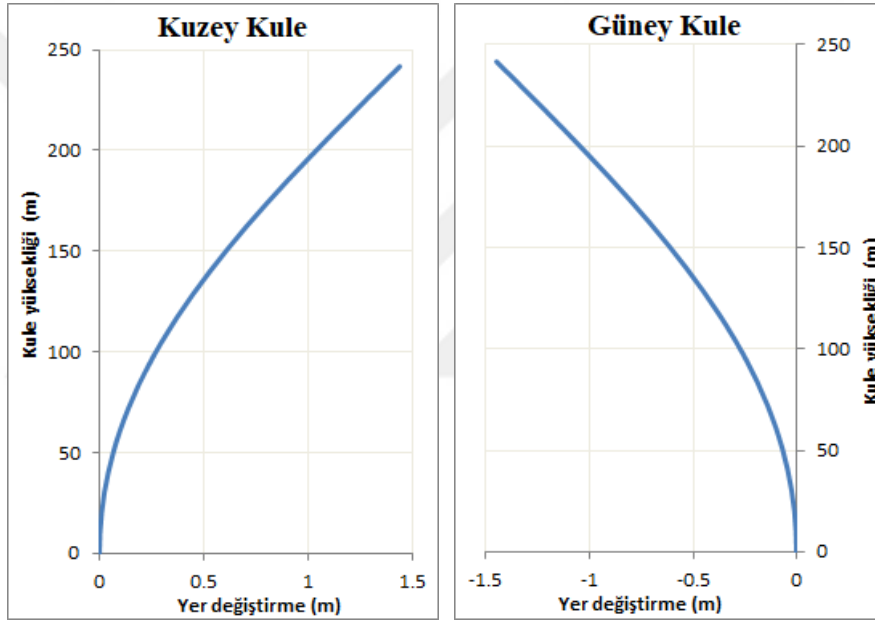
Şekil 2.33. Eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi

## 2.8.2. Kule Davranışı

### 2.8.2.1. Yatay Yer Değişirmeler

Kuzey ve güney kulelerinde oluşan yatay yer değiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.34'te verilmektedir.

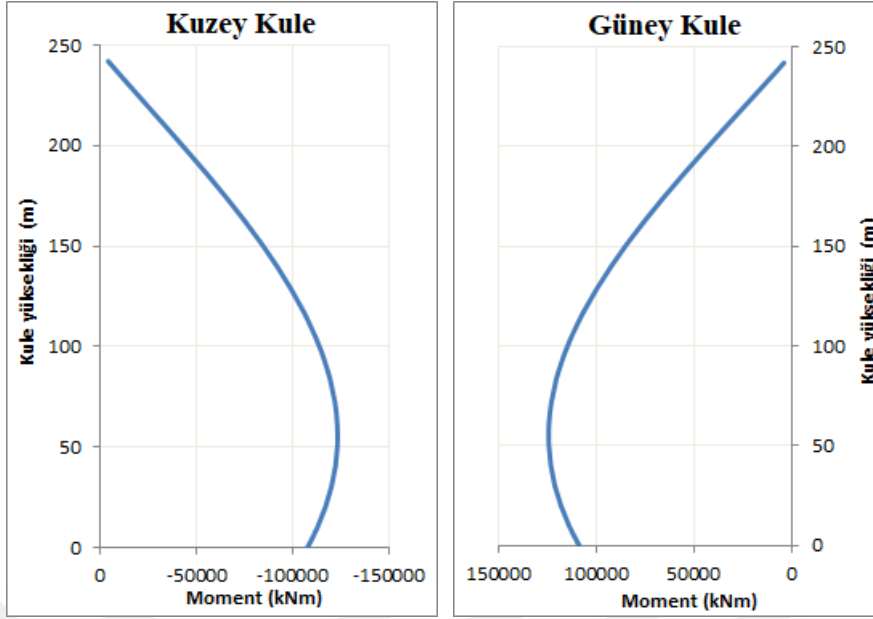
Şekil 2.34 incelendiğinde, yatay yer değiştirmelerin kule boyunca arttığı ve maksimum yer değiştirme değerlerinin kule tepe noktasında, kuzey ve güney kuleleri için sırasıyla 1.438 m ve 1.448 m olarak elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2.34. Yatay yer değiştirme değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

### 2.8.2.2. Momentler

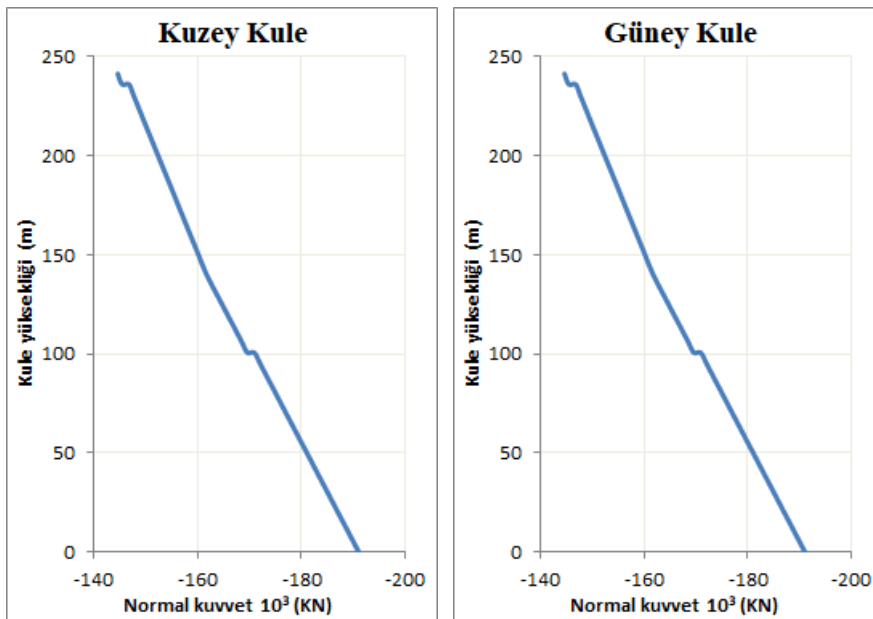
Kuzey ve güney kuleleri için elde edilen eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.35'te verilmektedir. Şekil 2.35 incelendiğinde, kule maksimum eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliğinin yaklaşık ilk 50 m'sinde maksimum olduğu görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değerleri; kuzey kulesi için 122988 kNm, güney kulesi için ise 123919 kNm olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.35. Eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

### 2.8.2.3. Normal Kuvvetler

Kule yükseklikleri boyunca elde edilen normal kuvvet değerleri Şekil 2.36'da verilmektedir. Şekil 2.36 incelendiğinde; normal kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca azaldığı, maksimum normal kuvvet değerlerinin ise kuzey kulesi için 191076 kN, güney kulesi için ise 191250 kN olarak elde edildiği görülmektedir.

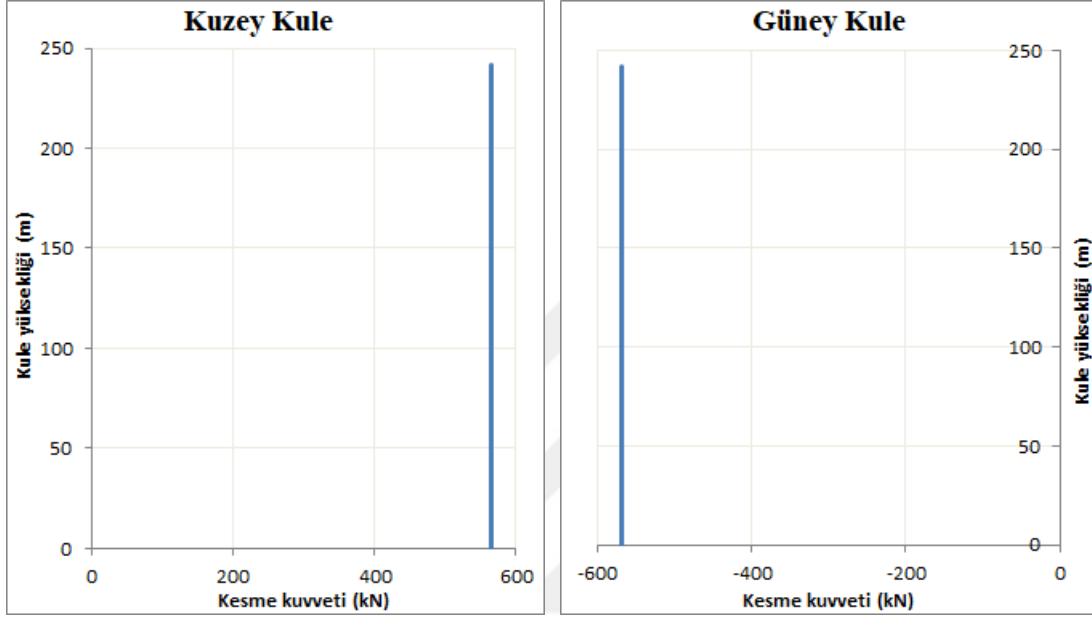


Şekil 2.36. Normal kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi



#### 2.8.2.4. Kesme Kuvvetleri

Kule yüksekliği boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri Şekil 2.37’de verilmektedir. Şekil 2.37 incelendiğinde, kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin aynı kaldığı görülmektedir.



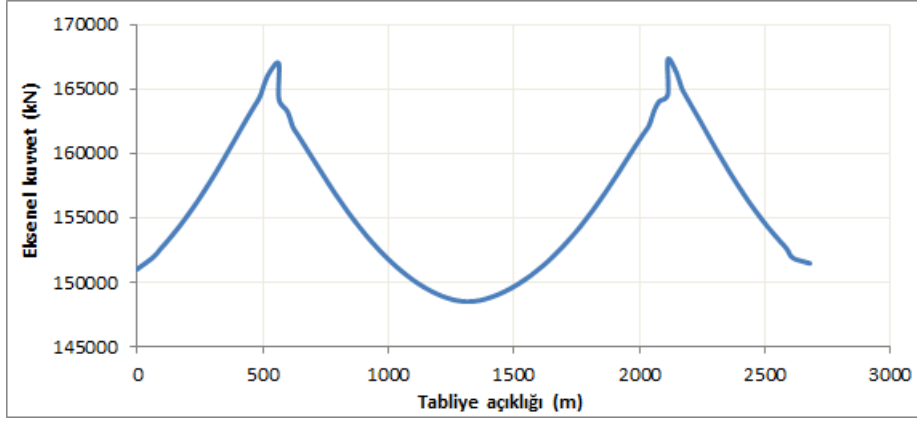
Şekil 2.37. Kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

#### 2.8.3. Ana Kablo Eksenel Kuvvetleri

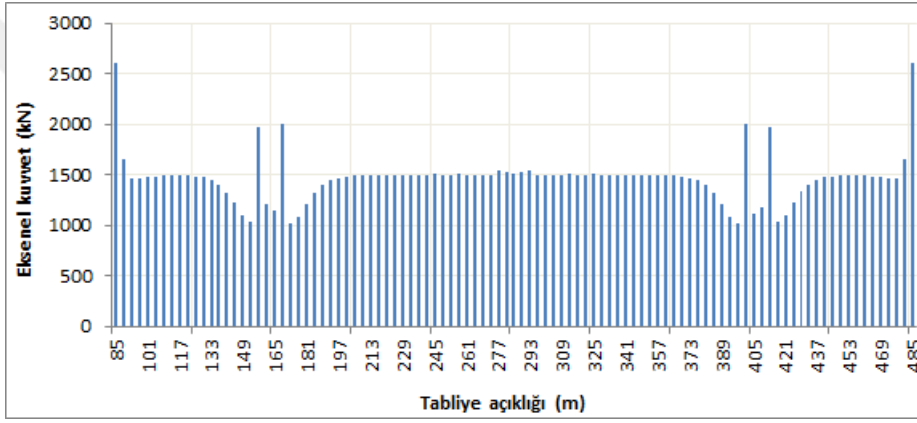
Ana kabloda oluşan eksenel kuvvet değerleri Şekil 2.38’de verilmektedir. Şekil 2.38’de görüleceği üzere maksimum kablo kuvvetleri kule yakınlarında meydana gelmiştir. Ana kablodaki maksimum eksenel kuvvet değeri 167283 kN olarak elde edilmiştir.

#### 2.8.4. Askı Eksenel Kuvvetleri

Askı halatlarında oluşan eksenel kuvvet değerlerinin değişimi Şekil 2.39’da verilmektedir. Şekil 2.39 incelendiğinde maksimum askı kuvvetlerinin köprünün mesnet bölgelerine yakın olduğu görülmektedir. Askı halatlarında oluşan en büyük kuvvet 2621 kN olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.38. Ana kablo eksenel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi



Şekil 2.39. Askı eksenel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi

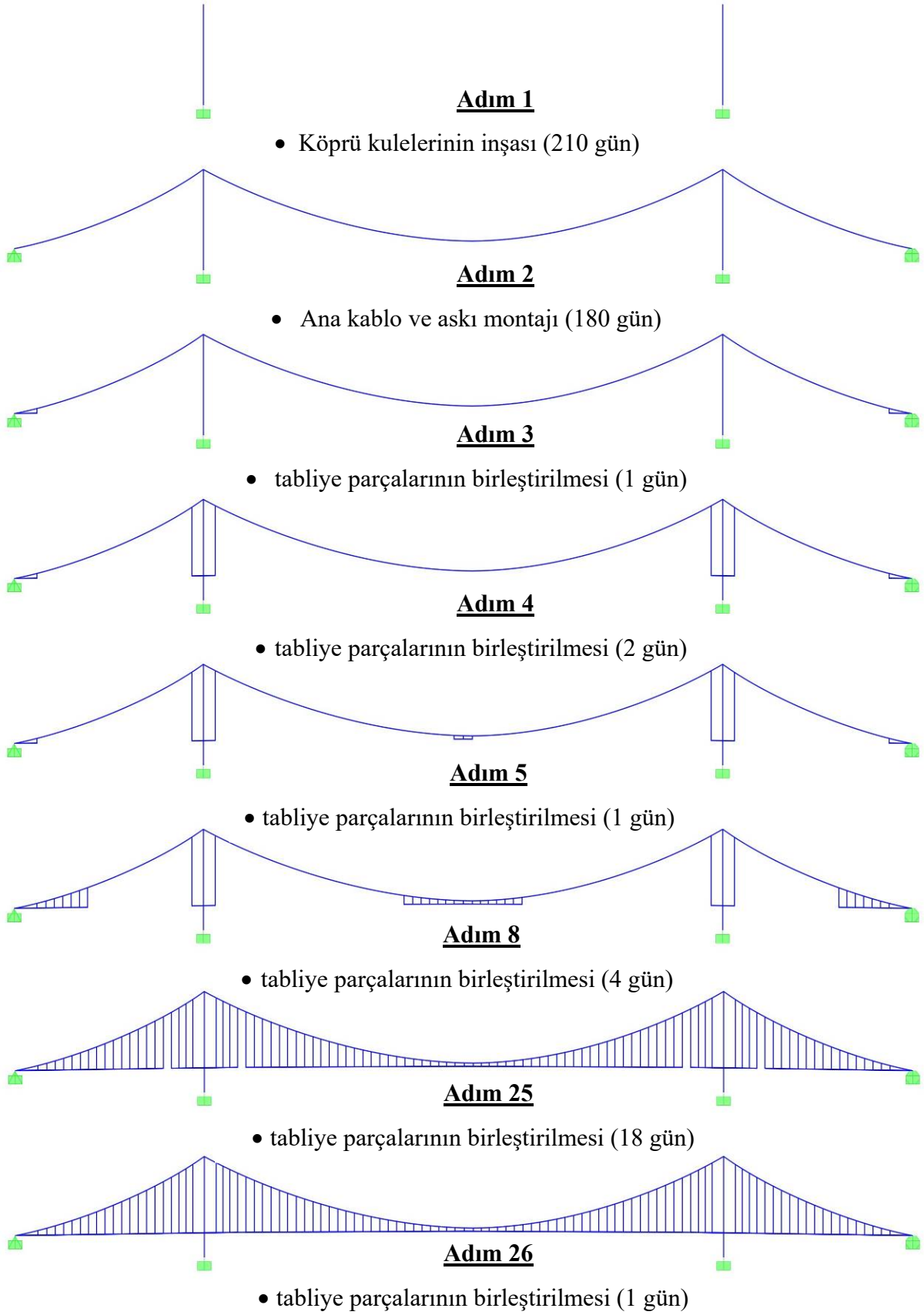
## 2.9. Yapım Aşamalı Analiz

### 2.9.1. Osmangazi Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi

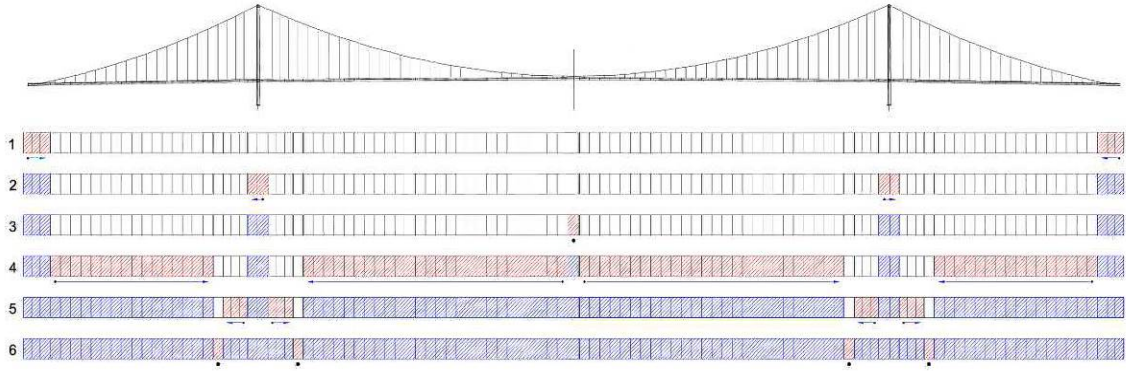
Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapısal davranışa yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli 26 adımda oluşturulmuştur. Osmangazi Köprüsü'nün toplam inşaat süresi 417 gün olarak dikkate alınmıştır. Modelleme sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Osmangazi Köprüsü'nün bazı yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli Şekil 2.40'da verilmektedir. Ayrıca tabliye montajlarına ait iş planı Şekil 2.41'de verilmektedir. Resim 2.41'de; kırmızı renk mevcut montaj durumunu, mavi renk ise bir önceki adımlarda yapılan montaj durumunu ifade etmektedir. Tabliyelerin sonlu eleman modelindeki montajı bu iş planına göre gerçekleştirilmiştir.

Osmangazi Köprüsü'nün yapısal davranışına zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla, yapım aşamalı sonlu eleman modelinde çelik malzemesi için çeliğin gevşeme özelliği dikkate alınmıştır. Çünkü çelik gibi yapı malzemelerin özellikleri iklim şartlarına ve yükleme durumlarına bağlı olarak devamlı değişkenlik gösterebilmektedir.

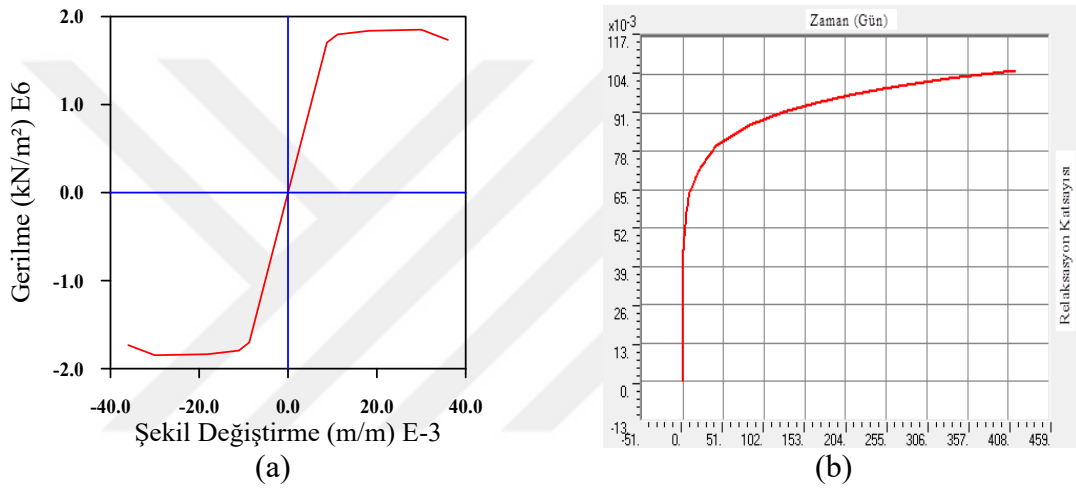
Çelik için gerilme-şekil değiştirme ve zamana bağlı değişen malzeme özellikleri grafikleri Şekil 2.42'de verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodu yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak Şekil 2.42'de verilen grafikler otomatik olarak değişmektedir.



Şekil 2.40. Osmangazi Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modelleri



Şekil 2.41. Tabliye montaj aşamaları (Sorensen, 2016)



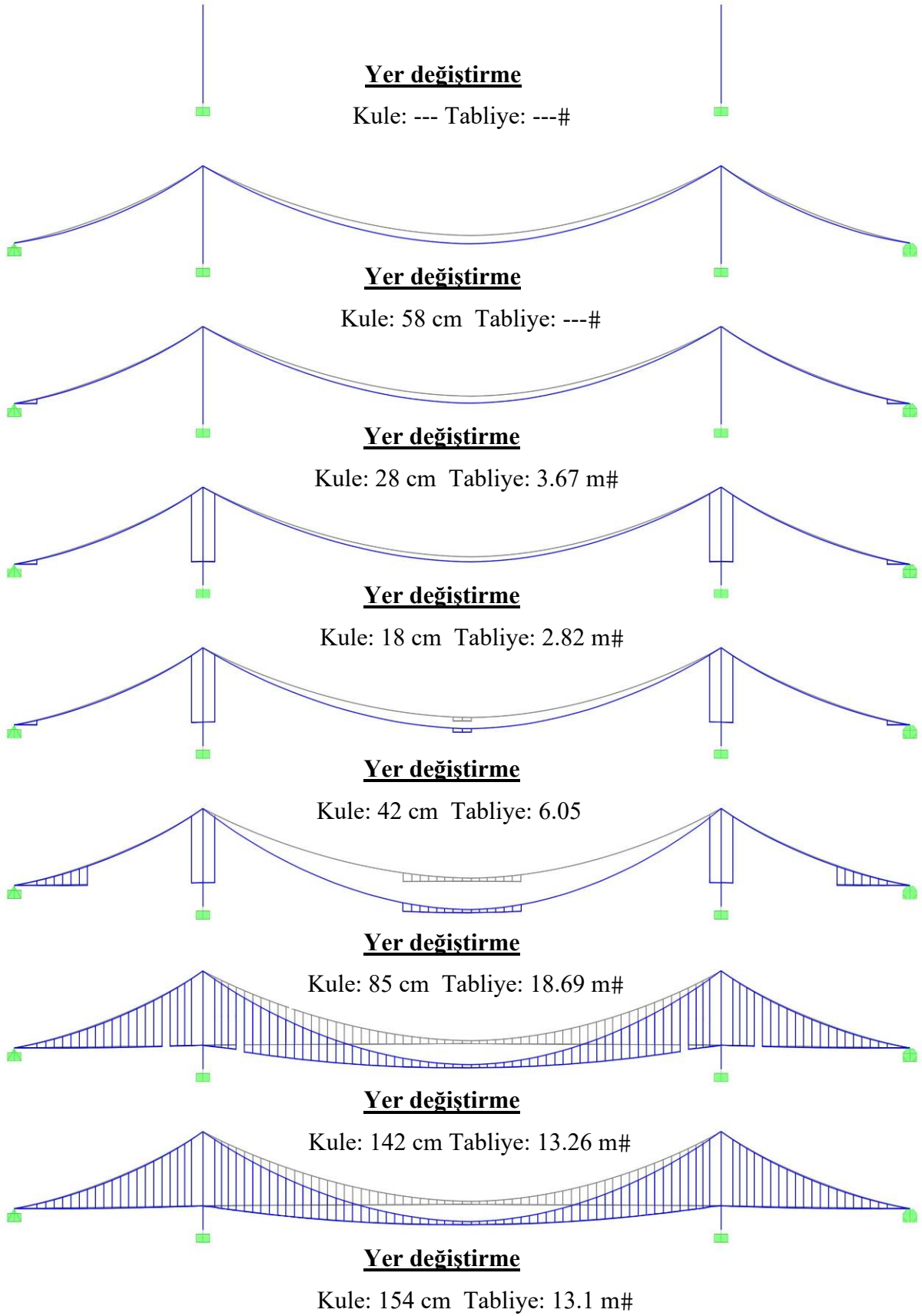
Şekil 2.42. Öngerilmeli çelik için gerilme-şekil değiştirme (a) ve zamana bağlı malzeme özellikleri değişimi (b) diyagramları

### 2.9.2. Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları

Osmangazi Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla yükleme durumu olarak tüm elemanların kendi ağırlıkları dikkate alınmıştır.

### 2.9.3. Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri

Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule ve tabliyeye ait deformasyon değerleri Şekil 2.43'te verilmektedir. Şekil 2.43'te görüldüğü üzere köprü yapımı ilerledikçe tabliyede oluşan düşey deformasyonlarla kulelerde oluşan yatay deformasyonlar artmaktadır.

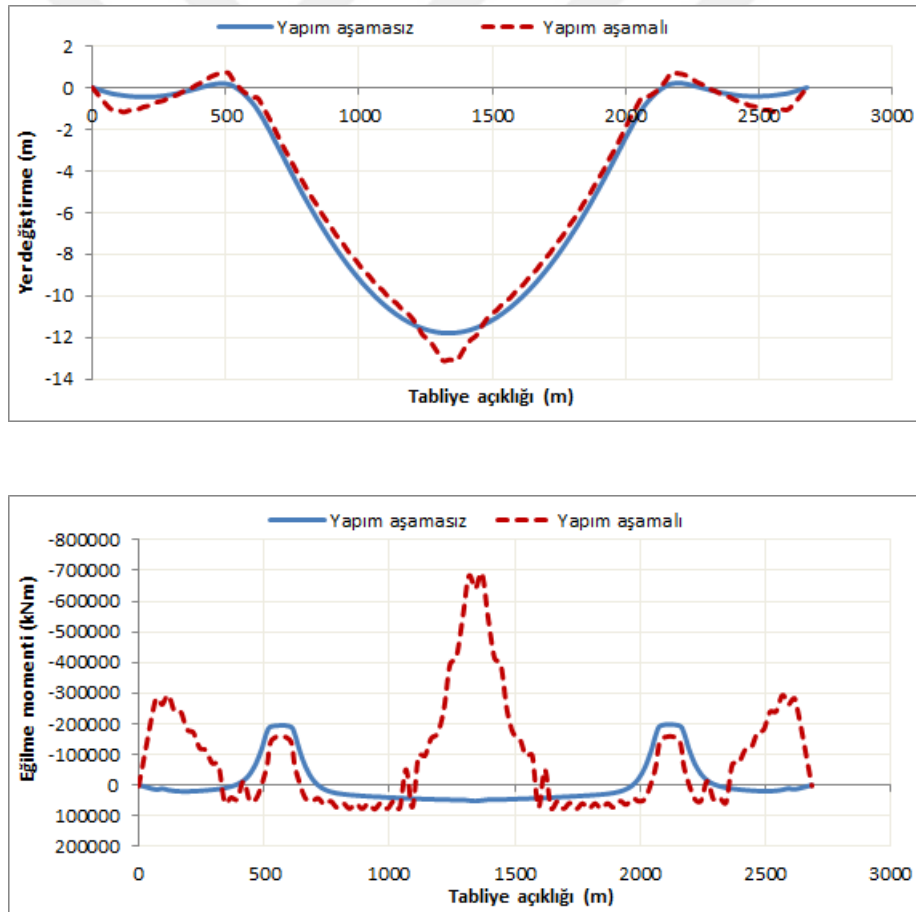


Şekil 2.43. Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule ve tabliyeye ait yer değistirme değerleri



### 2.9.4. Tabliye Davranışı

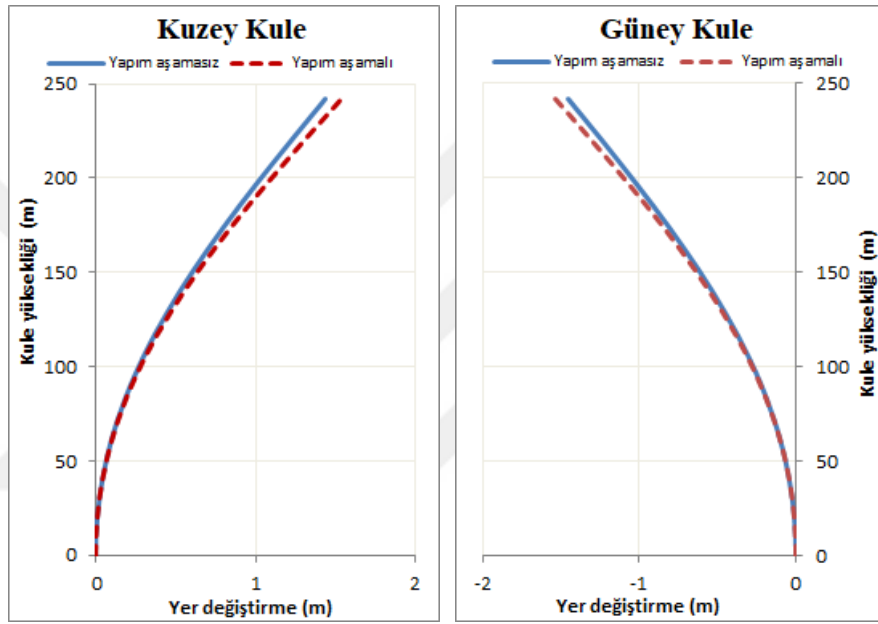
Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yer değiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.44'te verilmektedir. Yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerin etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 2.44'te görüldüğü gibi yer değiştirme ve eğilme momenti değerleri köprü ana açıklık ortasına doğru artmaktadır. Ayrıca, yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük değerlerin elde edildiği kolaylıkla görülebilmektedir.



Şekil 2.44. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yer değiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi

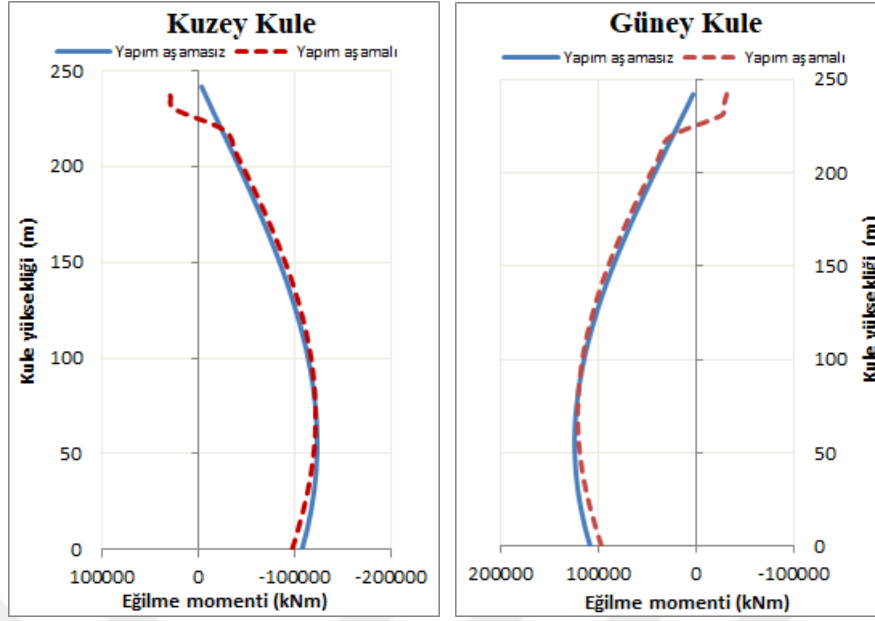
### 2.9.5. Kule Davranışı

Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yer değiştirme değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.45'te verilmiştir. Şekil 2.45 incelendiğinde, yatay yer değiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yer değiştirmenin yapım aşamalarının dikkate alındığı durum için kule uç noktasında 1.54 m olarak elde edildiği görülmektedir.



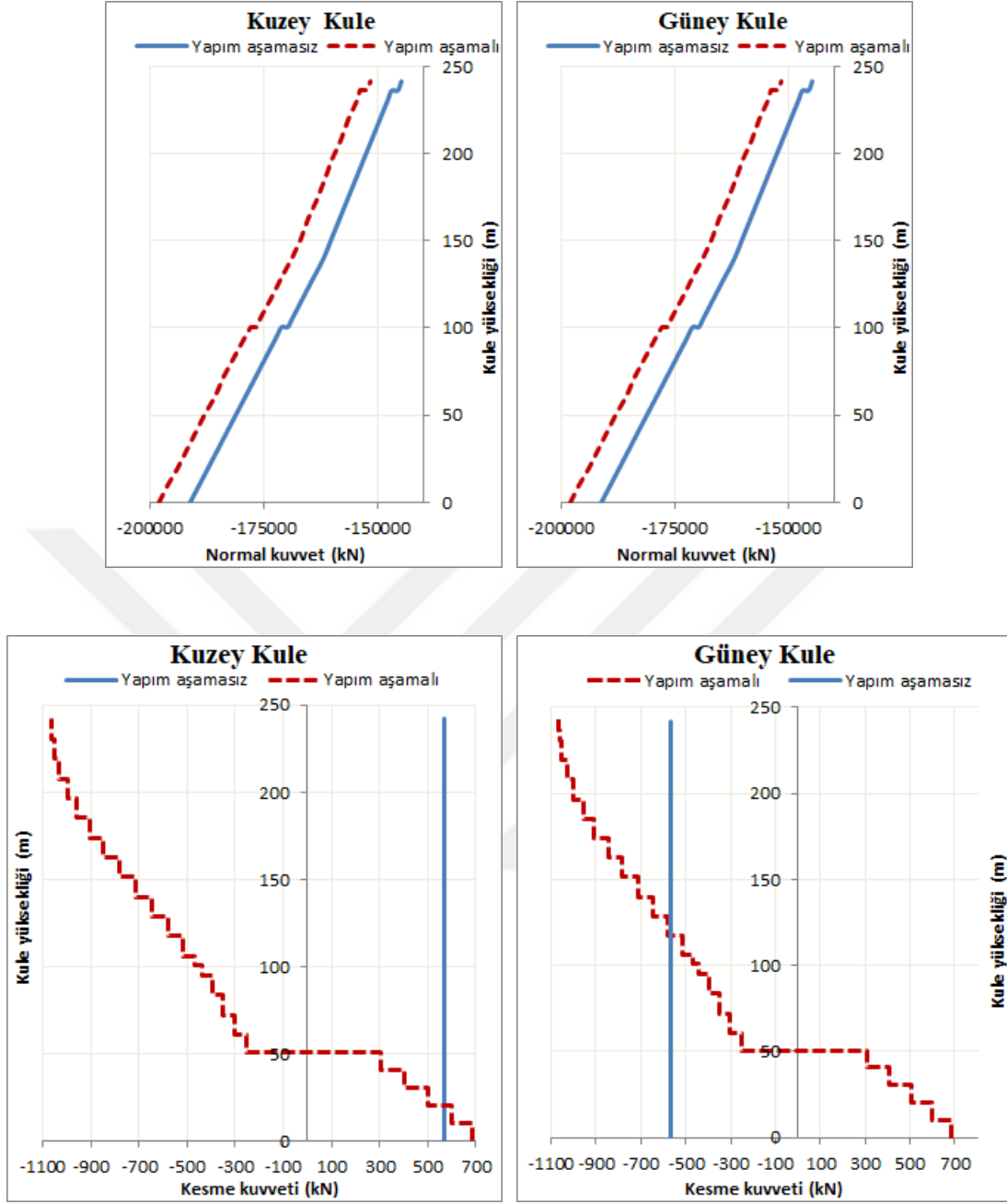
Şekil 2.45. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yer değiştirme değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi

Kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerlerinin değişimi Şekil 2.46'da verilmektedir. Şekil 2.46 incelendiğinde; yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı ve alınmadığı analizlerde, maksimum eğilme momenti değerleri tabandan yaklaşık 50 m yükseklikte oluşmaktadır. Ayrıca, her iki analiz türü için elde edilen maksimum eğilme momenti değerleri kuzey ve güney kulelerde hemen hemen aynıdır.



Şekil 2.46. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi

Kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin değişimi Şekil 2.47'de verilmektedir. Şekil 2.47 incelendiğinde, kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizde ise aynı kaldığı görülmektedir. Yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizde ise kesme kuvveti değerinin kule yüksekliği boyunca kule orta noktasına doğru azaldığı, kule orta noktasından kule tepesine doğru ise arttığı görülmektedir. Ayrıca, yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük kesit tesirlerinin elde edildiği görülebilmektedir.

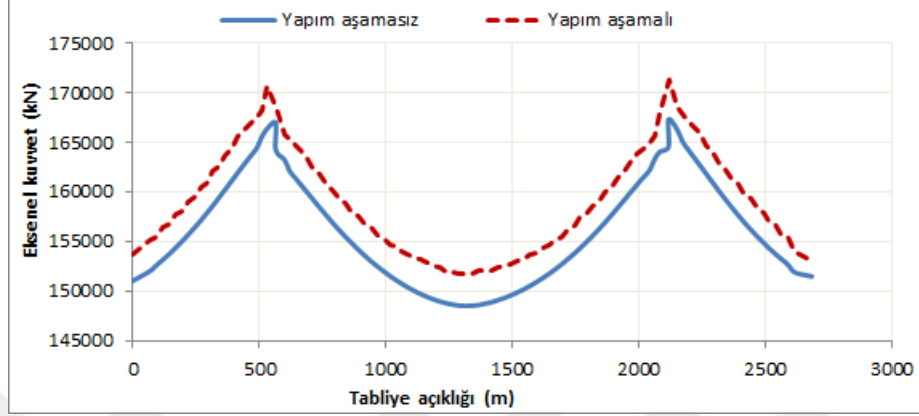


Şekil 2.47. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kuzey ve güney kule yüksekliği boyunca değişimi

### 2.9.6. Kablo Davranışı

Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizler için ana kablodan elde edilen aksel kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.48'de verilmiştir. Şekil 2.48'den görüleceği üzere analizlerde yapım aşaması ve malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda kablo kuvvetleri daha

büyük elde edilmiştir. Yapım aşaması ve malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda maksimum kablo kuvveti 172346 kN olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.48. Osmangazi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen kablo aksenal kuvvet değerlerinin tabliye boyunca değişimi

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Osmangazi Asma Köprüsü'nün yapısal davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla köprünün modal, statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Modal, statik ve dinamik analizlerde P-Delta etkileri dikkate alınmıştır. Köprünün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve malzemede zamanla meydana gelen deformasyonların etkisi ayrıca araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

#### Modal Analiz:

- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modelinden elde edilen ilk 9 doğal frekans değerleri 0.0886-0.2726Hz arasında değişmektedir.
- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modelinden elde edilen ilk 20 doğal frekans değerleri 0.0607-0.2695Hz arasında değişmektedir.
- ✓ Osmangazi Köprüsü'nün modal analizden elde edilen ilk 20 mod şekli tabliyede düşey salınımının farklı şekilleri (simetrik-antisimetrik) ve burulma şeklindedir. Köprünün birinci modu yanal ötelenme şeklinde elde edilmiştir. Köprünün ilk 20 modu için kule ve kablolarında simetrik ve antisimetrik modlar elde edilmiştir.

#### Dinamik Analiz:

- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün dinamik analizlerinde yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depreminin Gebze İstasyonundan elde edilen üç ivme kaydı kullanılmıştır.
- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün dinamik analizleri sonucunda tabliye orta noktasında elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla Uz (düşey) için 0.613 m, Ux (enine) için 1.19 m ve Uy (boyuna) için 0.10 m olarak elde edilmiştir.
- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda tabliye orta noktasında elde edilen maksimum eğilme momenti değerleri M3-3 için 65679 kNm ve M2-2 için 352915 kNm olarak elde edilmiştir.
- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda kulelerdeki maksimum yer değiştirme değerleri Uz (düşey) 0.08 m, Ux (enine) 0,90 m, Uy (boyuna) 0.01 m'dir.
- ✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda kulelerdeki maksimum eğilme momenti değerleri kuzey kulede M3-3 için 130436 kNm ve

M2-2 için 225849 kNm, güney kulede ise M3-3 için 130095 kNm ve M2-2 için 225970 kNm'dir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda kulelerdeki maksimum normal kuvvet değerleri kuzey kulede 4836 kN olarak yer hareketinin 270 bileşenindeki (boyuna yönde) dinamik kuvvetten elde edilmiştir. Güney kulede bu değer aynı dinamik kuvvet için 4402 kN olarak elde edilmiştir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda kabloda meydana gelen maksimum eksenel kuvvet değerleri; düşey (UP bileşeni) dinamik kuvvet için 11450 kN, enine (00 bileşeni) yöndeki dinamik kuvvet için 364 kN ve boyuna (270 bileşeni) yöndeki dinamik kuvvet için 6383 kN olarak elde edilmiştir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda kule yakınındaki askıda maksimum eksenel kuvvet değerleri elde edilmiştir. Bu değerler; düşey (UP bileşeni) dinamik kuvvet için 473 kN, enine (00 bileşeni) yöndeki dinamik kuvvet için 20 kN ve boyuna (270 bileşeni) yöndeki dinamik kuvvet için 254 kN olarak elde edilmiştir.

Statik Analiz:

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda tabliye orta noktasında 11.8 m'lik maksimum yer değiştirme ve kule-tabliye birleşim noktasında 193000 kNm'lik maksimum eğilme momenti değerleri elde edilmiştir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda kuzey ve güney kule tepe noktasında 1.438 m'lik yatay yer değiştirme elde edilmiştir. Kuzey ve güney kulelerde edilen maksimum eğilme momenti değerleri ise sırasıyla 122988 kNm ve 123919 kNm dir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda kuzey ve güney kule taban noktalarında sırasıyla 191076 kN ve 191250 kN'luk normal kuvvet değerleri elde edilmiştir. Ayrıca kulelerde kule yükseklikleri boyunca sabit 570 kN'luk bir kesme kuvveti elde edilmiştir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda kabloda meydana gelen maksimum eksenel kuvvet değeri 167283 kN olarak elde edilmiştir. Ayrıca askılardaki maksimum eksenel kuvvet değeri 3146 kN olarak elde edilmiştir.

Yapım Aşamaları ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonların

Dikkate Alındığı Analiz:

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda elde edilen



yer değiştirme ve kesit tesirleri, bu etkilerin dikkate alınmaması durumuna göre daha büyüktür.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda tabliye orta noktasında elde edilen yer değiştirme değeri %11 artmıştır. Tabliyedeki maksimum eğilme momenti değeri ise %259 artmıştır.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda kule tepe noktalarında elde edilen yer değiştirme değerleri %7 artmıştır. Kulelerde elde edilen eğilme momenti değerleri her iki analiz için hemen hemen eşittir. Kulelerin taban noktalarında elde edilen normal kuvvet değerleri ise %4 oranında artmıştır.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda, kuzey ve güney kulede elde edilen maksimum kesme kuvvetleri 1082 kN ve 1083 kN'dur. Bu değerler statik analizde 570 kN olarak elde edilmiştir.

✓ Osmangazi Asma Köprüsü'nün statik analizlerinde yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınması durumunda maksimum kablo kuvveti değeri %3 artmıştır.

Bu tez çalışmasının yanı sıra gelecekte yapılabilecek bazı çalışmalar aşağıda sunulmaktadır:

➤ Osmangazi Asma Köprüsü'nün kulelerinde titreşim sönümleyiciler kullanarak benzer analizler gerçekleştirilebilir.

➤ Sahaya zel deprem yer hareketi spektrumu oluşturularak dinamik analizler gerçekleştirilebilir.

➤ Farklı tür taşıyıcı sisteme sahip köprülerin yapısal davranışlarında yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının etkisi incelenebilir.

➤ Yapılan analizlerde sıcaklık etkileri dikkate alınabilir.

➤ Yapı-zemin etkileşimleri analizlerde dikkate alınabilir.

➤ Osmangazi Asma Köprüsü'nn farklı yapım aşamalarında rüzgâr kuvvetlerinin yapısal davranışa etkileri araştırılabilir.

➤ Osmangazi Asma Köprüsü'nün gelecek yıllardaki araç artış miktarı hesap edilip araç yükleri etkisindeki yapısal davranışı incelenebilir.

#### 4. KAYNAKLAR

- Abdel-Ghaffar, A.M., ve Rubin, L.I., 1983. Vertical Seismic Behaviour of Suspension Bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 1-19.
- Adanur, S., 1997. Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan ve Elastik Zemin Analajisi ile Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Adanur, S., 2003. Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Mauz Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan Deterministik ve Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Adanur, S., ve Günaydın, M., 2010. Construction Stage Analysis of Bosphorus Suspension Bridges, Ninth International Congress on Advances in Civil Engineering, September, Trabzon, Türkiye, CD, ACE2010-SEE-161.
- Adanur, S., Akköse, M., Bayraktar, A., ve Dumanoğlu, A.A., 2011. Simplified Earthquake Analysis of Suspension Bridges by Finite Element Method, International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE.
- Adanur, S., Günaydın, M., Altunışık, A.C., ve Sevim, B., 2012. Construction Stage Analysis of Humber Suspension Bridge, Applied Mathematical Modelling, 36, 5492-5505.
- Aksoğan, O., 1986. Nonlinear Yapı Analizi, Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler, Ed: Ertepinar, A., Wasti, S.T., Aksoğan, O., KTÜ Basımevi, 225-233, Trabzon.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S., ve Domaniç, A., 2009a. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Analizinde Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Deformasyonların Dikkate Alınması, Yapı Dünyası Dergisi, 161, 11-15.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Domaniç, A., ve Adanur, S., 2009b. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Köprülerin Davranışlarının Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, October, Sakarya, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 209-219.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S., ve Domaniç, A., 2010. Construction Stage Analyses of Kömürhan Highway Bridge using Time Dependent Material Properties, Structural Engineering and Mechanics, 36, 2, 207-224.
- Argentini, T., Diana, G., Larsen, A., Pagani, A., Portentoso, M., Somaschini, C., ve Yamasaki, Y., 2013. Comparisons Between Wind Tunnel Tests on a Full Aerolastic Model and Numerical Results of the Izmit Bay Bridge, The 6th European African Conference on Wind Engineering, 7-11 Temmuz, Cambridge, UK.

- Atabey, N.A., 2011. Lifli Polimer Kompozit Asma Köprülerin Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Brownjohn, J.M.W., Dumanoglu, A.A., Taylor, C.A., 1994. Dynamic Investigation of a Suspension Footbridge, Engineering Structures, 16, 395-406.
- CEB-FIP, 1990. the International Federation for Structural Concrete FIP.
- Celasun, H.S., 1981. Asma Köprüler, İ.D.M.M. Akademisi Yayın Müd. Basımevi, İstanbul.
- Chen, W.F., 1999. Structural Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton.
- Chen, W.F., ve Duan, L., 2015. Computational Analysis and Design of Bridge Structures, CRC press.
- Cho, T., ve Kim, T.S., 2008. Probabilistic Risk Assessment for the Construction Phases of a Bridge Construction Based on Finite Element Analysis, Finite Elements in Analysis and Design, 44, 383-400.
- Chopra, A.K., 2012. Dynamics of Structures, Fourth Edition, Pearson Education, Inc., USA.
- Christensen, S.C., 2013. Izmit Bay Suspension Bridge Global Analyses Incorporating Local Sub Models, Long Span Bridges and Roofs-Development, Design and Implementation, IABSE Symposium, Kolkata, September.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 1993. Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw Hill, Inc., Singapore.
- Dumanoglu, A.A., Brownjohn, J.M.W. ve Severn, R.T., 1992. Seismic Analysis of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) Suspension Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 881-906.
- Diana, G., Yamasaki, Y., Larsen, A., Rocchi, D., Giappino, S., Argentini, T., Pagani, A., Villani, M., Somaschini, C., ve Portentoso, M., 2013. Construction Stages of the Long Span Suspension Izmit Bay Bridge: Wind Tunnel Test Assessment, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 123, 300-310.
- Diana, G., Rocchi, D., ve Argentini, T., 2014. Buffeting Response of the Izmit Bay Bridge: Numerical and Experimental Results, İstanbul Bridge Conference, 11-13 Ağustos, İstanbul, Türkiye.
- Günaydın, M., 2011. Asma Köprülerin Yapısal Davranışının Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.

- Günaydın, M., Adanur, S., Altunışık, A.C., ve Sevim, B., 2012. Construction Stage Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge, Structural Engineering And Mechanics, 42: 489-505.
- Günaydın, M., Adanur, S., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, E., 2014. Determination of Structural Behavior of Bosphorus Suspension Bridge Considering Construction Stages and Different Soil Conditions, Steel and Composite Structures, 17, 405-459.
- Karakaplan, A., Caner, A., Kurç, Ö., Domaniç, A., ve Lüleç, A., 2009. Yapı Çözümlemesinde Yeni Bir Devir: Yapım Aşaması, Teknik Dergi, 321, 4905-4917.
- Karataş, H., 1979. Asma Sistemler, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Yayınları.
- Karışlıoğlu, M., 2016. Sismik Zemin Büyütmelerinin İzmit Körfez Geçişi Osman Gazi Asma Köprüsü' nün Dinamik Davranışına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kartal, H., 2018. Eşit Merkez Açıklığa Sahip Uzun Açıklıklı Asma ve Eğik Kablo Askılı Köprülerin Dinamik Davranışının Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Kavak, Y., 2019. Çevresel Titreşim Kaydı ile Fatih Sultan Mehmet (FSM) Asma Köprüsü Elemanlarına ait Kuvvetlerin Tayin Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi/Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü/Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye
- Ko, J.M., Xue, S.D., ve Xu, Y.L., 1998. Modal Analysis of Suspension Bridge Deck Units in Erection Stage, Engineering Structures, 20, 1102-1112.
- Konovalov, A., ve Pustovalova, M., 2018. Performance of a Suspension Bridge with Active Vibration Dampers, MATEC Conference, Arhangelsk, Russia.
- Mabuli, A., 2016. Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün Deprem ve Taşıt Yükleri Altında Yapısal Davranışının Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Materrazi, A.L., ve Ubertini, F., 2015. Vertical Vibration of Suspension Bridges with Damage, AIMETA Conference, Bologna, Italya.
- Memişoğlu, N.A., 2002. Seismic Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi/Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü/Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Merritt, F.S., 1983. Standard Handbook for Civil Engineers, Third Edition, McGraw-Hill, New York.
- Myerscough, M., ve Hayward, C., 2013. Suspension Bridges:past and present, The Structural Engineer, 91, 12-21.

Lyngs, J., Kasper, T. ve Bertelsen, K., 2013. Modelling of Soil-Structure Interaction for Seismic Analyses of the Izmit Bay Bridge, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2-6 Eylül 2013, Paris, Fransa.

PEER Strong Motion Database, 2005. The Regents of the University of California. <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>, 06.03.2019.

Pugsley, S.A.,1968. The Theory of Suspension Bridges, Second Edition, Edward Arnold, London.

SAP2000, 2017. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.

Sorensen, J., Larsen, C.G., ve Fuglsang, K., 2016. Challenging Construction and Erection Methods for the Izmit Bay Suspension Bridge and the 3rd Bosphorus Bridge, Istanbul Bridge Conference, 8-10 Aug., Istanbul, Türkiye.

URL-1, [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/90/Jacobs\\_creek\\_bridge-1.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/90/Jacobs_creek_bridge-1.jpg), 30.12.2010.

URL-2, <https://blog.batchgeo.com/longest-suspension-bridge-spans/>, 22.02.2019.

URL-3, <http://www.sketchup3dconstruction.com/const/various-types-of-suspension-bridge-and-its-usages.html>, 04.01.2019.

URL-4, [www.imoankara.org.tr/Portals/0/CELIK%20KOPRULERIN%20TASARIMI.pdf](http://www.imoankara.org.tr/Portals/0/CELIK%20KOPRULERIN%20TASARIMI.pdf), 23.11.2010.

URL-5, [web.iku.edu.tr/~ecoskun/ASMA%20KÖPRÜLER.doc](http://web.iku.edu.tr/~ecoskun/ASMA%20KÖPRÜLER.doc) AsmaKöprüler, 23 11 2010.

URL-6, [www.imoankara.org.tr/Portals/0/CELIK%20KOPRULERIN%20TASARIMI.pdf](http://www.imoankara.org.tr/Portals/0/CELIK%20KOPRULERIN%20TASARIMI.pdf), 23.11.2010.

URL-7, <https://www.livescience.com/59290-building-golden-gate-bridge-today.html>, 23.06.2019.

URL-8, <https://gazetemanifesto.com/2017/bogazici-koprusu-trafige-kapatiliyor-istanbulda-kapanacak-yollar-ve-alternatif-guzergahlar-105476/>, 23.06.2019.

URL-9, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Xihoumen\\_Bridge.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Xihoumen_Bridge.JPG), 23.06.2019.

URL-10, <http://www.weiku.com/products/19602766/sleevetypesplaysaddlecastingofSteelbridge.html>, 23.06.2019.

URL-11, <https://www.wired.com/2013/07/expansive-photos-of-the-worlds-most-sophisticated-suspension-bridge/>, 23.06.2019.

- URL-12, [https:// www. ekoyapidergisi. org/ 1482- turkiyenin- sembol- projelerine- doka- tecrubesi.html](https://www.ekoyapidergisi.org/1482-turkiyenin-sembol-projelerine-dokatecrubesi.html), 23.06.2019.
- URL-13, <https://www.goverapp.com/etiket/kedi-yolu>, 23.06.2019.
- URL-14, [http://highestbridges.com/wiki/index.php%3Ftitle%3D2012\\_High\\_Bridge\\_Trip\\_Photo\\_Album/Week\\_3](http://highestbridges.com/wiki/index.php%3Ftitle%3D2012_High_Bridge_Trip_Photo_Album/Week_3), 23.06.2019.
- URL-15, [https://www.daelim.co.kr/pr/InfoView.do?cd\\_scrmn\\_cl=&cd\\_advt\\_cl=&searchword=&currentPage=138&cd\\_mnu=KU082&no\\_ntc\\_plte\\_sral=11915](https://www.daelim.co.kr/pr/InfoView.do?cd_scrmn_cl=&cd_advt_cl=&searchword=&currentPage=138&cd_mnu=KU082&no_ntc_plte_sral=11915), 23.06.2019.
- URL-16, [https:// www.blogarti.com/turkiyedeki-koprulerin-yuksekluk-ve-uzunluklari.html](https://www.blogarti.com/turkiyedeki-koprulerin-yuksekluk-ve-uzunluklari.html), 24.01.2019.
- URL-17, <https://www.superhaber.tv/yavuz-sultan-selim-koprusune-cinliler-talip-cikti-haber-140471>, 24.06.2019.
- URL-18, <https://eodev.com/gorev/7683461>, 24.06.2019.
- URL-19, [http:// c12. incisozluk. com. tr/ res/ incisozluk// 11509 /5/ 913885\\_ odd3a.jpg](http://c12.incisozluk.com.tr/res/incisozluk/11509/5/913885_odd3a.jpg), 24.06.2019.
- URL-20, OTOYOL Yatırım ve İşletme AŞ., Proje ile Beklenen Gelişmeler, [http://www.otoyolas.com.tr/?page\\_id=5336](http://www.otoyolas.com.tr/?page_id=5336), 06.03.2019.
- URL-21, OTOYOL Yatırım ve İşletme AŞ., Asma Köprü Fotoğraf Galerisi, [http://www.otoyolas.com.tr/?page\\_id=7690](http://www.otoyolas.com.tr/?page_id=7690), 06.03.2019.
- URL-22, Fuglsang, K., İzmit Bay Bridge, [http:// www. iabse. dk/ Mini-seminar\\_30 maj2013/05 -IZMIT- COW- PRE- DD- GEN-0010\\_1.0\\_IABSE %20 Denmark %20Mini-seminar%202013.pptx%20%5BRead-Only%5D .pdf](http://www.iabse.dk/Mini-seminar_30maj2013/05-IZMIT-COW-PRE-DD-GEN-0010_1.0_IABSE%20Denmark%20Mini-seminar%202013.pptx%20%5BRead-Only%5D.pdf) 03.01.2019.
- URL-23, <https://www.bridgeweb.com/Full-speed-ahead/4016>, 22.01.2019.
- URL-24, <https://www.youtube.com/watch?v=S-GPyyq4dBw>, 07.07.2019.
- Zhang, Y., Yao, S., ve Christie, S., 2013. Non-linear and Equivalent Linear Site Response Analysis for the Izmit Bay Bridge, Proceedings of the 3rd International FLAC /DEMSymposium, 22-24 Ekim, Hangzhou, Çin.

## ÖZGEÇMİŞ

**Hasan ALKASMOU**, 1988 yılında Halep'ta doğdu. İlköğrenimini 1994-1999 yılları arasında Hamza İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini ise 1999-2005 yılları arasında Albuhturi Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında Halep Üniversitesi'nde İnşaat Mühendisliği eğitimine başlayan AKASMOU 2013 yılında mezun oldu. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başladı. İngilizce bilmekte olan ALKASMOU çeşitli mühendislik firmalarında çalışmıştır.

Adanur, S., Alkasmou, H., Günaydin, M., ve Altunişik, A.C., 2018. Dynamic Analysis of Osman Gazi Suspension Bridge, 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering, İzmir, Türkiye, 24-27 Nisan 2018, pp.1-10

Günaydin, M., Alkasmou, H., ve Adanur, S., 2019. Modal and Static Behavior of İzmit Bay Suspension Bridge, Advancements in Civil Engineering and Architecture, Trabzon, Türkiye, 17-20 Nisan, pp.1326-1331.