

HİBRİT ve ÇELİK KABLOLU KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

¹Murat GÜNAYDIN, ²Süleyman ADANUR, ³Ahmet Can ALTUNIŞIK, ⁴Mehmet AKKÖSE

¹Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane
Email: gunaydin61@hotmail.com.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
Email: sadanur@ktu.edu.tr

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
Email: ahmetcan8284@hotmail.com

⁴Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
Email: akkose@ktu.edu.tr

Özet

Yüksek dayanım, yüksek rijitlik, düşük ağırlık, iyi korozyon direnci, düşük bakım masrafı, estetik görünüm, uzun kullanım ömrü gibi olumlu özelliklerinden dolayı lifli polimer (LP) kompozit malzemeler köprülerin tamamında veya kablo, tabliye, kiriş gibi elemanlarının inşaatında sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle çeliğin uzun açıklı yapılarda beklentileri karşılayamaması, LP kompozit malzemelerin uzun açıklı köprülerde kullanımına olan eğilimi artırmıştır. Fakat bu kullanım günümüzde ekonomik ve yapısal performans gibi nedenlerden dolayı köprü elemanlarının tamamının yerine bazı yapısal elemanlarda, özellikle kablolarda tercih edilmektedir. Bu çalışmada, kabloları hibrit ve çelik olarak modellenen kablolu köprülerin dinamik davranışlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Uygulama örneği olarak Güney Kore'de inşa edilen Jindo Kablolu Köprüsü seçilmiştir. Sonlu elaman analizleri kabloların hibrit ve çelik olması durumu için ayrı ayrı gerçekleştirilerek, farklı malzemelerden oluşturulan kabloların köprünün modal ve dinamik davranışı üzerindeki etkileri ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Dinamik analizlerde, 1992 Erzincan depreminin Doğu-Batı bileşeni yer hareketi olarak kullanılmıştır. Çalışma sonunda modal analizlerden elde edilen mod şekilleri, frekanslar ile dinamik analizlerden elde edilen yerdeğiştirmeler ve kesit tesirleri her bir durum için karşılaştırılmıştır.

Giriş

Artan nüfus ve gelişmişlik düzeyine paralel olarak hızlı ve kolay ulaşım talebi de artmaktadır. Bu durum köprü, viyadük, tünel gibi ulaşım yapılarına olan gereksinimi artırmaktadır. Bu yapılar içerisinde köprüler, özellikle de uzun açıklıklı köprüler sağladıkları avantajları, estetik görünümleri, üzerlerinden geçerken hissettirdikleri, inşa edildiği yerlere kattığı prestij bakımından heyecan verici ve büyüleyici yapılarıdır.

Uzun açıklıklı köprüler günümüzde kablo destekli olarak inşa edilmektedirler. Bu köprüler asma köprüler ve kablolu köprüler diye iki şekilde inşa edilmektedirler. Kablolar tabliyeden gelen yükleri alarak köprü ayağına veya ayaklarına aktarır. Asma köprülerde tabliyeden gelen yük, tabliyeyi taşıyan belirli aralıklarla dikey veya eğik kabloların en az iki ayak arasına çekilen bir ana kabloya bağlanmasıyla ana kablo üzerinden köprü ayaklarına aktarılmaktadır.

Kablolu köprülerde ise tabliyeyi taşıyan kablolar, eğik olarak köprü ayağına doğrudan bağlanarak yük aktarımını ayaklara yaparlar.

Bu köprüler geniş vadileri, geniş nehirleri, körfezleri geçebilmek amacıyla özellikle de deniz trafiği yapılan yerlerde, su içerisinde ayak yapımının zorlaştığı alanlarda inşa edilebilmektedirler.

Asma ve kablolu köprülerin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Kablolu köprüler asma köprülere oranla önemli derecede daha rijittir. Kablolu köprüler rijitlik ve sönüm özelliklerinden dolayı, rüzgar etkilerine karşı asma köprüler kadar hassas değildirler. Bununla birlikte kablolu köprülerin hareketli yük taşıma kapasiteleri asma köprülerden daha fazla iken, sabit yüklerin taşınması hususunda asma köprülerin taşıma kapasiteleri daha fazladır. Dolayısıyla asma köprüler çok uzun açıklıkların geçilmesi için kullanılırken, kablolu köprüler asma köprülere oranla daha kısa açıklıkları geçmek için inşa edilirler. 1998 yılında Japonya'da hizmete açılan Akashi Kaikyo Köprüsü (Şekil 1) 1991 metre ana açıklığıyla dünyanın en büyük asma köprüsüdür. Bu köprüyü 1650 metre ana açıklığıyla 2009 yılında Çin'de inşa edilen Xihoumen Asma Köprüsü takip etmektedir. 2000'li yıllardan günümüze kablolu köprülerin inşa sayısında ve ana açıklık uzunluğunda önemli bir artış olmuştur. 2000'li yıllardan önce ortalama 300-500 metre açıklıklarla planlanan kablolu köprüler günümüzde 1000 metreleri aşan ana açıklıklarda inşa edilebilmektedirler. Rusya'da inşa edilen Russky Köprüsü (1104 m), Çin'de inşa edilen Sutong (1088 m) ve Stonecutters Köprüleri (1018 m) günümüzde en uzun açıklıklı inşa edilen kablolu köprülerdir.



a) Akashi Kaikyo köprüsü



b) Russky köprüsü

Şekil 1. Dünyanın en uzun ana açıklıklı asma ve kablolu köprüleri (URL-1, URL-2)

Uzun açıklıklı köprülerde kullanılan kablolar genellikle yüksek dayanımlı çelikten imal edilmektedirler. Çelik kabloların ağırlığı, korozyon ve tekrarlı yükler altında meydana

gelen yorulmalar uzun açıklıklı köprülerin yapısal davranışını olumsuz etkileyebilmektedir. Artan korozyon ve yorulma yükleri altında kablo veya askılarda fazlaca hasarların meydana geldiği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir (Watson, 1988; Hamilton ve diğ. 1995; Colford, 2008; Meier, 2012). Çelik kablolar veya askılarda meydana gelen korozyon ve erken yorulma etkileri daha uzun açıklıklı köprülerin inşasını engellemektedir.

Bu etkiler kablolarda ani ve erken çatlamalara neden olmaktadır. Dolayısıyla yüksek onarım veya yenileme masrafı ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca, kablolarda çeliğin kendi ağırlığından dolayı meydana gelen kablo sarkmaları da ana açıklığın uzamasını engellemektedir. Birçok araştırmacı çelik kabloların bu olumsuz özelliklerinin geliştirilmesi gerektiğini belirtmektedir (Meier, 2012).

Bu amaçla, araştırmacılar bir yandan çeliğin korozyon ve yorulma direncini iyileştirici çalışmalar yaparken, diğer taraftan da çeliğe alternatif, daha uzun açıklıklı köprülerin inşa edilebileceği mühendislik malzemeleri geliştirmek için çalışmalar yapmaktadırlar. Bu malzemeler arasından kompozit malzemeler oldukça ilgi çekmektedirler (Zhang, 2008).

Kompozit malzemelerin bir çeşidi olan lifli polimer (LP) kompozit malzemeler hafiflik, yüksek dayanım, yüksek rijitlik, iyi korozyon direnci, düşük bakım masrafı, estetik görünüm gibi olumlu özelliklerinden dolayı yapı mühendisliğinde de sıklıkla tercih edilmeye başlanmış olup geleneksel malzemelere (çelik, beton, ahşap) alternatif olma yolunda hızla ilerlemektedir. Farklı tür malzemelerden elde edilen kompozit liflerin yüksek dayanımlı çeliğe göre fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'den görüldüğü gibi çelik malzemeye oranla bazı LP kompozit malzemelerin çekme dayanımı yaklaşık iki kat fazla, elastisite modülleri ise genellikle çeliğe yakın bazen de daha büyük olabilmektedir. Ağırlıkları ise çelikten oldukça küçüktür. Bu malzemelerin en büyük dezavantajları üretim maliyetlerin çeliğe oranla yüksek olmasıdır.

Tablo 1. LP liflerin bazı özelliklerinin çelik ile karşılaştırılması (Mazumdar, 2002).

Malzeme	Çap(μM)	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	E (GPa)	$\sigma(\text{GPa})$	E/ ρ	σ/ρ	C^0	%	M
Lifler									
E-camı	7	2.54	70	3.45	27	1.35	1540	4.8	Düşük
S-camı	15	2.50	86	4.50	34.5	1.8	1540	5.7	Orta
Grafit#	7.5	1.7	240	2.6	140	1.5	>3500	0.8	Yüksek
Boron	130	2.6	400	3.5	155	1.3	2300	-	Yüksek
Kevlar 49	12	1.45	130	2.8	89.5	1.9	500	2.5	Orta
Katı Metal									
Çelik	-	7.8	208	0.34-2.1	27	0.04-0.27	1480	5-25	Düşük
*: Yüksek Elastisite Modülü			M: Maliyet			σ/ρ : Özgül Dayanım			
#: Yüksek Gerilme						C^0 : Erime Noktası			
%: Kopma Gerilmesi						E/ ρ : Özgül Modül			

Günümüzde LP kompozit malzemeler köprülerin onarım-güçlendirme uygulamalarında, yaya köprülerinin ayak, kablo, kiriş ve tabliyelerin imalatlarında sıklıkla tercih edilir olmuşlardır. Yapımı 1982 yılında Çin'de tamamlanan 20.7m uzunluğunda, 9.9m genişliğindeki Miyun köprüsü tamamı lifli polimer kompozit malzemeden inşa edilen ilk köprüdür. 1982-2011 yılları arasında dünyanın çeşitli yerlerinde tamamı veya kablo, tabliye, kiriş gibi elamanları LP'den inşa edilmiş 355 tane köprü rapor edilmiştir (Potyrala, 2011). Karbon LP kablolar ilk olarak 1996'da İsviçre'de inşa edilen Stork Köprüsü'nde kullanılmıştır. Stork Köprüsü'nde iki adet çelik kablo 5 mm çapında karbon LP telciklerden oluşan kablo ile değiştirilmiştir.

Değiştirilen kabloların yapısal performansı optik sensörler ile takip edilmiştir. 1992 yılında İskoçya'da inşa edilen Aberteldy Köprüsü dünyanın tamamı LP kompozit malzemeden üretilen ilk ve en uzun açıklıklı kablolu köprüsüdür. Aberteldy Köprüsü 2,2 metre genişliğinde, 63 metre ana açıklığında, 113 metre toplam uzunluğundadır. Tabliyesi cam LP'den, kabloları ise kevlar LP'den üretilmiştir. 1999'da Danimarka'da yaya ve araçlar için acil kaçış yolu olarak inşa edilen Herning Köprüsü'nün 16 çelik kablosu karbon LP'den imal edilen kablolarla değiştirilmiştir. Bu amaçla, LP kabloların yaya, araç yükleri ve çevresel etkiler altındaki yapısal davranışları incelenmiştir.

Günümüzde LP kompozit malzemeler köprülerin onarım-güçlendirme uygulamalarında, yaya köprülerinin ayak, kablo, kiriş ve tabliyelerin imalatlarında sıklıkla tercih edilir olmuşlardır. Yapımı 1982 yılında Çin'de tamamlanan 20.7m uzunluğunda, 9.9m genişliğindeki Miyun köprüsü tamamı lifli polimer kompozit malzemeden inşa edilen ilk köprüdür. 1982-2011 yılları arasında dünyanın çeşitli yerlerinde tamamı veya kablo, tabliye, kiriş gibi elamanları LP'den inşa edilmiş 355 tane köprü rapor edilmiştir (Potyrala, 2011). Karbon LP kablolar ilk olarak 1996'da İsviçre'de inşa edilen Stork Köprüsü'nde kullanılmıştır. Stork Köprüsü'nde iki adet çelik kablo 5 mm çapında karbon LP telciklerden oluşan kablo ile değiştirilmiştir. Değiştirilen kabloların yapısal performansı optik sensörler ile takip edilmiştir. 1992 yılında İskoçya'da inşa edilen Aberteldy Köprüsü dünyanın tamamı LP kompozit malzemeden üretilen ilk ve en uzun açıklıklı kablolu köprüsüdür. Aberteldy Köprüsü 2,2 metre genişliğinde, 63 metre ana açıklığında, 113 metre toplam uzunluğundadır. Tabliyesi cam LP'den, kabloları ise kevlar LP'den üretilmiştir. 1999'da Danimarka'da yaya ve araçlar için acil kaçış yolu olarak inşa edilen Herning Köprüsü'nün 16 çelik kablosu karbon LP'den imal edilen kablolarla değiştirilmiştir. Bu amaçla, LP kabloların yaya, araç yükleri ve çevresel etkiler altındaki yapısal davranışları incelenmiştir.

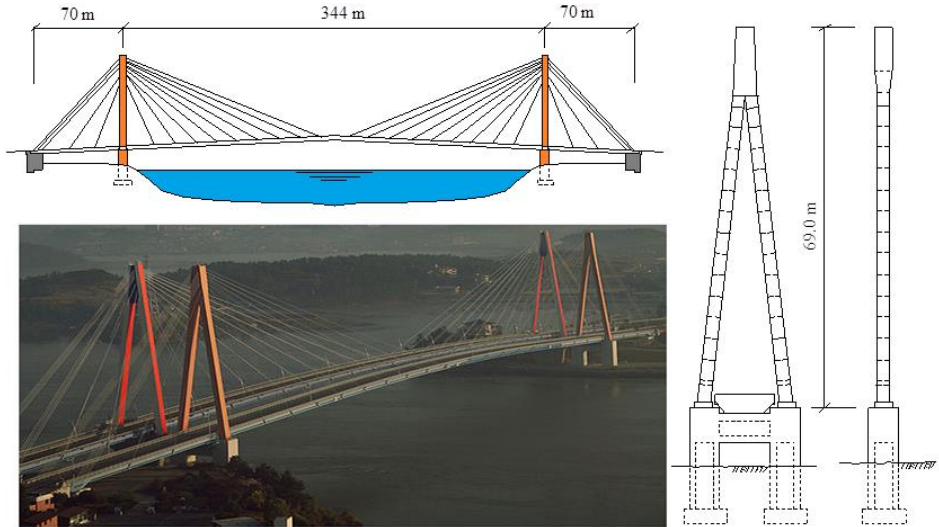
Günümüzde LP malzemelerin 150 m'den uzun açıklıklı köprülerde uygulaması olmamasına rağmen geleneksel malzemelere göre sahip oldukları üstünlükler ilerleyen yıllarda LP kompozitlerin uzun açıklıklı köprülerde kullanımı kaçınılmaz olacaktır. Bu bağlamda LP kompozitlerin uzun açıklıklı köprülerde kullanımı ile ilgili kısıtlı olan çalışmaların artırılması gerekmektedir. LP kompozitlerin uzun açıklıklı köprülerde kullanılmasının yapısal davranışa olan etkilerinin statik ve dinamik (deprem, rüzgar) etkiler altında araştırılması gerekmektedir. Bu amaçla, örnek olarak seçilen uzun açıklıklı kablolu bir köprü'nün kablolarında LP kompozit malzeme kullanılmasıyla yapısal davranışında meydana gelebilecek farklılıkların araştırılması bu çalışma kapsamında hedeflenmiştir. Örnek köprü olarak Jindo Kablolu Köprüsü seçilmiştir.

Köprü'nün yapısal davranışı kabloların çelik ve hibrit (çelik-kompozit) olması durumu için ayrı ayrı incelenerek, hibrit inşa edilen kabloların köprü'nün modal ve dinamik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Uygulama

Jindo Kablolü Köprüsü

Güney Kore'de Ekim 1984'de trafiğe açılan Jindo kablolu köprüsü (Şekil 2) uygulama örneği olarak seçilmiştir. Jindo köprüsü Jindo Adası ile ana kıyıya birbirine bağlamaktadır. Şekil 2'de genel bir şekli görülen Jindo köprüsü, 344 m olan ana açıklık ve 70'er m olan iki kenar açıklık olmak üzere, toplam üç açıklıktan oluşmaktadır. Kablolar yelpaze şeklinde tasarlanmış olup, A-Çerçeve tipindeki kulelerin tepelerinde bağlanmıştır. Kullanılan kabloların çapları 56 mm, 67 mm, 76 mm ve 87 mm'dir. Her bir kule 28 kablo taşımaktadır ve kulelerin mesnetlendikleri ayaklar üzerindeki yükseklikleri 69 m'dir. Köprü ayakları karada inşa edilen temeller üzerine inşa edilmiştir.



Şekil 2 Jindo Köprüsü

Sonlu Eleman Modeli

Jindo köprüsünün yapısal davranışını belirleyebilmek için köprü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (SAP2000 2008) programından faydalanılarak oluşturulmuştur. Köprü'nün sonlu eleman modelinde (Şekil 3) tabliye ve kuleler 139 çubuk eleman ile kablolar ise 28 tane moment aktarmayan kafes eleman ile temsil edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde bir düğüm noktası için yatay ve düşey doğrultudaki ötelenmeler ile bir dönmeden oluşan toplam üç serbestlik derecesi

vardır. Seçilen iki boyutlu sonlu eleman modeli 420 tane serbestlik derecesi ile temsil edilmiştir. Hesaplarda Jindo kablolu köprüsü için sönüm oranı % 2 alınmıştır.



Şekil 3. Jindo köprüsüne ait iki boyutlu sonlu eleman modeli.

Eğik kabloların lineer olmayan özellik, normal elastisite modülü, çökme ve çekme yükünün etkisini içeren eşdeğer elastisite modülü ile dikkate alınmıştır. Kablonun eşdeğer elastisite modülü aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$E_i = \frac{E}{1 + \left(\gamma_c^2 l^2 E / 12 \sigma^3 \right)} \quad (1)$$

Burada, E düz kablunun elastisite modülünü, l kablunun yatay izdüşüm uzaklığını, γ_c kablunun birim hacim ağırlığını, σ kablodaki çekme gerilmesini göstermektedir (Troitsky, 1988). Köprünün iki boyutlu modellenmesinde kullanılan kesit ve malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Jindo Köprüsü Kesit ve Malzeme Özellikleri.

Eleman	Malzeme Özellikleri				
	Elastisite Modülü kN/m ²	Poisson Oranı	Kesit Alanı m ²	Eylemsizlik Momenti m ⁴	Birim Hacim Ağırlık Kg/m ³
Tabliye	205000000	0.3	0.827	1.210	151.17
Tabliye	205000000	0.3	0.416	0.519	152.64
Tabliye	205000000	0.3	0.464	0.536	154.02
Tabliye	205000000	0.3	0.464	0.536	152.64
Kule	205000000	0.3	0.658	0.591	86.33
Kule	205000000	0.3	0.608	0.569	86.33
Kule	205000000	0.3	0.541	0.496	86.33
Kule	205000000	0.3	0.473	0.451	86.33
Ayak	21000000	0.3	35.600	121.420	25.00
Kablo	154000000	0.3	0.02010	-	81.72
Kablo	153600000	0.3	0.00556	-	81.72
Kablo	156100000	0.3	0.00428	-	81.72
Kablo	147600000	0.3	0.00756	-	81.72
Kablo	142400000	0.3	0.01004	-	81.72

Hibrit Kabloların Düzenlenmesi

LP kompozit kabloların yapısal davranışa olan etkilerini inceleyebilmek amacıyla Jindo köprüsünün 28 kablosunun 12 tanesi karbon LP'den imal edilen kablo ile değiştirilmiştir. Yani, 28 kablonun 16 tanesi çelik, 12 tanesi kompozit olarak analizlerde dikkate alınmıştır. Maliyet yüksekliği, yapısal davranış üzerindeki etkilerin tam olarak bilinmemesi gibi nedenlerden dolayı kabloların tamamı yerine bir kısmı kompozit olarak tasarlanmıştır. Literatürde çelik kabloların kompozitle değiştirilebilmesi için genellikle eşdeğer rijitlik ve eşdeğer dayanım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden elde edilen kesit alanları yapısal davranışın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eşdeğer dayanım ve eşdeğer rijitlik yöntemlerinde sırasıyla denklem 2 ve denklem 3 kullanılarak kablo kesitleri belirlenmektedir.

$$[\sigma]_{LP} A_{LP} = [\sigma]_{çelik} A_{çelik} \quad (2)$$

$$E_{LP} A_{LP} = E_{çelik} A_{çelik} \quad (3)$$

Denklemlerde, $[\sigma]_{LP}$ ve $[\sigma]_{çelik}$ sırasıyla LP ve çelik malzemesi için izin verilebilir gerilme değerlerini, E_{LP} ve $E_{çelik}$ sırasıyla LP ve çelik için elastisite modülünü, A_{LP} ve $A_{çelik}$ ise LP ve çelik malzemesinin kesit alanlarını ifade etmektedir. Bu çalışmada eşdeğer dayanım yöntemine göre LP kabloların kesit ve atalet kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu amaçla hesaplamalarda dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. LP Kablo Kesitlerinin Elde Edilmesinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü (GPa)	İzin Verilebilir Gerilme (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (Kg/m ³)
Çelik	142.4-156.1	980	81.72
LP	160	980	16

Tablo 3'te verilen malzeme özelliklerine göre eşdeğer dayanım yönteminden elde edilen LP kablo kesitleri denklem 4'e göre belirlenmiştir. Denklemden de anlaşılacağı üzere hesaplanan çelik ve LP kablo kesitleri aynı olup malzeme özellikleri birbirinden farklıdır.

$$A_{LP} = A_{çelik} \quad (4)$$

Dinamik Davranışının Belirlenmesi

Jindo köprüsünün dinamik davranışının belirlemek için sırasıyla köprünün modal ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz kabloların hibrit ve çelik olması durumu için tekrar edilerek elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kabloların hibrit ve çelik olması durumu için modal analizlerden elde edilen ilk 15 moda ait frekans değerleri, salınımın baskın olduğu bölge ve salınımın doğrultusu Tablo 4'te verilmektedir. Tablo 4'den de görüldüğü üzere her iki durum için elde edilen frekans ve mod şekilleri oldukça birbirine yakındır. Modlar tabliyede

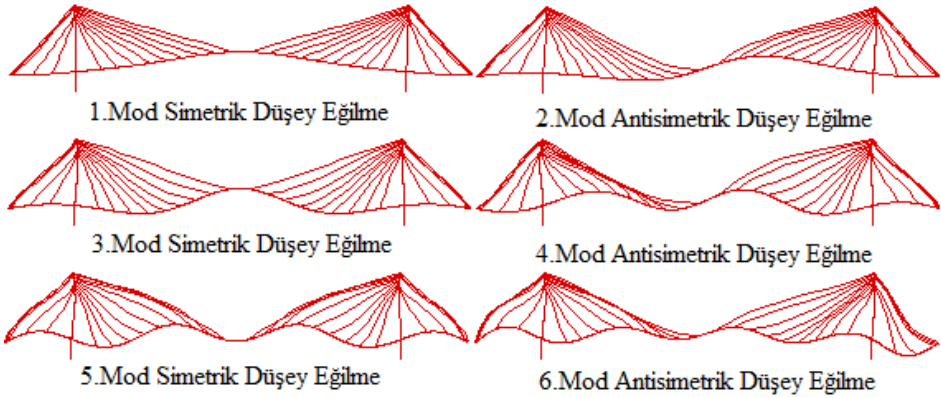
düşey salınımın farklı şekillerde ortaya çıkmasıyla, kulede ise aynı veya farklı yönlerde kulelerin eğilmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Kabloların hibrit modellenmesi mod şekillerini değiştirmemiştir. Modal analiz sonucunda ilk 6 mod Şekil 4'te verilmektedir.

Tablo 4. İlk 15 Moda ait Frekans ve Mod Şekilleri

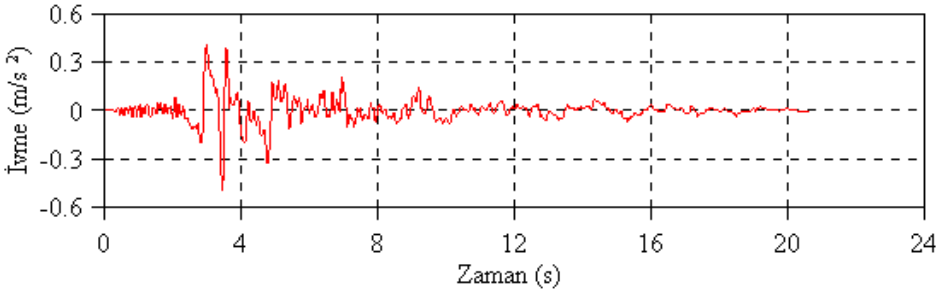
Mod No	Çelik Kablo		Hibrit Kablo	
	F (Hz)	Salınım Bölğ.-Salınım	F (Hz)	Salınım Bölğ.-Salınım
1	0.447	Tabliye-Düşey	0.454	Tabliye-Düşey
2	0.647	Tabliye-Düşey	0.656	Tabliye-Düşey
3	0.954	Tabliye-Düşey	0.962	Tabliye-Düşey
4	1.276	Tabliye-Düşey	1.288	Tabliye-Düşey
5	1.602	Tabliye-Düşey	1.613	Tabliye-Düşey
6	1.839	Tabliye-Düşey	1.851	Tabliye-Düşey
7	1.978	Kule-Batı Kulesi-Eğilme	1.996	Kule-Batı Kulesi-Eğilme
8	2.045	Kule-Batı Kulesi	2.061	Kule-Batı Kulesi
9	2.387	Tabliye-Düşey	2.403	Tabliye-Düşey
10	2.731	Kule-Farklı Yön-Eğilme	2.747	Kule-Farklı Yön-Eğilme
11	2.793	Kule-Aynı Yön-Eğilme	2.817	Kule-Aynı Yön-Eğilme
12	2.961	Tabliye-Düşey	2.973	Tabliye-Düşey
13	3.674	Tabliye-Düşey	3.699	Tabliye-Düşey
14	4.466	Kule-Farklı Yön-Eğilme	4.488	Kule-Farklı Yön-Eğilme
15	4.584	Kule-Farklı Yön-Eğilme	4.868	Kule-Farklı Yön-Eğilme

F: Frekans

Jindo köprüsünün dinamik davranışını belirlemek için yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının doğu batı bileşeni (Şekil 5) seçilmiştir. (PEER, 2015). Deprem kaydı köprüye düşey yönde 20.595s boyunca 0.005s'lik zaman adımlarıyla uygulanmıştır. Analizlerde yer hareketi ivme değerlerinin 2/3 katı dikkate alınmıştır.



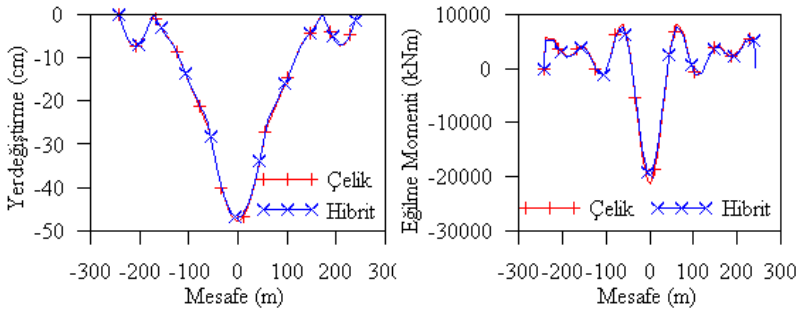
Şekil 4. Modal analizden elde edilen ilk 6 mod şekli



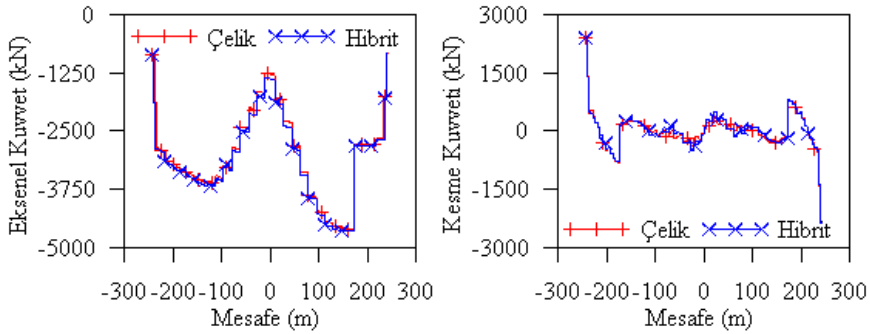
Şekil 5. 1992 Erzincan depreminin Doğu- Batı bileşenine ait ivme-zaman grafiği

Tabliye Davranışı

Hibrit ve çelik kablo durumu için dinamik analizlerden elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Düşey yerdeğiştirmeler tabliye boyunca artmakta olup tabliye ortasında maksimum olmaktadır. Hibrit kablo durumu için maksimum yerdeğiştirme yer hareketinin 6.055'inci saniyesinde 47 cm, çelik kablo durumu için ise yer hareketinin 6.095'inci saniyesinde 48 cm olarak elde edilmiştir. Hibrit ve çelik kablo durumu için maksimum eğilme momenti değerleri sırasıyla 19540 kNm (6.150'inci saniyede) ve 20630 kNm (6.160'inci saniyede) olarak tabliye orta noktasında elde edilmiştir. Şekil 6'dan da görüleceği üzere her iki durum için elde edilen değerler birbirlerine oldukça yakındır. Aksenal ve kesme kuvveti değerlerinin yer hareketi süresince maksimum elde edildiği andaki tabliye boyunca değişimleri Şekil 7'de verilmektedir. Hibrit kablo durumu için maksimum aksenal kuvvet 6.275'inci saniyede 4657 kN, çelik kablo durumu için 6.305'inci saniyede 4598 kN olarak elde edilmiştir. Maksimum kesme kuvveti değerleri ise hibrit ve çelik kablo durumu için sırasıyla 2381 kN ve 2388 kN olarak yer hareketinin 5.085'inci ve 5.105'inci saniyelerinde elde edilmiştir.



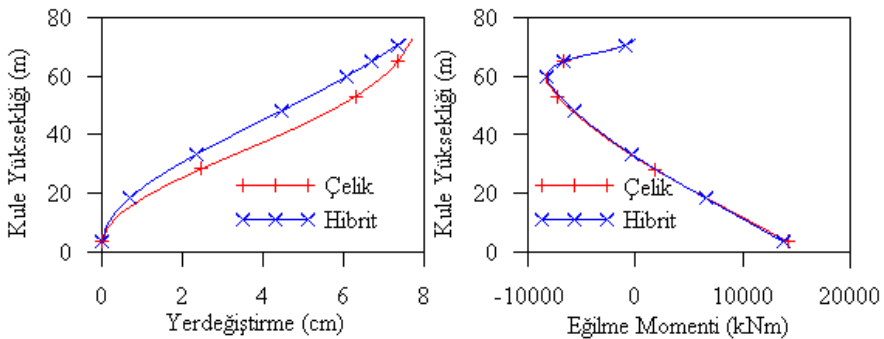
Şekil 6. Düşey yerdeğıştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değışimi



Şekil 6. Eksenel kuvvet ve kesme kuvvetlerinin tabliye boyunca değışimi

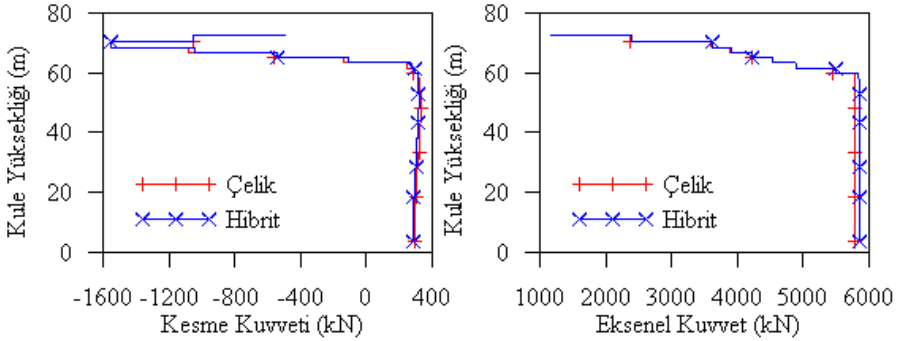
Kule Davranışı

Yerdeğıştirme ve eğilme momenti değerlerinin yer hareketi süresince maksimum elde edilme anındaki kule yüksekliği boyunca değışimleri Şekil 8'de verilmektedir. Hibrit kablo durumu için maksimum yerdeğıştirme 6.95'inci saniyede 7.5 cm, çelik kablo durumu için ise 5.015'inci saniyede 7.7 cm olarak elde edilmiştir. Maksimum eğilme momenti değerleri hibrit ve çelik kablo durumu için sırasıyla 13760 kN ve 14200 kN olarak elde edilmiştir.



Şekil 7. Maksimum yerdeğıştirme ve eğilme momenti değerlerinin değışimi

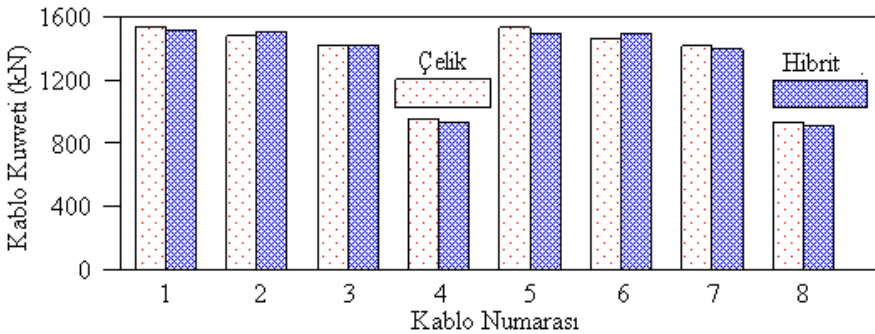
Eksenel ve kesme kuvveti değerlerinin yer hareketi süresince maksimum elde edildiği andaki kule boyunca değişimleri Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'dan görülebildiği gibi elde edilen değerler her iki durum içinde oldukça yakındır. Hibrit durum için maksimum eksenel ve kesme kuvveti değerleri sırasıyla 5855 ve 1552 kN olarak yer hareketinin 4.910'uncu ve 4.955'inci saniyelerinde meydana gelmiştir. Çelik kablo durumu için ise maksimum eksenel ve kesme kuvveti değerleri sırasıyla 5786 ve 1556 kN olarak yer hareketinin 4.925'inci ve 4.975'inci saniyelerinde elde edilmiştir.



Şekil 8. Eksenel ve kesme kuvveti kuvvetlerinin kule boyunca değişimi

Kablo Davranışı

Hibrit ve çelik olarak tasarlanan bazı kablolarda dinamik analiz sonucu elde edilen kablo kuvvetleri Şekil 10'da verilmektedir. Maksimum kablo kuvvetleri her iki durum için tabliye ayaklara bağlayan kenar açıklık kablolarında meydana gelmiştir. Hibrit ve çelik kablolarda elde edilen kuvvetler yukarıda elde edilen kesit tesirleri kuvvetleri gibi oldukça yakındır. Hibrit kablo durumu için maksimum kablo kuvveti 1509 kN olarak yer hareketinin 5.025'inci saniyesinde oluşurken çelik kablo durumu için 1536 kN olarak yer hareketinin 5.030'uncu saniyesinde oluşmuştur.



Şekil 9. Bazı kablolarda elde edilen kablo kuvvetleri

Sonuçlar

Bu çalışmada, kabloları hibrit ve çelik olarak modellenen kablolu köprülerin dinamik davranışlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Jindo Köprüsü uygulama örneği olarak seçilmiştir. Jindo Köprüsü'nün 28 kabolusunun 12 tanesi karbon LP malzemeden, diğer 16 tanesi ise çelik malzemeden tasarlanarak hibrit bir yapı oluşturulmuştur. Hibrit yapının yapısal davranışta meydana getirdiği farklılıkları inceleyebilmek için analizler kabloların çelik olması durumu içinde gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma ile aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Hibrit olarak tasarlanan 12 kablonun köprünün modal ve dinamik davranışı üzerinde çok fazla bir değişikliğe neden olmamıştır. Genel itibariyle tabliye ve kullerde meydana gelen yerdeğiştirmeler ve kesit tesiri kuvvetleri hibrit tasarım durumu için az da olsa azalmıştır.
- Kabloların hibrit tasarlanması sonucu çelik kablolarla göre kablo kuvvetleri yaklaşık %2.5 civarında azalmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki kabloların uzun açıklıklı köprülerde hibrit tasarlanması yapısal davranış üzerinde olumsuz bir etkiye neden olmamaktadır. Ayrıca, yüksek yorulma direnci, uzun kullanım ömrü, yüksek korozyon direnci, kolay montaj ve bakım gibi olumlu özellikler LP malzemeleri kablo tasarımında çeliğe göre tercih edilebilir kılabilmektedir.

Kaynaklar

1. Adanur, S., Mosallam, A.S., Shinozuka, M., Gumusel, L., (2011), "A Comparative study on static and dynamic responses of FRP composite and steel Suspension bridges", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(15), 1265-1279
2. Adanur, S., Günaydin, M., Altunışık, A.C., ve Sevim, B. (2013), "Dynamic behaviour of a cable stayed bridge using CFRP cables", *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (VEESD 2013).
3. Atabey, N. (2011), "Lifli Polimer Kompozit Asma Köprülerin Statik ve Dinamik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
4. Banck, F., ve Almborg, O.R. (2014), "Application of CFRP Cables in Super Long Span Cable Supported Bridges", *Master of Science Thesis in the Master's Programme Structural Engineering and Building Technology*, Göteborg, Sweden.
5. Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Adanur, S., ve Başağa, H.B. (2010), "Stochastic finite element analysis of long-span bridges with CFRP cables under earthquake ground motion", *Sadhana*, 35(3), 341-354
6. Colford, B. (2008), "Applying advanced bridge management plans to achieve best value and minimum disruption", In: *Proceedings of the 1st Asia Bridge Summit 2008*, Meris Consulting Company Ltd., Shanghai.

7. Hamilton, III H.R. Breen, J.E. Al-Rashid Nasser, I. (1995), "Stay Cable Survey". Report Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, USA.
8. Hodhod, O.A., Khalifa, M.A., (1997), "Seismic performance of a fiber-reinforced plastic cable-stayed bridge", Structural Engineering and Mechanics, 5(4), 399-414
9. Khalifa, M.A. (1992), "Dynamic vibration of cable-stayed bridges using carbon fiber composite cables", Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Neale, K.W. et al. (eds.), CSCE.
10. Khalifa, M.A., Hodhod, O.A., Zaki, M.A., (1996), "Analysis and design methodology for an FRP cable-stayed pedestrian bridge", Composites Part B: Engineering, 27(3-4), 307-317
11. Kim, P., ve Meier, U. (1991), "CFRP cables for large structures", Advanced Composites in Civil Engineering Structures, Lyer, S.L. (ed.), ASCE Specialty Conference, Las Vegas.
12. Kou, C.H., Xie, X., Gao, J.S. and Huang, J.Y. (2005), "Static behavior of long-span cable-stayed bridges using carbon fiber composite cable", J. Zhejiang University (Engineering Science), 39(1), 137-142.
13. Mazumdar, S.,K. (2002), "Structural Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering", CRC Press.
14. Meiarashi, S., P.E. M.ASCE, Nishizaki I. ve Kishima T. (2002), "Life-Cycle Cost Of All-Composite Suspension Bridges", Journal Of Composites For Construction, 6(4), 206-214
15. Meier, U. (1987), "Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site", Proc Inst Mech Eng, 201(B2): 73-8
16. Meier, U. (2012), "Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?", Arab J Sci Eng, 37, 399-411
17. Nagai, M., Xie, X., Yamaguchi, H. and Fujino, Y. (1998), "Static and dynamic instability analyses of 1400-meter long-span cable-stayed bridges", IABSE Reports, 79, 281-286
18. Nagai, M., Fujino, Y., Yamaguchi, H., ve Iwasaki, E. (2004), "Feasibility of a 1,400 m Span Steel Cable-Stayed Bridge", Journal of Bridge Engineering, 9(5), 444-452
19. Potyrala, P.B., (2011), "Use of fiber reinforced polymers in bridge construction", State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures.
20. SAP2000., (1998), Integrated finite element analysis and design of structures, computers and structures Inc, Berkeley, California, USA.
21. (URL-1), <https://blogs.lt.vt.edu/jac1993/2014/04/17/extreme-construction/>
22. (URL-2), <http://siberiantimes.com/business/others/news/vladivostoks-new-iconic-golden-gate-bridge-opens-for-ordinary-traffic/>
23. (URL-3) http://peer.berkeley.edu/nga_files/ath/ERZIKAN/ERZ-EW.AT2, 12 Şubat, 2015.
24. Wang X and Wu Z. (2010), "Integrated high-performance thousand-metre scale cable-stayed bridge with hybrid FRP cables", Composites Part B, 41(2), 166-175
25. Watson, S.C., ve Stafford, D. (1988), "Cables in trouble. Civil Eng". 58(4), 38-41

27. Xie, X., Li, X., ve Shen, Y. (2014), "Static and dynamic characteristics of a long-span cable-stayed bridge with CFRP cables", *Materials*, 7, 4854-4877; doi:10.3390/ma7064854
28. Xiong, W., Cai, C.S., Zhang Y., ve Xiao, R. (2011), "Study of super long span cable-stayed bridges with CFRP components", *Engineering Structures*, 33, 330-343
29. Zang, H., Tu, Y.M., ve Cao, Y. (2010), "Analysis of Dynamic Performance of Cable-Stayed Bridges with CFRP Cables", *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*.
30. Zhang, X.J. ve Ying, L.D. (2007), "Aerodynamic stability of cable-supported bridges using CFRP cables", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 8(5), 693-698
31. Zhang, X.J., (2008), "Mechanics feasibility of using CFRP cables in super long-span cable-stayed bridges", *Structural Engineering and Mechanics*, 29(5), 567-579
32. 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.

Anahtar Sözcükler: Jindo Köprüsü, Lifli polimer malzeme, Dinamik analiz, Modal analiz.