

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KABLOLU KÖPRÜLERİN YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Barbaros ATMACA

HAZİRAN 2012
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KABLOLU KÖPRÜLERİN YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ

İnş. Müh. Barbaros ATMACA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.05.2012
Tezin Savunma Tarihi : 15.06.2012**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Barbaros ATMACA tarafından hazırlanan

KABLOLU KÖPRÜLERİN YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 / 05 / 2012 gün ve 1458 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ
Üye : Yrd. Doç Dr. Süleyman ADANUR
Üye : Yrd. Doç Dr. Hasan GEDİKLİ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

‘‘Kablolu Köprülerin Yapım Aşamalarına Göre Analizi’’ konusunu kapsayan bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Kablolu köprülerin inşa yönteminin ve yapımında kullanılan malzemelerin iklim şartlarından etkilenen ve zamanla özelliklerindeki değişiminin dikkate alındığı bu çalışmanın önümüzdeki yıllarda proje ve uygulayıcı inşaat mühendislerine yararlı olması arzusundayım.

Değerli hocam, danışmanım, Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ, tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli ortamı hazırlamış, çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olmuştur. Kendisine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her konuda yardımlarını ve zamanını esirgemeyen, görüş ve önerilerinden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ a içten teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen, beni bilgilendiren ve yönlendiren bütün hocalarımı saygıyla anar, kendilerine ömür boyu minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Yaşamım boyunca, hayatın her aşamasında benden desteğini esirgemeyen ve elinden geldiği her imkânı sağlayan babam Şakir ATMACA ve annem Hesna Aydan ATMACA’ya teşekkürü borç bilir ve bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Barbaros ATMACA
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kablolu Köprülerin Yapım Aşamalarına Göre Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili programda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20/06/2012

Barbaros ATMACA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kirişli Köprüler	1
1.3. Kemer Köprüler	2
1.4. Kafes Köprüler	3
1.5. Asma Köprüler	3
1.6. Kablolü Köprüler	4
1.6.1. Kablolü Köprülerin Temel Özellikleri.....	6
1.6.2. Kablolü Köprülerin Yapısal Elemanları	7
1.6.2.1. Kablolar.....	9
1.6.2.1.1. Kablo Tipleri.....	10
1.6.2.1.1.1. Paralel Çubuk Kablolar	10
1.6.2.1.1.2. Paralel Tekil Kablolar	10
1.6.2.1.1.3. Demetlenmiş Kablolar	11
1.6.2.1.1.4. Kilit Sargılı Kablolar.....	12
1.6.2.1.2. Kablo Düzenleri	13
1.6.2.1.2.1. Enine Kablo Düzeni	13
1.6.2.1.2.1.1. Tekil Kablo Düzeni	13
1.6.2.1.2.1.2. İkili Kablo Düzeni	14
1.6.2.1.2.1.3. Üçlü Kablo Düzeni	14

1.6.2.1.2.2.	Boyuna Kablo Düzeni.....	15
1.6.2.1.2.2.1.	Paralel Kablo Düzeni.....	15
1.6.2.1.2.2.2.	Yelpaze Kablo Düzeni.....	15
1.6.2.1.2.2.3.	Radyal Kablo Düzeni	16
1.6.2.2.	Kuleler	16
1.6.2.3.	Tabliyeler.....	17
1.6.2.3.1.	Çelik Tabliyeler	18
1.6.2.3.2.	Beton Tabliyeler	18
1.6.2.3.3.	Kompozit Tabliyeler.....	19
1.6.3.	Kablolu Köprülerin İnşa Yöntemleri.....	20
1.6.3.1.	Kademeli İnşa Yöntemi	20
1.6.3.2.	İttirme Yöntemi	21
1.6.3.3.	Dengeli Konsol Yöntemi	21
1.7.	Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	22
1.8.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	26
2.	KABLOLU KÖPRÜLERİN ANALİZ VE MODELLEME YÖNTEMLERİ	28
2.1.	Analiz Yöntemi.....	29
2.1.1.	Kablolu Köprülerde Zamana Bağlı Analiz	30
2.1.1.1.	Zamana Bağlı Etkenler	30
2.1.1.1.1.	Betonun Sünmesi	30
2.1.1.1.2.	Betonun Basınç Dayanımı	32
2.1.1.1.3.	Betonun Yaşı	33
2.1.1.1.4.	Betonun Büzülmesi.....	33
2.1.1.1.5.	Çeliğin Gevşemesi	34
2.2.	Modelleme Yöntemi	35
3.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	36
3.1.	Manavgat Kablolu Köprüsünün Yapısal Özellikleri	37
3.2.	Manavgat Kablolu Köprüsünün Sonlu Eleman Modeli.....	42
4.	BULGULAR VE İRDELEMELER	47
4.1.	Tabliyenin Statik Davranışı	47
4.2.	Kulenin Statik Davranışı.....	48
4.3.	Tabliyenin Dinamik Davranışı	50

4.4.	Kulenin Dinamik Davranışı	53
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	56
6.	KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KABLOLU KÖPRÜLERİN YAPIM AŞAMALARINA GÖRE ANALİZİ

Barbaros ATMACA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ
2012, 61 Sayfa

Bu tez çalışmasında kablolu köprülerin konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkilerin dikkate alındığı lineer olmayan analizi ve deprem davranışını belirlemek için dinamik analizi yapılmaktadır. Bu araştırma için model olarak Türkiye'nin ilk kablolu köprüsü olan Manavgat kablolu köprüsü seçilmiştir. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün, konsol dilimler halinde inşasının doğrusal olmayan analizi ve dinamik analizi SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Köprü inşasının aşamaları söz konusu program yardımıyla modellenerek her aşaması için analiz sonuçları ayrı ayrı elde edilmiştir. Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli hem yapım aşaması yöntemine göre hem de yapım aşamaları dikkate alınmaksızın analiz edilmiştir. İki yöntem ile elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Dinamik analizlerden elde edilen bulgularla da köprü'nün dinamik karakteristiği belirlenmeye çalışılmıştır.

Birinci bölümde kablolu köprülere ait genel bilgiler ve yapılan çalışmalar aktarılmış, kablolu köprülerin yapı elamanları açıklanmıştır. İkinci bölümde kablolu köprülerin analiz ve modelleme yöntemlerinden bahsedilmiş yapılan kabuller ve matematiksel hesaplar ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde gerçek bir yapı olarak Türkiye'de inşa edilmiş olan Manavgat Kablolu Köprüsü ele alınmıştır. Köprü'nün yapısal ve geometrik tanıtımından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde köprü'nün yapım aşamalarının dikkate alındığı ve alınmadığı analizler sonucunda köprü'nün tabliyesinde ve kulesinde meydana gelen kesit tesirleri birbiriyle karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Bu bölümde ayrıca köprü'nün 3 boyutlu modelinin dinamik analizleri sonucunda elde edilen köprü'nün tabliyesinde ve kulesinde meydana gelen kesit tesirleri belirlenerek kablolu köprülerin dinamik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Beşinci bölümde ise çıkan sonuçlar değerlendirilerek, bu sonuçlar ışığında yapımın statik davranışını en iyi temsil eden analiz yöntemi belirlenmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Manavgat Kablolu Köprüsü, Yapım Aşaması, Zamana Bağlı Deformasyonlar, Dengeli Konsol Yöntemi.

Master Thesis

SUMMARY

CONSTRUCTION STAGE ANALYSIS OF THREE DIMENSIONAL
CABLE-STAYED BRIDGE

Barbaros ATMACA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assistant Prof. Sevket ATES
2012, 61 Pages

In this paper nonlinear static analysis of three-dimensional cable stayed bridges are performed for the time dependent materials properties such as creep, shrinkage and aging of concrete and relaxation of cable. The Manavgat Cable-Stayed Bridge is selected as an application. The bridge is located in Antalya, Turkey was constructed with balanced cantilever construction method. Total length of the bridge is 202 m. The tower of bridge is located middle of the bridge span. The bridge has one λ shape steel tower. The construction stages and 3D finite element model of bridge are modeled with SAP2000. Large displacement occurs in these types of bridges so geometric nonlinearity is taken into consideration in the analysis using P-Delta plus large displacement criterion. The time dependent material strength variations and geometric variations are included in the analysis. In the first chapter of the study is mentioned type of bridges and structural components of cable stayed bridges, and previous researches which related with this study. In the second chapter is showed the modeling method and the formulation of construction stage analysis of the bridge. In the third chapter, Manavgat Cable Bridge which constructed in Turkey is selected for modeling. The information about geometrical and material properties of bridge is given too. In the fourth chapter, two different finite element analyses carried out that are evaluated with and without construction stages and results are compared with each other. As a result of these analyses, variation of internal forces such as bending moment, axial forces and shear forces for bridge tower and displacement and bending moment for bridge deck are given with detailed. The result of dynamic analysis was showed with graphics and these graphics have helped us to understanding of dynamic behavior of the bridge. As a result, it is observed that the differences between two analysis. The construction stage analysis is the best way for showing static behavior of bridge.

Key Words: Manavgat Cable-Stayed Bridge, Construction Stage Analysis, Time dependent materials properties, 3D finite element model, Balanced cantilever method.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kirişli köprü.....	2
Şekil 1.2. Kemer köprü	2
Şekil 1.3. Kafes köprü.....	3
Şekil 1.4. Asma köprü.....	4
Şekil 1.5. Manavgat Kablolu Köprüsü.....	4
Şekil 1.6. Strömsund Köprüsü	5
Şekil 1.7. Kablolu köprünün temel elemanları	8
Şekil 1.8. Kablolu köprünün yük taşıma prensibi.....	8
Şekil 1.9. Paralel çubuk kablo kesiti	10
Şekil 1.10. Paralel tekil kablo kesiti.....	10
Şekil 1.11. Demetlenmiş kablo kesiti	11
Şekil 1.12. Kilit sargılı kablo kesiti	12
Şekil 1.13. Tekil kablo düzeni	13
Şekil 1.14. İkili kablo düzeni	14
Şekil 1.15. Üçlü kablo düzeni	14
Şekil 1.16. Paralel kablo düzeni.....	15
Şekil 1.17. Yelpaze kablo düzeni.....	15
Şekil 1.18. Radyal kablo düzeni	16
Şekil 1.19. Kablolu köprülerde çeşitli kule tipleri, a) Tekil kule, b)H tipi kule ve c) H tipi kule, d) A tipi kule, e) Elmas tipi kule, f) Ters Y tipi kule	17
Şekil 1.20. Çelik tabliye tipleri	18
Şekil 1.21. Beton tabliye tipleri	19
Şekil 1.22. Kompozit tabliye enkesiti	19
Şekil 1.23. Kademeli inşa yöntemi uygulaması.....	20
Şekil 1.24. İttirme yöntemi uygulaması.....	21
Şekil 2.1. Kiriş elemana ait serbestlik dereceleri	29
Şekil 3.1. Kocaeli-Gebze düşey ivme kaydı	37
Şekil 3.2. Manavgat Kablolu Köprüsü şematik şekli.....	37

Şekil 3.3.	Kulenin şematik şekli	39
Şekil 3.4.	Kulede kullanılan çelik profilin enkesiti (A-A kesiti)	40
Şekil 3.5.	Tabliyede boyuna doğrultuda kullanılan çelik profilin enkesiti	41
Şekil 3.6.	Tabliyede enine doğrultuda kullanılan çelik profilin enkesiti	41
Şekil 3.7.	Manavgat Kablolu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli	42
Şekil 3.8.	Manavgat Kablolu Köprüsü'nün yapım aşamaları	43
Şekil 3.9.	Öngerilme çelik için gerilme şekil-değiştirme (a) ve zamana bağlı malzeme özelliklerinin değişimi (b) diyagramları.....	45
Şekil 3.10.	Beton için zamana bağlı malzeme özelliklerinin değişimi	46
Şekil 4.1.	Düşey yerdeğiştirmenin tabliye boyunca değişimi.....	48
Şekil 4.2.	Eğilme momentinin tabliye boyunca değişimi	48
Şekil 4.3.	Düşey yerdeğiştirmenin kule boyunca değişimi.....	49
Şekil 4.4.	Normal kuvvet ve kesme kuvveti değerinin kule yüksekliği boyunca değişimi	49
Şekil 4.5.	Eğilme momenti değerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	50
Şekil 4.6.	Düşey yerdeğiştirmenin tabliye uzunluğu boyunca değişimi	51
Şekil 4.7.	Düşey yerdeğiştirmenin en büyük değere ulaştığı elemandaki düşey yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	52
Şekil 4.8.	Eğilme momentinin tabliye uzunluğu boyunca değişimi	52
Şekil 4.9.	Eğilme momentinin en büyük değere ulaştığı elemandaki eğilme momentinin zamanla değişimi	53
Şekil 4.10.	Normal kuvvetin kule yüksekliği boyunca değişimi	54
Şekil 4.11.	Normal kuvvetin en büyük değere ulaştığı elemandaki normal kuvvetin zamanla değişimi	54
Şekil 4.12.	Eğilme momentinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	55
Şekil 4.13.	Eğilme momentinin en büyük değere ulaştığı elemandaki eğilme momentinin zamanla değişimi.....	55

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Köprüde kullanılan kablolarla ait kesit alanları	38
Tablo 3.2. Manavgat Kablo lu Köprüsünün Yapım Aşamaları	44
Tablo 4.1. Köprünün periyot ve frekans değerleri	51

SEMBOLLER DİZİNİ

$\{u\}$: Yapının yerdeğiştirme vektörü
$[K]$: Rijitlik matrisi
$[K_{\text{sistem}}]$: Sistem rijitlik matrisi
$[K_E]$: Eleman rijitlik matrisi
$[K_G]$: Geometrik rijitlik matrisi
F	: Dış kuvvet vektörü
$\sigma_c(t_o)$: t_o anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilmeyi
$\varphi(t,t_o)$: Sünme katsayısını
β_c	: Yüklemeden sonra devam eden sünmeyi
t	: Betonun gününü
t_o	: Yükleme anındaki betonun yaşını
f_{cm}	: Betonun 28 günlük basınç dayanımı
s	: Çimento tipine bağılı bir katsayı
$E_{ci}(t)$: t günlük betonun elastisite modülünü
E_{ci}	: Betonun 28 günlük elastisite modülünü
ϵ_{cso}	: Kavramsal büzölme katsayısını
β_s	: Zamana bağılı devam eden büzölmeyi gösteren bir katsayayı
f_{cmo}	: 10MPa
β_{sc}	: Çimentonun tipine bağılı bir katsayı
RH	: % olarak atmosferdeki nem oranı
A_c	: Kesit alanı
u	: Atmosfer ile temas eden çevre uzunluğu
ρ_t	: t saat sonraki relaksasyonu
$\beta_{cc}(t)$: Betonun yaşına bağılı bir katsayı

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanoğlu yüzyıllar boyunca başta barınak olarak kullandığı yapıların inşasını dışında farklı ihtiyaçları için farklı yapılar inşa etmiştir. İnsanoğlunun en önemli ihtiyaçlarında birisi de ulaşım ihtiyacıdır. Çünkü toplumların ihtiyaçlarının birçoğunun karşılanması ulaşım olanaklarına bağlıdır. İnsanoğlunun ulaşım ihtiyacını karşılariken de bazı engellerle karşılaşmıştır. Nehirler ve derin vadiler gibi engelleri aşmak için de insanoğlu köprüyü keşfetmiştir. Köprüler genelde iki ucunda iki kenar ayağa ve varsa orta ayaklara oturan tabliyeden oluşan yapılarıdır. Yapılan ilk köprüden günümüze kadar birçok köprü inşa edilmiştir. Her yapılan köprü bir sonraki köprü için bir basamak yani bilgi birikimi oluşturmuştur. İnsanoğlunun artan bilgi birikimi köprülerin gelişmesine ve yeni köprü türlerinin meydana gelmesini sağlamıştır. Meydana gelen bu köprü türlerini 5 ana başlık altında toplarsak;

1. Kirişli Köprüler
2. Kemer Köprüler
3. Kafes Köprüler
4. Kablolü Köprüler
5. Asma Köprüler

şeklindedir.

1.2. Kirişli Köprüler

İnsanoğlunun ilk kullandığı köprü türlerinden biridir. Örnek verecek olursak küçük bir nehri geçmek için nehir üzerine bir ağacın yerleştirilmesini verebiliriz. En yaygın köprü türü olup mesnetler arasına kirişlerin yerleştirilmesiyle oluşturulurlar ve kısa ile orta açıklıklarda uygulanır. Basit ve ekonomik oluşu tercih sebebidir. Şekil1.1'de kirişli bir köprü görülmektedir.



Şekil 1.1. Kirişli köprü (URL-1, 2012)

1.3. Kemer Köprüler

Kemer köprü sisteminde yükler kemerler tarafından alınır ve yüklerin yönü değiştirilerek basınç kuvveti olarak kemer boyunca nakledilir ve köprü ayaklarından zemine verilir. Kemer tipi köprülerdeki elemanlar genel olarak basınçta çalışırlar. Şekil 1.2’de kemer tipi bir köprü görülmektedir



Şekil 1.2. Kemer köprü (URL-2, 2012)

1.4. Kafes Köprüler

Kafes köprüler üzerlerine gelen yükleri düğüm noktaları yoluyla mesnetlere iletilir. Özellikle çelik üretiminin artmasıyla bu tip köprülerin sayısında hızlı bir artış olmuştur. Aynı açıklıkta eşit yük taşıyan eşdeğer kirişten daha hafif ve etkilidir. Şekil 1.3’de kafes bir köprü görülmektedir.



Şekil 1.3. Kafes köprü (URL-3, 2012)

1.5. Asma Köprüler

Asma köprülerde iki taşıyıcı kenar ayak, iki ana taşıyıcı kablo ve ana taşıyıcı kabloların bağlandığı ankraj kütleleri bulunmaktadır. Araçların geçtiği tabliye dediğimiz yol, askı çubukları adı verilen ve genelde düşey konumda olan kablolar yardımıyla iki ana taşıyıcı kabloya asılmıştır. Şekil 1.4’te asma bir köprü görülmektedir



Şekil 1.4. Asma köprü (URL-4, 2012)

1.6. Kablolu Köprüler

Kablolu köprüler; orta kısımda bir veya daha fazla kule ve sürekli bir veya iki kirişten ve kablolardan oluşan en modern köprülerden biridir. Kablolu köprüler özellikle geniş nehirler, derin vadiler ve arada ayak yapılmasına izin vermeyen geniş otoyol geçişlerinde ideal bir çözüm olmaktadır. Şekil 1.5'te Manavgat'ta bulunan kablolu köprü görülmektedir.



Şekil 1.5. Manavgat Kablolu Köprüsü (URL-5, 2012)

İkinci Dünya savaşından sonra kablolu köprülerin yapımına toplumun artan ihtiyaçlarını karşılamak üzere başlanmıştır. Bu tarihten sonra birçok bilim adamı ve mühendis kablolu köprülerle ilgilenmeye başlamıştır. Bu dönemlerde bilgisayar teknolojisinin yeterli olmaması araştırmacıları 3 boyutlu modelleme yerine daha kolay hesaplanabilir 2 boyutlu modelleme üzerinde çalışmaya itmiştir. Fakat kablolu köprülerde kullanılan 2 boyutlu modellerin güçlü bir biçimde ortaya çıkan 3. boyut etkilerini gösterememesi açısından uygun olmadığını söylemiştir (Nazmy, 1987). Buna karşın kablolu köprülerin yüksek hiperstatikliğinden dolayı ilk zamanlarda yapı davranışı tam olarak anlaşılamamıştır. Bu yüzden de yapılan köprülerin bir kısmı yıkılmıştır. Modern kablolu köprülerin başlamasını sağlayan kişi Franz Dischinger'dir. Dischinger'in 1955 yılında İsveç'te tamamladığı Strömsund Kablolu Köprüsü ilk modern kablolu köprü olarak kabul edilir ve köprü Şekil 1.6'da görülmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve ilk kablolu köprülerin yapımından elde edilen bilgi birikimi modern kablolu köprülerin daha da yaygınlaşmasını sağlamıştır. Kablolu köprülerin estetik olarak hoş görünmesi, ekonomik ve yapımının kolay olması sayısındaki artışın en önemli sebepleridir.



Şekil 1.6. Strömsund Köprüsü (URL-6, 2012)

Köprü gibi büyük mühendislik yapılarının yapımı uzun zaman almakta ve inşa sürecinde yapıya etkiyen yükler sürekli olarak değişkenlik göstermektedir. Fakat geleneksel yöntem ile yapılan yapı çözümlemesinde yapının bir anda yapılıp yüklendiği

kabul edilmekte ve yapıda kullanılan malzemelerin zamanla değişen özellikleri dikkate alınmamaktadır. Bu durum ise gerçek yapı davranışını yansıtmamaktadır. Gerçekte yapının inşası belli bir sürede tamamlamakta ve bu süreçte yapıya etkiyen yükler ve yapıda kullanılan malzeme özellikleri zaman ile değişmektedir. İnşa süresi uzun olan yapılarda kullanılmakta olan malzemelerin özelliklerinde, yapının davranışını büyük ölçüde etkileyecek değişimlerin meydana gelmesi kaçınılmazdır. Gerçek yapı davranışının öngörülmediği bir çözümlenmeden gerçekçi sonuçların elde edilmesi mümkün olmayabilir. Köprü gibi büyük mühendislik yapılarının sahadaki yapım sürecine göre çözümlenmesi daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Bundan dolayı köprü ve köprü gibi yapım süreci uzun süren mühendislik yapılarının analizleri sırasında yapım aşamaları ve malzeme özelliklerindeki değişimin dikkate alınması gerekmektedir.

1.6.1. Kablolu Köprülerin Temel Özellikleri

Kablolu köprülerin temel çalışma prensibi, kulelerin tepelerinden asal kirişlere uzanan öngerilmeli veya sonradan çekme verilmiş kablolar ile asal kirişlerin bir bütün olarak çalışmasıdır. Çekmeye çalışan kablolardan gelen yatay basınç kuvvetlerinin kirişler tarafından alınması, alt yapıda önemli bir ekonomi sağlamaktadır. Kablolu köprülerdeki kulelerin ve asal kirişin, kabloların neden olduğu büyük aksel basınç kuvvetleri ile birlikte eğilmeye maruz kalması kablolu köprülerin ayırt edici özelliğidir (Yiu ve Brotton, 1988; Khalil vd., 1983).

Uzun açıklıklı kablolu köprülerin hakim periyodu genellikle 2 sn ile 5 sn arasında değişmektedir. Hakim periyodun büyük olması, kablolu köprülerin yüksek dereceden deforme olabilen yapı sistemleri grubuna dahil olduğunu gösterir.

Kablolu köprü sistemlerine ait elemanları oluşturan malzemeler genel olarak lineer elastik davranış göstermesine rağmen, köprünün proje yükleri altında yük-yerdeğiştirme ilişkisi lineer olmayacaktır. Lineer olmayan bu davranış aşağıdaki sebeplerden kaynaklanmaktadır

1. Kablolarda kendi öz ağırlığından dolayı bir eğri şeklinde sehim yapması kaçınılmazdır buda lineer olmayan aksel kuvvet-deformasyon ilişkisinin meydana gelmesine neden olur. Kablolu köprülerde kablolardan kaynaklanan bu lineer

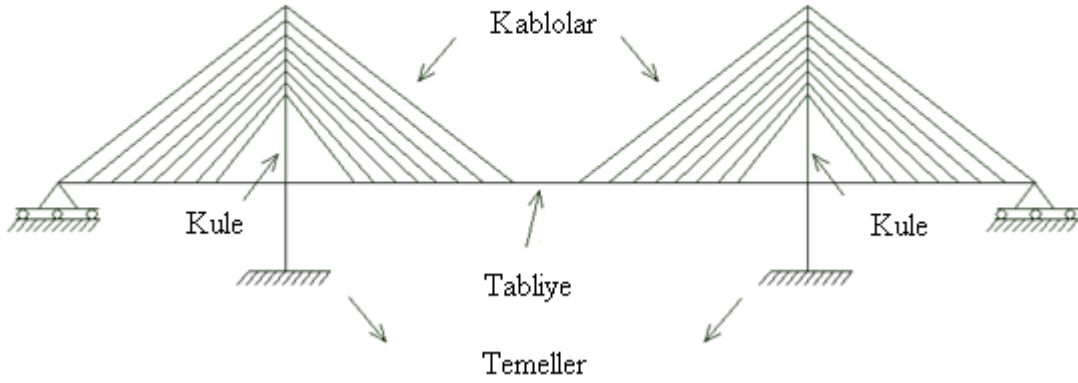
olmayan davranış, bu sehimden kaynaklanmaktadır. Sehimin oluşması ile kablonun aksel rijitliği de değişecektir. Geleneksel çekme elemanları için kendi ağırlığından kaynaklanan sehim güvenilir bir şekilde ihmal edilebilirken, kablo elemanları için doğru bir analiz yapılmak isteniyorsa sehimin dikkate alınması gerekmektedir.

2. Eğilme ve aksel kuvvet etkisindeki kule ve uzunlamasına doğrultudaki kiriş elemanları için, lineer olmayan aksel kuvvet-deformasyon ve eğilme momenti-deformasyon ilişkisi. Herhangi bir yapı sisteminde küçük deformasyon kabulü yapılıyor ise, eğilme elemanlarının aksel kuvvet ve eğilme rijitliklerinin genelde bağımsız oldukları düşünülür. Ancak deformasyonlar küçük değil ise, aksel kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki elemanların aksel ve eğilme deformasyonları arasında bir etkileşim vardır. Çoğu geleneksel lineer yapı sistemleri için eğilme momenti ve aksel kuvvet arasındaki etkileşim ihmal edilebilir. Fakat kablolu köprü elemanlarında oluşabilecek büyük deformasyonlardan dolayı, bu etkileşim önemli olabilir ve tüm lineer olmayan hesaplarda dikkate alınmalıdır.
3. Bu tür yapılar için servis yükleri altında olabileceği gibi, çevresel yüklerden de kaynaklanabilecek büyük yerdeğiştirmelerin neden olduğu geometri değişimleri. Lineer yapı analizlerinde; yük etkisindeki yapı sisteminin düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler, orijinal düğüm noktası koordinatları yanında ihmal edilebilmektedir. Böylece yapıdaki geometri değişimleri ihmal edilmekte ve şekil değiştirmiş yapı sisteminin rijitliğinin, şekil değiştirmemiş yapı sisteminin rijitliğine eşit olduğu kabul edilmektedir. Fakat kablolu köprülerde normal servis yükleri altında büyük yerdeğiştirmeler ve dolayısıyla köprü geometrisinde önemli değişimler olabilir. Böyle bir durumda, köprünün rijitliği yapının yeni geometrisi ile hesaplanmalıdır.

1.6.2. Kablolu Köprülerin Yapısal Elemanları

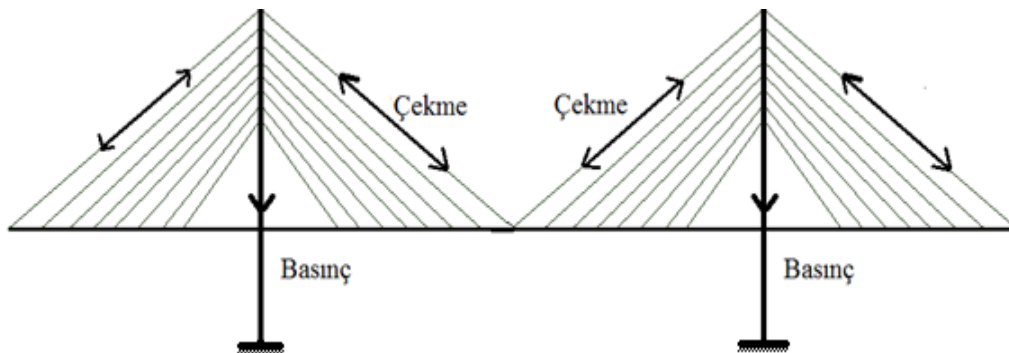
Kablolu köprülerin temel yapısal elemanlarını tabliye, kule, kablolar ve temel olarak adlandırabiliriz. Kablolu köprülerde kablolar kule ve tabliyeye direk olarak bağlıdır. Kablolu köprülerde çok farklı kule tiplerinin kullanılması ve farklı kablo düzenlemesine izin vermesi tasarımcının yaratıcılığını artırmaktadır. Buda çok farklı şekillerde kablolu köprülerin meydana getirilmesini sağlamıştır. Kablolu köprüler için yapısal elemanlar genellikle Şekil 1.7’de görüldüğü gibi dört temel bileşene ayrılabilir.

1. Kablolar
2. Kuleler
3. Temel
4. Tabliye



Şekil 1.7. Kablolu köprünün temel elemanları

Kablolu köprülerde, tabliyenin kendi ağırlığı ve tabliye üzerine gelen yükler kablolarla aktarılır ve bu yüklerden dolayı kablolarda çekme kuvveti oluşur. Kablolarda meydana gelen bu çekme kuvveti kulelere aktarılır. Kablolardaki bu çekme kuvveti kulelere aktarıldığında bu çekme kuvveti kulede basınç kuvvetine dönüşür. Kulelerde kabloların neden olduğu bu basınç kuvvetlerini temellere aktarma görevini üstlenir. Temellerde maruz kaldığı yükleri zemine güvenli bir şekilde iletmekle görevlidirler. Şekil 1.8’de bir kablolu köprünün bu yük taşıma prensibi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Kablolu köprünün yük taşıma prensibi

1.6.2.1. Kablolar

Kablolu köprülerde kablolar tabliye ve kulelerin birlikte çalışmasını sağlayan çekme kuvvetlerinin etkisindeki elemanlardır. Kablolu köprülerde asma köprülerden farklı olarak kablolar, kuleler ve tabliyeyi birbirine doğrudan bağlamış durumdadır. Kablolu köprülerde kullanılan kablolar doğrusal olmayan davranış gösteren en önemli elemanlardır.

Kablolu köprülerin gelişimindeki en önemli unsurlardan biri de yüksek dayanımlı çelik kabloların üretilmiş olmasıdır. Kablolu köprülerde kullanılan kabloların akma dayanımları 1860 Mpa ve daha yüksek olan yüksek dayanımlı çelikten üretilirler. Tabliye ve kabloların tasarımında, kabloların aksenal yük altındaki uzamasının göz önüne alınması önemlidir. Kabloların kopma uzama oranları %3.5 civarındadır. Kablo boyları belirlenirken bu uzama oranları oldukça etkindir.

Modern kablolu köprülerde, kablo sistemi genellikle birçok tek kablo lifinin birlikte çalışacak şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu kabloların birlikte çalışmalarını sağlamak için tekli kabloların çok sık aralıklarla ve çok sayıda olması gerekmektedir.

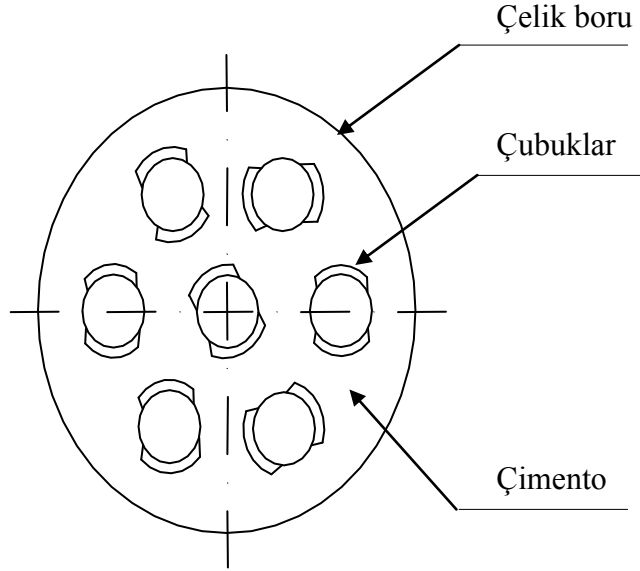
Kablolu köprülerde kullanılan genel kablo türleri 4 çeşittir bunlar;

- Paralel çubuk kablolar
- Paralel tekil kablolar
- Demetlenmiş kablolar
- Kilit sargılı kablolar

1.6.2.1.1. Kablo Tipleri

1.6.2.1.1.1. Paralel Çubuk Kablolar

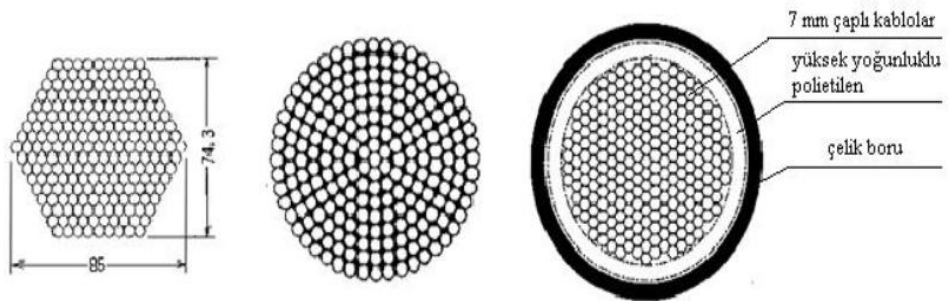
Standart çubuk kablo, her biri 26,5 mm, 32 mm veya 36 mm çapında akma sınırı 1080 MPa, kopma dayanımı 1230 MPa olan 7–10 tane galvaniz kaplamalı çelik çubuğun çelik bir boru içine yerleştirilmesi ve boşlukların çimento ile doldurulması suretiyle oluşturulur. Paralel çubuk kablo kesiti Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Çekme dayanımı ve yorulma dayanımı açısından diğer kablolardan zayıf olan çubuk kablolar, açıklığı, ağırlığı ve yükü az olan köprülerde tercih edilir.



Şekil 1.9. Paralel çubuk kablo kesiti

1.6.2.1.1.2. Paralel Tekil Kablolar

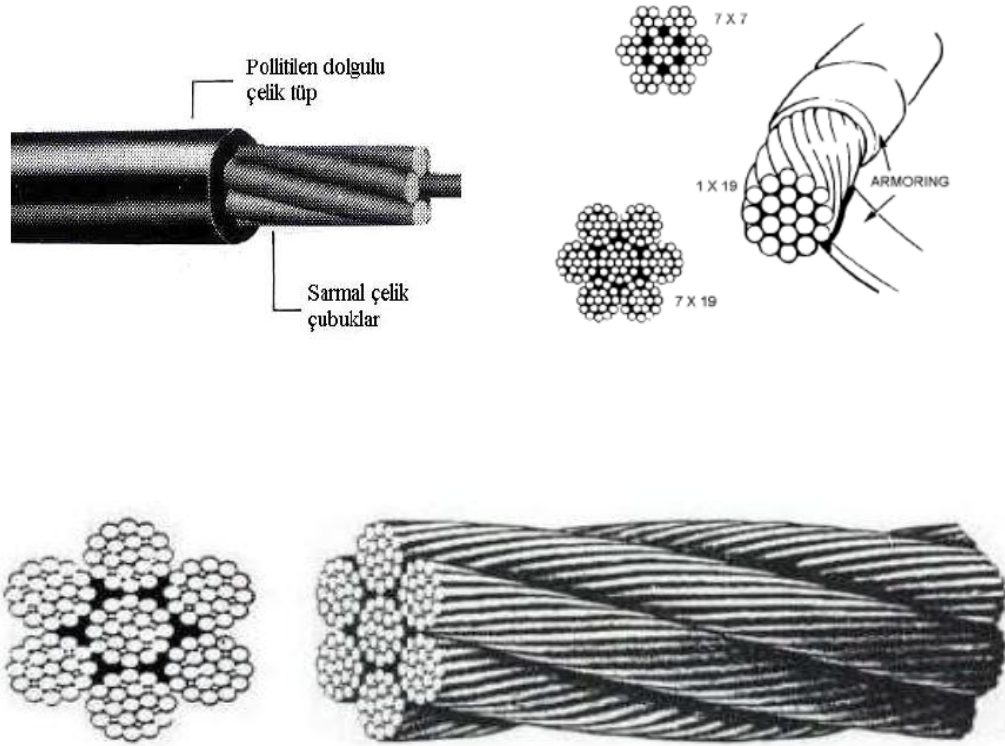
Paralel tekil kablolar genel olarak çok sayıda öngerilmeli yüksek dayanımlı galvaniz kaplamalı çelik kablonun birbirlerine paralel konumda bir arada kullanılması ile oluşturulur. Paralel tekil kablo kesiti Şekil 1.10'da görülmektedir. Yapım aşamasında her bir tekil kablo ayrı ayrı çekilir sonra gerilerek bir araya getirilir. Bu nedenle yapım aşaması uzun ve zahmetlidir. Ancak kablo sayısı standart olmadığından en çok tercih edilen kablo türüdür. Kaç adet tekil kablonun kullanılacağı yapının tasarımına göre seçilir. Oluşturulan paralel tekil kablo çelik bir boru içine koyularak boşluklar çimento ile değil korozyon önleyici kimyasallar ile doldurulmaktadır (Gimsing, 1998).



Şekil 1.10. Paralel tekil kablo kesiti (Eğriboyun, 2008)

1.6.2.1.1.3. Demetlenmiş Kablolar

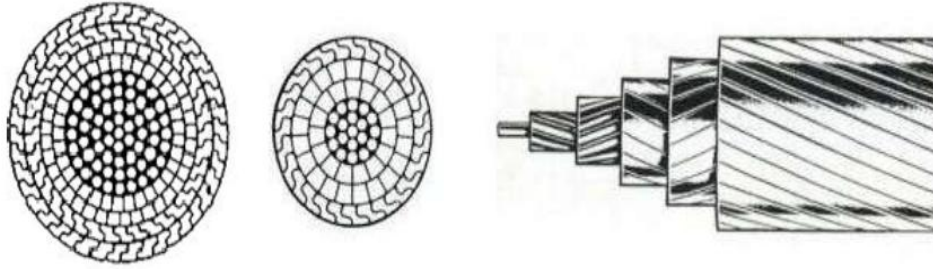
Genel olarak 5 mm çaplı yedi galvaniz kaplamalı kablonun sarmal olarak bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Demetlenmiş kablo kesiti Şekil 1.11’de görülmektedir. Prefabrik imal edildiğinden ihtiyaçlara göre çeşitli çap ve sayıda (7–19–37–61–91–127) üretilebilir. Kopma dayanımları 1770–1860 MPa arasında değişmektedir. Demetlenmiş kablolar ayrıca çok sayıda tekil kablonun merkezde bir kablo etrafında sarmal şekilde sarılması ile de oluşturulur. Oluşturulan ana kablo diğer kablolarda olduğu gibi çelik tüp içine konarak boşluklar genellikle yüksek dayanımlı çimento harcı ile doldurulur. Ancak günümüzde çimento doldurma uygulaması kablo ağırlığını artırdığından, kablolarda oluşan fazladan eksenel şekil değiştirmeyi ortadan kaldırmak için yerini polietilen kimyasallara bırakmıştır.



Şekil 1.11. Demetlenmiş kablo kesiti (Eğriboyun, 2008)

1.6.2.1.1.4. Kilit Sargılı Kablolar

Kilit sargılı kablolar iki ya da üç tip farklı kesitli kablonun bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Kilit sargılı kablo kesiti Şekil 1.12.'de görülmektedir. Merkezde daire kesitli, dışta kare ve z kesitli kablolar kullanılır. Bu kablo türünde başka kablolarla kullanılan özel z kesitli kablolar kullanılarak ana kablonun mümkün olduğunca sıkı ve boşluksuz yapılabilmesi, böylece daha küçük kesitle, büyük kesitli kablolar kadar dayanım elde edilmesi, aynı zamanda da kablo ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Kilit sargılı kablolar günümüzde diğer kablolar gibi galvaniz kaplamalı üretilmektedir. Bu kablolar, diğer tür kablolardan farklı olarak düzgün yüzeyli olduğundan çelik tüp içine konmadan boya kaplanması suretiyle, korozyon koruması yapılmaktadır. Korozyon korumasının sadece boya ile yapılması bu kablo türünün hafif olmasının bir diğer sebebidir (Gimsing, 1998; Troitsky, 1988).



Şekil 1.12. Kilit sargılı kablo kesiti (Eğriboyun, 2008)

1.6.2.1.2. Kablo Düzenleri

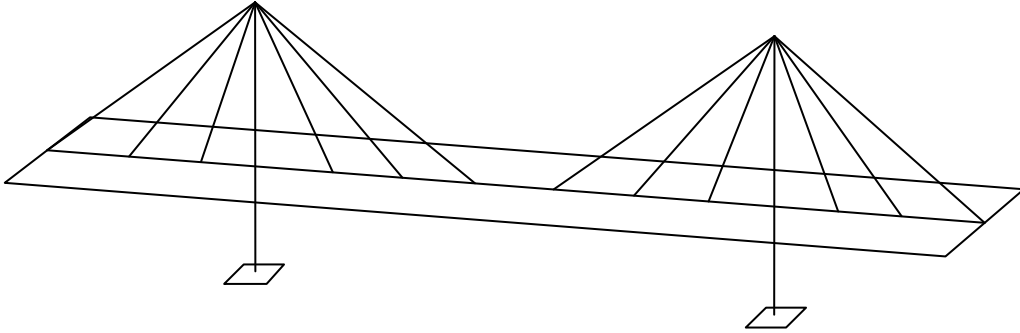
Kablolar kulelere ve tabliyeye çok çeşitli şekillerde mafsallı olarak bağlanırlar. Kabloların kuleye ve tabliyeye mafsallı olarak bağlanmasıyla kablolarla momentin oluşmasının önüne geçilir ve kabloların sadece çekmeye çalışması sağlanmış olur. Kendi ağırlığının etkisiyle kablolarla momentin oluşması kaçınılmazdır fakat kabloda oluşan bu moment ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Kablolar kulelere ve tabliyelere farklı noktalardan ve aralarında farklı mesafeler olacak şekilde bağlanabilirler. Kablo düzeni olarak adlandırılan bu durum kablolu köprülerin tasarımında hayati öneme sahiptir. Kablo düzeni enine kablo düzeni ve boyuna kablo düzeni olmak üzere ikiye ayrılır.

- Enine Kablo Düzeni
- Boyuna Kablo Düzeni

1.6.2.1.2.1. Enine Kablo Düzeni

1.6.2.1.2.1.1. Tekil Kablo Düzeni

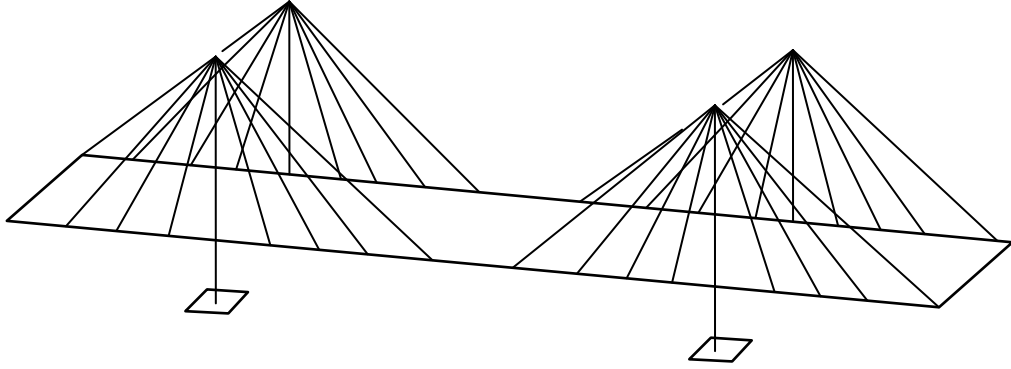
Tekil kablo düzeninde kuleden çıkan kablolar köprü tabliyesinin enine doğrultusundaki merkez hattında bulunan ana kirişe bağlanır. Tabliye sadece orta kısmında uzanan bir hat boyunca taşındığından uç kısımlar konsol olarak çalışmakta bu durum burulma gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Burulma gerilmelerini karşılamak için ise tabliye kutu kesit olarak tasarlanmakta bu durum maliyetin artmasına neden olmaktadır. Şekil 1.13'te tekil kablo düzeni görülmektedir.



Şekil 1.13. Tekil kablo düzeni

1.6.3.1.2.1.2. İkili Kablo Düzeni

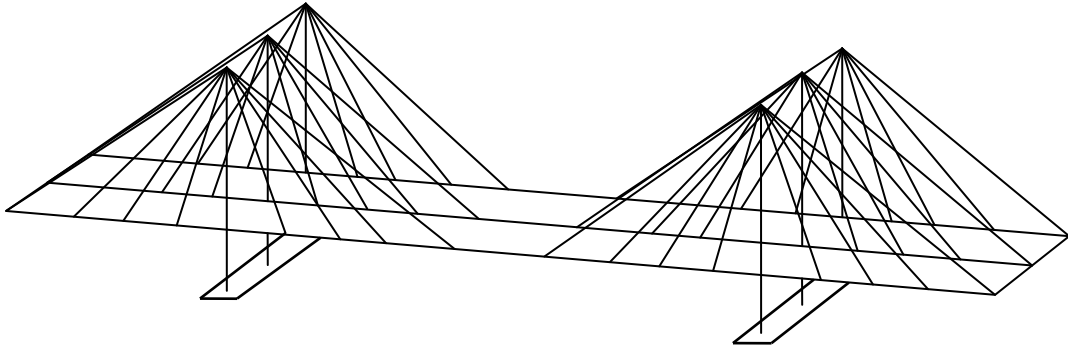
İkili kablo düzeninde kuleden çıkan kablolar köprü tabliyesinin iki kenar hattı boyunca uzanan ana kirişlere bağlanır. Bu düzen simetrik bir yapı oluşturduğundan burulma problemi önemli değildir ve aerodinamik açıdan daha elverişlidir. İkili kablo düzeni daha narin tabliyenin kullanılmasına izin verebilir. Bu durum da tabliye maliyetinin büyük ölçüde azalmasını sağlar. Şekil 1.14'te ikili kablo düzeni görülmektedir.



Şekil 1.14. İkili kablo düzeni

1.6.2.1.2.1.3. Üçlü Kablo Düzeni

Üçlü kablo düzeninde kuleden çıkan kablolar köprü tabliyesinin iki kenar hattında ve merkez hattında bulunan ana kirişlere bağlanır. Üçlü kablo düzeni özellikle yoğun trafik yüküne maruz kalacak geniş köprülerde tercih edilir. Bu köprülerde kablo sayısı artırılarak tabliyenin üzerindeki yoğun trafik yükü karşılanmaya çalışır. Şekil 1.15'te üçlü kablo düzeni görülmektedir.



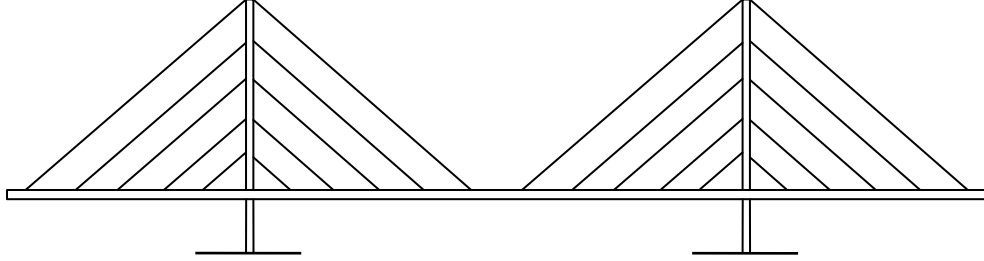
Şekil 1.15. Üçlü kablo düzeni

1.6.2.1.2.2. Boyuna Kablo Düzeni

1.6.2.1.2.2.1.Paralel Kablo Düzeni

Paralel kablo düzeninde kuledeki ve tabliyedeki kablo bağlantı noktaları arasındaki mesafeler birbirine eşit olacak şekilde konumlandırılır. Bu şekilde bağlantı noktalarına ankrajlanan kablolar birbirlerine paralel olacaklardır. Kabloların kuleye bağlanırken

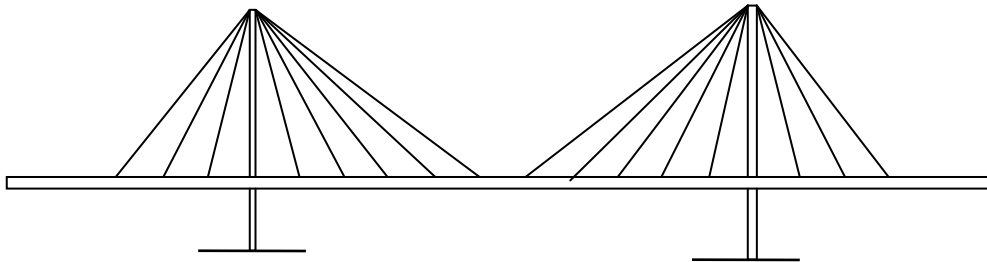
aralarda belirli mesafenin bulunması yapımı kolaylaştırır. Kabloların görüntü olarak birbirini kesmemesi estetik olarak hoş bir görüntü ortaya koyar. Şekil 1.16'da paralel kablo düzeni görülmektedir.



Şekil 1.16 Paralel kablo düzeni

1.6.2.1.2.2.2. Yelpeze Kablo Düzeni

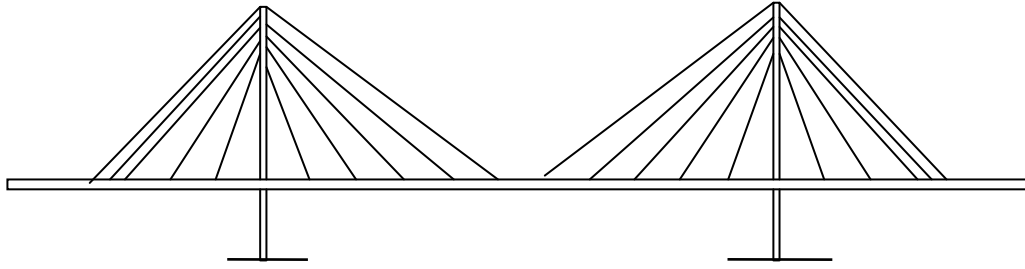
Yelpeze kablo düzeninde kabloların hepsi aynı yere bağlanacak şekilde kulenin üst kotunda belirli bir noktaya bağlanır. Bu kablo düzeninde kablo ile tabliye arasındaki açı büyür ve kablonun maruz kalacağı aksenal kuvvet azalır. Bu durum kabloların maliyetinde bir azalma sağlayacaktır. Fakat tasarımda ve kulenin kablolarla olan bağlantı noktalarının yapımındaki zorluklar ile karşılaşılır. Kule ankraj bağlantılarının yapımında karşılanan bu zorluklar maliyetin artmasına sebep olur bu durumda düzenlemenin eksik yönünü oluşturmaktadır. Şekil 1.17'de yelpeze kablo düzeni görülmektedir.



Şekil 1.17 Yelpeze kablo düzeni

1.6.2.1.2.2.3. Radyal Kablo Düzeni

Radyal kablo düzeni aslında paralel ve yelpaze sisteminin bir karmasıdır. Paralel ve yelpaze sistemlerinin iyi yönlerini kapsayacak şekilde oluşturulur. Kablolar kulenin en üst kotuna bağlanır fakat yelpaze sistemden ayrı olarak kablolar arasında bağlantıyı kolaylaştıracak mesafeler bırakılır. Şekil 1.18’te radyal kablo düzeni görülmektedir.



Şekil 1.18 Radyal kablo düzeni

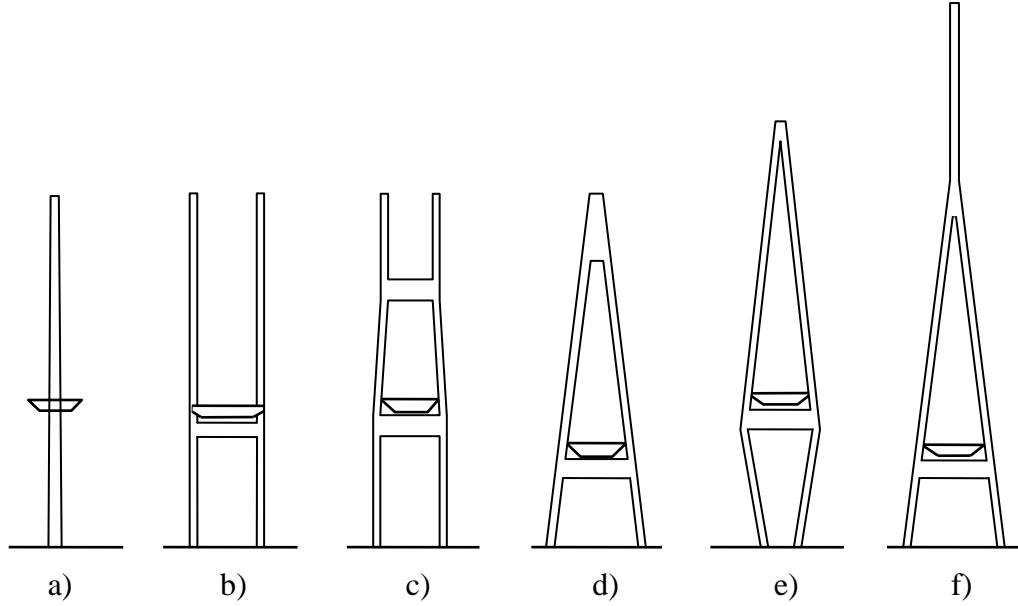
1.6.2.2. Kuleler

Kablolu köprülerde kuleler kablolardan gelen aksenal kuvvetlere, rüzgâr ve deprem etkilerine maruz kalan önemli elemanlardır. Kablolarda oluşan büyük mertebedeki çekme kuvveti kulede büyük bir basınç kuvvetine dönüşmektedir. Bu büyük basınç kuvveti nedeniyle kulelerde burkulma etkisi kritik olabilmektedir. Bundan dolayı, kutu kesitleri kullanılarak minimum malzemeyle burkulmaya karşı güvenlik sağlanmaya çalışılmaktadır. Özellikle çelik kulelerde bu durum daha önemli hale gelmektedir. Kuleler, beton çelik veya kompozit olarak inşa edilebilir. Çelik kulelerin parçalarının yapımı fabrikalarda tamamlanarak montaj işleri sahada yapılır. Bu ise çelik kulelerin inşasını hızlandıran bir süreçtir. Fakat kablolu köprülerin uzunluğu arttıkça çelik kulelerin kullanılması ekonomik olmamaktadır. Kablolu köprülerin uzunluğu arttıkça beton ya da kompozit kulelerin kullanılması daha ekonomik olur.

Kablo ile ana kiriş arasındaki eğimin açısı arttıkça, kablolardaki gerilmeler azalır. Kablolardaki gerilmeleri azaltmak için ya kablo birleşimleri kulenin en üst noktasında toplanmalı yada kule yüksekliği artırılmalıdır. Kulenin yüksekliği arttıkça, kablo uzunlukları ve dolayısıyla aksenal deformasyonlar da artar. Kule yüksekliği birçok etmene

bağlıdır. Bu etmenlerden en önemli olanları; tabliyenin uzunluğu tabliyenin maruz kalacağı tahmini yükler ve kablo düzeni olarak sıralayabiliriz. Merkez açıklığın %20-%25'i kule yüksekliği için iyi bir orandır (Leonardt, 1970).

Kulelerin şekli temel olarak kablo sistemi, ekonomik etmenler ve estetik ile yakından ilgilidir. Bunlara bağlı olarak çok sayıda kule tasarımı yapılabilir. Şekil 1.19'da şematik olarak kule tipleri verilmişlerdir.



Şekil 1.19. Kablolu köprülerde çeşitli kule tipleri, a) Tekil kule, b)H tipi ve c) H tipi kule, d) A tipi kule, e) Elmas tipi kule, f) Ters Y tipi kule

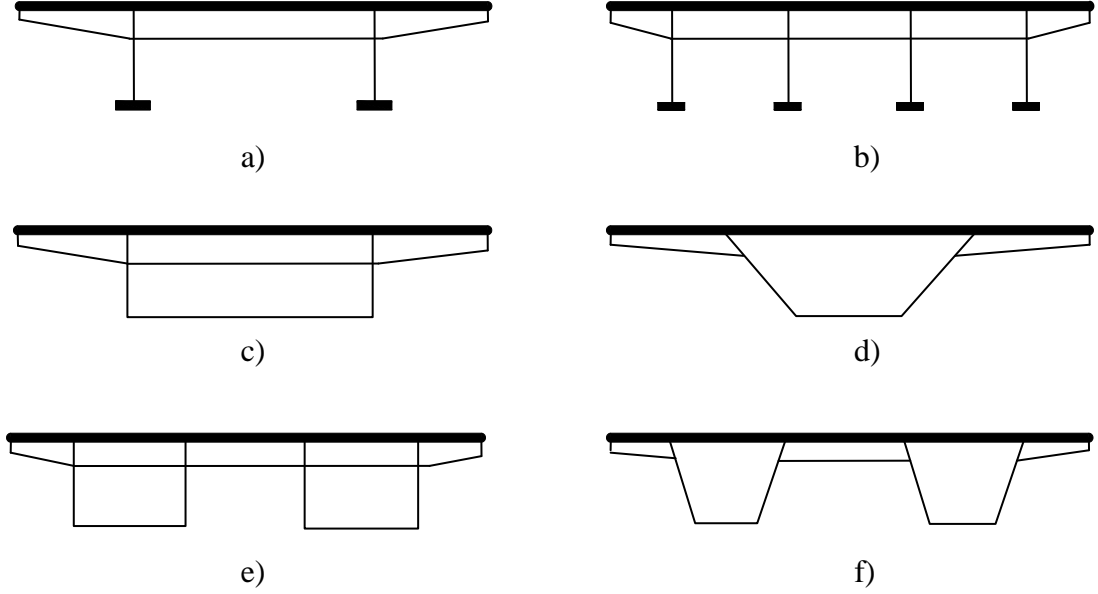
1.6.2.3. Tabliyeler

Tabliye köprüde yatay konumlandırılmış ve üzerinden trafiğin aktığı yapı elemanıdır. Köprü tabliyesi seçiminde yapım yöntemi, üzerine gelecek tahmini yük ve maliyet gibi faktörler etkili olmaktadır. Köprü tabliyesi kullanılan malzemeye göre çelik, beton, kompozit tabliye olmak üzere 3 ana başlık altında toplayabiliriz.

1.6.2.3.1. Çelik Tabliyeler

Çelik tabliyeliler çeşitli kesitlere göre tasarlanabilirler. Şekil 1.20. (a) ve (b)'de I profilleriyle desteklenmiş çelik tabliye kesitleri gösterilmiştir. Bu kesitler düşük burulma

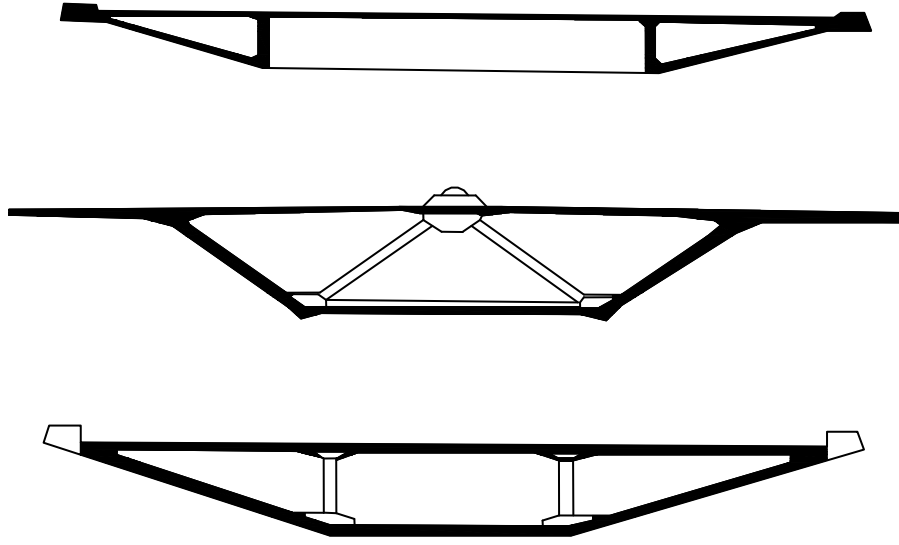
rijitliğine sahiptir. Burulma rijitliği yüksek tabliyeye ihtiyaç duyulduğu zaman kutu kesitli tabliyeler tercih edilmektedir. Kutu kesitli tabliye çeşitleri şekil 1.20. (c), (d), (e),ve (f) de görülmektedir.



Şekil 1.20. Çelik tabliye tipleri

1.6.2.3.2. Beton Tabliyeler

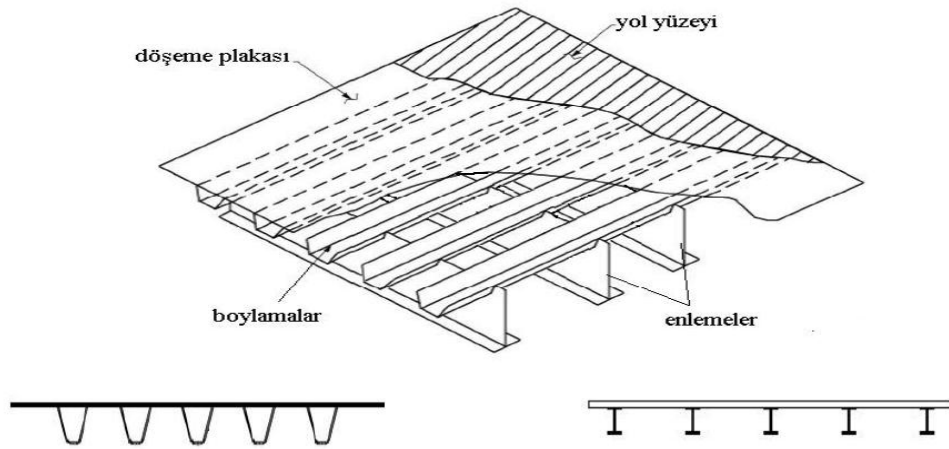
Beton tabliyeler kablolu köprülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzeme olarak beton yüksek basınç dayanımına ve düşük çekme gerilmesine sahiptir. Kablolu köprülerin tabliyeleri, çekme gerilmeleri kablolar ile azaltılmış olduğunda betonun kullanılması uygun olacaktır. Tabliye ya prefabrike olarak hazırlanmış parçaların birleştirilmesiyle ya da yerinde döküm halinde yapılır. Şekil 1.21 'de beton tabliye kesitleri görülmektedir.



Şekil 1.21. Beton tabliye tipleri

1.6.2.3.1. Kompozit Tabliyeler

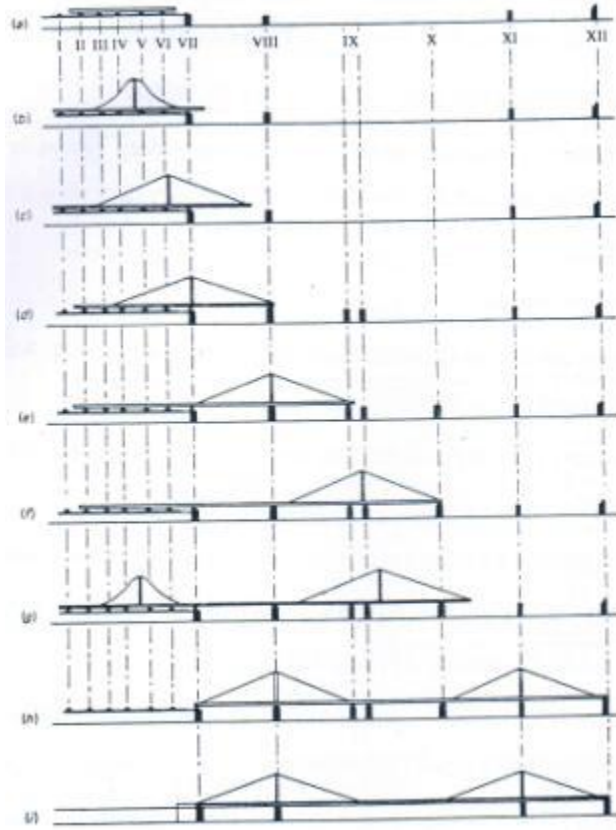
Kompozit tabliye çelik ve betonun bir arada kullanılmasıyla oluşturulan tabliye çeşididir. Bu tipteki tabliye çeşidi son yıllarda hızlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 1.22’de kompozit tabliye görülmektedir.



Şekil 1.22. Kompozit tabliye enkesiti (Eğriboyun, 2008)

1.6.3.2. İttirme Yöntemi

Bu metodun kullanımı ise, köprü aşağısındaki trafiğe karışmaması dikkate alınarak yapılır. Bu yöntemde köprü tabliyesinin büyük bölümü silindirik iskele yardımıyla ittirilerek montaj ve inşa gerçekleştirilir. Tabliye her bir ayaktan ittirilerek merkeze veya bazı örneklerde olduğu gibi bir ayaktan diğer ayağa kadar tüm yol boyunca ittirilerek inşaat tamamlanır. Şekil 1.24’de ittirme yöntemiyle yapılmış bir köprü inşaatının yapım süreci görülmektedir (Abbas, 1990).



Şekil 1.24. İttirme yöntemi uygulaması (Abbas, 1990)

1.6.3.3. Dengeli Konsol Yöntemi

Bu yöntemde, köprü tabliyesi küçük parçalar halinde prefabrike hazırlanmış elemanların şantiyede birleştirilmesi ile inşa edilir. Bu çeşit köprülerin yapımındaki artış, şantiye işçiliği düzeyinin yükselmesi, hızlanmış inşaat yapımı, daha iyi kalite kontrolü ve en uygun malzeme kullanımı ile gerçekleşebilir.

Bununla birlikte; dengeli konsol yöntemi, kablolu köprülerin inşaatında çevresel etkilerini önemseyerek oluşturulan bir yöntemdir. İlerleyen bölümlerde bu yöntemle ilgili daha ayrıntılı bilgiler verilecektir.

1.7. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Kablolu köprülerin geniş ve başarılı uygulamaları; yüksek mukavemetli çeliklerin ve ortotropik döşemelerin kullanılması, kaynak tekniklerindeki gelişmeler, yapı analizindeki ilerlemeler ile ancak son yıllarda olmuştur. Bilgisayarların gelişimi, kablolu köprü ile yüksek dereceden statik olarak belirsiz sistemlerin çözümü için ve üç boyutlu davranışın analizi için büyük imkânlar sağlamıştır. Böylece son yıllarda rüzgâr etkilerine karşı aerodinamik olarak dayanıklı kablolu köprüler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Güney Kore’de 1982 yılında inşa edilen Jindo Köprüsü ve 1983 yılında inşa edilen Dolsan Köprüsü son yıllarda inşa edilen kablolu köprülere ait örneklerdir (Tappin ve Clark, 1985; Rees ve Kim, 1985).

İlk modern kablolu köprülerin trafik yükleri altında oldukça rijit davranması, estetik olarak hoş görünmesi, ekonomik ve yapımının kolay olması kablolu köprü sistemlerinin uygulama alanını arttırmıştır (Troitsky, 1988).

Cluyet ve Shepherd (1990), kablolu köprülerin lineer olmayan analizleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İki açıklıklı, tek kuleli ve iki boyutlu olarak modelledikleri kablolu köprüde, öngerme çubuklarını tanımladıkları kutu kesit döşemede kullanmışlardır. Zamana bağlı etkileri değerlendirmek için kule ve döşemeler beton, kablolar öngerme çubukları ile aynı malzemeden tanımlamışlardır. Çalışmadaki amaç köprü yapılırken zamanın ve dış etmenlerin malzemelere dolayısıyla köprüye olan etkilerini irdelemek olmuştur. Çalışma sonrasında sünme, rötme ve gevşeme etkilerinin kablolu köprü üzerinde oluşturacağı etkileri karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır.

Kablolu köprüler, açıklıkları 150 m ile 600 m arasında değişen köprüler için ekonomik olarak tüm dünyada giderek artan bir şekilde uygulanmaktadır. İlk kablolu köprüler genelde sismik olmayan bölgelerde inşa ediliyorken, son yıllarda sismik olan bölgelerde de inşa edilmeye başlanmıştır. (Garevski, 1991)

Nazmy ve Abdel-Ghaffar (1987,1992), deprem hareketi etkisindeki üç boyutlu, uzun açıklıklı, kablolu köprülerin lineer olmayan dinamik davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarda üniform yer hareketi yanında mesnetlerinden farklı dinamik etkiler için de

kablolu köprülerin dinamik davranışı belirlenmiştir. Kablolu köprülerde söz konusu lineer olmayan etkilerde analizlerde dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, bu tür uzun, kompleks ve üç boyutlu yapıların deprem analizi yapılırken, üniform olmayan yer hareketlerinin önemli etkilerinin olabileceği ve analizlerde dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Sajid Abbas. (1993), iki açıklıklı tek kuleli bir kablolu köprü sisteminin dilimler halinde inşa edilmesi durumunda, zamana bağlı etkileri de kapsayan bir analizi gerçekleştirmiştir. Zamana bağlı etkiler olarak rötre sünme ve gevşeme dikkate alınırken köprü iki boyutlu olarak modellemiştir. Çalışma sonucunda kule ve tabliyede karşılaştırmalar yapılmış ve zamana bağlı malzeme özelliklerinin köprü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Takemiya ve Kai (1983), Spyrakos (1992), Kitazawa vd. (1990), Kawano ve Furukawa (1988), köprülerin sismik davranışında zemin-yapı etkileşiminin etkilerini anlamak için yaptığı çalışmalarında, zemin-yapı etkileşiminin köprü-temel-zemin sisteminin doğal periyodunu uzatma eğiliminde olduğunu ve köprü deplasmanların da ve yapısal elemanlarda atalet kuvvetlerini büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca köprünün sismik davranışında zemin-yapı etkileşiminin etkileri köprü-temel-zemin sisteminin koşullarına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Nazmy (1995), çalışmasında kablolu köprülerin dinamik davranışı ile ilgili problemleri tanımlamıştır. Üç boyutlu 1000 m uzunluğundaki analitik model kullanılarak çeşitli çözümler üzerinde durulmuştur. Önerilen çözümlerin incelenebilmesi amacıyla mesnetlerinden farklı dinamik etkilere maruz köprünün lineer olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kablolu köprülerin 1000 m'ye kadar olan açıklıklar için ekonomik olacağı belirtilmektedir.

Der Kiureghian ve Keshishian (1996) ve Der Kiureghian, Keshishian ve Hakobian (1997), çalışmalarında farklı mesnetlerdeki zemin şartlarının değişiminden kaynaklanan yer hareketindeki değişim için yeni bir bileşen elde edilmiştir. Bunun yanında zemin frekans davranış fonksiyonu için de çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Çalışmada uygulama amacı ile iki köprü örneği kullanılmış ve yer hareketinin değişiminin yapı davranışı üzerinde etkili olduğu belirmişlerdir.

Kablolu köprülerin önceleri 150–600 m arası orta tabliye uzunluğu için, asma köprülerden daha ekonomik olduğu gözlemlenmiştir. Günümüzde ise kablolu köprülerin büyük açıklıklar için asma köprüler kadar ekonomik olması sağlanabilmektedir. Ancak

açıklık boyutu büyüdükçe kablolu köprülerde, yeterli tabliye rijitliğinin elde edilmesi ve yükler altında sistemin kararlılığının sağlanması için, tabliye kalınlığının ve kablo çaplarının artırılması gerekmektedir. Asma köprülerde ise gene tabliye kalınlığı artırılmalı ancak mevcut kabloların çapı sabit tutulup sayısı artırılmalıdır. Orta açıklığı 1000 metreyi aşan köprü modelleri için asma köprülerin daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir (Soyluk, 1997).

Zembaty ve Rutenberg (1998a,1998b), çalışmalarında yerel zemin etkisinin yapı davranışı üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla iki mesnet noktasından her birinin ayrı bir zemine oturduğu düşünülen tek serbestlik dereceli bir sistem ile farklı zeminlere oturan bir köprünün rastgele titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Yer hareketi için Kanai-Tajimi spektral yoğunluk fonksiyonu ile Der Kiureghian tarafından önerilen zemin etkisini içeren bir korelasyon modeli kullanılmıştır. Çalışma sonucunda farklı zemin cinsleri için elde edilen tepki değerlerinin doğal frekansa ve zemin türüne bağlı olarak uniform yer hareketine oranla arttığı gözlenmiştir.

Ren ve Obata (1999), çalışmalarında sonlu eleman yöntemi ile uzun açıklıklı kablolu çelik köprülerin elasto-plastik sismik davranışını araştırmıştır. Analizde geometri ve malzeme non-lineerliği dahil edilmiştir. Geometrik nonlineerlik büyük yerdeğiştirme, aksenal yük-eğilme momenti etkileşimi ve kablo gergilerinin çökmesinden kaynaklanmaktadır. Çelik kirişin esnemesiyle malzeme nonlineerliği ortaya çıkmaktadır. Köprüye boyuna yönde, enine yönde ve hem boyuna hem enine yönde yer hareketi uygulanmıştır. Kalıcı elasto-plastik sismik tepkiyi hesaplamak için, maksimum eşdeğer plastik gerilme oranı olarak bilinen sismik hasar indeksi önerilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında elasto-plastik etkiler uzun açıklıklı kablolu çelik köprülerin sismik tepkisini azaltma eğiliminde olduğunu göstermiştir. En büyük yer ivme değerinin olduğu deprem kaydı muhakkak en büyük elasto-plastik sismik hasarı içerdiği anlamına gelmediği belirlenmiştir.

Boduroğlu (2007), kablolu köprülerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile deprem performansının belirlenmesi üzerine yaptığı çalışmada, yapı önem katsayısının kullanılması ve bazı elemanların elastik bölgede kalacak şekilde boyutlandırılması halinde, kablolu köprülerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz ile belirlenen deprem performansının, öngörülen sınırlar içinde kaldığını göstermiştir.

Soneji ve Jangid (2007), çalışmalarında şiddetli yer hareketine maruz kalan kablolu köprülerin korunmasında pasif karma sistemlerin etkisi araştırmışlar ve ortaya konmuşlardır. Karma sistem viskoz sıvı sönüm ile birlikte kayma ve kauçuk izolasyon sistemlerinin kombinasyonundan oluşmaktadır. Illinois'te Quincy Bay-view Köprüsünün basitleştirilmiş bir modelinin sismik tepkisi gerçek deprem yer hareketinin iki yatay bileşeni altında araştırılmıştır. Viskoz sıvı sönüm, pasif karma kontrol sistemlerini oluşturmak için kauçuk ve karma izolasyon sistemleriyle işbirliği yaparak pasif bir enerji dağıtma aracı olarak kullanılmıştır. İzole edilmiş kablolu köprülerin sismik tepkisinde viskoz sıvı sönümünün doğrusal olmayan etkileri, farklı hız değerleri ve sönüm katsayıları dikkate alınarak araştırılmıştır. Araştırmaların sonuçları viskoz sıvı sönümün sismik olarak izole edilmiş kablolu köprünün deprem tepkisini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Ayrıca doğrusal olmayan viskoz sönümün izole edilmiş köprünün maksimum izolatör yerdeğiştirmelerinin kontrolünde daha etkin olduğu görülmüştür.

Eğriboyun (2008), farklı kablo düzenlemelerine sahip üç boyutlu çift tabliyeli kablolu köprülerin, birbirlerine göre farklılıklarını elde edebilmek amacıyla SAP2000 bilgisayar programı yardımı ile statik ve dinamik yükler altında analizler gerçekleştirmiştir. Statik yükler altında fan (radyal) tip kablolu köprü modeli hem yer değiştirmeler hem de gerilmeler bakımından diğer modellerden üstün iken dinamik yükler altında harp (paralel) tip kablolu köprü modelinin daha kararlı davrandığı gözlemlenmiştir. Özellikle son yıllarda deprem riski bulunan bölgelerde inşa edilen kablolu köprülerin harp ve yarı harp (yelpaze) tiplerde yapılmış olması da bunun bir göstergesidir. Statik yükler altında fan tip modelin diğer modellerden kararlı olması, bu tipin deprem riskinin az olduğu bölgelerde daha uygun olmaktadır. Çalışmada kullanılan çift tabliyeli kablolu köprü modelleri orta uzunlukta olduğundan, modeller arasında yer değiştirmeler ve kuvvetler bakımından çok büyük farklar gözlemlenmemiştir. Ancak açıklık boyutu arttıkça yer değiştirme ve kuvvet değerleri artacağından, uzun açıklıklarda modeller arasında, oluşacak değerler büyük farklılıklar gösterebilmektedir.

Literatürde, köprülerin yapım aşamalarını ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarını dikkate alarak gerçekleştirilen bazı çalışmalar vardır.

Diri. (2009), kablolu köprülerin konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkileri açıklamak amacıyla LARSA 2000 sonlu eleman programı ile lineer olmayan analiz yaparak, çevresel etkenlerin, yer değiştirmeler açısından yapıya etkisini incelemiştir.

Altunışık ve diğ. (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.

Ateş (2011), 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.

Adanur ve diğ (2012) uzun açıklıklı ve kutu kesitli olarak inşa edilen asma köprünün sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarını dikkate alarak çalışmışlardır.

1.8. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında kablolu köprülerin konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkilerin dikkate alındığı lineer olmayan analiz ve deprem davranışını belirlemek için dinamik analiz yapılmıştır. Daha önceki konu ile ilgili olarak yapılmış çalışmalarda da belirtildiği gibi yapılan çalışmalar genellikle iki boyutlu ve yeterli olmayan sayıda da üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak kablolu köprülerin üç boyutlu davranış sergilemeleri, söz konusu köprülerin için üç boyutlu olarak modellenerek çevresel etkenler ve deprem yükleri için incelenmesini gerekli kılmıştır. Bu araştırma için model olarak Türkiye'nin ilk kablolu köprüsü olan Manavgat Kablolu Köprüsü seçilmiştir. Manavgat kablolu köprüsünün, konsol dilimler halinde inşasının doğrusal olmayan analizi SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Köprü inşasının aşamaları söz konusu program yardımıyla modellenerek her aşaması için analiz sonuçları ayrı ayrı elde edilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli hem yapım aşaması yöntemine göre hem de yapım aşamaları dikkate alınmaksızın analiz edilmiştir.

Birinci bölümde kablolu köprülere ait genel bilgiler ve yapılan çalışmalar aktarılmış, kablolu köprülerin yapı elamanları açıklanmıştır.

İkinci bölümde kablolu köprülerin analiz ve modelleme yöntemlerinden bahsedilmiş yapılan kabuller ve matematiksel hesaplar ortaya konmuştur.

Üçüncü bölümde gerçek bir yapı olarak Türkiye’de inşa edilmiş olan Manavgat Kablo Köprüsü ele alınmıştır. Köprünün yapısal ve geometrik özelliklerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde köprünün yapım aşamalarının dikkate alındığı ve alınmadığı analizler sonucunda köprünün tabliyesinde ve kulesinde meydana gelen kesit tesirleri birbiriyle karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Bu bölümde ayrıca köprünün 3 boyutlu modelinin dinamik analizleri sonucunda elde edilen köprünün tabliyesinde ve kulesinde meydana gelen kesit tesirleri belirlenerek kablo köprülerin dinamik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

Beşinci bölümde ise çıkan sonuçlar değerlendirilerek, bu sonuçlar ışığında yapının statik davranışını en iyi temsil eden analiz yöntemi belirlenmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

2. KABLOLU KÖPRÜLERİN ANALİZ VE MODELLEME YÖNTEMLERİ

2.1. Analiz Yöntemi

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

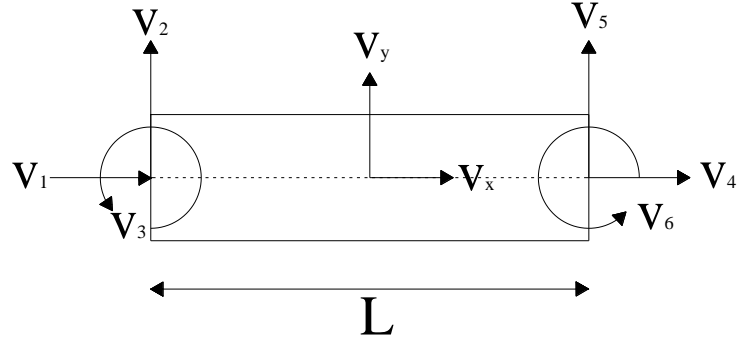
$$\{F\}=[K].\{u\} \quad (2.1)$$

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

Yükleme halinde değişen rijitlik matrisine geometrik rijitlik matrisi denir. Lineer olmayan analizde, yapının bilinen rijitlik matrisine, geometrik rijitlik matrisi eklenerek sistem rijitlik matrisi bulunur ve analize devam edilir (Premieniecki, 1986). Bu şekilde yapılan lineer olmayan analize 2. mertebe hesabı veya geometrik olarak lineer olmayan analiz denir.

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

Burada K_E , yapının ilk elastik rijitlik matrisini, K_G ise geometrik rijitlik matrisini gösterir. Buradaki K_G sadece elemanın geometrisine bağlı olmayıp, başlangıçtaki iç kuvvetleri de içerebilir. Kiriş elemana ait serbestlik dereceleri Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Kiriş elemana ait serbestlik dereceleri

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

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

$$\text{Burada } F = \frac{EA}{L}(V_4 - V_1) \approx \text{sabittir.} \quad (2.5)$$

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

2.1.1. Kablolu Köprülerde Zamana Bağlı Analiz

2.1.1.1. Zamana Bağlı Etkenler

2.1.1.1.1. Betonun Sünmesi

Betonda sünme sabit gerilme altında şekil değiştirmelerin zamanla artması olarak tanımlanmaktadır. Betonun yüklenmesi ile ani olarak gelişen bir elastik şekil değiştirme ortaya çıkmaktadır. Yüklemenin sabit kalması durumunda, zamana bağlı olarak ek sünme şekil değiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Böylelikle oluşan toplam sünme şekil değiştirmesi ani olarak gelişen elastik şekil değiştirmenin iki yılda üç katı mertebesinde olabilmektedir. Yükleminin kaldırılmasıyla eş zamanlı olarak şekil değiştirme geri kazanılmaktadır. Bu durumu takiben başlangıçtaki sünme şekil değiştirmesinin ancak belli bir bölümünün geri kazanıldığı aşamalı bir evre gelmektedir (Podolyn, 1975).

Genellikle sünmenin yapı dayanımı üzerindeki etkisi küçüktür. Ancak, zamanla şekil değiştirmelerde artmakta ve gerilme dağılımının değişimine sebebiyet verebilmektedir.

Betonda ortaya çıkan sünme aşağıdaki faktörlerden etkilenmektedir.

- Gerilme,
- Yüklemede betonun yaşı,
- Çevrenin bağıl nemi,
- Beton elemanın kalınlığı
- Beton karışımı.

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

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \varphi(t, t_0) \quad (2.6)$$

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

$$\varphi(t, t_0) = \beta_c(t - t_0) \varphi_0 \quad (2.7)$$

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

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (2.8a)$$

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)}{0.46 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (2.8b)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}}} \quad (2.8c)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_0}{t_1} \right)^{0.2}} \quad (2.8d)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki bütün parametreler yukarıda açıklanmaktadır.

Zamana bağlı olarak devam eden sünme,

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right] \quad (2.9a)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (2.9b)$$

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

2.1.1.1.2. Betonun Basınç Dayanımı

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

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (2.10)$$

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

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2.11)$$

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.

2.1.1.1.3. Betonun Yaşı

Betonun elastisite modülü zamanla birlikte değişmektedir. Elastisite modülü,

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (2.12)$$

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.

2.1.1.1.4. Betonun Büzülmesi

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

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s(t - t_s) \quad (2.13)$$

denklemini ile hesap edilmektedir. Burada, ε_{cso} kavramsal büzülme katsayısını, β_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.

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (2.14a)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[160 + 10 \beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \quad (2.14b)$$

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

$$\left. \begin{array}{l} \beta_{RH} = -1.55 \beta_{sRH} \quad 40\% \leq RH < \%99 \\ \beta_{RH} = 0.25 \quad RH \geq \%99 \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

Burada,

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (2.16)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, RH % olarak atmosferdeki nem oranını göstermektedir. RH_0 100%'dür. Zamana bağlı olarak devam eden büzülme,

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0) + (t-t_s)/t_1}} \quad (2.17)$$

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

2.1.1.1.5. Çeliğin Gevşemesi

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

30 yıla kadarki relaksasyon tahmini,

$$\rho_t = \rho_{1000} \left(\frac{t}{1000} \right)^k \quad (2.18)$$

bağıntısı ile hesap edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada, ρ_t t saat sonraki relaksasyonu, ρ_{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, ρ_{100} ise 100 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir. Normalde, relaksasyonun uzun süreli değerleri için uzun süreli testler yapılmaktadır. 50 yıl üzeri relaksasyon değerleri için 1000 saatlik relaksasyonun 3 katı dikkate alınmaktadır.

2.2. Modelleme Yöntemi

Kablolu köprülerin davranışını matematiksel olarak gerçeğe en uygun olarak modelleyebilmek için, köprü elemanları, bağlantılar ve sınır şartları, bilgisayar analiz programlarına çeşitli kabullerle aktarılmıştır. Gerçek duruma en yakın sonucu alabilmek için bu modeller, değişik şekillerde denenerek en optimum çözümün bulunması için çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde ele alınan köprü 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Köprünün bilgisayar ortamında modellenirken yapılan kabuller aşağıda özetlendiği gibidir.

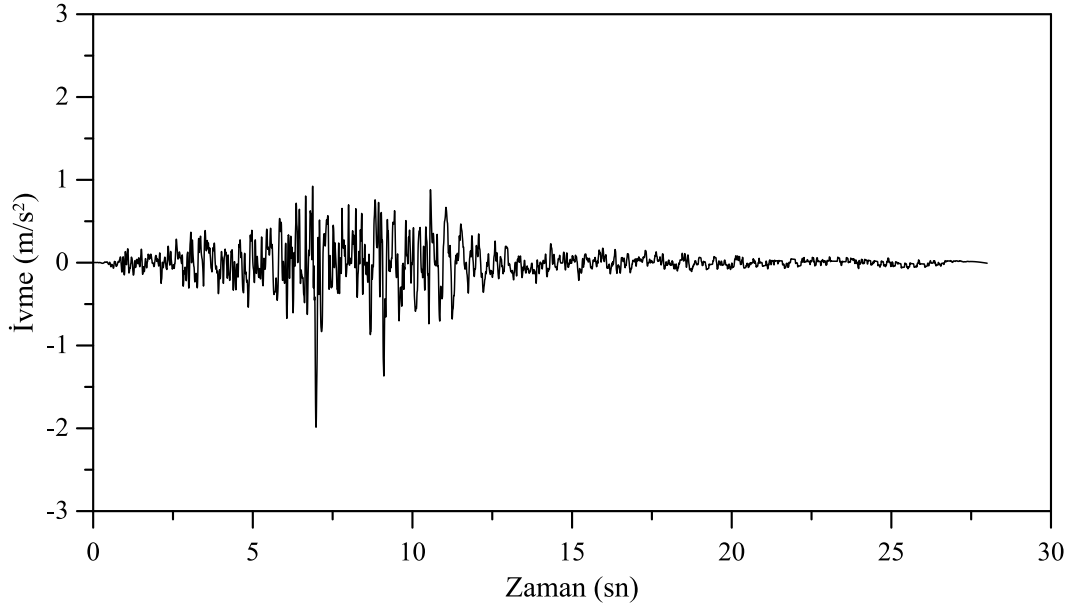
Kablolu köprülerin modellenmesi gereken ana elemanları; kuleler, kablolar, tabliye ve uç mesnetlerdir. Bu elemanlar, kullanılan bilgisayar analiz programlarına gerçek boyutlarıyla ve gerçek malzeme özellikleriyle (birim ağırlığı, rijitliği, elastisite modülü vs.) girilebilmekte ve analiz edilebilmektedir.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

Kablolu köprülerde genel olarak tabliyenin üst kısmı olan kule ve tabliyenin alt kısmından zemine kadar uzanan ayaklar, hem birbirine hem de yere ankastre bağlantıyla sabitlenmektedir. Kablolar kule ve tabliye bağlantı noktalarına moment aktarmayacak şekilde mafsallarla bağlanmalıdır. Tabliyenin zemine oturan uç noktalarındaki mesnetlerde, tasarıma uygun olarak sabit veya kayıcı mesnet olarak tanımlanabilmektedir.

Yapılan çalışmalar, tabliye ve kulelerin bağlantısının, beklenmeyen dinamik etkilerle karşı özel mesnet tipleri ile kontrollü olarak sağlanmasının önemli olduğunu göstermiştir. Deprem, rüzgâr yükü ve sıcaklık değişimlerinden gelen etkilerin kulelere iletilirken sönümlenmesinin, kule ve kule temeli tasarımlarını önemli düzeyde rahatlattığı belirlenmiştir (Abdel-Ghaffar, 1986; Wilson, 1991). Kablolu köprülerde yeni yaklaşım tabliyenin kulelere ankastre bağlantılar yapmaması ve boyuna doğrultuda sadece kablolar yardımıyla ve elastik bağlantı elemanları ile bağlanması yönündedir. Bu şekilde tabliyenin dinamik etkilerle boyuna ve enine doğrultuda yapacağı büyük deplasmanların ve kuvvetlerin kuleye aktarılması önlenir. Bu ayrıca köprünün doğal periyodunun kontrol altında olmasını da sağlar. Bu serbestlik tabliyeye sadece dinamik etkiler altındaki büyük deplasmanların aktarılmasını önlemek amacıyla sağlanmalıdır. Çünkü köprünün günlük kullanımında büyük yerdeğiştirme yapmadan uygun hizmet verebilmesi gereklidir.

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

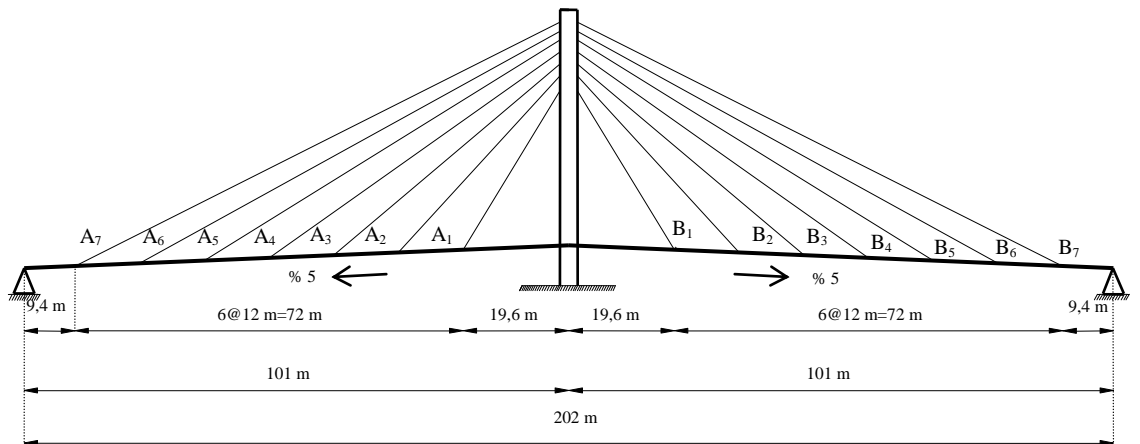
Bu tezde, kablolu köprü analizleri için gerekli olan modelleme ve bilgisayarda yapılacak analiz detayları anlatılacaktır. Örnek çalışma olarak modeli yapılmak üzere Antalya Manavgat'ta bulunan Manavgat Kablolu Köprüsü kullanılmıştır. Köprünün analizleri üç boyutlu model kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak köprünün sabit yükler altında zamana bağlı malzeme özellikleri dikkate alınmadan statik analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak da zamana bağlı malzeme özellikleri üç boyutlu modele tanıtılarak analizin zamana bağlı malzeme özelliklerini de kapsayacak şekilde olması sağlanmıştır. İki analiz sonucunda elde edilen veriler birbiriyle karşılaştırılarak zamana bağlı malzeme özelliklerinin kablolu köprülerin statik analizine olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Dinamik analizlerde kullanılmak üzere yer hareketi olarak 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Kocaeli depreminin Düzce istasyonunda kaydedilen düşey ivme kaydı dikkate alınmıştır ve bu ivme kaydı Şekil 3.1'de görülmektedir. SAP2000 programı yardımıyla yukarıda belirtilen depremin ivme kaydının düşey bileşeni köprünün sonlu eleman modeline uygulanmıştır. Dinamik analizler sonucunda elde edilen veriler grafiklere dönüştürülmüştür. Bu grafiklerde ilk olarak sistemin tümünün depremin hangi saniyesinde kesit etkilerinin en büyük değerlere ulaştığı belirlenmiş ve bu saniyelerde oluşan kesit tesirleri grafiklere halinde gösterilmiştir. Grafiklerde tabliye için düşey yerdeğiştirme ve eğilme momenti grafiği kule için ise eğilme momenti ve normal kuvvet grafikleri elde edilmiştir. İkinci olarak ise bu kesit tesirlerinin hangi eleman veya noktada en büyük değere ulaştığına bakılmış ve bu elemanların depremin başlangıcından sonuna kadarki kesit etkilerinin değişimleri incelenmiştir.



Şekil 3.1. Kocaeli-Gebze düşey ivme kaydı

3.1. Manavgat Kablolu Köprüsünün Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada sayısal uygulama için Manavgat'ta bulunan ve Türkiye'deki ilk örneği olan ve Şekil 3.2'de görülen Manavgat Kablolu Köprüsü örnek seçilmiştir. Manavgat Kablolu Köprüsü 202 m uzunluğunda olup 2 şerit araç ve 2 şerit yaya trafiğine hizmet vermektedir. Köprü toplamda 28 tane çelik kabloya sahiptir. Bunlardan 14 tanesi kulenin sağındaki diğer 14 tanesi de soldaki tabliyeyi desteklemektedir. Kablolar arası mesafe 12 m'dir.



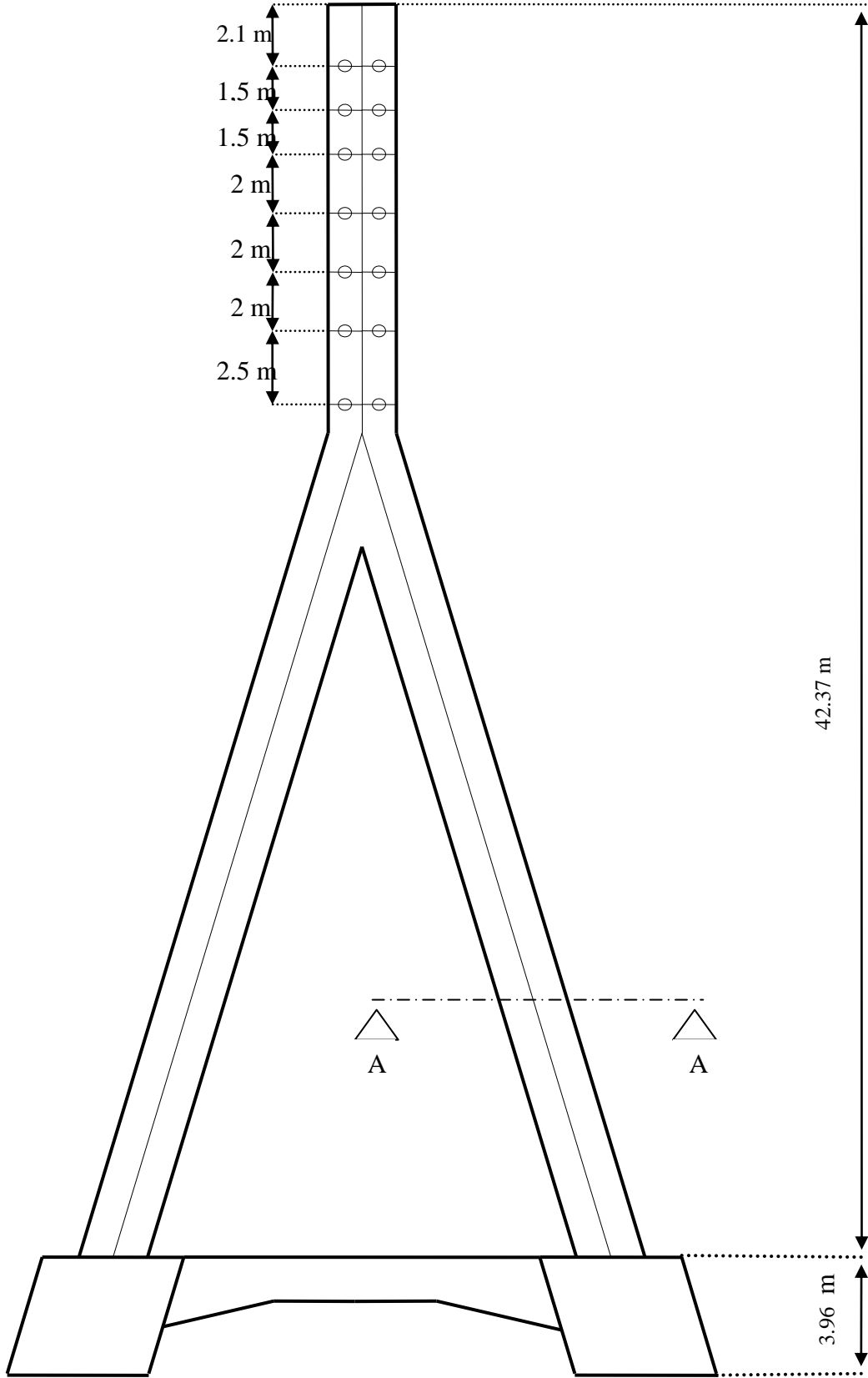
Şekil 3.2. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün şematik şekli

Köprüde kullanılan kabloların çapları birbirinde farklı olup kabloların çapları Tablo'1 de gösterilmektedir.

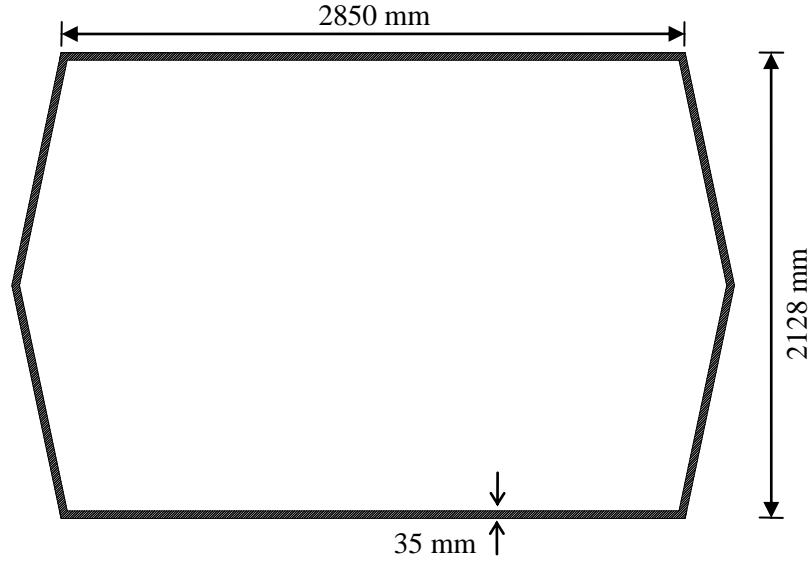
Tablo 3.1. Köprüde kullanılan kabloları ait kesit alanları

Kablo Numarası	İplik Sayısı (Adet)	İplik Çapı (mm)	Kablonun Toplam Kesit Alanı (mm ²)
A ₁	15	15,2	2722
A ₂	16	15,2	2903
A ₃	19	15,2	3448
A ₄	19	15,2	3448
A ₅	22	15,2	3992
A ₆	19	15,2	3448
A ₇	24	15,2	4355
B ₁	15	15,2	2722
B ₂	16	15,2	2903
B ₃	19	15,2	3448
B ₄	19	15,2	3448
B ₄	22	15,2	3992
B ₆	19	15,2	3448
B ₇	24	15,2	4355

Manavgat Kablo Köprüsü tabliyenin uzunlamasına doğrultusunda tam merkezine konumlandırılmış λ şeklinde çelik bir kuleye sahiptir. Kulenin şematik şekli Şekil 3.3'te görülmektedir. Kulenin beton ayaktan yüksekliği 42.37 m'dir. Beton ayağın yerden yüksekliği ise 3,96 m'dir. Kulenin en kesiti içi boş altıgen şeklindedir. Altıgen kesiti Şekil 3.4'de görülmektedir ve et kalınlığı 35 mm'dir.



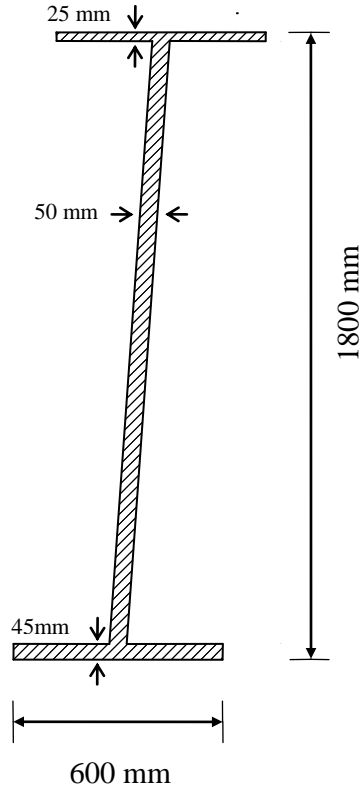
Şekil 3.3. Kulenin şematik şekli



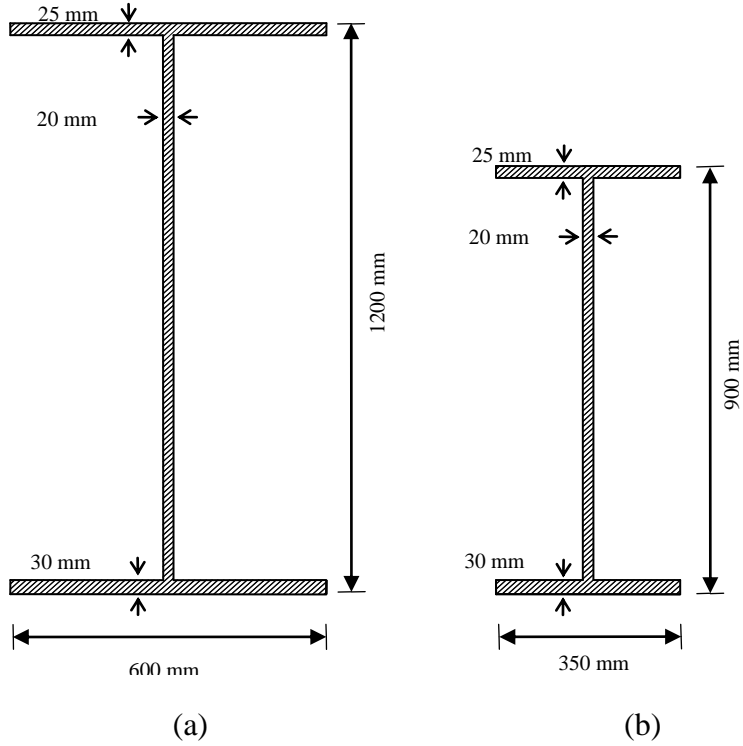
Şekil 3.4. Kulede kullanılan çelik profilin enkesiti (A-A kesiti)

Köprü kompozit bir tabliyeye sahiptir. Tabliye boyuna ve enine doğrultuda kullanılan I profilleri ile üzerine 25 cm kalınlığında betonun ve 10 cm kalınlığında asfaltın yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Boyuna doğrultuda uzanan kirişler köprünün bir ucundan diğer ucuna kadar sürekli olarak uzanmaktadır. Boyuna doğrultudaki I profillerinin gövdeleri yatayla belirli bir açı yapacak şekilde tasarlanmıştır. Boyuna doğrultuda kullanılmış olan I profili şekil 3.5'te gösterilmiştir. Profilin üst başlığının et kalınlığı 25 mm alt başlığın et kalınlığı ise 45 mm'dir.

Enine doğrultuda ise 2 çeşit profil tipi kullanılmıştır. Bu profiller şekil 3.6' te görülmektedir. Şekil 3.6 (a) da görülen profil köprünün uç mesnetlerinin ve kule birleşim bölgesinde kullanılmıştır. Şekil 3.6 (b) de görülen profiller ise tabliye uzunluğu boyunca aralarında 3 m mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Çelik profillerle oluşturulan tabliye iskeletinden sonra tabliyenin beton kısmının yapılması için kalıp imalatı yapılmıştır. Kalıp imalatı tamamlandıktan sonra donatıların yerleştirilmesi işlemine geçilmiştir. Donatı imalatı da tamamlandıktan sonra 28 günlük basınç dayanımı 40 MPa olan betonun döküm işlemi yapılmıştır. 10 cm asfaltın serilmesiyle köprünün kompozit tabliyesi tamamlanmıştır.



Şekil 3.5. Tabliyede boyuna doğrultuda kullanılan çelik profilin enkesiti

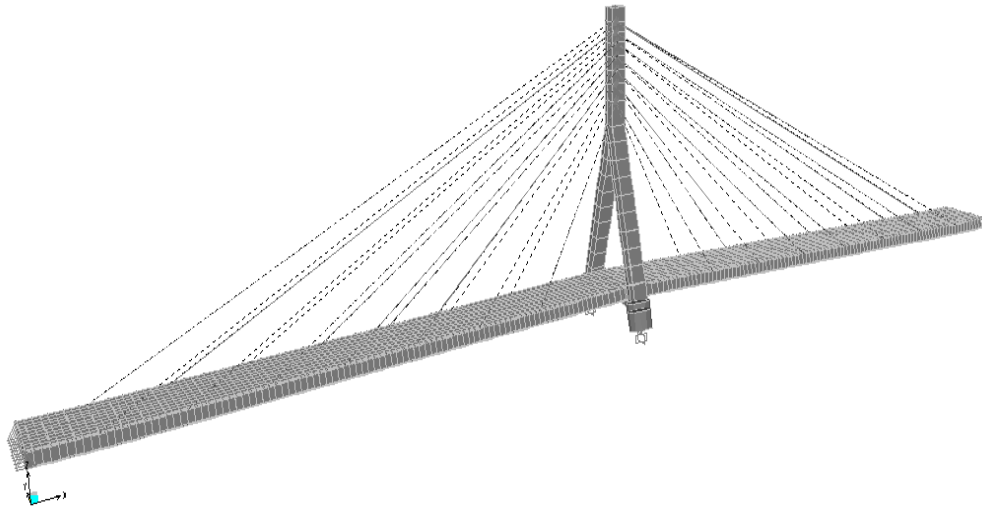


Şekil 3.6. Tabliyede enine doğrultuda kullanılan çelik profillerin enkesiti

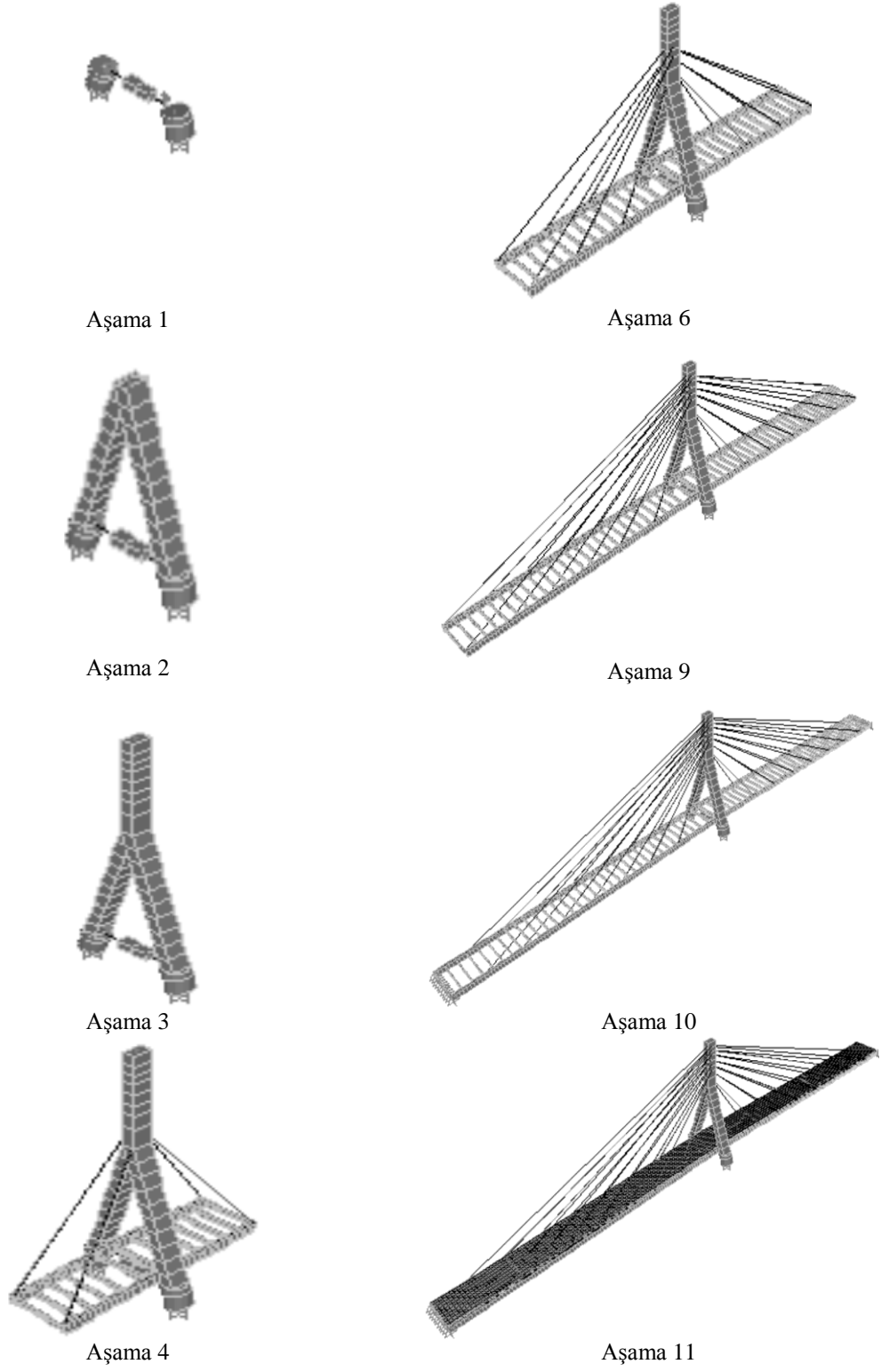
3.2. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modeli

Manavgat Kablolu Köprüsü'nün yapısal davranışını belirlemek için köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 sonlu eleman paket programından faydalanılarak oluşturulmuştur. Köprü'nün sonlu eleman modelinde Şekil 3.7'de görüldüğü gibi tabliye, kule ve kablolar kiriş elemanlar ile temsil edilmiştir. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli 2257 düğüm noktası, 1102 kiriş eleman, 28 kafes eleman ve 1980 alan elemanından oluşmaktadır.

Yapım aşaması çözümlemesi, yapının bir anda inşa edilmesi ve yüklenmesi yerine şantiyede yüklenici firma yapıyı nasıl inşa ediyorsa, proje ofisinde bulunan mühendislerin bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmeleri demektir (Karakaplan ve diğ. 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. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün yapısal davranışına, yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprü'nün sonlu eleman modeli 13 adımda oluşturulmuştur. Bu adımlar Tablo 2'de gösterilmektedir. Toplam inşaat süresi 243 gün olarak dikkate alınmıştır. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün yapım aşamalarına ait sonlu eleman modelleri Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli.



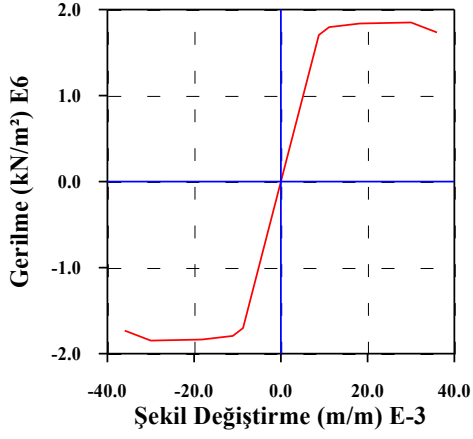
Şekil 3.8. Manavgat Kablo lu Köprüsü'nün yapı m aşamaları

Tablo 3.2. Manavgat Kablolu Köprüsünün Yapım Aşamaları

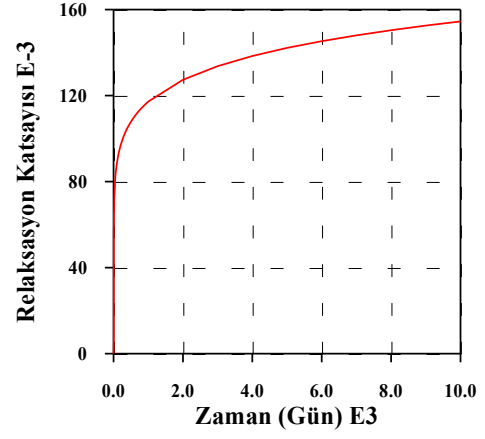
Aşama Numarası	Yapım Aşaması	Zaman (Gün)
1	Beton ayakların tamamlanması	30
2	Kule ayaklarının yapılması	20
3	Kulenin inşasının tamamlanması	20
4	İlk tabliye parçasının inşası	30
5-11	Diğer tabliye parçalarının inşası	7x20
12	Tabliyenin beton kısmının tamamlanması	3
13	Asfalt tabakanın serilmesi	1
Toplam		243

Yapım aşamaları yöntemine göre yapılan analizlerde yapıyı oluşturan malzemelerin zamana bağlı özellikleri muhakkak dikkate alınmalıdır. Köprü gibi yapım süreci uzun süren mühendislik yapılarında malzeme özelliklerinin değişimi oldukça önemlidir. Çünkü köprünün inşası sırasında betonun elastisite modülü, sünme ve rötre katsayıları iklim şartlarına bağlı olarak sürekli değişikliğe uğrayacaktır. Örnek vermek gerekirse beton 7 günlük, 28 günlük veya 1000 günlük iken dayanımı farklılık göstermektedir.

Manavgat Kablolu Köprüsü'nün yapısal davranışına, zamana bağlı malzeme özelliklerinin etkisini belirlemek amacıyla analizlerde çelik malzemesi için çeliğin gevşemesi beton için ise sünmesi, rötresi ve yaşlanması dikkate alınmıştır. Çünkü çelik ve beton gibi yapı malzemelerin özellikleri iklim şartlarına ve yükleme şekline bağlı olarak sürekli bir değişkenlik gösterebilmektedir. Çelik için gerilme şekil değiştirme ve zamana bağlı değişen malzeme özellikleri grafikleri Şekil 3.9'da verilmektedir. Beton için gerilme şekil değiştirme ve zamana bağlı değişen malzeme özellikleri grafikleri Şekil 3.10'da verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodu yardımıyla belirlenmiştir.

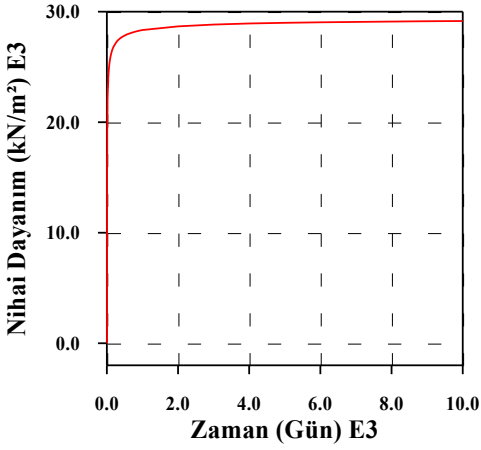


(a)

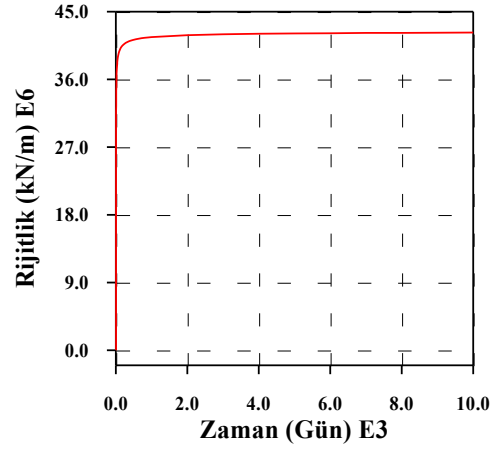


(b)

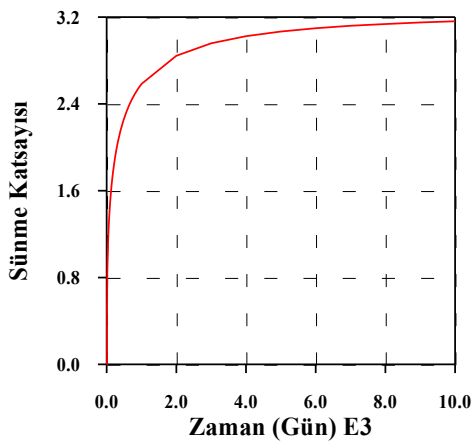
Şekil 3.9. Çelik için gerilme şekil-değişirme (a) ve zamana bağlı malzeme özelliklerinin değişimi (b) diyagramları.



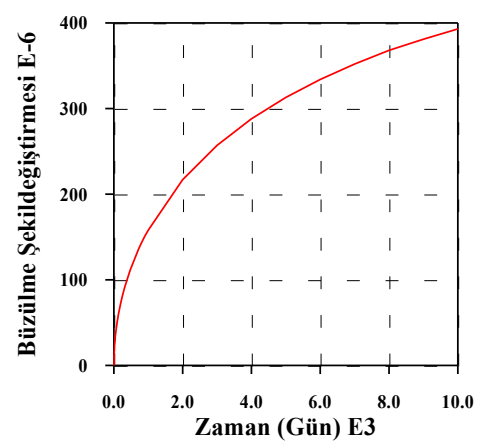
a) Zamana bağlı dayanım değişimi



b) Zamana bağlı rijitlik değişimi



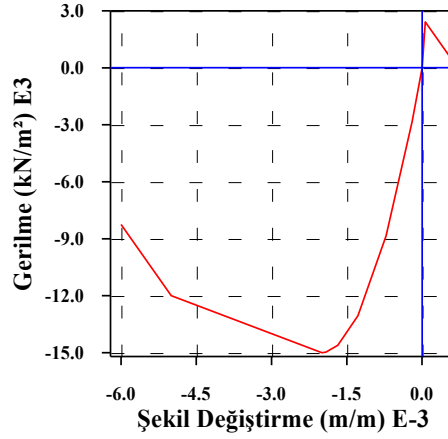
c) Zamana bağlı sünme katsayısı



d) Zamana bağlı büzülme şekil değişirmesi

Şekil 3.10. Beton için zamana bağlı malzeme özelliklerinin değişimi

Şekil 3.10 'nun devamı



e) Beton için gerilme şekil değişirme

Kablolu köprülerin yapısal davranışına, yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek için Antalya'da bulunan Manavgat Kablolu Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Köprü'nün toplam açıklığı 202 m'dir. Kulenin yüksekliği yaklaşık 42 m'dir. Analizler SAP2000 sonlu eleman paket programı kullanılarak oluşturulmuştur. Analiz tipi olarak "Nonlinear Staged Construction" ve geometrik parametreler için "P-Delta Etkisi" dikkate alınmıştır. Manavgat Kablolu Köprüsü'nün yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır.

Sabit Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır.

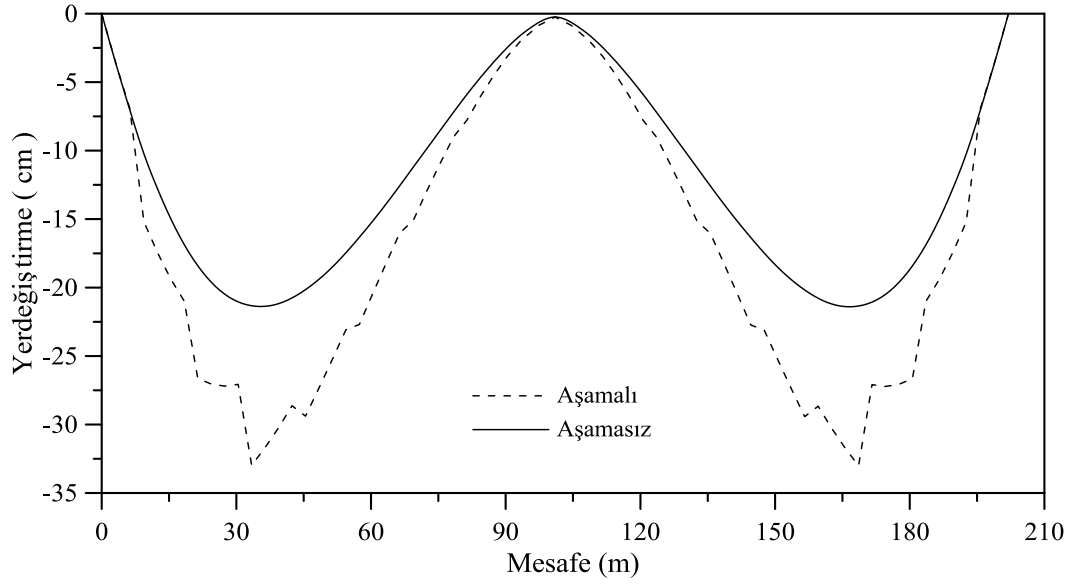
İlave Sabit Yük: 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplama, tabliyenin üzerine 2,2 kN/m² düzgün yayılı yük olarak uygulanmıştır.

4. BULGULAR VE İRDELEMELER

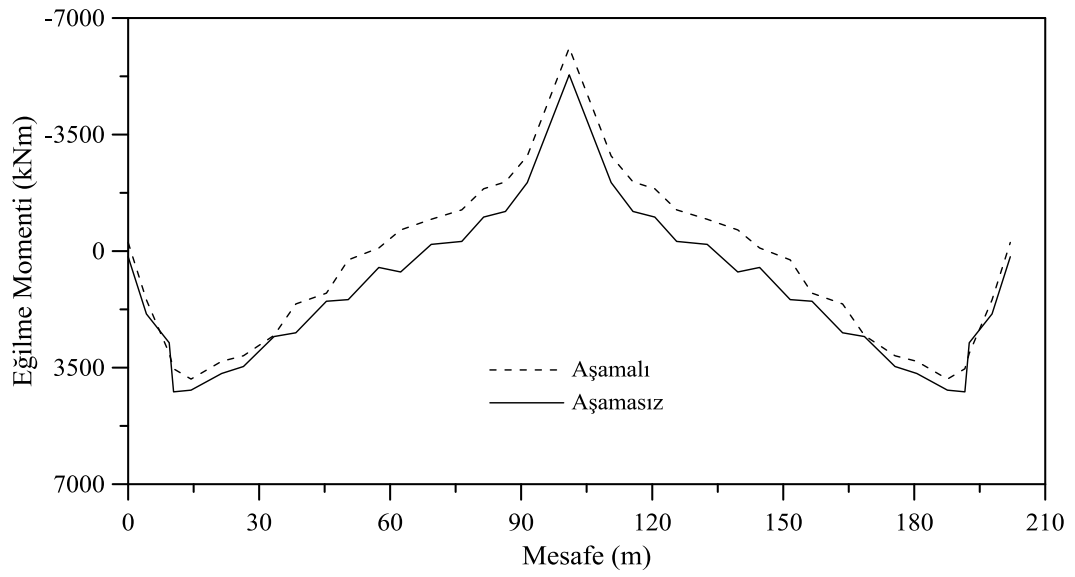
Bu çalışmada örnek sistem olarak Manavgat kablolu köprüsünün konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda; sünme, rötre, gevşeme ve yaşlanma gibi zamana bağlı çevresel etkiler için lineer olmayan analizi gerçekleştirilmiştir. Sap2000 programında oluşturulan üç boyutlu köprü modeli üzerinde yapım aşamasız, yapım aşamalı ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapım aşamasız ve aşamalı analizler sonucunda elde edilen kesit tesirleri birbiriyle karşılaştırılarak iki analiz arasındaki farklılıklar saptanmıştır. Dinamik analizde elde edilen kesit tesirleriyle ise kablolu köprünün dinamik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

4.1. Tabliyenin Statik Davranışı

Yapım aşamalı analizler sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Düşey yerdeğiştirmelerin maksimum değeri kenar mesnetlere yakın bölgelerde oluşmaktadır. Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde maksimum yer değiştirmenin 21,4 cm dikkate alındığı analizlerde ise maksimum yerdeğiştirmenin 33 cm olduğu görülmüştür. Eğilme momenti değerlerinin kuleyle tabliyenin birleştiği noktada maksimuma ulaştığı görülmüştür. Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde eğilme momentinin değeri 5295 kNm, dikkate alındığı analizlerde ise eğilme momentinin değeri 6105 kNm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Düşey yerdeğiştirmelerin tabliye boyunca değişimi.

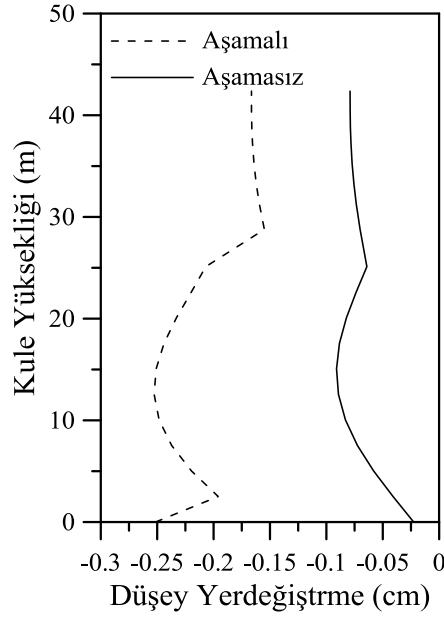


Şekil 4.2. Eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi.

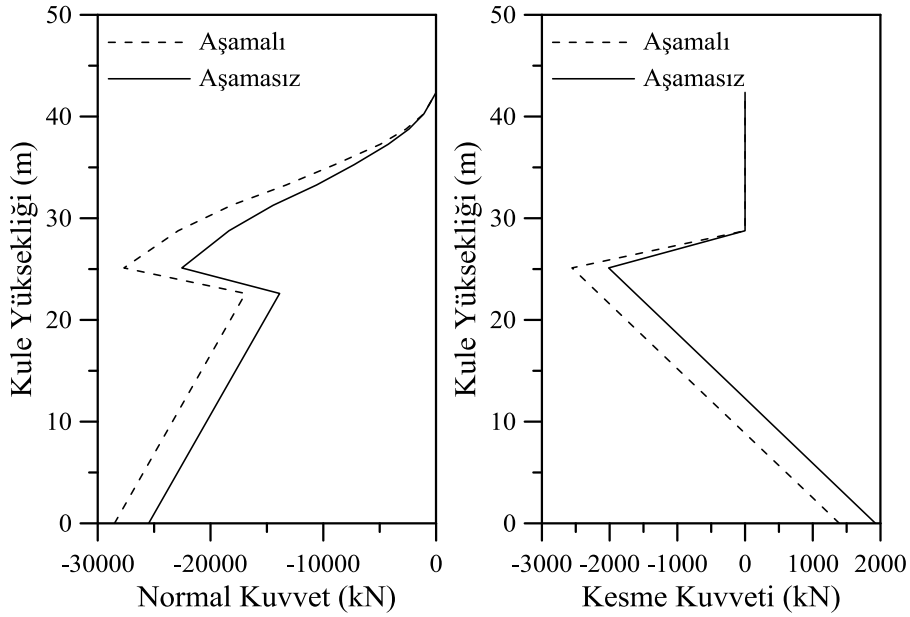
4.2. Kulenin Statik Davranışı

Yapım aşamalı ve yapım aşamasız analizler sonucunda elde edilen kule düşey yerdeğiştirmelerin çok küçük olduğu ve yer değiştirmenin maksimum değerinin yapım aşamalı analiz için 0,25 cm aşamasız analiz içinse 0,09 cm olarak elde edilmiştir. Kule yüksekliği boyunca meydana gelen düşey yerdeğiştirmelerin değerleri Şekil 4.3'te verilmiştir.

Kule yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Kulenin en ũst noktasında kulenin ayaklarına doğru gidildikçe normal kuvvet değerlerinin artığı, aşamalı analizdeki maksimum değer 28512 kN aşamasız analizdeki maksimum değerde 25483 kN olarak elde edilmiştir. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerinin kule ayaklarının birleştiği noktadan kulenin tepesine kadar olan bŕlgede iki analiz içinde sıfır olduğu gŕrũlmüřtũr.

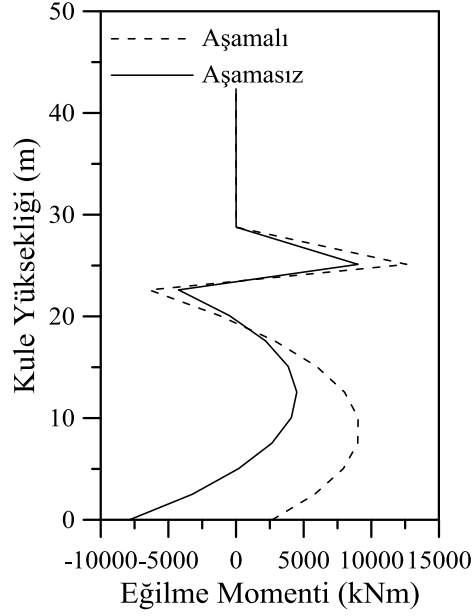


Şekil 4.3. Düşey yerdeğiştirmenin kule yüksekliği boyunca değişimi



Şekil 4.4. Normal kuvvet ve kesme kuvveti değerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

Kule yüksekliği boyunca eğilme momentindeki değişim Şekil 4.5'te verilmiştir. Eğilme momenti kule ayaklarının birleştiği noktada maksimuma ulaşmıştır. Bu noktadan kulenin tepesine kadar olan bölgede ise eğilme momenti değeri sıfır olarak elde edilmiştir



Şekil 4.5. Eğilme momenti değeri kule yüksekliği boyunca değişimi

4.3. Tabliyenin Dinamik Davranışı

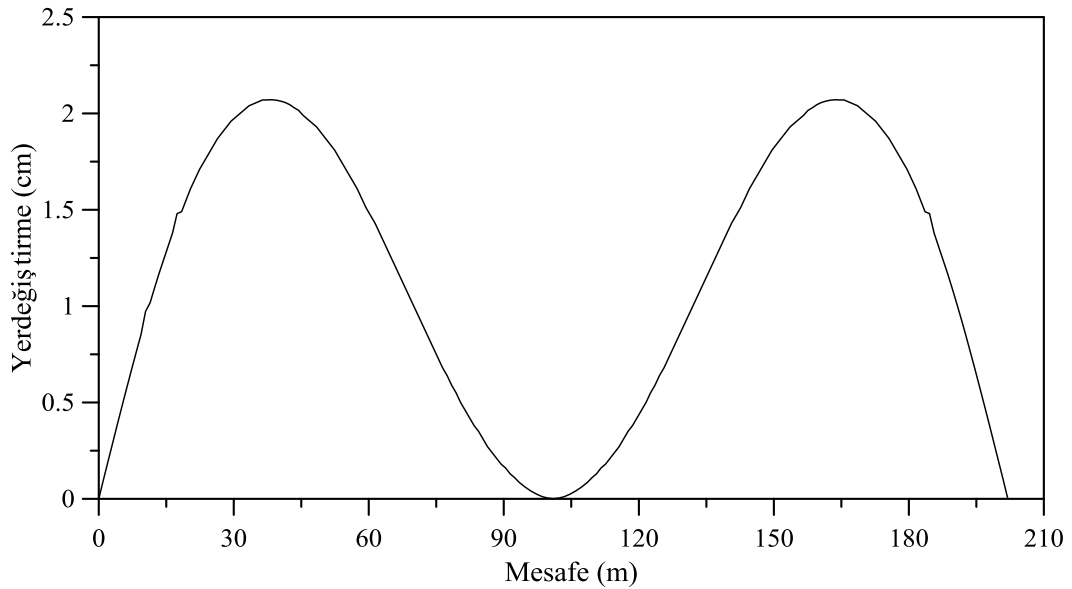
Dinamik analizler sonucunda tabliyede elde edilen en büyük düşey yer değiştirmelerin depremin 8,83'üncü saniyesinde oluştuğu belirlenmiştir. Depremin 8,83'üncü saniyesinde köprü tabliyesinin yerdeğiştirmesi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. 8,83'üncü saniyede köprünün tabliyesinde meydana gelen en büyük yerdeğiştirme 2,08 cm olarak kenar mesnetlere yakın bölgedeki elemanlarda tespit edilmiştir. Tabliyenin düşey yerdeğiştirmesinin en büyük değere ulaştığı bu elemanlardaki depremin tamımdaki yerdeğiştirmesi de Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Köprünün modlarının frekansları ve periyotları Tablo 4.1'de görülmektedir.

Dinamik analizler sonucunda tabliyede elde edilen en büyük eğilme momentinin depremin 7,06'ncı saniyesinde oluştuğu belirlenmiştir. Depremin 7,06'ncı saniyesinde köprünün tabliyesinde meydana gelen eğilme momenti değeri kule boyunca ki değişimi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. 7,06'ncı saniyede köprünün tabliyesinde meydana gelen en büyük eğilme momenti değeri 667 kNm olarak köprü ile tabliyenin birleştiği

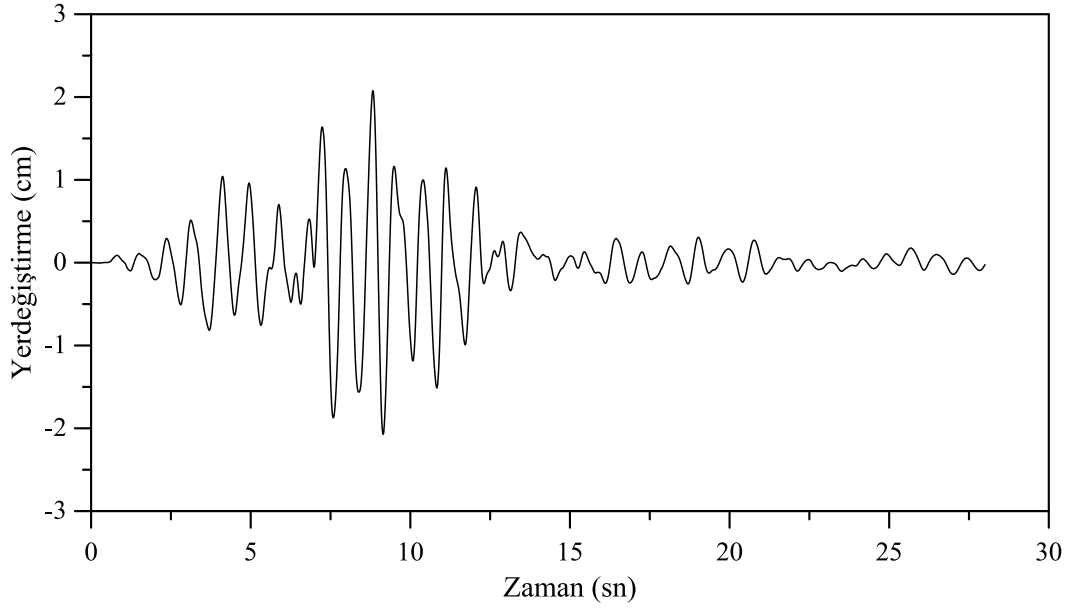
bölgede tespit edilmiştir. Tabliyede meydana gelen en büyük eğilme momentinin oluştuğu elemanın deprem süresindeki değişimi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Köprünün periyot ve frekans değerleri

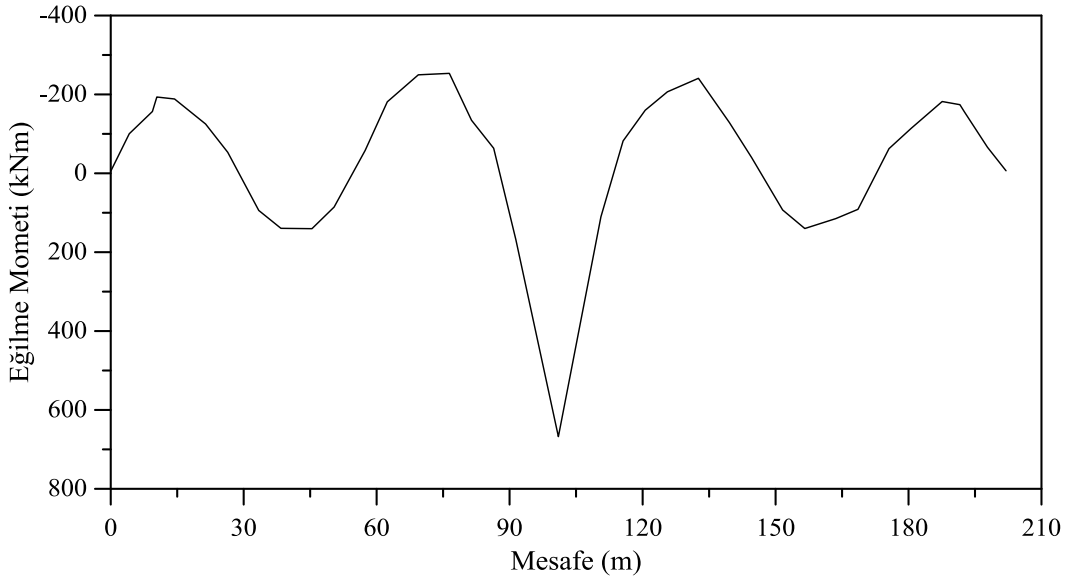
Mod sayısı	Frekans (Hz)	Periyot (sn)
1	0,802890	1,245501
2	1,213097	0,824336
3	2,046897	0,488544
4	2,303374	0,434146
5	2,509093	0,398550
6	3,165657	0,315890
7	3,326184	0,300645
8	3,369079	0,296817
9	3,590440	0,278517
10	3,963838	0,252281
11	4,490389	0,222698
12	4,724953	0,211642



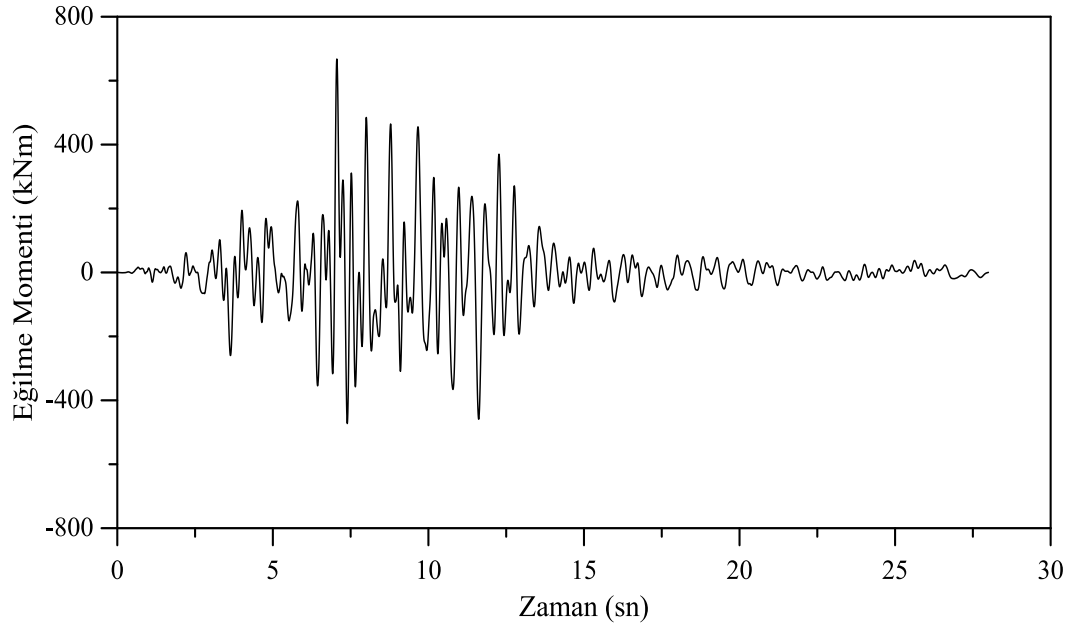
Şekil 4.6. Düşey yerdeğiştirmenin tabliye uzunluğu boyunca değişimi



Şekil 4.7. Düşey yerdeğiştirmenin en büyük değere ulaştığı elemandaki düşey yerdeğiştirmenin zamanla değişimi



Şekil 4.8. Eğilme momentinin tabliye uzunluğu boyunca değişimi

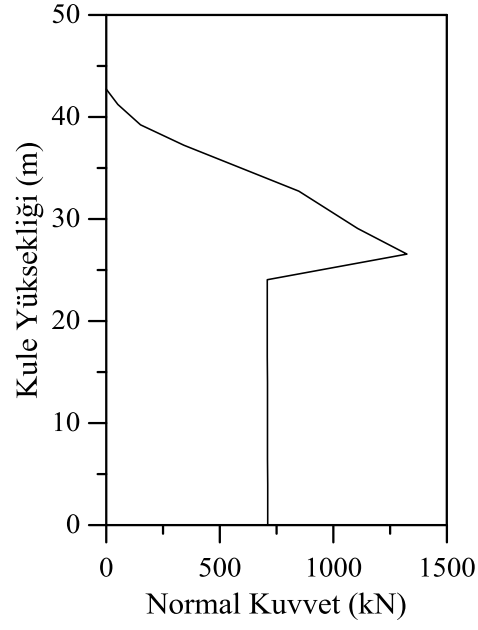


Şekil 4.9. Eğilme momentinin en büyük değere ulaştığı elemandaki eğilme momentinin zamanla değişimi

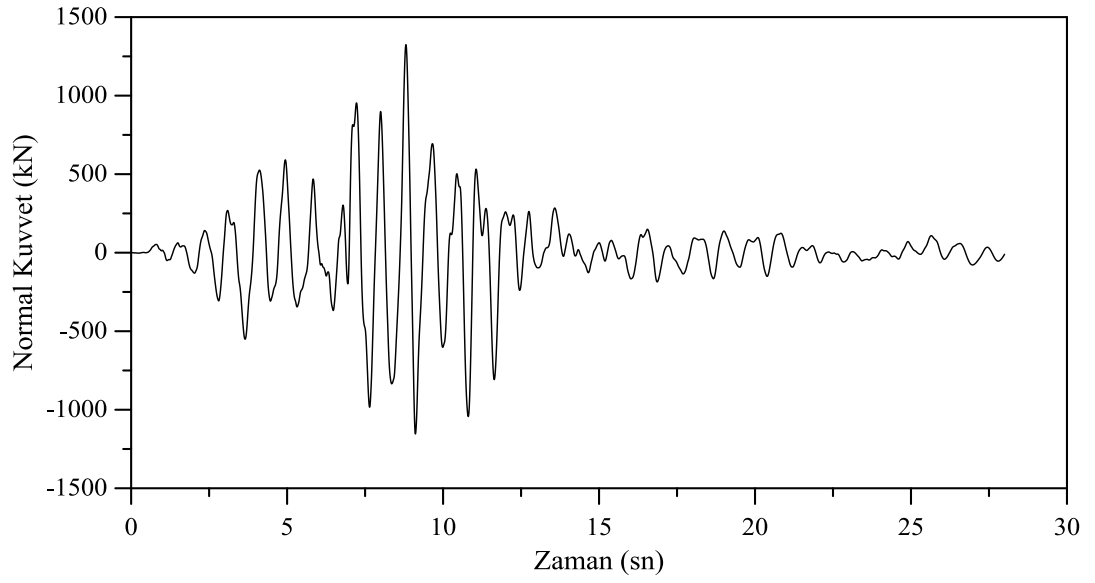
4.4. Kulenin Dinamik Davranışı

Dinamik analizler sonucunda kule yüksekliği boyunca elde edilen en büyük normal kuvvet değerinin depremin 8,81'nci saniyesinde oluştuğu belirlenmiştir. Depremin 8,81'nci saniyesinde kulede meydana gelen normal kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. 8,81'nci saniyede kulede meydana gelen en büyük normal kuvvetin değeri 1324 kN olduğu tespit edilmiştir. Kule yüksekliği boyunca meydana gelmiş olan 1324 kN'luk normal kuvvetin oluştuğu eleman belirlenmiş ve bu elemanın deprem süresindeki normal kuvvet değerinin değişimini de Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

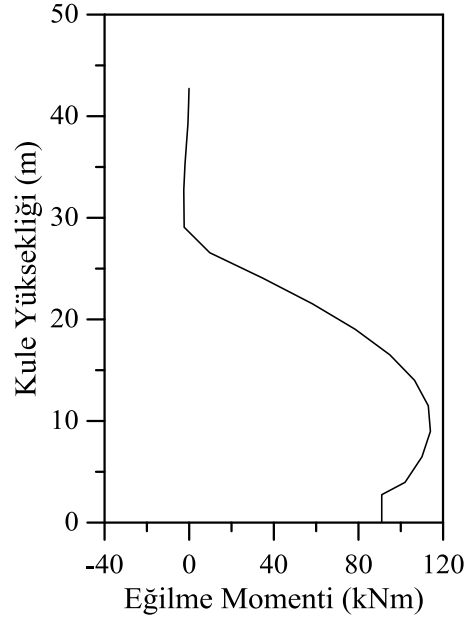
Dinamik analizler sonucunda kule yüksekliği boyunca elde edilen en büyük eğilme momentinin depremin 7,06'nci saniyesinde oluştuğu belirlenmiştir. Depremin 7,06'nci saniyesinde kulede meydana gelen eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliğindeki değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Köprünün kulesinde meydana gelen en büyük eğilme momenti değeri 104 kNm olarak tespit edilmiştir. Kulede meydana gelen en büyük eğilme momentinin oluştuğu elemanın deprem süresindeki değişimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



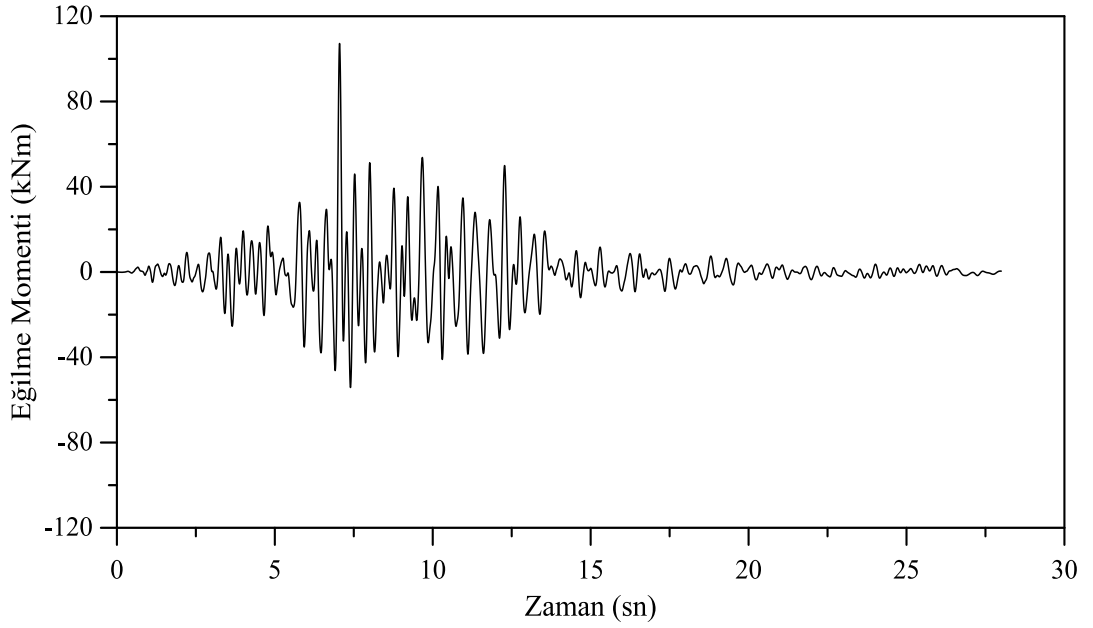
Şekil 4.10. Normal kuvvetin kule yüksekliği boyunca değişimi



Şekil 4.11. Normal kuvvetin en büyük değere ulaştığı elemandaki normal kuvvetin zamanla değişimi



Şekil 4.12. Eğilme momentinin kule yüksekliği boyunca değişimi



Şekil 4.13. Eğilme momentinin en büyük değere ulaştığı elemandaki eğilme momenti değişiminin zamanla değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada örnek sistem olarak seçilen Manavgat Kablolü Köprüsü'nün betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağılı etkiler için konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda lineer olmayan analiz ve dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Köprünün 3 boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Köprünün dinamik analizinde 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Kocaeli depreminin Düzce istasyonunda kaydedilen düşey ivme kaydı kullanılmış ve köprüye sadece düşey doğrultuda etki ettirilmiştir. Bu çalışma ile aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Yapım aşamalarının dikkate alındığı ve alınmadığı analizlerde yerdeğıştirmeler tabliyede kuleden uzaklaştıkça artmakta kıyıdağı mesnetlere yaklaştıkça azalmaktadır. Maksimum tabliye yerdeğıştirmesi kuledeki mesnetten çok kıyıdağı mesnetlere daha yakın bölgede meydana geldiğı gözlenmiştir.. Elde edilen bu veriler yapım aşamalı analiz ile elde edilen maksimum yerdeğıştirme değerinin yapım aşamasız analiz ile elde edilen yerdeğıştirmeden % 54 daha fazla olduğunu göstermektedir.

Grafiklerden elde edilen önemli sonuçlardan biri de iki yöntem arasında tabliyede meydana gelen çekme ve basınç bölgelerindeki değışim olarak görülmüştür.

İki analiz sonucunda da kule yüksekliğı boyunca elde edilen normal kuvvet değerlerinin kulenin en üst kotundan en alt kotuna doğru gidildikçe arttığı belirlenmiştir. Kule yüksekliğı boyunca elde edilen moment değerlerine bakıldığında en çok zorlanan kesitin kule ayaklarının birbirine birleştiğı bölgede olduğu saptanmıştır.

Dinamik analizlerde kullanılmak üzere yer hareketi olarak 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Kocaeli depreminin Düzce istasyonunda kaydedilen düşey ivme kaydı dikkate alınmıştır Statik analizler sonucunda elde edilen kesit etkilerinin hepsi dinamik analizlerden elde edilen kesit tesirlerinden büyüktür. Bu durum da uygulama örneğı olarak seçilen Manavgat Kablolü Köprüsü gibi ağırlıklı olarak çelikten yapılan köprülerin deprem performansının iyi olduğunu göstermektedir. Sismik bölgelerde yapılacak bu tür köprülerde çelik malzemesinin kullanılması köprüyü depremin yıkıcı etkilerinden daha az etkilemesini sağlayacaktır.

Köprünün dinamik analizinden elde edilen kesit etkilerinin hangi noktalarda ve hangi elemanlarda meydana geldiğı belirlenmiştir. Belirlenen nokta ve elemanlarda oluşan kesit

etkilerinin değişimi tüm deprem sırasında elde edilmiş ve bu değişimler grafiksel olarak incelenmiştir. Elde edilen grafiklerin sisteme uyguladığımız ivme kaydına benzer olduğu tespit edilmiştir. Yani sistem deprem hareketini aynı şekilde taklit etmektedir bu durum da sistemimizin oldukça rijit olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göstermiştir ki kablolu köprüler gibi inşa süresi uzun süren mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması gerekmektedir. Elde edilen bütün kesit tesirleri ve yerdeğiştirme değerlerinin yapım aşamalı analizlerde aşamasız analizlere göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Aşamasız analizlerden elde edilen kesit tesirlerine göre yapılacak olan kesit tayininin gerçek yapı davranışını daha iyi temsil eden aşamalı analizlerden elde edilen kesit tesirlerini karşılaması çok zordur.

KAYNAKLAR

- Abbas S., 1993. Nonlinear Geometric Material and Time Depent Analysis of Segmentally Erected Three Dimensional Cable StayedBridges, Doktora Tezi, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 44-83.
- Abdel-Ghaffar, A.M. ve Rubin, L.I., 1982. Suspension Bridge Response to Multiple-Support Excitations, Journal of Engineering Mechanics, 108, 419-435.
- Abdel-Ghaffar, A.M. ve Rubin, L.I., 1983. Vertical Seizmic Behaviour of Suspension Bridges, Earthquake Engineering and Strucutral Dynamics, 11, 1-19.
- Abdel-Ghaffar A.M. ve Stringfellow, R.G., 1984. Response of Suspension Bridges to Travelling Earthquake Excitations, Part 2: Lateral Response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3, 2, 72-81.
- Abdel-Ghaffar, A.M., Scanlan, R.H. ve Nazmy, A.S., 1986. Earthquake Resistant Analysis of the Talmadge Memorial Bridge – Savannah Cable Stayed Bridge – Concrete Alternate, Report prepaper for the DRC Consultants Inc., Flushing, New York, 3-5.
- Adanur, S., Günaydın, M., Altunışık, A.C., Sevim, B., 2012 Construction stage analysis of Humber Suspension Bridge, Applied Mathematical Modelling, 10.1016/j.apm.2012.01.011
- 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., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2010a. Construction Stage Analyses of Kömürhan Highway Bridge using Time Dependent Material Properties, Structural Engineering and Mechanics, 36, 2, 207-223.
- 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.
- Ates, S., 2011. Numerical Modelling of Continuous Concrete Box Girder Bridges Consider Construction Stages, Applied Modelling, 35, 3809-3820.
- Boduroğlu, M.K., 2007. Kablolü Köprülerin Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemi ile Deprem Performansının Belirlenmesi Üzerine Sayısal Bir İnceleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çelik, A., 2010. İki ve Üç Boyutlu Olarak Modellenen Kablolu Köprülerin Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 19-29.
- Cluyet, N.C. ve Shepherd, R., 1994. Analysis of Concrete Cable-Stayed Bridges for Creep Shrinkage and Relaxation Effects, Department of Civil Engineering, California State Polytechnic University, Pomona, U.S.A, 110-134.
- Der Kiureghian, A., ve Keshishian, P., 1996. Effect of Site Response on Spatial Variability of Ground Motion, 11th World Conference on Earth. Eng., Oxford.
- Der Kiureghian, A., 1996. A Coherency Model for Spatially Varying Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, 99-111.
- Diri, T.G., 2009. Zamana Bağlı Çevresel Etkiler İçin Konsol Dilimler Halinde İnşa Edilen Kablolu Köprülerin Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-22, 38-45.
- Eğriboyun, O., 2008. Farklı Kablo Düzenlerine Sahip Çift Tabliyelili Kablolu Köprülerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 17-23.
- Garevski, M., Brownjohn, J.M.W., Blakeborough, A. ve Severn, R.T., 1991. Resonance-Search Tests on a Small-Scale Model of a Cable-Stayed Bridges, Engineering Struct., 13, 59-66.
- Gimsing, N.J., 1998. Cable Supported Bridges (Concept and Design). Second Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Karakaplan, A., Caner, A., Kurç, Ö., Domaniç, A. ve Lüleş, A., 2009. Yapı Çözümlemesinde Yeni Bir Devir: Yapım Aşaması, Teknik Dergi, 321, 4905-4917.
- Kumar, S., 2003. Balanced Cantilever-A Specialist Method in Bridge Construction, Edition, 1, 1-16.
- Kuyumcu, 2010. Elastik Zemin Oturan Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, , Trabzon, 8-9.
- Nazmy, A.S., 1995. Solutions for the Seismic Problems of Superlong Cable-Stayed Bridges, Restructuring: America and Beyond Proceedings of Structures Congress XIII, American Society of Civil Engineers, New York, 1, 465-468.
- Nazmy, A.S. ve Abdel-Ghaffar, A.M., 1987. Seismic Response Analysis of Cable Stayed Bridges Subjected to Uniform and Multiple-Support Excitations, Report No. 87-SM-1, Department of Civil Engineering, Princeton University, Princeton, N.J.

- Nazmy, A.S., 1987. Nonlinear Earthquake-Response Analysis of Cable-Stayed Bridges Subjected to Multiple-Support Excitations, Doktora Tezi, Princeton University, Princeton.
- Nazmy, A.S. ve Abdel-Ghaffar, A.M., 1992. Effects of Ground Motion Spatially Variability on the Response of Cable-Stayed Bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, 1-20.
- Podolyn, W., 1975. Cable-Stayed Versus Classical Suspension Bridge, Transportation Engr. Journal, 102, 291-310.
- Proc. Instn. Civ. Engrs., 1985. Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges Design, 78, 1281-1300.
- Przemieniecki, J.S., 1986. Theory of Matrix Structural Analysis, 1st edition, McGraw Hill Inc., New York, 110-145.
- Ren, W. ve Obata, M., 1999. Elastic-Plastic Seismic Behavior of Long Span Cable-Stayed Bridges, Journal of Bridge Engineering, 4, 3, 194-203.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Soneji, B.B. ve Jangid, R.S., 2007. Passive Hybrid Systems for Earthquake Protection of Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, 29, 57-70.
- Soyluk, K., 1997. Kablolü Köprülerin Stokastik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Soyluk, K., Dumanoğlu, A.A., ve Bayraktar, A., 1997. Comparison of Stochastic and Asynchronous Response of Cable Stayed Bridges, Eighth International Conference on Soil Dynamic and Earthquake Engineering, July, İstanbul, 250-251.
- Takemiya, H. ve Kai, S., 1983. Seismic Analysis of a Multi-Span Continuous Elevated Bridge on Deep Pile Foundations, International Institute of Earthquake Engineering, 332, 1-10.
- Tappin, R.G.R. ve Clark, P.J., 1985. Jindo and Dolsan Bridges: Design, Proc. Instn. Civ. Engrs., 78, 1281-1300.
- URL-1, <http://ilsabeton.com.tr>, 02 Şubat 2012.
- URL-2, <http://galeri.uludagsozluk.com/r/monstar-köprüsü-6130/>, 02 Şubat 2012.
- URL-3, <http://tkic.org.tr/dokumanlar.html>, 02 Şubat 2012.
- URL-4, <http://fotoanaliz.hurriyet.com.tr>, 02 Şubat 2012.

URL-5, <http://www.aykoncelikyapi.com>, 02 Şubat 2012.

URL-6, [http:// http://en.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6msund_Bridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6msund_Bridge), 02 Şubat 2012.

Troitsky, M.S., 1988. Cable-Stayed Bridges. Second Edition, BSP Professional Books, London.

Wang, P.H., Tang, T.Y. ve Zheng, H.N., 2004. Analysis of Cable-Stayed Bridges During Construction by Cantilever Methods, Computers and Structures, 82, 329-346.

Wilson J.C, ve Gravelle W., 1991. Modelling of a Cable-Stayed Bridge for Dynamic Analysis, Earthquake Eng.Struct.Dyn., 20, 707-721.

Wilson, E.L., 1997. Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures with Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures Inc.

Yiu, P.K.A. ve Brotton, D.M., 1988. Computation of Fabrication Dimensions for Cable-Stayed Bridges, The Structural Engineer, 66, 237-243.

Zembaty, Z. ve Rutenberg, A., 1998a. Sensivity Analysis of Spatial Seismic Effects from Local Soil Amplification, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, Computer File.

Zembaty, Z. ve Rutenberg, A., 1998b. On the Sensivity of Bridge Seismic Response with Local Soil Amplification, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1095-1099.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Çorum'da doğdu. İlköğrenimini Mehmet Akif Ersoy İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini ise Yunus Emre Anadolu Lisesi'nde tamamladı.

2004 yılında lisans öğrenimine başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. İyi derecede İngilizce bilen Atmaca halen Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki görevine devam etmektedir.