

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ASMA KÖPRÜLERİN YAPISAL DAVRANIŞININ  
YAPIM AŞAMALARI DİKKATE ALINARAK BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Murat GÜNAYDIN**

**OCAK 2011  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ASMA KÖPRÜLERİN YAPISAL DAVRANIŞININ  
YAPIM AŞAMALARI DİKKATE ALINARAK BELİRLENMESİ**

**İnş. Müh. Murat GÜNAYDIN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“İnşaat Yüksek Mühendisi”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.12.2010  
Tezin Savunma Tarihi : 19.01.2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR** 

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ** 

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Coşkun HAMZAÇEBİ** 

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Trabzon 2011**

## ÖNSÖZ

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

“Asma K öprülerin Yapısal Davranışının Yapım Aşamaları ve M alzeme Deformasyonları Dikkate Alınarak Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Yrd. D oç. D r. S üleyman ADANUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca çok büyük desteklerini gördüğüm, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım Hocalarım Yrd. Doç. Dr. Barış SEVİM'e ve Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a teşekkürlerimi sunmayı büyük bir borç bilirim.

Hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız, en zor zamanlarımda hep yanımda olan değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Mahmut SARI'ya, Dr. Melik İNCE'ye, İnş. Müh. Coşar ATAGÜL'e, Biyolog Mustafa GÜNAYDIN'a ve İnş. Müh. Murat YAŞARYILDIZ'a şükranlarımı sunarım.

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

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren başta babaannem Sebahat GÜNAYDIN'a, anneme, babama, kardeşlerime, halalarım, amcalarım ve ailemin tüm fertlerine müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca bana bilgi ve tecrübeleriyle yön gösteren ve destek olan amcam Prof. Dr. İhsan GÜNAYDIN'a teşekkür eder; bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Murat GÜNAYDIN  
Trabzon 2011

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Asma Köprülerin Yapısal Davranışları ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği .....	8
1.4. Asma Köprülerin İnşasında Tarihsel Gelişim.....	9
1.5. Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları.....	16
1.5.1. Ankraj .....	17
1.5.2. Ana Kablo .....	17
1.5.2.1. Tel Grupları .....	18
1.5.2.2. Çelik Halatlar .....	18
1.5.2.3. Paralel Tel Grupları .....	18
1.5.3. Kule.....	19
1.5.4. Askılar.....	20
1.5.5. Tabliye .....	20
1.6. Asma Köprülerin Analitik Modellenmesi .....	21
1.6.1. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması.....	21
1.6.2. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması .....	22
1.6.2.1. Basınç Dayanımı.....	23
1.6.2.2. Betonun Yaşı .....	23
1.6.2.3. Betonun Büzülmesi.....	24
1.6.2.4. Betonun Sünmesi .....	25

1.6.2.5.	Çeliğin Relaksasyonu (Gevşemesi) .....	26
1.7.	Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Dinamik Formülasyon .....	27
1.7.1	Kiriş Eleman İçin Geometrik Rijitlik Matrisinin Hesaplanması .....	28
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	34
2.1.	Giriş .....	34
2.2.	Boğaziçi Köprüsü .....	34
2.2.1.	Boğaziçi Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri.....	34
2.2.2.	Boğaziçi Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması .....	36
2.2.3.	Boğaziçi Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi .....	44
2.2.3.1.	Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları.....	51
2.2.3.2.	Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri .....	51
2.2.3.2.1	Tabliye Davranışı.....	53
2.2.3.2.2	Kule Davranışı .....	54
2.3.	Humber Köprüsü .....	56
2.3.1.	Humber Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri.....	56
2.3.2.	Humber Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması .....	58
2.3.3.	Humber Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi .....	60
2.3.3.1.	Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları.....	67
2.3.3.2.	Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri .....	67
2.3.3.2.1	Tabliye Davranışı.....	69
2.3.3.2.2	Kule Davranışı .....	70
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
4.	KAYNAKLAR .....	76

ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, asma köprülerin yapısal davranışlarının, yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, İstanbul'da bulunan asma köprülerden Boğaziçi Köprüsü ve İngiltere'de Severn Nehri üzerinde bulunan Humber Köprüsü örnek olarak seçilmiştir.

Bu tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; asma köprülerin yapısal davranışı ile ilgili yapılmış çalışmalar, asma köprülerin inşasında tarihsel gelişim, asma köprülerin elemanları, 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. İlk olarak Boğaziçi Köprüsü'nün ve Humber Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Sonra lineer statik analizlerin yanında yapım aşamaları ve zamana bağlı malzeme deformasyonları dikkate alındığı analizler gerçekleştirilmiş ve köprünün yapısal davranışı belirlenmiştir. Yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının analizlerdeki etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde betonun zamana bağlı dayanım değişimi, elastisite modülünün değişimi, sünme ve rötre etkileri ile çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Köprülerin her iki analiz durumu için elde edilen yerdeştirmeler ve kesit te sirleri birbiriyle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır. Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Asma Köprüler, Boğaziçi Köprüsü, Humber Köprüsü, Sonlu Eleman Analizi, Yapım Aşamaları, Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonu.

## SUMMARY

### **Determination of Structural Behavior of Suspension Bridges considering Construction Stage and Time Dependent Material Properties**

In this thesis, it is aimed to perform the construction stage analysis of suspension bridges considering construction stage and time dependent material properties. For this purpose, Bosphorus Suspension Bridge and Humber Suspension Bridge are selected as examples.

Three main sections are considered in this thesis. In the first section of the thesis; background of structural behavior of suspension bridges, historical development of the construction of bridges, elements of suspension bridges, construction stage analysis methods, and formulation of these methods are represented. In the second section of the thesis, studies and findings from these studies are considered. Finite element models of Bosphorus and Humber Bridge are constituted using SAP2000 program. Besides linear static analysis, the structural behavior of bridges are determined considering construction stage and time dependent material properties. Two different finite element analyses with and without construction stages are carried out and results are compared with each other. As analyses result, variation of displacements and internal forces such as bending moment, axial forces, and shear forces for the bridge deck and towers are given with detail. In the analysis, creep, shrinkage, and steel relaxation are considered as time dependent material properties. In the third section of the thesis; conclusions and some suggestions related to the thesis study are represented. Lastly, references and autobiography are represented.

**Key Words** : Suspension Bridges, Boğaziçi Suspension Bridge, Humber Suspension Bridge, Finite Element Analysis, Construction Stage, Time Dependent Material Properties.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Jacobs Creek Köprüsü .....	10
Şekil 1.2. Brooklyn Köprüsü .....	12
Şekil 1.3. Manhattan Köprüsü .....	12
Şekil 1.4. Tacoima Köprüsü .....	13
Şekil 1.5. Tipik bir asma köprü örneği .....	16
Şekil 1.6. Örnek bir ankraj sistemi .....	17
Şekil 1.7. Asma köprülerde kullanılan tel çeşitleri.....	18
Şekil 1.8. Asma köprülerde kullanılan çelik halat çeşitleri .....	18
Şekil 1.9. Asma köprülerde kullanılan paralel tel grupları.....	19
Şekil 1.10. Asma köprülerde kullanılan kule tipleri .....	19
Şekil 1.11. Asma köprülerde kullanılan tabliye çeşitleri .....	20
Şekil 1.12. Kiriş elemana ait yerdeğiştirmeler. ....	29
Şekil 2.1. Boğaziçi Köprüsü .....	37
Şekil 2.2. Boğaziçi Köprüsü genel görünüşü .....	38
Şekil 2.3. Boğaziçi Köprüsü kule görünüşü .....	38
Şekil 2.4. Boğaziçi Köprüsü kablo kesitleri .....	39
Şekil 2.5. Boğaziçi Köprüsü tabliye kesiti .....	39
Şekil 2.6. Boğaziçi Köprüsü viyadük kesiti .....	40
Şekil 2.7. Boğaziçi Köprüsü kule ayak temelleri .....	40
Şekil 2.8. Boğaziçi Köprüsü ankraj kesiti .....	41
Şekil 2.9. Boğaziçi Köprüsü iki boyutlu sonlu eleman modeli .....	41
Şekil 2.10. Boğaziçi Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli.....	45
Şekil 2.11. Öngerilmeli çelik için gerilme şekil-değiştirme (a) ve zamana bağlı malzeme özellikleri değişimi (b) diyagramları .....	46
Şekil 2.12. Boğaziçi Köprüsü kulelerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	46
Şekil 2.13. Boğaziçi Köprüsü ana kablo yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	48
Şekil 2.14. Boğaziçi Köprüsü tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	50



Şekil 2.15.	Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule, tabliye ve kablolarla ait yerdeğiştirme değerleri .....	52
Şekil 2.16.	Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değışimi .....	53
Şekil 2.17.	Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değışimi .....	54
Şekil 2.18.	Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değışimi .....	55
Şekil 2.19.	Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin kule yüksekliği boyunca değışimi.....	55
Şekil 2.20.	Humber Köprüsü .....	57
Şekil 2.21.	Humber Köprüsü genel görünüşü .....	58
Şekil 2.22.	Humber Köprüsü kule görünüşü .....	58
Şekil 2.23.	Humber Köprüsü tabliye kesiti .....	59
Şekil 2.24.	Humber Köprüsü iki boyutlu sonlu eleman modeli .....	59
Şekil 2.25.	Humber Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli.....	61
Şekil 2.26.	Beton (a) ve öngerilmeli çelik (b) için kullanılan gerilme-şekil değıştirme diyagramları.....	62
Şekil 2.27.	Beton için zamana bağlı malzeme özelliği değışimleri.....	62
Şekil 2.28.	Öngerilmeli çelik için zamana bağlı malzeme özelliği değışimi .....	63
Şekil 2.29.	Humber Köprüsü kulelerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	63
Şekil 2.30.	Humber Köprüsü ana kablo ve tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar .....	65
Şekil 2.31.	Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule, kablo ve tabliye ait deformasyon değerleri.....	68
Şekil 2.32.	Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değışimi .....	69
Şekil 2.33.	Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değışimi .....	70
Şekil 2.34.	Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değışimi.....	71

Şekil 2.35. Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	71
--	----

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Bazı önemli asma köprüler (URL-5, 2010).....	15
Tablo 2.1. Boğaziçi köprüsü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri (Dumanoğlu ve Severn, 1985).....	42
Tablo 2.2. Boğaziçi köprüsü ile ilgili bazı teknik bilgiler (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).....	43

## 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
$I$	Atalet momenti
$[K]$	Rijitlik matrisi
$[K_E]$	Elastik rijitlik matrisi
$[K_G]$	Geometrik rijitlik matrisi
$L$	Eleman uzunluğu
$P$	Kuvvet
$\{P\}$	Yük vektörü
$RH$	% olarak atmosferdeki nem oranı
$t$	Zaman
$t_0$	Yükleme anındaki betonun yaşı
$U_i$	Şekildeğiştirme enerjisi
$v$	Yerdeğiştirme
$\{v\}$	Toplam yerdeğiştirme vektörü
$\beta_{cc}(t)$	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
$\xi$	Sönüm oranı

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Köprüler, insanoğlunun varoluşundan beri hayatını kolaylaştıran en önemli mühendislik yapılarından biridir. Eski zamanlardan beri köprüler, akarsuları, derin vadileri, hatta kıtaları geçmeyi sağlayarak insanları birbirlerine kavuşturmaktadır. Eski zamanlarda yapılan köprüler dar, küçük açıklıklı ve hafif yükleri taşıyabilecek nitelikte, kâgir ve ahşap malzemelerden yapılırken; günümüzde bu köprülerin yerini betonarme ve çelik köprüler almıştır. Bu amaçla günümüzde geniş, büyük açıklıklı ve ağır yükleri taşıyabilecek betonarme ve çelik köprüler inşa edilmektedir.

Bu tip yapılar arasında 550 m'den daha uzun olan asma köprüler, gerek büyük açıklıkların geçilmesi gerekse köprü altında kalan alanların rahatça kullanılabilmesi açısından benzerlerinden daha ekonomik mühendislik yapılarıdır. Asma köprüler mühendislik açısından önem katsayısı yüksek yapılarıdır. Bu tarz köprülerinin yüksek yapım maliyetleri ve buldukları bölgelerdeki lojistik önemleri dikkate alındığında, bu tür mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Çünkü bu tür köprülerin zarar görmesi, can ve mal kaybının yanında şehirlerarası ulaşım bağlantısının da yok olması anlamına gelmektedir (Altunışık, 2010).

Asma köprülerin yapısal davranışlarının belirlenmesinde genellikle sonlu eleman analizleri kullanılmaktadır. Analizler bilimsel dünyada kabul edilmiş ve yaygın olarak kullanılan sonlu eleman paket programları ile gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerde inşa edilecek olan yapının statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan davranışları belirli kabuller dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu kabullerin başında, yapıların sanki bir an içerisinde inşa edildiği, yüklendiği ve malzeme özelliklerinin inşa süresince değişmediği sıralanabilmektedir. 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).

## **1.2. Asma Köprülerinin Yapısal Davranışı ile İlgili Çalışmalar**

Bu kısımda, asma köprülerinin yapısal davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlendiği çalışmalara yer verilmektedir. 1900 yılların başlarından itibaren yapıların yapısal davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlemeye çalışılmıştır. İlerleyen bilgisayar teknolojisi ve analiz yöntemlerini de dikkate alarak, günümüze kadar asma köprüler ile ilgili yapılan birçok analitik çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu nedenle, tezin literatür kısmında genellikle son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalara yer verilmektedir.

Asma köprülerinin dinamik karakteristiklerinin ve dinamik etkiler altındaki davranışlarının analitik olarak belirlenmesi konusunda geçmişten günümüze kadar 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 alınmış ve 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.

Brownjohn vd. , (1987), tabliye ve kulelerin yanal ve düşey titreşim karakteristiklerini belirlemek için Humber Köprüsü'nün rüzgar ve trafik nedeniyle oluşan titreşim ölçümlerini yapmışlardır. Deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Teorik model ve veri analiz teknikleri açıklanmıştır.

Brownjohn vd. , (1989), Boğaziçi Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini elde etmek için trafik ve rüzgar hareketlerini kullanmışlardır. Gerekli sayıda mod sayısı alınarak analizler yapılmıştır. Bu modlar ve bu modlara karşılık gelen ve üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen modlar arasında detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır.

Brownjohn vd., (1992), rüzgâr ve trafik gibi dinamik etkilerden dolayı, Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün tabliye, kule, kablo ve askıları üzerindeki yerel ivmeleri ölçmüşlerdir. Bu çalışmalar, köprünün sismik analizleri için kullanılan matematik modelin geçerliliğini göstermek için yapılmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü, Boğaziçi Köprüsü ve Humber Köprüleri'nin dinamik davranışları, yükleme ve yapısal tasarımdaki farklılıklar açısından incelenmiştir.

Dumanoğlu vd., (1992), Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini köprünün sonlu eleman modelini kullanarak doğal frekans ve mod şekilleri cinsinden elde etmişlerdir. Bu serbest titreşim verilerine bağlı olarak, üç ortogonal ekseninde farklı dalga hızlarında meydana gelen deprem hareketine karşı köprünün asinkronize davranışı ile düşey harekete karşı stokastik davranışı için ayrı analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar köprünün sismik yüklemeye karşı dinamik davranışını tayin etmek için kullanılmıştır. Modern asma köprülerin farklı tasarım özelliklerinin ilişkisi ve bu tip köprülerin dinamik davranışları araştırılmıştır. Çalışmada, sismik davranışın öneminin yanında asinkronize hareketin etkilerinin de önemli olduğu ve göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.

Monti vd., (1996), mesnetlerinden farklı dinamik etkilere maruz köprülerin lineer olmayan stokastik davranışı için nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Üni form ve üniform olmayan yer hareketleri için değişen rijitlik ve süneklikteki köprüler projelendirilmiş ve detaylı olarak incelenmiştir. Üni form yer hareketi için projelendirilen ve üniform olmayan yer hareketi için incelenen köprüde merkez a yaklardaki kuvvetlerin fazla çıktığı, kenara yaklara yakın noktalarda ise tersi bir durumun gözlemlendiği belirtilmiştir.

Rassem (1992) ve Rassem vd., (1996), alüvyonlu olduğu kabul edilen bir vadide bulunan farklı noktalarda serbest yüzey hareketlerini hesaplayıp Humber Köprüsü'nün mesnetlerine uygulamış ve mesnetlerinde değişen yer hareketi bulunan köprünün dinamik davranışını belirlemişlerdir. Vadinin farklı iki yakasındaki zeminlerin güçlendirilmesindeki değişimden dolayı mesnet noktalarındaki yer hareketlerinin genlik ve frekanslarının farklı olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada, yumuşak ve sert zemin olmak üzere iki zemin sınıfı kullanılmıştır. Zemin şartları ve topoğrafik yapı; mesnet hareketlerinin büyüklüğü üzerinde önemli değişikliklere sebebiyet verdiğinde analizlerde değişen yer hareketinin de hesaba katılması gerektiği belirtilmiştir. Köprüyü etkileyen yer hareketlerinin daha iyi değerlendirilebilmesi için zemin sınıfı, kıyı topoğrafik yapısı ve

köprü mesnetlerinin vadideki yeri analizlerde göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.

Adanur (1997), asma köprülerin P- $\Delta$  etkileri dikkate alınarak geometrik olarak lineer olmayan dinamik analizleri, elastik zemin analogisine göre yapılan basitleştirilmiş analizleri ve zıt-fazlı deprem etkileri için farklı tür analizleri gerçekleştirmiştir. Analizlerde örnek olarak İstanbul'da inşa edilmiş olan Boğaziçi Köprüsü seçilmiştir. Boğaziçi Köprüsü'nün eğilebilir (narin) kuleleri, kutu kesitli ve aerodinamik forma sahip tabliyesi ve eğik askıları köprünün örnek olarak seçilmesinde önemli parametrelerdir. Ayrıca, modern yapısı ve iki kulesi arasındaki 1074 m açıklığı analizler arasındaki farklılıkların daha belirgin bir şekilde görülmesine imkân vermiştir.

Zemby (1997), değişen yer hareketi etkisindeki dört açıklıklı bir köprü sistemini rastgele titreşim teorisine bağlı olarak incelemiş ve zahiri-statik ve dinamik bileşenlerin etkilerini araştırmıştır. Dinamik etkilerin temel parametreleri tanımlanmış ve bu parametrelerin yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, yerdeğiştirmelerin üniform harekete oranla daha küçük bulunduğu belirtilirken, eleman kuvvetlerinin dalga yayılma hızına ve açısına bağlı olarak daha küçük veya daha büyük tepki değerleri verebileceği ifade edilmektedir.

Nazmy (1998), uzun açıklıklı asma, kablolu ve keşmer köprülerinin dinamik davranışlarını incelemiştir. Köprü modelleri üç boyutlu olarak modellenmiş, analizlerde lineer olmayan etkiler dikkate alınmıştır. Ayrıca, yer hareketindeki değişimler de dikkate alınmıştır. Çalışmada, söz konusu köprü sistemlerinin üç boyutlu lineer olmayan analizlerinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, bu tür köprüler için değişerek yayılan yer hareketinin dikkate alınmasının gerçeğe daha yakın sonuçların elde edilmesinde etkili olacağı belirtilmiştir.

Ko vd., (1998), Hong-Kong'da bulunan ana açıklığı 1377 m ve toplam uzunluğu 2160 m olan Tsing Ma asma köprüsünün yapımı esnasında köprü tabliyesinin modal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, tabliyenin doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Adanur ve Dumanoğlu (2002), asinkronize yer hareketine maruz asma köprülerinin geometrik olarak lineer olmayan stokastik analizini incelemiştir. Analizlerde yer hareketinin çeşitli sonlu hızları yanında, üniform yer hareketine karşılık gelen sonsuz hızla da yayıldığı kabul edilmektedir. Çalışma sonucunda, deterministik analizlerde



olduğu gibi stokastik analizlerde de dalga yayılma hızı azaldıkça, tepkilerin arttığı vurgulanmıştır.

Adanur (2003), m esnetlerinden farklı dinamik etkilere maruz asma köprülerin yapısal davranışlarını, geometrik olarak lineer olmayan deterministik ve stokastik analizlerin gerçekleştirilmesiyle belirlemiştir. Deterministik analizlerde yer hareketi olarak 1971 yılında meydana gelen San Fernando depreminin S16E bileşeni ile 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni kullanılmıştır. Stokastik analizlerde ise yer hareketi olarak Clough ve Penzien (Clough ve Penzien, 1993) tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, mesnetlerdeki farklı yer hareketlerinin asma köprüler üzerinde önemli etkiler oluşturduğu ortaya koyulurken, bu etkilerin asma köprüler gibi uzun açıklıklı yapı sistemlerinin analizlerinde dikkate alınması gerektiği de vurgulanmıştır.

Cheng vd., (2003), Çin'de bulunan ve dünyanın en büyük ana açıklıklı (550 m) çelik kemer köprüsü olan Lupa Köprüsünün iki yapım aşaması sırasında rüzgâr etkisi altındaki davranışını incelemiştir. Birinci yapım aşamasında, ana açıklık kemeri kapatılmadan önce maksimum konsollu bir sistem dikkate alınmıştır. İkinci yapım aşamasında ise, ana açıklık kirişi hariç köprü sisteminin tamamen tamamlandığı durum dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, ikinci modelin rüzgâr etkilerine karşı daha hassas olduğu vurgulanmıştır.

Wang vd., (2004), dengeli konsol yöntemi kullanılarak inşa edilen asma köprülerin farklı yapım aşamaları dikkate alınarak yapısal davranışlarının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada iki sayısal süreç üzerine durulmuştur; birinci süreçte ileriye dönük süreç analizi gerçekleştirilmiştir, diğ erinde ise geçmiş süreç analizi gerçekleştirilmiştir. Birinci yöntem köprü inşasındaki birbirini takip eden inşa aşamalarını sonraki yöntem ise inşa yöntemini geriye dönük uygulanmasıdır. Her iki yöntemde de köprü yapımının inşa aşamasındaki başlangıç şekillerinin bulunmasında başarı ile uygulanabilmektedir. Yapılan analiz sonuçlarına göre köprü şekli tasarlanıp inşa edilmektedir. Yapılan çalışmada estetik görünüm, ekonomik şartlar ve inşa kolaylığı açısından açıklık mesafesi 200 m'den 1000 m'ye, yani orta açıklıktan uzun açıklığa kadar olan köprülerde asma köprü modelinin daha uygun olduğunu vurgulanmıştır. Çalışmada, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen asma köprülerin sonlu eleman yöntemi kullanılarak başlangıç şekil analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu nedenle, her iki doğrusal ve

doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak ileriye dönük ve geçmiş süreç analizleri gerçekleştirilmiştir.

Alp (2007), Yaygın yöntemlerle yapılan yapısal analiz sonuçlarının kademeli yükleme etkisi göz önüne alınarak yapısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasını incelemiştir. Yapılan çalışma kapsamında, yükleme etkisini göz önüne alan ve üç boyutlu yapı analizini gerçekleştiren bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Kademeli yükleme etkisi göz önüne alınarak gerçekleştirilen yapı analiz sonuçlarının klasik analiz yöntemleriyle gerçekleştirilen yapı analiz sonuçlarından farkı bu bilgisayar programı yardımıyla ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda, düzensiz yapılar için kademeli analiz yönteminin son derece önemli olduğu çözülen farklı örneklerle vurgulanmıştır. Bilgisayar programı, klasik analiz yöntemlerinden farklı olarak bazı düğüm noktalarında %69.09'lara varan fazla deplasman tespit etmiştir. Bu nedenle klasik analiz yöntemlerinin düzensiz yapılarda kullanışlı olmadığı, bu yöntemler yerine kademeli analiz yöntemlerinin kullanılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca yapı elemanlarının kesit tesirleri ve özellikle mesnet reaksiyonlarının inanılmaz ölçüde büyümesi yapı güvenliği açısından son derece tehlikeli olduğu belirtilmiştir.

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 belirtilmiştir. Bu amaçla, hayali inşa edilen bir asma köprüdeki yapım aşamaları esnasında ana kablo halatlarındaki nihai limit durumlarında meydana gelebilecek kopmalar için risk değerlendirilmeleri yapılmıştır.

Karakaplan vd., (2009), yapım aşamaları dikkate alınarak elde edilen analiz sonuçlarının klasik çözümleme sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak incelenmesi amacıyla seçilen bir yaya köprüsünün, bir öngerilmeli karayolu köprüsünün ve çok katlı bir binanın sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, ardgermeli dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen köprülerde ve uzun açıklıklı gergin eğik askılı köprülerde yapım aşamalarının mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Adanur ve Günaydın (2010), İstanbul'da bulunan ve Asya ile Avrupa'yı birbirine bağlayan 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.

Altunışık vd., (2010), uzun açıklıklı, değişken kesitli ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen betonarme karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Örnek olarak, Elazığ-Malatya karayolu üzerinde bulunan K. Ömürhan Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, yapım aşamalarını dikkate alınmadığı analizlerde gerçekleştirilmiş, elde edilen verilerin karşılıklı olarak irdelenmesi sonucunda karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının belirlenmesinde bu analiz yönteminin çok etkili olduğu belirtilmiştir.

Ateş (2010), uzun açıklıklı, betonarme kutu kesitli ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmıştır. Örnek olarak Artvin-Erzurum karayolu üzerinde bulunan Budan Köprüsü seçilmiştir. Köprü, toplam 350 m uzunluğunda ve 15 m genişliğinde, orta açıklık 165 m ve kenar açıklıklar 92.5'er m olmak üzere toplam üç açıklıktan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında, yapım aşamalarını dikkate alınmadığı analizlerde gerçekleştirilmiş, elde edilen verilerin karşılıklı olarak irdelenmesi sonucunda karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının belirlenmesinde bu analiz yönteminin çok etkili olduğu belirtilmiştir.

Malm ve Sundquist (2010), dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Örnek olarak, İsveç'te bulunan Gröndal ve Alvik köprüleri örnek olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin yapım aşamasında tahmin edilenden daha büyük yer değiştirmelerin meydana gelebileceği belirtilmiştir. Bu yer değiştirmelerin sebebinin rötre, sünme ve sıcaklık etkilerinden meydana gelebileceği ifade edilmiştir. Çalışma kapsamında, zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin yapısal davranışına önemli etkileri olduğu vurgulanmıştır.

### 1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmasının ilk kısmında asma köprülerinin lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik davranışlarını belirlemek 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, asma köprülerinin yapısal davranışlarının yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Ülkemizde bulunan Boğaziçi Köprüsü ve İngiltere’de bulunan Humber Köprüsü uygulama olarak seçilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; asma köprülerin yapısal davranışı ile ilgili yapılmış çalışmalar, asma köprülerin inşasında tarihsel gelişim, asma köprülerin elemanları, 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. Boğaziçi Köprüsü ve Humber Köprüsü iki boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturuldu. Lineer statik analizlerin yanında yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizler gerçekleştirilerek köprünün yapısal davranışı belirlenmiştir. 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. Analizlerde betonun zaman bağlı dayanım değişimi, elastisite modülünün değişimi, sünme ve rötre etkileri ile çeliğin relaksasyonu

dikkate alınmıştır. Köprülerin her iki analiz durumu için elde edilen yerdeğişirmeler ve kesit tesirleri birbiriyle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

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

#### **1.4. Asma Köprülerin İnşasında Tarihsel Gelişim**

Asma köprüler, tekniğin geliştirdiği yeni buluşlardan olmayıp, en eski çelik köprü türüdür. Doğu Asya, Güney Amerika ve Ekvator Afrika'sında çok eski zamanlarda, ilkel şekilde asma köprüler kullanılmıştır. 4. yüzyılda yazılmış bir eserde (Pugsley, 1968; Celasun, 1981) İndüs Nehri üzerinde, Swat yakınlarında halatlı bir köprüden bahsedilmektedir.

Assam'daki ilkel asma köprülerde kule olarak ağaçlar kullanılmış ve bunlar Hint kamışından (bambu) inşa edilerek düşey çubuklarla bir veya iki ana kabloya asılmışlardır. Benzer köprülere Himalayalar'da ve Burma gibi bazı Güneydoğu Asya bölgelerinde rastlanır. Bu köprülerin bazılarının kabloları söğüt veya üzüm asmasından yapılmıştır. F.W. Robins bu ilkel köprülerden bazılarının fotoğraflarını basmıştır. Bu köprülerden Jawa'da bulunan bir tanesi şekil olarak oldukça modern görünümlüdür (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Asma köprüler Güney Amerika'da, İnkalar tarafından eskiden beri kullanılmaktaydı. Kablolar öd ağacı veya burulmuş söğütten yapılmış, kuleler doğal kayalardan oluşturulmuş ve ankrajlar kayalara monte edilen kalın ahşap enleme kirişlere kabloları bağlamak suretiyle inşa edilmişti. Bu köprülerin bir kaç yıl arayla onarılması ve kablolarının yenilenmesi zorunluydu. Yakın köylüler bu bakım çalışmasından sorumlu tutuluyordu (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Ekvator Afrika'sı yerlileri, ağaç tepeleri arasında kurdukları asma köprülerin taşıyıcı halatlarını, çeşitli sürüngen bitkilerden yapmışlardı. İlkel olmakla birlikte bazen kazıklarla zeminde ankrajlar oluşturmuşlardı (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

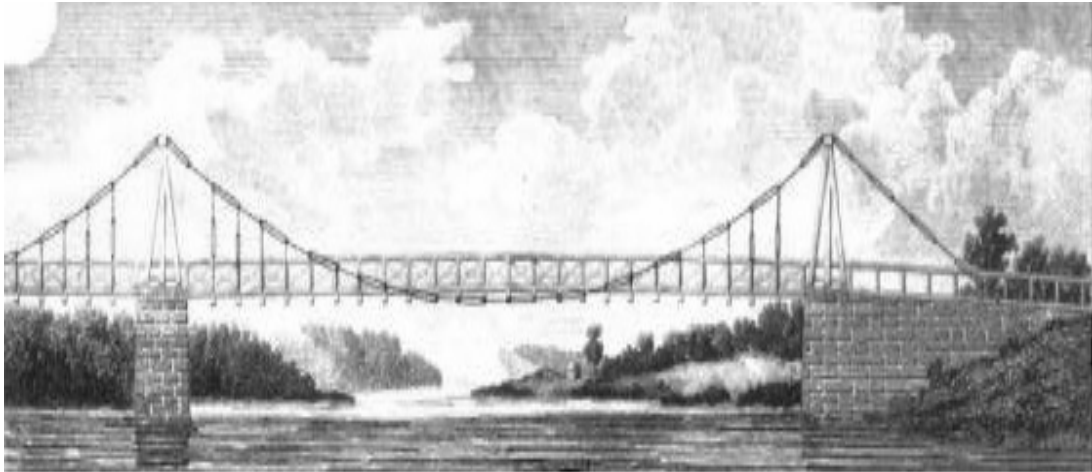
Doğal halatlarla yapılmış bu ilk doğal asma köprülerin, metal kablolar yardımıyla yapılması ilk kez Çin'de olmuştur. Navier, "Memoires sur les ponts suspendus (1983)" adlı kitabında, Çin'de, Pan-Po Nehri üzerinde Demir Köprü adıyla bilinen ve Miladi 65 yılında Çinli bir general tarafından inşa ettirildiği söylenen, bir demir zincirli köprüden bahsetmektedir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Çin’de ve ilk Tibet köprülerinin bazılarında, halatların yerini yaklaşık olarak 25 mm çapında çubuklardan oluşan, halkaları bağlı demir çubuklar almıştır ve kuleler bazen kargir olarak yapılmıştır. Bu tür köprülere güzel bir örnek olarak, 1632 yıllarında Hwa Kiaya Nehri üzerinde inşa edilmiş olup halen mevcut olan ve 16 adet demir zinciri bulunan, 60 m açıklığındaki köprü gösterilebilir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

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. Sonraları zincir yerine delikli çubukların kullanıldığı da olmuştur. İlk yapılan zincir köprülerin çoğu şiddetli rüzgarlarda salınımlardan zarar görmüşler ve çökmüşlerdir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Amerika’daki ilk demir asma köprüsü, Pennsylvama’da 1796 yılında James Finley tarafından yapılan Jacobs Creek Köprüsü’dür (Şekil 1.1) (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

Asma köprüler üzerinde ilk kitap Navier tarafından 1823 yılında yazılan ve 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 1.1. Jacobs Creek Köprüsü (URL-1, 2010).

İngiltere’de 19. yüzyılın ikinci çeyreğinde rijit asma köprüleri dikkate alınarak birçok deneysel çalışma yapılmıştır. James Dredge düşey askı çubukları yerine, kulenin tepesinden çıkararak açıklığın ortasına doğru uzanan eğik askılar kullanmakla köprü rijitliğinin artacağını ileri sürmüştür. Bu tarihe kadar inşa edilen köprülerin açıklığı 150 m’yi geçmiyordu. 1858 yılında Rankine asma köprülerle ilgili elemanter teoriyi geliştirmiştir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

19. yüzyılın ikinci yarısında kablo ile rijitlik kirişinin tesirleri daha iyi anlaşılmasına başlanmıştır. Amerika’da John A. Roebling 250 m açıklığındaki Niyagara Şelalesi Köprüsü’nde her üç metodu (düşey askılarla normal kablo, kule tepesinden çıkan eğik kablo ve büyük yükseklikli ağır rijitlik kirişleri) bir arada kullanmıştır. John A. Roebling, büyük açıklıklı köprülerde büyük ölü ağırlığın rijitliği artırıcı tesirini hissi olarak anlamış; aynı zamanda, bu suretle elde edilen rijitliğin tek başına rüzgârdan ileri gelen salınım tesirlerine karşı koyamayacağını da düşünmüştür. Bir taraftan da asma köprüler için tel kablolar imal etmeye çalışmıştır. Bütün bu gayretlerin sonucunda, John A. Roebling ve ölümünden sonra, 1883 yılında 487 m açıklığındaki Brooklyn Köprüsü inşa edilmiştir (Şekil 1.2) (Pugsley, 1968; Celasun, 1981). Asma köprülerin modern çağının başlangıcı Brooklyn Köprüsü’nün tasarım ve yapımıyla ortaya çıkarılmıştır. Niyagara Köprüsü’nde rijitlik kirişinin yüksekliği açıklığın 1/50’si iken, Brooklyn Köprüsü’nde bu oran 1/90’a düşmüştür. Brooklyn Köprüsü dünyanın sekizinci harikası olarak ilan edilmiştir (Bulson vd., 1983).

Celeste Clericetti, C.B. Bender ve Maurice Levy (Pugsley, 1968) asma köprülerin elastik teorisini geliştirmişlerdir (1880-1886). Asma köprülerin elastik teorisini geliştirilirken, Castigliano’nun deformasyon enerjisi teorisinin kemerlere uygulanmasından ve Navier’in çalışmalarından yararlanılmıştır. Asma köprüler konusunda elastik teoriye göre daha hassas olan sehim teorisinden, J. Melan’ın çalışmalarından yararlanan D.B. Steinman tarafından, 1906 yılında bahsedilmiştir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).

1888 yılında J. Melan asma köprülerin lineer olmayan analizini geliştirmiştir. Bu teori ilk defa L.S. Moisseiff ve F.E. Turneure tarafından 1909 yılında Gustav Lindenthal’ın yaptığı 448 m açıklığındaki Manhattan Köprüsü hesaplarına uygulanmıştır (Şekil 1.3). 1913 yılında yine D.B. Steinman, J. Melan’ın çalışmalarından yararlanarak önemli aşamalar kaydetmiştir. Teorinin dayandığı diferansiyel denklemin çözümünü S. Timoshenko Fourier trigonometrik serilerini kullanarak, Southwell ise rölaksasyon

yöntemini kullanarak göstermişlerdir. H. Bleich, Melan metodunun lineerizasyonunu ve böylece basitliğin sağlanmasını gerçekleştirmiştir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981).



Şekil 1.2. Brooklyn Köprüsü (URL-2, 2010).



Şekil 1.3. Manhattan Köprüsü (URL-3, 2010).



1940 yılında, Tacoma Köprüsü yapımı tamamlandıktan üç ay gibi kısa bir zaman sonra yıkılmıştır (Şekil 1.4). Araştırmalar sonucunda, köprünün rüzgârdan meydana gelen salınımlara karşı koyamadığı için yıkıldığı anlaşılmıştır. Yani titreşime karşı burulma rijitliğinin az oluşu köprünün yıkılmasına neden olmuştur. Köprünün kafes kirişli tabliyesi de rüzgârdan meydana gelen salınımları artırmış ve köprünün yıkılmasında önemli rol oynamıştır. Bu yüzden dolayı 1940 yılından sonra asma köprü inşasında yeni arayışlara gidilmiştir. Arayışlar sonunda kutu keşitli ve aerodinamik forma sahip asma köprü tabliyeleri inşa edilmiştir(Abo-Hamid ve Utku, 1978).



Şekil 1.4. Tacoma Köprüsü (URL-4, 2010).

Şekil 1.4'ün devamı



Önemli köprülerin inşası birbirini izlemiştir. Bunlardan bazıları buldukları yerler, trafiğe açılış tarihleri ve uzunlukları ile Tablo 1.1'de verilmektedir.

Bu köprülerden, Severn, Boğaziçi ve Humber Köprüleri eğik askılı, diğerleri ise düşey askılı olarak yapılmıştır. Boğaziçi Köprüsü'nün kenar açıklıkları ana kablolarla asılı olmayıp, zemine inşa edilmiş temeller üzerine oturtulmuştur. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nde ise kenar açıklık bulunmamaktadır (TCK, 1983; Dumanoğlu ve Severn, 1985; Brownjohn vd., 1992; Dumanoğlu vd., 1992).

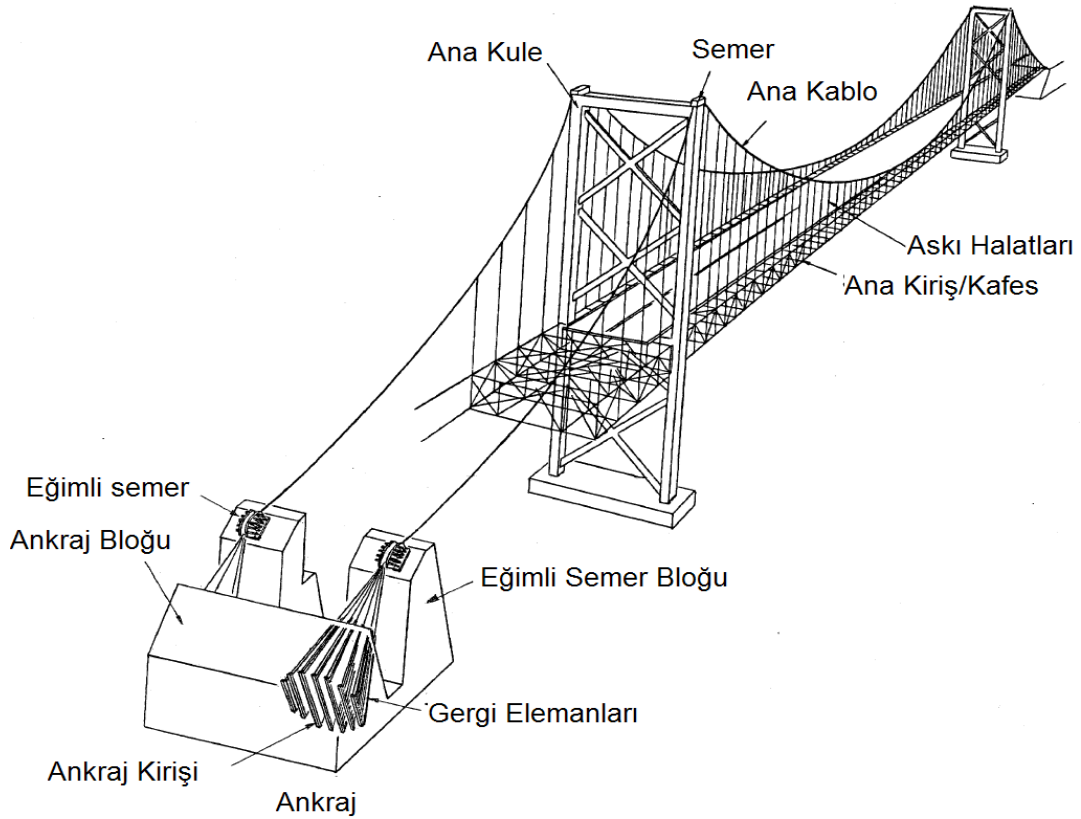
Tabliye kesitleri kare kesitli olan uzun açıklıklı asma köprülerde, ölü ağırlık rijitliği artırdığı halde rüzgârdan ileri gelen salınım tesirlerine karşı koyamamaktadır. Bu yüzden kutu kesitli ve aerodinamik forma sahip asma köprü yapımına gidilmiştir. Tabliye kesitlerinin kutu türü oluşu ve aerodinamik forma sahip olmaları burulma titreşimlerini azaltır. Severn, Boğaziçi, Humber ve Fatih Sultan Mehmet Köprüleri kutu kesitli asma köprülere örnektir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Dumanoğlu vd., 1985; Brownjohn vd., 1992; Dumanoğlu vd., 1992).

Tablo 1.1. Bazı önemli asma köprüler (URL-5, 2010).

<b>No</b>	<b>Köprü Adı</b>	<b>Açıklık(m)</b>	<b>Şehir</b>	<b>Ülke</b>	<b>Yıl</b>
1	Akashi-Kaikyo	1991	Kobe-Naruto	Japonya	1998
2	Great Belt East	1624	Korsor	Danimarka	1998
3	Runyang South	1490	Zhenjiang	Çin	2005
4	Humber	1410	Kingston-Upon-Hull	İngiltere	1981
5	Jianyin	1385	Jiangsu	Çin	1999
6	Tsing Ma	1377	Hong Kong	Çin	1997
7	Verrazano-Narrows	1298	New York, NY	ABD	1964
8	Golden Gate	1280	San Francisco, CA	ABD	1937
9	Höga Kusten	1210	Kramfors	İsveç	1997
10	Mackinac	1158	Mackinaw City, MI	ABD	1957
11	Minami Bisan-Seto	1100	Kojima-Sakaide	Japonya	1988
12	Fatih Sultan Mehmet	1090	İstanbul	Türkiye	1988
13	Boğaziçi	1074	İstanbul	Türkiye	1973
14	George Washington	1067	New York, NY	ABD	1931
15	Kurushima-3	1030	Onomichi-Imabari	Japonya	1999

### 1.5. Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları

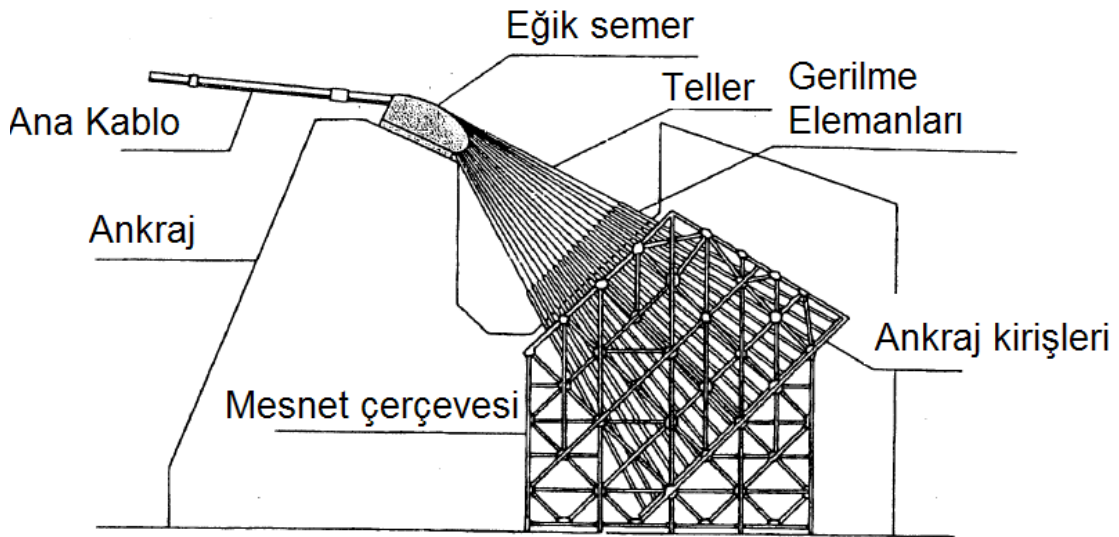
Asma köprüler, genelde 550 m'den büyük açıklıkların geçilmesi için, iki ana kablonun kuleler arasında asılması ve kablo uçlarının bloklara ankrajlanmasıyla inşa edilen yapılardır (Merritt, 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Ankraj, ana kablo, kule, askı ve tabliye gibi elemanlardan oluşmaktadır. Kule temelleri de asma köprüler için önemli olmakla birlikte, köprünün bir elemanı değildir (Bulson vd., 1983). Asma köprüler açıklıklarına, tabliyelerine, kulelerine, askılarına ve ankrajlanma tiplerine göre isimlendirilirler. Asma köprülerdeki sehim köprü davranışını etkilemektedir. Sehim azaldıkça ana kablolardaki çekme kuvveti artar ve buna bağlı olarak da köprünün rijitliği artar. Dolayısıyla ankraj bloklarına gelen çekme kuvveti de büyük olur. Ana kablolardaki sehim açıklığının  $1/9 - 1/11$ 'i kadar olmalıdır (Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Bazı özel durumlarda açıklığın  $1/13$ 'ü oranında da alınabileceği, fakat bundan küçük seçilmesinin uygun olmayacağı belirtilmektedir (Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Tipik bir asma köprü örneği Şekil 1.5'te verilmektedir.



Şekil 1.5. Tipik bir asma köprü (URL-6, 2010).

### 1.5.1. Ankraj

Ankraj, ana kablodan gelen yükleri zemine aktarır. Asma köprülerde ağırlık ve tünel ankraji olmak üzere iki çeşit ankraj kullanılmaktadır. Ağırlık ankrajında ana kablodaki çekme kuvvetinin düşey bileşeni ankraj bloğunun ağırlığı ile yatay bileşeni ise zemin ile ankraj bloğu arasındaki kesme kuvveti ile dengelenir. Tünel ankraji ise kablodaki çekme kuvvetini direkt olarak zemine aktarmakta kullanılmaktadır. Ankraj blokları ana kablodan gelen çekme kuvvetine ve zemin şartlarına göre boyutlandırılır. Tünel ankraj sistemi için uygun zemin şartları gerekmektedir (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Örnek bir ankraj sistemi Şekil 1.6'da verilmektedir.



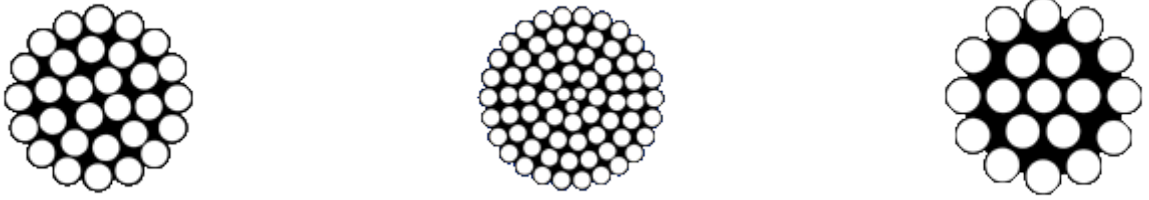
Şekil 1.6. Örnek bir ankraj sistemi (URL-6, 2010).

### 1.5.2. Ana Kablo

Ana kablolar, tabliyedeki yükleri askılar aracılığı ile alıp, kule ve ankraj blokları vasıtasıyla zemine aktarır. Ana kablolar genellikle 5 mm çapında ve  $160-180 \text{ kg/mm}^2$  dayanımı olan galvanizli çelik tellerden oluşturulmaktadır. Ana kablolar oluşturulduktan sonra dış etkilerden korunabilmesi için üzerleri yumuşak galvanizli telle sarıldıktan sonra astarlanıp boyanmaktadır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000).

### 1.5.2.1. Tel Grupları

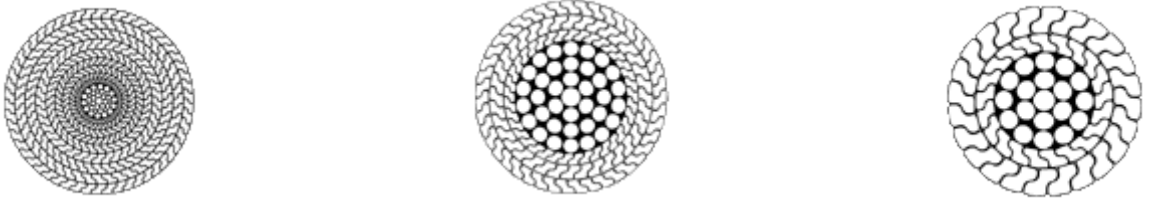
Bir merkez tel etrafında helisel olarak sarılan bir ya da daha çok tabakalı telden oluşur (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Asma köprülerde kullanılan tel çeşitleri (URL-5, 2010).

### 1.5.2.2. Çelik Halatlar

Tel gruplarının bir çekirdek etrafında helisel olarak sarılmasıyla elde edilirler (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Asma köprülerde kullanılan çelik halat çeşitleri (URL-5, 2010).

### 1.5.2.3. Paralel Tel Grupları

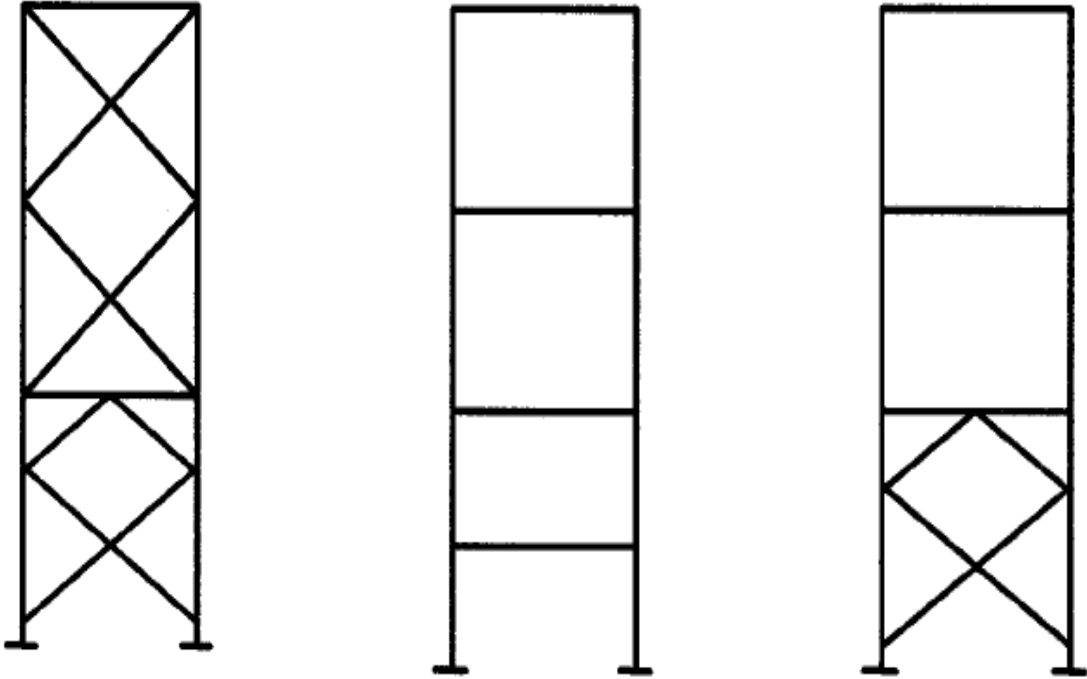
Tellerin helisel olarak sarılmayıp, paralel bir düzende bir araya gelmesiyle elde edilir (Şekil 1.9).



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

### 1.5.3. Kule

Kuleler, tepesine yerleştirilen eyerler ile ana kablolara mesnet görevi yaparlar. Büyük miktarda aksel 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; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Asma köprülerde kullanılan ana kule tipleri Şekil 1.10’da verilmektedir.



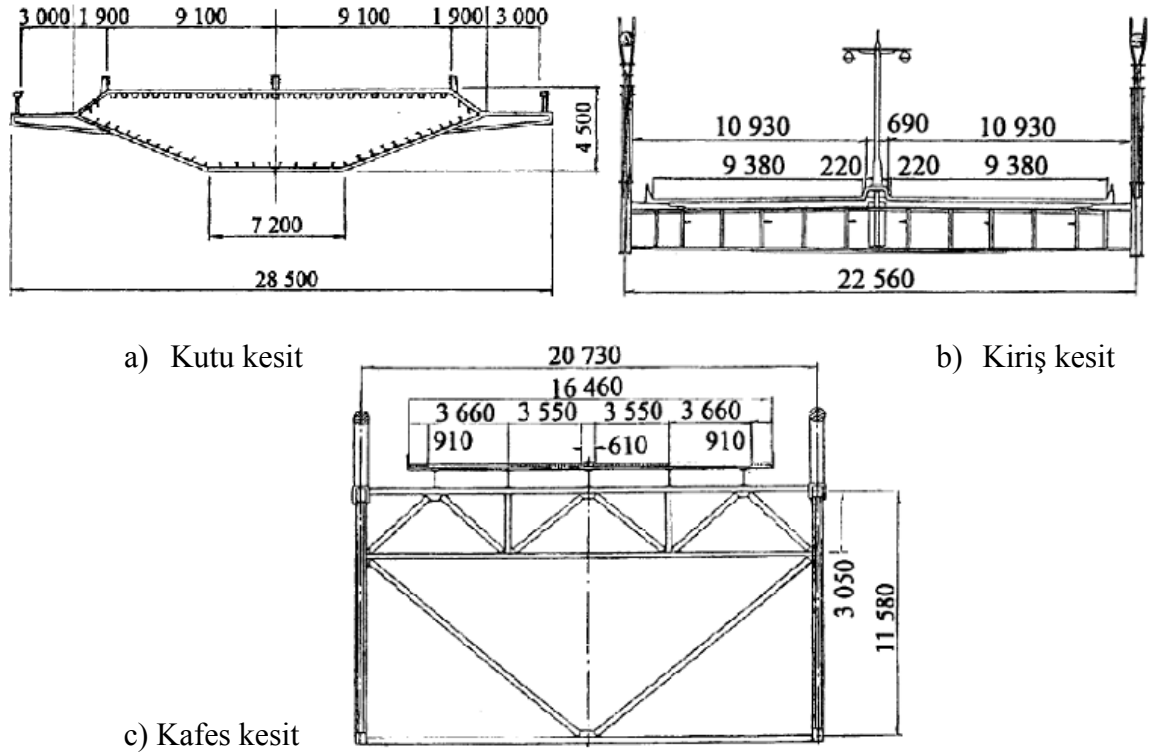
Şekil 1.10. Asma köprülerde kullanılan kule tipleri (URL-6, 2010).

### 1.5.4. Askı

Askı, tabliyedeki yükü ana kabloya aktarır. Düşey, eğik, eğik ve düşey birlikte olmak üzere üç şekilde inşa edilirler. Her bir askı, askı-tabliye bağlantısı, askı-kablo bağlantısı ve askının kendisi olmak üzere üç elemandan oluşmaktadır. Askılar çelik çubuk, bükümlü tel halatlar veya paralel tel halatlar şeklinde olabilirler. Modern asma köprülerde genellikle en çok kullanılan askı türü, bükümlü tel halatlı olanlardır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000).

### 1.5.5. 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 (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Asma köprülerde kullanılan tabliye çeşitleri Şekil 1.11’de verilmektedir.



Şekil 1.11. Asma köprülerde kullanılan tabliye çeşitleri (URL-6, 2010).



## 1.6. Asma Köprülerin Analitik Modellenmesi

Köprüler eski zamanlardan beri kullanılan en önemli mühendislik yapılarının basında 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 veremeyebilmektedir. 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.

### 1.6.1. 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, 2000). 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 yapıyı 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.

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

Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde, asma köprüler gibi önemli mühendislik yapıları sahada yüklenici firma tarafından nasıl inşa ediyorsa, statik hesap yapan mühendisler de bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmelidirler. Bunu yapmaya çalışan proje mühendislerinin zamana bağlı malzeme deformasyonlarını göz önüne almaları 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 şekilde gelecekte olabilecek hatalar engellenmeye çalışılabilmektedir (Karakaplan vd., 2009).

### 1.6.2.1. Basınç Dayanımı

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

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1.1)$$

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

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1.2)$$

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.

### 1.6.2.2. Betonun Yaşı

Betonun elastisite modülü zamanla birlikte değişmektedir. Elastisite modülü,

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (1.3)$$

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.

### 1.6.2.3. Betonun Büzülmesi

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

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_s) \quad (1.4)$$

denklemleri 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.

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (1.5a)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[ 160 + 10 \beta_{sc} \left( 9 - \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \quad (1.5b)$$

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

$$\left. \begin{array}{l} \beta_{RH} = -1.55 \beta_{sRH} \quad 40\% \leq RH < 90\% \\ \beta_{RH} = 0.25 \quad RH \geq 99\% \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

Burada,

$$\beta_{sRH} = 1 - \left( \frac{RH}{RH_o} \right)^3 \quad (1.7)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, RH % olarak atmosferdeki nem oranını göstermektedir. RH<sub>o</sub> 100%'dür. Zamana bağlı olarak devam eden büzülme,

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_o) + (t-t_s)/t_1}} \quad (1.8)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada, h mm cinsinden ifade edilen kavramsal bir boyuttur ve  $h = 2A_c/U$  ifadesi ile hesap edilmektedir. A<sub>c</sub> kesit alanı, u ise atmosfer ile temas eden çevre uzunluğudur. h<sub>o</sub>=100mm ve t<sub>1</sub>=1 gündür.

#### 1.6.2.4. Betonun Sünmesi

Sünme etkisi CEB-FIP (1990) şartnamesinde sünme modeli olarak adlandırılan bir yaklaşımla hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda, t<sub>o</sub> anında sabit bir gerilme için,

$$\varepsilon_{cc}(t, t_o) = \frac{\sigma_c(t_o)}{E_{ci}} \phi(t, t_o) \quad (1.9)$$

ifadesi dikkate alınmaktadır. Burada,  $\sigma_c(t_o)$  t<sub>o</sub> anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilmeyi,  $\phi(t, t_o)$  ise sünme katsayısını göstermektedir. Bu katsayı,

$$\phi(t, t_o) = \beta_c(t-t_o)\phi_o \quad (1.10)$$

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

$$\phi_o = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_o) \quad (1.11a)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)}{0.46 \left( \frac{h}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (1.11b)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}}} \quad (1.11c)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + \left( \frac{t_0}{t_1} \right)^{0.2}} \quad (1.11d)$$

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

$$\beta_c(t-t_0) = \left[ \frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right] \quad (1.12a)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (1.12b)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $t_1=1$  gün;  $RH_0=100$  ve  $h_0=100\text{mm}$ 'dir.

#### 1.6.2.5. Çeliğin Gevşemesi

CEB-FIP (1990) şartnamesine göre, öngerilemeli çeliğin gevşemesi 3 g ruba ayrılmaktadır. Birinci grup, tel ve halat grupları için normal gevşeme; ikinci grup, tel ve halat grupları için gelişen ve devam eden gevşeme; son gr up i se de mir ç ubuklar v e donatılar için gevşemeyi göstermektedir.

30 yıla kadarki gevşeme tahmini,

$$\rho_t = \rho_{1000} \left( \frac{t}{1000} \right)^k \quad (1.13)$$

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.

### 1.7. Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Dinamik Formülasyon

Yapılara etki eden kuvvetler belli bir düzeyin altında kaldıkları sürece yapının lineer davranışını 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 mertebe hesabı veya geometrik olarak lineer olmayan analiz denir (Aksoğan, 1986). Lineer olmayan analizin zorunlu olduğu durumlarda rijitlik matrisi her yük adımında yeniden oluşturulur.

Büyük yerdeğiştirme yapan yapılarda kuvvet denge denklemleri yapının şekildeğiştirilmiş hali üzerinde yazılır. Bunun anlamı;

$$P = K_v \quad (1.14)$$

şeklindeki lineer bağıntının artık geçerli olmadığıdır. Burada P, uygulanan kuvveti; K, sistem rijitliğini; v, yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

Geometrideki değişimlerin etkilerini hesaba katmak amacıyla, her adımı yükteki artışa karşılık gelen bir dizi lineer işlemle lineer olmayan problem incelenerek v yerdeğiştirmeleri için çözümler elde edilebilir. Ancak, büyük sehimler nedeniyle, şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntıları lineer olmayan terimler içermektedir (Przemieniecki, 1968). Bu terimlerin hesaplanarak  $[K]$  rijitlik matrisine eklenmesi gerekmektedir.

Şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntılarındaki lineer olmayan terimler,  $[k]$  eleman rijitlik matrisinin

$$[k] = [k_E] + [k_G] \quad (1.15)$$

ifadesi ile tanımlanmasına neden olurlar. Burada  $[k_E]$  başlangıçta eleman geometrisi için hesaplanan standart elastik rijitlik matrisini,  $[k_G]$  ise geometrik rijitlik matrisini göstermektedir.  $[k_G]$  sadece geometriye değil aynı zamanda başlangıçta var olan iç kuvvetlere de bağlıdır. Elastik ve geometrik rijitlik matrisleri her eleman için hesaplanarak toplanırlar ve sistem rijitlik matrisi

$$[K] = [K_E] + [K_G] \quad (1.16)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $[K]$  sistem rijitlik matrisini,  $[K_E]$  sistem rijitlik matrisinin elastik bileşenini,  $[K_G]$  sistem rijitlik matrisinin geometrik bileşenini göstermektedir (Przemieniecki, 1968).

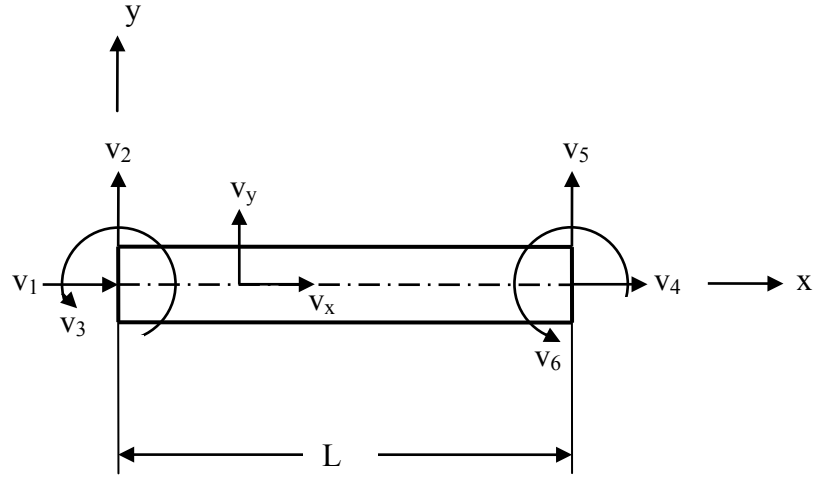
### 1.7.1. Kiriş Eleman İçin Geometrik Rijitlik Matrisinin Hesaplanması

Şekil 1.12'de görülen bir kiriş eleman üzerindeki yerdeğiştirme

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\xi & 6(\xi-\xi^2)\eta & (-1+4\xi-3\xi^2)L\eta & \xi & 6(-\xi+\xi^2)\eta & (2\xi-3\xi^2)L\eta \\ 0 & 1-3\xi^2+2\xi^3 & (\xi-2\xi^2+\xi^3)L & 0 & 3\xi^2-2\xi^3 & (-\xi^2+\xi^3)L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

ifadesi ile tanımlanabilmektedir (Przemieniecki, 1968).





Şekil 1.12. Kiriş elemana ait yerdeğişirmeler

Burada,  $\xi = \frac{x}{L}$ ,  $\eta = \frac{y}{L}$  ve  $v_1, v_2, \dots, v_6$  ise kiriş elemana ait düğüm noktası yerdeğişirmeleridir.  $U_i$  şekildeğişirme enerjisinin hesabında, kayma şekildeğişirmelerinden gelen etkiler ihmal edilmektedir (Przemieniecki, 1968). Böylece sadece normal şekildeğişirmeler,  $\varepsilon_{xx}$ , alınmaktadır. Eğilmede eleman üzerindeki büyük sehimler için bu şekildeğişirmeler;

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} y + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \quad (1.18)$$

denklemleriyle belirlenir. Burada,  $y$  kirişin tarafsız ekseninden ölçülen uzaklık,  $v_0$  ise  $y = 0$ 'daki  $v_x$  yerdeğişirmesidir. (1.18) denklemi kullanılarak,  $U_i$  şekildeğişirme enerjisi;

$$U_i = \frac{E}{2} \int_V \varepsilon_{xx}^2 dV \quad (1.19)$$

denklemleriyle ifade edilebilir. Bu denklemde  $\varepsilon_{xx}$  yerine (1.18) denklemindeki değeri yazılırsa;

$$U_i = \frac{E}{2} \int_V \left[ \frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} y + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right]^2 dV \quad (1.20)$$

elde edilir. (1.20) denkleminde;

$$\int_V dV = \int_{x=0}^L \int_A dx dA \quad (1.21)$$

olduğu dikkate alınır ve üslü ifade açılırsa;

$$U_i = \frac{E}{2} \int_{x=0}^L \int_A \left[ \left( \frac{\partial v_0}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \right)^2 y^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^4 - 2 \frac{\partial v_0}{\partial x} \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} y - \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 y + \frac{\partial v_0}{\partial x} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right] dx dA \quad (1.22)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadedeki  $\frac{1}{4} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^4$  yüksek mertebeli terimi, diğer terimler yanında çok küçük olduğundan ihmal edilebilir (Przemieniecki, 1968). Kesit alanı A üzerinde integrasyon alınır ve y tarafsız eksen den ölçülen uzaklık olduğu için  $\int y dA$  şeklindeki integrallerin sıfıra gitmesi gerektiği gözönüne alınır;

$$U_i = \frac{EA}{2} \int_0^L \left( \frac{\partial v_0}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{EI}{2} \int_0^L \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{EA}{2} \int_0^L \frac{\partial v_0}{\partial x} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 dx \quad (1.23)$$

elde edilir. Bu ifadede I kesit atalet momentini göstermektedir. (1.23) denklemindeki ilk iki integral lineer şekil değiştirme enerjisi, üçüncü integral ise lineer olmayan şekil değiştirme enerjisi bileşeninden gelen etkiyi göstermektedir.

Zincir kuralı (Bathe, 1996) türev kullanılarak (1.17) denkleminde;  $v_x$  yer değiştirmesinin  $y=0$ 'daki  $v_0$  değerinin x'e göre birinci mertebe kısmi türevinden

(1.24),  $v_y$  yerdeğiştirmesinin  $x$ 'e göre birinci merteye kısmi turevinden (1.25),  $v_y$  yerdeğiştirmesinin  $x$ 'e göre ikinci merteye kısmi turevinden (1.26) denklemleri elde edilir.

$$\frac{\partial v_0}{\partial x} = \frac{1}{L}(-v_1 + v_4) \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{1}{L} \left[ 6(-\xi + \xi^2)v_2 + (1 - 4\xi + 3\xi^2)Lv_3 + 6(\xi - \xi^2)v_5 + (-2\xi + 3\xi^2)Lv_6 \right] \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} = \frac{1}{L^2} \left[ 6(-1 + 2\xi)v_2 + 2(-2 + 3\xi)Lv_3 + 6(1 - 2\xi)v_5 + 2(-1 + 3\xi)Lv_6 \right] \quad (1.26)$$

(1.24), (1.25) ve (1.26) denklemleri (1.23) denkleminde yerlerine yazılır ve integrali alınır;

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{EA}{2L} (v_1^2 - 2v_1v_4 + v_4^2) \\ &+ \frac{2EI}{L^3} (3v_2^2 + L^2v_3^2 + 3v_5^2 + L^2v_6^2 + 3Lv_2v_3 - 6v_2v_5 \\ &+ 3Lv_2v_6 - 3Lv_3v_5 + L^2v_3v_6 - 3Lv_5v_6) \\ &+ \frac{EA}{L^2} (v_4 - v_1) \left( \frac{3}{5}v_2^2 + \frac{1}{15}L^2v_3^2 + \frac{3}{5}v_5^2 + \frac{1}{15}L^2v_6^2 \right. \\ &+ \frac{1}{10}Lv_2v_3 - \frac{6}{5}v_2v_5 + \frac{1}{10}Lv_2v_6 \\ &\left. - \frac{1}{10}Lv_3v_5 - \frac{1}{30}L^2v_3v_6 - \frac{1}{10}Lv_5v_6 \right) \end{aligned} \quad (1.27)$$

elde edilir.

$$F = \frac{EA}{L} (v_4 - v_1) \cong \text{sabit} \quad (1.28)$$

olarak tanımlanır ve (1.27) denklemindeki şekildeğiştirme enerjisi ifadesine Castigliano Teorisi uygulanırsa (1.29) denkleminde gösterilen eleman yük-yerdeğiştirme denklemi elde edilir (Przemieniecki, 1968).

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6L & 0 & -12 & 6L \\ 0 & 6L & 4L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & \frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & -6L \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} + \frac{F}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & \frac{L}{10} \\ 0 & \frac{L}{5} & \frac{2L^2}{10} & 0 & \frac{L}{5} & -\frac{L^2}{10} \\ 0 & \frac{L}{10} & \frac{2L^2}{15} & 0 & \frac{L}{10} & -\frac{L^2}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6}{5} & -\frac{L}{10} & 0 & \frac{6}{5} & -\frac{L}{10} \\ 0 & \frac{L}{10} & -\frac{L^2}{30} & 0 & -\frac{L}{10} & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Bu ifade sembolik olarak;

$$\{P\} = ([k_E] + [k_G]) \{v\} \quad (1.30)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $[k_E]$  ve  $[k_G]$  elastik ve geometrik rijitlik matrisleri olup (1.31) ve (1.32) denklemlerindeki gibidir.

$$[k_E] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

$$[k_G] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} \\ 0 & \frac{5L}{F} & \frac{10}{2FL} & 0 & -\frac{5L}{F} & \frac{10}{FL} \\ 0 & \frac{10}{F} & \frac{15}{10} & 0 & \frac{10}{F} & -\frac{30}{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6F}{5L} & -\frac{F}{10} & 0 & \frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} \\ 0 & \frac{5L}{F} & \frac{10}{FL} & 0 & -\frac{5L}{F} & \frac{10}{2FL} \\ 0 & \frac{10}{F} & -\frac{30}{10} & 0 & \frac{10}{F} & \frac{15}{10} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Asma köprüler kule, kablo, askı ve tabliye gibi farklı davranış gösteren elemanlardan oluşmaktadır. Özellikle kablo ve askılar büyük çekme kuvvetlerine maruz kaldıklarından bu kuvvetlerin eleman rijitlik matrisine etkisi büyük olmaktadır. Dolayısıyla lineer davranışın yanında geometrik olarak lineer olmayan davranışında yapıların sonlu eleman analizlerinde dikkate alınması gerekmektedir.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR**

### **2.1. Giriş**

Bu tez çalışmasında, asma köprülerinin yapısal davranışlarının yapım aşamaları ve zamana bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, Boğaziçi Köprüsü ve Humber Köprüsü uygulama olarak seçilmiştir.

### **2.2. Boğaziçi Köprüsü**

#### **2.2.1. Boğaziçi Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri**

Bu çalışmada sayısal uygulama için İstanbul Boğaziçi Köprüsü (Şekil 2.1) örnek olarak seçilmiştir. Boğaziçi Köprüsünün tasarımı Londra'daki Freeman, Fox and Partners (1968) firması tarafından yapılmıştır. Köprü İstanbul'un Avrupa ile Asya yakalarını birbirine bağlamaktadır. Yapımına 1970 yılında başlanmış olup, 1973 yılında trafiğe açılmıştır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Genel görünüşü Şekil 2.2'de verilen Boğaziçi Köprüsünün ana açıklığı 1074 m, kenar açıklıkları Avrupa yakasında 231 m, Asya yakasında 255 m'dir. Kenar açıklık tabliyeleri kablolarla asılı olmayıp, orta ayak temellerinin üzerine yerleştirilen çelik kolonlar tarafından taşınmaktadır. Ana kablolar arasındaki mesafe 28 m'dir. Her biri 3 şerit olan, biri gidiş diğeri dönüş toplam iki yolu bulunmaktadır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

165 m yüksekliğinde olan çelik kulelerin her biri, birbirine üçer adet yatay portal kirişle bağlanmış ikişer ayağa sahiptir (Şekil 2.3). Tabanda 5.20x 7.00 m tepede ise 3.00x7.00m boyutunda olan kule ayakları, 10 kademede inşa edilmiştir. Her kademe 4 adet çelik panelin bir araya getirilip bulonlarla birleştirilmesiyle, içi boş bir kutu kesit formu elde edilmiştir. Çelik panellerin ilk kademesi 6.5 m diğerkademeleri ise 18-19 m yüksekliğindedir. Kule ayaklarının iç boşluklarında tabliye kotuna kadar 18 kişi kapasiteli yolcu asansörleri, kulelerin güney ayaklarında ise tabliye kotundan kule tepesine kadar küçük bakım asansörleri bulunmaktadır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Tabliyeden gelen yükleri kule ve ankrajlar vasıtasıyla zemine aktaran ana kablolar 5 mm çapında 160 kg/ mm<sup>2</sup> lik dayanıma sahip galvanizli çelik tellerin, havai çekim metodu ile montajı suretiyle oluşturulmuştur. Her bir kablonun ana açıklık kısmında 548 adet çelik telden oluşan 19 adet ana büklüm bulunmaktadır. Bu şekilde, her bir kabloda, kuleler arasındaki kesimde 10412 adet paralel tel bulunmaktadır. Kenar açıklık ana kablolarında ise ayrıca her biri 192 adet çelik telden oluşan 4 ilave büklüm daha bulunmaktadır. Böylece kenar açıklıklardaki toplam tel sayısı 11180'dir (Şekil 2.4). Ana kabloların dış etkilerden korunabilmesi için üzerleri önce 3.5 mm kalınlığındaki yumuşak galvanize telle sarılmış olarak iki kat astar ve iki kat da boya ile boyanmıştır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Şekil 2.5'te kesiti görülen aerodinamik şekle sahip tabliye, içi boş kutu kesitli 60 adet tabliye ünitesinin birbirine kaynaklanmasıyla meydana gelmiştir. Her biri 140 ton ağırlığında olan 60 adet ünitenin montajına açıklığın ortasından başlanmış ve iki yana doğru simetrik olarak devam edilmiştir. Aerodinamik şekle sahip tabliye, geleneksel kafes sistem tabliyeden daha hafif ve rüzgar etkisini de 1/3 oranında azaltmaktadır. Tabliye düşeyde 17900 m yarıçaplı bir kurb üzerinde bulunmaktadır. Yapım işleminin tamamlanmasından sonra tabliye raspa ile temizlenerek çelik üst yüzeyine önce 3mm kalınlığında kauçuklu bitüm tabakası konmuş, daha sonra da 35 mm kalınlığında mastik asfalt serilerek elle masterlanmak suretiyle tabliye kaplaması oluşturulmuştur. Köprünün iki yanındaki yaya yollarında ise, çift kat kauçuklu bitüm uygulanmıştır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Kuleler ve ankrajlar arasında yer alan yaklaşım viyadükleri (kenar açıklık tabliyeleri) kompozit sistemlerle pr ojelendirilmiş köprülerdir. Orta ayak temellerinin üzerine yerleştirilen 1.5 m çapındaki çelik kolonlar, kutu kesitli içi boş çelik taşıyıcı ana kirişlere mesnet oluşturmaktadır (Şekil 2.6). Taşıyıcı ana kirişler 15 m'lik parçalar halinde hazırlanarak, ankrajlardan başlayarak kuleye doğru montaj edilmişlerdir. Taşıyıcı ana kirişler üzerine 3 m aralıklarla enine (I) kirişleri yerleştirilmiş olup, bunların uçları tabliyenin yaya yolu altında konsol olarak uzanmaktadır. Bu çelik yapının üzerinde ise, 19 cm'lik bir betonarme döşeme bulunmaktadır. Yaklaşım viyadüklerinin betonarme döşemesinin üzerinde de tabliyede olduğu gibi, toplam 38 mm kalınlığında mastik asfalt yer almaktadır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Ortaköy kulesi temel kazıları çelik palplanj batardolar içinde 17-24 m derinliğe kadar inmiştir. Diabaz ve sert Grovak kayaya oturtulan temeller 18m çapında ve silindirik birer kütle betondur. Beylerbeyi kulesi temelleri hafriyatı ise sağlam kayanın yüzeye yakınlığı nedeniyle batardo yapılmasını gerektirmemiştir. 5-12 m derinliğe kadar inen temel kazıları dikdörtgen olarak açılmış ve planda 15x19 m'lik beton temeller inşa edilmiştir. Her bir kuleye ait temellerin zemin yüzeyleri deniz seviyesinden 3 m yüksekliktedir (Şekil 2.7) (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Ortaköy ve Beylerbeyi'nde ana kabloyu sabitleştiren ve kablodaki çekme kuvvetini sağlam kayaya aktaran beton ankraj bloklarının herbiri iki kablo ankraj odasından oluşmaktadır. Blokların yaklaşık 2/3'ü toprak içinde olmak üzere derinlikleri kademeli olarak 40 m'ye kadar inmekte olup plan ölçüleri 35x40 m'dir. Odalar arkada betonarme bir perde ile birleştirilerek ortada çekmeye karşı bir kaya bloğunun ilave direncinden de yararlanılmaktadır (Şekil 2.8) (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

### 2.2.2. Boğaziçi Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Boğaziçi Köprüsü'nün yapısal davranışını belirlemek için köprünün iki boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur.

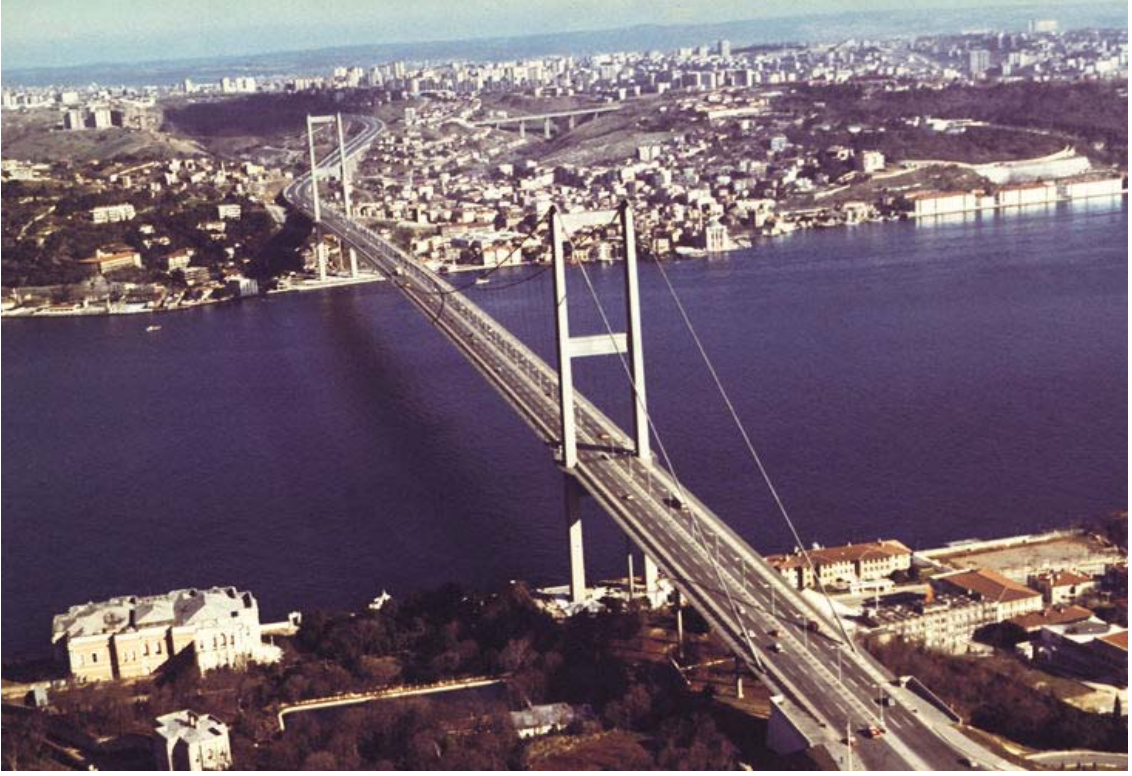
Boğaziçi Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli 202 düğüm noktası, 195 kiriş eleman ve 118 kafes elemandan oluşmaktadır (Şekil 2.9).

Seçilen sonlu eleman modeli, 575 serbestlik derecesi ile temsil edilmiştir. Hareket denklemi ötelenme ve dönme serbestlik derecelerini içerecek şekilde yazılabilmektedir. Ancak, dönme serbestlik derecelerine ait dinamik tepkiler ötelenme serbestlik derecelerine bağlı olduklarından, dönme serbestlik derecelerine karşılık gelen kütle atalet momenti veya dış yük yoksa, hareket denkleminde dönme serbestlik derecelerini ihmal edecek "Statik Yoğunlaştırma Metodu" kullanılabilir (Clough ve Penzien, 1993). Böylece, kullanılan 575 serbestlik derecesi statik yoğunlaştırma metodu ile 33 ana serbestlik derecesine indirgenmiştir.

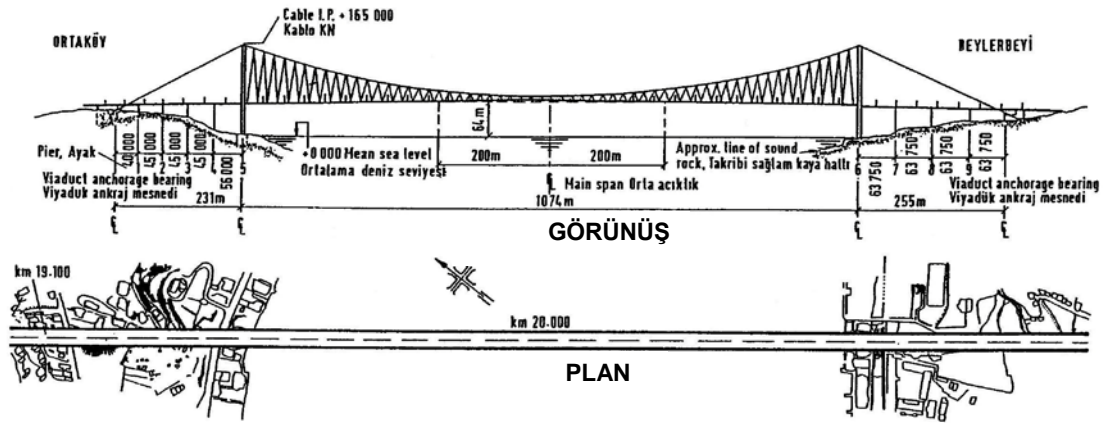
Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri T ablo 2.1'de verilmektedir (Dumanoglu ve Severn, 1985).

Boğaziçi Köprüsü ile ilgili bazı teknik bilgiler Tablo 2.2'de verilmektedir (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

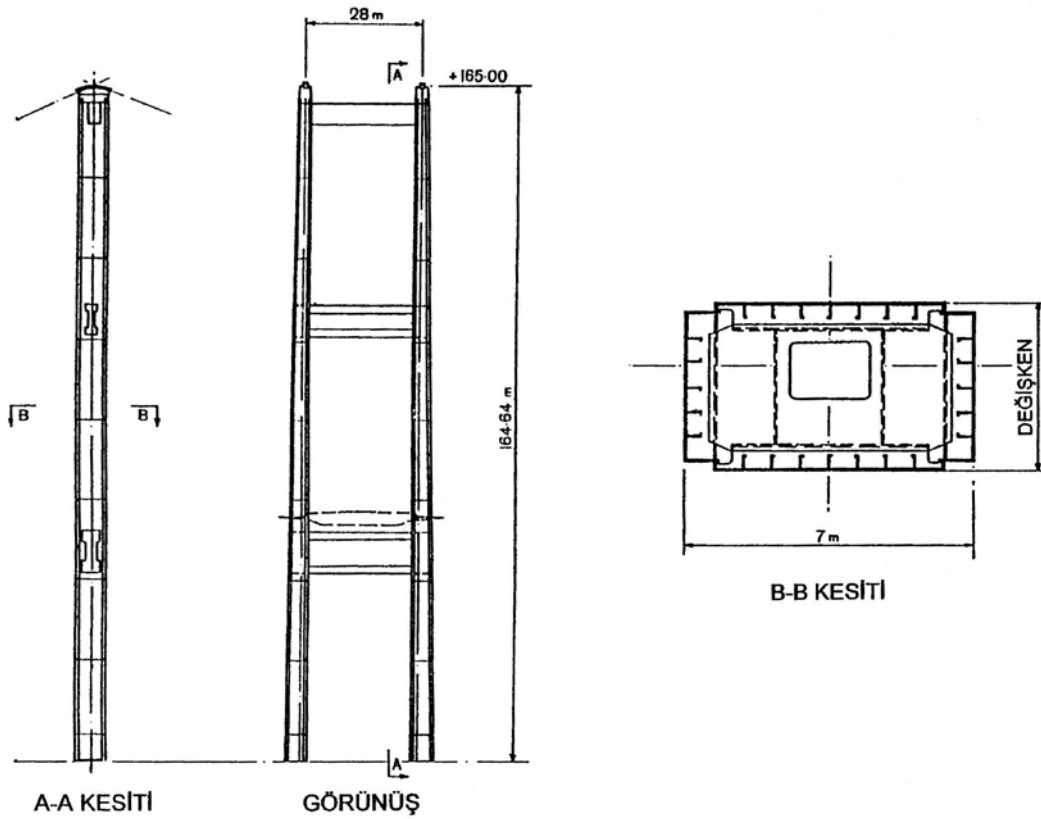




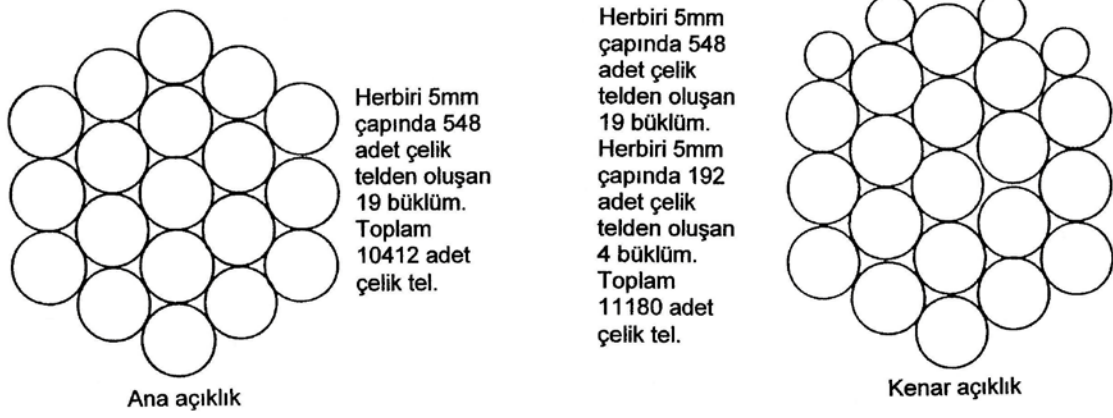
Şekil 2.1. Boğaziçi Köprüsü (URL 5 ve 7, 2010).



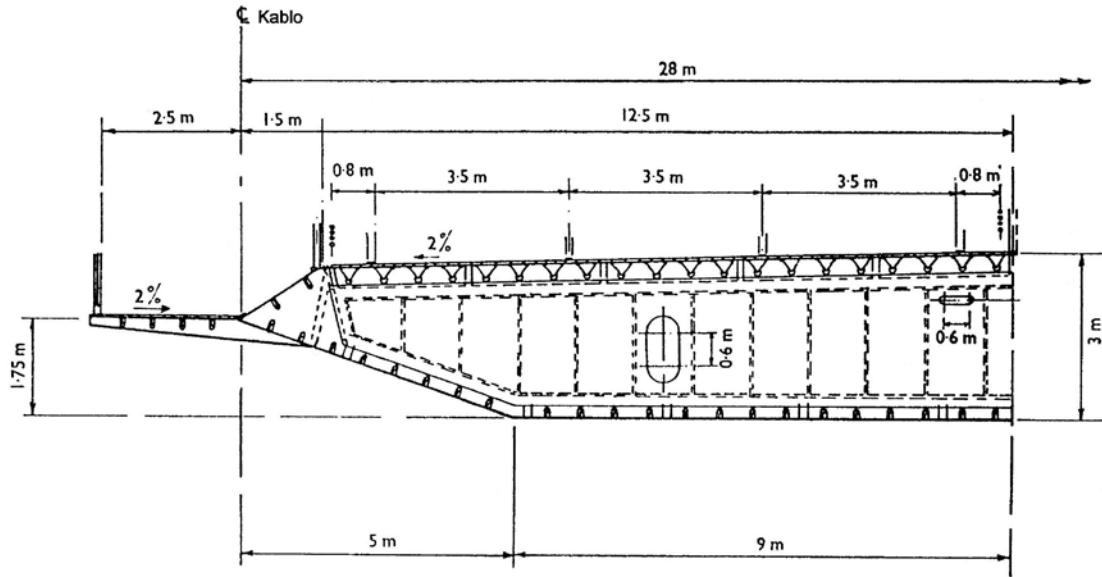
Şekil 2.2. Boğaziçi Köprüsü genel görünüşü (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).



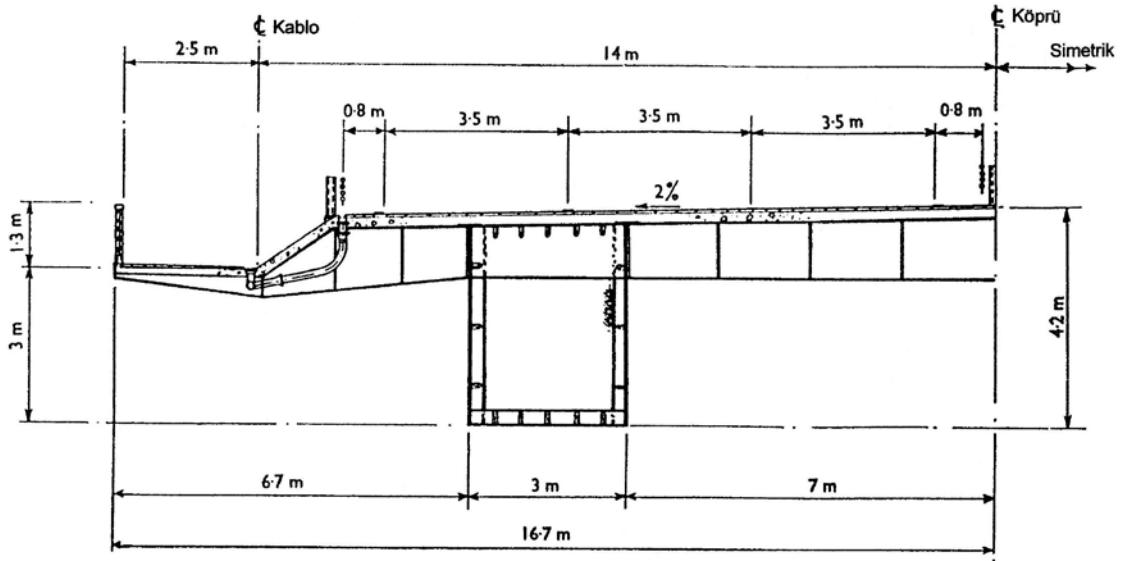
Şekil 2.3. Boğaziçi Köprüsü kule görünüşü (Brown ve Parsons, 1975).



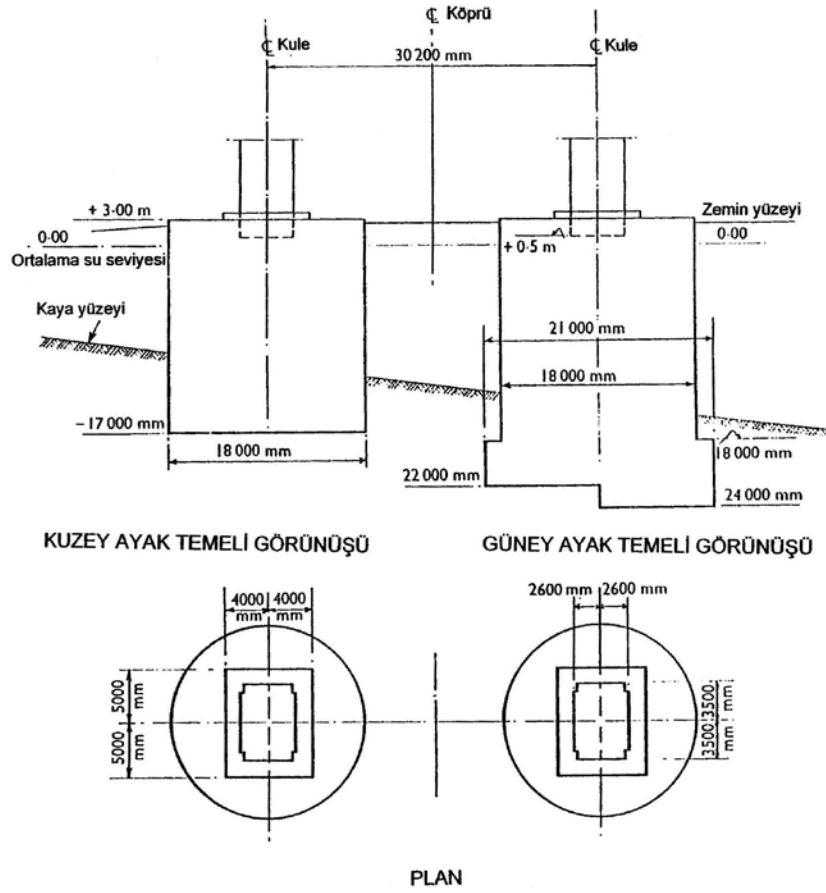
Şekil 2.4. Boğaziçi Köprüsü kablo kesitleri (Brown ve Parsons, 1975).



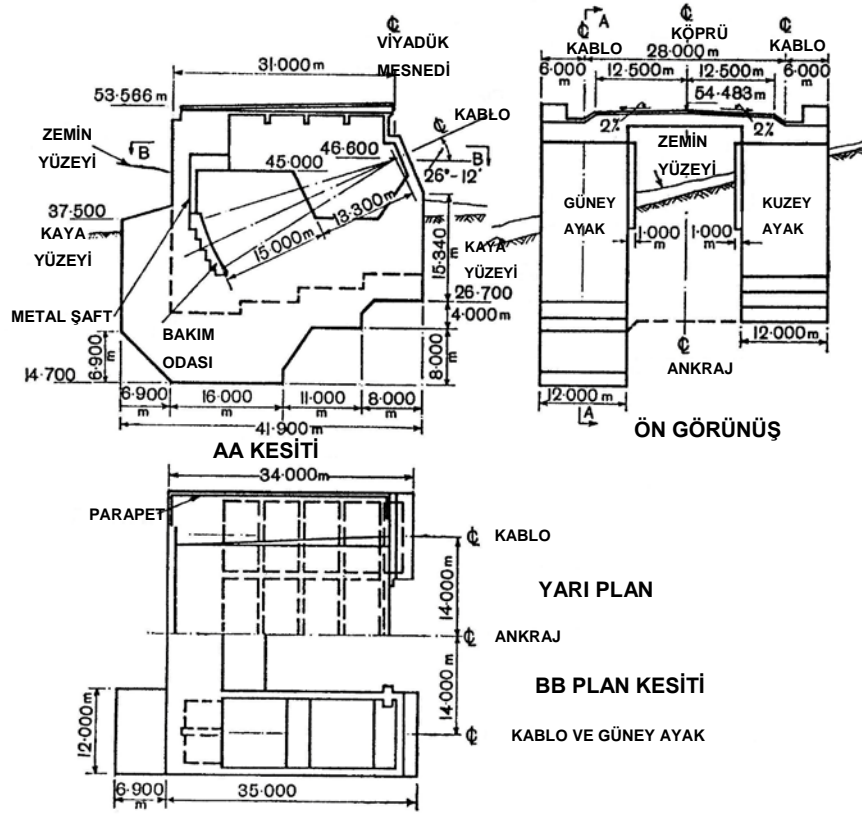
Şekil 2.5. Boğaziçi Köprüsü tabliye kesiti (Brown ve Parsons, 1975).



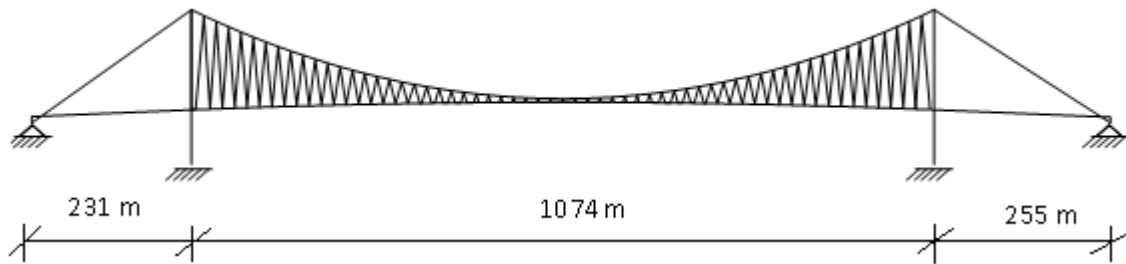
Şekil 2.6. Boğaziçi Köprüsü viyadük kesiti (Brown ve Parsons, 1975).



Şekil 2.7. Boğaziçi Köprüsü kule ayak temelleri (Brown ve Parsons, 1975).



Şekil 2.8. Boğaziçi Köprüsü ankraj kesiti (Brown ve Parsons, 1975).



Şekil 2.9. Boğaziçi Köprüsü iki boyutlu sonlu eleman modeli

Tablo 2.1 Boğaziçi köprüsü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri (Dumanoglu ve Severn, 1985)

Eleman	Değişken	Değer
Kablolar	Elastisite modülü	$193 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Ana açıklıktaki her bir kablo kesit alanı	$0.205 \text{ m}^2$
	Kenar açıklıktaki her bir kablo kesit alanı	$0.219 \text{ m}^2$
Askılar	Elastisite modülü	$162 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir askı alanı	$0.0021 \text{ m}^2$
Tabliye	Elastisite modülü	$205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Çelik kesit alanı	$0.851 \text{ m}^2$
	Düşey eğilmedeki atalet momenti ( $I_{33}$ )	$1.238 \text{ m}^4$
	Yanal eğilmedeki atalet momenti ( $I_{22}$ )	$63.61 \text{ m}^4$
	Burulma rijitliği	$3.35 \text{ m}^4$
Kuleler	Elastisite modülü	$205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir ayaktaki ortalama çelik kesit alanı	$0.68 \text{ m}^2$
	Her bir ayağın boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. ( $I_{33}$ )	$4.9 \text{ m}^4$
		$2.2 \text{ m}^4$
	Her bir ayağın yanal eğilmedeki ort. atalet mom. ( $I_{22}$ )	$4.481 \text{ m}^4$
	Her bir ayağın ortalama burulma rijitliği	

Tablo 2. 2 Boğaziçi köprüsü ile ilgili bazı teknik bilgiler (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Toplam Uzunluk	1560 m
Orta Açıklık	1074 m
Ortaköy Viyadüğü	231 m
Beylerbeyi Viyadüğü	255 m
Köprü Genişliği	33.40 m
Orta Açıklık Deniz Yüksekliği	64 m
Kulelerin Yüksekliği	165 m

#### Ana Sistemde Yükler

Bir Kabloya gelen	7.27 ton/m
Ana Sistemde hareketli Yük	1.33 ton/m
Rüzgar Hızı	45 m/s
Deprem İvmesi	0.1 g
Ana Kablo Sehimi	93 m
Ana Kablodaki Çekme	15400 ton/kablo
Ana Kablo Çapı	58 cm

#### Bazı İmalat Miktarları

Kazı	63000 m <sup>3</sup>
Beton	71000 m <sup>3</sup>
Betonarme Çelik	4000 ton
Yapı Çeliği	17000 ton
Kablo Çeliği	6000 ton

#### Kesin Hakedişe Göre Köprü Yapımı

Maliyeti	23.213.666 ABD Doları
----------	-----------------------

### **2.2.3. Boğaziçi Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi**

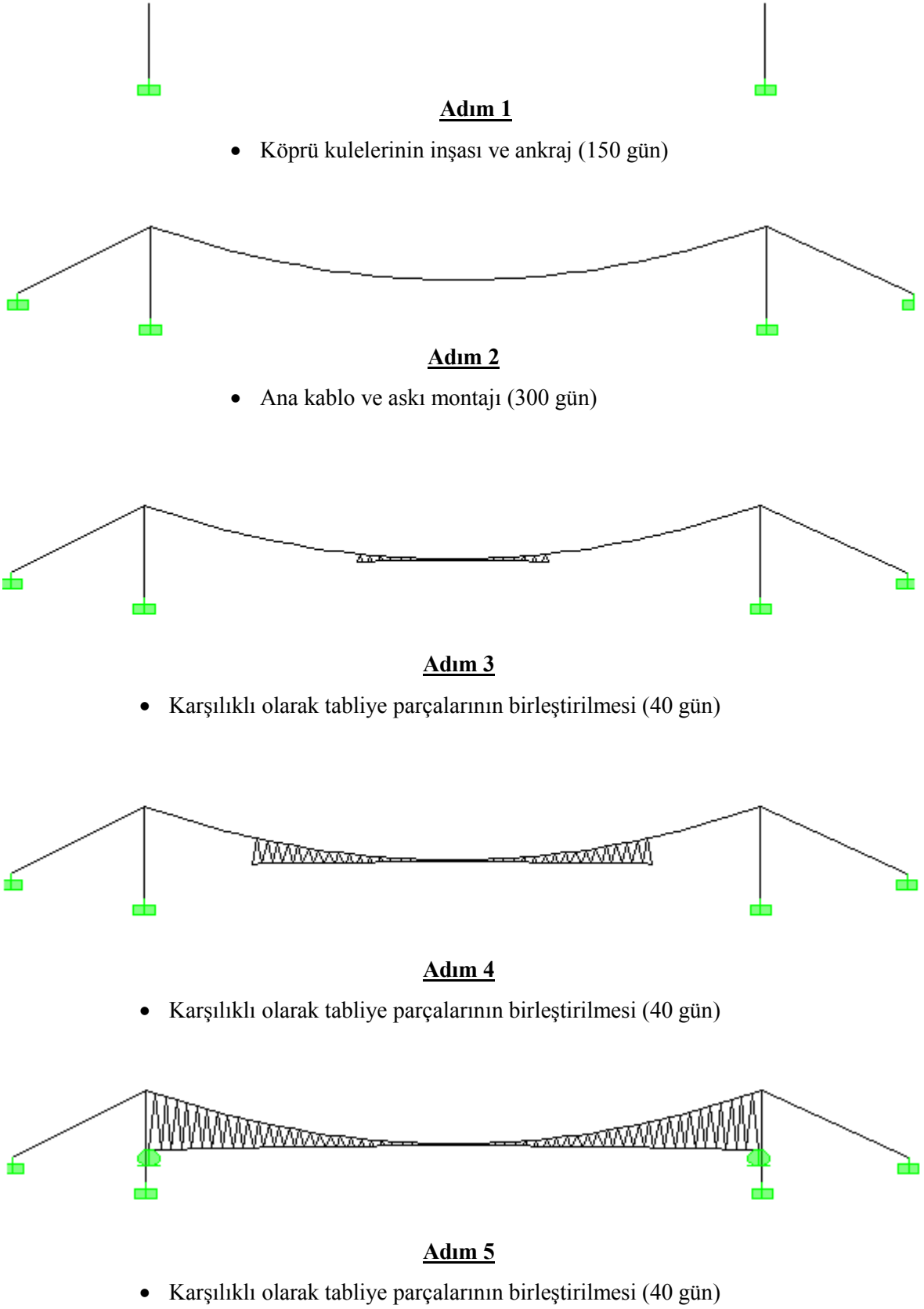
Boğaziçi Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli 5 adımda oluşturulmuştur. Toplam inşaat süresi 570 gün olarak dikkate alınmıştır. Modellemeler sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Boğaziçi Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli Şekil 2.10'da verilmektedir.

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

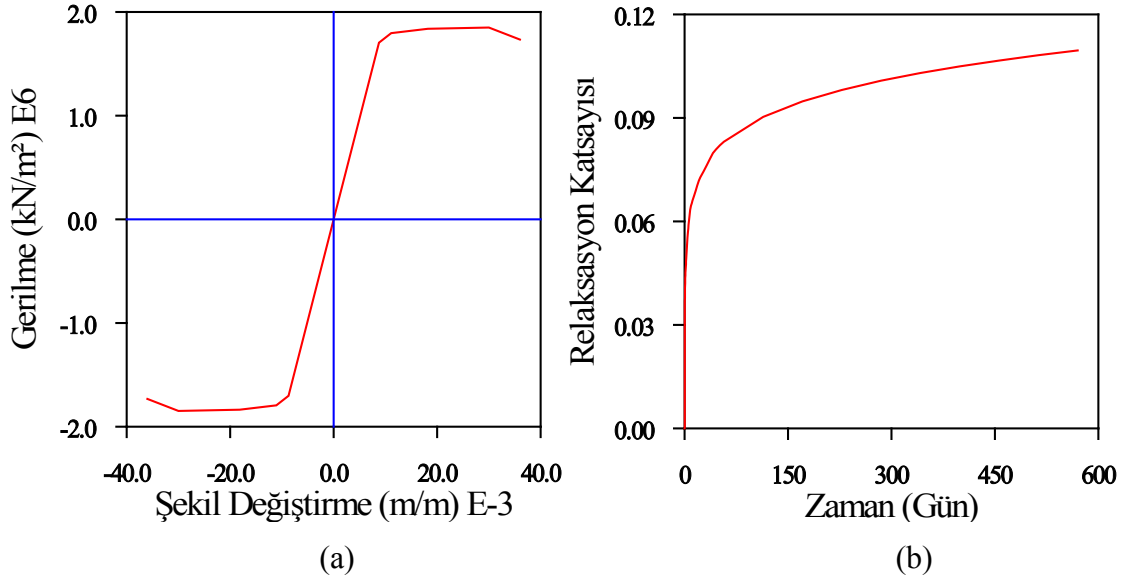
Çelik için gerilme şekil değiştirme ve zamana bağlı değişen malzeme özellikleri grafikleri Şekil 2.11'de verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodun yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak Şekil 2.11'de verilen grafikler otomatik olarak değişmektedir.

Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.12-2.14'te verilmektedir.

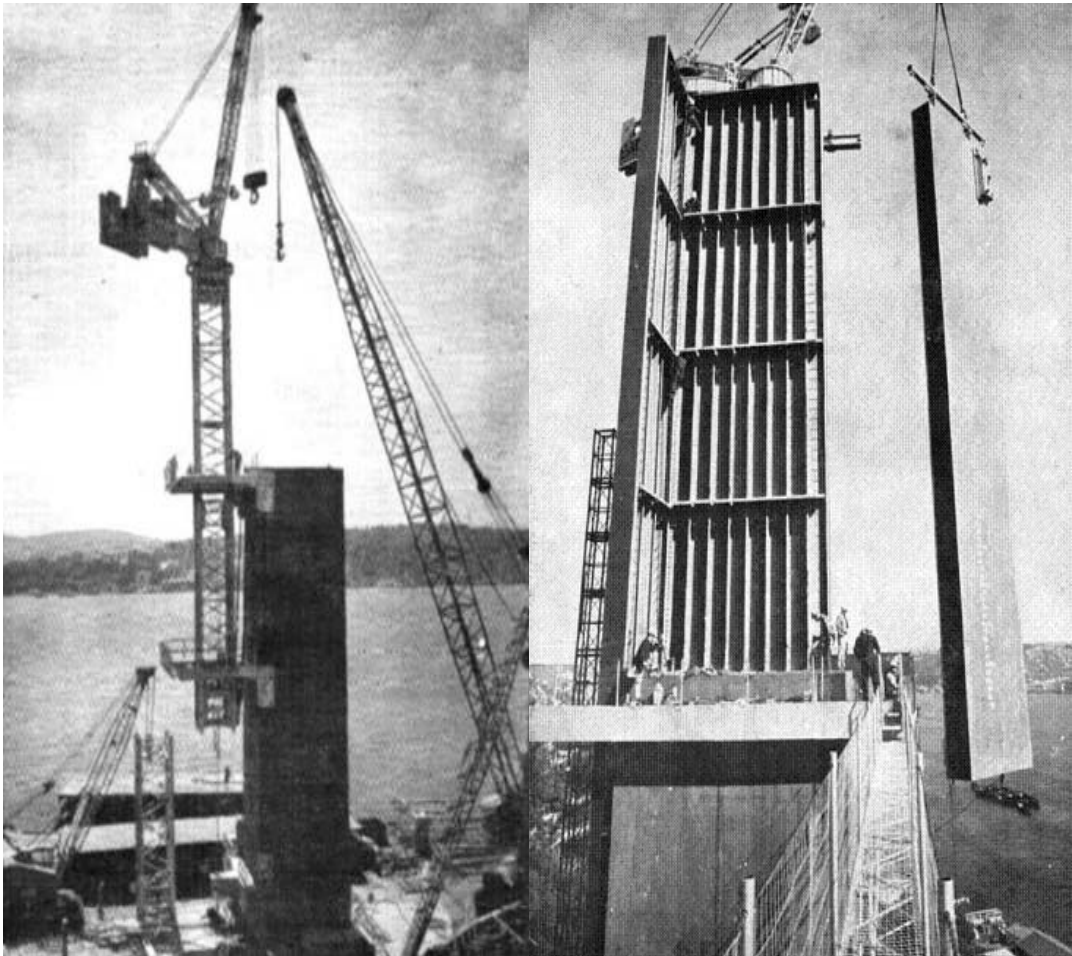




Şekil 2.10. Boğaziçi Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli

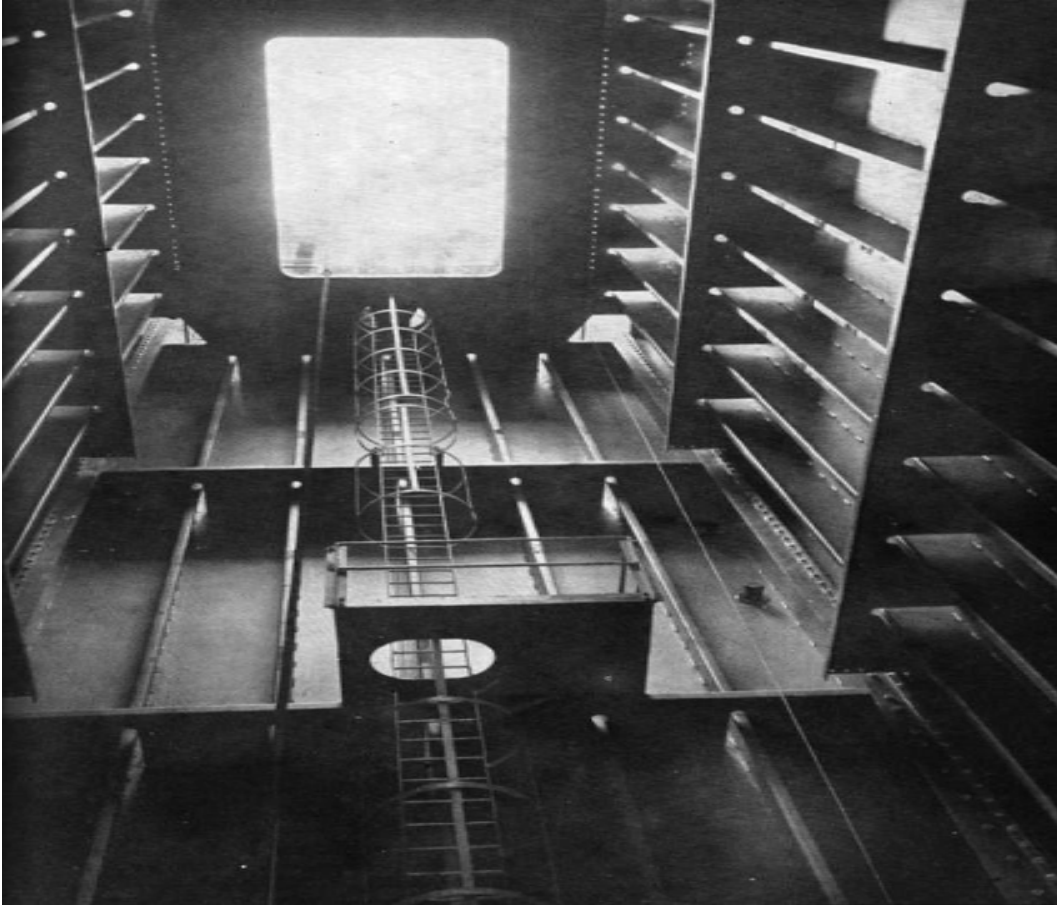
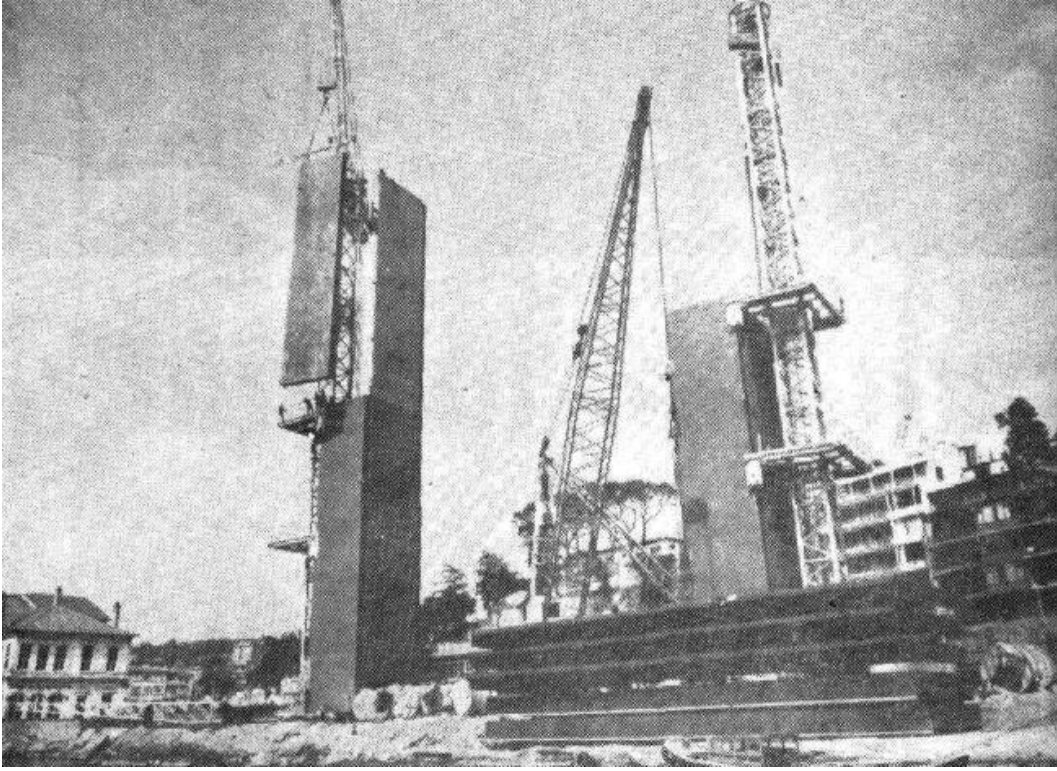


Şekil 2.11. Öngerilmeli çelik için gerilme şekil-değişirme (a) ve zamana bağlı malzeme özellikleri değişimi (b) diyagramları



Şekil 2.12. Boğaziçi Köprüsü kulelerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-8, 2010).

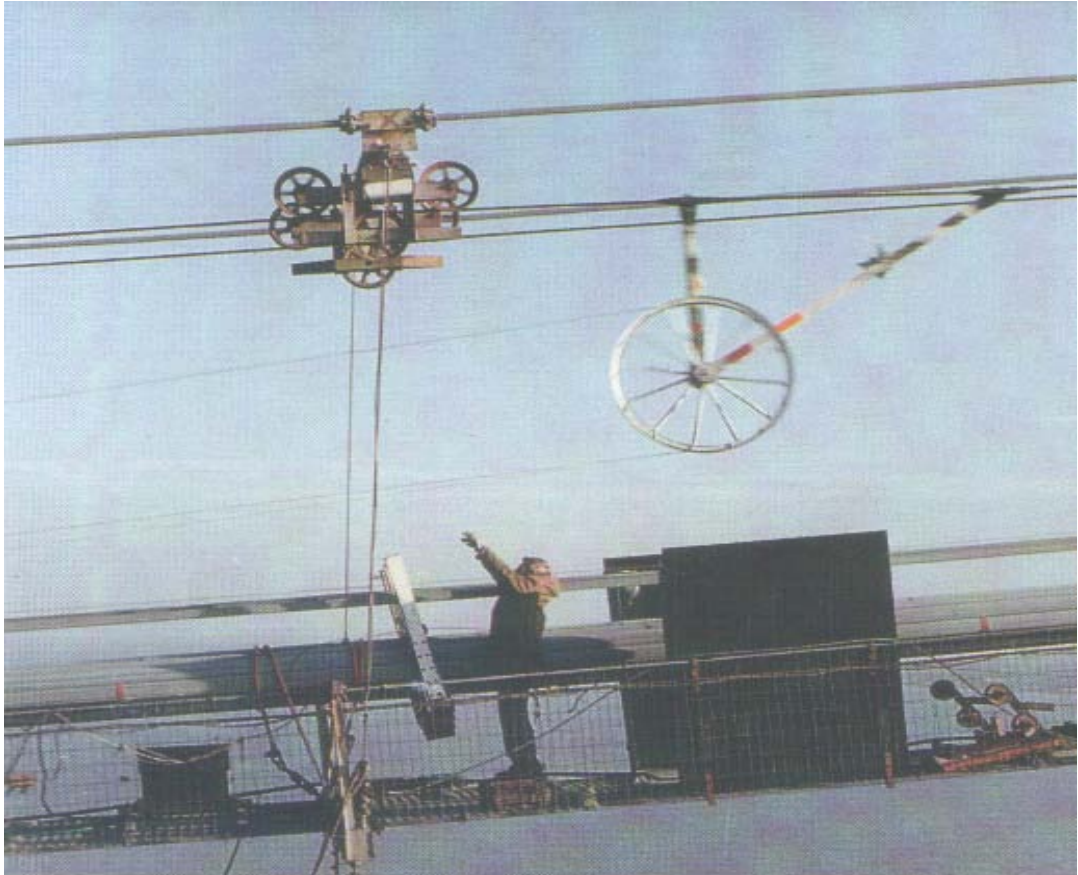
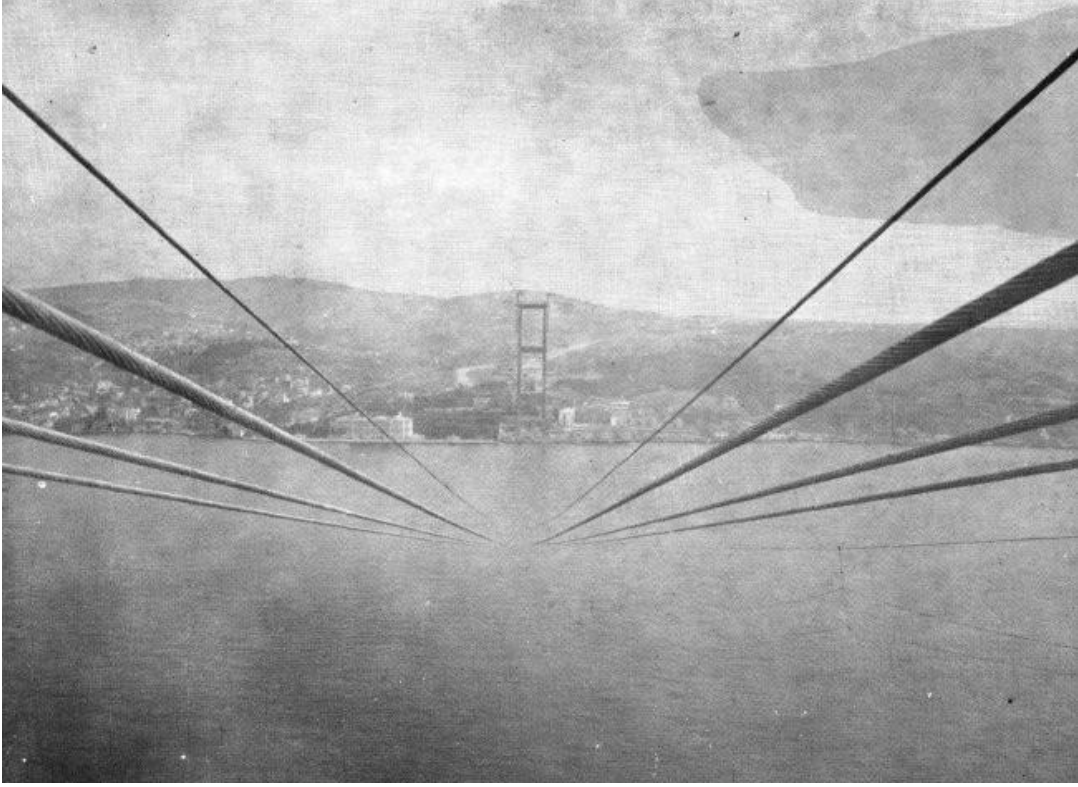
Şekil 2.12'nin devamı





Şekil 2.13. Boğaziçi Köprüsü ana kablo yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL 8 ve 5, 2010).

Şekil 2.13'ün devamı





Şekil 2.14. Boğaziçi Köprüsü tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-5, 2010).

### **2.2.3.1. Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları**

Boğaziçi Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme de formasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

- Sabit Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- Ek Sabit Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır. 10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 40 kN/m olarak etki ettirilmiştir.

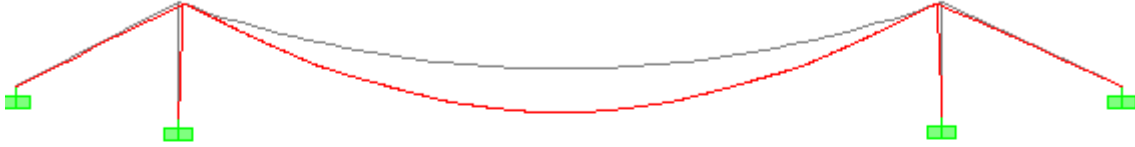
### **2.2.3.2. Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri**

Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule, tabliye ve kabloya ait deformasyon değerleri Şekil 2.15'te verilmektedir. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi köprü yapımı ilerledikçe tabliye ve kabloda oluşan düşey deformasyonlar ile kulelerde oluşan yatay deformasyonlar artmaktadır.



### Yerdeğiştirme

- Kule: 1.38 cm Tabliye: --- Kablo: ---



### Yerdeğiştirme

- Kule: 43 cm Tabliye: --- Kablo: 5.10 m



### Yerdeğiştirme

- Kule: 72 cm Tabliye: 6.52 m Kablo: 6.50 m



### Yerdeğiştirme

- Kule: 94 cm Tabliye: 8.26 m Kablo: 8.25 m



### Yerdeğiştirme

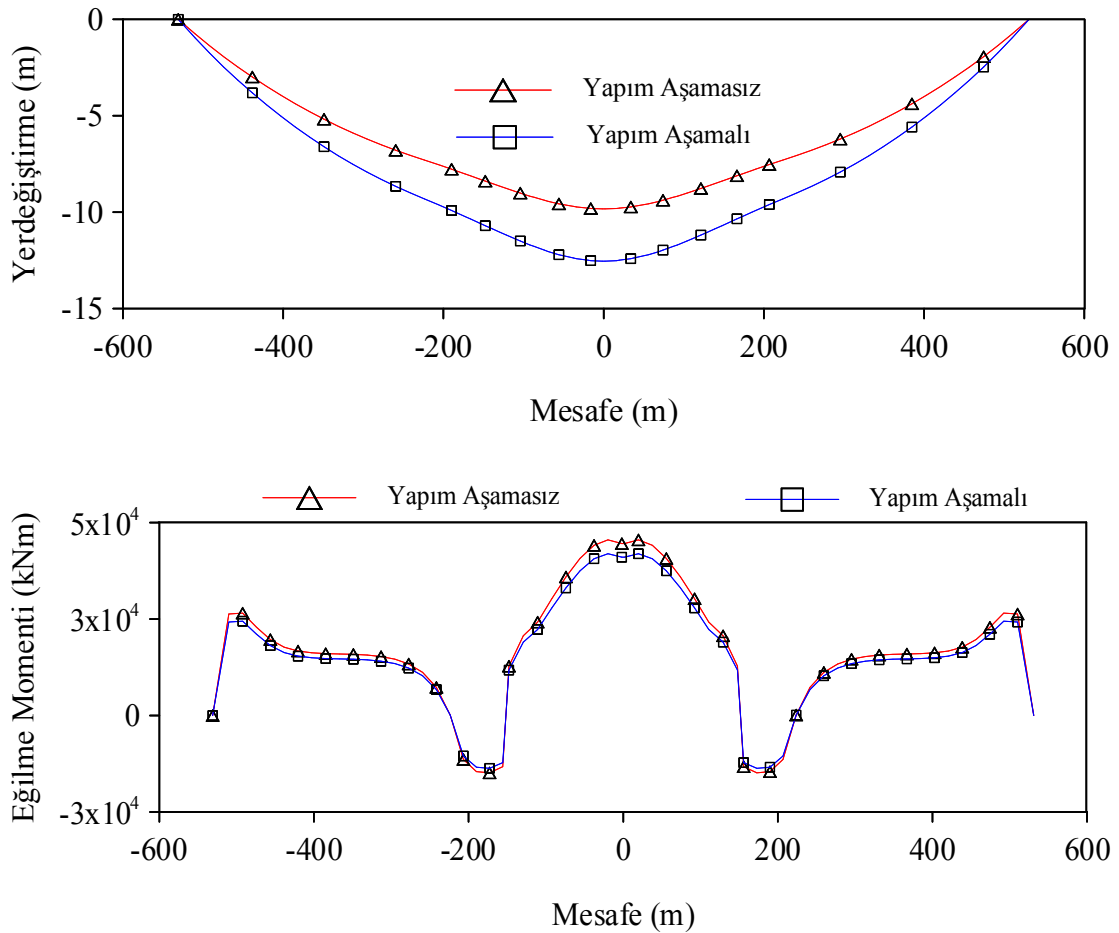
- Kule: 103 cm Tabliye: 12.54 m Kablo: 12.51 m

Şekil 2.15. Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule, tabliye ve kablolarla ait yerdeğiştirme değerleri



### 2.2.3.2.1. Tabliye Davranışı

Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.16'da verilmektedir. Yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak geręekleřtirilen analizlerin etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi yerdeğiştirmeler ve eğilme momenti köprü açıklık ortasına doğru artmaktadır. Ayrıca, yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak geręekleřtirilen analizlerden daha büyük değerlerin elde edildiği görülmektedir.

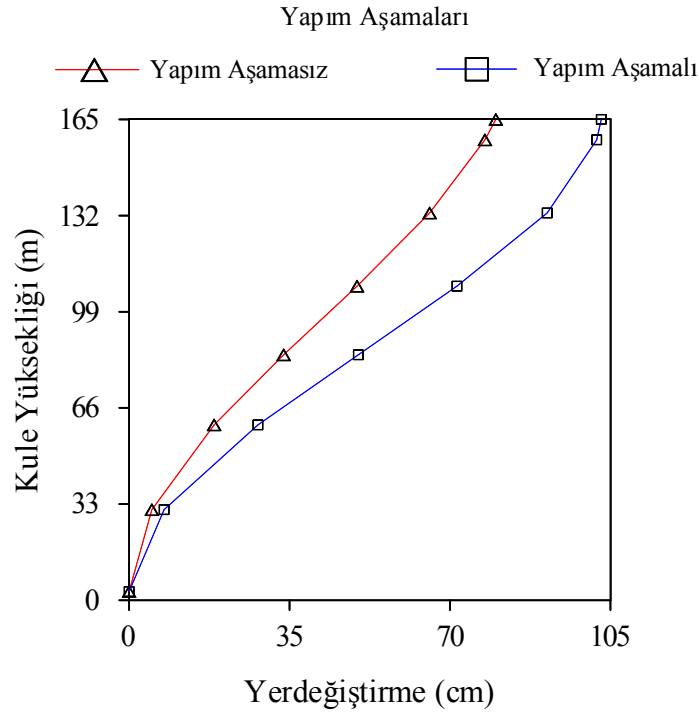


Şekil 2.16. Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi

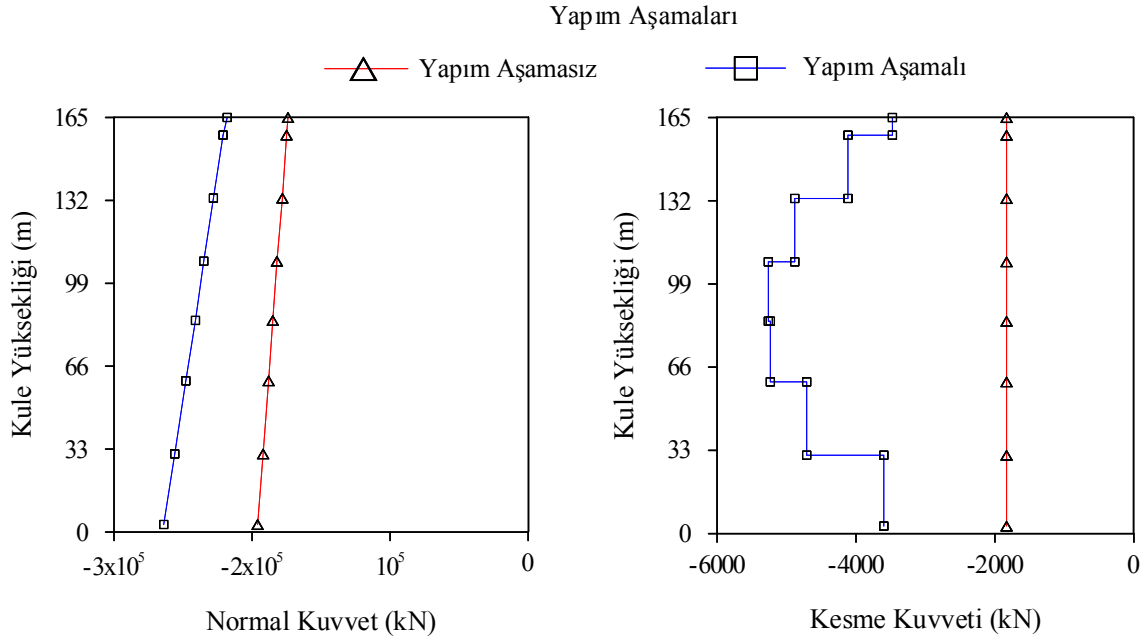
### 2.2.3.2.2. Kule Davranışı

Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.17'de verilmiştir. Şekil 2.17 incelendiğinde, yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yerdeğiştirmenin yapım aşamalarının dikkate alındığı durum için kule u noktasında 103 cm olarak elde edildiği grlmektedir.

Kule yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.18'de verilmektedir. Şekil 2.18 incelendiğinde, kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise hemen hemen aynı kaldığı grlmektedir. Ayrıca, yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük kesit tesirlerinin elde edildiği grlmektedir.

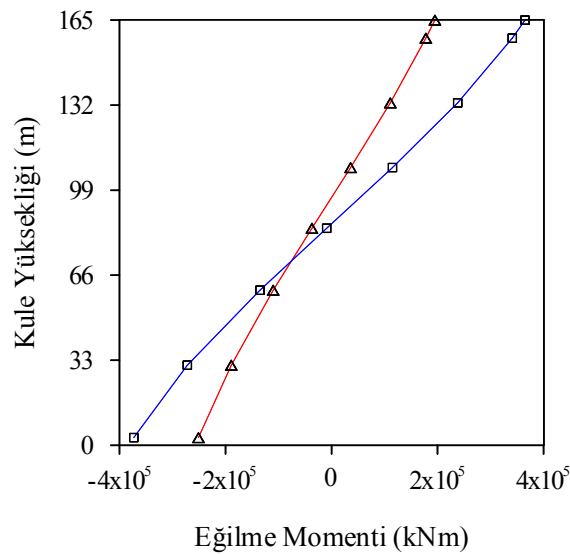


Şekil 2.17. Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi



Şekil 2.18. Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

Kule yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.19'da verilmektedir. Şekil 2.19 incelendiğinde, kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gösterdiği, kule ortasına doğru değerlerin azalıp daha sonra tekrar arttığı görülmektedir. Ayrıca, yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük eğilme momentlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2.19. Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

## 2.3. Humber Köprüsü

### 2.3.1. Humber Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri

Bu çalışmada sayısal uygulama için İngiltere'de bulunan Humber Köprüsü örnek olarak seçilmiştir (Şekil 2.20). Humber Köprüsü Londra'daki Freeman, Fox and Partners firması tarafından Severn ve Boğaziçi köprülerinden sonra inşa ettiği üçüncü asma köprüdür. (Brownjohn vd., 2010). Hull şehri yakınlarında bulunan Humber Köprüsü, dünyanın beşinci en büyük tek açıklıklı asma köprüsüdür. Severn nehrinden yüksekliği 30 m dir. Kuzey kıyısında Hessle ve Güney kıyısında Barton yakalarını birbirine bağlamaktadır. Yapımına 1972 yılında başlanmış olup, 1981 yılında trafiğe açılmıştır (URL-11, 2010).

Genel görünüşü Şekil 2.21'de verilen Humber Köprüsünün ana açıklığı 1410 m, kenar açıklıkları Hessle yakasında 280 m, Barton yakasında 530 m'dir. Kenar açıklık tabliyeleri kabloları asılıdır. Ana kablolar arasındaki mesafe 22 m'dir. Her biri 2 şerit olan, biri gidiş diğeri dönüş toplam iki yolu bulunmaktadır. Ayrıca 3 m genişliğinde iki tane yaya kaldırımı bulunmaktadır.

155,5 m yüksekliğinde olan betonarme kulelerin her biri, birbirine dört adet yatay portal kirişle bağlanmış ikişer ayağa sahiptir (Şekil 2.22). Kuleler için rüzgâr yükü 44 m/sn lik bir rüzgâr hızı dikkate alınırken kule tepesinde 66 m/sn olarak dikkate alınmıştır (URL-11, 2010).

Şekil 2.23'de kesiti görülen aerodinamik şekle sahip tabliye, içi boş kutu kesitli 124 adet tabliye ünitesinin birbirine kaynaklanmasıyla meydana gelmiştir. Her biri 140 ton ağırlığında olan 124 adet ünitenin montajına Hessle, Barton ve açıklığın ortasından başlanarak simetrik olarak dört yana doğru devam edilmiştir. Her bir tabliye ünitesi 18,1 m uzunluğunda, 4,5 m derinliğinde ve 28,5 m genişliğindedir. Montaj işlemleri tamamlandıktan sonra Humber köprüsünden önce inşa edilen uzun açıklıklı köprülerden farklı olarak tabliye çelik üst yüzeyi el ile mastarlanmamış, bu yöntemin yerine makine ile döşeme tekniği geliştirilerek 37 mm kalınlığında mastik asfalt serilerek uygulanmıştır (URL-11, 2010).

Tabliyeden gelen yükleri kule ve ankrajlar vasıtasıyla zemine aktaran ana kablolar 5 mm çapında 19.400 tonluk çekme dayanıma sahip 14.948 galvanizli çelik tellerin montajı

suretiyle oluşturulmuştur. Kablolarda kullanılan tel uzunluğu toplamı 71.000 km, kule tepesindeki ana kablolar arasındaki yatay mesafe 22 m dir (URL-11, 2010).

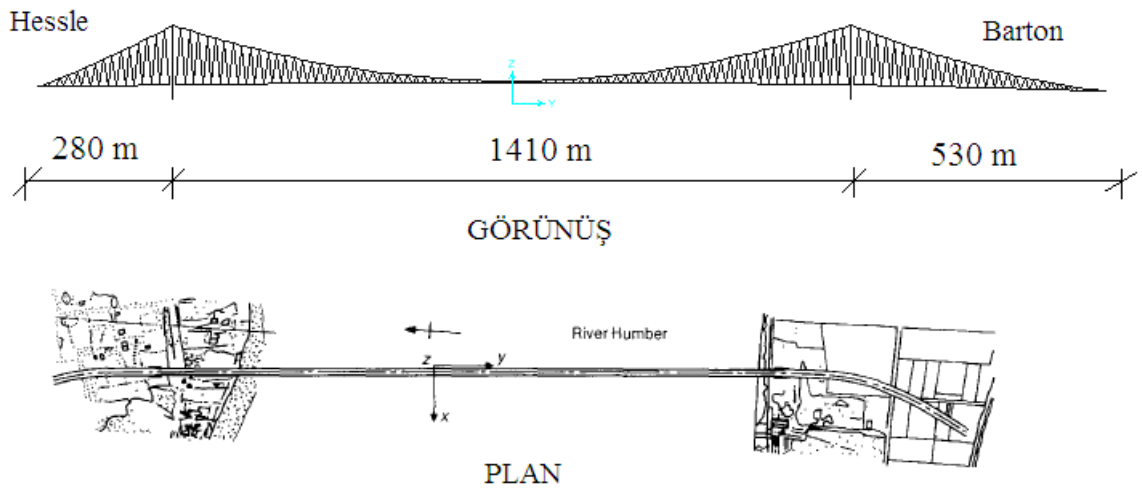


Şekil 2.20. Humber Köprüsü (URL 9 ve 10, 2010).

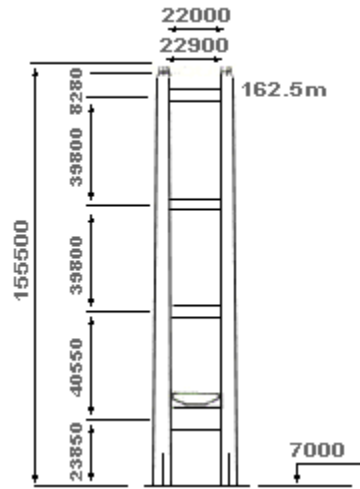
### 2.3.2. Humber Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Humber Köprüsü'nün yapısal davranışını analitik olarak belirlemek için köprü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur.

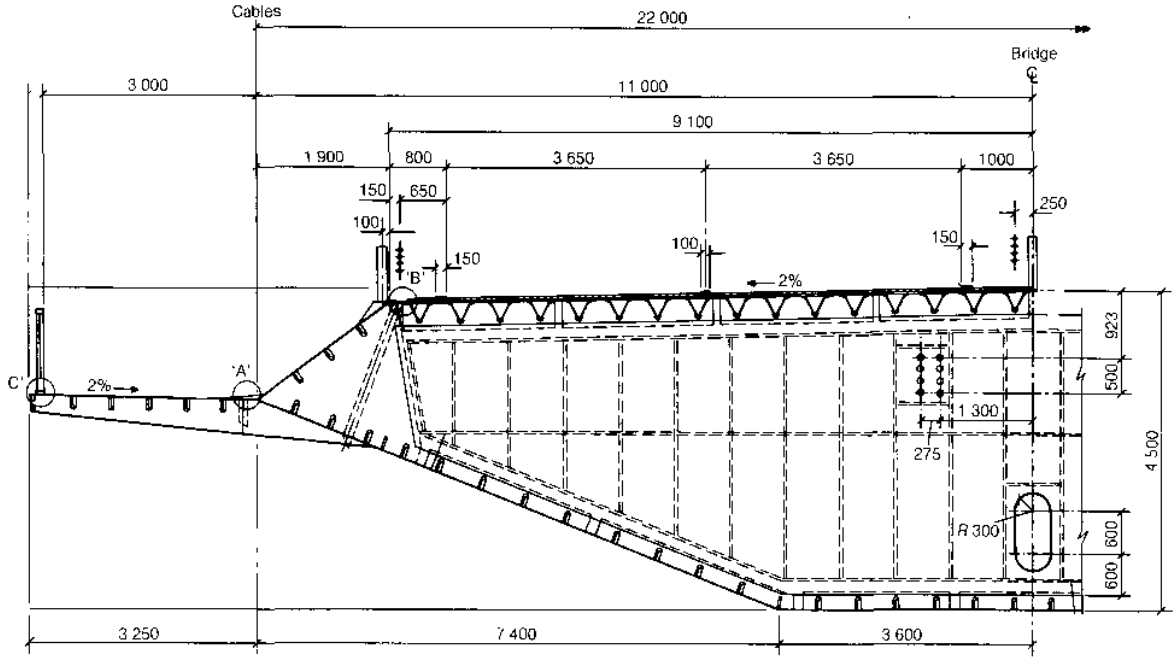
Humber Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli 291 düğüm noktası, 287 kiriş eleman ve 236 kafes elemandan oluşmaktadır (Şekil 2.24). Sonlu eleman modeli 855 serbestlik derecesi ile temsil edilmiştir.



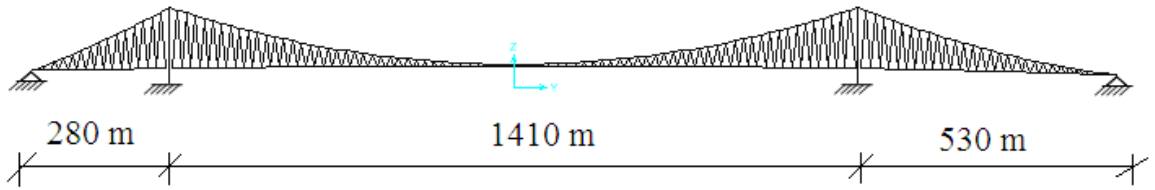
Şekil 2.21. Humber Köprüsü genel görünüşü (Brownjohn vd., 1987).



Şekil 2.22. Humber Köprüsü kule görünüşü (Brownjohn vd., 1987).



Şekil 2.23. Humber Köprüsü tabliye kesiti (Brownjohn vd., 1987).



Şekil 2.24. Humber Köprüsü iki boyutlu sonlu eleman modeli

### **2.3.3. Humber Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi**

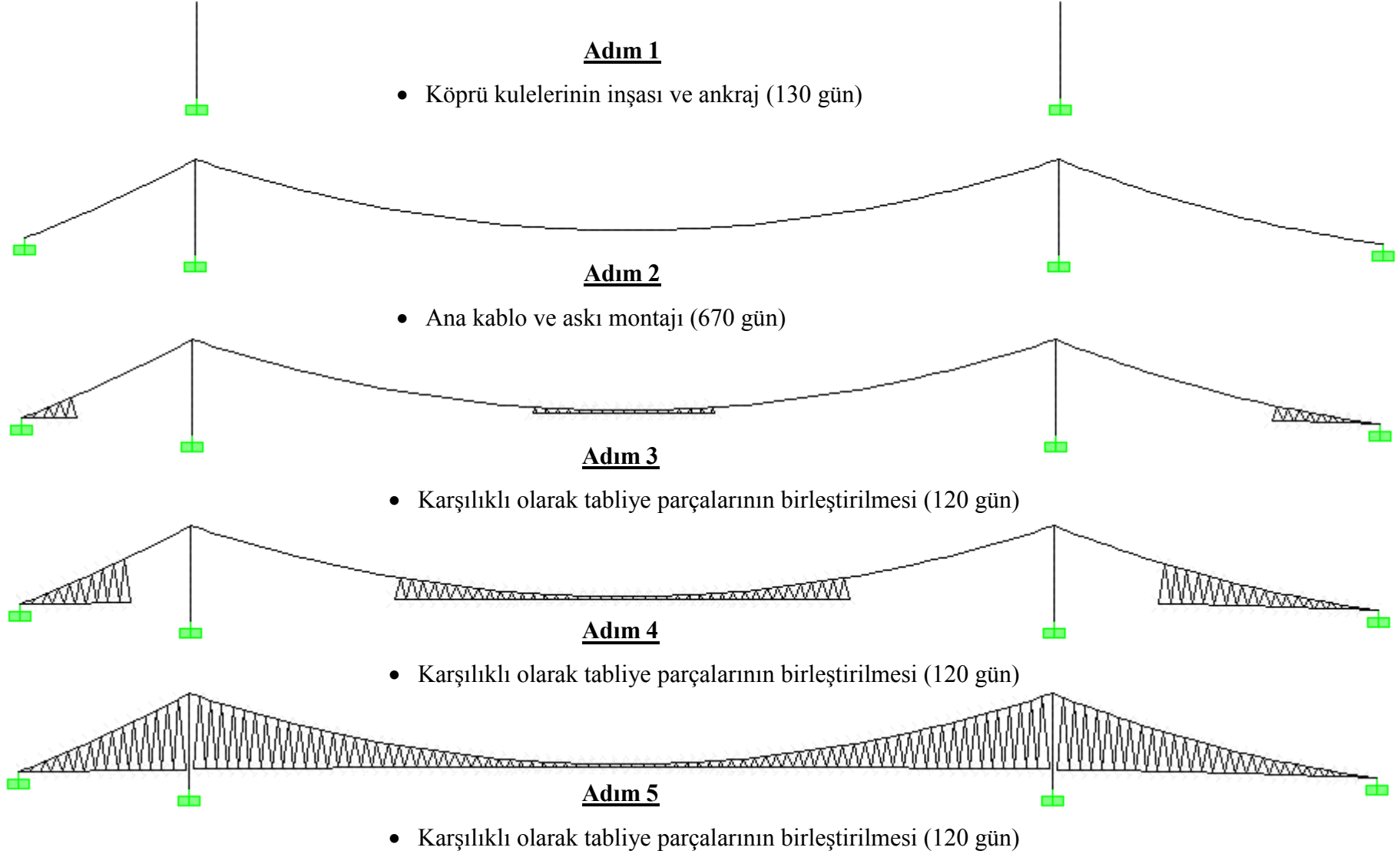
Humber Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli 5 adımda oluşturulmuştur. Toplam inşaat süresi 1160 gün olarak dikkate alınmıştır. Modellemeler sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Humber Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli Şekil 2.25'te verilmektedir.

Humber Köprüsü'nün yapısal davranışına zamana bağlı malzeme özelliklerinin etkisini belirlemek amacıyla yapım aşamalı sonlu eleman modelinde çelik malzemesi için çeliğin relaksasyonunun yanında, beton malzemesi için elastisite modülündeki değişimler, rötre ve sünme etkileri, dikkate alınmıştır. Çünkü beton ve çelik gibi yapısal malzemelerin bu özellikleri iklim şartlarına bağlı olarak devamlı değişkenlik gösterebilmektedir.

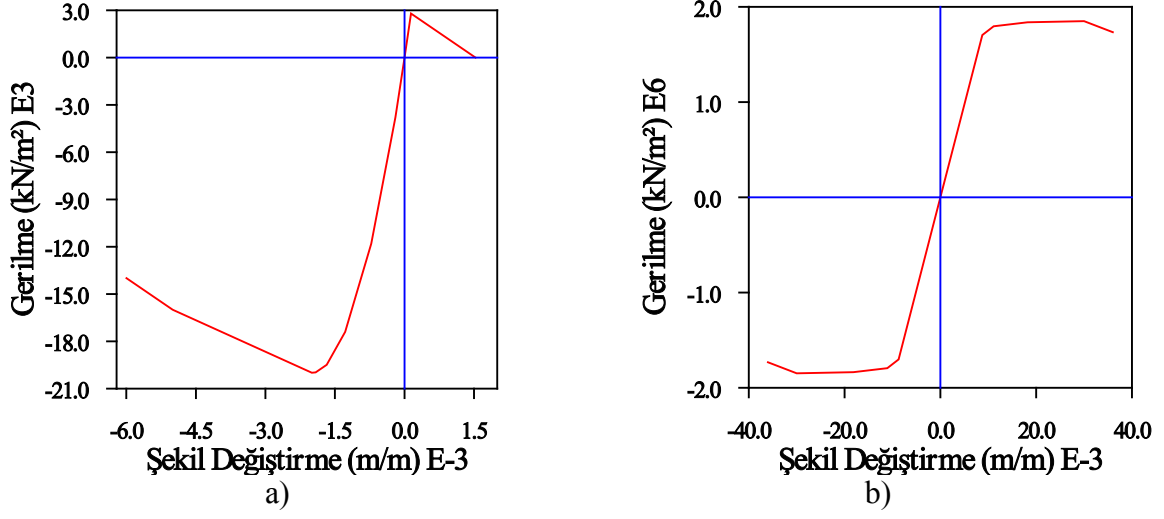
Beton ve çelik için zaman bağlı değişen malzeme özellikleri Şekil 2.26-2.28'de verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodun yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak Şekil 2.26-2.28'de verilen grafikler otomatik olarak değişmektedir. Köprünün inşasının başlamasından tamamlanmasına kadar geçen süre ortalama olarak 1160 gün olarak dikkate alınmıştır.

Humber Köprüsü'nün yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.29-2.30'da verilmektedir.

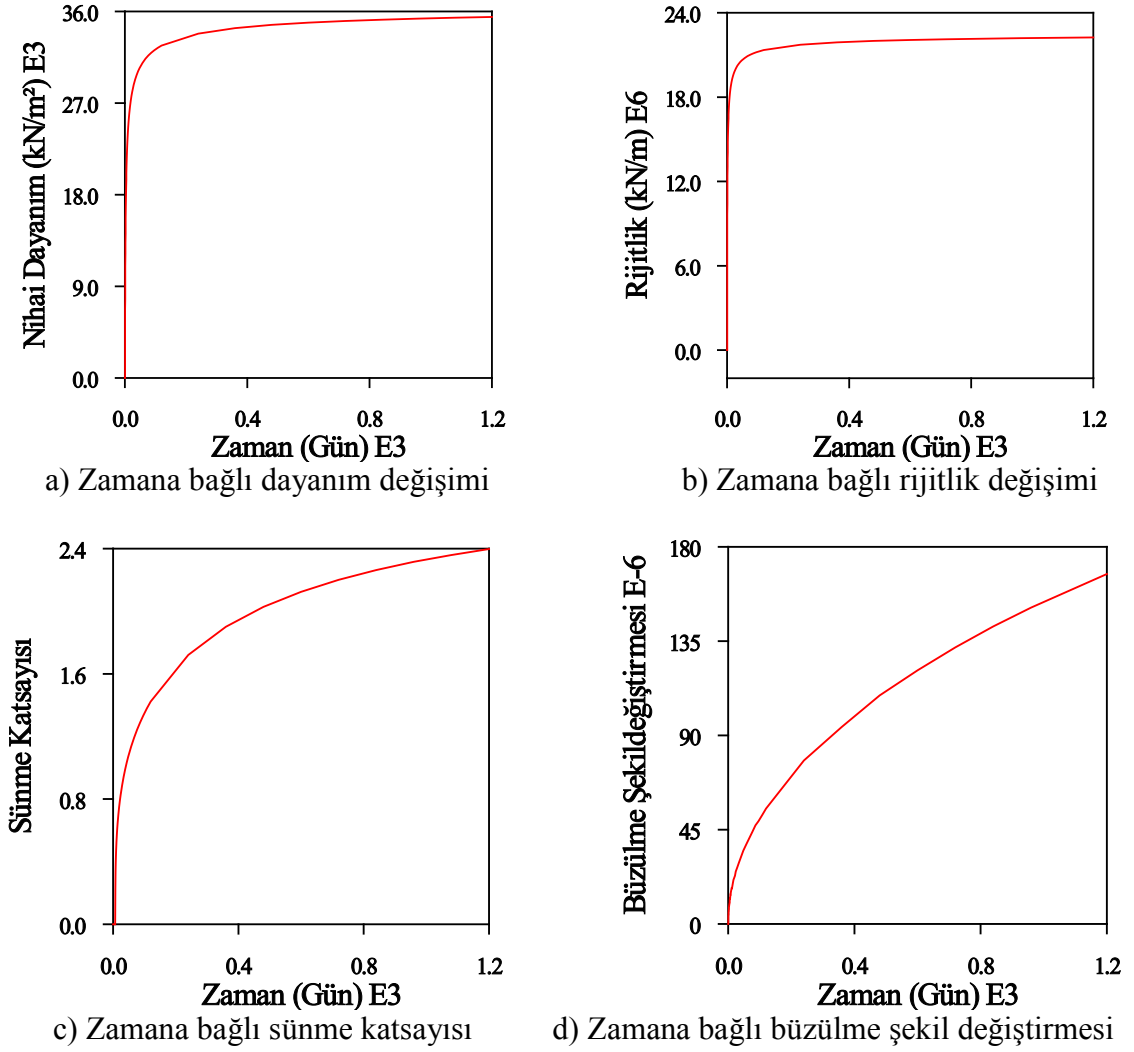




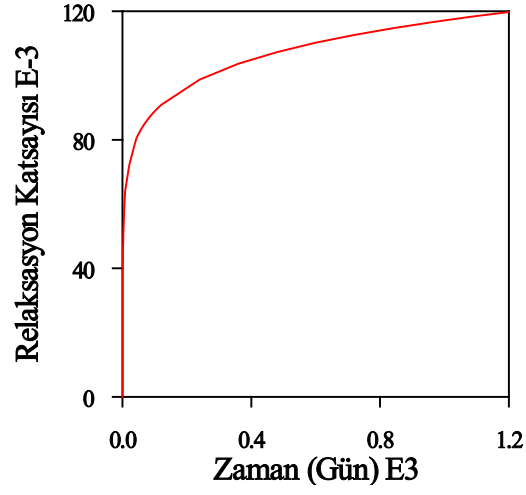
Şekil 2.25. Humber Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli



Şekil 2.26. Beton (a) ve öngerilmeli çelik (b) için kullanılan gerilme-şekil değişirme diyagramları



Şekil 2.27. Beton için zamana bağlı malzeme özelliği değişimleri

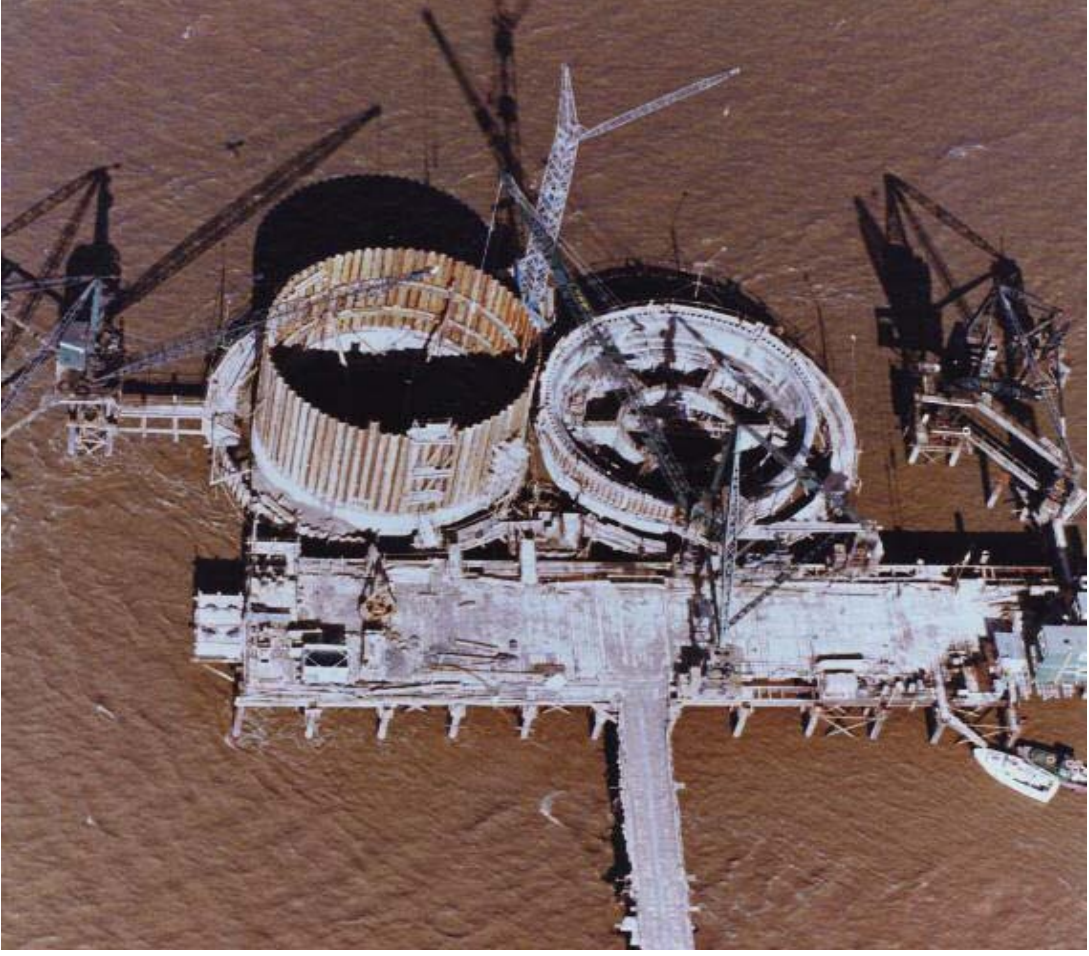


Şekil 2.28. Öngerilmeli çelik için zamana bağlı malzeme özelliği değişimi



Şekil 2.29. Humber Köprüsü kulelerinin yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL-11, 2010).

Şekil 2.29'un devamı





Şekil 2.30. Humber Köprüsü ana kablo ve tabliye yapım aşamalarına ait bazı fotoğraflar (URL 11 ve 12, 2010).

Şekil 2.30'un devamı



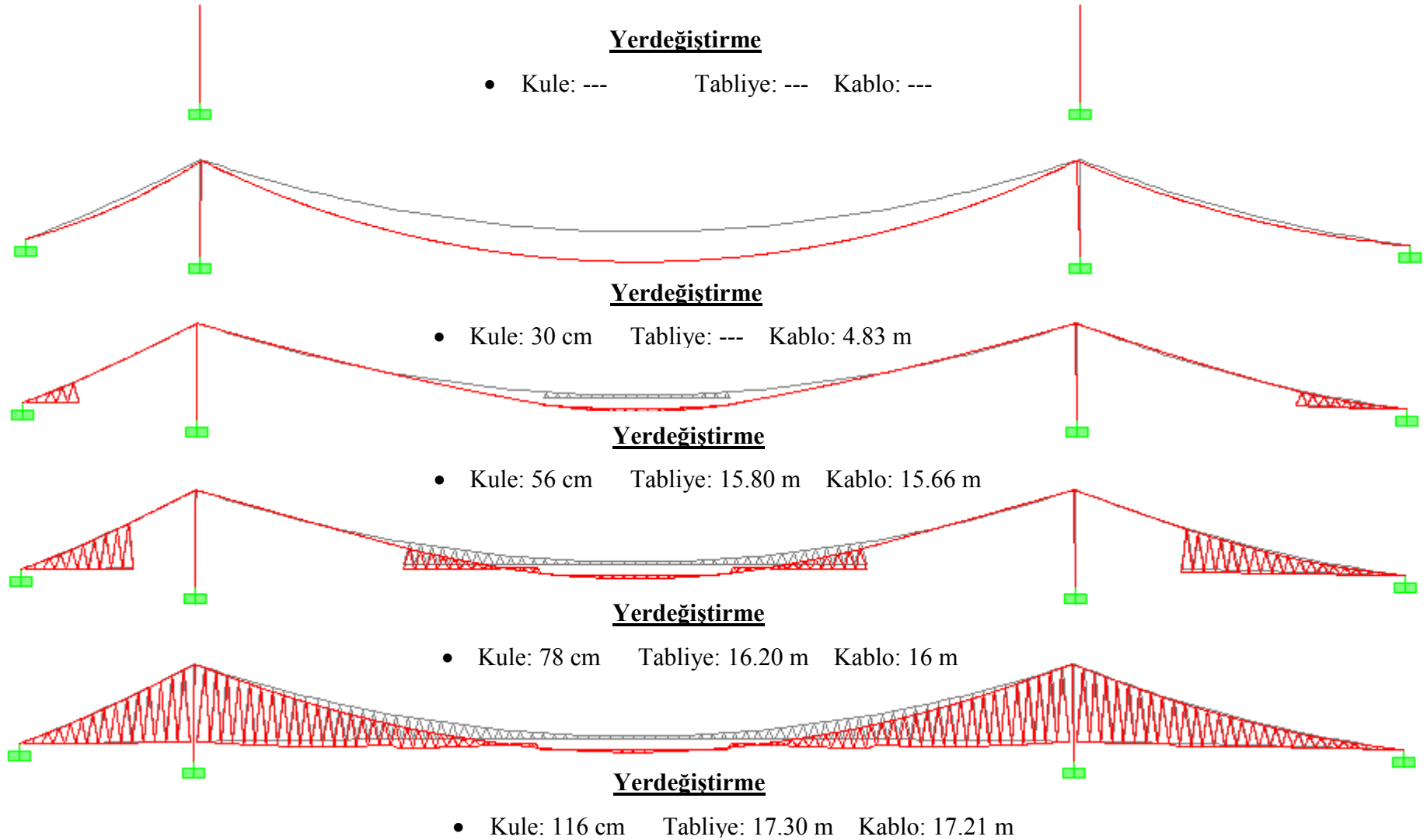
### **2.3.3.1. Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları**

Humber Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

- Sabit Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- Ek Sabit Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır. 10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 40 kN/m olarak etki ettirilmiştir.

### **2.3.3.2. Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri**

Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule, tabliye ve kabloya ait deformasyon değerleri Şekil 2.31'de verilmektedir. Şekil 2.31'de görüldüğü gibi köprü yapımı ilerledikçe tabliye ve kabloda oluşan düşey deformasyonlar ile kulelerde oluşan yatay deformasyonlar artmaktadır.

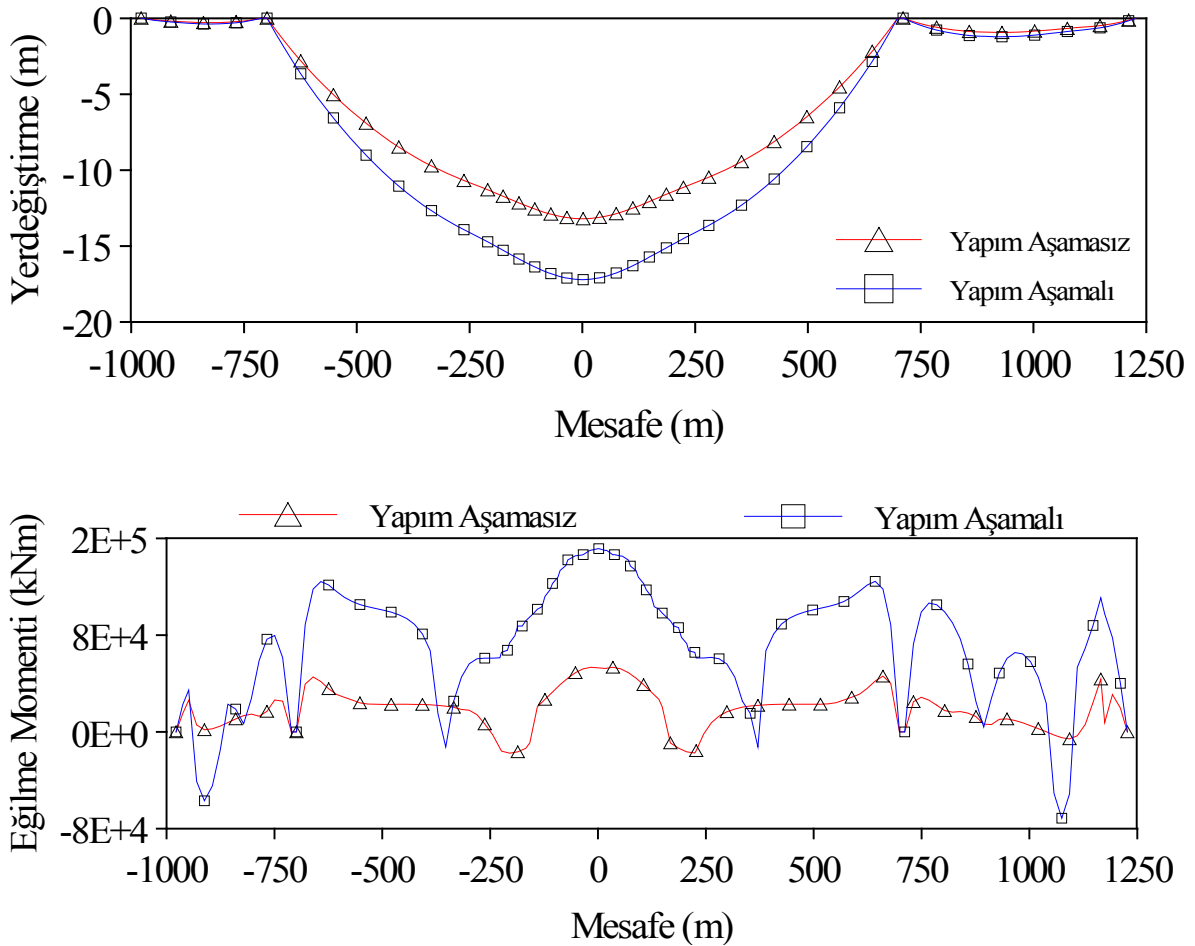


Şekil 2.31. Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule, tabliye ve kabloya ait deformasyon değerleri



### 2.3.3.2.1. Tabliye Davranışı

Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.32'de 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 2.32'de g örüldüğü gibi yerdeğiştirmeler ve eğilme momentleri köprü açıklık ortasına doğru artmaktadır. Ayrıca, yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük değerlerin elde edildiği kolaylıkla görülebilmektedir.

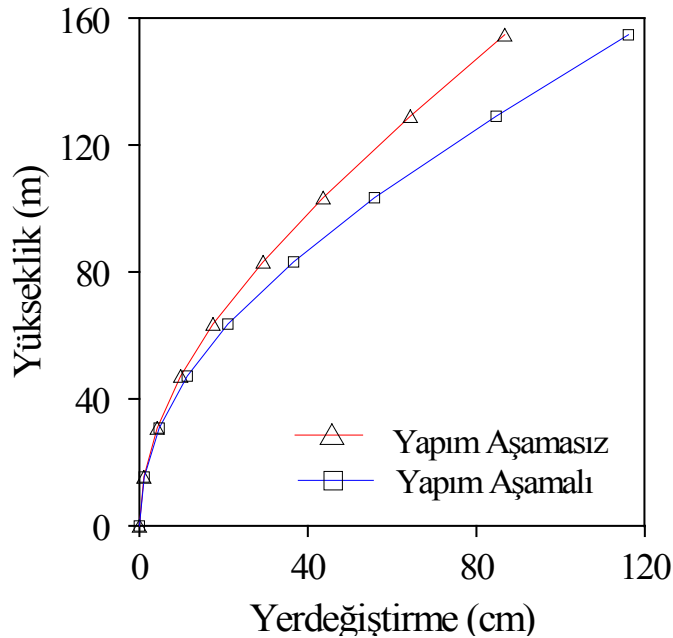


Şekil 2.32. Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi

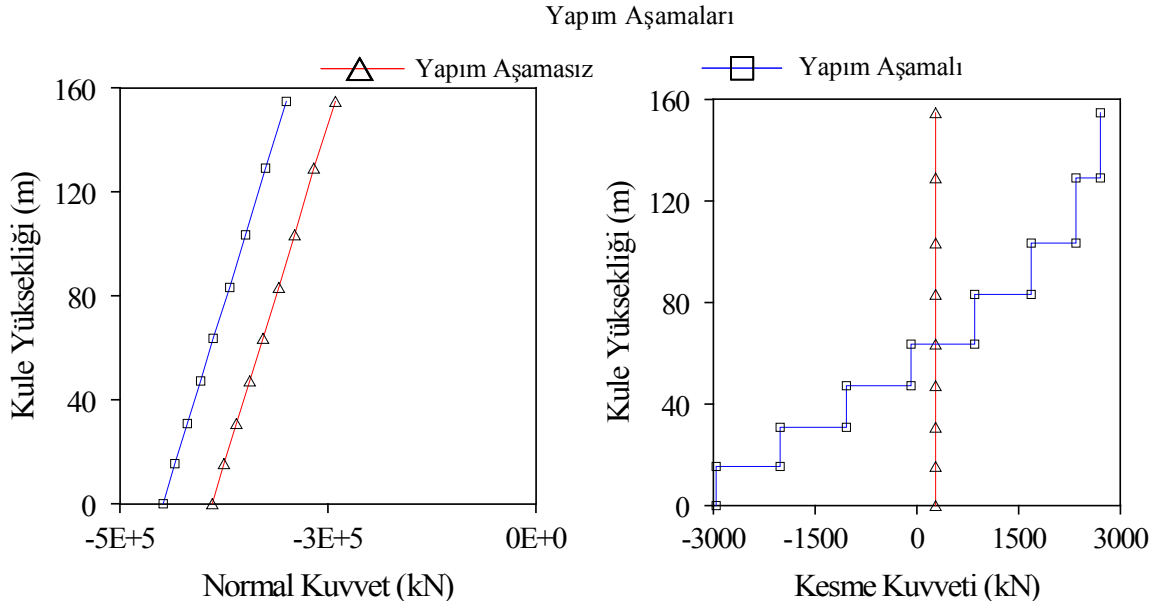
### 2.3.3.2.2. Kule Davranışı

Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.33'da verilmiştir. Şekil 2.33 incelendiğinde, yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yerdeğiştirilenin yapım aşamalarının dikkate alındığı durum için kule uę noktasında 116 cm olarak elde edildiği gürmektedir.

Kule yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.34'te verilmektedir. Şekil 2.34 incelendiğinde, kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alınmadığı analiz için aynı kaldığı gürmektedir. 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 arttığı gürmektedir. Ayrıca, yapım aşamaları dikkate alınarak geręekleřtirilen analizlerden daha büyük kesit tesirlerinin elde edildiği gürmektedir.

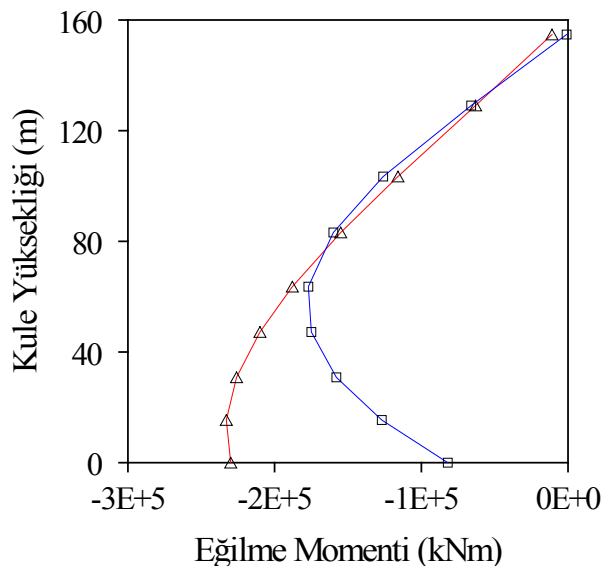


Şekil 2.33. Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule boyunca değişimi



Şekil 2.34. Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

Kule yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.35'te verilmektedir. Şekil 2.35 incelendiğinde, yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alınmadığı analiz sonucunda maksimum eğilme momenti değeri tabanda oluşmakta iken, yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analiz sonucunda ise maksimum eğilme momenti tabandan yaklaşık 40 m yüksekliğinde oluşmaktadır.



Şekil 2.35. Humber Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, asma köprülerinin yapısal davranışlarına yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar, iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda örnek olarak seçilen İstanbul'da bulunan asma köprülerden Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamaları ve malzeme deformasyonları dikkate alınarak lineer olmayan statik analizleri gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda İngiltere'de Severn Nehri üzerinde bulunan Humber Köprüsü'nün yapım aşamaları ve malzeme deformasyonları dikkate alınarak lineer olmayan statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde betonun zaman bağlı dayanım değişimi, elastisite modülünün değişimi, sünme ve rötire etkileri ile çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerin etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen yerdeğiştirmeler ve kesit değerleri yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

Boğaziçi Köprüsü'nün yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınmadığı statik analizler sonucunda;

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, tabliye orta noktasında maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri tabliye orta noktası için 9.8271 m dir. Maksimum eğilme momenti değeri ise 4.5E4 kNm olarak elde edilmektedir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda kabloda elde edilen düşey yerdeğiştirmenin maksimum değeri 9.8231 m olduğu görülmüştür.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı görülmektedir. Maksimum yatay yerdeğiştirme değeri kule tepe noktası için 80 cm dir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise hemen

hemen aynı kaldığı görülmektedir. Maksimum normal kuvvet ve maksimum kesme kuvveti değerleri sırasıyla 2E5 kN ve 2000 kN olarak kule alt ucunda elde edilmiştir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kule alt ucundan kule ortasına doğru azalıp daha sonra kule orta nokrasından kule tepesine doğru tekrar arttığı görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri 2E5 kNm olarak elde edilmiştir.

Boğaziçi Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün s onlu e leman m odeli proje hesap raporları dikkate alınarak toplam 5 adımda oluşturulmuş, çelik malzemesi için çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. 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 incelenmiştir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, tabliye orta noktasında maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri tabliye orta noktası için 12.54 m dir. Maksimum eğilme momenti değeri ise 4.2E4 kNm olarak elde edilmektedir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda kabloda elde edilen düşey yerdeğiştirmenin maksimum değeri 12.51 m olduğu görülmüştür.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı görülmektedir. Maksimum yatay yerdeğiştirme değeri kule tepe noktası için 103 cm dir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise kule alt ucundan kule ortasına doğru azalıp daha sonra kule orta nokrasından kule tepesine doğru tekrar arttığı görülmektedir. Maksimum normal kuvvet ve maksimum kesme kuvveti değerleri sırasıyla 3E5 kN ve 4000 kN olarak elde edilmiştir.

✓ Boğaziçi Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kule alt ucundan kule ortasına doğru azalıp daha sonra

kule orta nokrasından kule tepesine doğru tekrar arttığı görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri 4E5 kNm olarak elde edilmiştir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değışimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, tabliye orta noktasında maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri tabliye orta noktası için 13.21 m dir. Maksimum eğilme momenti değeri ise 5E4 kNm olarak elde edilmektedir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda kabloda elde edilen düşey yerdeğiştirmenin maksimum değeri 13.21 m olduğu görülmüştür.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı görülmektedir. Maksimum yatay yerdeğiştirme değeri kule tepe noktası için 87 cm dir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değışimi dikkate alındığında, normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Maksimum normal kuvvet ve maksimum kesme kuvveti değeri sırasıyla 4E5 kN ve 278 kN olarak kule alt ucunda elde edilmiştir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen statik analizleri sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kule alt uc undan kule tepe noktasına doğru azaldığı görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri 2E5 kNm olarak elde edilmiştir.

Humber Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün s onlu e leman m odeli proje hesap raporları dikkate alınarak toplam 5 adımda oluşturulmuş, beton malzemesi için elastisite modülündeki değışimler, rötre ve sünme etkileri ile çelik malzemesi için çeliğin relaksasyonu di kkte alınmıştır. 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 incelenmiştir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değışimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, tabliye orta noktasında maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Maksimum düşey

yerdeğiştirme değeri tabliye orta noktası için 17.30 m dir. Maksimum eğilme momenti değeri ise yaklaşık olarak 2E5 kNm olarak elde edilmektedir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda kabloda elde edilen düşey yerdeğiştirmenin maksimum değeri 17.21 m olduğu görölmüştür.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin kule yüksekliği boyunca artığı görölmektedir. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri kule tepe noktası için 116 cm dir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi dikkate alındığında, normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise kule alt ucundan kule ortasına doğru azalıp daha sonra kule orta noktasından kule tepesine doğru tekrar arttığı görölmektedir. Maksimum normal kuvvet ve maksimum kesme kuvveti değerleri sırasıyla 4.5E5 kN ve 3000 kN olarak elde edilmiştir.

✓ Humber Köprüsü'nün gerçekleştirilen yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen maksimum eğilme momenti değerlerinin tabandan yaklaşık 40 m yüksekliğinde olmaktadır. Maksimum eğilme momenti değeri ise 1.5E5 kNm olarak elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, asma köprüleri gibi yapımı uzun yıllar süren mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi için yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması çok büyük önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

➤ Statik analizler başlangıç şartı olarak kabul edilip köprülerin yapım aşamalı analizlerin dikkate alındığı ileri dinamik analizleri gerçekleştirilebilir.

➤ Farklı tür taşıyıcı sisteme sahip köprülerin yapısal davranışları da yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak belirlenebilir.

➤ Analizler sonucunda elde edilen değerlerin hassaslığını artırabilmek için yapım aşamalarının modellenmesi daha fazla adımda gerçekleştirilebilir.

➤ Yapım aşamalı analizlerin dikkate alındığı durumlarda betonun elastisite modülü, rötre ve sünme özelliklerinin yapım aşamalı analizleri nasıl etkilediği ayrı ayrı incelenebilir.

➤ Yapılan analizlerde sıcaklık etkileri dikkate alınabilir.

➤ Yapı zemin etkileşimleri dikkate alınabilir.

➤ Yapım aşamaları esnasında deprem etkileri dikkate alınabilir.

#### 4. KAYNAKLAR

- Abo-Hamid, M. ve Utku, S., 1978. Analytical Study of Suspension Bridge Flutter. *Journal of Engineering Mechanics*, 104, 537-550.
- 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 Dumanoglu, A.A., 2002. Stochastic Dynamic Analyses of Suspension Bridges Subjected to Asynchronous Ground Motions, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, September, İstanbul, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 507-606.
- 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.
- Aksoğan, O., 1986. Nonlinear Yapı Analizi, Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler, Ed: Ertepinar, A., Wasti, S.T., Aksoğan, O., KTÜ Basımevi, 225-233, Trabzon.
- Alp, Y.Z., 2007. Yaygın Yöntemlerle Yapılan Yapısal Analiz Sonuçlarının Kademeli Yükleme Etkisi Gözönüne Alınarak Yapılan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- 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., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- 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.



- Ateş, Ş., 2010. Construction Stage Analysis of Box Girder Bridges, Ninth International Congress on Advances in Civil Engineering, September, Trabzon, Türkiye, CD, ACE2010-SEE-139.
- Bathe, K. J., 1996. Finite Element Procedures, First Edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Brown, W.C. ve Parsons, M.F., 1975, Bosphorus Bridge, Part I, History of Design, Proc. Instn Civ.Engrs, 58, 505-532.
- Brownjohn, J.M.W., Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T. ve Taylor, C.A., 1987. Ambient Vibration Measurements of the Humber Suspension Bridge and Comparison with Calculated Characteristics, Proc. Instn. Civ. Engrs., 2, 83, 561-600.
- Brownjohn, J.M.W., Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T. ve Blakeborough, A., 1989. Ambient Vibration Survey of the Bosphorus Suspension Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 263-283.
- Brownjohn, J.M.W., Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1992. Ambient Vibration Survey of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) Suspension Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 907-924.
- Bulson, P.S., Caldwell, J.B. ve Severn, R.T., 1983. Engineering Structures Developments in the Twentieth Century, The University of Bristol Press, Bristol.
- 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., 2000. Bridge Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton
- Cheng, J., Jiang, J.J., Xiao, R.C. ve Xia, M. 2003. Wind-induced load capacity analysis and parametric study of a long-span steel arch bridge under construction. Computers and Structures, 81, 2513-2524.
- 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.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 1993, Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw Hill, Inc., Singapore.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1985. A synchronous Seismic Analysis of Modern Suspension Bridges, Part 1: Free Vibration, University of Bristol, Bristol.

- Dumanoğlu, A.A., Brownjohn, J.M.W. ve Severn, R.T.,1992. Seismic Analysis of the Fatih Sultan Mehmet ( Second Bosporus) Suspension Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 881-906.
- Karakaplan, A., Caner, A., Kurç, Ö., Domaniç, A. ve Lüleç, A., 2009. Yapı Çözümlemesinde Yeni Bir Devir: Yapım Aşaması, Teknik Dergi, 321, 4905-4917.
- 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.
- Malm, R. ve Sundquist, H., 2010. Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges. Engineering Structures, 32, 1038-1045.
- Merritt, F.S., 1983. Standard Handbook for Civil Engineers, Third Edition, McGraw-Hill, New York.
- Monti, G., Nuti, C. ve Pinto, P.E., 1996. Nonlinear Response of Bridges Under Multisupport Excitation, Journal of Structural Engineering, 122, 10, 1147-1159.
- Nazmy, A.S., 1998. Seismic performance of long-span bridges: issues and solutions, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Inst., Oakland, Computer File.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Przemieniecki, J.S., 1968. Theory of Matrix Structural Analysis, First Edition, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Pugsley, S.A.,1968. The Theory of Suspension Bridges, Second Edition, Edward Arnold, London.
- Rassem, M., 1992. Seismic Site Response of Alluvial Valleys and Effects on a Suspension Bridge, Doktora Tezi, McMaster University.
- Rassem, M., Goharrah, A. ve Heidebrecht, A.C., 1996. Site Effects on the Seismic Response of a Suspension Bridge, Engineering Structures, 18, 363-370.
- T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983. İşletmeye Açılışının 10. Yıl Dönümünde Boğaziçi Köprüsü, İstanbul.
- URL-1, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/90/Jacobs-creek-bridge-1.jpg>, 30.12.2010.
- URL-2, [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/LOC\\_Brooklyn Bridge and East River 7.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/LOC_Brooklyn Bridge and East River 7.png), 30.12.2010.
- URL-3, <http://www.disoriented.net/photo/2005/05/Saunter/6>, 30.12.2010.

URL-4, <http://www.lib.washington.edu/specialcoll/exhibits/tnb/>, 30.12.2010.

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, [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Bosphorus Bridge Night.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Bosphorus_Bridge_Night.jpg) 30.12.2010.

URL-8, <http://www.fussilet.com/index.php?topic=26745.0>, 30.12.2010.

URL-9, <http://hubpages.com/hub/Grimsby>, 30.12.2010.

URL-10, <http://www.pbase.com/clements/image/50325338>, 30.12.2010

URL-11, [www.humberbridge.co.uk/media/Engineering\\_The\\_Humber\\_Bridge\\_e-book.pdf](http://www.humberbridge.co.uk/media/Engineering_The_Humber_Bridge_e-book.pdf) 21.11.2010.

URL-12, <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=76>, 30.12.2010

Wang, P.H., Tang, T.Y. ve Zheng, H.N. 2004. A nalysis of c able-stayed br idges dur ing construction by cantilever methods, Computer and Structures, 82, 329-346.

Zembaty, Z., 1997. V ibrations of B ridge S tructure U nder K inematic W ave E xcitations, Journal of Structural Engineering, 123, 4, 479-487.

## ÖZGEÇMİŞ

**Murat GÜNAYDIN**, 1983 yılında Trabzon’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini 1989-2001 yılları arasında Trabzon/Tonya’da tamamladı. 2004 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı’nda gösterdiği başarı sonucu Erzurum Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde “Lisans” eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 2008 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Anabilim Dalı’nda “Yüksek Lisans” eğitimine başladı ve 2009 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevi sürdürmekte olan GÜNAYDIN iyi derecede İngilizce bilmektedir.

- 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.