

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LİFLİ POLİMER KOMPOZİT ASMA KÖPRÜLERİN
STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Nil Arın ATABEY

**TEMMUZ 2011
TRABZON**

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Nil Arın ATABEY tarafından hazırlanan

LİFLİ POLİMER KOMPOZİT ASMA KÖPRÜLERİN
STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 05 / 07 / 2011 gün ve 1412 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20 / 07 / 2011 tarihinde yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

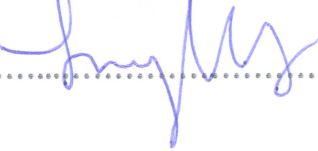
Başkan : Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR


.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK


.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ


.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

“Lifli Polimer Kompozit Asma Köprülerin Statik ve Dinamik Analizi” konulu bu araştırmayı bana öneren ve konu üzerinde çalışma fırsatını veren, bilimsel düşünce, bilgi birikimi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR başta olmak üzere, Yrd. Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK ve öğrenimim boyunca emeği geçen bütün hocalarıma sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam ve yüksek lisans eğitimi süresince, bilgi ve deneyimlerimizi paylaştığım ve her daim paylaşacağımıza inandığım değerli arkadaşlarıma teşekkür eder, yardım ve özverilerinden dolayı meslektaşım ve çok değerli arkadaşım İnş. Yük. Müh. Gül ÇETİNKAYA'ya da teşekkür ederim.

İyi kötü her anımda bana destek olan, güzel anılarımı paylaştığım ve her daim paylaşacağım, dostluğumuzun baki kalacağı, değerli arkadaşlarım, Çiğdem AKIN ve Yıldan AKAYDIN' a sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca, her konuda, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, başta anneannem Semiha GÖNENÇ, babam Kazım ATABEY, annem Ruhsar ATABEY, kardeşim Gülru Gizem ATABEY, teyzelerim Nilgün, Nazan ve Aysun GÖNENÇ olmak üzere, GÖNENÇ ve ATABEY ailelerinin bütün fertlerine müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize yararlı olmasını temenni ederim.

Nil Arın ATABEY

Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Lifli Polimer Kompozit Asma Köprülerin Statik ve Dinamik Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR’ un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda 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. 04.07.2011

NİL ARIN ATABEY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ	IV
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XIII
SEMBOL LİSTESİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması	3
1.2.1. Lifli Polimer (LP) Malzemelerin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı ile İlgili Çalışmalar	3
1.2.2. LP Malzemelerin Uzun Açıklıklı Köprülerde Kullanımı ile İlgili Çalışmalar	4
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	11
1.4. LP Kompozit Malzemeler.....	12
1.4.1. Lifler	14
1.4.2. Matris.....	16
1.4.3. Ara Yüzey	17
1.5. LP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	17
1.6. LP Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları.....	18
1.7. LP Kompozitlerin İnşaat Mühendisliğinde Uygulama Alanları	20
1.7.1. Mevcut Yapılarda Onarım ve Güçlendirme	20
1.7.2. LP Kompozit Köprü Tabliyeleri ve Üstyapıları.....	24
1.7.3. Karma LP/ Beton Kesitler	25
1.8. Asma Köprüler.....	25
1.8.1. Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları	26
1.8.1.1. Kuleler	27
1.8.1.2. Ankrajlar	27

1.8.1.3.	Kablolar	27
1.8.1.4.	Askılar	28
1.8.1.5.	Tabliye	28
1.9.	Asma Köprülerin Dinamik Analiz Formülasyonu	28
1.9.1.	Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Hareket Denklemleri	28
1.9.1.1.	Doğal Frekans ve Modların Hesabı.....	29
1.9.1.2.	Mod Süperpozisyon Yöntemi	33
1.10.	Zaman Tanım Alanında Geometrik Olarak Lineer Olmayan Dinamik Analiz	38
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	41
2.1.	Giriş.....	41
2.2.	Boğaziçi Köprüsü	41
2.2.1.	Boğaziçi Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri	41
2.2.2.	Boğaziçi Köprüsü'nün Sonlu Elamanlar Modelinin Oluşturulması	47
2.2.3.	Boğaziçi Köprüsü'nün Statik ve Dinamik Davranışlarına LP Kompozitlerin Etkilerinin Belirlenmesi.....	49
2.2.3.1.	Eğdeğer Rijitlik Yöntemi.....	50
2.2.3.2.	Eşdeğer Dayanım Yöntemi.....	53
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	55
3.1.	Giriş.....	55
3.2.	Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	56
3.3.	Statik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	70
3.3.1.	Yer Değiştirmeler.....	70
3.3.1.1.	Tabliye Düşey Yerdeğiştirmeleri	70
3.3.1.2.	Kule Yatay Yerdeğiştirmeleri	71
3.3.2.	Eğilme Momentleri	72
3.3.2.1.	Tabliye Eğilme Momentleri.....	72
3.3.2.2.	Kule Eğilme Momentleri	73
3.3.3.	Kesme Kuvvetleri.....	74
3.3.3.1.	Tabliye Kesme Kuvvetleri.....	74
3.3.3.2.	Kule Kesme Kuvvetleri	74
3.3.4.	Normal Kuvvetler.....	75
3.3.4.1.	Kule Normal Kuvvetleri	75
3.4.	Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	76

3.4.1. Yer Değiştirmeler.....	76
3.4.1.1. Tabliye Düşey Yerdeğiştirmeleri	76
3.4.1.2. Kule Yatay Yerdeğiştirmeleri.....	79
3.4.2. Eğilme Momentleri	81
3.4.2.1. Tabliye Eğilme Momentleri.....	81
3.4.2.2. Kule Eğilme Momentleri	83
3.4.3. Kesme Kuvvetleri.....	85
3.4.3.1. Tabliye Kesme Kuvvetleri.....	85
3.4.3.2. Kule Kesme Kuvvetleri	86
3.4.4. Normal Kuvvetler.....	87
3.4.4.1. Kule Normal Kuvvetleri	87
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
5. KAYNAKLAR	94
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

LİFLİ POLİMER KOMPOZİT ASMA KÖPRÜLERİN
STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Nil Arın ATABEY

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR
2011, 98 Sayfa

Bu çalışmada, lifli polimer (LP) kompozit malzemeden yapılmış, asma bir köprünün, statik ve dinamik davranışı incelenmiştir. Uygulama olarak Boğaziçi Köprüsü seçilmiştir. Çelikten yapılmış gerçek köprü modeli de analiz edilmiştir. LP kompozit ve çelik malzeme durumunda elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Statik analizlerde köprünün kendi ağırlığı dikkate alınmıştır. Geometrik olarak lineer olmama ve P- Δ etkileri analizlerde göz önünde bulundurulmuştur. Dinamik analizlerde zaman tanım alanı yöntemi kullanılmıştır. Yer hareketi olarak, 1999 Kocaeli Depremi, Yarımca Petro-Kimya Tesisleri ivme kayıtları seçilmiştir. Çelik malzeme kesit alanları baz alınarak, LP malzemeler için Eşdeğer Rijitlik ve Eşdeğer Dayanım yöntemlerine göre kesit alanları belirlenmiştir. Analizler sonucunda hafif ağırlık, yüksek elastisite modülü, birim ağırlığa oranla yüksek dayanım, rijitlik, sönüm yeteneği ve çevresel koşullara karşı direnç gibi özellikler nedeni ile mekanik performans bakımından, LP kompozit malzemelerin asma köprüler için uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Asma Köprü, Lifli Polimer Kompozit, Çelik, Statik Analiz, Dinamik Analiz, Eşdeğer Rijitlik, Eşdeğer Dayanım

Master Thesis

SUMMARY

STATIC AND DYNAMIC ANALYSES OF
FIBER REINFORCED POLYMER SUSPENSION BRIDGES

Nil Arın ATABEY

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Süleyman ADANUR
2011, 98 Pages

In this study, static and dynamic analyses of fiber reinforced polymer (FRP) composite suspension bridges are investigated. Bosphorus Suspension Bridge is selected for application. The real bridge model which composes of steel is also analysed. The results of analyses calculated for FRP and steel materials are compared with each other. The self-weight of the bridge is considered in the static analyses. Geometrical non-linearity and P- Δ effects are taken into consideration in the analyses. In dynamic analyses, time history method is used. Yarımca Petrochemistry Institution acceleration records of 1999 Kocaeli Earthquake are utilized as ground motion. Based on the steel material cross-sectional areas, the cross-sectional areas for FRP composites are determined by the Equivalent-Stiffness and Equivalent-Strength methods. The results show that FRP composite materials are feasible for suspension bridges because of the light weight, high elasticity modulus, high strength in comparison with the self weight, high stiffness, damping ratio and the resistance of environmental conditions etc.

Key Words: Suspension Bridge, Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite, Steel, Static Analysis, Dynamic Analysis, Equivalent-Stiffness, Equivalent-Strength

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Lifli polimer kompozit malzeme formu.....	13
Şekil 1.2.	Elyaf ve matris malzemelerin gerilme uzama diyagramı	16
Şekil 1.3.	Kolonlarda LP ile güçlendirme teknikleri.....	21
Şekil 1.4.	Kirişlerde eğilme ve kesmeye karşı LP ile güçlendirme	22
Şekil 1.5.	Kesmeye karşı güçlendirmede U şeklinde LP uygulaması.....	23
Şekil 1.6.	Mod süperpozisyon yöntemi	34
Şekil 1.7.	Mod süperpozisyon yönteminde modal koordinatlar ve çözüm	37
Şekil 2.1.	Boğaziçi Köprüsü genel görünüşü.....	43
Şekil 2.2.	Boğaziçi Köprüsü kule görünüşü	44
Şekil 2.3.	Boğaziçi Köprüsü kablo kesitleri	44
Şekil 2.4.	Boğaziçi Köprüsü tabliye kesiti.....	45
Şekil 2.5.	Boğaziçi Köprüsü viyadük kesiti.....	45
Şekil 2.6.	Boğaziçi Köprüsü kule ayak temelleri.....	46
Şekil 2.7.	Boğaziçi Köprüsü ankraj kesiti	46
Şekil 2.8.	Boğaziçi Köprüsü üç boyutlu sonlu elamanlar modeli.....	47
Şekil 3.1.	1999 Kocaeli Depreminin, Yarımca Petro-Kimya Tesislerinden elde edilen ivme kaydının zamana bağlı değişimi.....	55
Şekil 3.2.	Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı mod şekilleri.....	60
Şekil 3.3.	Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	70
Şekil 3.4.	Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi	71
Şekil 3.5.	Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi.....	72
Şekil 3.6.	Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	73
Şekil 3.7.	Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi.....	74
Şekil 3.8.	Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	75

Şekil 3.9. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen normal kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.....	76
Şekil 3.10. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi.....	78
Şekil 3.11. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi.....	78
Şekil 3.12. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi.....	78
Şekil 3.13. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca değişimi.....	79
Şekil 3.14. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi.....	80
Şekil 3.15. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi.....	80
Şekil3.16. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi.....	80
Şekil 3.17. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi.....	81
Şekil 3.18. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi.....	82
Şekil 3.19. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi.....	82
Şekil 3.20. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi.....	82
Şekil 3.21. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi.....	83
Şekil 3.22. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi.....	84

Şekil 3.23. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi.....	84
Şekil 3.24. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi.....	84
Şekil3.25. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi.....	85
Şekil 3.26. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi	86
Şekil 3.27. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi	87
Şekil 3.28. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen normal kuvvet değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi	88

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Boğaziçi Köprüsü ile ilgili bazı teknik bilgiler	48
Tablo 2.2. Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri	49
Tablo 2.3. Boğaziçi Köprüsü için kullanılacak geleneksel çelik ve lifli polimer malzemelere ait özellikler	50
Tablo 2.4. Geleneksel çelik malzemesinin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit özellikleri.....	51
Tablo 2.5. Eşdeğer Rijitlik yöntemine göre, lifli polimer malzemenin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit özellikleri	52
Tablo 2.6. Eşdeğer Dayanım yöntemine göre, lifli polimer malzemenin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit özellikleri.....	54
Tablo 3.1. Boğaziçi Köprüsü'nün Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım'a göre frekans ve periyot değerleri.....	56
Tablo 3.2. Boğaziçi Köprüsü'nün Çeliğe göre Mod Şekilleri ve Periyot-Frekans Değerleri	57
Tablo 3.3. Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitliğe göre Mod Şekilleri ve Periyot-Frekans Değerleri	58
Tablo 3.4. Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Dayanıma göre Mod Şekilleri ve Periyot-Frekans Değerleri	58

SEMBOL LİSTESİ

$A_{\text{Çelik}}$: Çelik kesit alanı
A_{LP}	: Lifli polimer kesit alanı
C_r	: r. genelleştirilmiş sönüm
E_1	: Tek doğrultulu lifli polimer kompozit elastisite modülü
$E_{\text{Çelik}}$: Çelik elastisite modülü
E_f	: Lif elastisite modülü
E_k	: Kompozit elastisite modülü
E_{LP}	: Lifli polimer elastisite modülü
E_m	: Matris elastisite modülü
I_{22}	: Yanal eğilmedeki ortalama atalet momenti
I_{33}	: Boyuna eğilmedeki ortalama atalet momenti
J	: Burulma rijitliği
K_r	: r. genelleştirilmiş rijitlik
LP	: Lifli polimer
M_r	: r. genelleştirilmiş kütle
P_r	: r. genelleştirilmiş kuvvet
T_k	: Kompozit çekme mukavemeti
T_m	: Matris çekme mukavemeti
V_f	: Lif hacimsel oranı
V_m	: Matris hacimsel oranı
α	: Faz açısı
$\{\dot{U}\}$: Sistemin hız vektörü
$[C]$: Sistem sönüm matrisi
$[I]$: Birim matris
$[K]$: Sistemin rijitlik matrisi
$[K_L]$: Lineer olmayan bağlantı elemanların lineer serbestlik dereceleri için ve bütün lineer elastik elemanların rijitlik matrisi
$[K_N]$: Bütün lineer olmayan serbestlik dereceleri için lineer efektif rijitlik matrisi
$[M]$: Sistem kütle matrisi

$[\Phi]$: Normalleştirilmiş modal matris
$\{P\}$: Dış yük vektörü
$\{P_n\}$: Lineer olmayan bağlantı elemanların lineer olmayan serbestlik derecesinden doğan yük vektörü
$\{q\}$: Modal koordinatlar
$\{U\}$: Sistemin yer değiştirme vektörü
$\{\ddot{U}\}$: Sistemin ivme vektörü
$\{\varphi\}$: Hareketin genlik vektörü
$\{\varphi\}_i$: Titreşim modu
$\{\Phi\}_r$: Normalleştirilmiş mod
$q_r(t)$: r. titreşim moduna ait modal koordinat
$\sigma_{\text{Çelik}}$: Çelik gerilme dayanımı
σ_{LP}	: Lifli polimer gerilme dayanımı
ω_i	: Doğal frekans
ω_n	: Doğal açısal frekans
ω_r	: r. titreşim moduna karşılık gelen açısal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyadaki köprü projeleri, 21.yüzyıla girerken, deniz aşma, ada bağlantısı sağlama gibi düşünceler ile yeni bir döneme girmiş bulunmaktadır. Bu amaçla büyük açıklıklı kablo taşıyıcı sistemli köprüler planlanmıştır. Japonya'da Akashi Kaikyo (1990m), Danimarka'da Great Belt (1624m) köprüleri son yüzyıllarda açıklığı 2000 metreye yaklaşan ve mühendislik uygulamaları yönünden önem taşıyan asma köprülerdir. Ayrıca Fransa'daki Normandy Köprüsü (856m) ve Japonya'daki Tarata Köprüsü (890m), kablolu köprü olup, açıklığı 1000 metreye yaklaşan diğer köprü örnekleridir. İtalya'da Messina Köprüsü (3300m), İspanya ile Fas arasındaki Cebelitarık Köprüsü (1018m) ve Çin'de Sutang Köprüsü (1088m), uzun açıklıklı asma köprü projeleri olma özelliği taşımaktadır.

Açıklık uzunluğundaki hızlı artış, köprüleri narin ve rüzgâr etkilerine karşı hassas hale getirmekte ve yeni problemlerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum, tasarım için çok önemlidir. Genellikle büyük açıklıklı asma köprülerin tasarımı, yapının ölü yükleri tarafından kontrol edilmekte ve kablolar yapısal ölü yüklerde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı malzeme kullanımı, kabloların ölü yükünü azaltmaktadır. Bu özellikli malzemeler, alt yapı kesitlerini azaltmakta ve sonuç olarak asma köprüler için yapım zorluğu ve maliyet azalmaktadır. Günümüzde asma köprü elemanları genellikle yüksek mukavemetli çelikten yapılmaktadır. Çelik elemanlar ağırdır ve yapısal performansta önemli eğilme etkileri oluştururlar. Bu durumda, asma köprü rijitliğinde azalma olur ve köprü servis yükleri altında daha esnek bir davranış sergiler. Çelik için korozyon ve yorulma, köprülerde karşılaşılan diğer bir sorundur. Yüksek trafik yükü ya da çevresel etkiler, çelik kablo ve elemanlarda, erken çatlamların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla onarım ve güçlendirme masrafları da yüksek olmaktadır. Bu gibi sorunlara çözüm olması açısından araştırmacılar bir yandan geleneksel çelik malzemeleri iyileştirmek üzere çalışmalar yaparken, diğer taraftan da yeni mühendislik malzemeleri geliştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Buna bağlı olarak LP malzemeler mühendislik alanında kullanılmaya başlanmıştır (Zhang, 2008).

Yüksek dayanımlı çelik malzemeye oranla, LP kompozit malzemelerin çekme dayanımı 2 kat daha fazladır. Elastisite modülü çeliğin %80'i kadardır. Ağırlığı ise, çelik

ağırlığının %20'sidir. LP'lerin korozyona ve yorulmaya karşı direnç yeteneği ile termal etkilere karşı dayanımı diğer önemli özellikleri arasındadır (Zhang, 2008).

Yüksek maliyet ve düşük kesme kapasitesine rağmen, ankraj sistemleri için de LP'ler kullanılmaktadır. LP'lerin hafif olmaları nedeni ile kabloların ve tabliye gibi diğer köprü elemanlarının, yüklemeler ve eğilme etkileri altında boyuna deformasyonları azalmaktadır. Asma ve kablolu köprüler gibi maksimum rijitlik ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda, LP kullanımı rahatlık sağlamaktadır (Zhang, 2008).

Çin'de tamamı polimer kompozitten yapılmış ilk köprü 1980'lerde inşa edilmiş Jiaoyuan Köprüsü'dür. 1981 yılında lay-up tekniği ile Bulgaristan Ginizi'de LP kompozit köprü yapılmıştır. Ekim 1982 yılında yine Çin'de 20,7 metre uzunluğunda ve 9,2 metre genişliğinde araç geçişi için Miyun Karayolu köprüsü inşa edilmiştir. Bu köprü kutu kesitli olup bal peteği tabliyeli cam LP'den yapılmıştır. 1997'de İsviçre'nin Pontresina dağlık bölgesinde tamamı kompozit köprü inşa edilmiştir. 2 köprü kesitinin yaklaşık ölçüleri 12,5 metre olup ağırlığı 2,5 tondur. Bu köprünün taşıma işlemi helikopter ile yapılmış olup yük taşıma kapasitesi 500 kg/m^2 , kar yükü ise 1 ton'dur. Karbon LP kablolar ilk olarak 1996'da İsviçre'de kullanılmıştır. Stork Köprüsü'ndeki 2 çelik kablo karbon LP kablo ile değiştirilmiş ve karbon LP kabloların performansı optik fiber sensörler ile denetlenmiştir. Dünyanın tamamı kompozit ilk kablolu yaya köprüsü 1992'de İskoçya'da yapılan Aberteldy Köprüsü'dür. Aberteldy Köprüsü 2,2 metre genişliğinde, 63 metre ana açıklığında, 113 metre toplam uzunluğunda olup ana kablolarda Kevlar kompozit kullanılmıştır. Kablolar, yelpaze şekilli olup aralıkları 17,2 metredir. Köprü tabliyesi yapısal elemanları, cam LP'den yapılmıştır. Rusya'da 16 metre açıklığında, 3 metre genişliğinde, 6,8 ton ağırlığında, tamamı pultrozyon LP olan kablolu yaya yolu köprüsü Dubna Şehri köprüsü bir günde inşa edilmiştir (Adanur vd. 2011). Tabliyesi cam LP'den oluşan asma yaya yolu köprüsü ise 2001 yılında Bodmin, Cornwall, İngiltere'de inşa edilmiş olan, 48 metre ana açıklığa sahip, Halgavor Köprüsüdür (Firth and Cooper, 2002).

1.2. Literatür Çalışması

1.2.1. Lifli Polimer (LP) Malzemelerin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Dünyada kullanılan taşıyıcı sistem malzemeleri, kargir, betonarme, ahşap ve çeliktir. Son zamanlarda kompozit elemanların hafifliği, korozyona karşı dayanımı, rijitlik oranlarına göre yüksek dayanımı, kolay uygulanabilir olması gibi özelliklerinden dolayı inşaat mühendisliğinde kullanımı yaygınlaşmıştır.

Çelik iskeletli bir yapıda, taşıyıcı sistemin bütün elemanlarının malzeme olarak tek başına çelikten oluşması hiçbir zaman söz konusu olamaz. Çeliğin en yüksek oranda kullanıldığı endüstri yapılarında bile, en azından temeller betonarmedir. Köprülerde çelik kirişlere oturan tabliyeler, betonarme döşeme plaklarıyla çelik kirişlerinin, yine betonarme döşeme plaklarıyla kalıcı kalıp olarak kullanılan çelik sacların ve örtü ya da iç dolgu niteliğindeki betonla da, çelik kolonların ortaklaşa çalıştırılması mümkündür. Böylece betonun basıncı daha iyi karşılaması, çeliğin ise çekmeye olan dayanıklılığı sayesinde, kompozit kesitler yalın çelik kesitlere göre daha ekonomik değerler vermektedir. Ayrıca kompozit kesitlerin çelik kesitlere göre bir üstünlüğü de rijitlik artışından dolayı sehim değerlerinin daha küçük çıkmasıdır.

Özellikle, son yıllarda beton teknolojisindeki ilerlemeler, çok yüksek dayanıma sahip özel betonların üretilmesine olanak sağlamıştır. Ancak, yüksek dayanımlı betonlar tipik olarak gevrek davranış sergiler. Yapılan çalışmalarda, bu olumsuzluk, beton karışımının içine lifler katılarak giderilmeye çalışılmıştır. Böylece; lif donatılı çimento esaslı kompozit (FRCC), lif donatılı beton (FRC), lif donatılı harç (FRM) gibi LP malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Günümüzde, çelik-beton kiriş ve kolonlardan oluşan kompozit yapılar depreme dayanıklı yapı tasarımında en genel çözüm yollarından birini oluşturmaktadır. Bu nedenle son yıllarda, bu tür yapıların analizi ve sonlu eleman modellemesine önem verilmiştir.

LP kompozit malzemeler, 1980'li yıllardan itibaren, betonarme ve çelik yapıların onarım ve güçlendirilmesinde, köprülerin onarım ve güçlendirilmesi ile yeni yapılan köprülerde geniş bir kullanıma sahiptirler (Fang vd., 1999; Bakis vd., 2002; Cheng ve Karbhari, 2006; Zhao ve Zhang, 2007, İlki ve Kumbasar, 2002; İlki vd., 2004; 2008; 2009; 2011; Binici ve Bayrak, 2005; Binici, 2005; Sipahioğlu, 2006; Vellasco vd., 2006; Candan,

2007; Mert 2007; Mosalam vd., 2007; Binici vd., 2007; Binici ve Mosalam, 2007; Camlı ve Binici, 2007; Binici, 2008; Doğan, 2008; Wang ve Li, 2008; Ozcan vd., 2008; 2010a; 2010b; Altay, 2010; Kaya, 2010; Yormaz, 2010)

1.2.2. LP Malzemelerin Uzun Açıklıklı Köprülerde Kullanımı İle İlgili Çalışmalar

LP malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarında önem kazanması ile önemli mühendislik yapılarından olan asma köprüler için de araştırma ve çalışmalar hız kazanmıştır. Malzeme tekniğine bağlı olarak, asma köprüler ve köprü elemanları için LP kompozit malzemelerin etkilerini belirlemek adına, bazı araştırmalar yapılmıştır.

Khalifa vd. (1996), ana açıklığı 122m ve toplam uzunluğu 274,3m olan Lincoln kablolu köprüsünün analiz ve tasarımı üzerine çalışma yapmışlardır. Her iki kule yüksekliği, tabliye seviyesi üzerinden 24,1 metre olup bu yükseklik tabliye açıklığının 0,2'si değerindedir. Ankrajların rahat uygulanabilmesi için kablo düzeni yelpaze şekilli seçilmiştir. Kablolar, tabliyede burulma rijitliğini sağlamak için 2 düzlemde sıralanmıştır. Her kablo düzlemi 40 kablo içermektedir. Aramid lifli kablolar, Kevlar 49 bu proje için tercih edilmiştir. Tabliyede ise iki farklı düzenek seçilmiştir. İlk düzenek, doğrultularına kutu kesitlidir. Bu tip kutu kesitlerde dinamik etkilere karşı uyumun pekiyi olmadığı, fakat bazı iyileştirme işlemleri ile bu sistemlerin çok daha iyi uyum sağlayabileceği ifade edilmiştir. Malzeme olarak bu tabliye için pultrozyonlu cam LP kullanılmıştır. İkinci düzenek için ise; üretim için en uygun olan bal peteği tabakalı cam LP tabliye seçilmiştir. Statik ve dinamik köprü davranışlarını belirlemek amacı ile köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Çalışmanın dayanım kriterleri incelendiğinde; LP malzeme içerisindeki liflerin, uzay koordinatları doğrultusunda düzgün olmayan dağılım sergilemesi nedeni ile bu malzeme ortotropik tanımlanmıştır. Tek doğrultulu plaklarda; lif doğrultusundaki dayanımın daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.

Hodhod ve Khalifa (1997), tamamı cam LP'den yapılmış, hafif ağırlıklı kablolu yaya köprülerinin depreme karşı davranış özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, geleneksel betonarme kablolu köprü ile cam LP köprü arasında, dinamik özellikleri ve depreme karşı davranışları açısından karşılaştırma yapılmıştır. Tasarımda 3 boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmış, orta açıklığı 122m, yan açıklıkları 76m olan Lincoln köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Her iki köprü modeli, frekans özellikleri farklı üç yapay deprem etkisinde

bırakılmıştır. Malzeme özellikleri farklı olan köprülerin karşılaştırılmasında, normalleştirilmiş hareketli yükler ve ölü yüklere bağlı deprem iç kuvvetleri dikkate alınmıştır. Her iki tasarım için bu kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Köprüler, hareketli yükler altında, tabliyede aynı maksimum yer değiştirme yapacak şekilde boyutlandırılmıştır. Tabliyenin, kulelerde boyuna doğrultuda sabit olmadığı farz edilmiş ve kule ayaklarında mafsallanmıştır. Bu uygulama lineer dinamik köprü davranışı olarak belirlenmiştir (Nazmy ve Abdel-Ghaffar, 1987). Kablo sarkma etkisi, büyük yerdeğiştirmeler ve kulelerdeki $P-\Delta$ etkilerinden dolayı geometrik olarak lineer olmayan davranışın oluşabileceği ifade edilmiştir (Hodhod ve Khalifa, 1997). Kablo titreşiminin kendi açısından çok önemli olmasına rağmen, tabliye ya da kulelerin dinamik davranışına pek etkisi yoktur (Abdel-Ghaffar ve Khalifa, 1991). Buna bağlı olarak, her kablo tekil sonlu eleman ile temsil edilmiştir. Çalışmalarda, cam LP köprülerin betonarme köprülere göre enine ve boyuna doğrultularda daha esnek oldukları sonucuna varılmıştır. Kulelerde karşılaştırma yapıldığında, cam LP kulelerin yanal doğrultuda betonarme köprülere göre daha esnek olduğu belirlenmiştir. Cam LP köprü kulesinin, betonarme köprü kulesine göre çok az kesme kuvveti karşıladığı tespit edilmiştir. Kule tabanında taban kesme kuvvetlerinin, yer ivmesini içeren frekansa bağlı olarak yapının toplam ölü ağırlığının %1-%2 oranı arasında olduğu, betonarme köprüde ise bu oranın %1-%4 arasında olduğu belirtilmiştir. Lif doğrultusundaki çekme dayanımı, enine doğrultudakine oranla 4 kattır. Bu değer basınç dayanımında ise 2 kattır (Nagaraj ve GangaRao, 1993). Normal basınç gerilmesi altında LP'li tabakaların düzlem içi dayanımının, tabakaların burkulma dayanımına bağlı olduğu belirtilmiştir. Bal peteği yapıları cam LP'ler, pultrozyonlu cam LP'ler gibi aynı dayanım değerine sahiptir (Heger ve Chambers, 1984). Çalışmanın rijitlik kriteri incelendiğinde, ortotropik plakaların rijitlik özelliğini tanımlamada en az üç malzeme sabitliğinin tanımlanması gerektiği ifade edilmiştir. Bunlar; her iki doğrultudaki elastisite modülleri ile poisson oranıdır. LP malzemelerin daha esnek davranış sergilemesi nedeni ile yanal yükler altındaki yerdeğiştirmeler hesaplandığı zaman, kesme deformasyonlarının da hesaba katılması önerilmektedir. Malzeme ağırlığının hafifliği, daha çok hareketli yüklere bağlı yapısal tepkilere sebebiyet verdiği ifade edilmiştir. Kablolu köprüler gibi uzun açıklıklı yapılar için; lineer olmamadan dolayı büyük yerdeğiştirmeler ve moment-normal kuvvet etkileşimlerinin, düşük elastisite modülü ile genellikle büyütülebileceği ifade edilmiştir. Çalışmada yapılan analizlerde; tabliyenin mesnetlenme şartlarında; tabliyenin boyuna doğrultuda hareketine, tabliye ile kule arasında aksta

dönmelere müsaade edilmiştir. Tabliye sonlarında mafsalı mesnet olması, tabliyelerde normal kuvvetlerin yüksek olmasına neden olur ve bu durum karbon LP tabliyelerde istenmeyen bir durumdur (Ohtsuka, 1984). Dinamik analizlerde, tabliye hareketi, kule ve kablo hareketi ile ilişkilendirilmiştir. Yaya yürüyüşünün yatay ve düşey köprü tepkileri Fourier Serisi ile belirlenmiştir (Allen ve Murray, 1993). Yapılan çalışma sonucunda, LP'lerin dayanım ve rijitlik için kriterleri, uzun ve kısa periyotlar için belirlenmiştir. Bu kriterlerin, LP'lerin ortotropik özelliklerine bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Aref ve Parsons (2000) çalışmalarında, lif takviyeli plastik köprü tasarımı yapmışlardır. Elde edilen sistemin davranışı incelenmiş ve diğer sistemler ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Çalışmada kullanılan üst yapıda, dışı LP plaka ile çevrili, içi hücresel kesitlerden meydana gelen tabliye sistemi kullanılmış ve kaplaması olmayan diğer bir köprü sistemi ile karşılaştırma yapılmıştır. Tabliye iç hücrelerinde, dairesel kesitler kullanılmıştır. Bu sayede köşelerde oluşan gerilme yoğunlaşmalarından kaçınıldığı belirtilmiştir. Dış plaka ve iç hücreler arasında etkili kesme transferinin, tabakalar arasında geniş temas yüzeyi ile sağlandığı belirtilmiştir. Tasarımın rijitlik ve dayanımı, taşıt yükleri etkisinde incelenmiş ve diğer LP plastik köprüler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada etki ettirilen yüklemelerde, ölü yükler ve hareketli taşıt yüklerinin kombinasyonu uygulanmıştır. Yüklemelerde maksimum etkiler göz önüne alınarak irdelemelerde bulunulmuştur. Maksimum kesme kuvveti, eğilme momenti ve yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Deformasyon değeri olarak L köprü uzunluğunun, L/800 değeri AASHTO'ya göre belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, dış kaplama yüzeyinin olmadığı durumda, maksimum deformasyondaki değer %50 artış göstermiştir. Lokal deformasyonlar, araç eksenlerinde daha çok yayılmıştır. Hücreler ile dış kabuk katmanı arasındaki yüzeyde, kesme gerilmesi değeri incelendiğinde, LP dış yüzey tabakasının gerilmelerde daha etkin olduğu bilgisi elde edilmiştir. Çalışmanın sonucunda önemli rijitlik ve dayanım artışlarının, iç hücresel elemanlar çevresine LP tabaka sarılması ile mümkün olabileceği vurgulanmıştır.

Meiarashi vd. (2002) çalışmalarında, geleneksel çelikten yapılmış ve tamamı karbon lif takviyeli kompozitden tasarlanmış iki karayolu asma köprüsünün, yapı ömrü boyunca maliyetlerini araştırmışlardır. Pultrozyon yöntem ile biçimlendirme tekniğinin tüm kompozit karayolu köprüleri için uygun olduğu kabul edilmiştir. Köprü malzeme özelliklerinin, statik ve dinamik etkilere katkılarını belirleyebilmek amacı ile her iki tasarım için aynı kesit ölçüleri kullanılmıştır. Tasarımda; 2 noktasından bağlı, 3 açıklıklı,

toplam uzunluğu 800 metre olan köprü kullanılmıştır. Geleneksel asma köprü için, kule tepe noktası ile tabliye seviyesi arası mesafe, tabliye orta açıklığının $1/10$ ' u değerinde seçilmiştir. Bu değer karbon LP malzeme için $1/20$ dir. Oranların, her iki köprü için en ekonomik değerler olduğu vurgulanmıştır. Karbon LP ve çelik köprü tabliye kesitleri için aynı boyutlar seçilmiştir ve kutu kesitlidir. Ana kablolar ve askı kabloları gibi gerilme elemanlarının malzemeleri, köprüleri oluşturan LP ve çelik özelliğindedir. Analizlerde; tabliye kutu kesitli ve kuleler rijit çubuk eleman olarak kabul edilmiştir. Kaplama malzemesi olarak beton kullanılmıştır. Zemin sınıfı kaya seçilmiştir. (Nishizaki, 1999) Karbon LP'lerin gevrek kırılma morfolojileri nedeni ile güvenlik faktörleri, çelik için 3, cam LP için 10'dur (Meiarashi vd., 2002). Bu nedenle, malzemeler için ulaşılabilir gerilme değeri; çelikte güvenlik katsayısı 3, karbon LP'de ise 10 alınmıştır. Çelik ve karbon LP köprü kulelerinin elastik burkulma yükleri Euler Formülü ile belirlenmiştir. Fakat analizlerde bu değer dikkate alınmamıştır. Statik ve dinamik analizlerde, kesit tesirleri ve titreşim özellikleri her iki yapı elemanları için hesaplanmıştır. Statik analizlerde; ölü yükler, hareketli yükler, rüzgâr yükleri, sıcaklık yükleri, yük transferleri ve yapım hatalarından oluşan yükler dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Kesit etkileri; normal yükleme ve rüzgâr yüklemelerine bağlı olarak belirlenmiştir. Tepki spektrum analizinde deprem için titreşim özellikleri ile kesit etkileri araştırılmıştır. Zeminin kaya olması nedeni ile zemin ankastre olarak alınmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarında, karbon LP köprü tabliyesindeki maksimum eğilme momentinin, çelik köprü eğilme momentine göre %40 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Rüzgâr analizlerine göre bu değer yaklaşık %30 civarında olduğu tespit edilmiştir. Karbon LP köprüdeki maksimum yatay yerdeğiştirmenin, çelik köprüye göre 2 kat olduğu belirtilmiştir. Çelik köprülerin ölü yükleri, karbon LP köprülerin yaklaşık 3 katıdır. Bu durumun, karbon LP'lerin hafif ağırlığından kaynaklandığı vurgulanmıştır. Üst yapı ağırlığının azalması ile altyapı maliyetleri LP köprülerde azalır (Ohno 1999). Maliyetlerin her iki köprü için karşılaştırılması yapıldığında, karbon LP köprülerin ilk yapım maliyetlerinin çeliklere oranla çok daha fazla olduğu, fakat uzun vadede bakım ve onarım masrafları düşünüldüğünde karbon LP köprülerin çelik köprülere oranla daha uygun oldukları vurgulanmıştır.

Aref vd. (2004) çalışmalarında, sonlu elemanlar yöntemi ile karma lifli polimer–beton, köprü üst yapı sistemleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Karma üst yapı sistemi tasarlandıktan sonra, beş adet katı küçük bir model üzerinde statik yüklemeler yapılmıştır. Üç adet trapez kesitli cam LP kutu kesit, tek şerit oluşturmak amacı ile birbiriyle

yapıştırılmıştır. Beton katman ise; oluşturulan bu kesitin basınç bölgesine yerleştirilmiştir. Uygulamadaki amacın; her iki malzemeyi bir arada kullanarak daha iyi bir malzeme özelliği geliştirmek ve cam LP kompozitlerin rijitliğini artırmak olduğu ifade edilmiştir. LP kompozitlerin beton ile karma yapı formları olarak kullanıldığı en etkili yerler, yük taşıyıcı elemanlar ve beton için koruyucu önlemlerin gerektiği yerlerdir (Mirmiray, 2001). Kutu kesitler, cam lifli reçine karışımından elde edilmiş olup, üzerinde yaklaşık 1m beton tabaka mevcuttur. Oluşturulan üst yapının, korozyona karşı dayanım, hafif ağırlık, maliyette uygunluk, yükleme altında lokal deformasyonlarda azalma, kısa sürede fabrikasyon ve inşaa gibi avantajlarının olduğu vurgulanmıştır. Araştırmalarda, statik yükler altında, karma sistem üst yapının davranışı incelenmiştir. Ardından kiriş ve ortotropik plak analizleri yapılmış ve doğruluğu lineer sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde beton ve cam LP arası yapışma yüzeyinin mükemmel olduğu varsayımı yapılmıştır. Cam LP için lineer olmama esas alınmıştır. Bunun nedeninin LP kompozitlerin ortotropik plastiklik özelliklerinin olduğu ifade edilmiştir. Düzlem gerilme şartlarında LP plakaların homojen ortotropik malzeme olduğu vurgulanmıştır. Tasarım hareketli yükler altında, üst yapının statik eğilme davranışının analizlerle belirlendiği, ayrıca lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile beton ve cam LP'li kesitlerin elastik bölge dışında incelenebileceği vurgulanmıştır.

Zhang ve Ying (2007), Runyang ve Jinsha Köprüleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Köprülerde karbon LP kablo kullanımı ile aerodinamik stabiliteler incelenmiştir. Asma köprüler ve kablolu köprüler için, karbon LP kullanılmış ve köprülerin aerodinamik rüzgâr etkilerine karşı, davranışı incelenmiştir. Kabloların kesit alanları, eşdeğer eksenel rijitlik yöntemine göre belirlenmiştir. Eşdeğer rijitlik yöntemine göre, rijitlikleri aynı olan asma köprü modeli için, karbon LP kullanıldığında, köprü kütlesi biraz azalmıştır. Kütle ve kütle atalet momenti, yapı doğal frekansı ile ters orantılıdır. Karbon LP köprünün biraz düşük olan kütlesi ve kütle atalet momenti nedeni ile doğal frekanslar için karbon LP kablolarda artış gözlemlenmiştir. Doğal frekansların, yatay ve düşey eğilme modlarının %9 arttığı, burulma frekansının ise %29,6 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Aerodinamik stabiliteden anlaşıldığı üzere, karbon LP kabloların, uzun açıklıklı asma köprüler için uygun olduğu ifade edilmiştir. Kablo askılı köprüler için ise, karbon LP kullanımı ile yapısal kütledeki azalma, temel burkulma frekansında çok az bir artışa sebep olmuştur. Aerodinamik stabiliteden hareketle, uzun açıklıklı, kablo askılı köprülerde de karbon LP kullanımının uygun olduğu ifade edilmiştir. Asma köprüler için burulma frekansındaki artma nedeni ile,

karbon LP kabloların, aerodinamik stabilitesinin çeliklerden daha iyi olduğu, fakat kablo askılı köprüler için, karbon LP kabloların aerodinamik stabilitesinin, çelik kablolar ile hemen hemen aynı olduğu vurgulanmıştır.

Zhang (2010), 1400 metre açıklıklı köprüde, karbon LP kabloların uygulanabilirliğine yönelik yaptığı çalışmada, servis yükleri altında, statik ve dinamik davranışları incelemiştir. Eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemlerine göre karbon LP kesit alanları belirlenmiştir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak, eşdeğer dayanım yöntemi için $A_{\text{Karbon LP}} = A_{\text{Çelik}}$, eşdeğer rijitlik yöntemi için ise; $A_{\text{Karbon LP}} = 1.25A_{\text{Çelik}}$ olarak belirlenmiştir. Üç boyutlu geometrik olarak lineer olmayan sonlu elemanlar analizi Zhang'a (2002) göre belirlenmiştir. Eşdeğer kablo dayanımında, tabliye ve kuleler için her ikisinde de maksimum yerdeğiştirme önemli artış göstermektedir. Karbon LP kablolarda düşük elastisite modülü ve aynı enkesit alanları nedeni ile karbon LP kabloların destek yetenekleri ve köprünün düşey doğrultudaki rijitlikleri düşüktür. Eşdeğer kablo rijitliğinde ise, her iki köprü için maksimum yerdeğiştirmeler benzerdir. Düşey doğrultudaki rijitliğin her iki durum için de aynı olması nedeni ile bu durumun oluştuğu ifade edilmiştir. Statik yüklemeler altında, uzun açıklıklı kablolu köprülerde, karbon LP kullanımının uygun olduğu ve hesap yöntemi olarak eşdeğer rijitlik yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Dinamik davranışlarda, eşdeğer dayanım durumunda, düşey eğilme frekansı biraz azalmıştır. Yanal burkulma ve burulma frekansları ise artmıştır. Karbon LP kabloların hafif ağırlığı yapı kütlelerinde azalmaya yardımcı olmuştur. Düşey eğilme frekansı da bu nedenle azdır. Eşdeğer kablo rijitliği olması durumunda, yapısal frekanslar ve noktadaki burulma frekansları aşırı artış göstermiştir. Bu artışta yapı frekanslarının da etkili olduğu ifade edilmiştir. Sismik yük etkisinde, karbon LP kullanımı ile yerdeğiştirmelerde azalma olduğu ve içsel kuvvetlerin etkili bir şekilde azaldığı ifade edilmiştir. Karbon LP kabloların uzun açıklıklı köprülerde uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır.

Çavdar vd. (2010), belirsizliğe dayalı stokastik sonlu eleman ve Monte Karlo yöntemlerini kullanarak, kablolarının karbon LP olmasını dikkate alarak Jindo ve Fatih Sultan Mehmet köprülerinin stokastik analizlerini incelemiştir. Karbon LP kablo kesit alanları hesaplanırken eşdeğer rijitlik prensibinden faydalanılmıştır. Yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depremi kullanılmış olup, malzemedeki belirsizlikler ve geometrik olarak lineer olmama göz önünde bulundurulmuştur. Belirsizliğe dayalı stokastik sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonuçlar, Monte Karlo yöntemiyle bulunan sonuçlarla

karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda karbon LP kabloların uzun açıklıklı köprülerde kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Zheng vd. (2010) çalışmalarında, ana açıklığı 2000m ve 5000m olan iki tip asma köprüyü sırası ile Karbon LP ve çelik kablolu sistem şeklinde tasarlamıştır. Matlab ve Fortran programlarını kullanarak, öngerilmeli semer şekilli ana kablo için kablo eğilme parametrelerini hesaplamıştır. Analizlerde çelik kablo sisteminin kullanılması durumunda yapım süresince, kablo sehiminde artma gözlemlenmiştir. Çelik kablolu sistemdeki sehimin, Karbon LP kablolu sisteme göre çok fazla olduğu belirlenmiş, ana açıklığın artması ile bu değer 2000 metrelik açıklıkta %81, 5000 metrelik açıklıkta ise %128 değerine ulaştığı ifade edilmiştir. Ana kablodaki sehime bağlı olarak kule tepe noktalarındaki yük eksantritesi de artmıştır. Kule boyutlarını hesaplamada, ana kablodaki sehime dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Karbon LP kablolarındaki hafiflik, düşey kuvvetlerin kule tepe noktasında azalmasına ve haliyle moment değerlerinin az olmasına imkân vermektedir. Ana kablodaki sehim, inşa sırasında, karbon LP'lerde daha azdır. Buna bağlı olarak da karbon LP kablo kesitlerinde değişiklik yapılabilmesi ifade edilmiştir. Analizlerdeki diğer önemli bir faktör ise karbon LP'lerin çeliğe oranla düşük elastisite modülleridir. Aynı yükleme altında, çeliğe oranla karbon LP'lerde daha fazla yerdeğiştirme sağlanabilir. Buna bağlı olarak, karbon LP kullanılan asma köprülerde kablo deformasyonlarının fazla olabileceği ifade edilmiş ve karbon LP'lerin birim uzama miktarlarının fazla olması, buna neden olarak gösterilmiştir.

Adanur vd. (2011) çalışmalarında, LP kompozitlerin, asma köprülerde uygulanabilirliğini üzerine çalışma yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizler yapılmış ve analizlerde aynı köprü, LP ve çelik malzeme kullanılarak iki farklı şekilde modellenmiştir. Çalışmada eşdeğer rijitlik modeli kullanılmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprü'sü örnek olarak alınmıştır. Tabliye genişliği 39,4 metre, köprü uzunluğu ise 1090 metre olup kenar açıklıklar yoktur. Kulelerin yüksekliği 110 metredir. Köprü, boyutların fazla olması nedeni ile asma köprüler için LP kullanımının incelenmesinde, ideal bir örnek olmaktadır. Statik analizlerde köprünün ölü ağırlığı dikkate alınmıştır. Dinamik analizlerde ise 1999 Kocaeli Depremi dikkate alınmış ve ilk 20 mod kullanılmıştır. Dinamik analizde sönüm oranı LP için %5 ve çelik için %2 olarak belirlenmiştir. Çelik için köprü modellemesinde izotropik özellikler, LP köprü için ise ortotropik özellikler tercih edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda her iki köprünün, farklı tepkiler verdiği belirlenmiştir. Çelik köprü için tepki değerlerinin, LP'li köprüye oranla

daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Farklı mod değerlerine karşın, her iki köprü için mod şekilleri benzer davranış göstermektedir. Çalışmada, LP kompozitlerin hafif ağırlıklarının sonucu olarak; FRP kompozit köprü modelinin frekans değerlerinin, çelik köprü frekans değerlerinden daha fazla çıktığı vurgulanmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu çalışmada, LP kompozit malzemeden yapılmış, asma bir köprünün, statik ve dinamik davranışı incelenmiştir. Ayrıca çelik malzemeden inşa edilmiş gerçek köprü modeli de analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve iç kuvvetler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çalışmada Boğaziçi Köprü'sü model olarak seçilmiştir. Statik analizlerde, köprünün kendi ağırlığı, dinamik analizlerde ise, geometrik olarak lineer olmama ve $P-\Delta$ etkileri dikkate alınmış, deprem kuvveti olarak 1999 Kocaeli Depremi, Yarımca Petro-Kimya Tesisleri ivme kayıtları kullanılmıştır. Zaman tanım alanı yöntemine göre yapılan dinamik analizlerde, çelik malzeme kesit alanları baz alınarak, LP malzemeler için Eşdeğer Rijitlik ve Eşdeğer Dayanım yöntemlerine göre kesit alanları belirlenmiştir. Analizler sonucunda, hafif ağırlık, yüksek elastisite modülü, birim ağırlığa oranla yüksek dayanım, rijitlik, sönüm yeteneği ve çevresel koşullara karşı direnç gibi özellikler nedeni ile mekanik performans bakımından, LP kompozit malzemelerin asma köprüler için uygun olduğu tespit edilmiş ve kesit alanlarını belirlemede Eşdeğer Dayanım yönteminin de kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan işlemler bölümler halinde ele alınmıştır. Birinci bölümde; lifli polimer malzemelerin kullanımı üzerine yapılan çalışmalara, lifli polimer malzeme özelliklerine, inşaat mühendisliği alanında kullanımına yer verilmiş, ayrıca asma köprülerin temel özellikleri ve elemanları hakkında bilgi verilmiştir. Asma köprüler hakkında dinamik analiz formülasyonları, zaman tanım alanında dinamik hareket denklemleri, doğal frekans ve mod hesabı, SAP2000 programı için zaman tanım alanında geometrik olarak lineer olmayan dinamik analiz formülasyonları da bu bölümde verilmiştir.

İkinci bölümde, tez kapsamında örnek olarak seçilen, İstanbul'da Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan, önemli asma köprü örneklerinden olan Boğaziçi Köprüsü tanıtılmış, geometrik özellikleri ve sonlu eleman modeli sunulmuştur. Ayrıca, Boğaziçi

Köprüsü'nün statik ve dinamik davranışına, LP malzemelerin etkisini belirlemek adına, eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemlerine göre kesit alanları belirlenmiştir. Statik ve dinamik analizler bu bölümde yapılmış, modal analiz verileri ve mod şekilleri de elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde, ikinci bölümde yapılan, statik ve dinamik analiz sonuçlarına bağlı olarak, elde edilen bulgulara yer verilmiş ve bu bulgular için irdelemelerde bulunulmuştur. Tabliye ve kulelerde hesaplanan yerdeğiştirmeler ve kesit tesirleri, şekiller halinde verilmiştir. Çelik ile LP kompozit malzeme arasındaki farkları daha iyi görebilmek adına, hesaplanan değerler aynı şekiller üzerinde karşılaştırılmalı olarak verilmiş ve irdelemelerde bulunulmuştur.

Dördüncü bölümde ise, Boğaziçi Köprüsü'nde, statik ve dinamik analizlerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak, lifli polimer malzemelerin kullanımına yönelik avantaj ve dezavantajlar, sonuçlar ve öneriler kısmında verilmiştir.

1.4. LP Kompozit Malzemeler

Çok eski zamanlarda, insanoğlu lifleri bağlayıcı ve koruyucu malzeme olarak kullanmıştır. Bitki lifleri, tuğla ve çömlüklerin kırılmasını önlemek, güçlendirmeyi sağlamak ve sızdırmayı engellemek amacı ile eski Mısır Firevun medeniyetinde ve eski Maya uygarlığında kullanılmıştır (Nagia vd., 2011).

II. Dünya Savaşı'nı takip eden, yeni gelişen petrokimyasal endüstride, polimer reçinelerin içerisine cam liflerinin eklenmesi ile lifli polimer (LP) malzemelerin kullanım ve gelişim süreci başlamıştır. Yüksek dayanım, lif yapısındaki yüksek rijitlik ve düşük maliyet, hafif ağırlık, çevresel etkilere karşı direnç gibi kompozit malzemelerdeki mekanik özellikler, bileşenini meydana getiren elemanların tekil özelliklerinden daha iyidir. 1960–1970' lerde karbon, baron ve aramit gibi lif malzemelerindeki yüksek dayanım ve rijitlik ile düşük yoğunluk, uçak sanayi ve uzay araştırmaları alanında tercih edilmeye başlamış, bu malzemeler ticari bir alan haline gelmiştir. İlk olarak yüksek performanslı lifler ile oluşturulan kompozitler, uzay ve savunma sanayisinde kullanılmıştır. Fakat uygun ve yeterli darbe testleri için kullanım aşırı maliyetler getirmiştir. 1980'lerin sonu 1990'ların başında devletin de desteği ile lif ve LP üreticilerinin önemli yer edinmesi, LP endüstrisinin gelişmesine ve maliyetlerin daha düşük değerler ile sağlanmasına imkân

vermiştir. Bu sayede bakım ve onarım gerektiren mevcut yapılar için LP uygulamaları yaygınlaşmıştır (Bakis vd., 2002).

LP kompozit malzemeler, geleneksel yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığında, ağırlık oranına göre yüksek çekme dayanımları, çeşitli şekillere göre kalıp alabilme yeteneği, çevresel etkilere karşı direnç, düşük bakım-onarım maliyet potansiyeli gibi avantajları vardır. Bu özellikler ile LP kompozit malzemeler, yenilikçi inşaat alanı için iyi bir alternatif olmaktadır (Tuakta, 2005).

İnşaat mühendislerinin LP kompozitlerden yararlandığı alanlardan biri de köprü uygulama alanlarıdır. Köprü yapılarında, LP kompozit kiriş ve köprü tabliyeleri, kolon ve kiriş güçlendirmeleri, LP üstyapı vb. gibi uygulama alanları mevcuttur.

LP kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelmesi sonucu oluşan, kendisini oluşturan malzemelerin özelliklerinden daha farklı bir özellik kazanana malzemedir. Bu farklılığın nedeni, bileşenlerini oluşturan malzemelerin molekül düzeyindeki farklılıklar ve mekanik olarak ayrışabilme yeteneklerinin değişik olmasından ileri gelmektedir (Mazumdar, 2002). Mikro düzeydeki yapısal biçimi ve bileşenlerinin özellikleri ile LP'lerin mekanik ve fiziksel özellikleri kontrol edilir. Bu nedenle LP yapısal elemanlarının tasarım ve analizinde, LP'leri oluşturan malzeme özellikleri ve üretim teknikleri çok iyi bilinmelidir. Anizotropik özelliğe sahip olan LP kompozitler lif ve reçine malzemesinin birbirine yapışması ile oluşur. Bu durum Şekil 1.1' de verilmektedir. Her iki tabaka kendi mekanik özelliklerini gösterir ve böylece kompozit sistemin yeterli performansı sağlanabilir. LP kompoziti oluşturan öngerilmeli lifler dayanım ve rijitliği sağlarken, reçine sertlik verir ve çevresel etkilere karşı malzemeyi korur.



Şekil 1.1. Lifli polimer kompozit malzeme formu (Tuakta C., 2005)

1.4.1. Lifler

LP kompozit malzeme içinde yer alan lifler, kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra, yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahip olan lifler kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli liflerdir. Bu lifler özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutmaktadır. Cam lifler teknolojiye kullanılan en eski lif tiplerindedir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid lifler ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan lif tipleridir. Liflerin, ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, lifli kompozit bir malzeme;

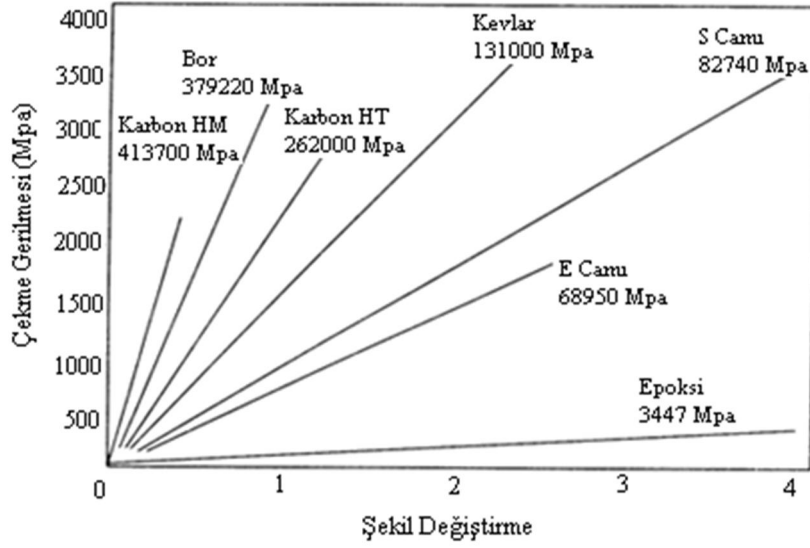
- Öngerilme ve güçlendirme sağlamak için yüksek elastisite modülü,
- Ulaşılabilir yüksek dayanım,
- Lifler arasında düşük ayrışma,
- El ile uygulama esnasında yüksek uygunluk,
- Lif doğrultusunda lifler arasında yüksek uniformluk

gibi özelliklere sahip olmalıdır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında genellikle üç tür lif kullanılmaktadır. Bunlar, cam, karbon ve aramid lifleridir. Cam lifler, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Cam liflerin bazı özelliklerini sıralamak gerekirse; cam liflerin çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir, ısı dirençleri düşüktür bu nedenle yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam lifli kompozitlerde matris ile cam lif arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel lif kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir. Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam lifli kompozitlerin kullanılması uygundur.

Karbon lifler, yoğunluğu 2.268 gr/cm^3 olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon lifler cam liflerden daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir lif grubudur. Karbon liflerin üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde $1000 - 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ civarına ısıtılır ve aynı zamanda

çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve rijitlik sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon lifler uygun değildir. Lif imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı lifler 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı lifler ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı lifler kadar iyi değildir fakat maliyetleri düşüktür. Karbon liflerin en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra, yüksek mukavemet ve rijitlik değerleridir. Karbon lifler, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Karbon lifler çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon lifler alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar. Karbon lifler, cam liflere oranla yüksek elastisite modülü ve şekil değiştirme yeteneğine sahiptir (Meier, 2000). Servis süreleri düşünüldüğünde karbonlu lifler, aramit ve cam liflere göre daha çok potansiyele sahiptir (Tuakta, 2005).

Aramit lifler için iki farklı tip aramit lif mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramidin mekanik özellikleri, karbon liflerde olduğu gibi lif eksenine doğrultusunda çok iyi iken, liflere dik doğrultuda çok zayıftır. Aramit lifler düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği karbonun gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir. Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir. Her iki kevlarda yaklaşık 2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir ve kopma uzaması %1,8'dir. Kevlar 49'un elastik modülü, Kevlar 29'ununkinden iki kat fazladır. Kevlar lifi yoğunluğu, cam ve grafit liflerin yoğunluklarından daha düşüktür. Şekil 1.2'de farklı lif malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.2. Elyaf ve matris malzemelerin gerilme uzama diyagramı

1.4.2. Matris

Kompozit yapılarda matrisin, üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, lifleri bir arada tutmak, yükü liflere dağıtmak ve lifleri çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken, daha sonra lifleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilen, katı forma kolaylıkla geçebilen özellikte olmalıdır.

Kompozit yapılarda, yükü taşıyan liflerin fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından, matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Matris malzemesi olmadan yük, bir ya da birkaç lif arasında zorlukla taşınabilir. Matrisin olması durumunda ise, yükün tüm liflere eşit olarak dağılması sağlanır. Kesme kuvveti altındaki bir gerilmeye karşı dayanım, lifler ile matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliğinin olması ile sağlanabilir. Lif yönlendirmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve lif ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris, life göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında önemlidir. Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile lif arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise, lif ya da matriste oluşacak bir çatlakın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit, gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer, bağ mukavemeti çok düşükse lifler boşluktaki bir lif demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, lif veya matristen başlayan enine doğrultuda bir

çatlak, lif/matris ara yüzeyine dönüp lif doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit, sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler (URL-1, 2011).

1.4.3. Ara Yüzey

Lif ve matris malzemelerinin fiziksel ve kimyasal olarak birbiri ile yapışma yüzeyi, ara yüzey ile ifade edilir. Malzemenin anizotropik özellik göstermesi ve LP kompozit malzemenin performans yeterliliği, bu aşamada sağlanır. LP malzeme analizlerinde, lif ve matris malzemesi arasındaki yapışma yüzeyinin mükemmel olduğu, bu nedenle, ara yüzeyin karşıt her iki yüzeyinde gerilme kesintisinin olmadığı farz edilir.

1.5. LP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

LP kompozitlerin mekanik özellikleri, lif-matris oranına, üretim tekniklerine ve lif ile matris arasındaki uyuma bağlıdır. Tek doğrultulu LP kompozitlerde lifler düzgün ve birbirine paraleldir. Malzemenin ortotropik olduğu dikkate alınır. Çünkü her iki düzlemde simetriktir. Tek doğrultulu lifli kompozitlerde elastisite modülü için, lif ve matris arasındaki ilişki Denklem (1.1)'de verilmektedir. Denklemde; V_f ve V_m sırası ile lif ve matrisin hacimsel oranını, E_f ve E_m ise sırası ile lif ve matrisin elastisite modülünü ifade etmektedir (Tuakta, 2005).

$$E_1 = V_f E_f + V_m E_m \quad (1.1)$$

Çapraz doğrultuda elastisite modülü ve kesme modülü LP malzemenin kesit doğrultularındaki lif dağılımına bağlıdır. LP kompozitlerin basınç-gerilme davranışı lineer şekillidir. Plastik olarak akma yapmazlar. Reçinedeki küçük çatlaklar, basınç durumunda liflerde burulma, lifler arasında ayrışma, matris-lif ve her ikisi arasında viskoelastik deformasyonlar gibi nedenlerden dolayı lineer olmama dikkate alınabilir. Bu nedenle akma noktası, kompozit malzemelerde basınç- gerilme ilişkisinde lineerlikten ayrılır. Eksenel çekme ve basınç gerilmeleri lif özellikleri ile baskındır. Çünkü eksenel yükün çoğunu lif taşımaktadır. Lif rijitliği, matris rijitliğinden daha yüksektir. Çekme kuvvetleri altında lifler

kırıldığı zaman, matris sıvısı deplasmanlara karşı direniş gösterir. Bu direniş, liflerin yan yüzeylerindeki kesme gerilmeleri ile olur. Matris, düşük basınç düzeyinde, liflerde basınç burkulmalarının oluşmasını, engellemeye yardımcı olur.

Kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri, liflerin kopmasıyla sona erer. Bu nedenle en uygun kompozit yapısında lifler, kuvvet doğrultusunda paraleldir. Liflerin kuvvet yönüne dik olduğu hallerde matris ile lifler aynı yükü taşır. Eş gerilme hali bilinen bu yükleme karşısında kompozitin elastisite modülü, denklem (1.2)'de verilmektedir.

$$E_k = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + (1 - V_f) E_f} \quad (1.2)$$

E_f ve T_f liflerin, sırası ile elastisite modülünü ve çekme mukavemeti; T_m liflerin koptuğu andaki şekil değıştirme değeri için matristeki gerilmeyi, V_f liflerin hacimsel oranı ifade eder. Bu durumda, kompozitin çekme mukavemeti, denklem (1.3)'de verilmektedir (Tuakta, 2005).

$$T_k = T_f V_f + (1 - V_f) T_m \quad (1.3)$$

1.6. LP Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları

FRP kompozitlerin sağladığı avantajlar, aşağıda belirtilmiştir.

- Farklı mekanik özellikler elde etmek amacı ile farklı tabaka ve kombinasyonların kullanımı ile kompozit malzeme inşa edilebilir.
- Kimyasallara, korozyona ve hava koşullarına karşı geleneksel çelik malzemesine oranla daha dayanıklıdır.
- Karmaşık parçaların tek olarak üretilebilmesinden dolayı, parça sayısının azalmasını sağlarlar. Bu sayede, ara birleştirme detay ve parçalarının azalmasıyla LP üretim süresi kısalmaktadır.
- Yüksek dayanıklılığına oranla düşük yoğunluğa sahiptirler.
- Yüksek elastisite modülü / ağırlık oranı vardır.

- Hafif olması nedeni ile kullanım alanı geniştir. Elle uygulama ya da basit aletler ile uygulama olanağı sağlar.
- Hafif ağırlığı nedeni ile maliyette uygunluk sağlar.
- Üretim düşük iş gücü kullanımı ile gerçekleşebilir.
- Birleştirme işlemleri metallerde olduğu gibi cıvata, vida, kama v.b. pek çok bağlama elemanı yerine, yapıştırma işlemi ile parça sayılarında önemli azalmalar sağlarlar.
- Yorulma ve darbe dayanımı yüksektir.
- Düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Elektriğe karşı yalıtkan özelliktedir.
- Kimyasallara karşı yüksek direnç göstermesi nedeni ile kullanım alanı geniştir.
- Hacimsel bazda polimer üretimi için metallerden daha az enerjiye ihtiyaç duyar.
- Yüksek aşınma mukavemetine sahiptirler.
- Uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymazlar.
- Elektromanyetik alan oluşturmaması nedeni ile radyo ve mikro dalga frekanslarını etkilemezler.
- Isıya bağlı birim uzama miktarları düşüktür.

Kompozit malzemelerin dezavantajları ise;

- Kompozit üretimi için hammadde pahalıdır.
- Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme dayanımı özelliği bulunmaktadır. Bu özellikte liflerin dağılım, yoğunluk ve düzeni etkilidir.
- Çevresel koşullara bağlı olarak yapışma yüzeyinde oluşan deformasyonlara bağlı olarak dayanımda yetersizlik durumu oluşabilir.
- Birim ağırlığındaki hafiflik nedeni ile aerodinamik dengesizlikler olabilir.
- Standartlaşmış bir kalite şuan için mevcut değildir ve mevcut standartlar yetersizdir.
- Bilirkişi ve uzman eksikliği, bazı uygulamalarda eksikliğe neden olabilir.
- Kırılgan yapıya sahiptirler. Onarılmaları ekstra problemler getirebilir.
- Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.
- Sıcak kurutma gerekmektedir.

1.7. LP Kompozitlerin İnşaat Mühendisliğinde Uygulama Alanları

1.7.1. Mevcut Yapılarda Onarım ve Güçlendirme

İnşaat mühendisliği alanında LP'li onarım ve güçlendirme uygulamaları, genellikle dıştan yapıştırma LP kompozit uygulaması şeklindedir. Bu teknik basit, hızlı ve etkilidir. LP kompozitler, geleneksel çelik plaklar yerine kullanılabilir. Avrupa'da yaklaşık %5 oranında hasarlı köprüde güçlendirme işlemi bu şekilde yapılmıştır. Onarım ve güçlendirme işlemlerinde uygulamaya bağlı olarak, LP malzemeler, şeritler halinde ya da bantlar halinde dıştan yapıştırma tekniği ile uygulanır. Dıştan yapıştırma tekniğinden başka, el ile uygulama ve reçine akıtma gibi uygulama teknikleri de vardır. Özellikle köprü tabliyelerinde ve elemanlarında artan servis yüklerine karşı, uygulama kolaylığı, bakım masraflarının azlığı, uygulama esnasında trafiğin durdurulmaması gibi sebeplerle LP güçlendirme sistemleri tercih edilmektedir.

Kolonlar bir yapının düşey taşıyıcı elemanlarıdır. Bunun yanında, kolonlar, yapının maruz kaldığı dinamik yükleri, temellerden alıp, yapının tamamına rijitliklere bağlı olarak aktarmakta görevlidir. Kolonlar, bir yapının ayakta kalabilmesinde en büyük davranışı sağlayan elemanlardan biridir.

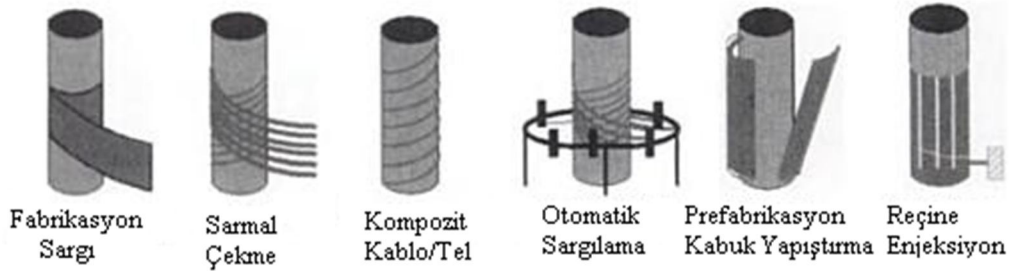
Kolonlara zarar veren kuvvetler; kesme, eğilme, burkulma ve basınç olarak sıralanabilir. Bu kuvvetlerin tamamı birbirleriyle ilişkilidir. Örneğin, eğilme donatılarındaki yetersizlik, binanın rijitliğini azaltarak, binanın daha fazla yerdeğiştirme yapmasına sebep olacak ve burkulmaya yol açacaktır. Eğilme donatısındaki fazlalık ise, kolonun rijitleşmesine sebep olacak ve çekme donatısı akmadan, basınç kırılması meydana gelecektir. Bu durumda toptan göçme gözlenir. Kolonlardaki etriyeler eksik olursa kolon, kesme kuvvetlerine mukavemet gösteremeyecek ve ani bir kırılmaya maruz kalacaktır. Ayrıca etriyeler, betonun basınç dayanımını aşması halinde kolonun dağılmasını engellemekte görevlidir. Şekil 1.3'de kolonlarda LP ile güçlendirme tekniklerinden örnekler verilmiştir.

LP'ler, kolonlarda güçlendirme amacıyla kullanılacak etkili ve yeni nesil malzemelerdir. Eğilme mukavemetinin ve rijitliğin artırılması için lif doğrultusuna paralel uygulanırlar. Kesme mukavemetinin, sünekliliğin, basınç mukavemetinin ve sismik dayanımın artırılması için enlemesine uygulanırlar (Mert, 2007).

Sağlam kolonlar üzerinde yapılan deprem testlerinde görülmüştür ki, kolon yüzeyinde en ufak bir çatlak belirmesi kolonun gücünün sınırına geldiğinin işaretidir.

Yapılan deprem simülasyonlarında kolonda çatlak belirdikten sonra, çatlak ortaya çıkaran darbenin 1,2 ila 1,5 misli bir darbe, kolonun tamamıyla yıkılmasına neden olmuştur. Yapılan testlerde LP sarılı kolonların, artan sismik ve tekrarlı yüklere karşı, daha fazla yerdeğiştirme yaparak enerji sönümlendiği görülmüştür (Mert, 2007).

LP sargılama tekniği ile basınç mukavemeti %100 oranında bile arttırılabilir. Beton düşey yüklere maruz bırakıldığında, büzülme meydana gelir ve yanal genişlemeler gözlemlenir. Bu durum teknik olarak “Poisson oranını” ifade eder. Buradan hareketle, yanal yerdeğiştirmeler kısıtlanırsa, düşey yük taşıma kapasitesinin arttırılabileceği sonucuna varılır. LP uygulamaları, kolon kiriş birleşim bölgelerinde, sıklaşma yapılmayan alanlarda uygulanabilir. Bu sayede, yük taşıma kapasitesi yükseltilebilir.



Şekil 1.3. Kolonlarda LP ile güçlendirme teknikleri

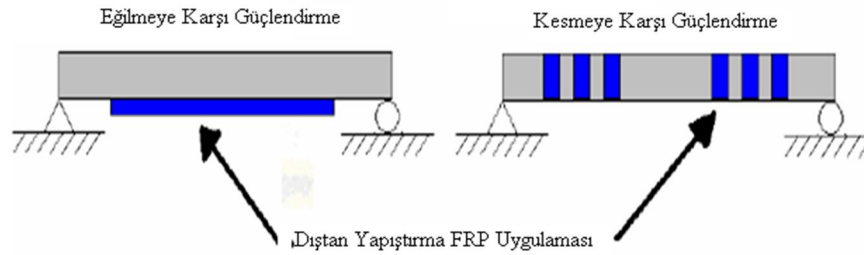
Statik ve dinamik kuvvetler haricinde, kolon donatılarında korozyon dolayısıyla kesit azalması meydana gelir. Bu olaya rutubetli ve asidik ortamlarda, deniz suyuna maruz köprü ayaklarında sıkça rastlanır. Korozyon sonucu donatıda meydana gelen mukavemet ve aderans kaybını telafi etmek için LP'ler gereken yönlerde uygulanabilir. LP içerisindeki reçine, beton ve çeliğin hava ile irtibatını keser. Buhar difüzyonuna izin vermez, kolonu asit ve alkalilerden korur. Karbon LP malzemeler, bunun için ideal malzemelerdir.

Aynı zamanda, LP güçlendirme tekniğinde, eleman kesitlerinde değişme, çelik ile güçlendirme tekniklerine nazaran daha azdır. Dolayısı ile elemanlarda atalet kuvvetlerinde değişme az olur. Bu durumda, yapıda ek rijitliklerin oluşması engellenebilir.

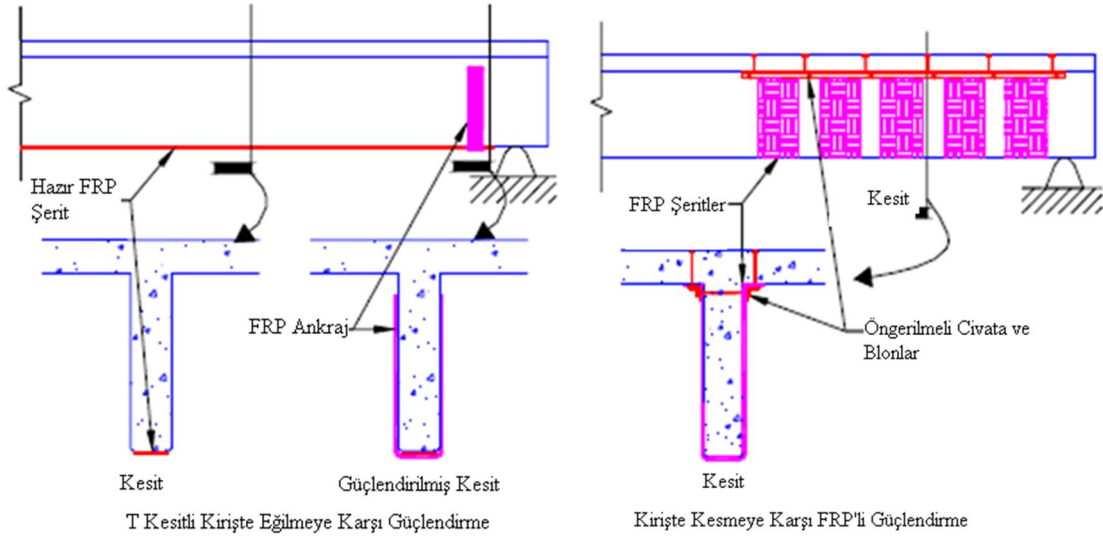
Kirişler ise, bir yapıda kolonlardan sonra, sistemin en önemli taşıyıcı elemanlarıdır. Döşemeden gelen yükleri kolonlara aktarmak ile görevlidirler. Deprem etkisinde,

kolonlarda yük dağılımını sağlarlar. Yapılarda kolonların kirişlere göre daha sağlam olmasına dikkat edilir. Gerekirse kirişlerin mafsallaşmasına da izin verilir.

Onarım ve güçlendirme uygulamalarında, genelde kirişlerin açıklık bölgesinde eğilme, mesnet bölgelerinde ise kesme kuvvetine karşı güçlendirme yapılır. Eğilme bölgesinde yapılacak gereğinden fazla güçlendirme, eğilme donatısı kopmadan basınç bölgesindeki betonun ezilmesine yol açar. Bu kırılma ani, gevrek ve istenmeyen bir kırılma şeklidir (Durmuş, 1998). Eğilme bölgesinde meydana gelebilecek bir hasarda önce LP malzemenin kopması daha sonra çelik donatıların akması, ardından betonun ezilmesi istenir. LP'ler kirişin eğilme bölgesinde boyuna, kesme bölgesinde ise 45° ve 135° açılarda uygulandığında maksimum performanslarını gösterirler (Mert, 2007). Şekil 1.4'de kirişlerde LP güçlendirmesine örnek verilmiştir. Hasarlı bir kiriş, LP ile güçlendirildiğinde orijinal kirişin tasarım kapasitesine tekrar ulaşılabilir, ya da kapasitenin üstüne çıkılabilir. Etriye eksikliğine karşı LP'ler, şeritler halinde, kesite U şeklinde uygulanır. Bu uygulama işlemi Şekil 1.5'de verilmektedir.



Şekil 1.4. Kirişlerde eğilme ve kesmeye karşı LP ile güçlendirme (Park S., 2002)



Şekil 1.5. Kesmeye karşı güçlendirmede U şeklinde LP uygulaması (Park S., 2002)

Döşemelerde en sık görülen hasar aşırı yüklemekten meydana gelen sehimlerdir. Bu, döşeme altındaki donatıların akması sonucu meydana gelir. Döşemelerde genelde eğilmeye karşı güçlendirme yapılır. Depremlerde döşemelerde kesme kuvvetinden meydana gelen hasarlara fazlaca rastlanmaz. Döşemeler plak elemanlar olduğu için kesitin tamamının çekmeye çalıştığı kabul edilir. Döşemelerde yapılacak güçlendirmede, LP lamine şeritler veya kumaşlar açıklık bölgesinde alttan (x ve y doğrultusunda), mesnet bölgesinde, üstten yapıştırılarak yük taşıma kapasitesi ve eğilme mukavemeti artırılır.

Dolgu duvarlar ve tuğla duvarlar, yapılarda taşıyıcı çerçevesi sistemin aralarında dolgu malzemesi olarak kullanılan taşıyıcı özelliği olmayan elemanlardır. Fakat depremde binanın rijitliğine katkıda bulunduğu ve çevrelediği kolonların deplasmanını kısıtlayarak burkulmasını önlediği bilinmektedir. Dolgu duvarlar, depremde çerçeve sisteminin aşırı deplasman yaparak enerji sönmemesi yerine, bu enerjiyi kendi bünyelerinde parçalanmak ve çatlamak suretiyle yok eder. Bu sayede, binaların yıkılmasını zorlaştırır. Dolgu duvarlarda yapılacak en iyi güçlendirme kolon ve kirişlerden ayrılarak kütle halinde düşmesini engellemektir. Bu yüzden 00/90° açıda dokunmuş LP kumaşlar birleşim yerlerine yapıştırılır. Eğer binanın betonarme sisteminin güçlü olduğu tespit edilmiş ve muhtemel bir depremde duvarlarda da çatlama ve kırılma olması istenmiyorsa, duvarlarda eğilmeye karşı boyuna, kesmeye karşı enine doğrultuda LP uygulanabilir. Maliyet unsurları da göz önünde bulundurularak karbona göre daha ucuz olan cam lifli kompozit sistemi tercih edilebilir (Mert, 2007).

1.7.2. LP Kompozit Köprü Tabliyeleri ve Üstyapıları

Köprü elemanlarında en çok hasar gören eleman tabliyelerdir. Yük kapasitesini arttırmak gerekmektedir. Bu nedenle; LP köprü tabliyeleri yeni çözüm olmuştur. Son birkaç yıl içerisinde yapılan çalışmalarda, LP ürünlerin çeliğe oranla daha hafif olmaları, birim ağırlıklarına oranla yüksek rijitlik ve dayanım sağlamaları nedeni ile uygulamalarda çelik yerine LP tercih edildiği tespit edilmiştir (Bakis vd., 2002). Onarım ve güçlendirme projelerinde, değişebilir köprü tabliyelerinde, mevcut tabliye yerine hafif LP tabliye kullanımı, ölü yüklerin azalmasına imkân sağlar. Bu durumda, köprü daha fazla hareketli yük taşıma kapasitesi elde etmiş olur. Bu strateji ile Amerika'da kısa açıklıklı ve uzay kafes sistem köprülerde, birçok iyileştirme projesi yapılmıştır. LP köprü tabliyesi tasarımı, dayanımdan daha ziyade rijitliğe bağlıdır. Köprü tabliyesinden başka, bariyerler, kablolar, yüzey kaplamaları gibi LP üretim elemanlarda kullanılmaktadır. Köprü tabliyeleri için iki farklı üretim şekli vardır. Bunlardan biri sandviç kesitli yapılar ve diğeri tutkal ile yapıştırılmış kesitli yapılarıdır. Sandviç kesitler, rijitlik ve dayanımın, hafif ağırlıklar ile sağlanması gerektiği, otomotiv sektörü, uzay sanayi, marina gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yapıştırma kesitler, trafik doğrultusunda yükü aktarırlar. Her iki tasarım avantajları, rijitlik, dayanım ve şantiyedeki uygulama teknikleridir.

Üretim için yapılan testlerde, lokal normal kesme kuvveti, ezilme yada kesitlerde lokal deformasyonlar gibi sorunlara dikkat edilmelidir. Lokal burkulma, kesme yada tekerlek yükleri altında tabakalar arasındaki ayrışma, toplam yapının rijitliğine zarar vermektedir (Gangarao ve Harik, 1999; Bakis vd., 2002).

Öngerilmeli kablolar ise tek doğrultulu LP elemanlara örnek verilebilecek diğeri bir köprü üst yapı elemanıdır. Karbon lif takviyeli öngerilmeli kablolar, geleneksel malzeme ile kullanıldığı zaman, maliyet uygun olur (Grace, 1997; Benjamin, 1998). Kablo ve öngerilme çubukları, sürekli yük etkisi altında zamanla şekil değişimi yapar. Cam lifler için kopma uzaması değerlendirmeye alınması gereken önemli bir kriterdir. Yatay ve düşey doğrultularda yük etki ettirildiği zaman malzemede uzama meydana gelmektedir. Yüksek elastisite modülü uzun açıklıkların geçilmesine imkân sağlar. Aynı zamanda termal etkiler ve korozyona karşı direnç de LP kabloların, uzun açıklıklı köprülerde kullanımına imkân vermektedir.

1.7.3. Karma LP/ Beton Kesitler

Donatılı bir kirişte betonun görevi, tarafsız eksenin altındaki bölgede çeliğe öngerilme vermek ve çeliği çevresel koşullara karşı korumaktır. Hâlbuki beton çeliğe çok az bir çekme dayanımı sağlar. Bu nedenle betonda ince çatlamlar meydana gelir. Çevresel etkilerin bu noktalarda çeliğe nüfuz eder. Bu nedenle, kompozit sistemler bu durumlarda önem kazanmıştır. LP kompozitlerin beton ile karma yapı formları olarak kullanıldığı en etkili yerler, yük taşıyıcı elemanlar ve beton için koruyucu önlemlerin gerektiği yerlerdir (Mirmiran, 2001). Karma sistemlerin bazı avantajları aşağıda belirtilmiştir.

- LP kompozit korozyona karşı dirençlidir. Bu sayede beton çevresel koşullardan etkilenemez.
- Tamamen LP uygulaması maliyeti karma sistem maliyetine göre daha yüksektir. Bu nedenle karma sistem uygulamasında maliyetin düşmesi sağlanabilir.
- Boyuna doğrultularda beton her zaman basınca çalışır. Betonun çekmeye karşı dayanımı çok düşüktür. LP karma tüp tasarımlarda ölü ağırlık biraz daha hafif olacağı için, ekstra yüklemelere uygunluk sağlanabilir.
- Köprü tabliyelerinde, lokal yükün etki ettiği noktalarda, deformasyonlar, tamamı kompozit sistemlerde daha fazla görülmektedir. Beton tabakanın üst bölgede uygulanması halinde deformasyonların azaldığı ifade edilmiştir.
- Üst bölgede etkili beton yüzeyi kullanımı ile rijitlik de sağlanır.
- Karma sistemlerde yamuk şekilli kesitler kullanımı ile aerodinamik stabilite sağlanabilir ve kesitler arasında yük transferi sayesinde, burkulma rijitliği sağlanabilir.

1.8. Asma Köprüler

Köprüler, insanoğlunun varoluşundan beri hayatını kolaylaştıran en önemli mühendislik yapılarından biridir. Eski zamanlardan beri köprüler, akarsuları, derin vadileri, hatta kıtaları geçmeyi sağlayarak insanları birbirlerine kavuşturmaktadır. Eski zamanlarda

yapılan köprüler dar, küçük açıklıklı ve hafif yükleri taşıyabilecek nitelikte, kâgir ve ahşap malzemelerden yapılırken; günümüzde bu köprülerin yerini betonarme ve çelik köprüler almıştır. Bu amaçla günümüzde geniş, büyük açıklıklı ve ağır yükleri taşıyabilecek betonarme ve çelik köprüler inşa edilmektedir.

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

1.8.1. Asma Köprülerin Temel Özellikleri ve Elemanları

Asma köprüler büyük açıklıkların geçilmesi için kullanılan, benzerlerinden daha ekonomik yapılardır. Kenar açıklıklar zemin üzerinde ve zeminle kenar açıklık tabliyeleri arasındaki mesafe az ise kenar açıklıklar asma yapılamayıp ekonomik açıdan, zemine oturan ayaklar üzerine inşa edilerek tek bir asılı açıklıktan oluşabilirler. Büyük açıklıkların geçilmesinde orta ve kenar açıklıklar asılı olarak yapılabilir. Daha çok büyük açıklıkların geçilmesinde ise dört veya daha büyük açıklıklı olarak tasarlanabilirler (Pugsley, 1968).

Asma köprüler kule, ankraj, kablo, askı ve tabliye gibi ana elemanlardan oluşmaktadır. Kulelere mesnet oluşturan temellerde su içerisinde yapılması gerektiğinde, pahalı ve zor olduğu için önem kazanırlar. Bu yüzden zorunlu olmadıkça çok açıklıklı asma köprü yapımından kaçınılır (Bulson vd, 1983).

Asma köprülerdeki sehim, köprü davranışını etkilemektedir. Sehim azaldıkça ana kablolardaki çekme kuvveti artar ve buna bağlı olarak da köprünün rijitliği artar. Dolayısıyla ankraj bloklarına gelen çekme kuvveti de büyük olur. Ana kablolardaki sehim açıklığın 1/9 – 1/11'i kadar olmalıdır (Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000). Bazı özel durumlarda açıklığın 1/13'ü oranında da alınabileceği, fakat bundan küçük seçilmesinin uygun olmayacağı belirtilmektedir (Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000).

1.8.1.1. Kuleler

Asma köprü kuleleri, tabliye yüzeyinden daha yüksekte inşa edilen betonarme veya çelik yapılardır. Kuleler, ana kabloların orta ve kenar açıklıkta daima eşit olmayan çekme kuvvetleri etkisindedirler. Ancak kulelerin devrilmesini engellemek için, çekme kuvvetlerinin yatay bileşenlerinin eşit olmasına özen gösterilir. Kuleleri meydana getiren dikmeler kutu kesitli olup genelde içleri boştur. Yol seviyesine ve bakım onarım için mesnet semerlerine çıkmayı sağlamak için kulelerde asansör tertibatı vardır. Her bir kule iki ayaktan oluşur ve bu ayaklar yatay veya diyagonal kirişlerle birbirine bağlanır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000).

1.8.1.2. Ankrajlar

Ankrajlar, kabloların gelen kuvvetleri zemine aktarırlar. Genelde ağırlık akraji ve tünel ankraji olmak üzere iki tip ankraj kullanılmaktadır. Ankrajların projelendirilmesindeki asıl problem, ankrajlardan zemine iletilen büyük yatay kuvvetlerin oluşturduğu kaymaya karşı bir güvenlik faktörünün temin edilmesidir. Kablodan ankraja gelen çekme kuvvetlerinin düşey bileşeni ankraj ağırlığıyla, yatay bileşeni ise zemin yüzeyinde oluşturulan kademelerle zemin kohezyonundan faydalanılmak suretiyle, zemin ile ankraj arasındaki sürtünmeyi artırarak karşılanır.

Ankraj kabloları yapı stabilitesini sağlamalıdır. Blokların çözümü zemin cinsine bağlı olarak değişebilir. Zemin kayalıksa ankraj bloklarının inşasından vazgeçilir. Beton kütleyle doldurulan galeriler açılır. Galeriler alt kısımlarından emniyeti sağlamak için betonarme kirişler ile birbirlerine bağlanır (Adanur S., 1997).

1.8.1.3. Kablolar

Ana kablolar, tabliyedeki yükleri askılar aracılığı ile alıp, kule ve ankraj blokları vasıtasıyla zemine aktarır. Ana kablolar genellikle 5 mm çapında ve 160-180 kg/mm² dayanımı olan galvanizli çelik tellerden oluşturulmaktadır. Ana kablolar oluşturulduktan sonra dış etkilerden korunabilmesi için üzerleri yumuşak galvanizli telle sarıldıktan sonra

astarlanıp boyanmaktadır (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983; Chen, 1999; Chen ve Duan, 2000).

1.8.1.4. Askılar

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

1.8.1.5. Tabliye

Tabliye, hareketli araç yüklerini yayan ve taşıyan boyuna yapılardır. Yanal yönde de kirişler gibi davranır ve yapının aerodinamik stabilitesini sağlarlar. Tabliye döşemesi ya Robinson dalı şeklinde ya da ortotrop plak şeklinde inşa edilir.

Tabliye mesnet bağlantıları aşağıdaki belirtilen yerdeğiştirmelere imkân vermelidir; (Pugsley, 1968; Celasun, 1981; Bulson vd., 1983)

- a) Isıl değişimlerden oluşan uzamalardan meydana gelen ötelemelere,
- b) Hareketli yüklerden oluşan deformasyonlardan meydana gelen mesnet çizgisine paralel yatay bir eksen etrafındaki dönmelere,
- c) Rüzgârdan oluşan deformasyonlar sebebi ile düşey bir eksen etrafındaki dönmelere,

1.9. Asma Köprülerin Dinamik Analiz Formülasyonu

1.9.1. Zaman Tanım Alanında Lineer Dinamik Hareket Denklemleri

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

Atalet ve sönüm etkileri gibi yüklemenin zaman faktörlerinin dikkate alınması önemlidir (ANSYS, 1996). Bir sistemin dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (Şimşek E., 2010).

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} \quad (1.4)$$

Bu denklemde;

$[M]$; sistemin kütle matrisi,

$[C]$; sistemin sönüm matrisi,

$[K]$; sistemin rijitlik matrisi,

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

$\{\dot{U}\}$; sistemin hız vektörü,

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

$\{P\}$; dış yük vektörü

ifade etmektedir.

1.9.1.1. Doğal Frekans ve Modların Hesabı

Sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için (1.4)'deki hareket denklemi

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (1.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin çözümü

$$\{U\} = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (1.6)$$

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

$$\{U\} = \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.7)$$

şeklinde yazılabilir. (1.7) denkleminde

$$\{\ddot{U}\} = -\omega_n^2 \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.8)$$

elde edilir. (1.7) ve (1.8) denklemleri (1.5) denkleminde yerine yazılırsa

$$-\omega_n^2 [M] \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) + [K] \{\phi\} \cos(\omega_n t - \alpha) = \{0\} \quad (1.9)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirse;

$$([K] - \omega_n^2 [M]) \{\phi\} = \{0\} \quad (1.10)$$

“Karakteristik Özdeğer Denklemi” elde edilir. Bu denklemden titreşim elde edilebilmesi için $\{\phi\}$ ’nin sıfırdan farklı olması gerekir. Sıfırdan farklı bir matris ile bir vektörün çarpımlarının sıfır olmasının tek yolu, matrisin tersinin bulunamaması, yani bunun tekil bir matris olmasıdır. Bir matrisin tekil olabilmesi için ise, determinantının sıfır olması gerekmektedir. Buna göre;

$$|[K] - \omega_n^2 [M]| = 0 \quad (1.11)$$

elde edilir. Burada $\omega_n^2 = \lambda$ alınırsa (1.11) denklemleri

$$|[K] - \lambda [M]| = 0 \quad (1.12)$$

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (1.15)$$

Maxwell-Betti teoremi ile kolayca elde edilebilen bu bağıntı “Titreşim Modlarının Ortogonalitesi” olarak adlandırılmaktadır. (1.15) denklemi rijitlik ve sönüm matrisi içinde geçerlidir.

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (1.16)$$

$$\{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_j = 0 \quad i \neq j \quad (1.17)$$

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

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = 1 \quad (1.18)$$

şeklindedir. Normleştirilmiş modlar;

$$\Phi_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\sqrt{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j}} \quad (1.19)$$

şeklinde elde edilir. Böylece modlar normleştirilir.

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

j. mod vektörü

j. normalleştirilmiş mod vektörü

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

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

Normalleştirme işleminin doğruluğu

$$[\Phi]^T [M][\Phi] = [I] \quad (1.20)$$

bağıntısı ile kontrol edilebilir. Burada $[I]$ birim matrisidir.

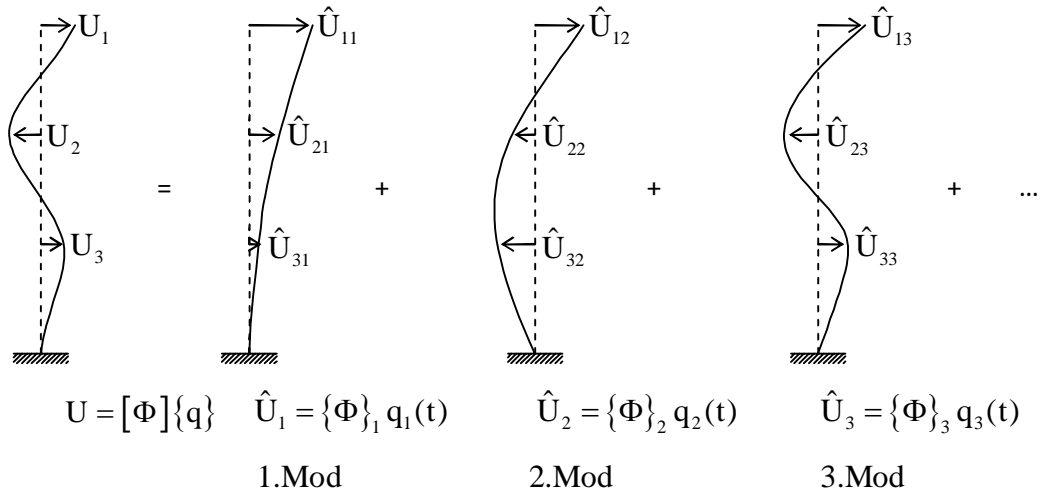
1.9.1.2. Mod Süperpozisyon Yöntemi

Mod süperpozisyon yöntemi, çok serbestlik dereceli ve çok modlu bir sistemi bir dizi eşdeğer tek modlu sistemlerin süperpozisyonu şeklinde kabul etmektedir. Çok modlu sistem, sanki her modu tek dereceli bir sistemmiş gibi kabul edilir ve her moddaki davranışlar uygun bir oranda süperpoze edilerek toplam davranış elde edilir. Serbestlik derecesi kadar mod ve her mod için bir özel periyod ve bir yerdeğiştirme vektörü vardır. Her modun hangi oranda davranışa etkidiği katkı oranı ile belirlenir. Mod süperpozisyon yönteminde;

(1.4) denklemi ile verilen dinamik hareket denkleminin çözümünün

$$\{U\} = [\Phi]\{q\} \quad (1.21)$$

şeklinde olduğunu kabul edilebilir. Burada; $[\Phi]$ normalleştirilmiş modal matris, $\{q\}$ modal koordinatlardır. (1.21) denklemi ile verilen çözüm, Şekil 1.6'daki gibi düşünülebilir.



Şekil 1.6. Mod süperpozisyon yöntemi

(1.21) denklemi açık olarak yazılırsa aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\{U\} = \{\Phi\}_1 q_1(t) + \{\Phi\}_2 q_2(t) + \{\Phi\}_3 q_3(t) + \dots + \{\Phi\}_n q_n(t) = \sum_{r=1}^n \{\Phi\}_r q_r(t) \quad (1.22a)$$

veya

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{21} \\ \Phi_{31} \\ \vdots \\ \Phi_{n1} \end{Bmatrix} q_1(t) + \begin{Bmatrix} \Phi_{12} \\ \Phi_{22} \\ \Phi_{32} \\ \vdots \\ \Phi_{n2} \end{Bmatrix} q_2(t) + \begin{Bmatrix} \Phi_{13} \\ \Phi_{23} \\ \Phi_{33} \\ \vdots \\ \Phi_{n3} \end{Bmatrix} q_3(t) + \dots + \begin{Bmatrix} \Phi_{1n} \\ \Phi_{2n} \\ \Phi_{3n} \\ \vdots \\ \Phi_{nn} \end{Bmatrix} q_n(t) \quad (1.22b)$$

veya matris formda

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{U}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \cdots & \Phi_{1r} & \cdots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \cdots & \Phi_{2r} & \cdots & \Phi_{2n} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} & \cdots & \Phi_{3r} & \cdots & \Phi_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \Phi_{n3} & \cdots & \Phi_{nr} & \cdots & \Phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{q}_n \end{Bmatrix} \quad (1.22c)$$

Normalleştirilmiş modal matris

Modal koordinatlar

(1.21) nolu denklem ve onun birinci ve ikinci türevleri (1.4) nolu denklemde yerine yazılırsa;

$$[\mathbf{M}][\Phi]\{\ddot{\mathbf{q}}\} + [\mathbf{C}][\Phi]\{\dot{\mathbf{q}}\} + [\mathbf{K}][\Phi]\{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{P}\} \quad (1.23)$$

elde edilir. (1.23) denkleminin her iki tarafı $\{\Phi\}_r^T$ ile çarpılırsa;

$$\{\Phi\}_r^T [\mathbf{M}][\Phi]\{\ddot{\mathbf{q}}\} + \{\Phi\}_r^T [\mathbf{C}][\Phi]\{\dot{\mathbf{q}}\} + \{\Phi\}_r^T [\mathbf{K}][\Phi]\{\mathbf{q}\} = \{\Phi\}_r^T \{\mathbf{P}\} \quad (1.24)$$

elde edilir. (1.15), (1.16) ve (1.17) denklemleriyle verilen titreşim modlarının ortogonalite şartı dikkate alınır (1.24) denkleminin şu hale gelir;

$$\{\Phi\}_r^T [\mathbf{M}]\{\Phi\}_r \ddot{\mathbf{q}}_r(t) + \{\Phi\}_r^T [\mathbf{C}]\{\Phi\}_r \dot{\mathbf{q}}_r(t) + \{\Phi\}_r^T [\mathbf{K}]\{\Phi\}_r \mathbf{q}_r(t) = \{\Phi\}_r^T \{\mathbf{P}\} \quad (1.25)$$

veya

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r(t) + \mathbf{C}_r \dot{\mathbf{q}}_r(t) + \mathbf{K}_r \mathbf{q}_r(t) = \mathbf{P}_r \quad (1.26)$$

Burada

$\mathbf{M}_r = \{\Phi\}_r^T [\mathbf{M}]\{\Phi\}_r$; r. Genelleştirilmiş kütle,

$\mathbf{C}_r = \{\Phi\}_r^T [\mathbf{C}]\{\Phi\}_r$; r. Genelleştirilmiş sönüm,

$\mathbf{K}_r = \{\Phi\}_r^T [\mathbf{K}] \{\Phi\}_r$; r. Genelleştirilmiş rijitlik,

$\mathbf{P}_r = \{\Phi\}_r^T \{\mathbf{P}\}$; r. Genelleştirilmiş kuvvet olarak adlandırılmaktadır.

(1.23) denklemi, açısal frekansı $\omega_r = \sqrt{\frac{\mathbf{K}_r}{\mathbf{M}_r}}$ olan TSD bir sistemin hareket denklemi

haline gelir. (1.23) denkleminin her iki tarafı \mathbf{M}_r 'ye bölünecek olursa

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_r \omega_r \dot{q}_r(t) + \omega_r^2 q_r(t) = \frac{\mathbf{P}_r}{\mathbf{M}_r} \quad (1.27)$$

elde edilir. $\{\Phi\}_r$ normalleştirilmiş mod olduğuna göre $\{\Phi\}_r^T [\mathbf{M}] \{\Phi\}_r = 1$ demektir. Yani $\mathbf{M}_r = 1$ olur. Buna göre (1.27) denklemi

$$\ddot{q}_r(t) + 2\xi_r \omega_r \dot{q}_r(t) + \omega_r^2 q_r(t) = \mathbf{P}_r \quad (1.28)$$

haline gelir. Burada; ω_r r. titreşim moduna karşılık gelen açısal frekans ve $q_r(t)$; r. titreşim moduna ait modal koordinatlardır.

Özetlenecek olursa; n serbestlik dereceli bir sistemin n tane açısal frekansı (ω_n) mevcuttur. Her bir açısal frekans için (1.28) denklemi çözülerek $q(t)$ modal koordinatlar elde edilir. Daha sonra (1.21) denklemi yardımıyla genel çözüm elde edilir. Yani;

- ω_1 için $\{\Phi\}_1$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_1(t) + 2\xi_1 \omega_1 \dot{q}_1(t) + \omega_1^2 q_1(t) = \mathbf{P}_1$ denkleminin çözümünden $q_1(t)$ elde edilir.
- ω_2 için $\{\Phi\}_2$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_2(t) + 2\xi_2 \omega_2 \dot{q}_2(t) + \omega_2^2 q_2(t) = \mathbf{P}_2$ denkleminin çözümünden $q_2(t)$ elde edilir.
- ω_3 için $\{\Phi\}_3$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_3(t) + 2\xi_3 \omega_3 \dot{q}_3(t) + \omega_3^2 q_3(t) = \mathbf{P}_3$ denkleminin çözümünden $q_3(t)$ elde edilir.
- \vdots
- ω_n için $\{\Phi\}_n$ elde edilir. Buna göre $\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \mathbf{P}_n$ denkleminin çözümünden $q_n(t)$ elde edilir.

Modal koordinatlar bulunduktan sonra;

$$U_1(t) = \Phi_{11}q_1(t) + \Phi_{12}q_2(t) + \Phi_{13}q_3(t) + \cdots + \Phi_{1n}q_n(t)$$

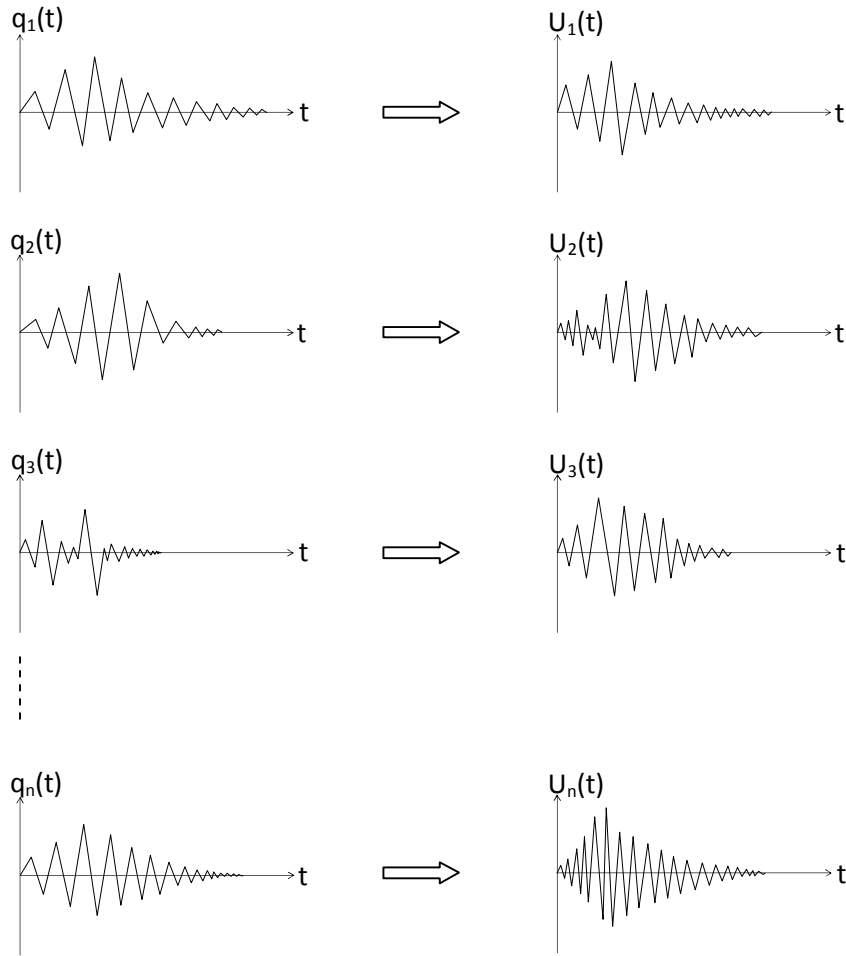
$$U_2(t) = \Phi_{21}q_1(t) + \Phi_{22}q_2(t) + \Phi_{23}q_3(t) + \cdots + \Phi_{2n}q_n(t)$$

$$U_3(t) = \Phi_{31}q_1(t) + \Phi_{32}q_2(t) + \Phi_{33}q_3(t) + \cdots + \Phi_{3n}q_n(t)$$

⋮

$$U_n(t) = \Phi_{n1}q_1(t) + \Phi_{n2}q_2(t) + \Phi_{n3}q_3(t) + \cdots + \Phi_{nn}q_n(t)$$

veya kısaca (1.21) denklemiyle, yani $\{U\} = [\Phi]\{q\}$, genel çözüm elde edilir. Bu çözüm şematik olarak Şekil 1.7' de verilmiştir.



Şekil 1.7. Mod süperpozisyon yönteminde modal koordinatlar ve çözüm

1.10. Zaman Tanım Alanında Geometrik Olarak Lineer Olmayan Dinamik Analiz

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

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

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

Eğik kablo veya asma köprülerin statik ve dinamik davranışı ağırlık rijitliklerinden dolayı geometrik olarak lineer olmamaktadır. Fakat dinamik davranış genellikle rijitliğin, ölü yük statik şekli gibi lineerleştirilerek basit bir şekilde incelenebilir. Fakat lineer analiz ile bazı salınımlar için doğru sonuçlar elde edilemeyebilir (Brownjohn vd., 1994). Bunlardan bazıları şunlardır:

- 1) Çok ağır araçların tabliyeden geçişi,
- 2) Şiddetli rüzgârlardaki aerodinamik kararsızlık ve şok etkisi,
- 3) Depremden dolayı mesnetlerin yerdeğiştirmesi.

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

Lineer olmayan elemanlara sahip lineer elastik bir yapının dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir (SAP2000, 1997);

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K_L]\{U\} + \{P_N\} = \{P\} \quad (1.29)$$

Bu denklemde;

$[M]$; sistemin kütle matrisi,

$[C]$; sistemin sönüm matrisi,

$[K_L]$; lineer olmayan bağlantı elemanları hariç lineer elastik elemanların rijitlik matrisi,

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

$\{\dot{U}\}$; sistemin hız vektörü,

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

$\{P\}$; dış yük vektörüdür.

$\{P_N\}$; lineer olmayan bağlantı elemanlarındaki lineer olmayan serbestlik derecesinden doğan yük vektörüdür.

Lineer olmayan elemanların her serbestlik derecesi için bir lineer efektif rijitlik tanımlanmıştır. Bu rijitlik değeri keyfi bir değerdir ancak genellikle “0” ile maksimum lineer olmayan rijitlik arasında değişmektedir. Buna göre (1.29) denklemi tekrar yazılacak olursa;

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} - (\{P_N\} - [K_N]\{U\}) \quad (1.30)$$

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

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışması, tamamı lifli polimer kompozit malzemedan yapılmış asma köprülerin statik ve dinamik analizlerinin incelenmesi üzerinedir. Kompozit malzemelerin özellikle son zamanlarda; hafifliği, korozyona karşı direnci, rijitlik oranlarına göre yüksek dayanımları, elastisite modülü özellikleri ve kolay uygulanabilir olması gibi özelliklerinden dolayı kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ayrıca çelik malzeme kullanılarak inşa edilmiş gerçek köprü modelinin analizleri de gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Boğaziçi Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılmış, SAP2000 programı yardımı ile analizleri elde edilmiştir.

2.2. Boğaziçi Köprüsü

2.2.1. Boğaziçi Köprüsü'nün Geometrik Özellikleri

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

Boğaziçi Köprüsünün ana açıklığı 1074 m, kenar açıklıkları Avrupa yakasında 231 m, Asya yakasında 255 m'dir (Şekil 2.1). Kenar açıklık tabliyeleri kablolarla asılı olmayıp, orta ayak temellerinin üzerine yerleştirilen çelik kolonlar tarafından taşınmaktadır. Ana kablolar arasındaki mesafe 28 m'dir. Her biri 3 şerit olan, biri gidiş diğeri dönüş toplam iki yolu bulunmaktadır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

165 m yüksekliğinde olan çelik kulelerin her biri, birbirine üçer adet yatay portal kirişle bağlanmış ikişer ayağa sahiptir. Kule kesit detayları Şekil 2.2' de verilmiştir. Tabanda 5.20x7.00 m, tepede ise 3.00x7.00m boyutunda olan kule ayakları, 10 kademe inşa edilmiştir. Her kademe 4 adet çelik panelin bir araya getirilip bulonlarla birleştirilmesiyle, içi boş bir kutu kesit formu elde edilmiştir. Çelik panellerin ilk kademesi

6.5 m diğer kademeleri ise 18-19 m yüksekliğindedir. Kule ayaklarının iç boşluklarında tabliye kotuna kadar 18 kişi kapasiteli yolcu asansörleri, kulelerin güney ayaklarında ise tabliye kotundan kule tepesine kadar küçük bakım asansörleri bulunmaktadır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Tabliyeden gelen yükleri kule ve ankrajlar vasıtasıyla zemine aktaran ana kablolar 5 mm çapında 160 kg/ mm² lik dayanıma sahip galvanizli çelik tellerin, havai çekim metodu ile montajı suretiyle oluşturulmuştur. Her bir kablonun ana açıklık kısmında 548 adet çelik telden oluşan 19 adet ana büklüm bulunmaktadır. Bu şekilde, her bir kaborda, kuleler arasındaki kesimde 10412 adet paralel tel mevcuttur. Kenar açıklık ana kablolarında ise ayrıca her biri 192 adet çelik telden oluşan 4 ilave büklüm daha bulunmaktadır. Böylece kenar açıklıklardaki toplam tel sayısı 11180'dir. Şekil 2.3' de kablo detayları verilmiştir. Ana kabloların dış etkilerden korunabilmesi için üzerleri önce 3.5 mm kalınlığındaki yumuşak galvanize telle sarılmış olarak iki kat astar yapılmış ve iki kat da boya ile boyanmıştır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

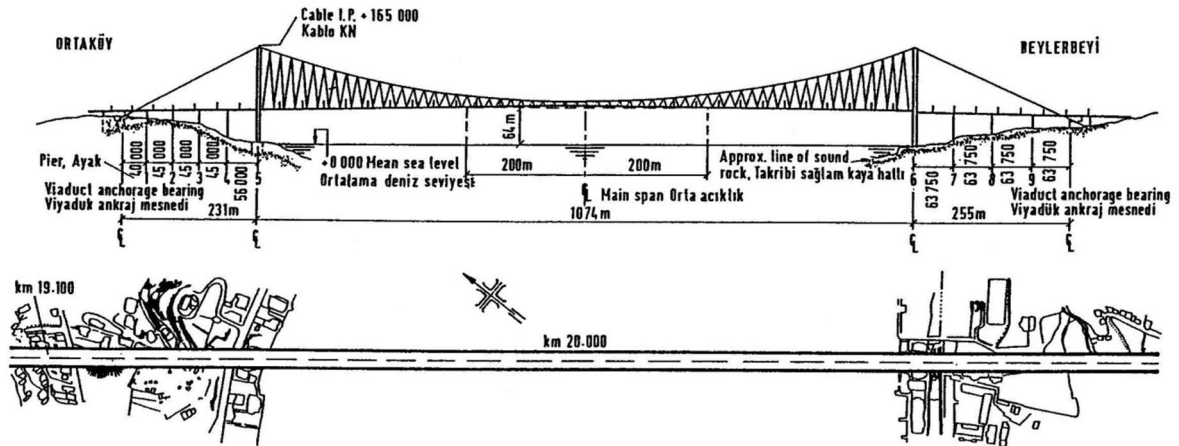
Şekil 2.4' de kesiti görülen aerodinamik şekle sahip tabliye, içi boş kutu kesitli 60 adet tabliye ünitesinin birbirine kaynaklanmasıyla meydana gelmiştir. Her biri 140 ton ağırlığında olan 60 adet ünitenin montajına, açıklığın ortasından başlanmış ve iki yana doğru simetrik olarak devam edilmiştir. Aerodinamik şekle sahip tabliye, geleneksel kafes sistem tabliyeden daha hafif ve rüzgar etkisini de 1/3 oranında azaltmaktadır. Tabliye düzeyinde 17900 m yarıçaplı bir kurb üzerinde bulunmaktadır. Yapım işleminin tamamlanmasından sonra tabliye raspa ile temizlenerek çelik üst yüzeyine önce 3mm kalınlığında kauçuklu bitüm tabakası konmuş, daha sonra da 35 mm kalınlığında mastik asfalt serilerek elle masterlanmak suretiyle tabliye kaplaması oluşturulmuştur. Köprünün iki yanındaki yaya yollarında ise, çift kat kauçuklu bitüm uygulanmıştır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Kuleler ve ankrajlar arasında yer alan yaklaşım viyadükleri (kenar açıklık tabliyeleri) kompozit sistemlerle projelendirilmiş köprülerdir. Orta ayak temellerinin üzerine yerleştirilen 1.5 m çapındaki çelik kolonlar, kutu kesitli içi boş çelik taşıyıcı ana kirişlere mesnet oluşturmaktadır. Detayı Şekil 2.5' de verilmiştir. Taşıyıcı ana kirişler 15 m'lik parçalar halinde hazırlanarak, ankrajlardan başlayarak kuleye doğru montaj edilmişlerdir. Taşıyıcı ana kirişler üzerine 3 m aralıklarla enine (I) kirişleri yerleştirilmiş olup, bunların uçları tabliyenin yaya yolu altında konsol olarak uzanmaktadır. Bu çelik yapının üzerinde ise, 19 cm'lik bir betonarme döşeme bulunmaktadır. Yaklaşım

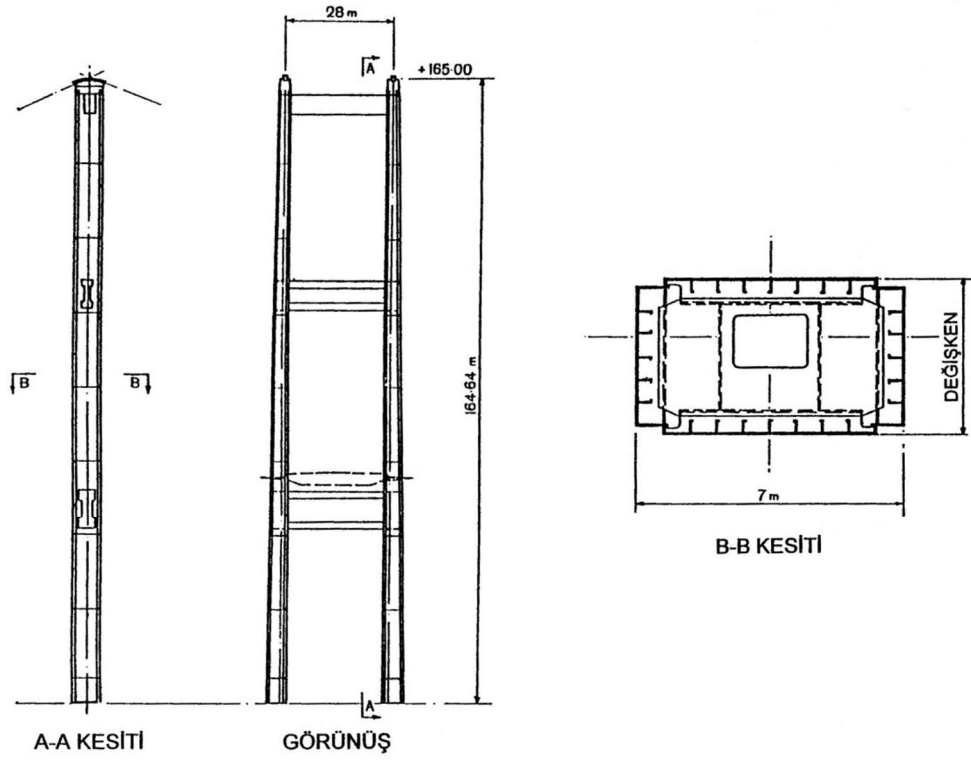
viyadüklerinin betonarme döşemesinin üzerinde de tabliyede olduğu gibi, toplam 38 mm kalınlığında mastik asfalt yer almaktadır (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

Ortaköy kulesi temel kazıları çelik palplanj batardolar içinde 17-24 m derinliğe kadar inmiştir. Diabaz ve sert Grovak kayaya oturtulan temeller 18m çapında ve silindirik birer kütle betondur. Beylerbeyi kulesi temelleri hafriyatı ise sağlam kayanın yüzeye yakınlığı nedeniyle batardo yapılmasını gerektirmemiştir. 5-12 m derinliğe kadar inen temel kazıları dikdörtgen olarak açılmış ve planda 15x19 m'lik beton temeller inşa edilmiştir. Her bir kuleye ait temellerin zemin yüzeyleri deniz seviyesinden 3 m yüksekliktedir. Kule temel detayları Şekil 2.6' da verilmiştir. (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).

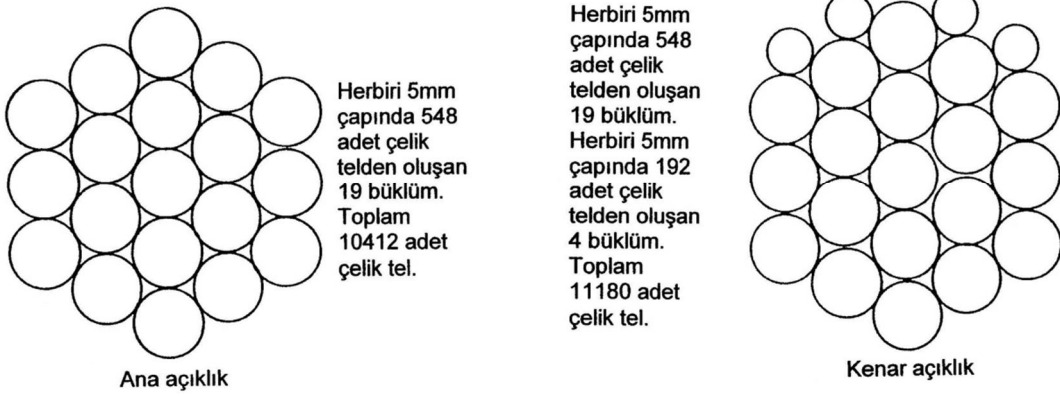
Ortaköy ve Beylerbeyi'nde ana kabloyu sabitleştiren ve kablodaki çekme kuvvetini sağlam kayaya aktaran beton ankraj bloklarının herbiri iki kablo ankraj odasından oluşmaktadır. Blokların yaklaşık 2/3'ü toprak içinde olmak üzere derinlikleri kademeli olarak 40 m'ye kadar inmekte olup plan ölçüleri 35x40 m'dir. Odalar arkada betonarme bir perde ile birleştirilerek ortada çekmeye karşı bir kaya bloğunun ilave direncinden de yararlanılmaktadır (Şekil 2.7) (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983).



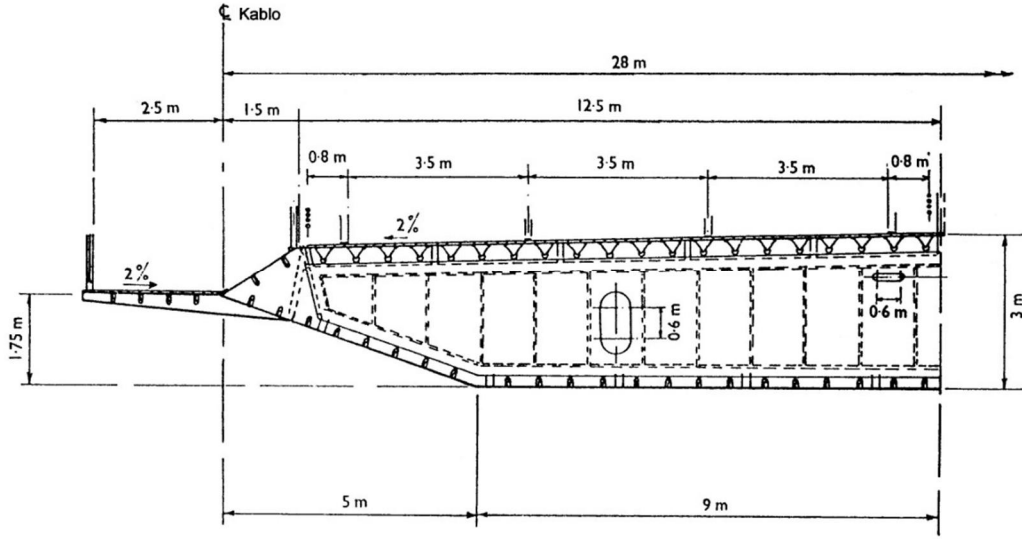
Şekil 2.1. Boğaziçi Köprüsü genel görünüşü



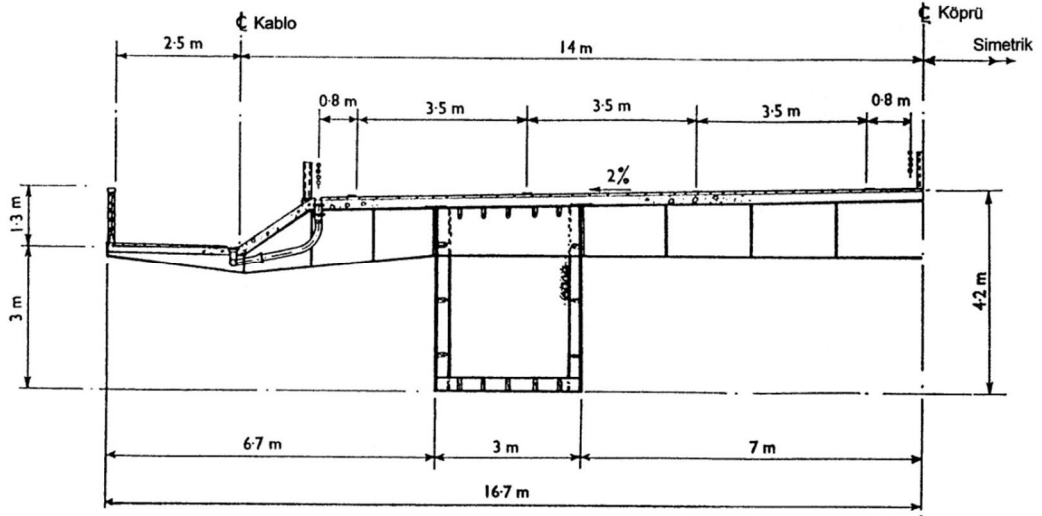
Şekil 2.2. Boğaziçi Köprüsü kule görünüşü



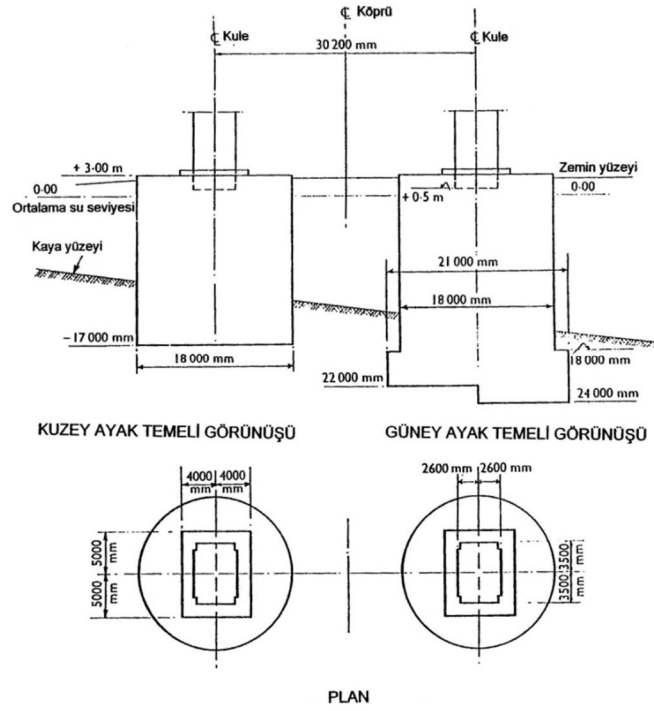
Şekil 2.3. Boğaziçi Köprüsü kablo kesitleri



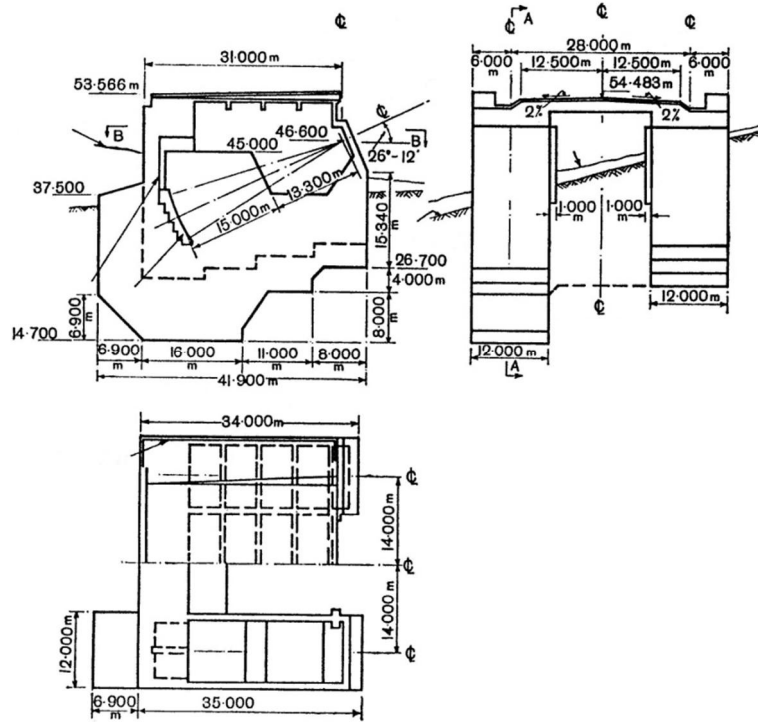
Şekil 2.4. Boğaziçi Köprüsü tabliye kesiti



Şekil 2.5. Boğaziçi Köprüsü viyadük kesiti



Şekil 2.6. Boğaziçi Köprüsü kule ayak temelleri

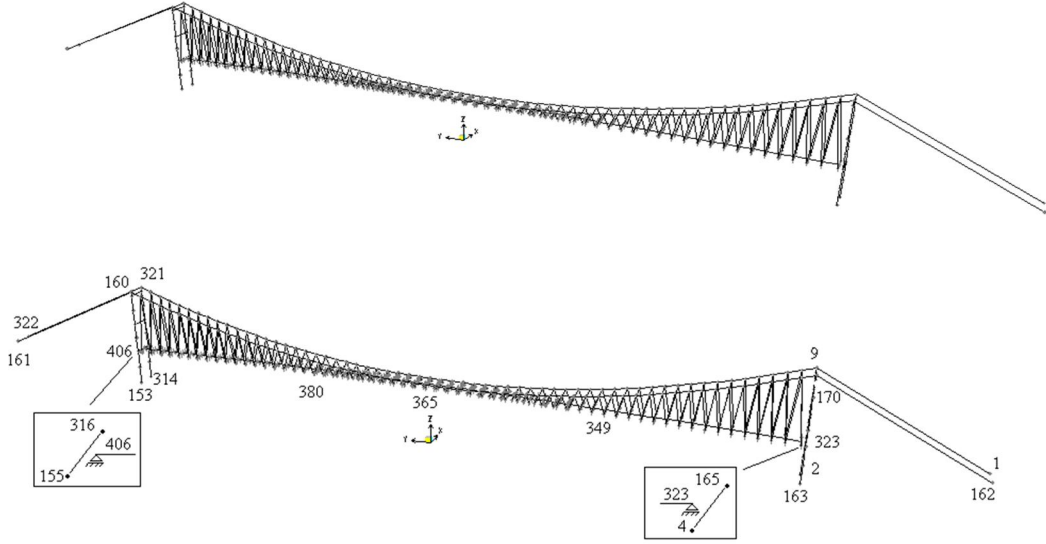


Şekil 2.7. Boğaziçi Köprüsü ankraj kesiti

2.2.2. Boğaziçi Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Boğaziçi Köprüsü'nün yapısal davranışını belirlemek için köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur. Analiz sırasında dikkate alınan sonlu elemanlar modeli, Şekil 2.8 'de verilmektedir. Aynı şekilde, düğüm noktası numaralandırılması da verilmiştir.

Boğaziçi Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli 322 düğüm noktası, 241 çerçeve eleman ve 236 kafes elemandan oluşmaktadır. 241 çerçeve elemanın 83'ü tabliyeyi, 124'ü kabloları ve 34'ü kuleleri temsil etmektedir. Askı kabloları, kafes eleman olarak tanımlanmıştır. Her bir kule 7 elemandan oluşmaktadır. Kenar açıklıklardaki tabliyeler, kablolarla asılı olmayıp, zemine inşa edilmiş temeller üzerine oturmaktadır. Kulelere oturan ve kule-tabliye bağlantısını sağlayan elemanlar da kablolarla asılı değildir. Tabliye her iki ucundan da kayıcı mesnetlere oturtulmuştur. Seçilen sonlu eleman modelinde, mesnetlenme koşullarına bağlı olarak 1372 serbestlik derecesi mevcuttur.



Şekil 2.8. Boğaziçi köprüsü üç boyutlu sonlu elemanlar modeli

Tablo 2.1 Boğaziçi Köprüsü ile ilgili bazı teknik bilgiler

Sistem Özellikleri	
Toplam Uzunluk	1560 m
Orta Açıklık	1074 m
Ortaköy Viyadüğü	231 m
Beylerbeyi Viyadüğü	255 m
Köprü Genişliği	33.40 m
Orta Açıklık Deniz Yüksekliği	64 m
Kulelerin Yüksekliği	165 m
Ana Sistemde Yükler	
Bir Kabloya gelen	7.27 ton/m
Ana Sistemde hareketli Yük	1.33 ton/m
Rüzgar Hızı	45 m/s
Deprem İvmesi	0.1 g
Ana Kablo Sehimini	93 m
Ana Kablodaki Çekme	15400 ton/kablo
Ana Kablo Çapı	58 cm
Bazı İmalat Miktarları	
Kazı	63000 m ³
Beton	71000 m ³
Betonarme Çelik	4000 ton
Yapı Çeliği	17000 ton
Kablo Çeliği	6000 ton
Kesin Hakedişe Göre Köprü Yapımı	
Maliyeti	23.213.666 ABD Doları

2.2.3. Boğaziçi Köprüsü'nün Statik ve Dinamik Davranışına LP Kompozitlerin Etkisinin Belirlenmesi

Boğaziçi Köprüsü'nün statik ve dinamik davranışlarında, lifli polimer malzemelerin etkisini belirlemek amacı ile geleneksel çelik malzemesinin kullanıldığı modelde, eş değer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemleri ile belirlenen kesit alanları ve atalet kuvvetleri kullanılmış ve yöntemlerde, lifli polimer malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemlerine göre, kesit alanları belirlenmiştir (Cheng, 1999).

Geleneksel çelik malzemesinin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü'nün elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri Tablo 2.2' de verilmektedir (Dumanoğlu ve Severn, 1985).

Lifli polimer kompozit malzeme özellikleri, tabliye ve ana kule için, Tablo 2.3'de verilmiştir (Meiarashi vd.,2002). Ana kablo ve askı kabloları için lifli polimer malzeme özellikleri de aynı tabloda belirtilmiştir (Zhang, 2008). Geleneksel çelik özelliklerinin de verildiği tabloya bağlı olarak, eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemlerine göre hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 2.2 Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit ve malzeme özellikleri

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

Tablo 2.3. Boğaziçi Köprüsü için kullanılacak geleneksel çelik ve lifli polimer malzemelere ait özellikler

Eleman	Değişken	LP	Çelik
Tabliye	İzin verilebilir gerilme dayanımı (Mpa)	102	137.3
	Elastisite Modülü (kN/m ²)	64x10 ⁶	205 x10 ⁶
Kule	İzin verilebilir gerilme dayanımı (Mpa)	147	137.3
	Elastisite Modülü (kN/m ²)	122x10 ⁶	205 x10 ⁶
Ana Kablolar	İzin verilebilir gerilme dayanımı (Mpa)	980	980
	Elastisite Modülü (kN/m ²)	160x10 ⁶	193 x10 ⁶
Askı Kabloları	İzin verilebilir gerilme dayanımı (Mpa)	980	980
	Elastisite Modülü (kN/m ²)	160x10 ⁶	162 x10 ⁶

2.2.3.1. Eşdeğer Rijitlik Yöntemi

Eşdeğer rijitlik yönteminde;

$$E_{\text{Çelik}} \times A_{\text{Çelik}} = E_{\text{LP}} \times A_{\text{LP}} \quad (2.1)$$

formülasyonu kullanılmıştır (Cheng, 1999). (2.1) denkleminde göre; $E_{\text{Çelik}}$ ve E_{LP} sırası ile çelik ve lifli polimer malzeme için elastisite modülünü, $A_{\text{Çelik}}$ ve A_{LP} ise, sırası ile çelik ve lifli polimer malzemenin kesit alanlarını ifade etmektedir. (2.1) eşitliğine göre, elemanlar için ayrı ayrı LP alanları belirlenmiştir. Eşdeğer rijitlik yöntemine göre elde edilen kesit alanlarına bağlı olarak, elemanlar için düşey doğrultuda atalet momenti, yanal doğrultuda atalet momenti ve burulma rijitliği hesaplanmıştır. Çelik malzemesinin kullanıldığı elemanlara ait kesit özellikleri Tablo 2.4' de, lifli polimer malzemenin kullanıldığı elemanlara ait kesit özellikleri ise Tablo 2.5 'de verilmektedir.

Atalet kuvvetleri belirlenirken, tabliye ve kuleler için, genişliğinin sabit kaldığı ve kutu kesitli olduğu, ana kablo ve askı kablolarının ise dairesel kesitli olduğu göz önüne alınmıştır.

Tablo 2.4. Geleneksel çelik malzemesinin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit özellikleri

Eleman	Değişken	Değer
Tabliye	Elastisite modülü	$205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Çelik kesit alanı	0.851 m^2
	Düşey eğilmedeki atalet momenti (I_{33})	1.238 m^4
	Yanal eğilmedeki atalet momenti (I_{22})	63.61 m^4
	Burulma rijitliği (J)	3.35 m^4
Kule	Elastisite modülü	$205 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir ayaktaki ortalama çelik kesit alanı	0.68 m^2
	Her bir ayağın boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	2.2 m^4
	Her bir ayağın yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	4.5 m^4
	Her bir ayağın ortalama burulma rijitliği (J)	2.435 m^4
Orta Açıklık Kabloları	Elastisite modülü	$193 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir kablo kesit alanı	0.205 m^2
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	$3.33 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	$3.33 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
Kenar Açıklık Kabloları	Elastisite modülü	$193 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir kablo kesit alanı	0.219 m^2
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	$3.83 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	$3.83 \times 10^{-3} \text{ m}^4$
Askı Kabloları	Elastisite modülü	$162 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir askı alanı	0.0021 m^2
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	0
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	0
	Her bir kablonun ortalama burulma rijitliği (J)	0

Tablo 2.5. Eşdeğer Rijitlik yöntemine göre, lifli polimer malzemenin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit özellikleri

Eleman	Değişken	Değer
Tabliye	Elastisite modülü	$64 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Çelik kesit alanı	2.7259 m^2
	Düşey eğilmedeki atalet momenti (I_{33})	3.9715 m^4
	Yanal eğilmedeki atalet momenti (I_{22})	2100.025 m^4
	Burulma rijitliği (J)	110.5972 m^4
Kule	Elastisite modülü	$122 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir ayaktaki ortalama çelik kesit alanı	1.1426 m^2
	Her bir ayağın boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	3.6882 m^4
	Her bir ayağın yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	21.2031 m^4
	Her bir ayağın ortalama burulma rijitliği (J)	11.4732 m^4
Orta Açıklık Kabloları	Elastisite modülü	$160 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir kablo kesit alanı	0.2473 m^2
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	0.004828 m^4
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	0.004828 m^4
	Her bir kablonun ortalama burulma rijitliği (J)	0.009656 m^4
Kenar Açıklık Kabloları	Elastisite modülü	$160 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir kablo kesit alanı	0.2642 m^2
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	0.005555 m^4
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	0.005555 m^4
	Her bir kablonun ortalama burulma rijitliği (J)	0.0111 m^4
Askı Kabloları	Elastisite modülü	$160 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	Her bir askı alanı	$2.1263 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	0
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	0
	Her bir kablonun ortalama burulma rijitliği (J)	0

2.2.3.2. Eşdeğer Dayanım Yöntemi

Eşdeğer dayanım yönteminde;

$$\sigma_{\text{Çelik}} \times A_{\text{Çelik}} = \sigma_{\text{LP}} \times A_{\text{LP}} \quad (2.2)$$

formülasyonu kullanılmıştır (Zhang, 2008). (2.2) denkleminde göre; $\sigma_{\text{Çelik}}$ ve σ_{LP} sırası ile çelik ve lifli polimer malzeme için izin verilebilir gerilme dayanım değerlerini, $A_{\text{Çelik}}$ ve A_{LP} ise, sırası ile çelik ve lifli polimer malzemenin kesit alanlarını ifade etmektedir. (2.2) eşitliğine göre LP alanları belirlenmiştir. Alanların belirlenmesi için Tablo 2.3'deki dayanım değerleri dikkate alınmıştır. Eşdeğer dayanım yöntemine göre elde edilen kesit alanlarına bağlı olarak, elemanlar için düşey doğrultuda atalet momenti, yanal doğrultuda atalet momenti ve burulma rijitliği belirlenmiştir. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı elemanlara ait kesit özellikleri ise, Tablo 2.6 'de verilmektedir.

Atalet kuvvetleri belirlenirken, tabliye ve kuleler için, genişliğinin sabit kaldığı ve kutu kesitli olduğu, ana kablo ve askı kablolarının ise dairesel kesitli olduğu göz önüne alınmıştır.

Tablo 2.6. Eşdeğer Dayanım yöntemine göre, lifli polimer malzemenin kullanıldığı Boğaziçi Köprüsü elemanlarına ait kesit özellikleri

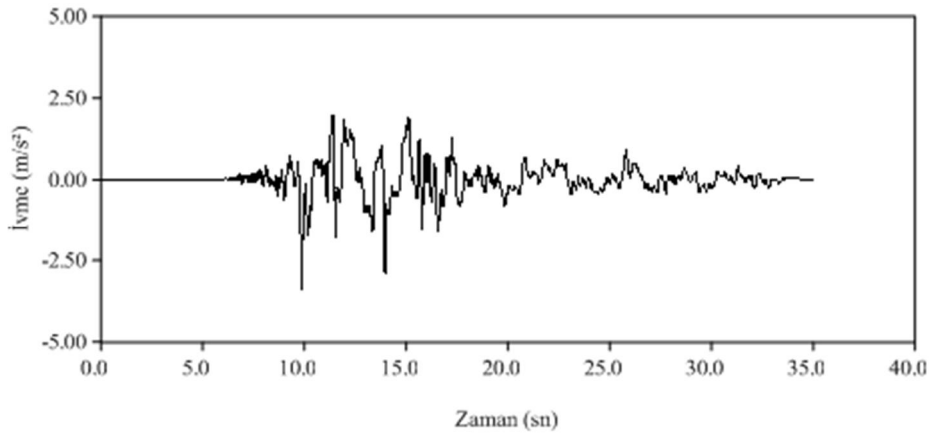
Eleman	Değişken	Değer
Tabliye	İzin verilebilir gerilme dayanımı (σ)	102×10^6 kN/m ²
	Çelik kesit alanı	1.1455 m ²
	Düşey eğilmedeki atalet momenti (I_{33})	1.6664 m ⁴
	Yanal eğilmedeki atalet momenti (I_{22})	155.14 m ⁴
	Burulma rijitliği (J)	8.17 m ⁴
Kule	İzin verilebilir gerilme dayanımı (σ)	147×10^6 kN/m ²
	Her bir ayaktaki ortalama çelik kesit alanı	0.635 m ²
	Her bir ayağın boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	2.054 m ⁴
	Her bir ayağın yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	3.6644 m ⁴
	Her bir ayağın ortalama burulma rijitliği (J)	1.9829 m ⁴
Orta Açıklık Kabloları	İzin verilebilir gerilme dayanımı (σ)	980×10^6 kN/m ²
	Her bir kablo kesit alanı	0.205 m ²
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	3.347×10^{-3} m ⁴
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	3.347×10^{-3} m ⁴
Kenar Açıklık Kabloları	İzin verilebilir gerilme dayanımı (σ)	980×10^6 kN/m ²
	Her bir kablo kesit alanı	0.219 m ²
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	3.815×10^{-3} m ⁴
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	3.815×10^{-3} m ⁴
Askı Kabloları	İzin verilebilir gerilme dayanımı (σ)	980×10^6 kN/m ²
	Her bir askı alanı	2.1×10^{-3} m ²
	Her bir kablo boyuna eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{33})	0
	Her bir kablo yanal eğilmedeki ort. atalet mom. (I_{22})	0
	Her bir kablonun ortalama burulma rijitliği (J)	0

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Giriş

Tezin bu bölümünde, Boğaziçi Köprüsü'nün statik ve dinamik davranışlarına lifli polimer malzemelerin etkileri incelenmiş ve analizler sonucu elde edilen bulgular grafikler ile desteklenerek verilmiştir. Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre dinamik analizlerinde, 1999 yılında meydana gelen Kocaeli Depremi'nin Yarımca Petro-Kimya Tesisleri'nden elde edilen deprem ivme kaydının düşey bileşeni kullanılmıştır (URL-2). Seçilen ivme kaydının zamana bağlı değişimi Şekil 3.1' de verilmiştir. Statik analizlerde ise sabit yük olarak, tüm elemanların kendi ağırlıkları dikkate alınmıştır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir. Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklar düşünülmüştür. 10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak, her bir eleman için yayılı yük şeklinde, 40 kN/m değerinde yük, ek sabit yükler olarak da etki ettirilmiştir.

Analizler sonucunda yerdeğiştirme, eğilme momenti, kesme kuvveti ve normal kuvvet değerlerinin tabliye uzunluğu ve kule yüksekliği boyunca değişimleri irdelenmiştir. LP malzemelerin tabliye uzunluğu ve kule yüksekliği boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları geleneksel çelik malzemesinin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 3.1. 1999 Kocaeli Depreminin Yarımca Petro-Kimya Tesislerinden elde edilen ivme kaydının zamana bağlı değişimi

3.2. Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dumanoğlu ve Severn'e (1987) göre, dinamik analizlerde yapı davranışının doğru olarak belirlenebilmesi, yeterli sayıda mod sayısının belirlenmesi ile mümkündür. Asma köprüler değişken davranış gösteren yapılardan olduğu için, bina ve barajlara göre daha fazla mod sayısının dikkate alınması gerekir (Adanur S., 2003). Bu çalışmada ilk 20 mod dikkate alınmıştır. Sönüm oranı ise %2,0 olarak seçilmiştir.

Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım yöntemlerine göre belirlenen malzeme özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen ilk 20 moda ait frekans ve periyot değerleri Tablo 3.1' de verilmektedir.

Tablo 3.1. Boğaziçi Köprüsü'nün Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım'a göre frekans ve periyot değerleri

Mod No	Çelik Malzemeli Köprü		Lifli Polimer (LP) Malzemeli Köprü			
	Çelik		LP-Eşdeğer Rijitlik		LP-Eşdeğer Dayanım	
	Periyot (s)	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Frekans (Hz)
1	8,874161	0,11269	5,26846	0,18981	5,140332	0,19454
2	6,567736	0,15226	3,52905	0,28336	4,784947	0,20899
3	4,917938	0,20334	3,012537	0,33195	3,960001	0,25253
4	3,975197	0,25156	2,890297	0,34599	3,768988	0,26532
5	3,828101	0,26123	2,789088	0,35854	3,711159	0,26946
6	3,642976	0,2745	2,766238	0,3615	3,249225	0,30777
7	3,596288	0,27806	2,341319	0,42711	3,165125	0,31594
8	3,554578	0,28133	2,133753	0,46866	2,576814	0,38808
9	3,341856	0,29923	2,016606	0,49588	2,465743	0,40556
10	2,918248	0,34267	1,895214	0,52764	2,207396	0,45302
11	2,871637	0,34823	1,66252	0,6015	2,179565	0,45881
12	2,542008	0,39339	1,65053	0,60587	1,924848	0,51952
13	2,497751	0,40036	1,647895	0,60683	1,924417	0,51964
14	2,35848	0,424	1,55875	0,64154	1,825065	0,54793
15	2,240219	0,44639	1,373931	0,72784	1,802525	0,55478
16	2,171123	0,46059	1,363757	0,73327	1,564838	0,63904
17	2,162366	0,46246	1,247111	0,80185	1,536527	0,65082
18	2,118659	0,472	1,187852	0,84186	1,480392	0,6755
19	1,954205	0,51172	1,171808	0,85338	1,398213	0,7152
20	1,785952	0,55993	1,041956	0,95973	1,374526	0,72752

Tablo 3.2’de çelik için 20 moda ait mod şekli ile frekans ve periyot değerleri verilmiştir. Çelik için yapılan modal analizlerde 5 yanal mod, 5 düşey mod, 3 burulma mod ve 7 kablo modu elde edilmiştir.

Tablo 3.2 Boğaziçi Köprüsü’nün Çeliğe göre Mod Şekilleri ve Periyot-Frekans Değerleri

Mod Sayısı	Mod Şekli	Periyot (s)	Frekans (Hz)
1	Yanal-Simetrik	8,874161	0,11269
2	Düşey-Asimetrik	6,567736	0,15226
3	Düşey-Simetrik	4,917938	0,20334
4	Yanal-Asimetrik	3,975197	0,25156
5	Kablo	3,828101	0,26123
6	Kablo	3,642976	0,27450
7	Düşey-Simetrik	3,596288	0,27806
8	Yanal-Simetrik	3,554578	0,28133
9	Burulma-Simetrik	3,341856	0,29923
10	Yanal-Asimetrik	2,918248	0,34267
11	Düşey-Asimetrik	2,871637	0,34823
12	Yanal-Simetrik	2,542008	0,39339
13	Kablo	2,497751	0,40036
14	Burulma-Asimetrik	2,358480	0,42400
15	Burulma-Asimetrik	2,240219	0,44639
16	Düşey-Simetrik	2,171123	0,46059
17	Kablo	2,162366	0,46246
18	Kablo	2,118659	0,47200
19	Kablo	1,954205	0,51172
20	Kablo	1,785952	0,55993

Tablo 3.3’de LP-Eşdeğer Rijitliğe bağlı 20 moda ait mod şekli ile frekans ve periyot değerleri verilmiştir. LP-Eşdeğer Rijitlik için yapılan modal analizlerde 2 yanal mod, 6 düşey mod ve 12 kablo modu elde edilmiştir. Tablo 3.4’de ise LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı mod şekilleri ile frekans ve periyot değerleri verilmiştir. LP-Eşdeğer Dayanım için 5 yanal mod, 5 düşey mod, 1 burulma modu ve 9 kablo modu elde edilmiştir.

Tablo 3.3 Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitliğe göre Mod Şekilleri ve Periyot-Frekans Değerleri

Mod Sayısı	Mod Şekli	Periyot (s)	Frekans (Hz)
1	Düşey-Asimetrik	5,268460	0,18981
2	Düşey-Simetrik	3,529050	0,28336
3	Kablo	3,012537	0,33195
4	Kablo	2,890297	0,34599
5	Kablo	2,789088	0,35854
6	Kablo	2,766238	0,36150
7	Düşey-Simetrik	2,341319	0,42711
8	Düşey-Asimetrik	2,133753	0,46866
9	Yanal-Simetrik	2,016606	0,49588
10	Kablo	1,895214	0,52764
11	Kablo	1,662520	0,60150
12	Yanal-Simetrik	1,650530	0,60587
13	Kablo	1,647895	0,60683
14	Düşey-Simetrik	1,558750	0,64154
15	Kablo	1,373931	0,72784
16	Kablo	1,363757	0,73327
17	Düşey-Asimetrik	1,247111	0,80185
18	Kablo	1,187852	0,84136
19	Kablo	1,171808	0,85338
20	Kablo	1,041956	0,95973

Tablo 3.4 Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Dayanıma göre Mod Şekilleri ve Periyot-Frekans Değerleri

Mod Sayısı	Mod Şekli	Periyot (s)	Frekans (Hz)
1	Yanal-Simetrik	5,140332	0,19454
2	Düşey-Asimetrik	4,784947	0,20899
3	Kablo	3,960001	0,25253
4	Kablo	3,768988	0,26532
5	Kablo	3,711159	0,26946
6	Yanal-Simetrik	3,249225	0,30777
7	Düşey-Simetrik	3,165125	0,31594
8	Kablo	2,576814	0,38808
9	Yanal-Simetrik	2,465743	0,40556
10	Kablo	2,207396	0,45302
11	Kablo	2,179565	0,45881
12	Düşey-Asimetrik	1,924848	0,51952
13	Düşey-Asimetrik	1,924417	0,51964
14	Kablo	1,825065	0,54793
15	Kablo	1,802525	0,55478
16	Yanal-Asimetrik	1,564838	0,63904
17	Kablo	1,536527	0,65082
18	Yanal-Asimetrik	1,480392	0,67550
19	Düşey-Simetrik	1,398213	0,71520
20	Burulma-Simetrik	1,374526	0,72752

Analizler sonucunda elde edilen mod şekilleri ise Şekil 3.2’de verilmektedir.

Dinamik analizlerden farklı mod frekanslarına rağmen, benzer mod şekilleri elde edilmiştir. LP Eşdeğer-Dayanım için elde edilen mod şekilleri, çelik için elde edilen mod şekilleri ile benzer özellik göstermektedir. LP-Eşdeğer Rijitlik yönteminde birinci yanal mod elde edilememiştir. LP malzeme özellikleri nedeni ile bu durum oluşmuştur. Mod şekillerine bağlı olarak, LP-Eşdeğer Dayanım yöntemi geleneksel yöntemle daha yakın davranış göstermektedir.

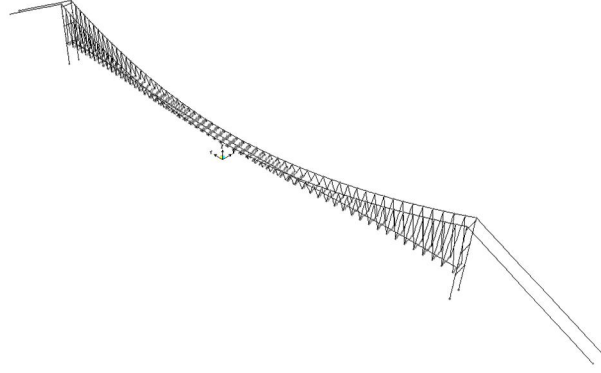
LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitliğe bağlı olarak elde edilen frekans değerlerinin, Çelik için elde edilen frekans değerlerinden büyük olduğu Tablo 3.1’de görülmektedir. Çelik köprü için hesaplanan frekans değerleri “0,11269Hz” ile “0,55993Hz” aralığında değişmektedir. LP-Eşdeğer Rijitlik için elde edilen frekans değerleri “0,18981Hz” ile “0,95973Hz” aralığındadır. LP-Eşdeğer Dayanım için, frekans değerleri “0,19454Hz” ile “0,72752Hz” arasında değişmektedir.

Verilerden görüleceği üzere, Çelik için hesap edilen frekans değerleri, LP-Eşdeğer değerlerine göre düşüktür. Lifli polimer malzemelerin, geleneksel malzemeye göre daha rijit ve hafif olması nedeni ile LP köprü frekansları büyük çıkmıştır.

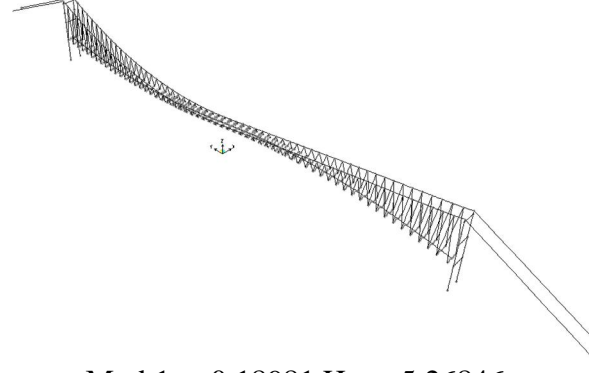
ÇELİK

LP-EŞDEĞER RİJİTLİK

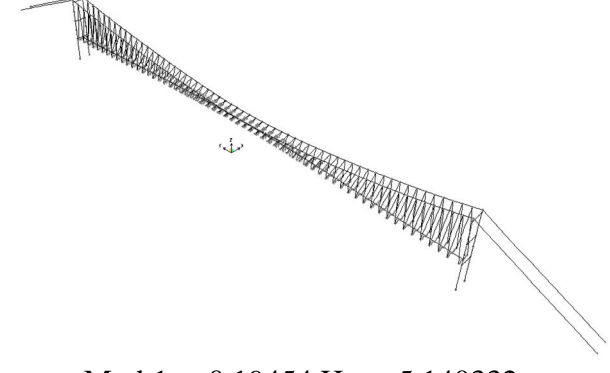
LP-EŞDEĞER DAYANIM



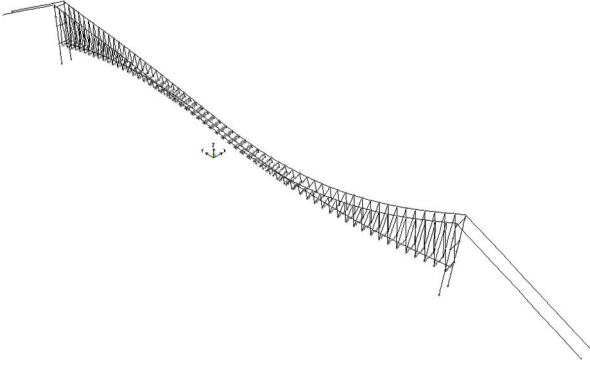
Mod 1 0,11269 Hz 8,874161 s



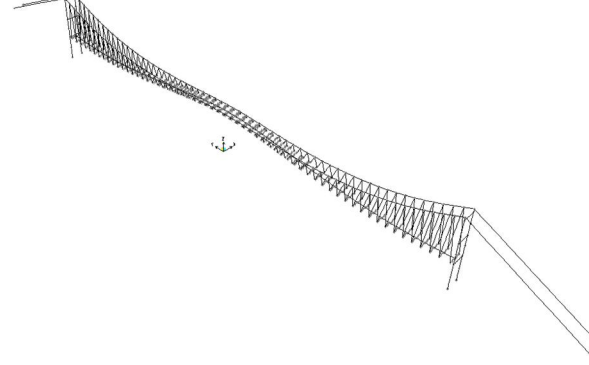
Mod 1 0,18981 Hz 5,26846 s



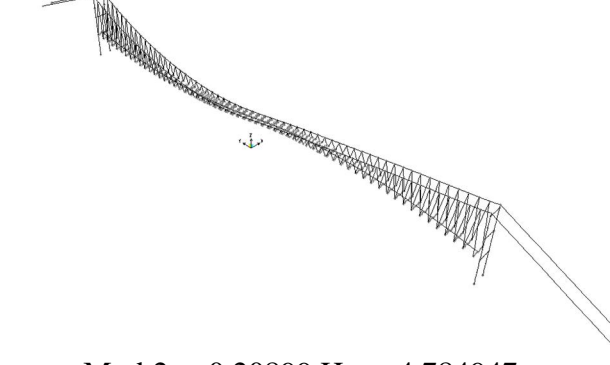
Mod 1 0,19454 Hz 5,140332 s



Mod 2 0,15226 Hz 6,567736 s



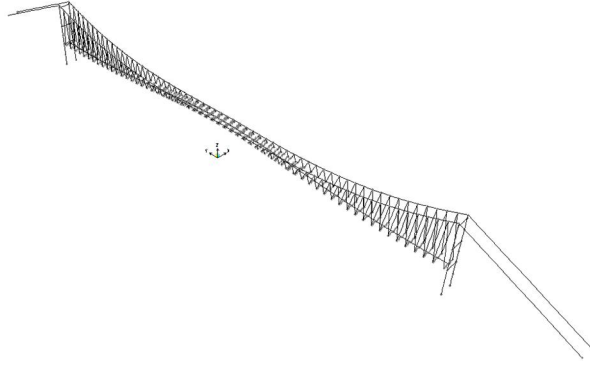
Mod 2 0,28336 Hz 3,52905 s



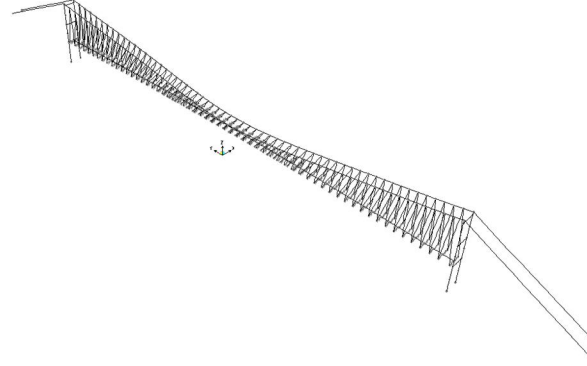
Mod 2 0,20899 Hz 4,784947 s

Şekil 3.2. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı mod şekilleri

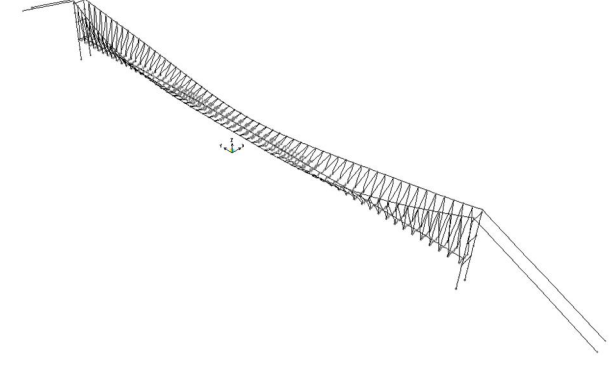
Şekil 3.2. Devamı



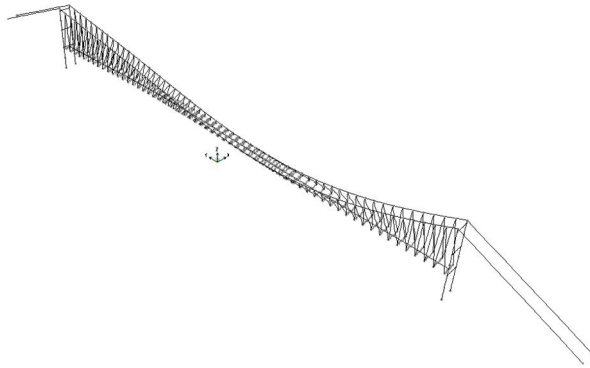
Mod 3 0,20334 Hz 4,917938 s



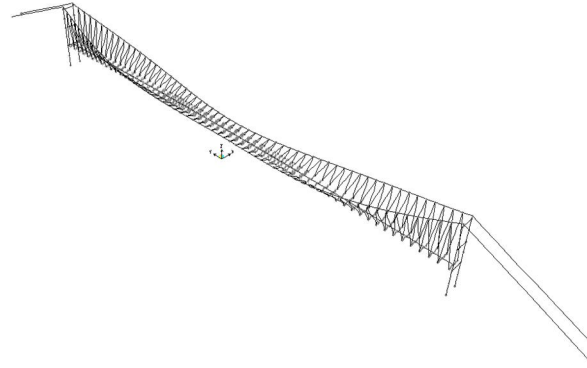
Mod 3 0,33195 Hz 3,012537 s



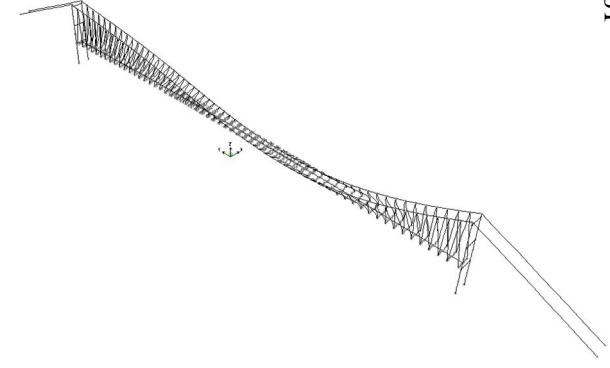
Mod 3 0,25253 Hz 3,960001 s



Mod 4 0,25156 Hz 3,975197 s

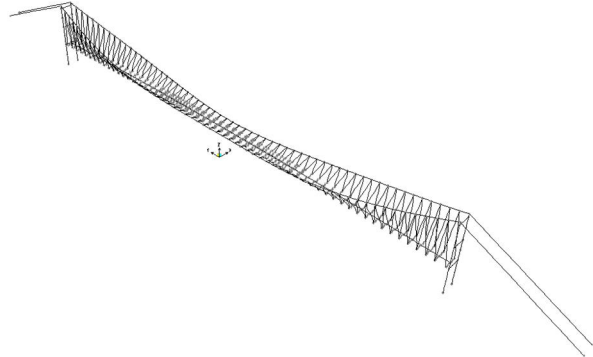


Mod 4 0,34599 Hz 2,890297 s

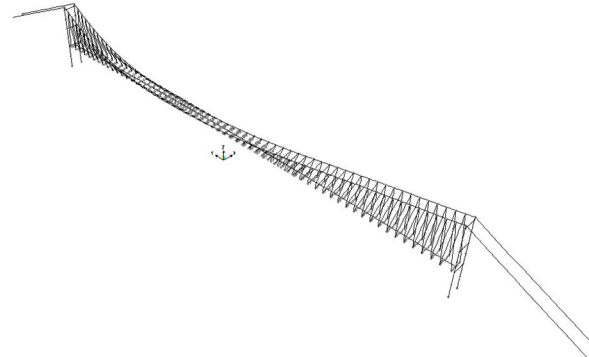


Mod 4 0,26532 Hz 3,768988 s

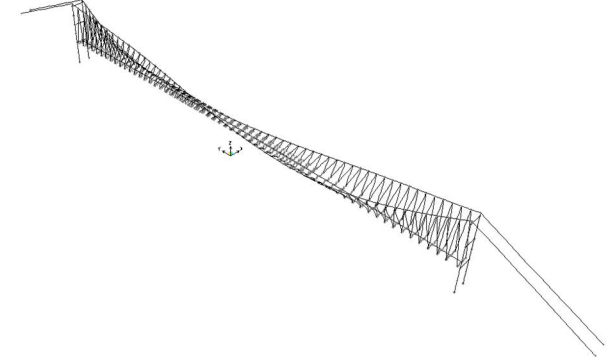
Şekil 3.2. Devamı



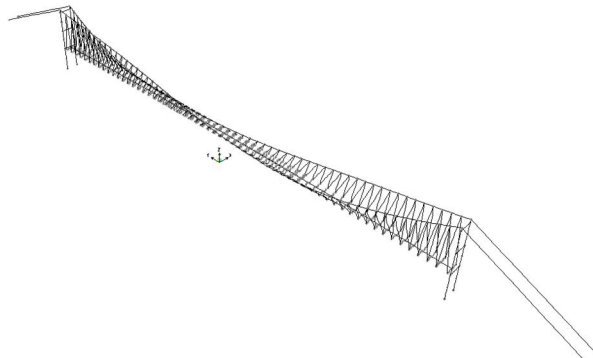
Mod 5 0,26123 Hz 3,828101 s



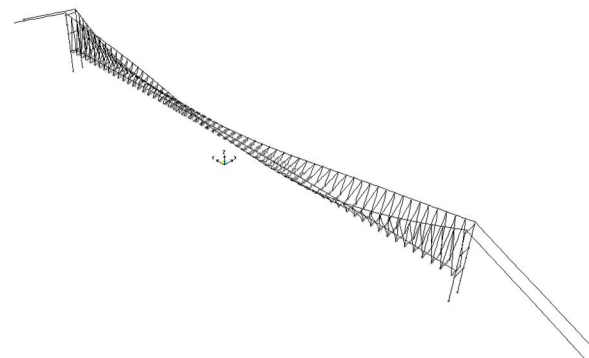
Mod 5 0,35854 Hz 2,789088 s



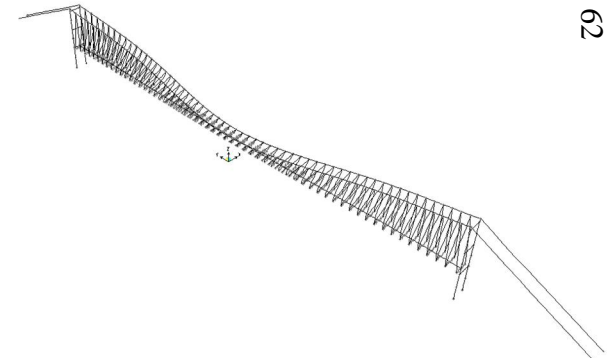
Mod 5 0,26946 Hz 3,711159 s



Mod 6 0,2745 Hz 3,642976 s

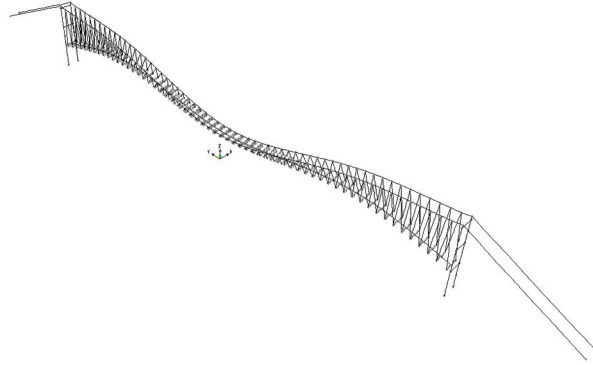


Mod 6 0,3615 Hz 2,766238 s

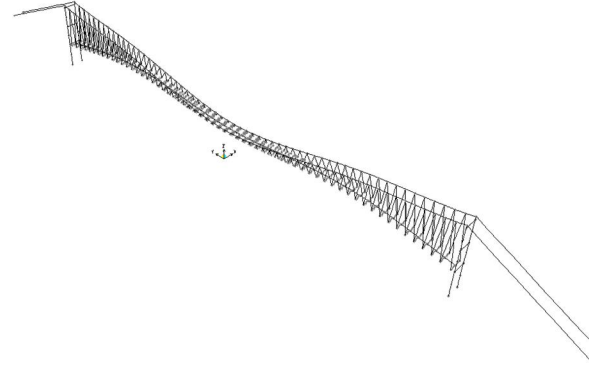


Mod 6 0,30777 Hz 3,249225 s

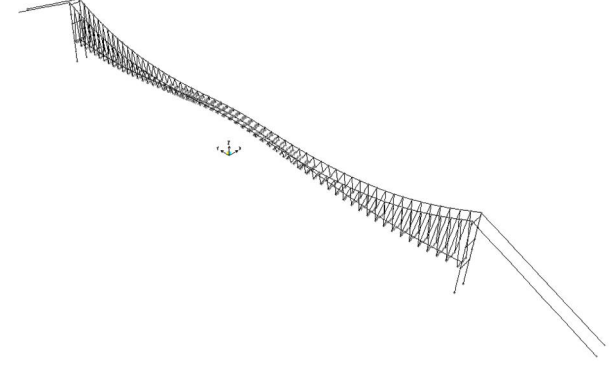
Şekil 3.2. Devamı



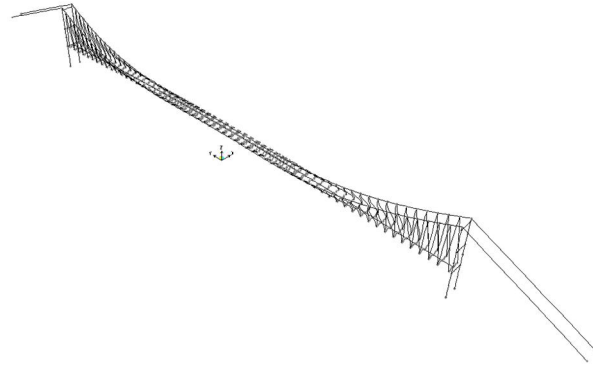
Mod 7 0,27806 Hz 3,596288 s



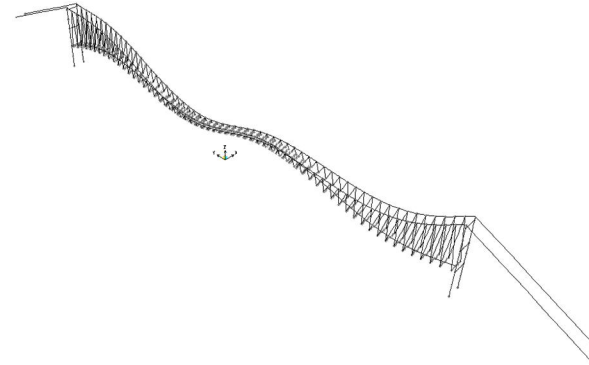
Mod 7 0,42711 Hz 2,341319 s



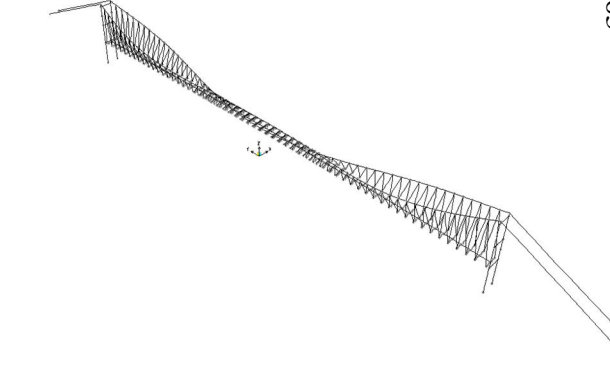
Mod 7 0,31594 Hz 3,165125 s



Mod 8 0,28133 Hz 3,554578 s

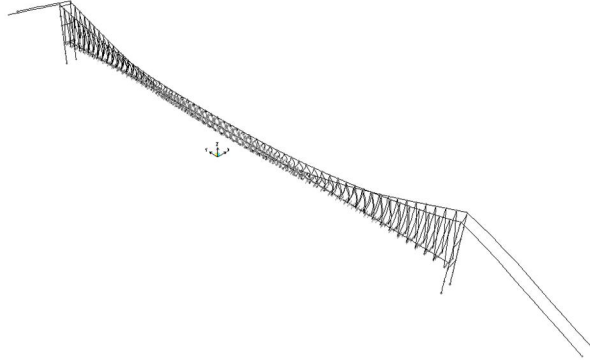


Mod 8 0,46866 Hz 2,133753 s

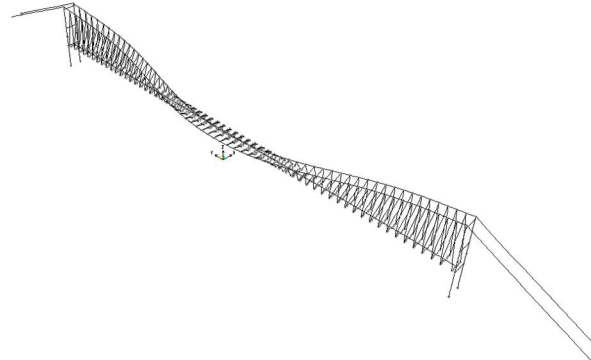


Mod 8 0,38808 Hz 2,576814 s

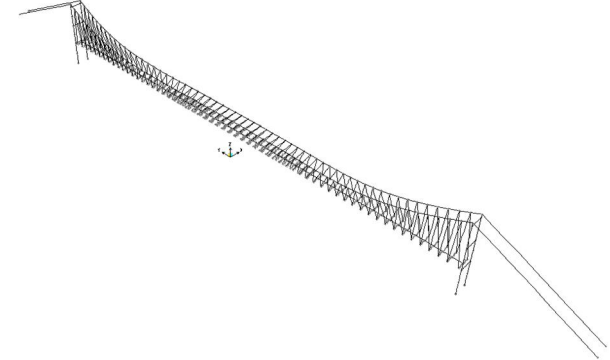
Şekil 3.2. Devamı



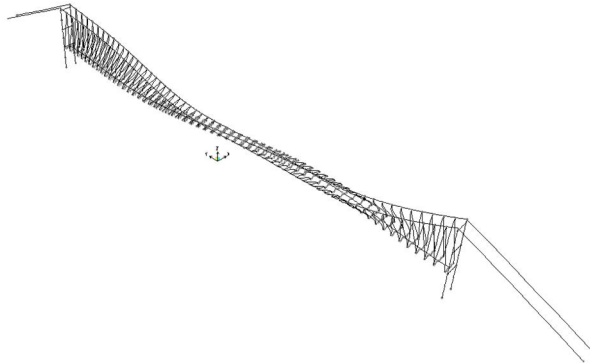
Mod 9 0,29923 Hz 3,341856 s



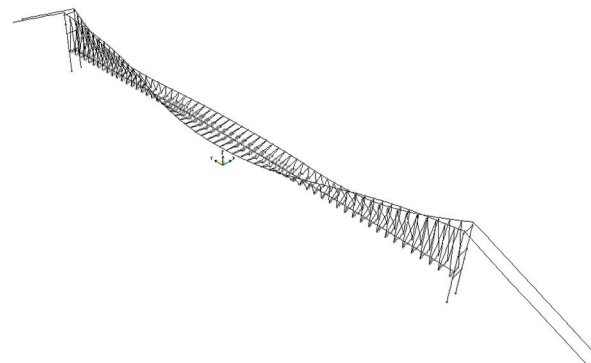
Mod 9 0,49588 Hz 2,016606 s



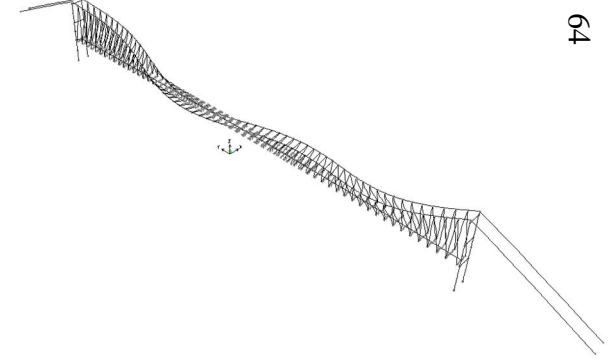
Mod 9 0,40556 Hz 2,465743 s



Mod 10 0,34267 Hz 2,918248 s

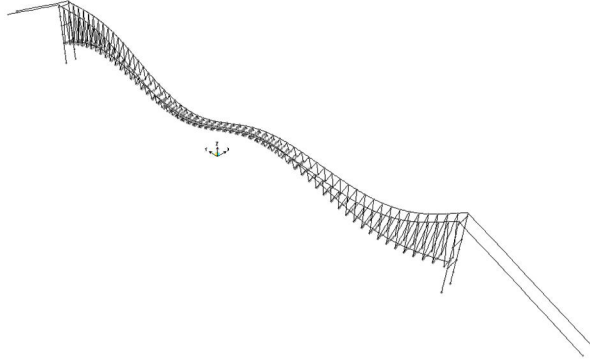


Mod 10 0,52764 Hz 1,895214 s

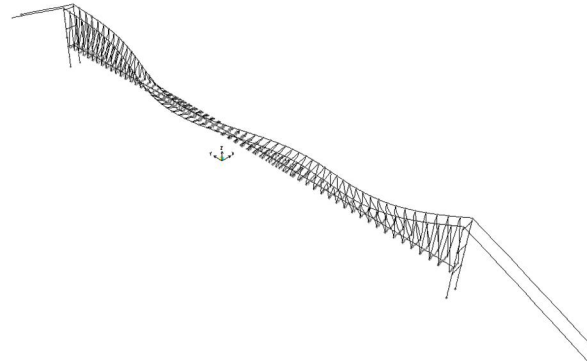


Mod 10 0,45302 Hz 2,207396 s

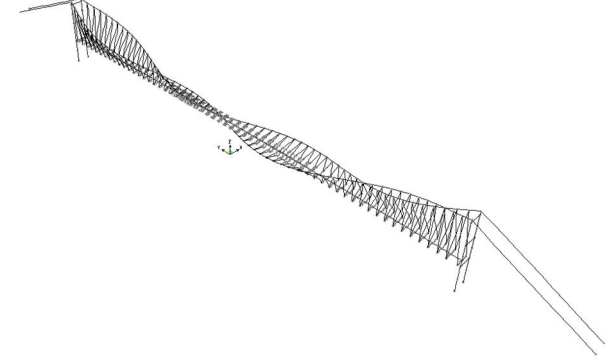
Şekil 3.2. Devamı



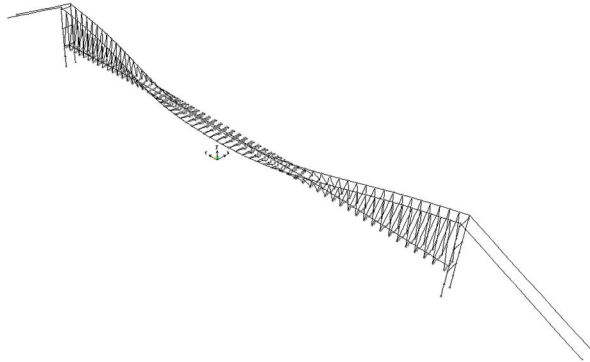
Mod 11 0,34823 Hz 2,871637 s



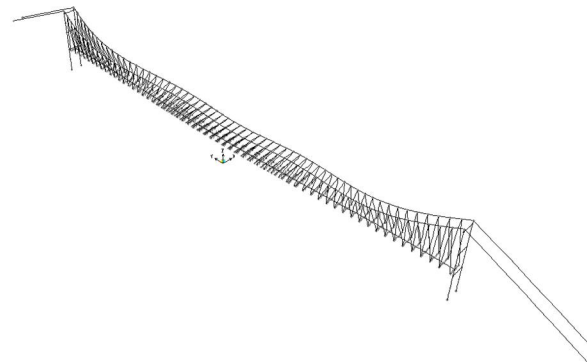
Mod 11 0,6015 Hz 1,66252 s



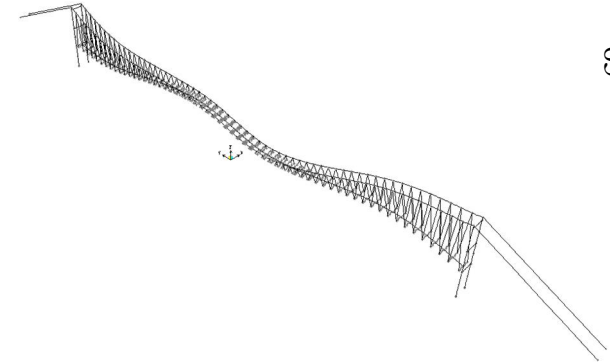
Mod 11 0,45881 Hz 2,179565 s



Mod 12 0,39339 Hz 2,542008 s

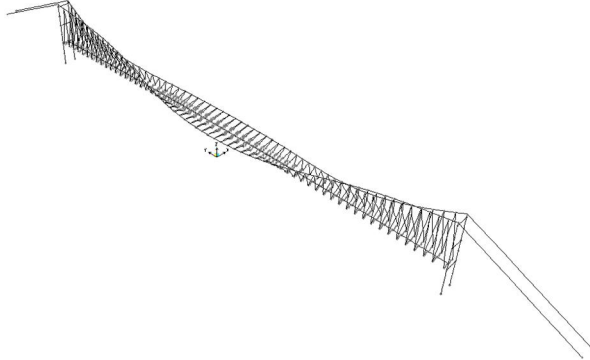


Mod 12 0,60587 Hz 1,65053 s

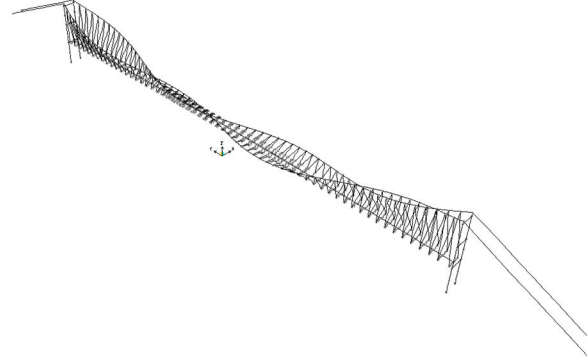


Mod 12 0,51952 Hz 1,924848 s

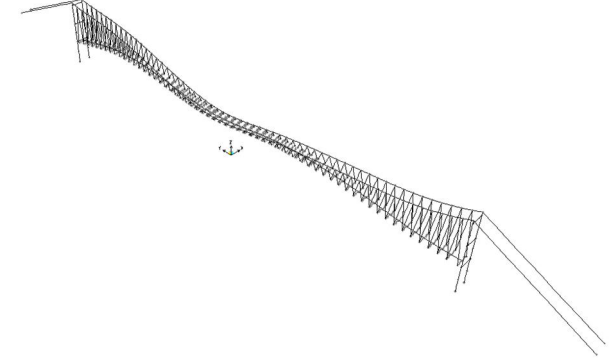
Şekil 3.2. Devamı



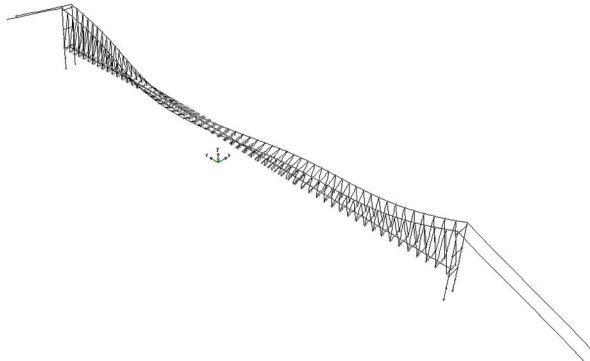
Mod 13 0,40036 Hz 2,497751 s



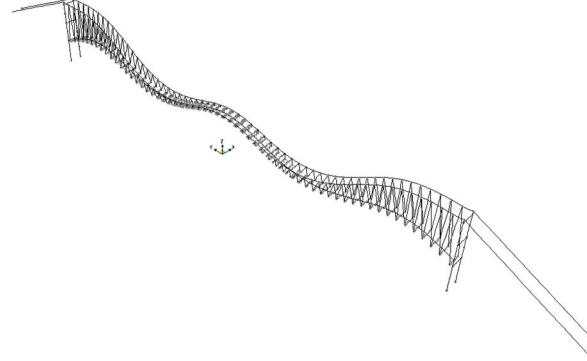
Mod 13 0,60683 Hz 1,647895 s



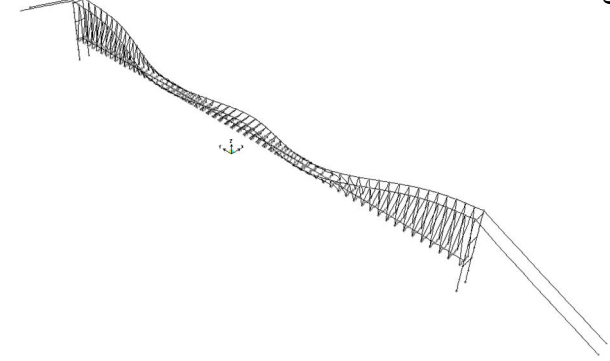
Mod 13 0,51964 Hz 1,924417 s



Mod 14 0,4240 Hz 2,35848 s

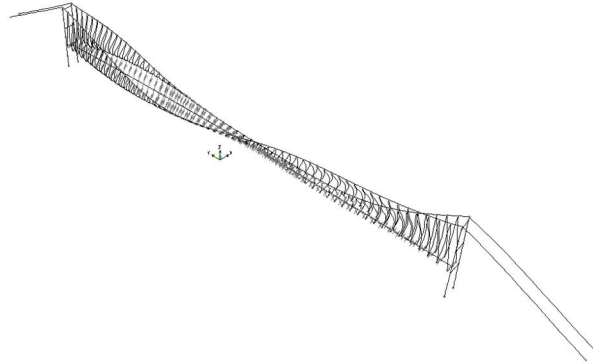


Mod 14 0,64154 Hz 1,55875 s

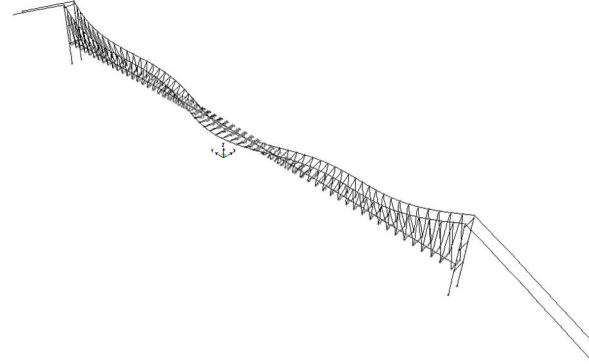


Mod 14 0,54793 Hz 1,825065 s

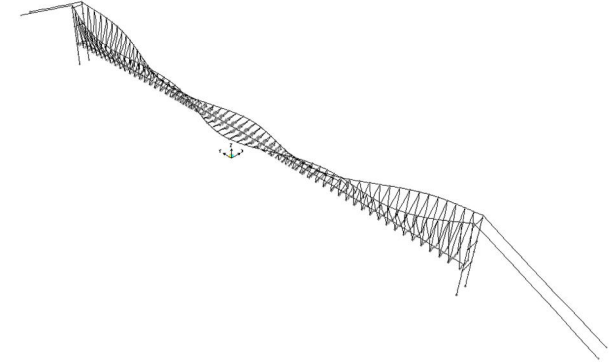
Şekil 3.2. Devamı



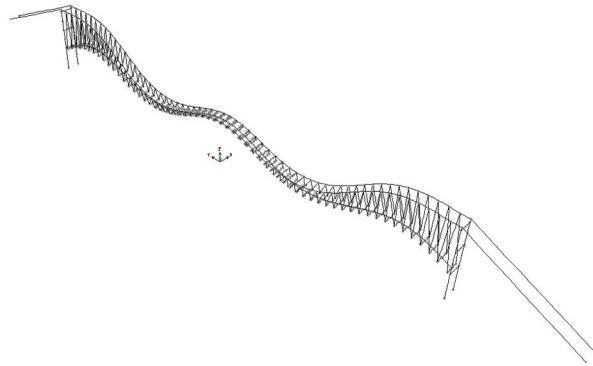
Mod 15 0,44639 Hz 2,240219 s



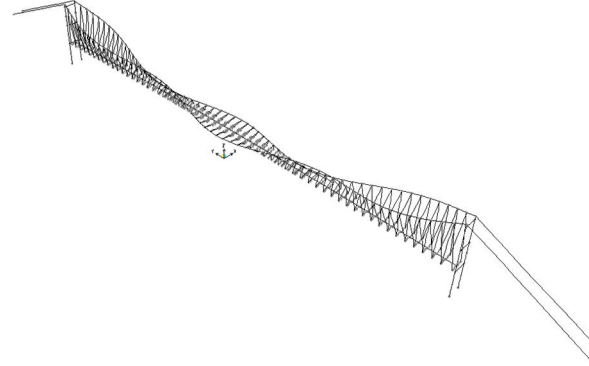
Mod 15 0,72784 Hz 1,373931 s



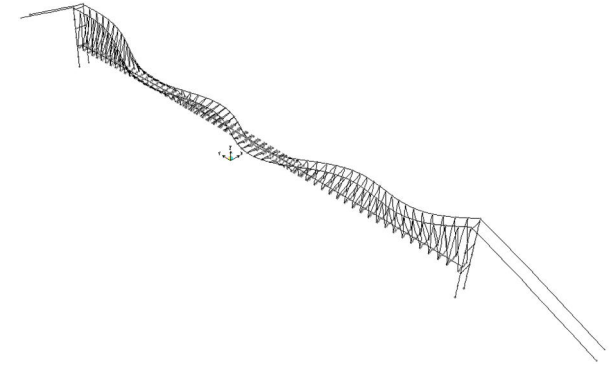
Mod 15 0,55478 Hz 1,802525 s



Mod 16 0,46059 Hz 2,171123 s

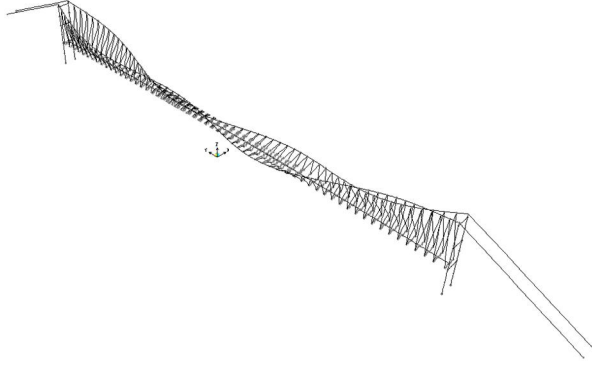


Mod 16 0,73327 Hz 1,363757 s

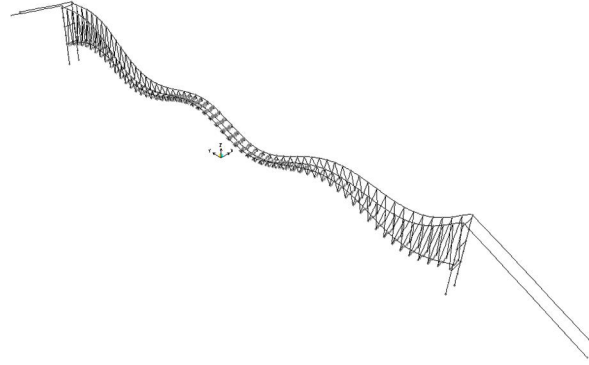


Mod 16 0,63904 Hz 1,564838 s

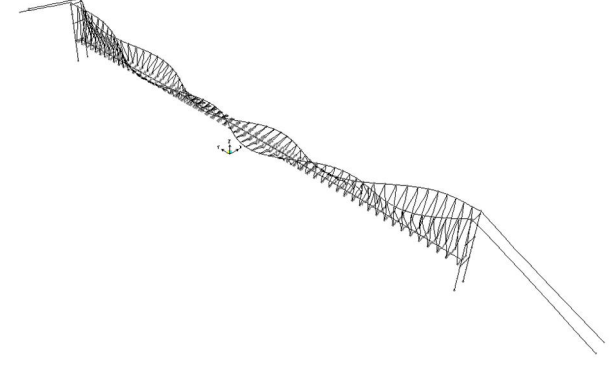
Şekil 3.2. Devamı



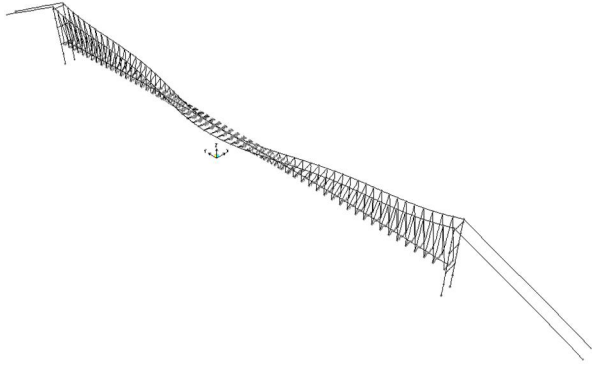
Mod 17 0,46246 Hz 2,162366 s



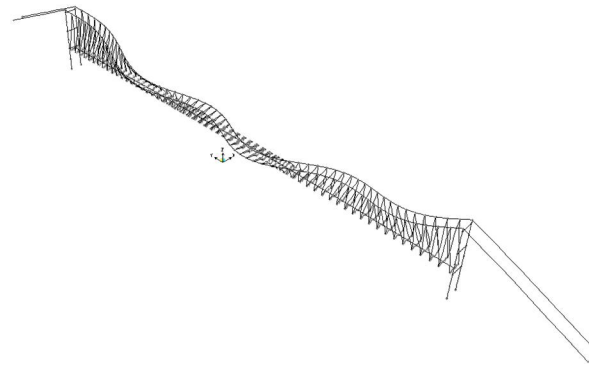
Mod 17 0,80185 Hz 1,247111 s



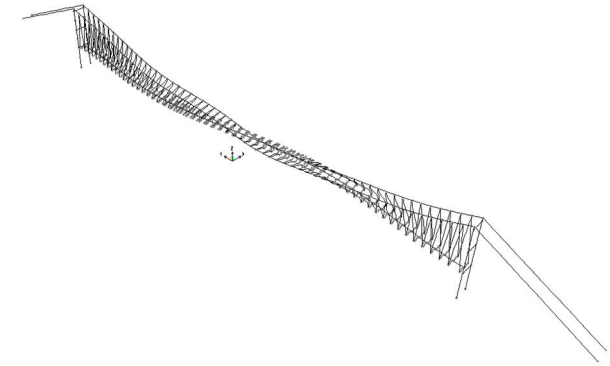
Mod 17 0,65082 Hz 1,536527 s



Mod 18 0,472 Hz 2,118659 s

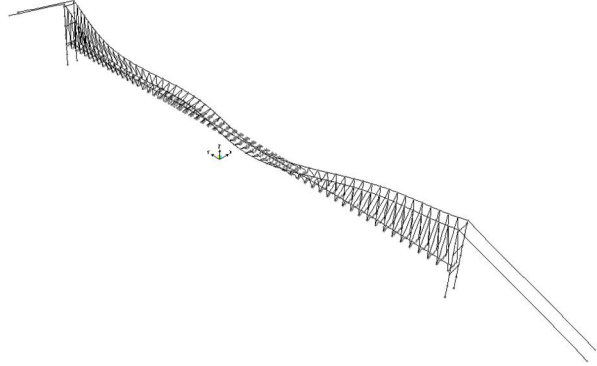


Mod 18 0,84186 Hz 1,187852 s

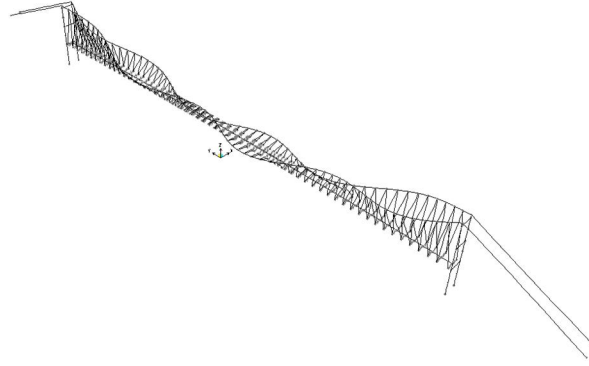


Mod 18 0,6755 Hz 1,480392 s

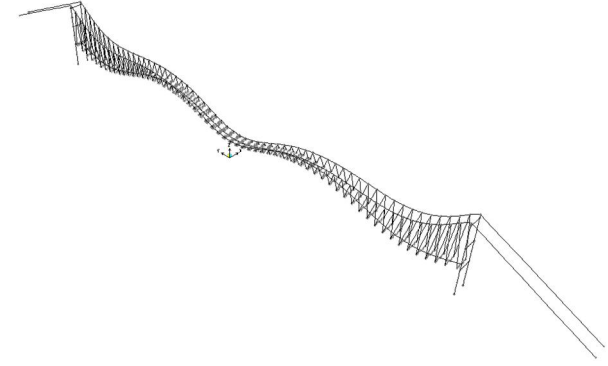
Şekil 3.2. Devamı



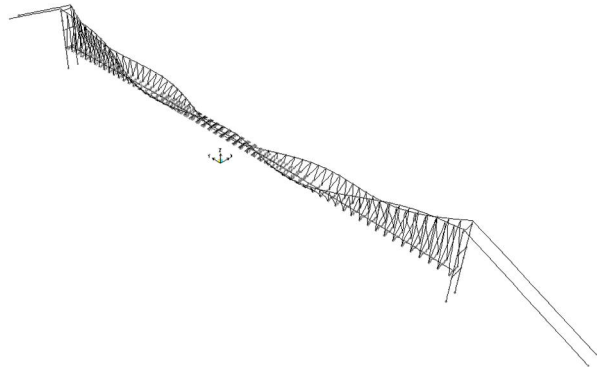
Mod 19 0,51172 Hz 1,954205 s



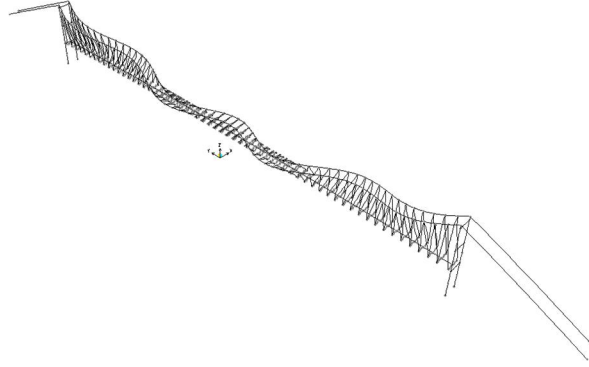
Mod 19 0,85338 Hz 1,171808 s



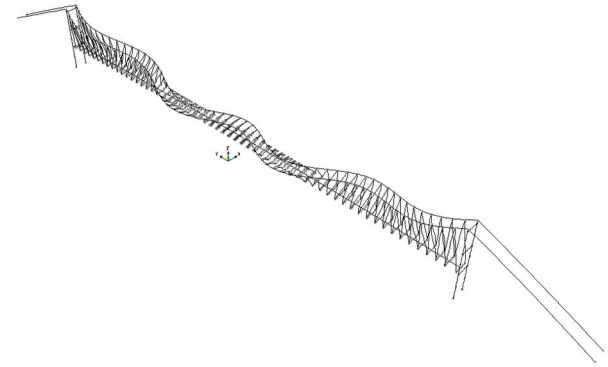
Mod 19 0,7152 Hz 1,398213 s



Mod 20 0,55993 Hz 1,785952 s



Mod 20 0,95973 Hz 1,041956 s



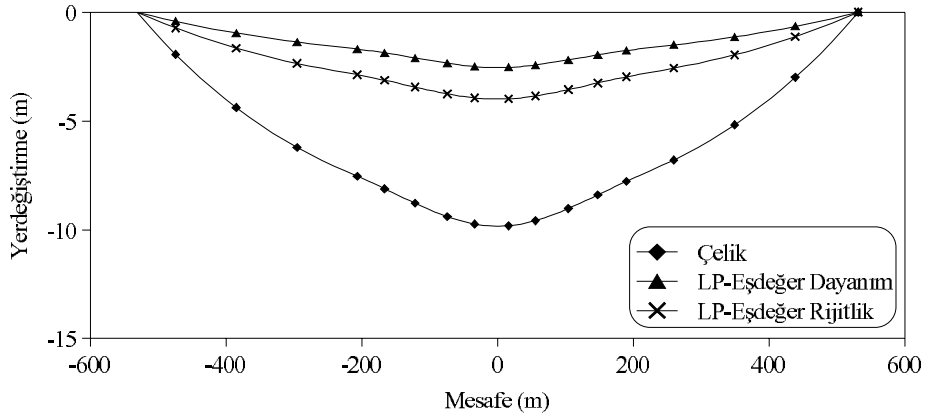
Mod 20 0,72752 Hz 1,374526 s

3.3. Statik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.3.1 Yerdeğiştirmeler

3.3.1.1 Tabliye Düşey Yerdeğiştirmeleri

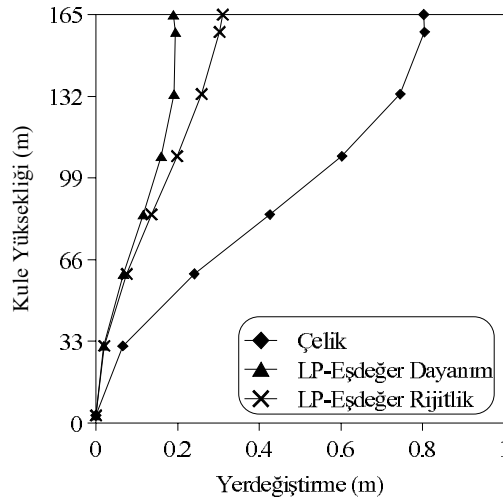
Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçları elde edilmiştir. Düşey yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca değişimi dikkate alınmıştır. LP malzemelerin, tabliye boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları, çelik malzemenin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri Şekil 3.3' te verilmiştir. Analizler sonucunda çelik için tabliye orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değeri 9,84 m'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 3,99 m ve LP-Eşdeğer Dayanım için 2,54 m olarak tespit edilmiştir. Lifli polimer malzemelerin birim ağırlıklarının, çelik malzemeye oranla daha hafif olmaları nedeni ile bu değerlerin elde edilmesi normaldir.



Şekil 3.3. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi

3.3.1.2 Kule Yatay Yerdeşistirmeleri

Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçları elde edilmiştir. Yatay yerdeştirme değerinin, kulelerdeki değişimi dikkate alınmıştır. LP malzemelerin, kulelerdeki etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları, çelik malzemenin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen yatay yerdeştirme değerleri Şekil 3.4' te verilmiştir. Analizlerde çelik için kule tepe noktasındaki yatay yerdeştirme değeri 0,804 m'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 0,310 m ve LP-Eşdeğer Dayanım için 0,194 m olarak tespit edilmiştir. Yapının kendi ağırlığı dikkate alınarak yapılan bu analizde, lifli polimer malzemenin, çeliğe oranla daha hafif olması nedeni ile kule tepe noktasındaki yatay yerdeştirme değeri, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanımda daha azdır.

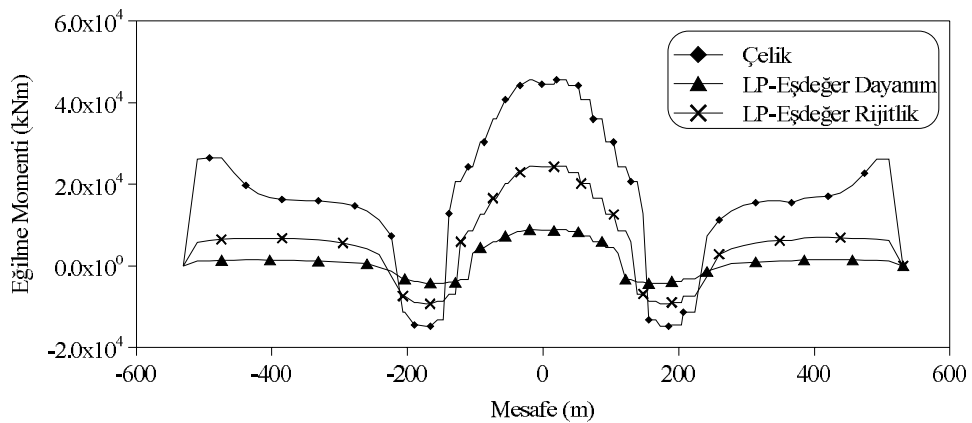


Şekil 3.4. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeştirme değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

3.3.2 Eğilme Momentleri

3.3.2.1 Tabliye Eğilme Momentleri

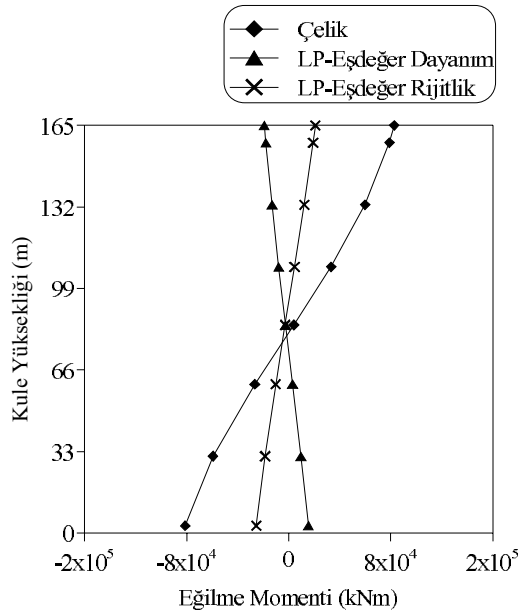
Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçlarında tabliye orta bölgesinde, maksimum eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, düşey yerdeğiştirme değerlerinin de bu bölgede maksimum olması nedeni ile moment değerlerinin tabliye orta bölgesinde oluşması normaldir. LP malzemelerin, tabliye boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım sonuçları ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları, çelik malzemenin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 3.5' te verilmiştir. Analizlerde çelik için maksimum eğilme momenti değeri 45588,046 kNm'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 24409,027 kNm ve LP-Eşdeğer Dayanım için 8897,845 kNm olarak tespit edilmiştir. Yapının kendi ağırlığı dikkate alınarak yapılan bu analizlerde, çelik malzemesinin ağırlığının, lifli polimerlere oranla düşük olması, yapının düşey yerdeğiştirme değerlerinin daha fazla olmasına neden olmuştur. Ayrıca lifli polimer rijitliği, çeliğe oranla daha yüksektir. Dolayısı ile çelik için eğilme momenti değerleri, LP-Eşdeğer Rijitliğe ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre daha fazladır.



Şekil 3.5. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin tabliye boyunca değişimi

3.3.2.2 Kule Eğilme Momentleri

Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçlarında kule tepe noktasında, maksimum eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Yatay yerdeğiştirme değerlerinin de kule tepe noktasında maksimum olması nedeni ile moment değerlerinin kule tepe noktasında oluşması normaldir. LP malzemelerin, kule yüksekliği boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları, çelik malzemenin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen maksimum eğilme momenti değerleri Şekil 3.6' da verilmiştir. Analizlerde çelik için kuledeki maksimum eğilme momenti değeri 82729,367 kNm'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 20965,463 kNm ve LP-Eşdeğer Dayanım için 19112,916 kNm olarak tespit edilmiştir. Lifli polimer malzemenin hafif ağırlığı ve çeliğe oranla daha rijit olması nedeni ile eğilme momenti değerlerinin daha düşük olması, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için normaldir.

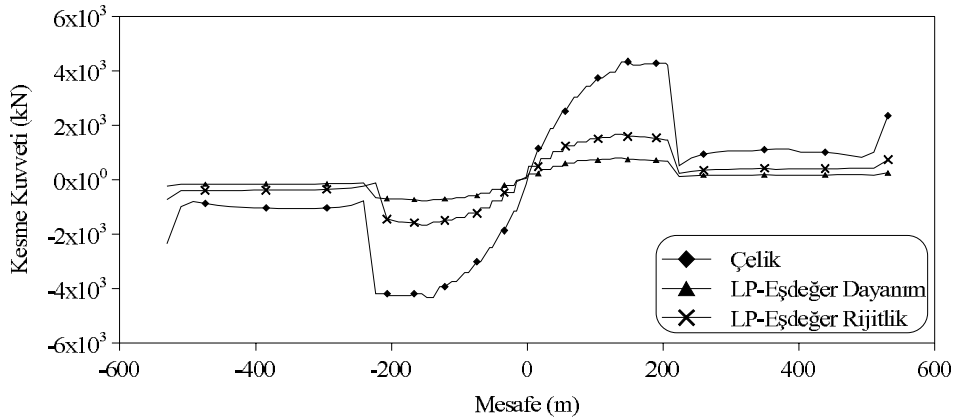


Şekil 3.6. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

3.3.3 Kesme Kuvvetleri

3.3.3.1 Tabliye Kesme Kuvvetleri

Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçlarında kesme kuvveti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi dikkate alınmıştır. LP malzemelerin tabliye boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları çelik malzemenin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen kesme kuvveti değerleri Şekil 3.7' de verilmiştir. Tabliye orta noktasında maksimum eğilme momenti tespit edilmiştir. Dolayısı ile kesme kuvveti değeri tabliye orta noktasında sıfırdır. Analizlerde çelik için maksimum kesme kuvveti değeri 4331,054 kN'dur. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 1667,984 kN ve LP-Eşdeğer Dayanım için 786,213 kN olarak tespit edilmiştir.

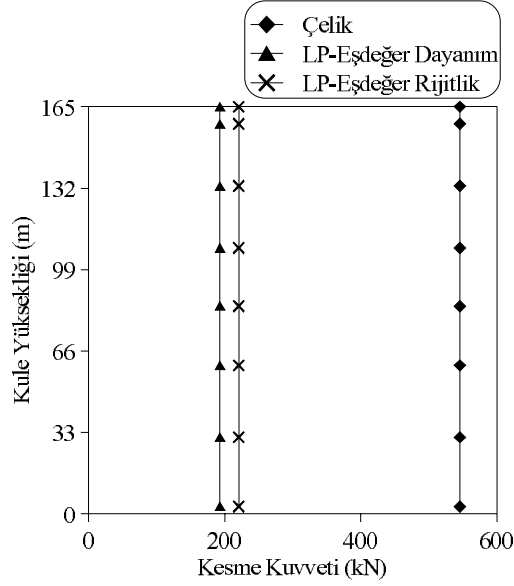


Şekil 3.7. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi

3.3.3.2 Kule Kesme Kuvvetleri

Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçlarında kesme kuvveti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi dikkate alınmıştır. LP malzemelerin, kule yüksekliği boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları, çelik malzemenin

kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri Şekil 3.8’ de verilmiştir. Analizlerde çelik için kuledeki maksimum kesme kuvvet değeri 545,742 kN’dur. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 220,488 kN ve LP-Eşdeğer Dayanım için 193,043 kN olarak tespit edilmiştir.



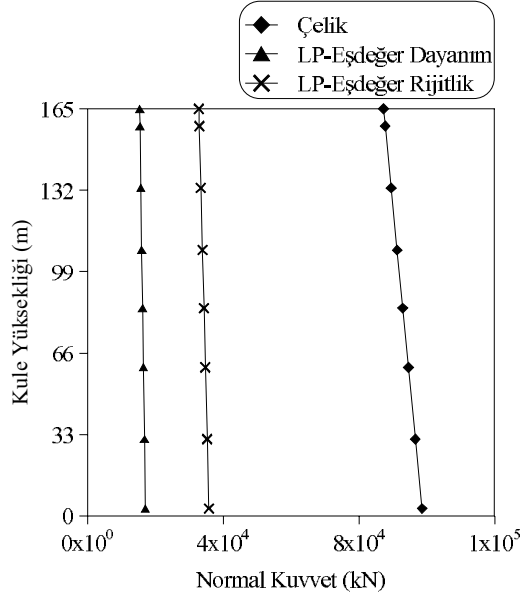
Şekil 3.8. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

3.3.4 Normal Kuvvetler

3.3.4.1 Kule Normal Kuvvetleri

Boğaziçi Köprüsü'nün LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre statik analiz sonuçlarında normal kuvvet değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi dikkate alınmıştır. LP malzemelerin, kule yüksekliği boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, elde edilen LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik sonuçları, çelik malzemenin kullanıldığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak elde edilen maksimum normal kuvvet değerleri Şekil 3.9’ da verilmiştir. Analizlerde, çelik için, kuledeki maksimum normal kuvvet değeri 98609,505 kN’dur. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 35774,606 kN ve LP-Eşdeğer

Dayanım için 17030,495 kN olarak tespit edilmiştir. Lifli polimer malzemelerin çeliğe oranla daha hafif olması nedeni ile normal kuvvet değerlerinin çelik için yüksek olması normaldir.



Şekil 3.9. Boğaziçi Köprüsü'nün, statik analizi sonucunda elde edilen normal kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi

3.4. Dinamik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

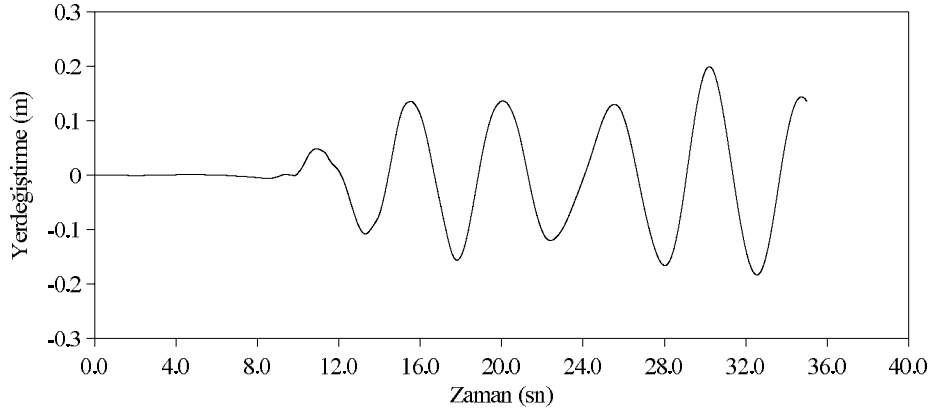
3.4.1 Yerdeğiştirmeler

3.4.1.1 Tabliye Düşey Yerdeğiştirmeleri

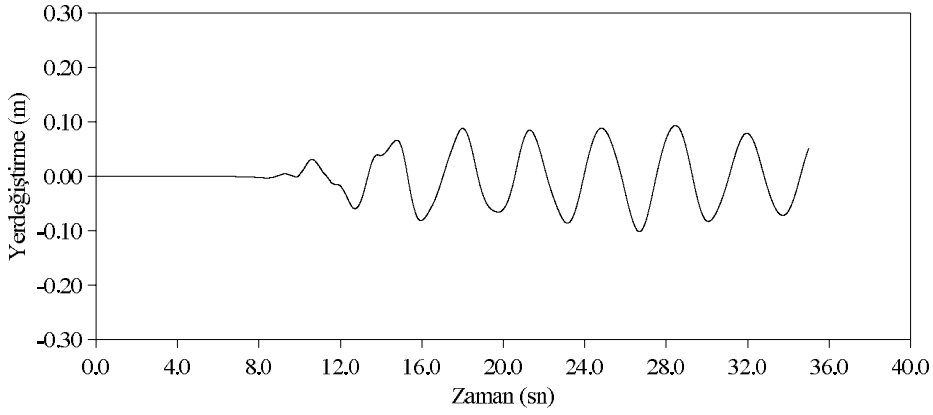
Statik analizlerden elde edilen maksimum yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde, yerdeğiştirmelerin tabliye orta noktasında maksimum olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle dinamik analizlerde Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için tabliye orta noktaya ait yerdeğiştirmelerin, zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum yerdeğiştirme değerleri çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için sırasıyla 0,1994 m, 0,09329 m ve 0,06156 m olarak elde edilmiştir. Dinamik analizler sonucunda

elde edilen maksimum yerdeşistirmelerin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimleri Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmektedir.

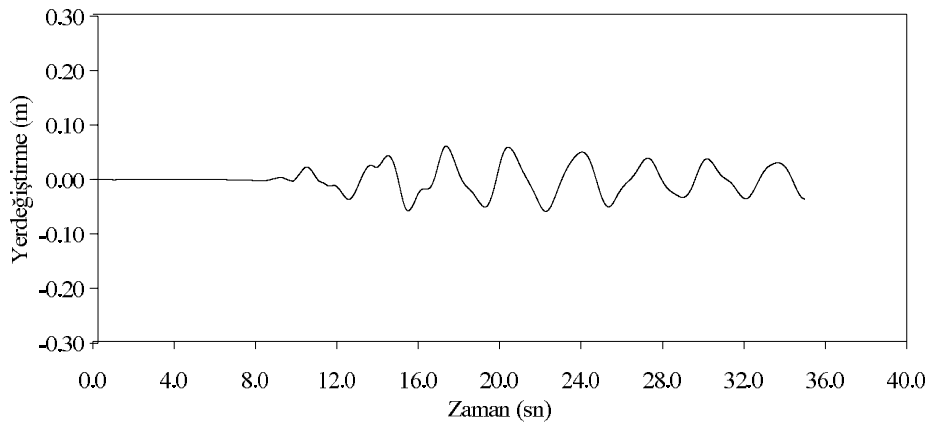
LP malzemelerin, etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında meydana gelen düşey yerdeğistirme değerlerinin tabliye boyunca değişimi elik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma bağlı olarak, karşılaştırmalı olarak Şekil 3.13’de verilmiştir.



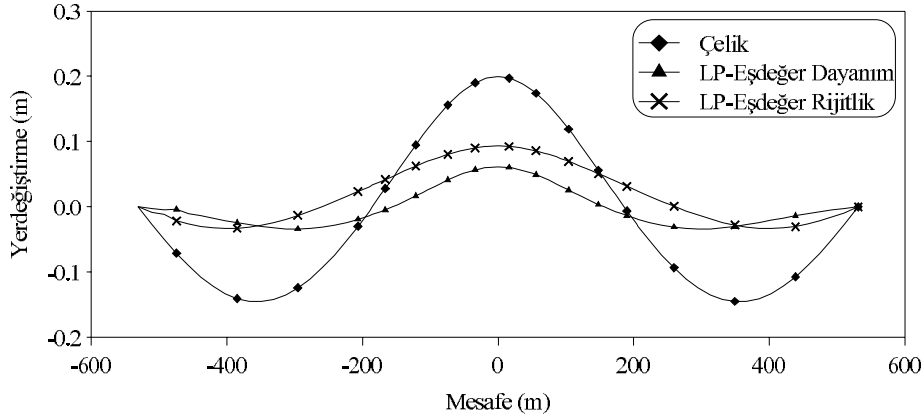
Şekil 3.10. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.11. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.12. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi

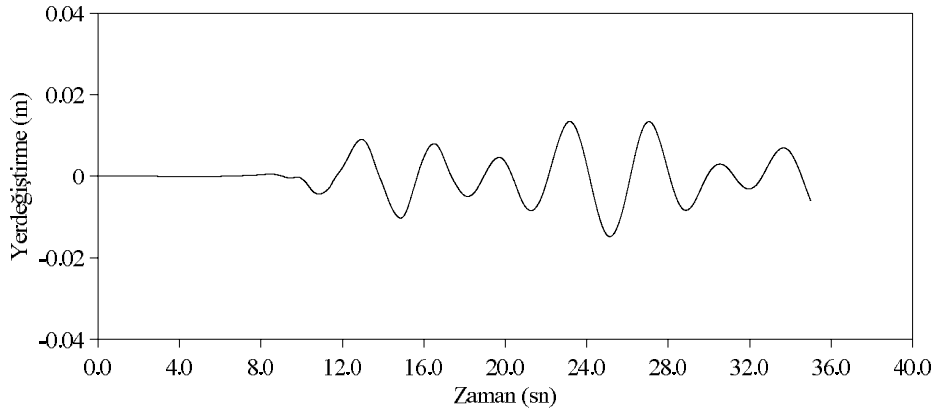


Şekil 3.13. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin, tabliye boyunca değişimi

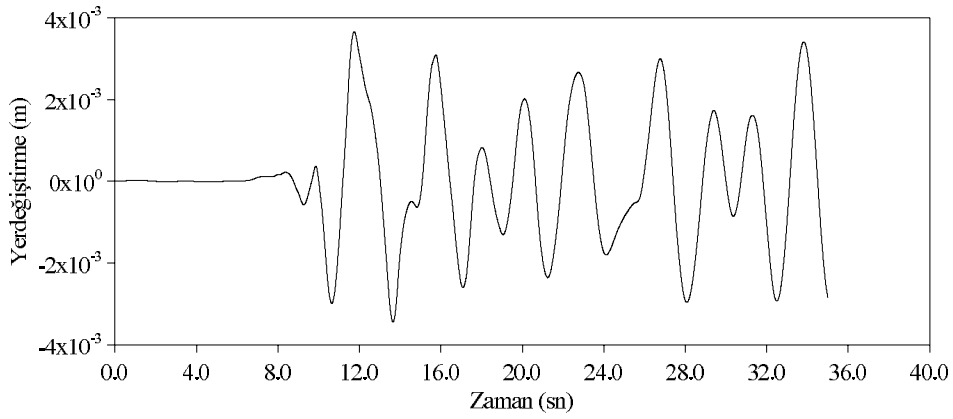
3.4.1.2 Kule Yatay Yerdeğiştirmeleri

Statik analizlerden elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde, yerdeğiştirmenin kule üst noktalarında maksimum olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde kule tepe noktaları dikkate alınmıştır. Buna bağlı olarak, çelik malzemenin kullanıldığı modelde, kulenin 8 numaralı düğüm noktasındaki maksimum yerdeğiştirme değeri 0,01479 m' dir. LP-Eşdeğer Rijitlik yöntemine bağlı olarak elde edilen sonuçlarda ise maksimum yerdeğiştirme değeri, kulenin 9 numaralı tepe noktasında meydana gelmiş ve değeri 0,003664 m olarak belirlenmiştir. LP-Eşdeğer Dayanımına göre kulenin 8 numaralı düğüm noktasındaki maksimum yatay yerdeğiştirme değeri ise 0,003291 m olarak belirlenmiştir. Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kulede zamana bağlı değişimleri, çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanımına bağlı olarak, sırası ile Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'de verilmektedir.

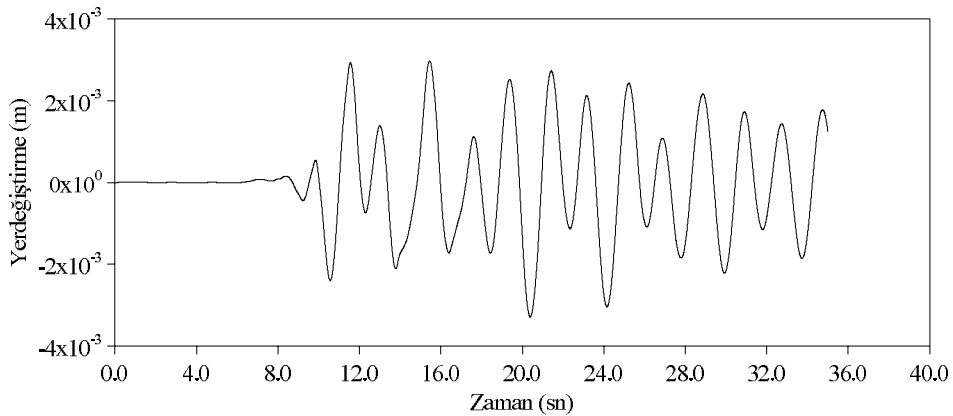
LP malzemelerin, etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında meydana gelen yatay yerdeğiştirme değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi, çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanımına bağlı olarak, karşılaştırmalı olarak Şekil 3.17'de verilmiştir.



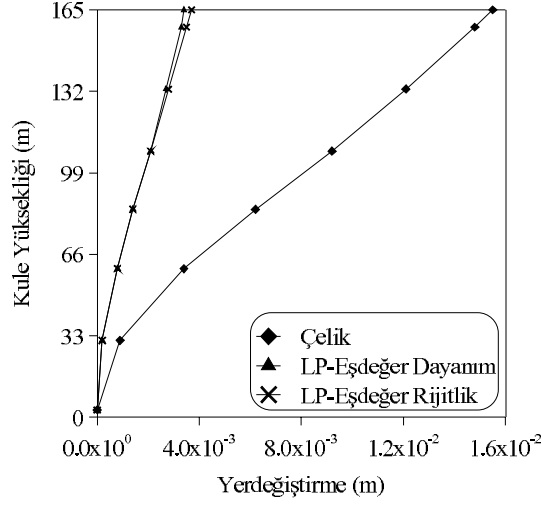
Şekil 3.14. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.15. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.16. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi



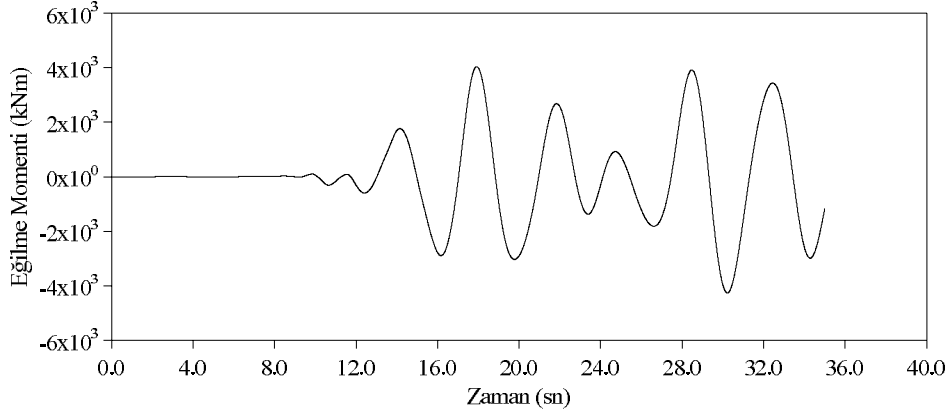
Şekil 3.17. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi

3.4.2. Eğilme Momentleri

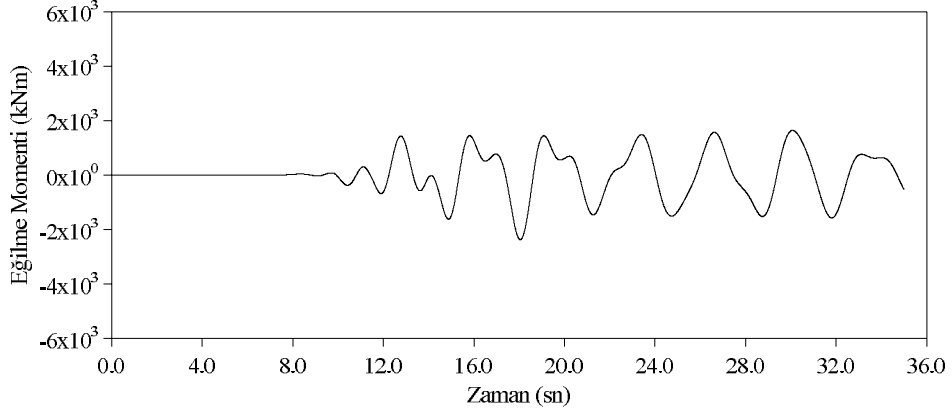
3.4.2.1. Tabliye Eğilme Momentleri

Çalışmada statik analizlerden elde edilen maksimum eğilme momenti değerleri incelendiğinde, yerdeğiştirmelerin tabliye orta noktasında maksimum olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla eğilme momentlerinin tabliye orta noktasındaki elemanda maksimum olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde tabliye orta noktasındaki elemana ait eğilme momenti değerinin, zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum eğilme momenti değerleri çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için sırasıyla, 4266 kNm, 2375 kNm, 918,7 kNm olarak elde edilmiştir. Dinamik analizler sonucunda elde edilen maksimum eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimleri Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de verilmektedir.

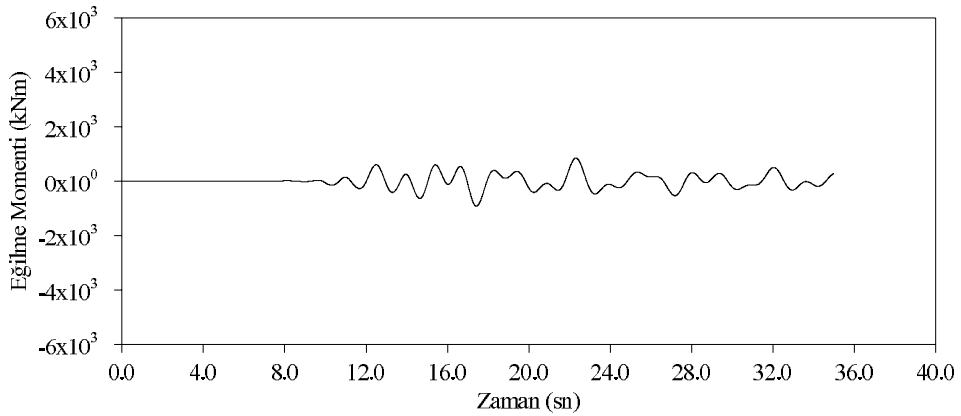
LP malzemelerin, tabliye boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında, tabliye boyunca meydana gelen, eğilme momenti değişimi, çelik için ve LP-Eşdeğer yöntemlere bağlı olarak Şekil 3.21' de verilmiştir.



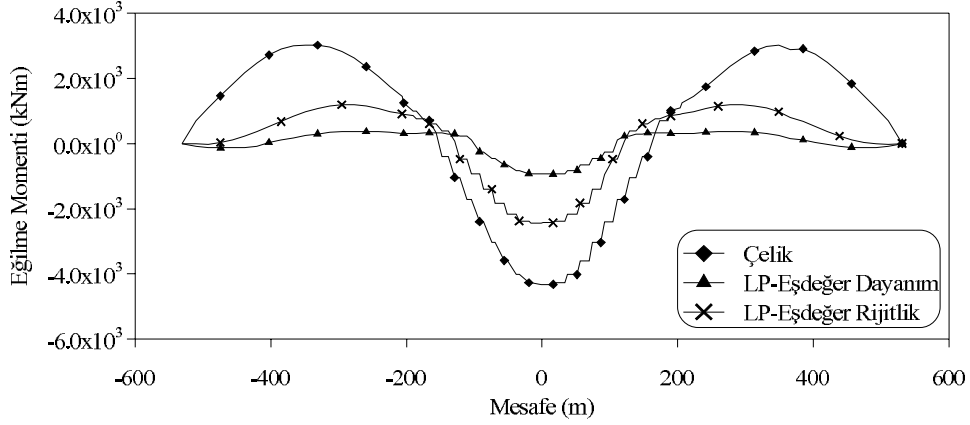
Şekil 3.18. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.19. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.20. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca zamana bağlı değişimi

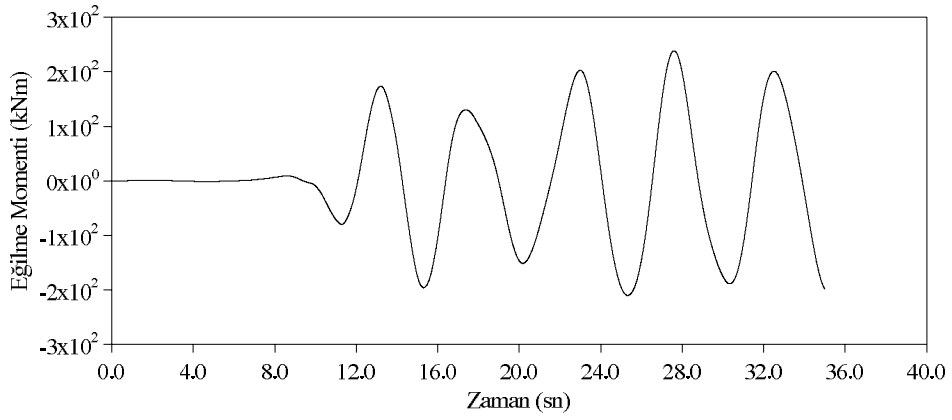


Şekil 3.21. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi

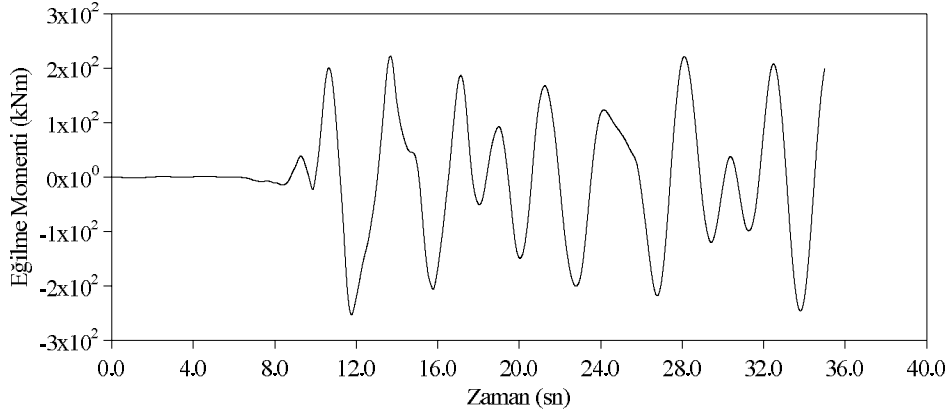
3.4.2.2. Kule Eğilme Momentleri

Statik analizlerden elde edilen maksimum eğilme momenti değerleri incelendiğinde çelik ve LP-Eşdeğer Dayanım yöntemine göre maksimum eğilme momenti kule tepe noktalarında oluşmuştur. LP-Eşdeğer Rijitlik yönteminde ise, maksimum eğilme momenti değeri kule tabanında meydana gelmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde maksimum statik eğilme momenti değerine dikkat edilmiştir. Buna bağlı olarak dinamik analizlerde, çelik için, kule tepe noktasındaki elemanda maksimum eğilme momenti değeri 238,7 kNm' dir. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik için, kule tepe noktasındaki maksimum eğilme momenti değeri, LP-Eşdeğer Dayanıma göre 36,15 kNm'dir. LP-Eşdeğer Rijitliğe göre ise maksimum eğilme momenti kule tabanındaki elemanda belirlenmiştir ve değeri, 252,8 kNm 'dir. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma ait maksimum eğilme momenti değerlerinin, zamana bağlı değişimleri Şekil 3.22, Şekil 3.23 ve Şekil 3.24' te sırası ile verilmiştir.

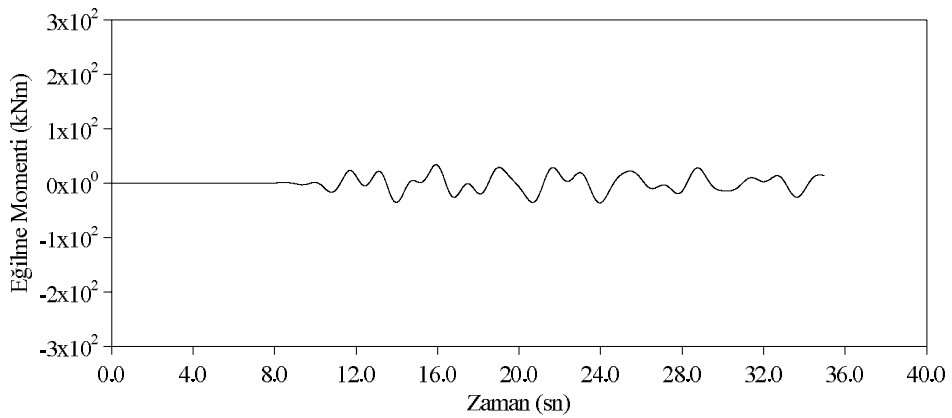
LP malzemelerin, kule yüksekliği boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında, kulede meydana gelen, eğilme momenti değişimi, çelik malzemesinin kullanıldığı yöntem ve lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer yöntemlere bağlı olarak Şekil 3.25' de verilmiştir.



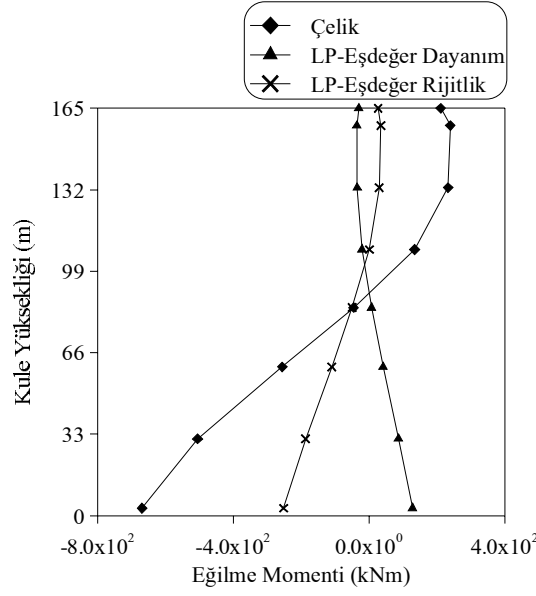
Şekil 3.22. Çelik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.23. LP-Eşdeğer Rijitlik için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi



Şekil 3.24. LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca zamana bağlı değişimi

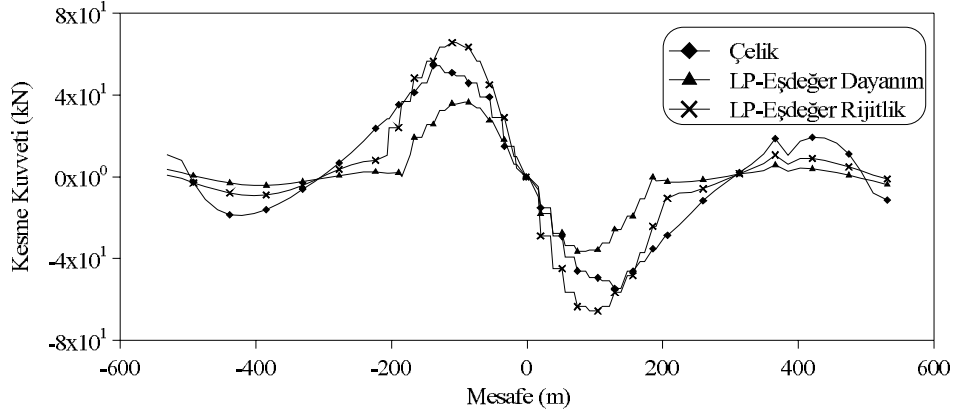


Şekil 3.25. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen eğilme momenti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi

3.4.3. Kesme Kuvvetleri

3.4.3.1. Tabliye Kesme Kuvvetleri

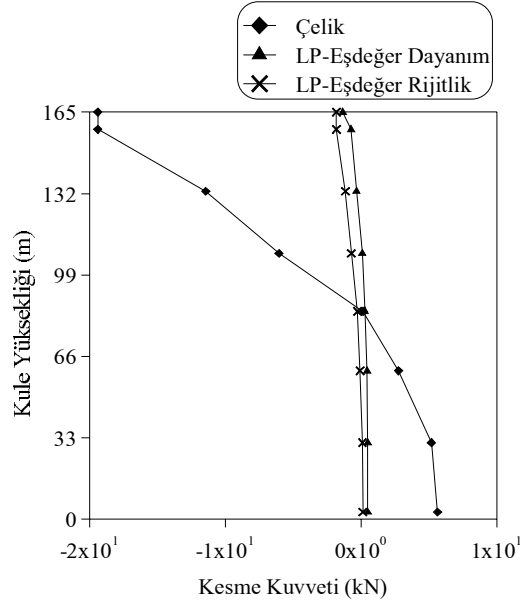
Statik analizlerden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri incelendiğinde, kesme kuvvetinin tabliye orta noktasına yakın bölgelerde maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde kesme kuvvetinin maksimum olduğu eleman dikkate alınmıştır. Buna bağlı olarak, geleneksel malzemenin kullanıldığı modelde, tabliyede maksimum kesme kuvveti değeri 46,18 kN' dir. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitliğe göre, tabliyede oluşan kesme kuvveti değerleri, LP-Eşdeğer Dayanımına göre 25,71 kN değerindedir. LP-Eşdeğer Rijitliğe bağlı olarak elde edilen sonuçlarda ise kesme kuvveti değeri, 56,58 kN olarak belirlenmiştir. LP malzemelerin, tabliye boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında, tabliye boyunca meydana gelen, kesme kuvveti değişimi, geleneksel çeliğe ve lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğere bağlı olarak Şekil 3.26' de verilmiştir.



Şekil 3.26. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, tabliye boyunca değişimi

3.4.3.2. Kule Kesme Kuvvetleri

Statik analizlerden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri incelendiğinde, kesme kuvvetinin, kule yüksekliği boyunca değişmediği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, geleneksel malzemenin kullanıldığı modelde, kulede maksimum kesme kuvveti değeri 11,44 kN' dur. Kulede oluşan kesme kuvveti değerleri, LP-Eşdeğer Dayanıma göre 0,7358 kN ve LP-Eşdeğer Rijitliğe göre 1,147 kN olarak belirlenmiştir. LP malzemelerin, kule boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında, kule yüksekliğinde meydana gelen, kesme kuvveti değişimi, geleneksel çelik ve lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer yöntemlere bağlı olarak Şekil 3.27' da verilmiştir.

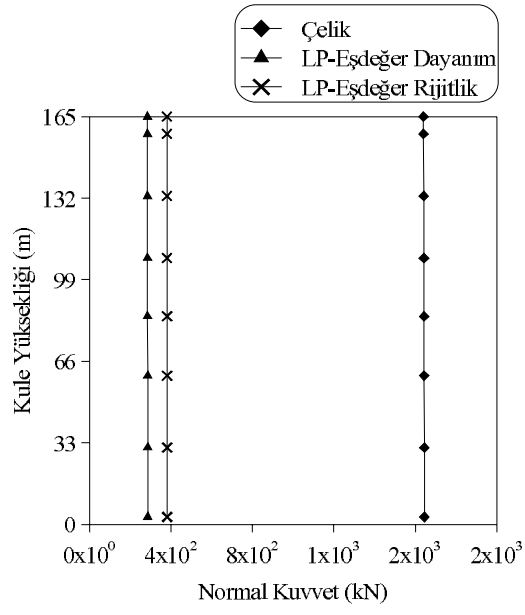


Şekil 3.27. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi

3.4.4. Normal Kuvvetler

3.4.4.1. Kule Normal Kuvvetleri

Statik analizlerden elde edilen maksimum normal kuvvet değerleri incelendiğinde, normal kuvvetinin, kule yüksekliği boyunca azalarak değiştiği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, geleneksel malzemenin kullanıldığı modelde, kulede maksimum normal kuvvet değeri 1645 kN' dur. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı Eşdeğer Dayanım ve Eşdeğer Rijitlik yöntemlerine göre, kulede oluşan normal kuvvet değerleri, Eşdeğer dayanım yöntemine göre 285,2 kN ve Eşdeğer rijitlik yöntemine göre 381 kN olarak belirlenmiştir. LP malzemelerin, kule boyunca etkilerini daha iyi görmek amacıyla, deprem esnasında, kule yüksekliğinde meydana gelen, normal kuvvet değişimi, geleneksel çelik malzemesinin kullanıldığı yöntem ve lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer yöntemlere bağlı olarak Şekil 3.28' de verilmiştir.



Şekil 3.28. Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, Boğaziçi Köprüsü'nün, dinamik analizi sonucunda elde edilen normal kuvvet değerlerinin, kule yüksekliği boyunca değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, lifli polimer kompozit malzemedan yapılmış bir asma köprüünün statik ve dinamik davranışı incelenmiştir. Aynı köprü modeli çelik malzemeli olarak da analiz edilmiş ve analiz sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Çalışmada, Boğaziçi Köprü'sü örnek olarak seçilmiştir. Statik analizlerde köprüünün kendi ağırlığı, dinamik analizlerde ise geometrik olarak lineer olmama durumu ve P- Δ etkileri dikkate alınmıştır. Deprem kuvveti olarak 1999 yılında meydana gelen Kocaeli Depremi'nin Yarımca Petro-Kimya Tesisleri'nden elde edilen deprem ivme kaydının, düşey ivme bileşeni kullanılmıştır. Zaman tanım alanı yöntemine göre dinamik analizler yapılmış, sönüm oranı %2,0 olarak seçilmiştir, 20 mod dikkate alınmıştır. Bu tez kapsamında, Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Modal analizlere bağlı olarak edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

✓ Modal analizlerde, farklı mod frekanslarına rağmen, Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre benzer mod şekilleri elde edilmiştir.

✓ Mod şekillerine bağlı olarak, LP-Eşdeğer Dayanım yöntemi geleneksel yöntemle daha yakın davranış göstermektedir.

✓ Çelik köprü için hesaplanan frekans değerleri "0,11269Hz" ile "0,55993Hz" aralığında değişmektedir. LP-Eşdeğer Rijitlik için elde edilen frekans değerleri "0,18981Hz" ile "0,95973Hz" aralığındadır. LP-Eşdeğer Dayanım için, frekans değerleri "0,19454Hz" ile "0,72752Hz" arasında değişmektedir. LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitliğe bağlı olarak elde edilen frekans değerleri, Çelik için elde edilen frekans değerlerinden büyüktür. Lifli polimer malzemelerin, çelik malzemeye göre hafif olması ve LP rijitliğinin çelikten üstün olması nedeni ile LP köprü frekansları büyük çıkmıştır.

Statik analizler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

✓ Çelik için; tabliye orta noktasındaki düşey yerdeğiştirme değeri 9,84 m'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 3,99 m ve LP-Eşdeğer Dayanım için 2,54 m olarak belirlenmiştir. Lifli polimer malzemelerin birim ağırlıklarının, çelik malzemeye oranla daha hafif olması ve LP'lerin düşük elastisite modülüne rağmen yüksek dayanıma sahip olması bu değerlerin elde edilmesine imkân vermiştir.

✓ Çelik için, kule tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirme değeri 0,804 m'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 0,310 m ve LP-Eşdeğer Dayanım için 0,194 m olarak tespit edilmiştir. Yapının kendi ağırlığı dikkate alınarak yapılan bu analizde, lifli polimer malzemenin, çeliğe oranla daha hafif olması nedeni ile kule tepe noktasındaki yatay yerdeğiştirme değeri, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanımda daha azdır.

✓ Çelik için, tabliyedeki maksimum eğilme momenti değeri 45588,046 kNm'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 24409,027 kNm ve LP-Eşdeğer Dayanım için 8897,845 kNm olarak tespit edilmiştir. Çelik malzemesinin ağır olması nedeni ile rijitliğinin, lifli polimerlere oranla düşük olması, yapının düşey yerdeğiştirme değerlerinin daha fazla olmasına neden olmuştur. Dolayısı ile çelik için eğilme momenti değerleri, LP-Eşdeğer Rijitliğe ve LP-Eşdeğer Dayanıma göre daha fazladır.

✓ Çelik için, kuledeki maksimum eğilme momenti değeri 82729,367 kNm'dir. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 20965,463 kNm ve LP-Eşdeğer Dayanım için 19112,916 kNm olarak tespit edilmiştir. Lifli polimer malzemenin hafif ağırlığı ve çeliğe oranla daha rijit olması nedeni ile eğilme momenti değerlerinin daha düşük olması, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için normaldir.

✓ Tabliye orta noktasında maksimum eğilme momenti tespit edilmiştir. Dolayısı ile kesme kuvveti değeri tabliye orta noktasında 0 'dır. Analizlerde, çelik için, maksimum kesme kuvveti değeri 4331,054 kN'dur. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 1667,984 kN ve LP-Eşdeğer Dayanım için 786,213 kN olarak tespit edilmiştir.

✓ Çelik için, kuledeki maksimum kesme kuvvet değeri 545,742 kN'dur. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 220,488 kN ve LP-Eşdeğer Dayanım için 193,043 kN olarak tespit edilmiştir. LP kompozitlerin birim ağırlığının düşük olması nedeni ile kulede etkili olan tesir kuvvetleri düşüktür.

✓ Çelik için, kuledeki maksimum normal kuvvet değeri 98609,505 kN'dur. Bu değer, LP-Eşdeğer Rijitlik için 35774,606 kN ve LP-Eşdeğer Dayanım için 17030,495 kN olarak tespit edilmiştir. Lifli polimer malzemelerin çeliğe oranla daha hafif olması nedeni ile normal kuvvet değerlerinin çelik için yüksek olması normaldir.

Dinamik analizler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

✓ Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için tabliye orta noktasına ait yerdeğiştirmelerin, zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum yerdeğiştirme değerleri Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için sırasıyla 0,1994 m, 0,09329 m ve 0,06156 m olarak elde edilmiştir.

✓ Çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, kule tepe noktaları dikkate alınmıştır. Buna bağlı olarak, çelik malzemenin kullanıldığı modelde, kulenin 8 numaralı noktasındaki maksimum yerdeğiştirme değeri 0,01479 m' dir. LP-Eşdeğer Rijitlik yöntemine bağlı olarak elde edilen sonuçlarda ise maksimum yerdeğiştirme değeri, kulenin 9 numaralı tepe noktasında meydana gelmiş ve değeri 0,003664 m' dir. LP-Eşdeğer Dayanıma göre kulenin 8 numaralı noktasındaki maksimum yatay yerdeğiştirme değeri ise 0,003291 m olarak belirlenmiştir.

✓ Eğilme momenti değerleri incelendiğinde, statik yerdeğiştirmelerin tabliye orta noktasında maksimum olması nedeni ile eğilme momentlerinin tabliye orta noktasındaki elemanda maksimum olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde tabliye orta noktasındaki elemana ait eğilme momenti değerinin, zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Maksimum eğilme momenti değerleri çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için sırasıyla, 4266 kNm, 2375 kNm, 918,7 kNm olarak elde edilmiştir.

✓ Statik analizlerden elde edilen maksimum eğilme momenti değerleri incelendiğinde çelik ve LP-Eşdeğer Dayanım yöntemine göre maksimum eğilme momenti kule tepe noktalarında oluşmuştur. LP-Eşdeğer Rijitlik yönteminde ise, maksimum eğilme momenti değeri kule tabanında meydana gelmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde maksimum statik eğilme momenti değerine dikkat edilmiştir. Buna bağlı olarak dinamik analizlerde, çelik için, kule tepe noktasındaki elemanda maksimum eğilme momenti değeri 238,7 kNm' dir. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitlik için, kule tepe noktasındaki maksimum eğilme momenti değeri, LP-Eşdeğer Dayanıma göre 36,15 kNm'dir. LP-Eşdeğer Rijitliğe göre ise maksimum eğilme momenti kule tabanındaki elemanda belirlenmiştir ve değeri, 252,8 kNm 'dir.

✓ Statik analizlerden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri incelendiğinde, kesme kuvvetinin tabliye orta noktasına yakın bölgelerde maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu nedenle çelik, LP-Eşdeğer Rijitlik ve LP-Eşdeğer Dayanım için, dinamik analizlerde kesme kuvvetinin maksimum olduğu eleman dikkate alınmıştır. Buna bağlı olarak, geleneksel malzemenin kullanıldığı modelde, tabliyede maksimum kesme kuvveti değeri 46,18 kN' dur. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı LP-Eşdeğer Dayanım ve LP-Eşdeğer Rijitliğe göre, tabliyede oluşan kesme kuvveti değerleri, LP-Eşdeğer Dayanıma

göre 25,71 kN değerindedir. LP-Eşdeğer Rijitliğe bağlı olarak elde edilen sonuçlarda ise kesme kuvveti değeri, 56,58 kN olarak belirlenmiştir.

✓ Statik analizlerden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri incelendiğinde, kesme kuvvetinin, kule yüksekliği boyunca değişmediği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, geleneksel malzemenin kullanıldığı modelde, kulede maksimum kesme kuvveti değeri 11,44 kN' dur. Kulede oluşan kesme kuvveti değerleri, LP-Eşdeğer Dayanıma göre 0,7358 kN ve LP-Eşdeğer Rijitliğe göre 1,147 kN olarak belirlenmiştir.

✓ Statik analizlerden elde edilen maksimum normal kuvvet değerleri incelendiğinde, normal kuvvetinin, kule yüksekliği boyunca azalarak değiştiği tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, geleneksel malzemenin kullanıldığı modelde, kulede maksimum normal kuvvet değeri 1645 kN' dur. Lifli polimer malzemenin kullanıldığı Eşdeğer Dayanım ve Eşdeğer Rijitlik yöntemlerine göre, kulede oluşan normal kuvvet değerleri, Eşdeğer dayanım yöntemine göre 285,2 kN ve Eşdeğer rijitlik yöntemine göre 381 kN olarak belirlenmiştir.

Beklenildiği gibi LP kompozit ve çelik köprü tasarımları arasındaki bu farklar, her iki köprünün mekanik ve fiziksel malzeme özelliklerinin çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. LP kompozitlerin ana karakteristik özelliklerinden biri, kendilerine özgü yüksek dayanım ve rijitlikleridir. Uzun açıklıklı asma köprü gibi uygulamalarda yapının kendi ağırlığı, tabliyede deformasyon oluşturur. Bu durumda yapının normal kuvvet değerleri fazladır. Dolayısıyla kesme ve eğilme momenti değerleri de fazladır. LP kompozit ve çelik ağırlıklarının karşılaştırılmasında, deplasmanlarda ve içsel kuvvetlerde önemli farklar ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak FRP kompozit köprülerin çelik köprülere göre daha hafif ağırlıklı olmaları, LP kompozit köprü frekanslarının, çelik köprülere göre büyük çıkmasına yardımcı olur.

Aynı yükleme altında, çeliğe oranla daha fazla yerdeğiştirme LP kompozitlerde sağlanabilir. Buna bağlı olarak, LP kullanılan asma köprülerde kablo deformasyonlarının fazla olabileceği göz önüne alınmalıdır. Çünkü LP' lerin birim uzama miktarlarının fazla olması yapısal rijitliğin etkilenmesine sebep olabilir.

Lifli kompozitlerin hafif ağırlıkları ve mekanik özelliklerinin iyi derecede olması, onları uygulamalar için üstün kılmaktadır. Buna rağmen kompozitlerin hafif ağırlığı, asma köprü tabliye uygulamaları için dikkatleri üstüne çekmiştir. Aerodinamik performans ve rüzgâr etkilerine karşı davranışların incelenmesinin de uygulama güvenliği açısından önemi büyüktür. Yüksek eğilebilirliği nedeni ile kablo destekli köprüler, rüzgâr etkilerine karşı çok hassastır. Uzun açıklıklı asma köprüler için, yapısal ölü yük azalımı, yapının

yerçekimine karşı rijitliğini çok geliştirmektedir. Bu nedenle, ana kablolarda düşük elastisite modülü ve kütleli lifli polimer malzeme kullanımına dikkat edilmelidir.

LP kompozitlerin uygulama methodlarına ve kompozit içeriğine dikkat edilmelidir. Kompozitlerin lif doğrultusundaki dayanımları daha yüksektir. Aynı zamanda içerisindeki lif çeşidi, yoğunluğu, doğrultusu gibi özellikler kompozit dayanımını etkilemektedir. Dolayısıyla onarım ve güçlendirme uygulamalarında bu dikkate alınmalıdır.

Korozyona ve termal etkilere karşı direnç potansiyeli, yüksek dayanım ve rijitlik, birim ağırlıklarının hafif olması gibi avantajlarının yanında, yeni ve gelişmekte olan bir malzeme olan kompozitlerin maliyetleri efektif olarak yüksektir. Bu durum LP kompozitlere dezavantaj sağlasa da, onarım, güçlendirme ve bakım masrafları düşünüldüğünde geleneksel malzemelere oranla çok daha ekonomik olmaktadır.

4. KAYNAKLAR

- Abdel-Ghaffar, A.M. ve Rubin, L.I.,1983. Vertical Seismic Behaviour of Suspension Bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 1-19.
- Adanur, S., 1997. Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan ve Elastik Zemin Analajisi ile Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Adanur, S., 2003. Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Maruz Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan Deterministik ve Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Adanur, S., Mosallam, A.S., Shinozuka, M. ve Gümüsel, L., 2011. A Comparative Study on Static and Dynamic Responses of FRP Composite and Steel Suspension Bridges, Journal of Reinforced Plastics and Composites, DOI: 10.1177/0731684411418391.
- Aksoğan, O., 1986. Nonlinear Yapı Analizi, Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler, Editör Ertepinar, A., Wasti, S.T., Aksoğan, O., 225-233, KTÜ Basımevi, Trabzon.
- Altay, S., 2010. Experimental Investigation and 3D Cyclic Finite Element Simulation of R/C Exterior Beam-Column Joints Retrofitted with CFRP Composite Materials, Doctor of Philosophy, Boğaziçi University.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aref, A., Kitane, Y. and Lee, G.C., 2004. Static and Fatigue Testing of Hiybrid Fiber - Reinforced Polymer - Concrete Bridge Superstructure, Journal of Composites for Construction, 8, 2, 182-190.
- Aref, A., Kitane, Y. ve Lee, G.C., 2005. Analysis of Hybrid FRP - Concrete Multi - Cell Bridge Superstructure, Composite Structures, 69, 5346-359.
- Aref, A.J. ve Parsons, I.D., 2000. Design and Performance of Modular Fiber Reinforced Plastic Bridge, Composites, Part B 31, 619-628.
- Bakis, C.E, Bank, L.C, Brown V.L., Cosenza E., Davalos J.F., Lesko J.J., Machida A., Rizkalla S.H. ve Triantafillou T.C., 2002. Fiber Reinforced Polymer Composites for Construction,State-of-The-Art Review, Journal of Composites for Construction, 6, 2, 73-87.
- Benjamin, T., P.E. ve Walter P., 1998. A Successful Beginning for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials in Bridge Applications, International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, December 7-11, Orlando, FL.

- Binici, B. and Bayrak O., 2005. Upgrading of Slab-Column Connections Using Fiber Reinforced Polymers, Engineering Structures, 27, 1, 97-107.
- Binici, B. and Mosalam Khalid M., 2007. Analysis of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with Fiber Reinforced Polymer Lamina, Composites Part B-Engineering, 38, 2, 265-276.
- Binici, B., 2005. An Analytical Model For Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, Engineering Structures , 27, 7, 1040-1051.
- Binici, B., 2008. Design Of FRPs in Circular Bridge Column Retrofits for Ductility Enhancement, Engineering Structures, 30, 3, 766-776.
- Binici, B., Özcebe G. and Özcelik R., 2007. Analysis and Design of FRP Composites for Seismic Retrofit of Infill Walls In Reinforced Concrete Frames, Composites Part B-Engineering, 38, 5-6, 575-583.
- Brown, W.C. ve Parsons, M.F., 1975. Bosphorus Bridge, Part I, History of Design, Proc. Instn Civil Engineers, 58, 505-532.
- Bulson, P.S., Caldwell, J.B. ve Severn, R.T., 1983. Engineering Structures Developments in the Twentieth Century, The University of Bristol Press, Bristol.
- Candan, Y., 2007. Düşük Dayanımlı Beton Panellerin İleri Teknoloji Malzemeler İle Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Celasun, H.S., 1981. Asma Köprüler, İ.D.M.M. Akademisi Yayın Müd. Basımevi, İstanbul.
- Chen, W.F. ve Duan, L., 2000. Bridge Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton.
- Chen, W.F., 1999. Structural Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton.
- Cheng, L., and Karbhari V.M., 2006. New Bridge Systems Using FRP Composites And Concrete: A State-Of-The-Art Review, Progress In Structural Engineering And Materials, 8, 4, 143-154.
- Doğan, A.B., 2008. Karbon Polimer Elyafı ile Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu ile Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1985. Asynchronous Seismic Analysis of Modern Suspension Bridges, Part 1: Free Vibration, University of Bristol, Bristol.
- Dumanoğlu, A.A., 1996. Structural Dynamics, Yüksek Lisans Ders Notları, (Yayımlanmamış), KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- Durmuş, A., 1998. Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi Ders Notları, (Yayımlanmamış), KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.

- Fang, L.X., Chan, S.L. ve Wong, Y.L., 1999. Strength Analysis of Semi-Rigid Steel-Concrete Composite Frames, Journal of Constructional Steel Research, 52, 3, 269-291.
- Firth, I. ve Cooper, D., 2002. New materials for New Bridges - Halgavor Bridge, UK, Structural Engineering International, 12, 2, 80-83.
- Hodhod, O.A. ve Khalifa, M.A., 1997. Seismic Performance of a Fiber – Reinforced Plastic Cable – Stayed Bridge, Structural Engineering and Mechanics, 5, 4, 399-414.
- Ilki A., Bedirhanoglu I. and Kumbasar N., 2011. Behavior of FRP-Retrofitted Joints Built with Plain Bars and Low-Strength Concrete, Journal Of Composites For Construction, 15, 3, 312-326.
- Ilki A., Demir C. and Bedirhanoglu I.vd., 2009. Seismic Retrofit of Brittle and Low Strength RC Columns using Fiber Reinforced Polymer and Cementitious Composites , Advances In Structural Engineering , 12, 3, 325-247.
- Ilki A., Kumbasar N. and Koc V., 2004. Low Strength Concrete Members Externally Confined with FRP Sheets, Structural Engineering And Mechanics, 18, 2, 167-194.
- Ilki A., Kumbasar N., 2002. Behavior of Damaged and Undamaged Concrete Strengthened by Carbon Fiber Composite Sheets, Structural Engineering And Mechanics, 13,1, 75-90.
- Ilki A., Peker O. and Karamuk E. vd., 2008. FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns, Journal of Materials in Civil Engineering , 20, 2, 169-188.
- Kaya, O., 2010. Seismic Retrofitting Of Rc Beam – Column Joints Using Composite Materials, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Khalifa, M.A., Hodhod, O.A. ve Zaki, M.A., 1996. Analysis and Design Methodology for An FRP Cable – Stayed Pedestrian Bridge, Composites, Part B 27B, 307-317.
- Mazumdar, 2002. Structural Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering, CRC Press.
- Meiarashi, S., P.E., 2002. M.ASCE, Nishizaki I. ve Kishima T., Life-Cycle Cost Of All-Composite Suspension Bridges, Journal Of Composites For Construction, 6, 4, 1, 206-214.
- Mert, N., 2007. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Plakalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Mosalam, K.M., Talaat M. and Binici B., 2007. A Computational Model for Reinforced Concrete Members Confined with Fiber Reinforced Polymer Lamina: Implementation and Experimental Validation, Composites Part B-Engineering , 38, 5-6, 598-613.
- Nangia, S., Srikanth G., Mittal A. and Biswas S., Technology Information Forecasting and

Assessment Council, http://www.tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=544:composites-in-civil-engineering&catid=85:publications&Itemid=952, 12 Mart 2011

- Özcan, O., Binici B. and Özcebe G., 2008. Improving Seismic Performance of Deficient Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber-Reinforced Polymers , Engineering Structures, 30, 6, 1632-1646.
- Özcan, O., Binici B. and Özcebe G., 2010a. Seismic Strengthening of Rectangular Reinforced Concrete Columns Using Fiber Reinforced Polymers, Engineering Structures, 32, 4, 964-973.
- Özcan, O., Binici B., Canbay E. and Ozcebe, G., 2010b. Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Columns with CFRPs, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 29, 22, 3411-3424.
- Park, S., Robertson I., Riggs R.H., 2002. A Primer for FRP Strengthening of Structurally Deficient Bridges, University of Hawaii College of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, September, 76.
- Pugsley, S.A., 1968. The Theory of Suspension Bridges, Second Edition, Edward Arnold, London.
- Serdar, C.Ü. and Binici B., 2007. Strength of Carbon Fiber Reinforced Polymers Bonded to Concrete And Masonry, Construction and Building Materials, 21, 7, 1431-1446.
- Sipahioğlu, M., 2006. Betonarme Binaların Fiber Takviyeli Polimer Sistemi İle Onarım ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Şimşek, E., 2010. Kabuk Elemanlar Kullanılarak Modellenen Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 1983. İşletmeye Açılışının 10. Yıl Dönümünde Boğaziçi Köprüsü, İstanbul.
- Tuakta, C., 2005. Use Of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Velasco, P.C.G.D., De Andrade, S.A.L., Da Silva, J.G.S., De Lima, L.R.O. ve Brito, O., 2006. A Parametric Analysis of Steel and Composite Portal Frames with Semi-Rigid Connections, Engineering Structures, 28, 4, 543-556.
- Wang, J.F. ve Li, G.Q., 2008. A Practical Design Method for Semi-Rigid Composite Frames under Vertical Loads, Journal of Constructional Steel Research, 64, 176-189.

- Yormaz, D., 2010. Seismic Behavior of Steel I-Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer: An Experimental Study, Master of Science, Izmir Institute of Technology.
- Zhang, X.J. and Ying, L.D., 2007. Aerodynamic Stability of Cable – Supported Bridges Using CFRP Cables, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 8, 5, 693-698.
- Zhang, X.J., 2008. Mechanics Feasibility of Using CFRP Cables in Super Long-Span Cable-Stayed Bridges, Structural Engineering and Mechanics, 29, 5, 30, 567-579.
- Zhao, X.L. and Zhang L., 2007. State-of-The-Art Review on FRP Strengthened Steel Structures, Engineering Structures, 29, 8, 1808-1823.
- Zheng, H., Teng, J. and Lü, Z., 2010. The Cables Behavior of Long-Span Suspension Bridge with CFRP Cable System During Erection, International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), June, Wuhan.
- URL-1 http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.html
12 Mart 2011
- URL-2 PEER <http://peer.berkeley.edu/svbin/GeneralSearch> 1999 Kocaeli Depremi, Yarımca Petro Kimya Tesisleri Deprem İvme-Zaman Kayıtları, 05 Mayıs 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Nil Arın ATABEY, 1986 yılında Erzincan'da doğdu. İlköğrenimini 1992–1997 yılları arasında Erzincan Ziya Gökalp İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini ise 1997–2004 yılları arasında Erzincan Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2005 yılında üniversite eğitimine başlamış olduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldu. Aynı yıl, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.