

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI KABLO DÜZENLEMELERİNE SAHİP ÇİFT TABLİYELİ  
KABLOLU KÖPRÜLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Olcay EĞRİBOYUN**

**HAZİRAN 2008  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI KABLO DÜZENLEMELERİNE SAHİP ÇİFT TABLİYELİ  
KABLOLU KÖPRÜLERİN İNCELENMESİ**

**İnş. Müh. Olcay EĞRİBOYUN**

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26.05.2008  
Tezin Savunma Tarihi : 26.06.2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM  
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Selim PUL  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU**

**Enstitü Müdür V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2008**

## ÖNSÖZ

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

“Farklı kablo düzenlemelerine sahip çift tabliyelı kablolu köprülerin incelenmesi” isimli bu çalışmayı seçmemi uygun görerek, tez çalışmam sırasında değerli zamanlarını ayırarak yardımlarını benden esirgemeyen, çalışmamı yakından takip edip her türlü bilgilerini benimle paylaşan kıymetli hocam sayın Prof.Dr. Metin HÜSEM'e şükran ve saygılarımı sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Her konuda yardımlarını ve zamanını esirgemeyen, görüş ve önerilerinden yararlandığım hocam sayın Öğr.Gör. Ercan YOZGAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar sırasında büyük yardımlarını gördüğüm hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Süleyman ADANUR ve Arş.Gör. Temel TÜRKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenimim süresince bana emeği geçen tüm hocalarımı saygı ile anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim

Bu günlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve bu uzun süreçte bana destek olan dostlarıma sonsuz teşekkür eder, bu çalışmanın daha başarılı çalışmalara örnek olmasını dilerim.

Olçay EĞRİBOYUN

Trabzon 2008

# İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| ÖNSÖZ.....  | II              |
| İÇİNDEKİLER.....  | III             |
| ÖZET .....  | V               |
| SUMMARY.....  | VI              |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                    | VII             |
| TABLolar DİZİNİ.....                                    | X               |
| SEMBOLLER DİZİNİ.....                                   | XI              |
| 1. GENEL BİLGİLER.....                                  | 1               |
| 1.1. Giriş.....   | 1               |
| 1.2. Kablolu Köprülerin İnşasında Tarihsel Gelişim..... | 1               |
| 1.2.1. Çoklu Kablo Sistemli Köprüler.....               | 6               |
| 1.3. Kablolu Köprülerin Bileşenleri.....                | 16              |
| 1.3.1. Kablolar.....                                    | 17              |
| 1.3.1.1. Paralel Çubuk Kablolar.....                    | 18              |
| 1.3.1.2. Paralel Tekil Kablolar.....                    | 18              |
| 1.3.1.3. Demetlenmiş Kablolar.....                      | 19              |
| 1.3.1.4. Kilit Sargılı Kablolar.....                    | 20              |
| 1.3.2. Tabliye.....                                     | 20              |
| 1.3.2.1. Ortotropik Tabliye Hesabı.....                 | 23              |
| 1.3.3. Kuleler.....                                     | 35              |
| 1.4. Konu İle İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....  | 37              |
| 1.5. Çalışmanın Amacı Ve Kapsamı.....                   | 41              |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....                              | 46              |
| 2.1. Giriş.....   | 46              |
| 2.2. Önboyutlandırma.....                               | 46              |
| 2.3. Pratik Tasarım.....                                | 47              |
| 2.3.1. Plaka.....                                       | 47              |
| 2.3.2. Rijitleştirici.....                              | 50              |
| 2.3.3. Enleme Kirişi.....                               | 52              |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.3.4. | Kuleler.....                                       | 53 |
| 2.3.5. | Kablolar.....                                      | 54 |
| 2.3.6. | Taşıt Yüğü.....                                    | 55 |
| 2.3.7. | Deprem Yüğü.....                                   | 55 |
| 2.4.   | Çalışmada Oluşturulan Kablolu Köprü Modelleri..... | 56 |
| 3.     | BULGULAR VE İRDELEME.....                          | 63 |
| 3.1.   | Statik Analiz Sonuçları.....                       | 63 |
| 3.2.   | Dinamik Analiz Sonuçları.....                      | 69 |
| 4.     | SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....                          | 91 |
| 5.     | KAYNAKLAR.....                                     | 95 |
|        | ÖZGEÇMİŞ.....                                      | 98 |

## ÖZET

Kablolu köprüler, üstün yük taşıma kapasiteleri, düşük maliyetleri, estetik görünüşleri ve inşa sürelerinin kısalığı nedeniyle dünya çapında son yıllarda orta ve uzun açıklıkların geçilmesi amacıyla tercih edilmektedirler. Modern kablolu köprüler, fan tip, harp tip ve yarı harp tip olarak üç farklı kablo düzenlemesinde inşa edilmektedirler. Her geçen gün taşıt sayısındaki artış, günümüzde daha fazla karayoluna ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle üretilen projelerde köprüler, geniş tabliyeler yerine iki yahut üç tabliyeli olarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen nedenlerden yola çıkılarak çift tabliyeli kablolu köprüler üzerine bir araştırma yapılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında genel olarak kablolu köprülerin tarihsel gelişiminden, yapısal bileşenlerinin özelliklerinden ve konu ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Tarihsel gelişim bakımından özellikle 20. yüzyıl da inşa edilmiş önemli modern kablolu köprü örneklerine ait özelliklerden söz edilmiştir. Kablolu köprülerin yapısal bileşenleri olan kablolar, tabliyeler ve kuleler hakkında bilgiler verilmiş ve son yıllarda köprü uygulamalarında sıklıkla kullanılan ortotropik tabliyelerin genel ve pratik hesabından bahsedilmiştir.

İkinci kısımda, çalışmanın amacına uygun oluşturulan üç boyutlu çift tabliyeli kablolu köprü modellerinin ön boyutlandırılması yapılmış ve modellerde kullanılan eleman kesitleri verilmiştir. Oluşturulan farklı kablo düzenlemelerine sahip modellere uygulanan yükler ve modellerin geometrileri de bu kısımda sunulmuştur.

Üçüncü kısımda, modellenen farklı kablo düzenlemelerine sahip çift tabliyeli kablolu köprülerin, birbirlerine göre farklılıklarını elde edebilmek amacıyla SAP2000 bilgisayar programı yardımı ile statik ve dinamik yükler altında analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Zaman-tanım aralığında yapılan dinamik analizde İzmit-Yarımca depremi kayıtları kullanılmıştır.

Dördüncü kısımda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılarak çift tabliyeli kablolu köprü modelleri arasındaki farklılıklar belirtilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Çift Tabliyeli Kablolu Köprü, Ortotropik Tabliye, Farklı Kablo Düzenlemeli Kablolu Köprü

## SUMMARY

### **Analysis of Double Deck Cable Stayed Bridges With Different Cable Layouts**

Cable stayed bridges are preferred to passing middle and long spaces entire world because of their superior load-carrying capacity, low cost, aesthetic appearance and short construction time. Modern cable stayed bridges are constructed three different cable layout such as fan type, harp type and semi-harp type. Because of the increasing vehicle population, everyday much more roadway to be needed. Hence, new cable stayed bridge projects are designed with two or three decks instead of wide decks. For these reasons above mentioned, there is a research about double deck cable stayed bridges in this study.

In the first part of the study is mentioned historical evolution and structural components of cable stayed bridges and previous researches which related with this study. Especially talked about features of important cable stayed bridges which was built in 20. century for historical evolution. General informations are given about cables, decks and towers which are main structural components of cable stayed bridges. Lastly, mentioned about general and practical calculation of orthotropic decks which often use in bridge projects at last years.

The preliminary design stage of three dimensional double deck cable stayed bridge models is handled and cross sections of components of models are given in the second part. In addition to this, loads which apply different cable layout models and geometry of models are presented in this chapter.

In the third part to obtain differences between double deck cable stayed bridges with different cable layouts are analyzed acting static and dynamic loads with SAP2000 computer program and consequences are presented. İzmit-Yarımca earthquake records are used for time–history analysis.

Finally, obtained results are summarized in the last part of the study and differences between cable stayed bridge models are presented.

**Key Word :** Double Deck Cable Stayed Bridge, Orthotropic Deck, Cable Stayed Bridge With Different Cable Layout

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Şekil 1. Lezardrieux kablolu köprüsü.....                           | 2               |
| Şekil 2. Strömsund kablolu köprüsü.....                             | 3               |
| Şekil 3. Severin kablolu köprüsü.....                               | 3               |
| Şekil 4. Theodor Heuss kablolu köprüsü.....                         | 5               |
| Şekil 5. Maracaibo kablolu köprüsü.....                             | 6               |
| Şekil 6. Friedrich Ebert kablolu köprüsü.....                       | 7               |
| Şekil 7. Knie kablolu köprüsü.....                                  | 7               |
| Şekil 8. Köhlbrand kablolu köprüsü.....                             | 8               |
| Şekil 9. Flehe kablolu köprüsü.....                                 | 8               |
| Şekil 10. Saint Nazaire kablolu köprüsü.....                        | 9               |
| Şekil 11. Brotonne kablolu köprüsü.....                             | 10              |
| Şekil 12. Zarate-Brazo Largo kablolu köprüsü.....                   | 10              |
| Şekil 13. Barrios De Luna kablolu köprüsü.....                      | 11              |
| Şekil 14. Rokko kablolu köprüsü.....                                | 12              |
| Şekil 15. Higashi Kobe kablolu köprüsü.....                         | 12              |
| Şekil 16. Tsurumi Tsubasa kablolu köprüsü.....                      | 13              |
| Şekil 17. Yangpu kablolu köprüsü.....                               | 13              |
| Şekil 18. Normandie kablolu köprüsü.....                            | 14              |
| Şekil 19. Tatara kablolu köprüsü.....                               | 15              |
| Şekil 20. Millau Viaduct kablolu köprüsü.....                       | 15              |
| Şekil 21. Rion Antirion kablolu köprüsü.....                        | 15              |
| Şekil 22. Tipik kablolu köprü.....                                  | 16              |
| Şekil 23. Değişik kablo düzenlemelerine sahip kablolu köprüler..... | 17              |
| Şekil 24. Paralel çubuk kablo enkesiti.....                         | 18              |
| Şekil 25. Paralel tekil kablo enkesiti.....                         | 19              |
| Şekil 26. Demetlenmiş kablo kesiti.....                             | 19              |
| Şekil 27. Kilit sargılı kablo kesiti.....                           | 20              |
| Şekil 28. Kutu kesitli betonarme tabliye enkesitleri.....           | 21              |
| Şekil 29. Ortotropik tabliye kesiti.....                            | 22              |



|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Şekil 30. | Fiber takviyeli polimer tabliye kesiti.....  | 23 |
| Şekil 31. | Modern ortotropik tabliye kesiti.....  | 24 |
| Şekil 32. | Rijitleştirici detayı.....   | 25 |
| Şekil 33. | Tabliye genişliğinde genel yükleme.....  | 27 |
| Şekil 34. | Tabliye ortasında tek araçlık yükleme.....   | 28 |
| Şekil 35. | Tabliye ortasında simetrik iki araçlık yükleme.....                                | 28 |
| Şekil 36. | Tabliye ortasında simetrik dört araçlık yükleme.....                               | 29 |
| Şekil 37. | Birim dönmeler ve yer değiştirmeler.....   | 31 |
| Şekil 38. | Tabliyedeki sinüzoidal yükleme.....  | 33 |
| Şekil 39. | Kule kesitleri.....  | 36 |
| Şekil 40. | Harp tip kablolu köprü modelinin şematik gösterimi.....                            | 43 |
| Şekil 41. | Yarı harp tip kablolu köprü modelinin şematik gösterimi.....                       | 44 |
| Şekil 42. | Fan tip kablolu köprü modelinin şematik gösterimi.....                             | 45 |
| Şekil 43. | Rijitleştirici ve plaka detayı.....  | 48 |
| Şekil 44. | AASTHO da tanımlanan Hs20 yüklemesi.....   | 48 |
| Şekil 45. | Tekerleklerin yola temas yüzeyi.....   | 49 |
| Şekil 46. | Genel ortotropik tabliye kesiti.....   | 50 |
| Şekil 47. | Modellerde kullanılan rijitleştirici ve plaka detayı.....                          | 50 |
| Şekil 48. | Enleme kirişine gelen toplam yük.....  | 52 |
| Şekil 49. | Modellerde kullanılan enleme kirişi kesiti.....                                    | 53 |
| Şekil 50. | Modellerde kullanılan kule kesiti.....   | 53 |
| Şekil 51. | Kocaeli depreminin ivme-zaman grafikleri.....                                      | 55 |
| Şekil 52. | Harp tip kablolu köprü modelinin üç boyutlu görünümü.....                          | 58 |
| Şekil 53. | Fan tip kablolu köprü modelinin üç boyutlu görünümü.....                           | 59 |
| Şekil 54. | Yarı harp tip kablolu köprü modelinin üç boyutlu görünümü.....                     | 60 |
| Şekil 55. | Kablolu köprü modellerinin boy kesitleri.....                                      | 61 |
| Şekil 56. | Kablo numaralandırılması.....  | 62 |
| Şekil 57. | Tabliye en kesiti.....   | 62 |
| Şekil 58. | Nonlineer analiz neticesinde elde edilen kablo kuvvetlerinin grafik gösterimi..... | 64 |
| Şekil 59. | Tabliye yer değiştirmesi.....  | 65 |
| Şekil 60. | Kule yer değiştirmesi.....   | 66 |
| Şekil 61. | Fan tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri.....                                    | 66 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Şekil 62. | Harp tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri.....                              | 67 |
| Şekil 63. | Yarı harp tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri.....                         | 67 |
| Şekil 64. | Fan tip modelin tabliye gerilme dağılımı.....                                 | 68 |
| Şekil 65. | Harp tip modelin gerilme dağılımı.....  | 68 |
| Şekil 66. | Yarı harp tip modelin gerilme dağılımı.....                                   | 68 |
| Şekil 67. | Harp tip kablolu köprü modelinin doğal periyotları ve mod şekilleri.....      | 69 |
| Şekil 68. | Yarı harp tip kablolu köprü modelinin doğal periyotları ve mod şekilleri..... | 73 |
| Şekil 69. | Fan tip kablolu köprü modelinin doğal periyotları ve mod şekilleri.....       | 77 |
| Şekil 70. | Harp tip kablolu köprü modeline ait dinamik analiz sonuçları.....             | 83 |
| Şekil 71. | Yarı harp tip kablolu köprü modeline ait dinamik analiz sonuçları..           | 85 |
| Şekil 72. | Fan tip kablolu köprü modeline ait dinamik analiz sonuçları.....              | 87 |
| Şekil 73. | Harp tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri.....                              | 89 |
| Şekil 74. | Yarı harp tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri.....                         | 89 |
| Şekil 75. | Fan tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri.....                               | 90 |

## TABLULAR DİZİNİ

|   | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---|------------------------|
| Tablo 1. Modellerde kullanılan kabloların özellikleri.....                      | 54                     |
| Tablo 2. Nonlineer analiz neticesinde elde edilen kablo kuvvetleri.....         | 63                     |
| Tablo 3. Alt tabliye hizasında kulelerde oluşan moment ve kesme kuvvetleri..... | 66                     |
| Tablo 4. Nonlineer dinamik analiz neticesinde elde edilen kablo kuvvetleri..... | 81                     |

## SEMBOLLER DİZİNİ

- $D_x$  : Ortotropik tabliye x yönü burulma rijitliği  
 $D_y$  : Ortotropik tabliye y yönü burulma rijitliği  
 $H$  : Ortotropik tabliye burulma rijitliği  
 $a_0$  : Etkili rijitleştirici genişliği  
 $e_0$  : Etkili rijitleştirici aralığı  
 $E$  : Elastisite modülü  
 $I_R$  : Rijitleştirici eğilme rijitliği  
 $\mu$  : Trapez şekilli rijitleştirici için etki katsayısı  
 $K$  : Trapez şekilli rijitleştirici burulma faktörü  
 $G$  : Malzeme kayma modülü  
 $\nu$  : Poisson oranı  
 $u$  : Trapez şekilli rijitleştiricinin üst başlık harici çevre uzunluğu  
 $I_P$  : Plaka atalet momenti  
 $t_P$  : Plaka kalınlığı  
 $t_R$  : Rijitleştirici kalınlığı  
 $\rho$  : Rijitleştirici kalınlığının plaka kalınlığına oranı  
 $s$  : İki enleme arası mesafe  
 $s_2$  : Etkili iki enleme kirişi arası mesafesi  
 $j$  : Trapez kesitli rijitleştiricinin alt tabanının ağırlık merkezine uzaklığı  
 $\lambda$  : Trapez kesitli rijitleştiriciye ait şekil katsayısı  
 $c_1$  : Trapez kesitli rijitleştiriciye ait şekil katsayısı  
 $c_2$  : Trapez kesitli rijitleştiriciye ait şekil katsayısı  
 $P$  : Taşıt yükü  
 $Q_x$  : Taşıt yükünün fonksiyonel ifadesi  
 $Q_0$  : Birim genişlikteki gerçek yük  
 $b$  : Tabliye genişliği  
 $l$  : Tabliye genişliği  
 $\omega$  : Yer değiştirme  
 $\kappa_n$  : Yük artırım katsayısı

- $k$  : Elastik yay sabiti  
 $\eta_n$  : Tesir çizgisi ordinatı  
 $\gamma$  : Rölatif rijitlik katsayısı  
 $t_{d,eff}$  : Etkili kaplama yüksekliği  
 $W_x$  : Mukavemet momenti

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Giriş**

Köprüler belki de insanlığın varlığından bu yana farklı malzemelerle bir engeli aşmak için kullanılmışlardır. Önceleri bir vadiyi ya da bir nehri aşmak için ağaçları köprü olarak kullanan insanoğlu, teknolojideki gelişmelere bağlı olarak, taştan, demirden, beton ve betonarmeden köprüler inşa etmiştir. Teknolojinin gelişimi ve nüfusun artması ile daha büyük açıklıkların geçilmesi gerekli olmuş ve böylece kablolu çelik köprülerin yapımı hız kazanmıştır. Bu bölümde, kablolu köprüleri tarihsel gelişimi, köprü elemanları ve bu köprüler üzerine yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur.

### **1.2. Kablolu Köprü Türleri ve Tarihsel Gelişimi**

Bir ya da birden çok kulenin kablolar vasıtası ile tabliyeyi desteklediği ve kabloların direk tabliye ile kulelere bağlandığı köprü türüne kablolu köprü adı verilmektedir. Modern kablolu köprülere ait ilk örnek 1784 yılında alman marangoz C.T. Loesher tarafından Friburg'da tamamen ahşaptan inşa edilen 32 m açıklığındaki köprüdür. Eğik zincirler ile desteklenen ilk köprü Dryburg Abbey' de Tweed nehri üzerine inşa edilen 79,3 m açıklığındaki ve 1,2 m genişliğindeki köprü olmuştur [1]. 1821 yılında Fransız mimar Poyet kirişlerin oldukça yüksek kulelere dövme demir çubuklarla asıldığı sistemleri önermiştir. Önerilen sistemlerde çubuk destekler yelpaze şeklinde düzenlenmiş olup, tüm çubuklar kule tepe noktalarında toplanmıştır. Poyet'in ortaya koyduğu sistem Fransız mühendis Navier tarafından geliştirilmiş ve 1823 yılında eğik zincirler ile rijitlenmiş köprü sistemleri oluşturulmuştur. 1868 yılında Ordish ve Le Feuvre tarafından asma ve kablolu köprülerin birleşimi olarak tasarlanan Franz Joseph köprüsü inşa edilmiştir [2].

19. yüzyıla kadar yapılan birçok kablolu köprü, kabloları oluşturmak için demir ve zincir gibi uygun olmayan malzemelerin kullanılması, yapı bileşenlerinin yetersiz kalması nedeniyle, yapımlarından bir süre sonra yıkılmıştır. Bu sistemlerde kullanılan kablolar, yapım aşamasında yeterince gerginleştirilmemiş ve etkiyen yükler altında kablolar görevlerini ancak bütün sistem önemli derecede şekil değiştirme yaptıktan sonra yerine

getirmeye başlamışlardır. Bu nedenle kablolu köprülerin güvenli olmadıkları düşünülmüştür.

19. yüzyılın ikinci yarısında köprü mühendisi Roebling asma köprülere eğik destek kabloları ekleyerek rüzgara karşı stabiliteyi, araç trafiğinin güvenliğini ve tabliyenin rijitlendirilmesini sağlamıştır.

Günümüzde, eski mühendislerin kablolardaki kuvvetleri doğru olarak hesaplayamadıkları ve kabloların sehimlerini tam olarak belirleyemedikleri anlaşılmıştır. Böylelikle kablolu köprüler kullanılmaz bulunmuş ve inşası bırakılmıştır. Ancak 20. yüzyılın başlarında kablolarda yüksek dayanımlı çelik kullanımının başlaması ve yapı teknolojisindeki diğer gelişmeler kablolardan oluşan sistemin yeniden kullanılmaya başlanmasını sağlamıştır. Poyet tarafından ortaya konulan kabloların yelpaze şeklinde desteklenmesi düşüncesi, Arnodin'in 1903 yılında Nant'da inşa ettiği Transporter köprüsü ile geliştirilmiş ve başarı ile uygulanmıştır.

Fransız mühendis Leinekugel Le Cocq kablolardan oluşan ve kablo kuvvetlerinin yatay bileşenlerini asal kirişe aktaran sistemleri geliştirmiştir. Bu sistem çok ekonomik olduğu gibi, oldukça az şekil değiştirme yapmıştır. Söz konusu sisteme ait örnek köprü 1925 yılında Fransa'da inşa edilen Lezardrieux köprüsüdür (Şekil 1).



Şekil 1. Lezardrieux Kablolu Köprüsü

İkinci dünya savaşından sonra malzeme azlığı ve çeliğin zor bulunur hale gelmesi minimum ağırlık, maksimum ekonomi ve stabilite gerektiren sistemlerin oluşturulmasını gerektirmiştir. Bu koşullar kablolu köprü yapımına geçişi hızlandırmıştır. 1955 yılında

Alman mühendis Dischinger İsveç'teki Strömsund köprüsünü inşa etmiştir (Şekil 2). Bu köprü ilk modern kablolu köprü olarak kabul edilmektedir. İlk modern kablolu köprülerin trafik yükleri altında oldukça rijit davranması, estetik olarak hoş görünmesi, ekonomik ve yapımının kolay olması kablolu köprü sistemlerinin uygulama alanını artırmıştır.



Şekil 2. Strömsund Kablolu Köprüsü

Kablolu köprülerin başarılı uygulamalarından biri de 1959 yılında Köln'de inşa edilen 700 m uzunluğa sahip Severin köprüsüdür. Bu köprüde A tip kule ilk defa kullanılmıştır. Köprü tabliyesi ortotropik çelik plak ile birleşen kutu kesitli iki kirişten oluşmaktadır. Severin köprüsü bu gün hala kablolu köprüler arasında en başarılı uygulamalardan biri olarak görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Severin Kablolu Köprüsü



Kablolu köprülerin geniş ve başarılı uygulamaları; yüksek dayanımlı çeliklerin ve ortotropik tabliyelerin kullanılması, birleşim yerleri uygulama tekniklerindeki gelişmeler ve yapı analizindeki ilerlemeler ile ancak 1970'lerden sonra oluşmuştur. Bilgisayarların gelişimi, kablolu köprü gibi yüksek dereceden statik olarak belirsiz sistemlerin çözümü ve üç boyutlu davranışının analizi için büyük imkanlar sağlamıştır. Böylece son yıllarda rüzgar etkilerine karşı aerodinamik açıdan dayanıklı kablolu köprüler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3].

Özet olarak aşağıdaki faktörler kablolu köprülerin hızlı gelişimine yardımcı olmuştur.

- 1- Yüksek dereceden statik olarak belirsiz yapıların analiz metotlarındaki gelişmeler ve bilgisayarların kullanılması,
- 2- Ortotropik çelik döşemelerin gelişimi,
- 3- Kablolu köprülerin temel elemanlarını içeren, önceden yapılmış köprülerden kazanılmış tecrübe,
- 4- Yüksek dayanımlı çelik kullanılması, yapım metotlarındaki gelişmeler,
- 5- Kablolu köprülerin model çalışmaları ile analiz edilebilme imkanı,

Kablolu köprülerin asma köprülere göre üstünlükleri aşağıda verilmektedir;

- 1- Asma köprülere nazaran daha fazla rijit yapıya sahip olduğundan tabliyede oluşan yer değiştirmelerin ve şekil değiştirmelerin daha küçük olması,
- 2- Küçük şekil değiştirmeler sayesinde tabliyenin daha ince yapılabilmesi,
- 3- Simetrik yapılabilme özelliği ile yatay kuvvetleri karşılaması, bu sayede kabloların asma köprülerdeki gibi zemine mesnetlenmesine gerek kalmaması,
- 4- Asma köprülerde iki kule kullanılması zorunlu iken kablolu köprülerin tek kule ile de inşa edilebilir olması,
- 5- İki kuleden fazla kule kullanılarak ve birden fazla kablolu köprü inşa edilerek çok daha uzun açıklıkların geçilebilir olması.

Kablolu köprülerin önceleri 150 – 600 m arası orta tabliye uzunluğu için, asma köprülerden daha ekonomik olduğu gözlemlenmiştir. Günümüzde ise kablolu köprülerin büyük açıklıklar için asma köprüler kadar ekonomik olması sağlanabilmektedir. Ancak açıklık boyutu büyüdükçe kablolu köprülerde, yeterli tabliye rijitliğinin elde edilmesi ve yükler altında sistemin kararlılığının sağlanması için, tabliye kalınlığının ve kablo çaplarının artırılması gerekmektedir. Asma köprülerde ise gene tabliye kalınlığı artırılmalı ancak mevcut kabloların çapı sabit tutulup sayısı artırılmalıdır. Orta açıklığı 1000 metreyi aşan köprü modelleri için asma köprülerin daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir [3].

Özellikle 20. yüzyılda kablolu köprü yapım hızı daha da artmış ve estetik açıdan da hoş görüldüğü için asma köprülerden fazla uygulanma şansı bulmuştur.

Almanya'nın ilk kablolu köprüsü olan Theodor Heuss köprüsü 260 m ana açıklığa ve 108 m kenar açıklığa sahiptir. Tabliyeye ve kuleye bağlantı şekli ile birbirine paralel uzanan kablolar ( harp şekli) ilk bu köprüde kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Theodor Heuss Kablolu Köprüsü

1962 yılında Venezuela'da ilk çok açıklıklı kablolu köprü olan Maracaibo köprüsü inşa edilmiştir. Kabloları hariç, kalan tüm kesitler betonarmeden imal edilmiştir. 5 adet 235 metrelik ana açıklığa sahip köprüde kule yapımı içinde farklı bir tasarım düşünülerek zeminden 4 ayaklı başlayan kule tepede 2 noktada birleştirilmiş bu sayede kulede oluşabilecek asimetrik yüklere karşı da stabilite sağlanmıştır. Köprüde tek eğik kablo ile kule tabliye bağlantısı yapılmış bu nedenle tabliye deformasyonları önleyebilmek içinde tabliye yüksekliği 5 m yi bulmuştur. Bu sebepten yapı ağırlığı artmış ve malzeme olarak yüksek dayanımlı beton kullanılması gerekmiştir (şekil 5).

Eğik askılı köprülerdeki gelişmeler, az fakat ağır gergi kabloları yerine, daha çok noktadan tabliyeyi destekleyen kabloların, yani çok kablolu sistemlerin geliştirilmesiyle gerçekleşmiştir. Kullanım süresince paslanma ve yorgunluk gibi etkenlerden zarar gören gergi kablolarının değiştirilmesinde sağladığı kolaylık ve oluşturduğu daha kararlı yapı nedeniyle, ilerleyen yıllarda yeni köprü uygulamalarında kablo sayısı artırılarak daha ince ve hafif tabliyeler inşa edilmiştir.



Şekil 5. Maracaibo Kablolu Köprüsü

### 1.2.1. Çoklu Kablo Sistemli Köprüler

Köprü türü yapılar yüksek dereceden belirsiz olduklarından, elle çözümleri çok uzun zaman almaktadır ve hata payı yüksektir. Bilgisayar programlarının gelişimi ve prefabrik üretim tekniklerindeki yenilikler ile çoklu kablolu köprü sistemleri 1970'lerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Bir konsept olarak bu tür köprüler, Almanya'da savaş sonrası dönemin oluşturduğu sosyal ihtiyaçların baskısıyla ortaya atılmış ve geliştirildikleri ortamda ekonomik olabilme özeliğini sağladıkları için kabul görmüşlerdir. Ekonomik olarak kafes türü köprülerin, daha üstün olmalarına rağmen, kablolu köprülerin daha fazla uygulama alanı bulmuş olması tasarımcı ve bürokratların aynı zamanda görüntüsel olarak yeni bir ürün oluşturma istekleridir.

Bu yönde yapılan ilk köprü Almanya'da inşa edilen Friedrich Ebert kablolu köprüsüdür. 91 ve 123 adet iki tip 5 mm' lik yüksek dayanımlı çelikten imal edilmiş kabloların bir arada sargılanması ile oluşturulan 80 adet kablo ile desteklenen köprü, 280 m ana açıklığa sahiptir. Çok sayıda 5 – 7 mm çaplı yüksek dayanımlı çelik tellerin bir arada sargılanması ile oluşturan kablo demetleri günümüzde de kullanılmaktadır. Çok kablo kullanımı ile tabliye bağlantı noktalarında ekstra güçlendirme yapılmasına gerek kalmamıştır. Ancak söz konusu köprüde kullanılan kuleler tabliye ortasında bulunduğundan burulma rijitliğini sağlamak için büyük kutu kirişler kullanılması gerekmiştir. Bu nedenle çoklu kablo sistemi tek kuleli köprü için çok fazla ekonomi sağlamamıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Friedrich Ebert Kablolu Köprüsü

Almanya’da inşa edilen bir diğer köprü olan Knie köprüsü harp tip kablo sistemine sahip olup önceki köprü uygulamalarından farklı olarak yan açıklıkta her bir kablonun tabliyeye mesnetlendiği noktalara ayaklar konularak mesnet sayısı artırılmıştır. Bu çalışma daha az kablo ve ince kirişler kullanılmasına olanak tanımış ayrıca burulma rijitliğini sağlamada yararlı olmuştur (Şekil 7).



Şekil 7. Knie Kablolu Köprüsü

Hamburg’da inşa edilen Köhlbrand köprüsü  $\lambda$  (lamda) şekilli kule tarafından desteklenen çift düzlem çoklu kablo sisteminin uygulandığı ilk köprüdür. Kule şekli nedeniyle uygulanan fan tip kablo sistemine, geliştirilmiş fan tip kablo sistemi adı verilmiştir (Şekil 8). Ana açıklığı 325 m olan köprüde 88 kablo kullanılmıştır. Aynı yapım tarzı ile Duesseldorf’da inşa edilen Flehe köprüsü de  $\lambda$  (lamda) şekilli kuleli kablolu köprülere örnek olmuştur (Şekil 9).



Şekil 8. Köhlbrand Kablolu Köprüsü



Şekil 9. Flehe Kablolu Köprüsü

1970'lerin ortalarına kadar Almanya'da örnekleri inşa edilen kablolu köprüler bu tarihten sonra dünyada geniş uygulanma şansı bulmuştur. 1974'te Fransa'da inşa edilen Saint Nazaire kablolu köprüsü ana açıklığı 400 m den uzun olan ilk köprü olmuştur.

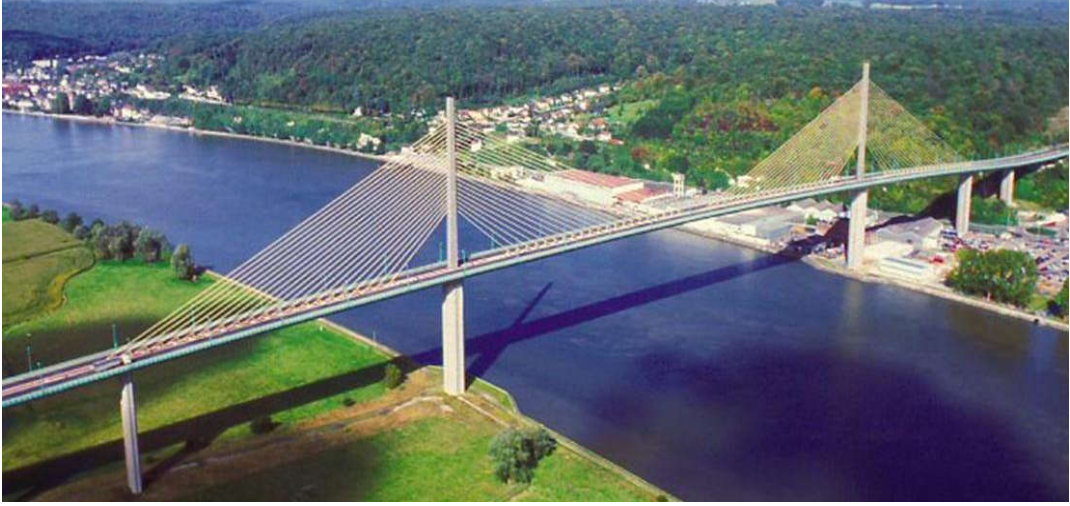
Tabliye altına kadar betondan inşa edilen kule ayakları, tabliye üstündeki ters V şekilli çelikten imal edilmiş kuleleri mesnetlendirmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Saint Nazaire Kablolu köprüsü

1978’de İtalya’da inşa edilen İndiano kablolu köprüsü 206 m ana açıklığa ve 70’ er m kenar açıklıklara sahiptir. Kenar açıklıklar ayaklarla mesnetlendirilmiş olduğundan bu köprüde asma köprü tarzı kabloların bir ucu toprağa bağlanmıştır. Bu inşa tarzı ile asma ve kablolu köprü karışımı bir tasarım oluşturulmuştur. Köprünün çok uzun olmaması nedeniyle yatay ve düşey kablo kuvvetlerinin zemine aktarılması yapının narin yapılabildiğini sağlamıştır.

1980’lerden sonra kablolu köprülerde, yapı teknolojilerinin gelişmesi ile öngörülen betonarme tabliyeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede daha geniş ve uzun tabliyeler yapma olanağı doğmuştur. Betonarme kutu kesitli tabliyeli inşa edilen ilk köprü 119 m ana açıklığa sahip Avusturya’daki Danube kanal köprüsüdür. Bu ufak uygulamadan sonra çok kablolu betonarme öngörülen tabliyeli köprü olarak Fransa’daki Brotonne köprüsü inşa edilmiştir (Şekil 11). Tabliye, ortasından yükselen iki tekil kuleye bağlı harp tip 84 kablo ile desteklenmiştir. Korozyondan korumak için demetlenmiş kabloların üzerine çelik tüpler geçirilip boşluklar betonla doldurulmuştur. Ancak bu köprüde kabloların tabliye ile bağlantı noktaları da betondan olduğundan özellikle titreşim üreten yükler altında tabliyenin yorulma dayanımının azaldığı görülmüştür. Bu nedenle köprü inşasından sonra kablo ankraj noktaları çelik kutular içine alınıp içleri epoxy ile doldurularak dayanım artırılmıştır.



Şekil 11. Brotonne Kablolu Köprüsü

1978’de Arjantin’de yapılan Zarate-Brazo Largo köprüsü ilk uzun açıklıklı tren yükü taşıma özelliği olan kablolu köprü olup H şekilli 2 kuleli, fan tip kablo sistemli ve 330 m ana açıklığa sahiptir. Köprünün tren yükü taşınması özel bir tasarım problemi oluşturmuş, bu problem tabliyenin her iki tarafında da farklı çaplı kablolar kullanılmasını gerektirmiştir. Kullanılan kablolar 103 ile 377 arasında değişen sayılarda 7 mm çaplı kabloların demetlendirilmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. Zarate-Brazo Largo Kablolu köprüsü

1984’te İspanya’da inşa edilen Barrios De Luna kablolu köprüsü betonun sadece kulelerde değil tabliyenin enine kirişlerinde de kullanılabileceğinin ve çelik kesitlerle

ekonomi ve rijitlik konularında yarışabileceğini göstermiştir. 440 m ana açıklığa sahip köprü, tabliyenin her iki kenarından kablolar ile desteklenen enine kirişlerin uygulanması ile büyük burulma rijitliğine sahip olmuştur (Şekil 13).



Şekil 13. Barrios De Luna Kablolu Köprüsü

Asma köprülerde tabliye rijitliğinin sağlanması için enine kirişler, tabliye altına yerleştirilen kafes elemanlar ile oluşturulmaktadır. Kablolu köprülerde ise kablo ankrajları gerekli rijitliği sağladığından ayrı bir kafes elemana gerek kalmamaktadır. Ancak artan trafik yüklerinin etkisi ile çift tabliyeli kablolu köprü yapımı gündeme gelmiş ve alt tabliye ile üst tabliye bağlantıları kafes elemanlarla sağlanmıştır.

İlk çift tabliyeli kablolu köprü 1977'de Japonya'da inşa edilen Rokko kablolu köprüsüdür (Şekil 14). İki tabliye arası 8 m olup H şekilli kuleli, fan tip kablo sistemli, 220 m ana açıklığa sahip bir köprüdür. Rokko köprüsü ile aynı tasarıma sahip 1988 yılında inşa edilen Hitsuishijima ve İwagurojima kablolu köprüleri de 14 m aralıklı çift tabliyeli olup üst tabliyede 4 şeritlik taşıt yolu, alt tabliyede ise 2 şeritlik tren yolu bulunmaktadır. Ancak bu köprülerde yüklerin çok büyük olması kesitlerinde büyük olmasını gerektirmiş ve eleman sayılarını artırmıştır. Bu sebepten bu köprülerde estetikten çok emniyete önem verilmiştir.





Şekil 14. Rokko Kablolu Köprüsü

Japonya’ da, çift tabliye uygulamalarının eksik ve yetersiz yönleri düzeltilerek 1993’te 484 m ana açıklığa sahip gayet estetik ve çok daha modern olan Higashi Kobe köprüsü inşa edilmiştir. İki ortotropik tabliye (Alt tarafına açık veya kapalı çelik berkitmelerin kaynaklanmış olduğu bir çelik plakadan imal edilen döşeme) eğik kafes elemanlarla birleştirilerek yüksek yapısal randıman elde edilmiştir. 17 m genişliğindeki tabliyelerin ikisinde de 4 şeritlik taşıt yolu bulunmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. Higashi Kobe Kablolu Köprüsü

1990’lı yıllarda kablolu köprüler konusunda söz sahibi hale gelen Japonya’da 1994 yılında kenar açıklığının orta açıklığa oranı 0,5 olan Tsurumi Tsubasa köprüsü inşa edilmiştir (Şekil 16). O tarihe kadar yapılan kablolu köprülerde kenar-orta açıklık oranı 0,4’ü geçmemiş ve kenar açıklık tarafına ek mesnetler yerleştirilmiştir. Bu köprüyü ön

plana çıkartan özelliği de kenar açıklıklarında mesnet olmayışıdır. Ayrıca kablolar 38 m genişliğe sahip tabliyenin kenarlarından değil sadece ortasından bağlanmıştır. Bu şekilde bir tasarımın ayakta duramayacağını bilen Japon mühendisler tabliyeyi öngerilmeli yaparak sabit yükler etkisi altındaki sehimi sıfırlamışlar ve aynı kesit özelliklerine sahip normal betonarme döşemeden daha fazla yük taşıyabilen bir tabliye elde etmişlerdir. Böylelikle hem önemli ekonomi sağlanmış hem de estetik bir görünüm elde edilmiştir.



Şekil 16. Tsurumi Tsubasa Kablolu Köprüsü

1990'lı yıllarda kablolu köprülerin uygulanma oranı artmış böylelikle yapım teknikleri sürekli geliştirilmiştir. Özellikle Kuzey Amerika'da kullanımına başlanan kompozit tabliyeler ile tabliye yükseklikleri 1,5 m ye kadar azaltılmıştır. Çin'de 1993'te 602 m ana açıklığa ve 208 m kule yüksekliğine sahip Yangpu kablolu köprüsü de kompozit tabliye kullanılarak inşa edilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Yangpu Kablolu Köprüsü

1995'te Fransa'da inşa edilen 856 m ana açıklığa sahip Normandia köprüsü çok farklı bir tasarıma sahiptir (Şekil 18). Tabliyenin orta 624 m' lik kısmı çelik, kalan kısmı ise betonarmedir. Gemi trafiğine açık bir nehir üzerine inşa edilen köprüde 214 m yüksekliğindeki kuleler ile su seviyesinden olabildiğince yükseğe çıkabilmek için tabliye bu farklı tasarıma sahiptir. Fan tip kablo düzeninde inşa edilmiş köprü tamamlandığında dünyanın en uzun kablolu köprüsü unvanını almıştır. Ancak 1999'da Japonya'da inşa edilen Tataru kablolu köprüsü (Şekil 19) bu unvanı 890 m ana açıklığı ile Normandie köprüsünün elinden almıştır. Gerek kule yüksekliği gerekse açıklığının büyüklüğü nedeniyle tamamıyla çelikten imal edilmiştir. Tataru köprüsü halen dünyanın en uzun kablolu köprüsüdür.



Şekil 18. Normandie Kablolu Köprüsü

Günümüzde ise Çin de yapımı devam etmekte olan 306 m kule yüksekliğine ve 1088 m orta açıklığa sahip Sutong kablolu köprüsü geleceğin köprülerinin ilk örneği sayılmaktadır. 40 m genişliğindeki ve 4 m yüksekliğindeki ortotropik tür tabliye ve lamda (ters Y) şekilli iki kuleden oluşan köprü tamamlandığında, dünyanın en uzun ve 1000 metreyi aşan ilk kablolu köprüsü olacak.

Japonya'daki Kojima-Sakaide, Fransa'daki Millau Viaduct (Şekil 20), Yunanistan'daki Rion-Antirion (Şekil 21) ve Hong Kong'daki Ting-Kau kablolu köprüleri ikiden fazla kule kullanılarak uzunlukları 1500 m yi aşan sıralı kablolu köprü örnekleridir [4, 5].



Şekil 19. Tatara Kablolu Köprüsü



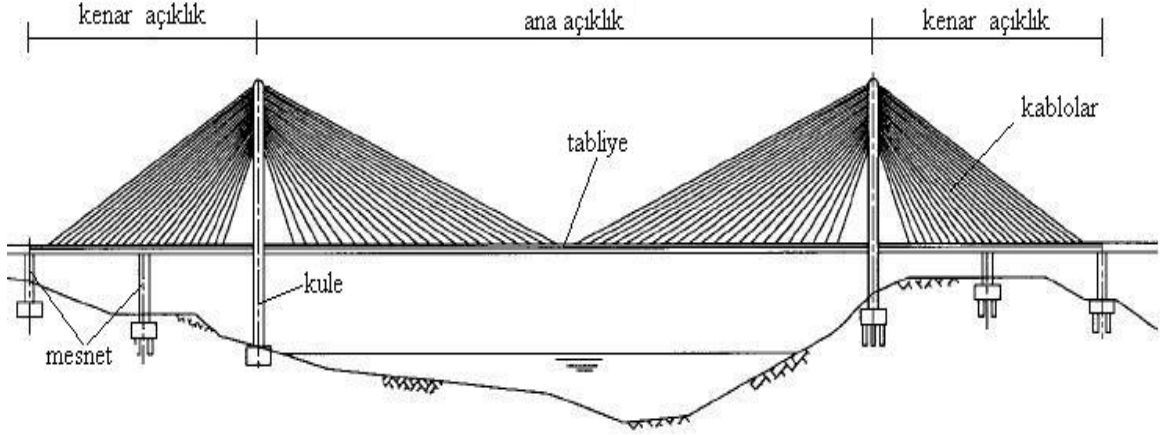
Şekil 20. Millau Viaduct Kablolu Köprüsü



Şekil 21. Rion Antirion Kablolu Köprüsü

### 1.3. Kablolu Köprülerin Bileşenleri

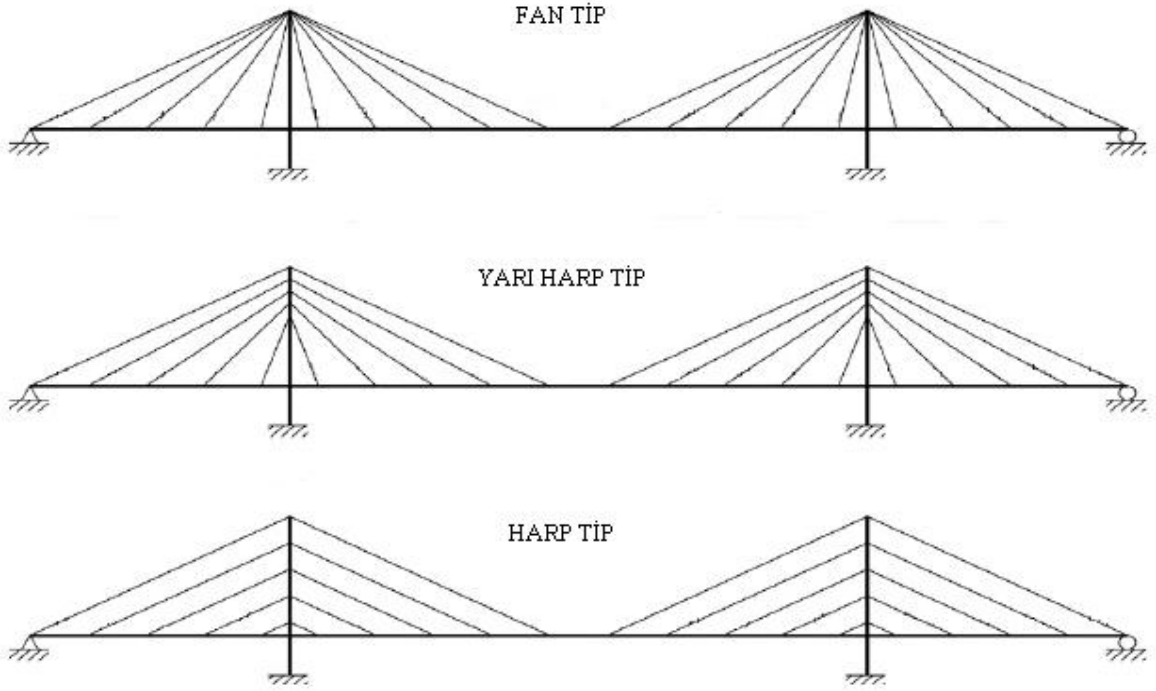
Modern kablolu köprüler, rijitlik sağlamada yardımcı enleme ve boylamalardan, kompozit veya ortotropik tipteki döşemeden, basınca çalışan kulelerden ve çekmeye çalışan yüksek dayanımlı kablolardan oluşan üç boyutlu sistemlerdir (Şekil 22).



Şekil 22. Tipik kablolu köprü

Kablolu köprüler, asma köprülere nazaran daha iyi aksel ve yanal rijitlik ve burulma dayanımı sağladığından rüzgar ve aerodinamik etkilere karşı daha kararlı davranış gösterir. Kablolu sistemlerin temel yapısal karakteristiği; kulelerin tepelerinden tabliyeye uzanan öngerilmeli ya da artgermeli kablolar ile tabliyenin bir bütün olarak çalışmasıdır. Kablolu köprüler, genel kablo sınıflandırması ile kablo düzenlerine göre adlandırılmıştır. Bu şekilde fan tip, yarı harp tip ve harp tip olmak üzere üç tür kablolu köprü tipi mevcuttur (Şekil 23).

Fan tip kablolu köprüde kablolar, kulenin üst kısmında genellikle 0,2–0,5 m ara ile bağlanır. Yarı harp tip tasarımda kablolar kule tepesinden başlayarak genellikle 0,5–2 m ara ile bağlanırlar. Harp tip kablolu köprüde ise kablolar kule üst kısmından başlayarak eşit aralıklarla bağlanırlar. Tüm tasarımlarda kablolar tabliyeye eşit aralıklarla bağlanırlar. İdeal bir köprü tasarımı emniyet, işlevsellik, estetik ve ekonomi olmak üzere dört genel maddenin sağlanması ile elde edilir. Ayrıca kullanım süresince bakım masraflarının az olması da bir köprü için önemlidir.



Şekil 23. Değişik kablo düzenlemelerine sahip kablolu köprüler

### 1.3.1. Kablolar

Kablolu köprülerin ana elemanlarından biri olan kablolar, normal yapı çeliğine nazaran daha büyük kopma dayanımına sahiptirler. Normal yapı çeliğinin kopma dayanımı 370 MPa civarında iken kablolu köprülerin kablolarının kopma dayanımı 1570–1860 MPa arasında değişmektedir. Kabloların yüksek dayanımı ve esnek yapısı, bağlantı geometrisine de bağlı olarak tabliyenin yer değiştirme değerlerini azaltarak asma köprülere nazaran daha durağan bir yapı elde edilmesini sağlar. Kablolu köprülerin tarihi boyunca, kablo çapları 5–7 mm arasında değişmiştir. Kabloların yapısal olarak;

- Yüksek yük taşıma kapasitesine,
- Kablo doğrultusu boyunca kararlı elastisite modülüne,
- Boşluksuz, sıkı kesit alanına,
- Yüksek yorulma ve korozyon dayanımına,

sahip olmaları gerekmektedir.

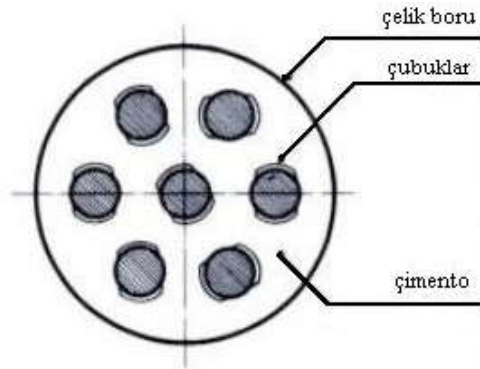
Kablolu köprülerde kullanılan genel kablo türleri;

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

olmak üzere dört çeşittir.

### 1.3.1.1. Paralel Çubuk Kablolar

Standart çubuk kablo, her biri 26,5 mm, 32 mm veya 36 mm çapında akma sınırı 1080 MPa, kopma dayanımı 1230 MPa olan 7–10 tane galvaniz kaplamalı çelik çubuğun çelik bir boru içine yerleştirilmesi ve boşlukların çimento ile doldurulması suretiyle oluşturulur (Şekil 24). Çekme dayanımı ve yorulma dayanımı açısından diğer kablolardan zayıf olan çubuk kablolar, açıklığı, ağırlığı ve yükü az olan köprülerde tercih edilir.



Şekil 24. Paralel çubuk kablo enkesiti

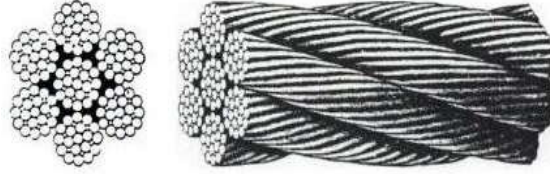
### 1.3.1.2. Paralel Tekil Kablolar

Paralel tekil kablolar genel olarak çok sayıda öngerilmeli yüksek dayanımlı galvaniz kaplamalı çelik kablonun birbirlerine paralel konumda bir arada kullanılması ile oluşturulur (Şekil 25). Ne tekil kablolar ne de ana kablo sarmal konum almaz. Yapım aşamasında her bir tekil kablo ayrı ayrı çekilir sonra gerilerek bir araya getirilir. Bu nedenle yapım aşaması uzun ve zahmetlidir. Ancak kablo sayısı standart olmadığından en çok tercih edilen kablo türüdür. Kaç adet tekil kablonun kullanılacağı yapının tasarımına



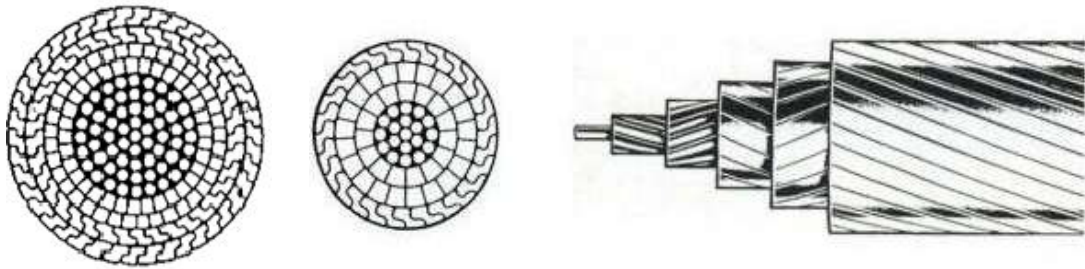


Şekil 26' nın devamı



#### 1.3.1.4. Kilit Sargılı Kablolar

Kilit sargılı kablolar iki ya da üç tip farklı kesitli kablonun bir araya getirilmesi ile oluşturulur (Şekil 27). Merkezde daire kesitli, dışta kare ve z kesitli kablolar kullanılır. Bu kablo türünde başka kablolarda kullanılmayan özel z kesitli kablolar kullanılarak ana kablonun mümkün olduğunca sıkı ve boşluksuz yapılabilmesi, böylece daha küçük kesitle, büyük kesitli kablolar kadar dayanım elde edilmesi, aynı zamanda da kablo ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Kilit sargılı kablolar günümüzde diğer kablolar gibi galvaniz kaplamalı üretilmektedir. Bu kablolar, diğer tür kablolardan farklı olarak düzgün yüzeyli olduğundan çelik tüp içine konmadan boya kaplanması suretiyle, korozyon koruması yapılmaktadır. Korozyon korumasının sadece boya ile yapılması bu kablo türünün hafif olmasının bir diğer sebebidir [4,5].



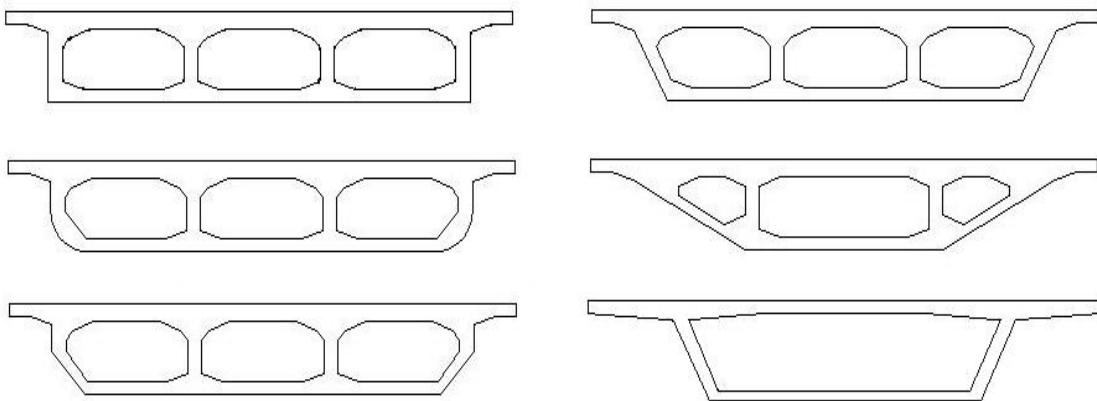
Şekil 27. Kilit sargılı kablo kesiti

#### 1.3.2. Tabliye

Kablolu köprülerin bir diğer ana bileşeni de tabliyedir. Tabliye genel olarak trafik ve insan yükü gibi üzerine gelen yükleri kablolar vasıtası ile kulelere aktaran döşemedir.

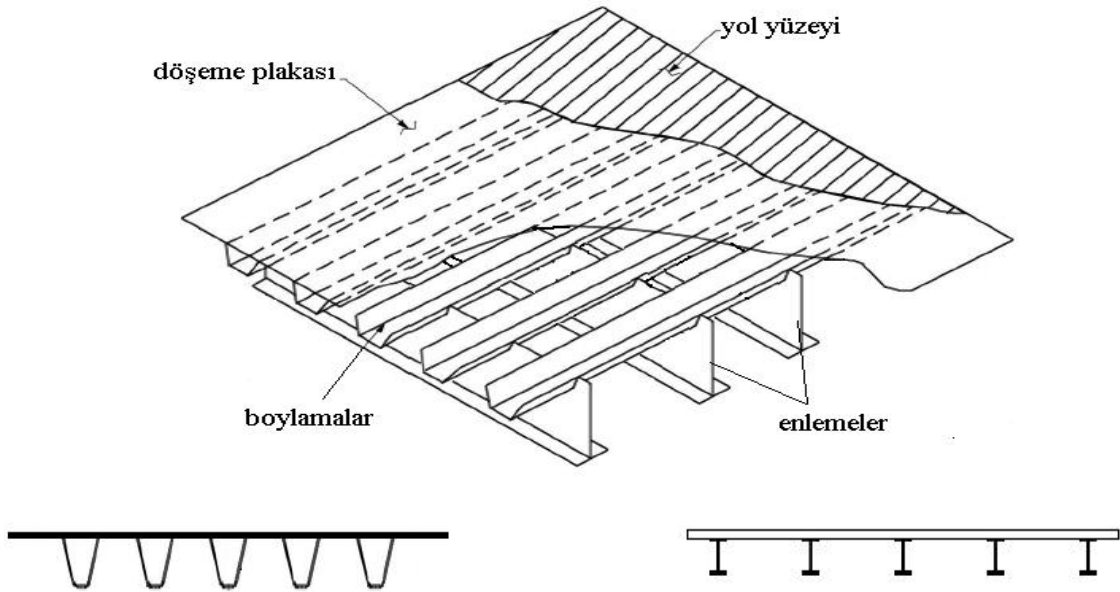
Kablolu köprülerde tabliyeler, betonarme, çelik, kompozit ve son yıllarda güçlendirilmiş fiber plastik malzemelerinden üretilmektedir.

Betonarme tabliyeler rijitlik bakımından gayet iyi sonuçlar vermiş ve yorulma dayanımının üstünlüğü ilerleyen yıllarda kendini göstermiştir. Ancak tabliyenin esnek olmayışı ve tabliye-kablo bağlantı noktalarında oluşan kuvvetler altında betonun ezilmesi betonarme tabliyelerde yenilikleri getirmiştir. Bu yenilikler betonarme-çelik karışımı, öngerilmeli ve artgerilmeli betonarme tabliyelerin oluşmasını sağlamıştır. Kompozit tasarımda tabliye kenarları çelik plakalarla çevrilmiş, enlemelerde çelik profiller kullanılmış ve böylece tabliyeye esneklik kazandırılarak kesme kuvvetinin de çelik enlemelerle daha rahat taşınması sağlanmıştır. Bunun yanı sıra öngerilmeli ve artgerilmeli betonarme elemanlar ile betonun düşük çekme gerilmesi mahzuru önlenmiştir. Betonun yüksek basınç dayanımı çeliğin yüksek çekme dayanımıyla birleştirilmiştir. Öngerilme ile betonun en büyük problemlerinden çatlak oluşumunun da önüne geçilmiştir. Bu tür tabliyelerde, betonda oluşturulan ön basınç gerilmeleri işletme sırasında doğacak çekme gerilmeleri ile süperpoze olmakta, böylece elemanlarda ya hiç çekme gerilmesi doğmamakta veya oluşan toplam çekme gerilmesi, betonun çekme dayanımının altında kalarak tabliyede aşırı sehime neden olmamaktadır. Bu özellik kısa açıklıklarda kullanılan betonarme tabliyelerin uzun açıklıklarda da kullanılabilmesini sağlamıştır. Ancak kullanılan malzemenin beton oluşu yapıyı ağırlaştırdığından tabliyelerde çelik kullanımı da öngerilmeli tabliyeler gibi yaygındır. Betonarme tabliyelerde genelde kapalı kutu kesitler tercih edilmektedir (Şekil 28).



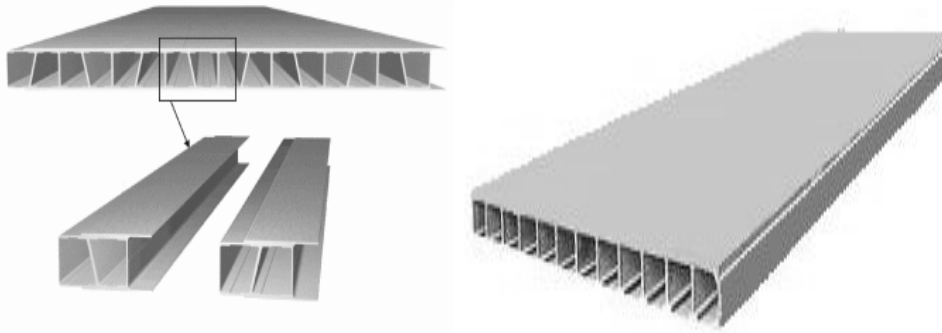
Şekil 28. Kutu kesitli betonarme tabliye enkesitleri

Tabliyelerde çelik kullanılması ile yeni bir döşeme tipi olan ortotropik döşeme ortaya çıkmıştır. Bir ortotropik döşeme basit olarak ince çelik plaka altına enine ve boyuna çelik plakaların kaynatılması ile oluşturulur. Köprüde kullanılacak tabliye ise enine ve boyuna çelik profillerin kullanılması ile meydana getirilir. Ortotropik döşeme enleme ve boylamaları sayesinde rijit bir yapı kazanır (Şekil 29). Ortotropik tabliye genel olarak orta ve uzun açıklıklardaki köprülerde ya da hafifliği nedeniyle hareketli köprülerde kullanılmaktadır. Bu döşemenin en önemli avantajı betonarme tabliyelere göre ince olmasına rağmen daha fazla yük taşıyabilmesidir. Dolayısıyla ağır yükler altında bile üstün yük dağıtma davranışı sayesinde düşey yer değiştirme az olmaktadır. Ayrıca hareketli yükler altındaki dinamik davranışı da iyi sonuçlar vermektedir. Tabliyenin oluşturulmasında kullanılan enleme ve boylamaların aralıklarının belli bir değeri yoktur, maruz kalacağı yüklere göre aralıklar azaltılıp eleman sayısı artırılabilir. Boylamalar arasındaki temel fark burulmaya karşı olan dirençleridir. Kutu kesitli profillerin burulma dirençleri daha fazladır. Ortotropik döşemelerde kaynak yerlerinin geometrisine ve bileşenlerinin narinliğine bağlı olarak yorulma çatlakları gözlemlenmiştir. Genelde tabliyenin kablo bağlantıları enlemelerin tabliye ile bağlantı noktalarından yapılmaktadır. Bu sebepten bu noktalara denk gelen enlemelerin kesitleri büyütülerek ya da kablo tabliye ankraj noktalarının çelik tüpler içine alınıp, epoxy ile doldurulması ile çatlak problemi ortadan kaldırılmıştır [6,7].



Şekil 29. Ortotropik tabliye kesiti

Uzun süreden beri kullanılan yapı malzemeleri çelik ve betona rakip yeni yapı malzemesi fiber takviyeli polimer, bu yüzyılda yapılarda kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 30). Aynı boyutlarda çelik ve betondan fazla dayanıma ve az ağırlığa sahiptir. Ancak malzemenin yeni olması fiyat konusunda sorunlar oluşturduğundan yapılarda beton ya da çelikle kompozit olarak kullanılır. Genellikle yüksek verim alınması amacıyla çelik kirişlerin üzerine döşeme olarak veya çelik döşemeye kiriş olarak kullanılır. Malzemenin yeni olması, kullanılabilirliğinin araştırılmasını gerektirmiş ve yapılan çalışmalarda çelik ve betona göre, yükler altındaki dayanıklılığı, yorulma etkisi ile rijitliğinin bozulmaması, yorulma dayanımının büyüklüğü sayesinde köprü tabliye ömrünü uzatması, korozyon direnci, hareketli yük kapasitesi, inşa süresini kısaltması, bakım maliyetlerinin azlığı ve sıcaklık değişimlerine dayanıklılığı yönlerinden üstün olduğu gözlemlenmiştir [8,9,10].

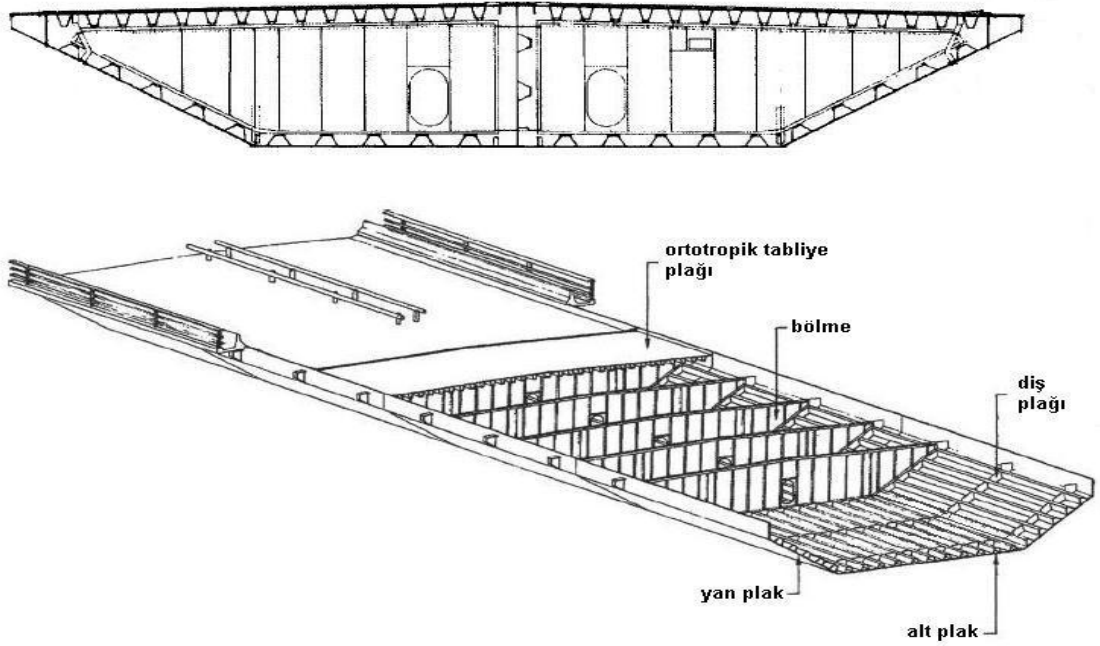


Şekil 30. Fiber takviyeli polimer tabliye kesiti

### 1.3.2.1. Ortotropik Tabliye Hesabı

Ortotropik tabliye hesabı Pelikan ve Esslinger tarafından geliştirilmiş yöntemle dayanmaktadır. Kapalı kutu rijitleştiricili (rib) çelik döşeme tasarımı iki aşamadan oluşmaktadır (Şekil 31). Birinci aşama, enleme kirişlerinin tamamen rijit kabulü ile rijitleştiricilerdeki ve enleme kirişlerindeki maksimum eğilme momentlerinin bulunmasıdır. İkinci aşama ise enleme kirişlerinin elastikiyetinin belirlenmesi ile birinci aşamadaki momentlerin düzeltilmesidir. Enlemelerden (döşeme kirişi) bağımsız hesap edilen plaka ve rijitleştirici değerleri rijit mesnetlenmiş sürekli kiriş teorisi ile elde edilmektedir. Enlemeler ise kendi başlarına elastik mesnetlenmiş sürekli kiriş teorisine göre hesaplanmakta ve bulunan değerler birbirine eklenmektedir. Bu teori, yüklere, enleme

kiriş açıklıklarına, tabliye genişliğine, tabliyenin x ve y yönlerindeki eğilme rijitliklerine ( $D_x$ ,  $D_y$ ) ve burulma rijitliğine ( $H$ ) dayanmaktadır. Tabliyenin x doğrultusundaki uzunluğu, y doğrultusundaki uzunluğundan çok büyük olduğundan teori de  $D_y=0$  kabul edilmiş ve kapalı rijitleştiricili ortotropik tabliyenin davranışı aşağıdaki diferansiyel eşitlikle tanımlanmıştır.

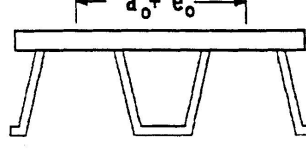


Şekil 31. Modern ortotropik tabliye kesiti

$$2H \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = p(x, y) \dots \dots \dots (1.1)$$

- H : Ortotropik tabliye burulma rijitliği
- $D_x$  : Ortotropik tabliye x yönü eğilme rijitliği
- $D_y$  : Ortotropik tabliye y yönü eğilme rijitliği
- $\omega$  : Yer değiştirme
- $p$  : Taşıt yükü

Tabliye plağı ile rijitleştiriciler birlikte çalıştığı için hesaplarda etkili plaka genişliği  $(a_0 + e_0)$  kullanılmaktadır (Şekil 32).



Şekil 32. Rijitleştirici detayı

Etkili plaka genişliği kullanılarak eğilme rijitliğine geçilir.

$a_0 + e_0 = 1,1(a + e)$  şeklinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

$$D_y = \frac{EI_R}{a + e} \dots\dots\dots(1.2)$$

$a$  : Trapez rijitleştirici üst genişliği.

$e$  : İki rijitleştirici arası mesafe.

$I_R$  : Bir rijitleştiricinin  $a_0 + e_0$  değeri kullanılarak hesaplanan atalet momentidir.

Ortotropik döşemeler için burulma rijitliği aşağıdaki formül ile belirtilmiştir.

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu GK}{a + e} \right) \dots\dots\dots(1.3)$$

$G$  : Malzeme kayma modülü

Rijitleştirici kesit özelliklerine bağlı burulma faktörü,  $K$ , eşitlik 1.4 ile belirlenmektedir.

$$K = \frac{4A^2}{\frac{u}{t_R} + \frac{a}{t_P}} \dots\dots\dots(1.4)$$

$A$  : Trapez şekilli rijitleştirici iç alanı

$u$  : Trapez şekilli rijitleştiricinin üst başlık harici çevre uzunluğu

$t_R$  : Rijitleştirici kalınlığı

$t_P$  : Plaka kalınlığı

Trapez şekilli rijitleştirici için  $\mu$  etki katsayısının bulunması aşağıda belirtilmiştir.

Plakanın eğilme rijitliği;

$$EI_P = \frac{Et_P^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots(1.5)$$

$I_P$  : Plaka atalet momenti

$\nu$  : Poisson oranı

Rijitleştirici kalınlığının plaka kalınlığına oranı;

$$\rho = \left(\frac{t_R}{t_P}\right)^3 \dots\dots\dots(1.6)$$

Etkili iki enleme kirişi arası mesafesi  $s_2 = 0,81s$  olarak kullanılmaktadır.

$$\frac{1}{\mu} = 1 + \frac{GK}{EI_P} \left(\frac{a^3}{12(a+e)^2}\right) \left(\frac{\pi}{s_2}\right)^2 \left[ \left(\frac{a}{e}\right)^3 + \left(\frac{e-j}{a+j} + \lambda\right)^2 + \frac{\lambda^2}{\rho} \left(\frac{j}{a}\right)^3 + \frac{24}{\rho} \left(\frac{h'}{a}\right) \times \left(c_1^2 + c_1c_2 + \frac{c_2^2}{3}\right) \right]$$

$$\lambda = \frac{(2a+j)(a+e)jh' - \rho a^3(e-j)}{(a+j)[2h'(a^2+aj+j^2) + j^3 + \rho a^3]} \dots\dots\dots(1.8)$$

$$c_1 = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{j}{a}\right) \dots\dots\dots(1.9)$$

$$c_2 = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{a-j}{a}\right) - \left(\frac{a+e}{a+j}\right) \frac{j}{2a} \dots\dots\dots(1.10)$$

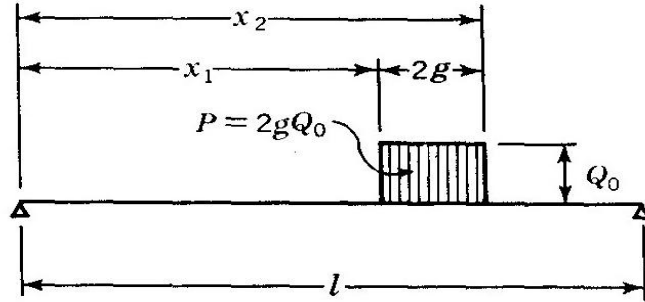
$j$  : Trapez kesitli rijitleştiricinin alt tabanının ağırlık merkezine uzaklığı.

$h'$  : Trapez kesitli rijitleştiricinin yan yüzey uzunluğu.

Rijitleştiricinin kesit boyutlarına bağlı olarak belirlenen  $j$ ,  $\lambda$ ,  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları konu ile ilgili yayınlarda tablolarda halinde bulunabilmektedir.

Bir ortotropik döşemenin yükler altındaki gerçek davranışını ve enleme kirişlerinin esnekliklerinin momentler üzerindeki değişimi tanımlayabilmek için taşıt yüklerinin Fourier serisi yardımıyla sisteme uygulanması gerekmektedir. Ayrıca yüklemenin tüm tabliye genişliğine yayılmasının sağlanması için yükler sinüzoidal olarak alınmalıdır. Taşıt yükünün ( $P$ ) sinüzoidal yükleme bileşeninin ( $Q_0$ ) belirli  $x$  mesafeleri için genel biçimi Şekil 33' te görülmekte ve 1.11 eşitliğinde verilmektedir.

$$P = Q_0 (x_2 - x_1) \dots \dots \dots (1.11)$$



Şekil 33. Tabliye genişliğinde genel yükleme

Şekil 33' de görülen genel yükleme sinüsün fonksiyonu olan bir dizi ile ifade edilmektedir.

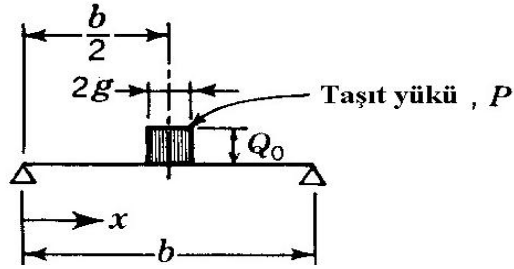
$$Q_x = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \sin \frac{n\pi x}{l} \dots \dots \dots (1.12)$$

$$\begin{aligned} Q_n &= \frac{2Q_0}{l} \int_{x_1}^{x_2} \sin \frac{n\pi x}{l} dx \\ &= \frac{2Q_0}{n\pi} \left[ \cos \frac{n\pi x_1}{l} - \cos \frac{n\pi x_2}{l} \right] \dots \dots \dots (1.13) \end{aligned}$$

Eşitlik 1.12, farklı taşıt yüklemeleri için aşağıdaki örneklerde tekil eşitliklere dönüştürülebilmektedir (Şekil 34, Şekil 35 ve Şekil 36).



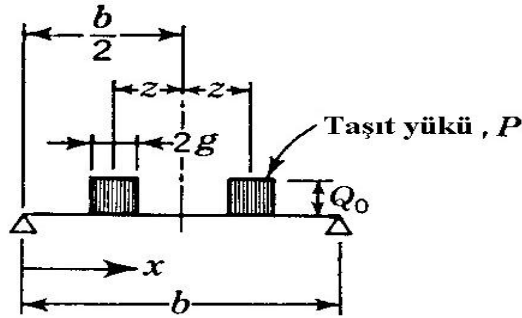
a) tabliye ortasında tek araçlık yükleme için;



Şekil 34. Tabliye ortasında tek araçlık yükleme

$$\frac{Q_{mx}}{Q_0} = \frac{4}{n\pi} \sin \frac{n\pi g}{b} \quad n = 1, 3, 5 \dots \dots \dots (1.14)$$

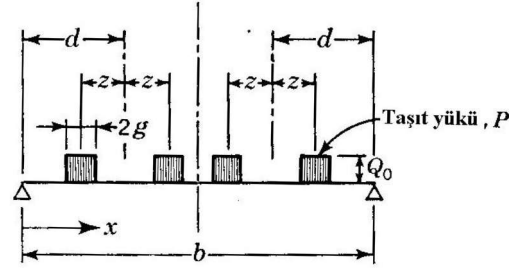
b) tabliye ortasında simetrik iki araçlık yükleme için;



Şekil 35. Tabliye ortasında simetrik iki araçlık yükleme

$$\frac{Q_{mx}}{Q_0} = \frac{8}{n\pi} \cos \frac{n\pi z}{b} \sin \frac{n\pi g}{b} \sin \frac{n\pi x}{b} \quad n = 1, 3, 5 \dots \dots \dots (1.15)$$

c) tabliye ortasında simetrik dört araçlık yükleme için;



Şekil 36. Tabliye ortasında simetrik dört araçlık yükleme

$$\frac{Q_{mx}}{Q_0} = \frac{16}{n\pi} \cos \frac{n\pi z}{b} \sin \frac{n\pi g}{b} \sin \frac{n\pi d}{b} \sin \frac{n\pi x}{b} \quad n = 1, 3, 5, \dots \dots \dots (1.16)$$

Rijitleştiricilerdeki eğilme momentlerinin bulunabilmesi için plakanın yükten bağımsız eşitliğine ihtiyaç vardır. Bu nedenle eşitlik 1.1 aşağıdaki hale getirilmektedir.

$$2H \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = 0 \dots \dots \dots (1.17)$$

Yukarıdaki eşitliğin genel çözümü de yer değiştirmeye bağlı bir seri ile ifade edilebilmektedir.

$$\omega_n = (C_{1n} \sinh \alpha_n y + C_{2n} \cosh \alpha_n y + C_{3n} \alpha_n y + C_{4n}) \sin \frac{n\pi x}{b} \dots \dots \dots (1.18)$$

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{b} \sqrt{\frac{2H}{D_y}} \dots \dots \dots (1.19)$$

$C_{1n}, C_{2n}, C_{3n}$  ve  $C_{4n}$  sınır şartlarına bağlı integrasyon sabitleridir. Bu sabitleri bulabilmek için yer değiştirmenin y ye göre türevleri

$$\omega' = \alpha (C_1 \cosh \alpha y + C_2 \sinh \alpha y + C_3) \sin \frac{n\pi x}{b} \dots \dots \dots (1.20)$$

$$\omega'' = \alpha^2 (C_1 \sinh \alpha y + C_2 \cosh \alpha y) \sin \frac{n\pi x}{b} \dots \dots \dots (1.21)$$

$$\omega''' = \alpha^3 (C_1 \cosh \alpha y + C_2 \sinh \alpha y) \sin \frac{n\pi x}{b} \dots\dots\dots(1.22)$$

$$\omega'''' = \alpha^4 (C_1 \sinh \alpha y + C_2 \cosh \alpha y) \sin \frac{n\pi x}{b} \dots\dots\dots(1.23)$$

şeklinde elde edilir.

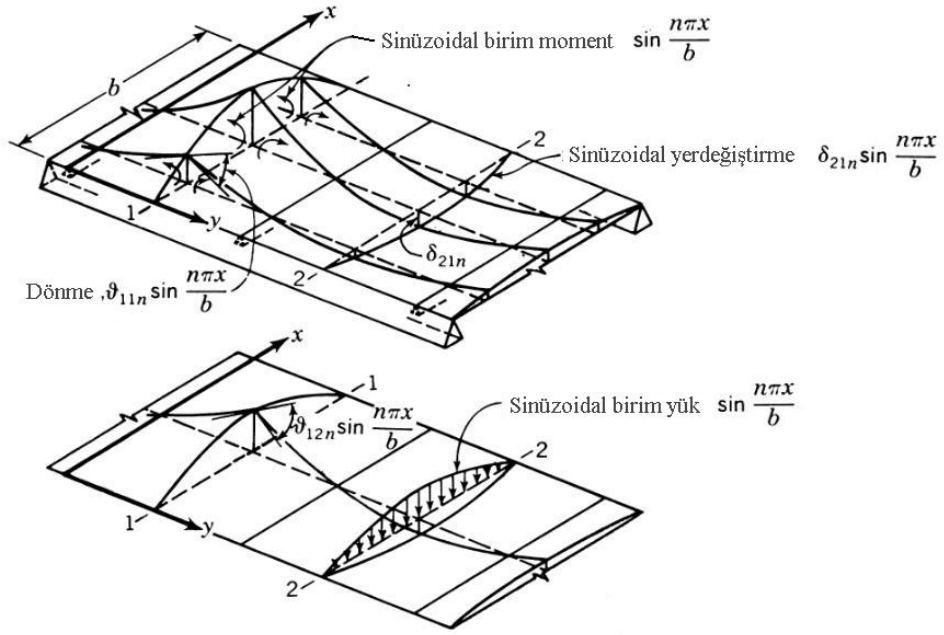
Moment hesabında köprü uygulamalarında sıklıkla kullanılan kuvvet yöntemi ( üç moment denklemleri) kullanılmaktadır. Sürekli ortotropik plakanın üç moment eşitliği ile çözümü için  $\kappa$  yük artırım katsayısı hesaplanmalıdır. Sinüzoidal olarak ifade edilen yükten dolayı momentlerde sinüsün fonksiyonu olacağından  $\kappa$  değerleri de n tane olacaktır. n değeri için literatürde minimum değer 35 olarak öngörülmektedir.  $\kappa$  değerleri moment hesabında direk kullanılmamakta, hesap sonunda elde edilen momentlerin maksimum haricindeki noktalardaki değerlerinin bulunması için çarpan olarak işleme dahil edilmektedir.

$$\kappa_n = -k + \sqrt{k^2 - 1} \dots\dots\dots(1.24)$$

$$k = \frac{\alpha s \coth \alpha s - 1}{a^*} \dots\dots\dots(1.25)$$

$$a^* = 1 - \frac{\alpha s}{\sinh \alpha s} \dots\dots\dots(1.26)$$

Moment değerleri, yer değiştirme ve birim dönmelere göre hesaplanan tesir çizgisi ordinatları yardımıyla bulunur (Şekil 37).



Şekil 37. Birim dönmeler ve yer değiştirmeler

Şekil 37' de gösterildiği üzere;

$\theta_{11n} \sin(n\pi x/b) = \sinüzoidal \ momentin \ etkisiyle \ maksimum \ değeri \ x = b / 2n$  noktasında oluşan 1-1 eksenindeki dönme.

$\delta_{21n} \sin(n\pi x/b) = 1-1 \ eksenindeki \ sinüzoidal \ momentin \ etkisiyle \ 2-2 \ ekseninde$  oluşan yer değiştirme.

Tesir çizgilerinin ordinatları da kısaca;

$$-\frac{\delta_{21n}}{\theta_{11n}} = \eta_n \dots\dots\dots(1.27)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Böylece moment;

$$M_n = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \sin \frac{n\pi x}{b} \eta_n \dots\dots\dots(1.28)$$

olarak bulunabilmektedir. Yüğü temsil eden eşitlik 1.29, eşitlik 1.28'de yerine konursa ve pay ile payda  $Q_0s$  değeriyle çarpılırsa eşitlik 1.30'da daha kolay bir moment eşitliği elde edilir.

$$Q_{nx} = Q_n \sin \frac{n\pi x}{b} \dots\dots\dots(1.29)$$

$$M = Q_0s \sum_{n=01}^{\infty} \frac{Q_{nx}}{Q_0} \frac{\eta_n}{s} \dots\dots\dots(1.30)$$

Burada  $\frac{Q_{nx}}{Q_0}$  değeri fourier katsayısı,  $\frac{\eta_n}{s}$  ise tesir çizgisi ordinatının iki enleme kirişi arası mesafeye oranıdır. İki değer de boyutsuzdur.

Eşitlik 1.30' da belirtilen moment değeri tabliye kesiti içindir. Rijitleştiricilerdeki moment ise,

$$M_R = Q_0s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\eta_n}{s} \int_{x=f-\frac{a+e}{2}}^{x=f+\frac{a+e}{2}} \frac{Q_{nx}}{Q_0} dx \dots\dots\dots(1.31)$$

$f$  : Momenti bulunacak rijitleştiricinin orta noktasının x yönündeki mesafesi ile ifade edilmiştir.

Genel olarak, yükleme altında enlemelerdeki yer değiştirmeler tabliyedeki moment dağılımını değiştirir. Tabliye ortasındaki pozitif momenti artırırken mesnetlerdeki negatif momentleri azaltır. Tabliye kirişi (enleme) esnekliğinin etkisi de elastik mesnetlenmiş sürekli kiriş teorisi ile açıklanmıştır. Elastik mesnetlenmiş sürekli kiriş reaksiyonları genel bir ifadeyle;

$$\bar{F}_m = \delta_m k_m \dots\dots\dots(1.32)$$

$\delta$  : Yer değiştirme

$k$  : Mesnetlerin dikey yer değiştirmeye direnci olarak açıklanabilecek elastik yay sabiti.

$m$  : Herhangi bir mesnedi (tabliye boyunca uzanan enlemelerin sayısı) temsil etmektedir.

olarak tanımlanmıştır.

Elastik mesnetli sürekli kirişlerdeki eğilme momentleri ve mesnet reaksiyonları boyutsuz bir parametre olan göreceli (rölatif) rijitlik katsayısı  $\gamma$  ya bağlıdır. Elastik mesnetli sürekli kirişlerin tesir çizgileri ordinatlarının bulunması rijit mesnetli sürekli kirişler gibi birim dönmelere bağlıdır. Rölatif rijitlik katsayısı ( $\gamma$ ),

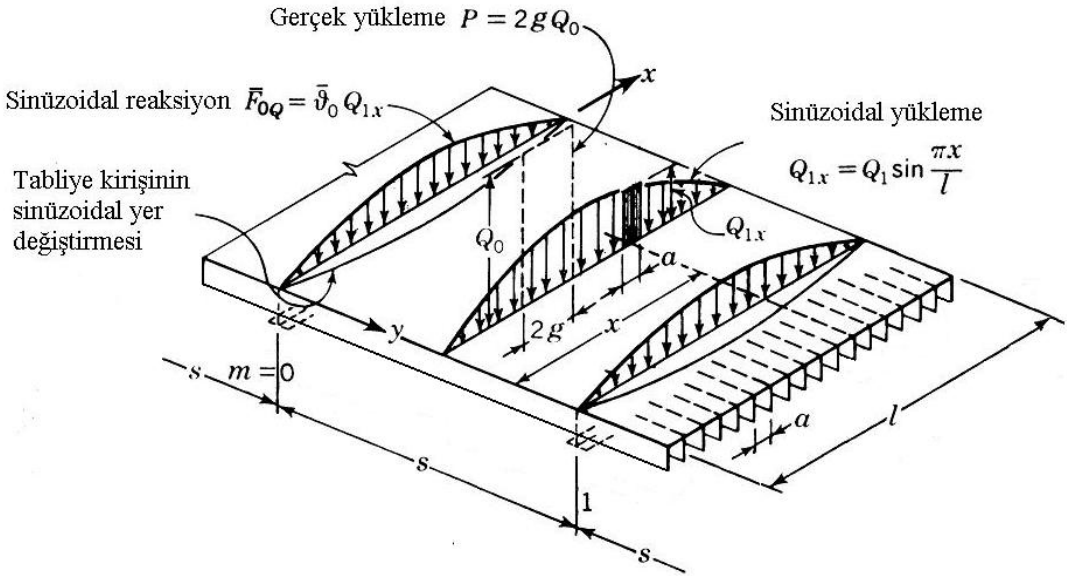
$$\gamma_n = \frac{EI_R l^4}{s^3 (a+e) n^4 \pi^4 I_F} \dots\dots\dots(1.33)$$

şeklinde hesaplanır. Pratik çözüm istenirse tüm  $\gamma$  değerlerinin ortalaması da kullanılabilir.

Eşitlik 1.32, k değerine göre yazılırsa

$$k = \frac{\bar{F}}{\delta} \dots\dots\dots(1.34)$$

haline gelir.



Şekil 38. Tabliyedeki sinüzoidal yükleme

Şekil 38' de görüldüğü üzere sinüzoidal yükleme  $Q_{nx}$  den dolayı  $m=0$  daki  $(\bar{F}_{0Q})_n$  reaksiyonu aşağıda belirtilmiştir.

$$(\bar{F}_{0Q})_n = \bar{Q}_{0n} Q_n \sin \frac{n\pi x}{l} \dots\dots\dots(1.35)$$

$\bar{Q}_{0n}$  : Tesir çizgisi ordinatı.

$\gamma$  değeri  $\bar{Q}_{0n}$  değerinin bulunması için kullanılmaktadır.

Enleme kirişinde oluşacak yer değiştirme ise,

$$\delta_n = \frac{1}{EI_F} \iiint \iiint (F_{0Q})_n dx^4 = \frac{\bar{Q}_{0n}}{EI_F} \left( \frac{l}{n\pi} \right)^4 Q_n \sin \frac{n\pi x}{l} \dots\dots\dots(1.36)$$

$EI_F$  : Enleme kirişinin rijitliği.

$l$  : Enleme kirişinin uzunluğu.

Eşitlik 1.35 ve eşitlik 1.36, eşitlik 1.34' de yerine konursa elastik yay sabiti;

$$k_n = \frac{n^4 \pi^4 EI_F}{l^4} \dots\dots\dots(1.37)$$

şeklinde elde edilir.

Enleme kirişinin esnekliği nedeniyle tabliye kesitindeki eğilme momentindeki düzeltme;

$$\Delta M = P_s \sum \frac{F_m}{P} \frac{\bar{\eta}_{im}}{s} \dots\dots\dots(1.38)$$

$$\frac{F_m}{P} = \left[ -0,8038 \frac{y}{s} + 1,3923 \left( \frac{y}{s} \right)^2 - 0,5885 \left( \frac{y}{s} \right)^3 \right] (-0,2679)^{m-1} \dots\dots\dots(1.39)$$

$m$  : Herhangi bir enleme kirişinin numarası

$y$  :  $m$  değerine sahip enlemenin  $y$  eksenindeki mesafesi.

$\frac{\bar{\eta}_{im}}{s}$  :  $\gamma$  değerine göre yönetmelikteki abaklardan alınmaktadır.

şeklinde ifade edilmiştir.

Rijitleştiricilerdeki momentin düzeltilmesi ise;

$$\Delta M_R = Q_0 s (a + e) \frac{Q_{1x}}{Q_0} \sum \frac{F_m}{P} \frac{\bar{\eta}_{im}}{s} \dots\dots\dots(1.40)$$

ifadesi ile yapılmaktadır. Burada ortotropik çelik plakalı döşeme hesabı genel hatlarıyla verilmiştir. Bu yöntemle göre hesap yapılacak ise ayrıntılı açıklamanın bulunduğu kaynağın incelenmesi gerekmektedir.

### 1.3.3. Kuleler

Kablolu köprülerin diğer ana bileşeni de kuleleridir. Kuleler, tabliye ile kabloların yüklerini üzerine alarak zemine ileten yapılardır. İlke olarak, kuleler dev kolonlar olarak algılanabilir ve bu yönde projelendirilebilir şekilde düşünülse de kabloların ve diğer dinamik yüklerin neden olduğu yatay yüklerin oluşturduğu moment etkisi kulelerde eğilme meydana getirmektedir. Bu nedenle sadece aksel yükler altında yapılan hesap, köprü kuleleri için yeterli değildir. Örneğin tabliye ortasından yükselen tekil kuleler için tabliye altında kalan kule kısmı zemine, tabliye üstünde kalan kule kısmı da tabliye seviyesinde kulenin alt kısmına ve tabliyedeki enine kalın kirişe ankastre mesnetlendirilerek burkulmaya karşı emniyet sağlanmış olmaktadır.

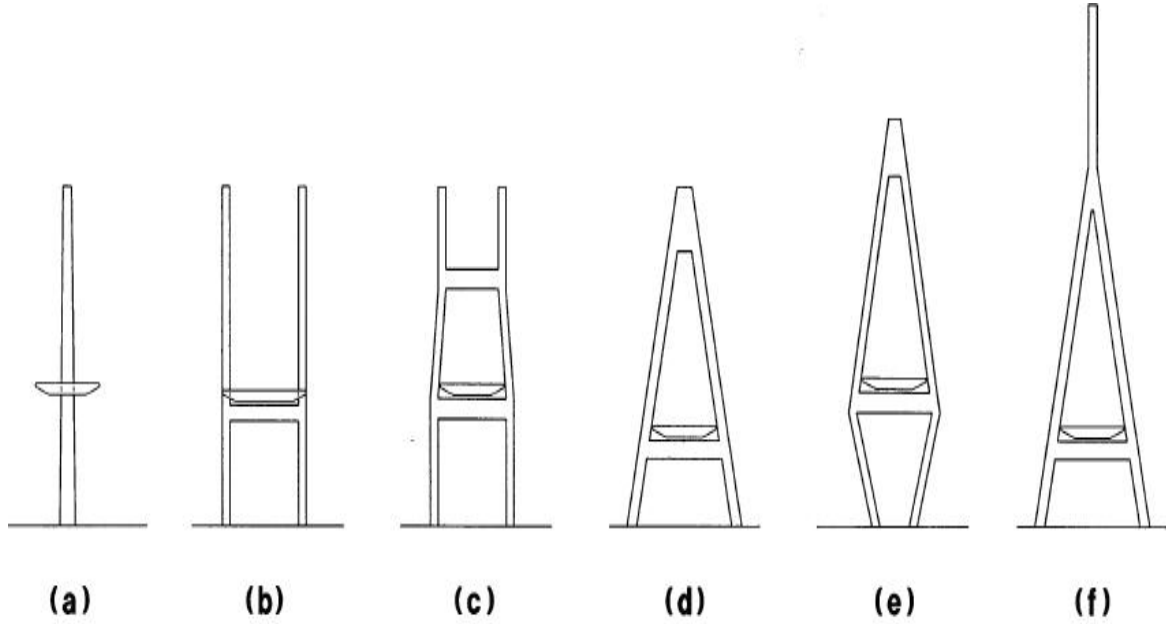
Kuleler genellikle binlerce ton yükü taşımak zorundadırlar. Bundan dolayı kutu kesitler kullanılarak minimum malzemeyle burkulmaya karşı güvenlik sağlanmaya çalışılmaktadır. Kuleler çelikten, betondan veya öngerilmeli betondan yapılabilir. Çelik kulelerin avantajı hafif, narin, esnek, sünek ve hızlı yapımıdır. Ancak çeliğin periyodik bakım gereksinimi maliyeti artırmaktadır. Bununla birlikte kulelerde malzeme olarak beton kullanılması uzun açıklıklarda çeliğe oranla % 40 civarında ekonomi sağlamaktadır. Ancak malzeme seçimi sadece ekonomi ile ilgili değildir, zemin şartları, çevresel koşullar, yapı kararlılığı vb. sebepler bazen ekonomiyi ikinci planda bırakabilmektedir.

İnşa edilecek kule tipi seçilirken kablolardan gelen yükleri sorunsuz, emniyetli bir şekilde zemine iletebilmesi sağlanmalıdır. Ayrıca kuleler temel işlevlerinin yanında estetik



ve ekonomik olmalıdır. Diğer köprü bileşenlerinin aksine kuleler, yenilenemeyeceğinden ve bir parçası dahi değiştirilemeyeceğinden köprü ömrü açısından iyi dizayn edilmelidir.

Kablolu köprülerde kullanılan çeşitli kule tipleri mevcuttur. Bunlar, tekil kuleler, H şekilli kuleler, A şekilli kuleler, elmas şekilli kuleler ve ters Y ( $\lambda$ , lamda) şekilli kuleler şeklinde sıralanabilmektedir (Şekil 39).



Şekil 39. Kule kesitleri (a) Tekil kule (b-c) H şekilli kule (d) A şekilli kule (e) Elmas şekilli kule (f) Ters Y şekilli kule

Tekil kuleler açıklıkları ve genişlikleri en az olan kablolu köprülerde kullanılmaktadır. Kablolar tabliye ortasına düzlem şekilde bağlanırlar ve yatay yükler altında çok emniyetli olmayan sistemlerdir. H şekilli kulelerde kablolar tabliye kenarlarına bağlanırlar. Bu bağlantı yerlerinde tabliyede enine kirişler inşa edilerek rijit bir sistem oluşturulmakta ve dinamik ve yatay yüklerin döndürme etkilerine karşı emniyet sağlanmaktadır. H şekilli kulelerde yapı kararlılığı için kullanılan enine bağlantıların sayısı projeye göre değişebilmekte, enine bağlantılar yatay değil çapraz elemanlarla da oluşturulabilmektedir. A şekilli kulelerin H şekilli kulelere göre avantajı kablo bağlantı noktalarıdır. H şekilli kulelerde kabloların kulelere mesnetlendiği yerler, tabliye hizasının dışında, A şekilli kulelerde ise tabliye hizasının içinde bulunmaktadır. H şekilli kulelerin kablo bağlantı noktaları tabliye ekseninden, A şekilli kulelere göre daha uzaktır. Bu sebepten A şekilli kulelerde kabloların kuleye bağlantı yerleri itibariyle moment kolları kısaldığından oluşan

sistemin rijitliği ve stabilitesi daha yüksektir. A Şekli kuleler ile ters Y Şekli kuleler arasında yapı rijitliği bakımından fark yoktur. Uzun açıklıklar yüksek kulelere gereksinim duyduğundan ters Y Şekli kuleler ve elmas Şekli kuleler uzun açıklıklı kablolu köprülerde kullanılmaktadır. Genel kablolu köprü tasarımlarında kulelerin tabliye üstü yükseklikleri köprü ana açıklığının % 20 si kadardır [4,11,12].

#### **1.4. Konu İle İlgili Daha nce Yapılmış alıŐmalar**

Günümüzde tren hız ve yüklerinin ve trafik yoğunluğunun artışı, yeni büyük araçların trafiğe katılıŐı köprüler üzerindeki dinamik yükleri ve titreŐimlerin büyüklüklerini artırmıştır. Bu artış mevcut köprülerin yorulma ve servis ömürlerini azaltmıŐtır. X. Lei ve N.A. Noda çalışmasında [13], köprülerin günümüz yükleri altında davranışlarını araŐtırmıŐlardır. Çalışmada araç ve araç katarları için dinamik sayısal modeller sonlu elemanlar metodu kullanılarak geliştirilmiştir. Araç ve araç katarı sistemi zayıf ve güçlü olarak iki Şekilde oluşturulmuştur. Güçlü sistemde hem araç hem de tren yükü, zayıf sistemde ise sadece tren yükü alınmıştır. İki sistem birbirinden bağımsız analiz edilmiştir. Araç ve tren katarlarının analizinde araç tekeri ve ray arasındaki kuvvet etkilerini sabit ve hareketli olarak karşılaştırılması trigonometrik seriler de kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada trafik yoğunluğunu da iŐlemler dhil etmek için farklı Şeritlerde farklı hızlarda farklı araçlarla analizler yapılmıştır. Sonuçlarda köprülerin günümüz yükleri altında dinamik tepkilerinin oluŐmasında rastgele düzensiz katar hareketlerinin önemi vurgulanmış ve yeni tasarımlar için önerilerde bulunulmuştur.

Her yapı sistemi üzerinde dengeyi bozabilecek kritik noktalar vardır. Bu kritik noktalar çatallanma noktası ve limit noktası olarak adlandırılmaktadır. Çatallanma noktası kararsızlık yaklaŐımı başlangıç hataları ve artık gerilmeler gibi hesaba katılmayan yapı hatalarını da dikkate alan elastik ve doğrusal olmayan eğilme modeline dayanır. Bu yaklaŐım bir nevi olasılık hesabı yaparak analiz eder. Limit noktası kararsızlık yaklaŐımı ise geometrik ve malzeme açısından doğrusal olmamayı dikkate alan yumuŐak plastik mafsallı yöntemine dayanan analiz yöntemidir. Weon-Keun Song ve Seung-Eock Kim çalışmalarında [14], kablolu köprülerin düzlem göçme mekanizmalarının statik yükleme altında analizi için lineer ve elastik olmayan eğilme modeline dayanan çatallanma noktası kararsızlık yaklaŐımı ile yumuŐak plastik mafsallı modeline dayanan limit noktası kararsızlık yaklaŐımı ele alınmıştır. Fan tip, yarı-harp tip ve harp tip olmak üzere üç model

tasarlanmıştır. Ayrıca köprülerin yük-taşıma kapasiteleri içinde seçilen yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda çatallanma noktası kararsızlık yaklaşımının yük-taşıma kapasitesini değerlendirmede yeterli olmadığı görülmüş ve limit noktası kararsızlık yaklaşımına göre de fan tip kablolu köprülerin diğer tiplere oranla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Kablolu köprüler ekonomi ve yapısal özellikleri açısından genelde büyük açıklıklı inşa edilirler. Bir köprünün dinamik davranışının belirlenebilmesi araç yükleri altında analizi büyük önem taşımaktadır. D. Bruno\_, F. Greco ve P. Lonetti çalışmalarında [15], farklı araç kombinasyonları ile köprü karakteristikleri, hareketli yükler ve dinamik etki değişiklikleri arasında ilişkiler kurmaya çalışmışlardır. Çalışmada büyük açıklıklı kablolu köprülerin hareketli yükler altında dinamik tepkilerini araştırılmıştır. Üç boyutlu A ve H tip kuleli modeller üzerinde tabliyenin her bir parçası tüm tabliye ile karşılaştırılmalı incelenmiştir. Tabliye, kule ve kablo sistemi arasındaki kuvvet etkileşimi sürekli dağıtılmış fonksiyonlarla tanımlanmış, direk integrasyon yöntemiyle denge denklemleri çözülerek yer değiştirme ile gerilme değişikliklerine ait dinamik etki faktörleri belirlenmiştir. Araştırma sonunda köprü deformasyonu ve hareketli yükler arasındaki etkileşim için genelde dikkate alınmayan merkezci ve coriolis kuvvetlerinin önemsenmesi gerektiği vurgulanmış, eksantrik yüklemeler sonucunda da bükülme ve burulma deformasyon modlarına dikkat çekilmiştir.

Köprülerin trafik, rüzgar ve deprem gibi dinamik yüklere karşı güvenliğinin sağlanması önemli bir sorundur. Eğer köprünün doğal frekansları, mod şekilleri ve sönümlenme oranları doğru elde edilebilirse bu sorun çözülebilir. Bir yapının dinamik karakteristiklerini (modal parametrelerini) belirlemede kullanılan eski ama etkin bir yöntem olan modal analiz de bu sorunun çözümünde iyi bir yol göstericidir. Wei-Xin Ren, Xue-Lin Peng ve You-Qin Lin çalışmalarında [16], orta açıklığı 605 m uzunluğa sahip kompozit tabliyeli Quingzhou kablolu köprüsünün analitik ve deneysel modal analizi yapılmıştır. Yapının üç boyutlu sonlu elemanlar modeli analiz edilerek deformasyon sonuçlarına, doğal frekansları ve mod şekillerine ulaşılmıştır. Bunun yanında modele çevresel titreşimler ( taşıt ve rüzgâr yükü) de etki ettirilmiştir. Deneysel çalışmada 15 ivmeölçerle köprünün çeşitli noktalarından kayıtlar alınmış ve bir sonlu elemanlar modeli daha oluşturulmuştur. Deneysel ve analitik iki modelin analiz sonuçlarının çok yaklaşık olduğu gözlemlenmiş, köprünün ilk 20 modu değerlendirilmiş ve tüm doğal frekansların 0.222 – 0.752 Hz aralığında olduğu

gözlemlenmiştir. Toplam uzunluğu 1105 m olan Quingzhou kablolu köprüsünün uzun açıklıklı köprülerin gelecekteki modellerine referans olabileceği belirtilmiştir.

Önceleri bilgisayar programları biri köprüye diğeri araçlara ait iki diferansiyel eşitlikle çözüm yapmaktaydı, ancak günümüzde trafik yoğunluğunun, araç çeşitliliğinin ve hızlarının artması nedeniyle bilgisayar programlarının daha karmaşık çözümler yapabilmesi gerekmektedir. W. H. Guo ve Y. L. Xu çalışmalarında [17], farklı tür araç katarlarının kablolu köprülere etkilerinin bilgisayara uyarlanması amaçlanmış ve sonlu elemanlar yardımıyla araç kombinasyonları oluşturulmuştur. Köprü üzerinden farklı türden araçların geçtiği varsayılarak eşitlikler bu yönde çıkarılmıştır. Her araca ait kütle matrisi, rijitlik matrisi ve kuvvet vektörleri geliştirilmiş ardından köprü ile katarlar arasındaki etkileşimin gerçekliği için yol yüzeyi pürüzlülüğü katsayıları çıkarılmıştır. Modellerde araç tekerlekleri yaylarla temsil edilmiş ve yaylarda birbirine rijit bağlanmışlardır. Yol yüzeyi sürekli ve tekerlerin her zaman yüzeye değmesi kabulü yapılmıştır. Köprü ise geleneksel sonlu elemanlar metodu ile tasarlanmış yapısal etki sönümlenme davranışı da Rayleigh sönümlenme metodu ile modellenmiştir. Bu bilgiler ışığında çeşitli araç katarlarının kablolu köprüler üzerindeki dinamik etkileri için bir bilgisayar programı tasarlanmıştır.

Modern kablolu köprülerin açıklıkları gün geçtikçe artmakta bu nedenle bu yapıların emniyeti için geometrinin ve malzemenin lineer olmayan etkilerini içeren daha gerçekçi analizler yapılmalıdır. A.M.S, Freire, J.H.O, Negrao, ve A.V. Lopes, çalışmalarında [18], kablolu köprülerin statik analizindeki geometrik lineer olmayışın önemi değerlendirilmiştir. Kablolu köprülerde geometrik lineer olmayan davranışın kiriş-kolon etkileşimi,  $P-\Delta$  kuvveti olarak ta bilinen büyük yer değiştirmelerin etkisi ve kabloların eğilme etkisi olarak üç ana nedeni vardır. Çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar modelinin lineer, elastisite modüllerinin değiştirilmesine dayanan yarı lineer ve lineer olmayan analizi yapılmıştır. Sonuçlar çelik kablolu köprülerde en önemli lineer olmayan etkilerin kablo eğilmelerinden ve büyük yer değiştirmelerden kaynaklandığını doğrulamış, lineer ve yarı lineer analizlerin ise bu tür yapılarda sınırlı kaldığını ve modelleme için yeterli olmadıklarını göstermiştir.

Yapılan çeşitli çalışmalarda kablolu köprülerin kablolarında rüzgar, trafik yükü, deprem vb. dinamik yükler altında büyük genliklerin meydana geldiği ve kablolarında anlık eğilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Çoklu kablo sisteminin geniş ölçüde kullanılmasından dolayı tüm köprü sisteminin doğal modlarının frekansları kabloların yerel doğal frekanslarına yaklaşmış bu da yükler altında kabloların, anlık büyük genliklerin

oluşmasına, yatkın hale gelmesine neden olmuştur. Q. Wu, K. Takahashi, T. Okabayashi ve S. Nakamura çalışmalarında [19], kablolu köprülerdeki kabloların parametrik titreşimlerini incelemiştir. Anlık büyük genliklerin irdelenmesi sinüzoidal yaklaşımla üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılmış analizde taşıt ve deprem yükleri de kullanılmıştır. Oluşturulan modelde kuleler her yönden, tabliye düşey ve dönme yönünden tutulmuş kablolar ise mesnetlendirilmemiştir. Toplam 12 mod esas alınan analizde beklendiği gibi frekanslar yaklaşık çıkmıştır. Sonuç olarak kablolardaki anlık büyük genliklerin kablolar ve köprü sistemine zarar vereceği görülmüş kabloların mesnetlendirilmesi için zamanla değişen yer değiştirmelere göre önerilerde bulunulmuştur.

Kablolu köprülerin deprem yükleri altında güvenliğinin sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle olasılıklı sismik risk analizi yapılarak değişken kuvvetlerin etkileri incelenmelidir. R.A. Khan, T.K. Data ve S. Ahmad çalışmalarında [20], fan tip kablolu köprülerin hasar olasılık matrisi kavramı yardımıyla sismik risk analizini değerlendirmiştir. Kablolu köprü modeli iki boyutlu aksel basınca ve eğilmeye maruz bırakılmış sürekli kiriş olarak tasarlanan tabliye ile oluşturulmuştur. Köprü tepkilerinin belirlenmesi için deprem yoğunluğuna göre belirlenmiş yer hareketlerinin güç spektral yoğunluk fonksiyonlarının kullanıldığı bir spektral analiz kullanılmıştır. Kullanılan deprem büyüklüğü için büyük, orta ve küçük olarak üç tane hasar olasılık matrisi belirlenmiştir. Bunun yanında farklı deprem büyüklüklerinin oluşma olasılığı ile farklı hasar olasılık matrisleri birleştirilerek bir sismik risk indeksi oluşturulmuştur. Hasar olasılık matrislerinin belirlenmesinde deprem oluş sıklıkları, yer hareketi bileşenleri ve zemin şartları parametreleri kullanılmıştır. Köprü tabliyesinin akma gerilmesine ulaştığı andaki maksimum eğilme momenti sınır düzey olarak kabul edilmiştir. Tabliye gerilmelerinin, sınır düzeye eşit olması ya da aşması haline büyük hasar oluşma olasılığı, sınır düzeyin yarısına eşit olması ya da aşması ancak sınır düzeye erişmemesi haline orta hasar oluşma olasılığı ve sınır düzeyin yarısının altında kalması haline de küçük hasar oluşma olasılığı olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak gelişmiş bir stokastik analiz olarak tasarlanan bu metod ile, büyük ve orta hasar oluşma olasılıklarının sınır düzeyin altında kaldığı ve yer hareket bileşenlerinin büyük ve orta hasar oluşma olasılıklarına önemli etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yer hareketlerinin boyuna bileşenlerinin tabliyenin boyuna doğrultusunda önemli hasarlar oluşturulabileceği ve hasar oluşma olasılıkları üzerinde zemin şartlarının büyük önemi olduğu saptanmıştır.

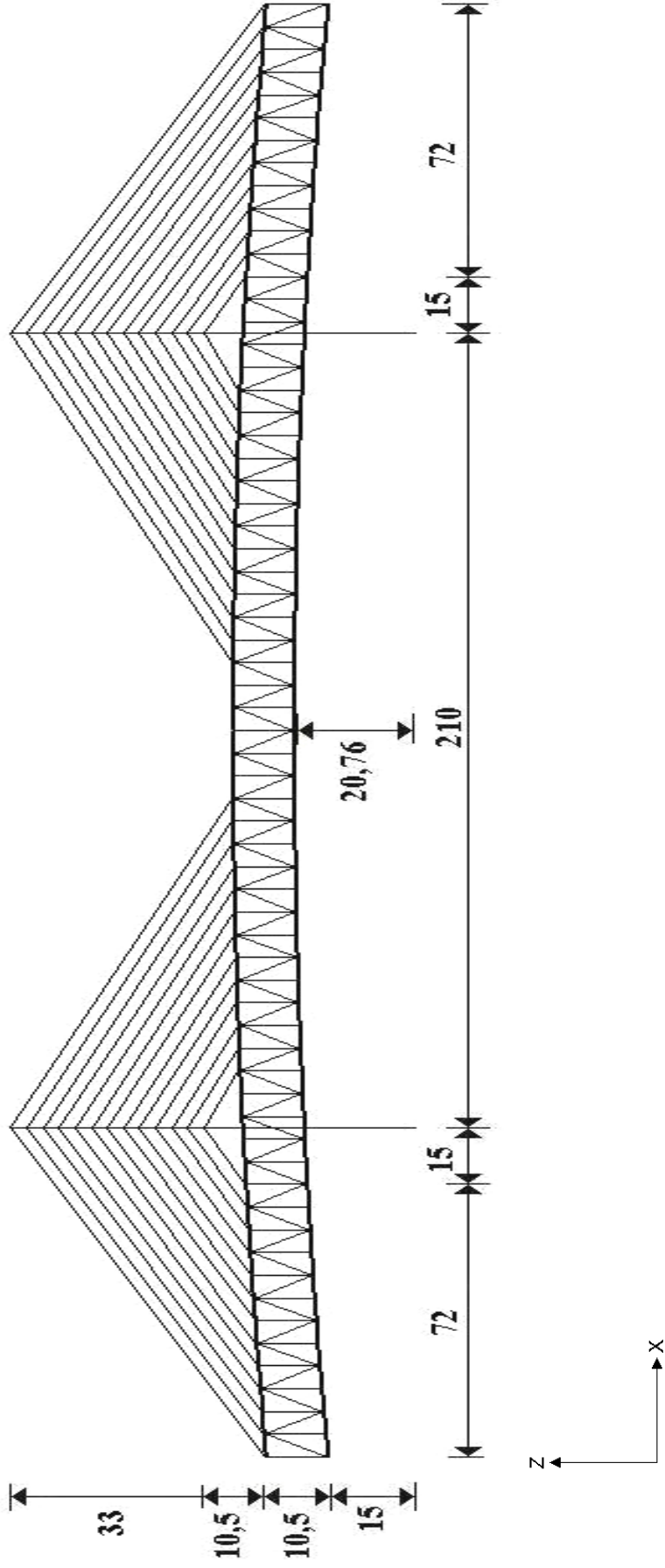
Tek tabliyeli köprüler dünyanın bir çok yerinde iki kıyıyı birleştirerek karayolu taşımacılığına hız kazandırmak için uygulanmaktadır. Ancak günümüzde artan trafik

yoğunluğuna çözüm getirmek için çok katlı köprü uygulamaları gündeme gelmiştir. Y.L. Xu, ve N. Zhang da çalışmasında [21], kablolu köprü tasarımını bir adım ileri götürerek çift tabliyeli bir köprü tasarlamıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile üst tabliyede araç trafiği alt tabliyede ise tren trafiği olması düşünülerek hazırlanan modelin değişik yönlerden etkileyen rüzgar yükleride göz önüne alınarak dinamik analizi üzerinde durulmuştur. Rüzgar yükleri köprüye hız spektral gösterim yöntemi kullanılarak zaman alanında oluşturulmuş ani ve kademeli artan şekillerde uygulanmıştır. Rüzgar etkisindeki araçların ve trenin ani kısmi yön değişimleri, hızlarındaki azalma yada artım ile köprü tabliyelerinin davranışı arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır. Tabliye ile araç ve tren arasındaki etkileşim ise tekerlek izleri düşünülerek sağlanmıştır. Tekerlek izleri araçlarda düz değil eğrisel kabul edilmiş trende ise raylara şerit yükler uygulanmıştır. Sonuç olarak ortalama 30m/s olarak hesaba katılan rüzgar yükü ile 160 km/h olarak hesaba katılan tren yükü köprüde titreşimler dolayısıyla önemi yanal yer değiştirmelere neden olmuştur. Ancak düşey yer değiştirme konusunda sorun oluşmamıştır. Araçlar ve tren için hesaplanan yoldan çıkarma kuvveti kabul edilir değerlerin altında kalmış ve taşıtların güvenli seyahat edebileceği görülmüştür. Trenin düşey hareketi yolcu konforu konusunda sorun olmazken yanal hareket yolcu konforunu sağlamamıştır. Yapılan çalışmada araçlara ve trene sabit hızlar verilmiş rüzgar yükü de düşünüldüğü gibi tam değişken tasarlanamamıştır. Ayrıca sismik bir yükte sisteme uygulanmamıştır. Ancak çok katlı köprü tasarımı konusunda çok az olan kaynak arasında bu çalışma ile verimli verilere ulaşılmıştır.

### **1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

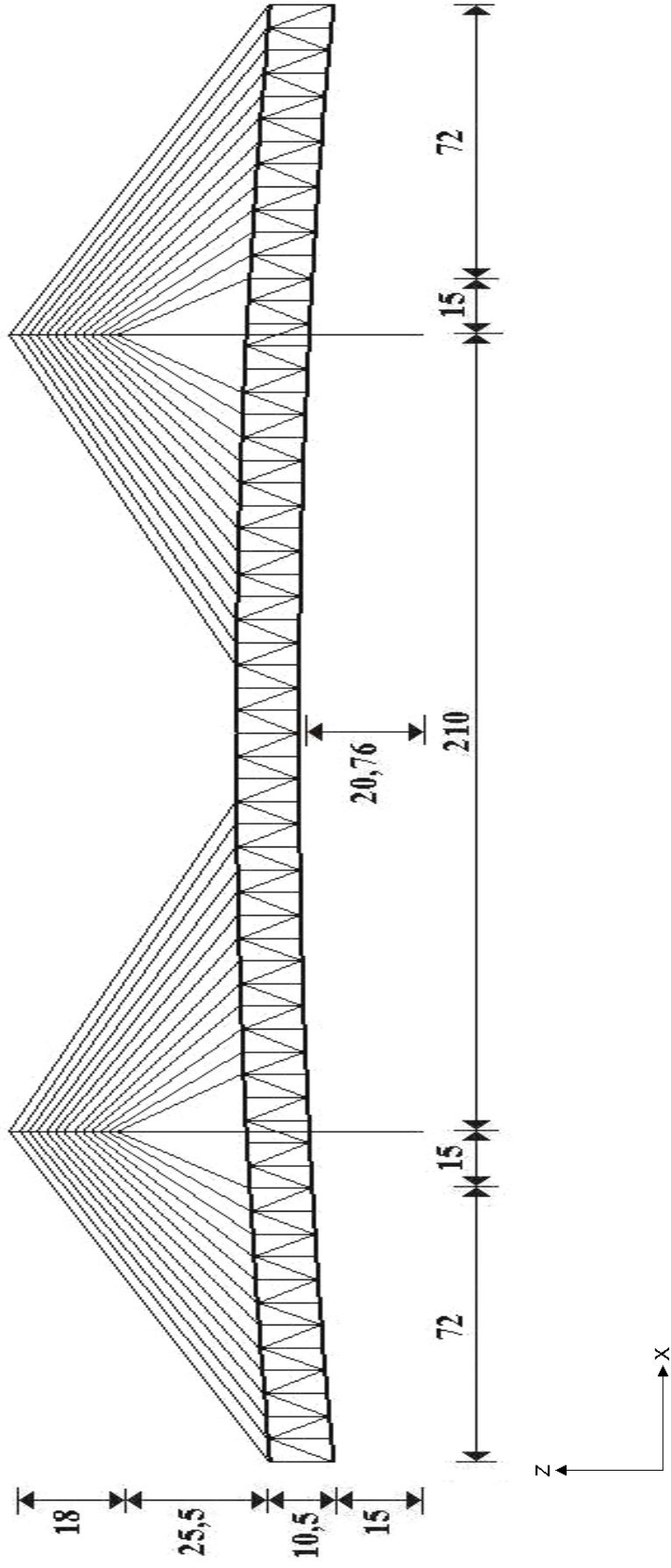
Kablolu köprüler, orta uzunluktaki açıklıkları geçmek üzere, dünya çapında kullanılan bir köprü türüdür. Tabliye, kablolar ve kulelerden oluşan bu köprüler, kısa açıklıklarda ekonomik olması ve inşaa sürelerinin kısalığı bakımından tercih edilmişlerdir. Günümüzde ve gelecekte karayolları çok daha fazla taşıtı taşımak zorunda olduğundan tek tabliyeli köprüler yerine çift tabliyeli kablolu köprüler inşaa edilmeye başlanmıştır. Bu nedenle bu çalışmada, çift tabliyeli köprülerin davranışlarını incelemek için, aynı tabliye, kule ve mesnetlenme koşuluna sahip çift tabliyeli, harp tip (Şekil 40), yarı harp tip (Şekil 41) ve fan tip (Şekil 42) kablo düzenlemeli üç boyutlu, üç ayrı kablolu köprü modeli oluşturulmuştur. Çalışmanın amacına uygun olarak modellenen köprülerin orta açıklıkları

210 m kenar açıklıkları ise 87 m dir. Yüksekliği 69 m olan dört kule tarafından taşınan bu köprülerin, trapez kesitli ortotropik tabliyelerinin enkesit boyutları 16 m genişliğinde ve 2,5 m yüksekliğindedir. Her bir modelde değişik çaplarda 104 kablo kullanılmıştır. Kablolar tabliyeye 6 metre aralıklarla bağlanmışlardır. Çalışmada çift tabliyeli üç tür kablolu köprünün taşıt ve sismik yükler altında analizleri yapılarak karşılaştırmalı incelemesi amaçlanmıştır.



Şekil 40. Harp tip kablolu köprü modelinin şematik gösterimi





Şekil 41. Yarı harp tip kablolu köprü modelinin şematik gösterimi



## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Giriş**

Bu çalışmada, çalışmanın amacına uygun olarak modellenen, farklı kablo tiplerine sahip kablolu köprülerin kendi yükleri, taşıt yükleri ve sismik yükler altında yapısal çözümlemesi yapılarak elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Modelleme ve karşılaştırma aşamalarında konu ile ilgili yapılan çalışmalardan ve yönetmeliklerden yararlanılmıştır. Kablolu köprülerin modellenmesi ile ilgili özel bir yönetmelik bulunmadığından modelleme konusunda farklı yönetmeliklerin konu ile ilgili maddeleri, literatürde kabul görmüş araştırmacıların yöntemleri ve inşa edilmiş kablolu köprü detayları kullanılmıştır.

Oluşturulan üç ayrı model için kablo düzenleri hariç aynı kesit ve malzeme özellikleri kullanılarak birbirine benzer sistemler meydana getirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan modeller arasındaki karşılaştırmalar yapılmıştır.

### **2.2. Önboyutlandırma**

Ön boyutlandırma, sistemin, yükten bağımsız, geçmiş deneyimlerden ve uygulamalardan yararlanılarak matematik modelinin oluşturulmasıdır. Kablo destekli köprülerin tasarımı için kullanılacak genel bir yönetmelik bulunmamakta ancak bu konuda ileri ülkelerin yapı şartnamelerinde kablolu köprüler ile ilgili maddeler ve bazı araştırmacıların derlediği yardımcı kaynaklar bulunmaktadır. Çalışmaya konu olan kablolu köprülerin optimum tasarımı için daha önceki uygulamalardan yola çıkılarak farklı kesit özelliklerinde birkaç farklı model oluşturulmuş ve bu modeller karşılaştırılarak en uygun model çalışmada yer almıştır. Modellemeye tabliyeden başlanmış ardından kablolar ve kulelere geçilmiştir. Ön boyutlandırma, Gimsing N.J. [4] ve Troitsky M.S. [5] tarafından önerilen şekilde yapılmıştır.

Tabliye için göz önüne alınan ilk koşul, açıklık mesafesine bağlı tabliye yüksekliğidir. Kablolu köprülerde H şekilli kuleler kullanıldığı takdirde ortotropik tabliyeler için orta açıklığın tabliye yüksekliğe oranı 1/50-150 arasında değişmektedir. Bu oran A şekilli kuleler için daha azdır. Çalışmada H şekilli kuleler ve ortotropik tabliye kullanılmıştır.

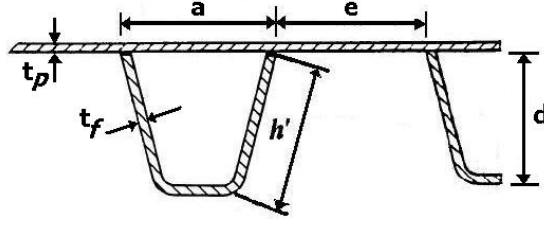
Seçilen ana açıklık 210 m' dir ve buna bağlı olarak değişik yüksekliklerde ortotropik tabliye modelleri oluşturulmuştur. Tabliye genişliğinin derinliğine oranı ise 1/10–15 arasında değişmektedir. Tabliye genişliği, 3 metre genişlikli 4 şeritten ve yanlarda 2 şer metrelik yaya yolu olarak düşünülmüş ve 16 m seçilmiştir. Tabliyenin kenar açıklığının orta açıklığına oranı ise 0,35–0,45 arasında değişmektedir. 210 metre seçilen orta açıklığa bağlı olarak kenar açıklık mesafeleri için de farklı modeller oluşturulmuştur. Göz önüne alınan diğer bir koşulda orta açıklığa bağlı kule yüksekliğidir. Kulelerin tabliye üstü yüksekliklerinin orta açıklığa oranı ise 0,2–0,25 arasında değişmektedir.. Kabloların çapları için herhangi bir ön seçim koşulu belirtilmediğinden ön boyutlandırma için inşa edilmiş köprülerden esinlenilmiştir.

Tekrar hatırlatmak gerekirse ön boyutlandırma da sadece geçmiş uygulamalardan ve deneyimlerden yola çıkılarak tahmini boyutlandırma yapılmış yükler uygulanmamıştır.

### **2.3. Pratik Tasarım**

#### **2.3.1. Plaka**

Modellerde tabliye için trapez kesitli rijitleştiricili (rib) ortotropik tür döşeme kullanılmıştır (Şekil 43). Ortotropik çelik döşemenin birincil özelliği üzerine gelen yükleri boyuna uzanan rijitleştiricilere aktararak elde ettiği büyük yük taşıma kapasitesidir. Ayrıca aynı boyutlardaki kompozit tabliyelerden daha hafiftir. Ortotropik tabliye özellikleri köprü sınıflandırması yapılarak birçok ülke yönetmeliğinde bulunmaktadır. Ancak yapılan sınıflandırma içerisinde kablolu ya da asma köprülerin bahsi geçmemektedir. Yönetmelikler kullanımı yaygın olan kısa açıklıklı ( 150 m) kablosuz köprüler için değerler vermekte, kablolu köprüler için ise tasarımcının bilgilerinin, araştırmacıların yöntemlerinin ve yapılan çalışmalardan elde edilen deneyimlerin kullanmasını önermektedir. Ortotropik tabliyenin kesit özellikleri AASTHO-LRFD köprü yönetmeliğine [22] ve AISC ortotropik çelik plakalı köprü tabliyelerinin tasarımı el kitabına [23] dayanılarak seçilmiştir.



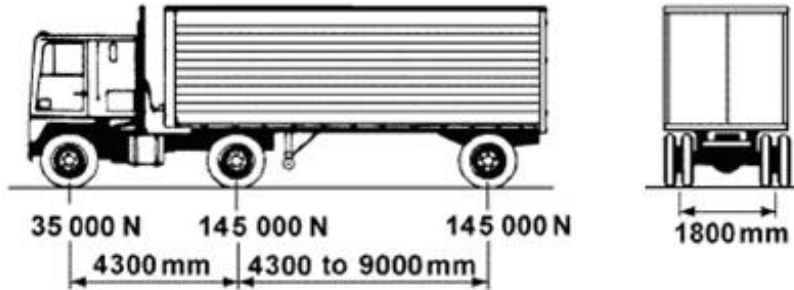
Şekil 43. Rijitleştirici ve plaka detayı

Bir ortotropik tabliyenin hesabı genel olarak bölüm 1.3.2.1.' de anlatılmıştır. Bu süreç el ile çözüm için oldukça zahmetli ve uzundur. Bu nedenle hata yapma olasılığı yüksektir. Bu zahmetli sürecin kısaltılması yahut pratikleştirilmesi amacıyla genel abaklar, tablolar ve deneysel bağıntılar geliştirilmiş ve yönetmeliklerde de yer almıştır. AISC ortotropik çelik plakalı köprü tabliyelerinin tasarımı el kitabında da uygulanabilirliğinden bahsedilen bir deneysel bağıntı olan minimum plaka kalınlığı ( $t_p$ ), Kloeppe'l'in geliştirdiği formülle [23] belirlenebilmektedir (Şekil 44 ve Şekil 45).

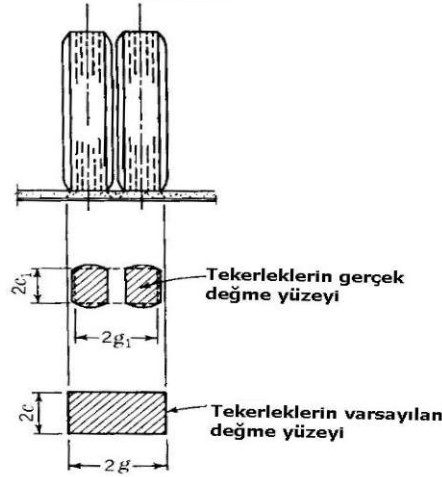
$$t_p \geq (0,004a)(\sqrt[3]{P}) \dots\dots\dots(2.1)$$

$a$  : Kapalı kutu rijitleştiricinin üst genişliği (mm)

$P$  : Taşıt yükünün, tek tekerleğin tabliyeye değme yüzeyine bölünmesiyle elde edilen gerilme (kPa), 145 kN iki tekerleğin ortak ağırlığıdır, o nedenle tek ağırlık olarak 75 kN kullanılmıştır.



Şekil 44. AASTHO da tanımlanan Hs20 yüklemesi



Şekil 45. Tekerleklerin yola temas yüzeyi

Plaka kalınlığı sadece hareketli yük etkisiyle boyutlandırılmaktadır. Tabliyenin ve kaplamanın ağırlıkları rijitleştiricilerin hesabında kullanılmamakta, enleme kirişlerinin hesabında işleme katılmaktadır. Şekil 44' de görülen 75 kN luk yük için değme yüzeyi AASTHO' da 61x25,4 cm olarak belirtilmiştir. Ayrıca yük plakaya üzerindeki kaplamadan aktarılacağı için tekerlek etkime yüzeyinin her iki yönde kaplama kalınlığı olan 5 cm kadar artırılarak hesaba katılması öngörülmektedir. Rijitleştirici üst genişliği ( $a$ ) de ön boyutlandırma da 32 cm seçilmiştir.  $P$  yükü hesaba katılırken dinamik etkiler için %30 artırım yapılmıştır.

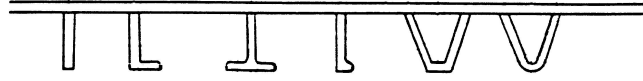
$$P = \frac{75 \times 1,3}{0,66 \times 0,304} = 486 \text{ kPa} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$t_p \geq (0,004 \times 320) \left( \sqrt[3]{486} \right) = 10,1 \text{ mm} \text{ seçilen } t_p = 20 \text{ mm} \dots\dots\dots(2.3)$$

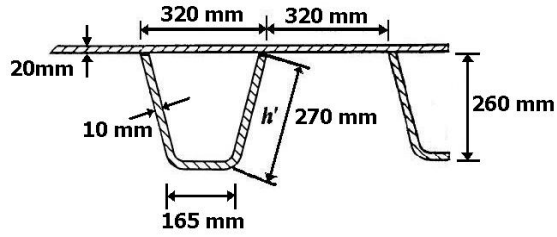
Yönetmelik gereği plaka kalınlığı 14 mm den veya en büyük rijitleştirici genişliğinin %4 ünden az olmamalıdır

### 2.5.2. Rijitleştirici

Ortotropik tabliyelerde kullanılan rijitleştiriciler değişik geometrilere sahip olabilmektedir (Şekil 46). Çalışmada, uygulamalarda en çok tercih edilen, kapalı tip (trapez kesit) kullanılmıştır (Şekil 47). Kapalı tip rijitleştiriciler plaka kalınlığına bağlıdır ve genel olarak a+e mesafesi 610 – 760 mm arasında değişmektedir. Rijitleştirici et kalınlığı da 8 mm den az olmamalıdır.



Şekil 46. Genel ortotropik tabliye kesiti



Şekil 47. Modellerde kullanılan rijitleştirici ve plaka detayı

Birbiriyle bağıntılı olan rijitleştirici ve plaka kesitleri arasında da aşağıdaki bağıntının sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{t_R a^3}{t_{d,eff}^3 h'} \leq 400 \dots\dots\dots(2.4)$$

$t_{d,eff}$  : Etkili kaplama yüksekliği (m)

$h'$  : Rijitleştirici yan yüzey uzunluğu (m)

$t_R$  : Rijitleştirici et kalınlığı (m)

$t_{d,eff}$  değeri için belirtilen değer kaplama yüksekliğini yarısıdır.

$$t_{d,eff} = t_p + 25 = 45 \text{ mm} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\frac{0,010 \times 0,32}{0,045^3 \times 0,27} = 130,1 \leq 400 \dots\dots\dots(2.6)$$

Kloppel'in taşıy yükü, plaka kalınlığı ve rijitleştiriciler arası mesafenin kullanıldığı yer değiştirme formülü ile yukarıda hesaplanan değerlerin kontrolü yapılabilmektedir.

$$\omega = \frac{5}{6} \frac{12}{384} \frac{pa^4}{Et_p^3} \leq \frac{a}{300} \dots\dots\dots(2.7)$$

Buradan  $t_p$  çekildiğinde eşitlik 2.8 elde edilmektedir.

$$t_p \geq a \sqrt[3]{\frac{125}{16} \left( \frac{P}{E} \right)} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$0,02 \geq 0,32 \sqrt[3]{\frac{125}{16} \left( \frac{486}{2.10^8} \right)} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$0,02 \geq 0,00852 \dots\dots\dots(2.10)$$

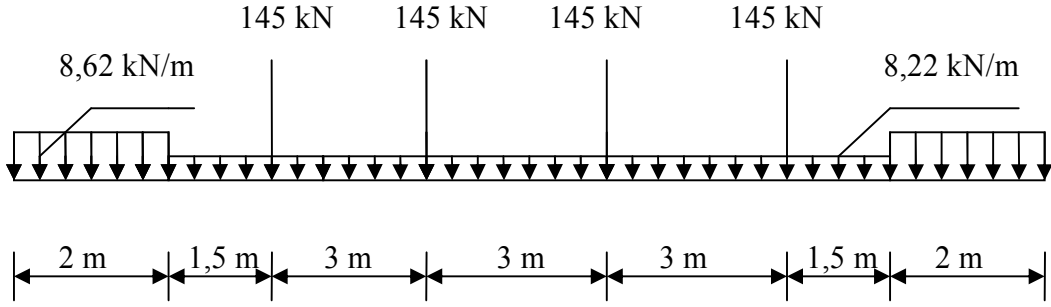


### 2.3.3. Enleme Kirişi

Enleme kirişleri uygulamalardaki gibi basit mesnetli kiriş olarak boyutlandırılmıştır (Şekil 48). Bu boyutlandırmada ;

|  |                                |                                 |
|--|--------------------------------|---------------------------------|
| Kaplama yükü                               | = $0,05 \times 24 \times 3$    | = $3,6 \text{ kN} / \text{m}$   |
| Plaka yükü                                 | = $0,02 \times 76,97 \times 3$ | = $4,62 \text{ kN} / \text{m}$  |
| Taşıt yükü (3 m genişliğindeki şerit için) | =                              | = $145 \text{ kN}$              |
| Kenarlardaki yaya yollarının yükü          | =                              | = $4 \text{ kN} / \text{m}$     |
| St 52 çeliğinin emniyet gerilmesi          | =                              | = $353 \text{ N} / \text{mm}^2$ |

olarak alınmıştır.



Şekil 48. Enleme kirişine gelen toplam yük

Enleme kirişinde, yükleden dolayı oluşan moment;

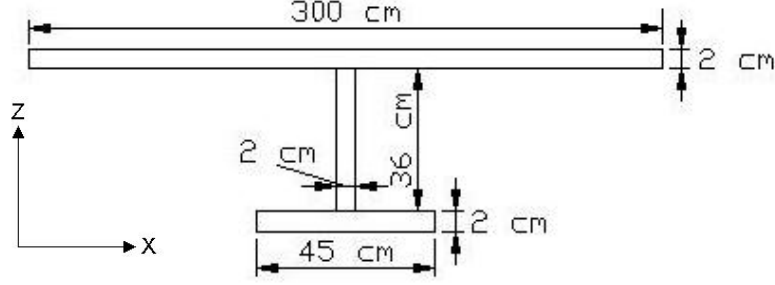
$$M_{maks} = 2 \times \frac{8,62 \times 2^2 \times 2}{4} + \frac{145 \times 16}{1,6} + \frac{8,22 \times 12}{12} \left( \frac{8^2 - 2^2}{2} \right) = 1731,1 \text{ kNm} \dots\dots\dots(2.9)$$

Maksimum momenti karşılaması gereken kesitin mukavemet momenti;

$$W_x = 1731,1 / 353 = 4903,96 \text{ cm}^3 \dots\dots\dots(2.10)$$

Enlemeler Ters T şeklinde uygulanmaktadır. Kesitin plaka ile beraber çalıştığı kabulü yapılmakta bu şekilde oluşan I profilin başlık kalınlığı 20 mm olacaktır [24]. Bu değerler

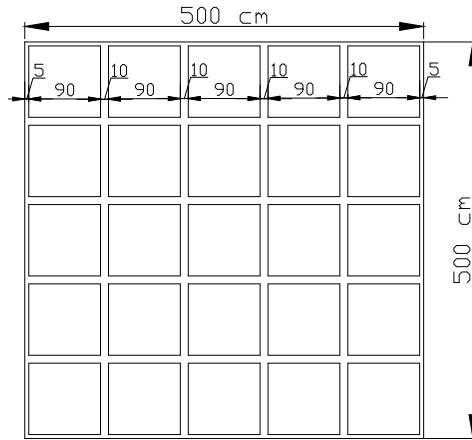
ışığında uygun bir I kesit hesabı yapılmalıdır. Bu doğrultuda oluşturulan kesit Şekil 49’ da gösterilmiştir.



Şekil 49. Modellerde kullanılan enleme kirişi kesiti

#### 2.3.4. Kuleler

Kablolu köprülerin kuleleri sadece aksenal yüklerle değil aynı zamanda rüzgar ve kablolardan oluşan yatay yükler etkisinde boyutlandırılmalıdır. Kaynak yönetmelikler kablo taşıyıcı köprülerin tasarımı için yeterli olmadığından ve kule tasarımı konusunda bir madde içermediğinden kulelerin boyutlandırılması, araştırmacıların yayınlarına ve deneyimlere bağlı gerçekleştirilmiştir. Ön boyutlandırmada, kule genişliğinin kule yüksekliğine oranı 1/20-25 ve kule tepe kesitinin taban kesitine oranı ise 0,6-0,9 olarak alınmıştır [4]. Bu bilgiler ışığında toplam 69 m yüksekliğe sahip kulelerin kesitleri analiz sonucunda programdan alınan veriler neticesinde Şekil 50’ deki gibi optimize edilmiştir. Tabanda 5x5 m boyutlarındaki kulenin tepe kesiti ise 4x4 m dir.



Şekil 50. Modellerde kullanılan kule kesiti

### 2.3.5. Kablolar

Kablolar gerek akma gerekse kopma dayanımı bakımından çok büyük değerlere sahiptir. Çalışmada kullanılan kablolar akma dayanımı 1170 MPa, kopma dayanımı ise 1570 MPa olan kilit sargılı kablo olarak modellenmiştir. AISC de yüksek dayanımlı çelikler için tüm yükler etkisinde en büyük aksenal gerilmenin, malzeme kopma dayanımının % 45 ' ini, Çin çelik yapı yönetmeliğinde ise kablolu köprüler için kabloların kopma dayanımının 1/3 ' ünü aşmaması öngörülmüştür [25,26]. Modellemeler tek tabliyelik kablolu köprülerdeki kablo kuvvetlerinden yola çıkılarak harp tip kablo düzeni ile tasarlanmış diğer modeller harp tip kablolu köprünün eleman boyutları ile türetilmiştir. Kablo kesit özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Modellerde kullanılan kabloların özellikleri

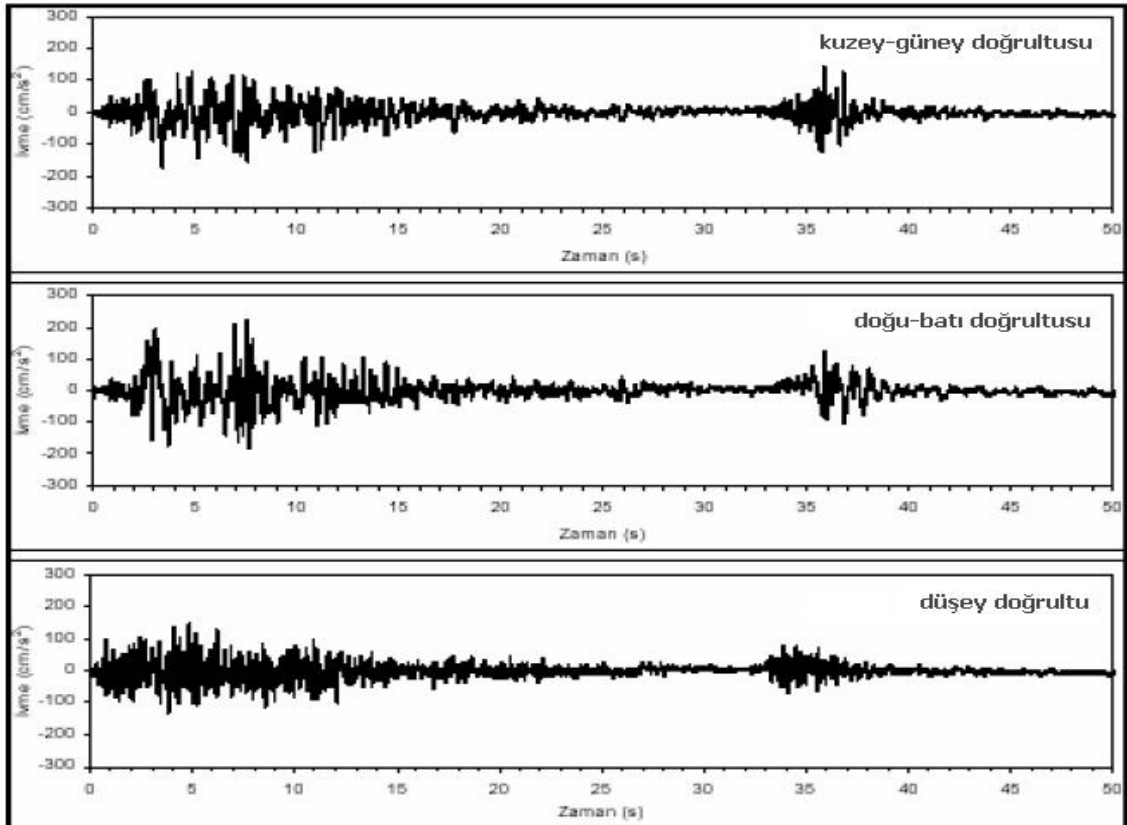
| Kablo No | Kesit Alanı<br>(m <sup>2</sup> ) | Elastisite Modülü<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | Birim hacim ağırlık<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|----------|----------------------------------|---|---|
| K1       | 0,0201                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K2-O2    | 0,0177                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K3       | 0,0154                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K4       | 0,0133                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K5-O5    | 0,0123                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K6-O6    | 0,0113                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K7-O7    | 0,009053                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K8-O8    | 0,008659                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K9-O9    | 0,007854                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K10-O10  | 0,007088                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K11-O11  | 0,006362                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K12-O12  | 0,005675                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| K13-O13  | 0,005027                         | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| O1       | 0,0189                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| O3       | 0,015                            | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |
| O4       | 0,0137                           | 1,8.10 <sup>8</sup>                       | 88  |

### 2.3.6. Taşıt Yüğü

Taşıt yüğü seçiminde AASTHO' da belirtilen şekil 41' de gösterilen 325 kN ağırlığındaki üç dingilli kamyon kullanılmıştır. 8 metre uzunluğunda tasarlanan taşıtlar köprü uzunluğunca tüm şeritlerde ardı ardına sıralanmış kabul edilerek uygulanmışlardır. Toplam taşıt yüğü köprü uzunluğuna bölünerek 3 metre genişlikli şeritlerin ortasından 40 kN/m' lik hareketli yük olarak tabliyeeye etki ettirilmiştir.

### 2.3.7. Deprem Yüğü

Çalışmada Kocaeli depreminin İZMİT-YARIMCA kayıtlarının verileri kullanılmıştır. Zaman-tanım alanında yapılan dinamik analizde modellere doğu-batı ve kuzey güney yönünde 0,6 g, düşey yönde ise 0,4 g değerinde yük etki ettirilmiştir (Şekil 51).



Şekil 51. Kocaeli depreminin ivme-zaman grafikleri

#### 2.4. Çalışmada Oluşturulan Kablolu Köprü Modelleri

Çalışmada 210 m orta açıklığa ve 87' şer m kenar açıklıklara sahip farklı kablo düzenlemeleri ile oluşturulmuş üç kablolu köprünün sabit yükler, taşıt yükleri ve sismik yükler altında analizi SAP2000 bilgisayar programı ile yapılmıştır. Kullanılan kabloların çapları 80 mm ile 160 mm arasında değişmektedir. Kulelerin ve yardımcı ayakların zemine bağlantıları ankastre mesnetlerle temsil edilmiştir. Ortotropik döşemenin enleme kirişleri köprü eksenine doğrultusunda 3' er metre ara ile yerleştirilmiştir.

Kablolu köprülerin davranışları özellikle kabloların ikinci derece yer değiştirmeleri sebebiyle ancak lineer olmayan davranış ile açıklanabilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin yeterli olmadığı zamanlarda inşa edilen kablolu köprülerin lineer olmayan davranışları el ile hesaplarda genel kabullerle ifade edildiğinden normalden büyük kesitler elde edilmiş ve birçoğu sismik yükler altında yıkılmıştır. Bu nedenle çalışmaya konu olan kablolu köprülerin tüm yükler altında lineer olmayan analizi yapılarak gerçek davranış elde edilmeye çalışılmıştır.

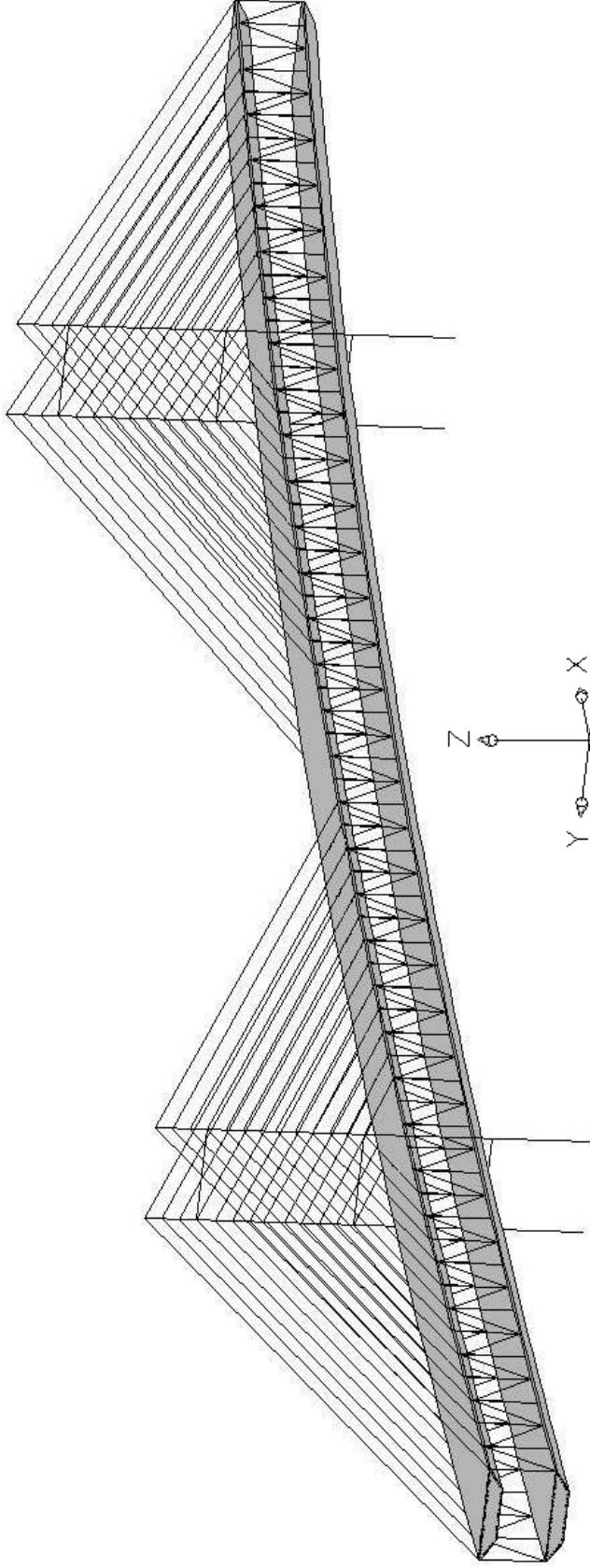
Kablolu köprülerin mesnetlenme koşulları için tek bir kural bulunmamaktadır. Genel kabul ile modellemelerde, tabliyelerin gerçek davranışının oluşturulması amacıyla tabliyenin boyuna yönde hareketinin kenar mesnetlerin birinde engellenmesi gerekmektedir. Oluşturulan modellerde, alt ve üst tabliye kulelere yanlardan temas ettirilmiştir. Mesnetlenme koşulları, alt tabliyenin kule girişine oturduğu kısımda enine ve düşey yöndeki, sol kenar mesnette üç yöndeki ve sağ kenar mesnette ise enine ve düşey yöndeki hareketin engellenmesi ile oluşturulmuştur. Ayrıca üst tabliyenin kenar mesnette enine yönde yer değiştirmesi de tutulmuştur.

Kablolar sadece çekme taşıyan elemanlar olarak modellenmelidir. Basınç kuvveti de taşıyabilecek şekilde modellenir ise gevşek bağlanmış olurlar [27]. Bu nedenle sadece eksenel çekme taşıyan kablo eleman olarak modellenmiş, uç noktalarındaki momentler tutulmuş ve basınç limiti sıfırlanmıştır. Ayrıca kabloların gerginliğini sağlamak amacıyla 10 kN başlangıç P-Delta kuvveti uygulanmıştır.

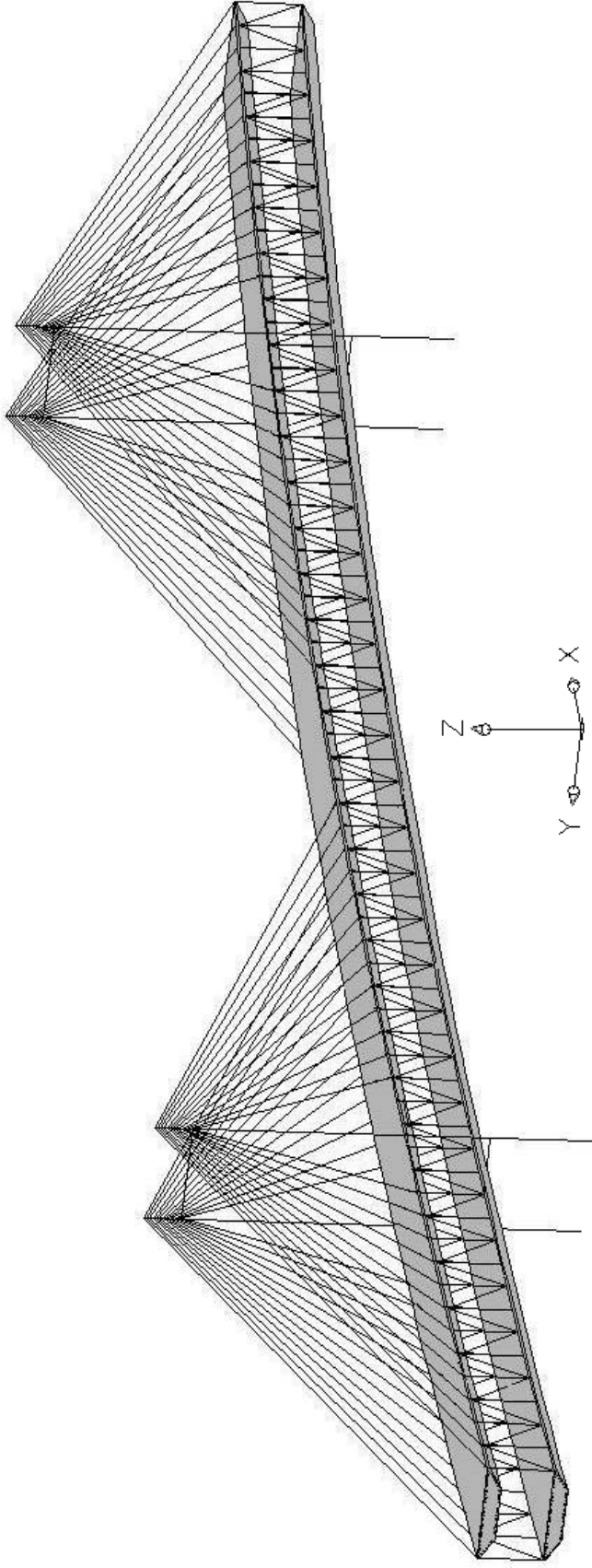
Tabliyenin boyuna eğimi % 3 alınmıştır ve düşey yönlü bir parabol ile modellenmiştir. Bu nedenle tabliyenin orta noktası kenar uç noktasından 5,76 m yukarıdadır. Bu özellik tabliyenin düşey yer değiştirme değerlerini azaltmaktadır.

Tabliye plağı, rijitleştiriciler, enleme kirişleri ve alt plaka, shell elemanlar ile modellenmiştir.

Oluşturulan ift tabliyeli kablolu köprü modelleri Şekil 52, Şekil 53 ve Şekil 54' de, modellere ait boy kesit, en kesit ve kabloların numaralandırılması Şekil 55, Şekil 56 ve Şekil 57 'te gösterilmiştir.

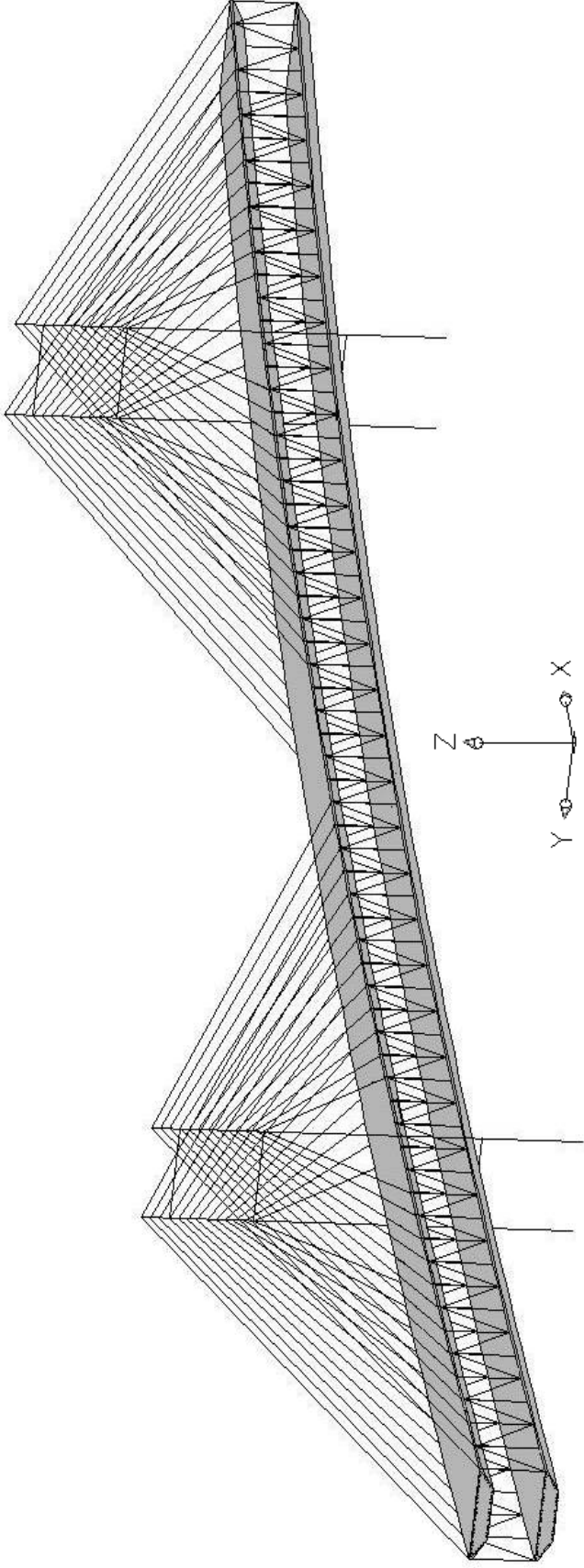


Şekil 52. Harp tip kablolu köprü modelinin üç boyutlu görünümü

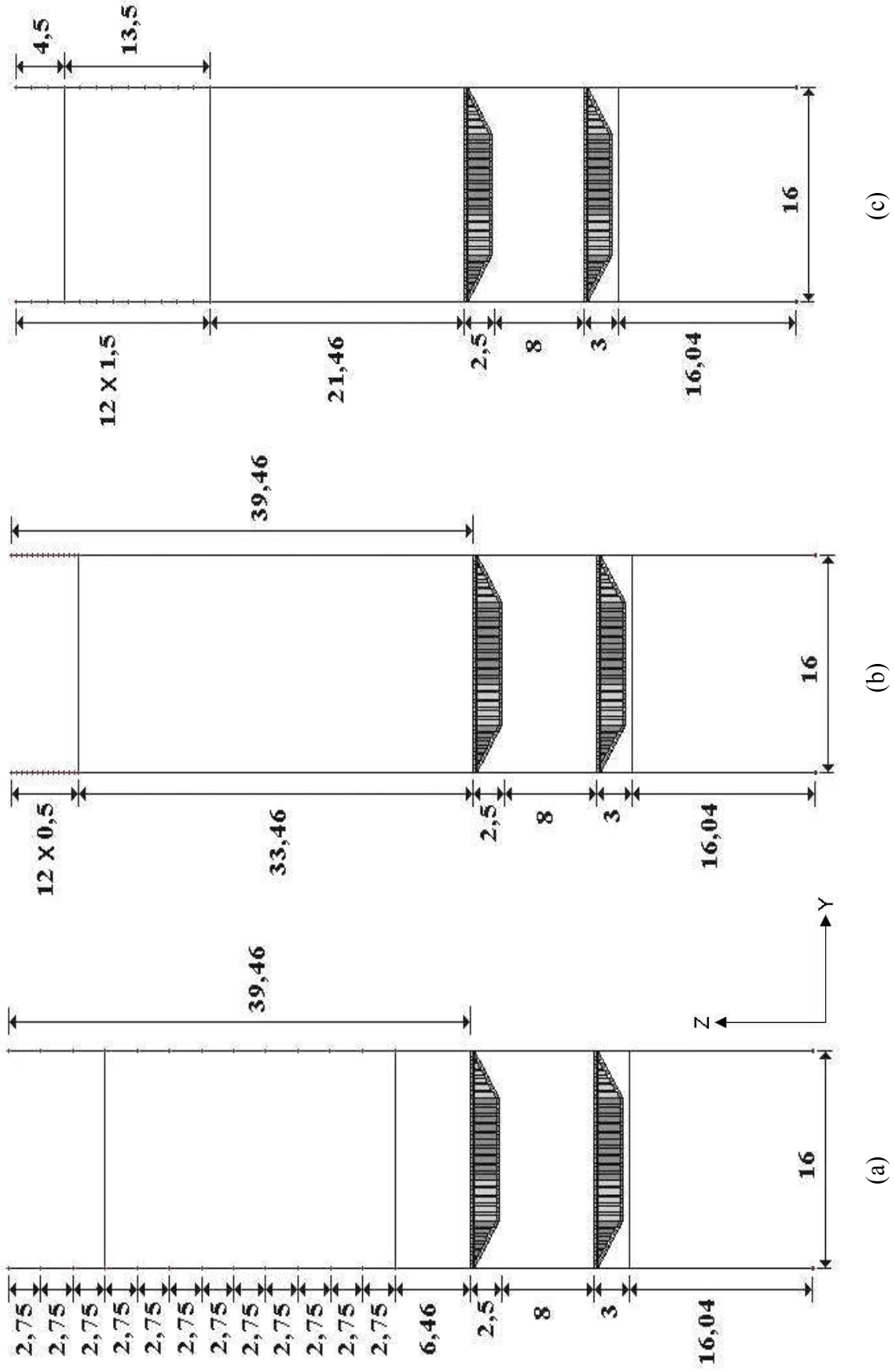


Şekil 53. Fan tip kablolu köprü modelinin üç boyutlu görünümü



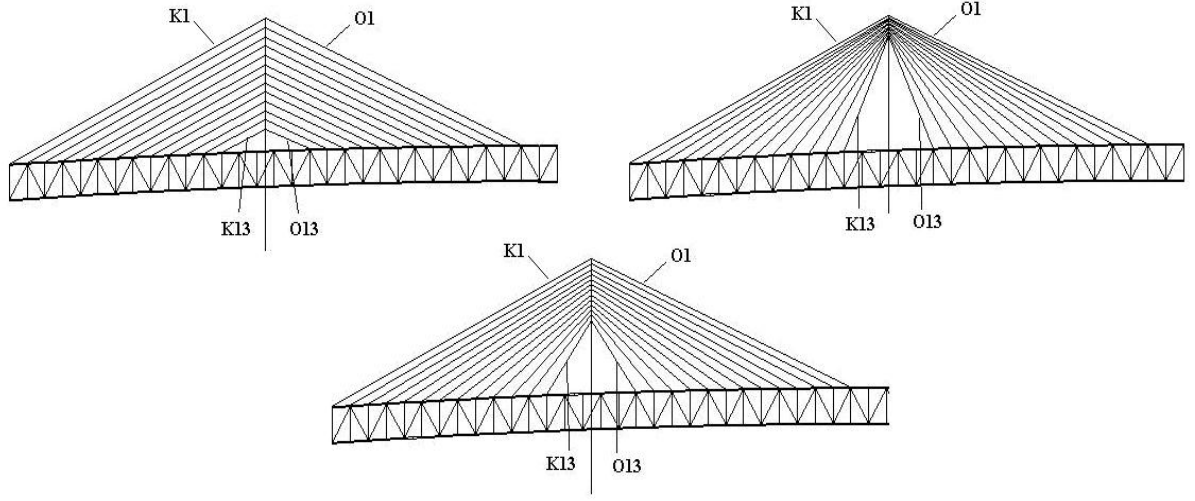


Şekil 54. Yarı harp tip kablolu köprü modelinin üç boyutlu görüntümü

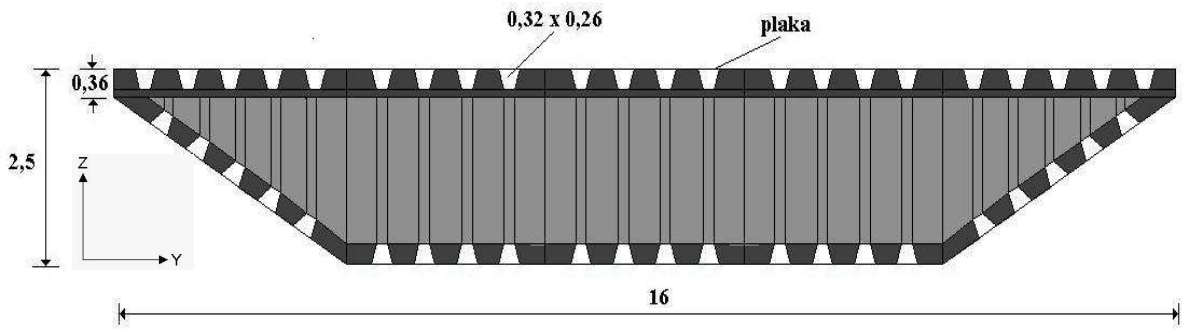


Şekil 55. Kablolu köprü modellerinin boy kesitleri (a) harp tip (b) fan tip (c) yan harp tip

birim : m



Şekil 56. Kablo numaralandırılması



Şekil 57. Tabliye en kesiti

Çift tabliyeli farklı kablo düzenlemesine sahip üç ayrı kablolu köprünün oluşturulan matematik modellerinin çözümü yapılarak elde edilen bulgular Bölüm 3' te verilerek gerekli irdemeler yapılmıştır.

### 3.BULGULAR VE İRDELEME

#### 3.1. Statik Analiz Sonuçları

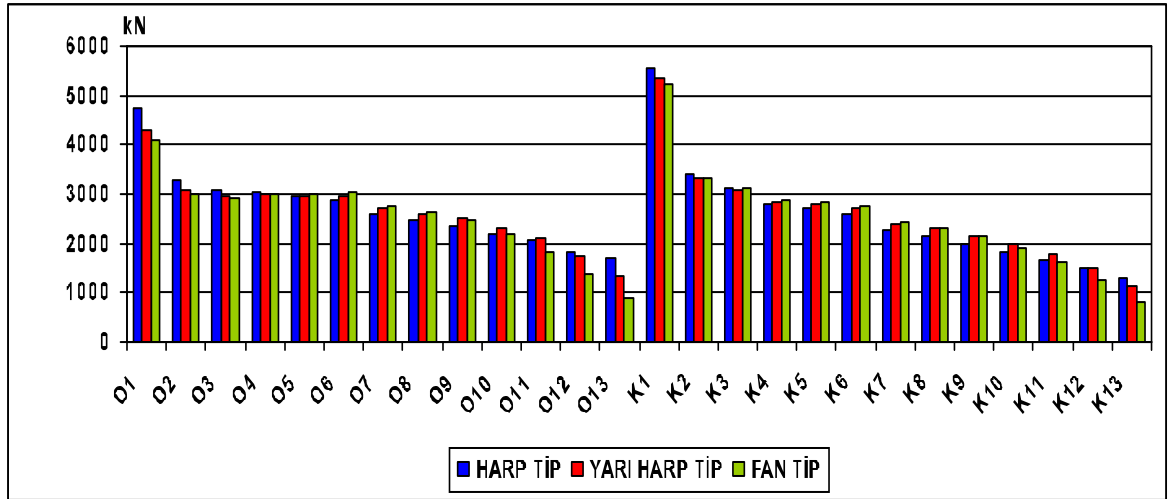
Bu çalışmanın amacına uygun olarak ön boyutlandırması yapılan, yarı harp tip, harp tip ve fan tip çift tabliyeli kablolu köprülerin lineer olmayan statik yükler altında çözümlemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmış, elde edilen kablo kuvvetleri Tablo 2’de ve Şekil 58’ de, tabliyelerin yer değiştirmeleri Şekil 59’ da, kulelerin yer değiştirmeleri ise Şekil 60’ ta verilmiştir.

Tablo 2. Nonlineer analiz neticesinde elde edilen kablo kuvvetleri

| KABLO NO | YARI HARP TİP<br>(kN) | FAN TİP<br>(kN) | HARP TİP<br>(kN) |
|----------|-----------------------|-----------------|------------------|
| O1       | 4289,89               | 4092,97         | 4727,71          |
| O2       | 3080,28               | 3002,76         | 3297,98          |
| O3       | 2960,75               | 2936,7          | 3084,98          |
| O4       | 2999,7                | 3016,22         | 3052,72          |
| O5       | 2976,64               | 3019,74         | 2963,92          |
| O6       | 2965,51               | 3022,33         | 2892,31          |
| O7       | 2710,28               | 2746,36         | 2595,46          |
| O8       | 2601,31               | 2616,96         | 2458,72          |
| O9       | 2502,1                | 2452,72         | 2357,93          |
| O10      | 2303,39               | 2171,69         | 2171,32          |
| O11      | 2097,19               | 1842,67         | 2051,85          |
| O12      | 1748,91               | 1393,45         | 1823,13          |
| O13      | 1340,13               | 908,32          | 1716,26          |
| K1       | 5337,37               | 5240,11         | 5551,54          |
| K2       | 3342,1                | 3322,82         | 3423,82          |
| K3       | 3098,51               | 3114,92         | 3126,84          |

Tablo 2' nin devamı

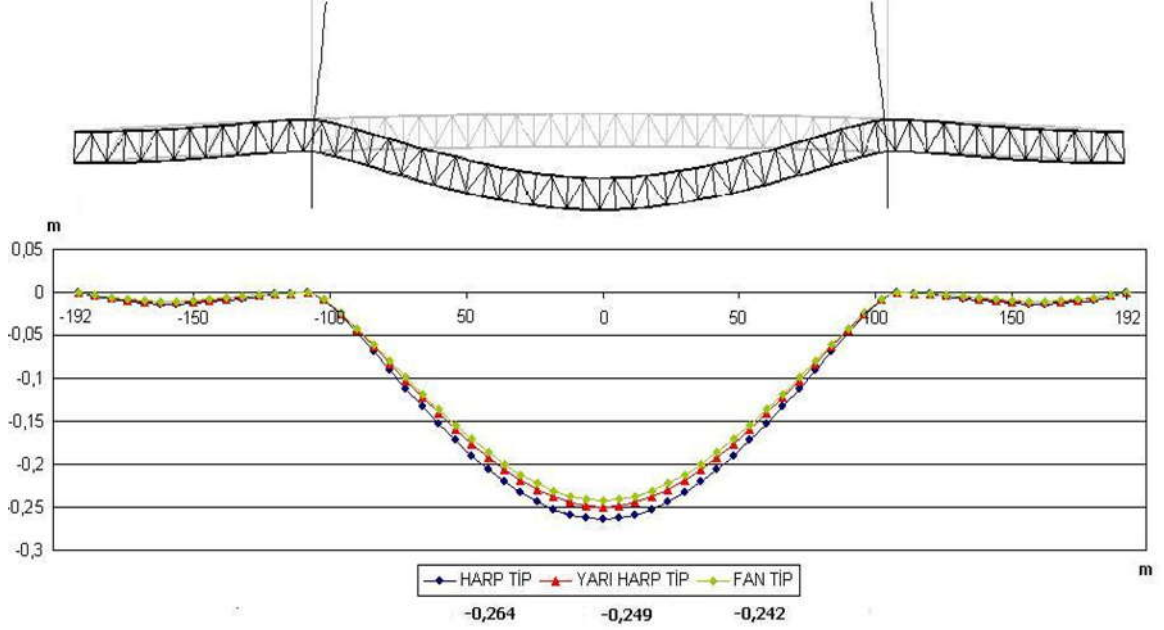
|     |         |         |         |
|-----|---------|---------|---------|
| K4  | 2836,49 | 2877,92 | 2816,45 |
| K5  | 2780,53 | 2837,37 | 2714,1  |
| K6  | 2711,42 | 2775,49 | 2604,27 |
| K7  | 2396,23 | 2448,57 | 2262,1  |
| K8  | 2293,42 | 2320,33 | 2134,87 |
| K9  | 2151,36 | 2136,61 | 1975,21 |
| K10 | 1998,32 | 1910,72 | 1834,53 |
| K11 | 1776,14 | 1609,82 | 1648,22 |
| K12 | 1514,63 | 1250,86 | 1504,02 |
| K13 | 1132,86 | 822,51  | 1283,4  |



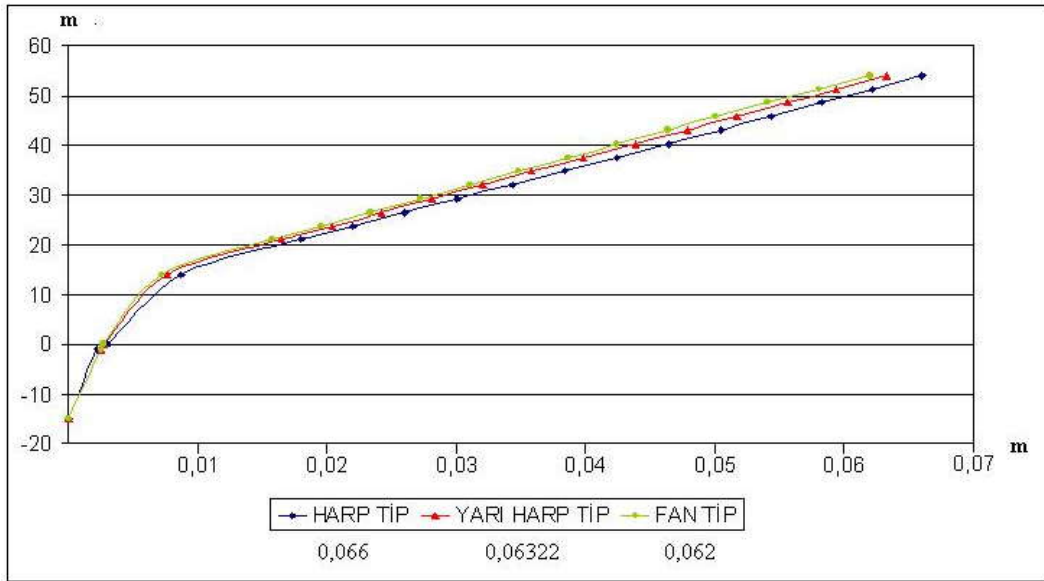
Şekil 58. Nonlineer analiz neticesinde elde edilen kablo kuvvetlerinin grafik gösterimi

Elde edilen sonuçlar neticesinde aynı özellikteki kablolarda her modelde azalan ve artan yükler oluşmuştur. En uzun ve en fazla zorlanan kablolar olan, orta açıklıktaki O1 ve kenar açıklıktaki K1 kablolarında, en düşük değerler sırasıyla 4092 kN ve 5240 kN ile fan tip kablolu köprü modelinde, en büyük değerler ise 4727 kN ve 5551 kN ile harp tip kablolu köprü modelinde oluşmuştur. En kısa ve en az zorlanan kablolarda da fan tip modelde

oluşan değerler diğer modellerden daha azdır. Bu sonuç, fan tip kablolu köprü modelinde, statik yükler için daha küçük kesitli kablo kullanılabileceğini göstermektedir. Daha genel karşılaştırma yapabilmek için tüm kablolardaki toplam kuvvete bakıldığında fan tip kablolu köprü'nün kablolarının en az yükü aldığı görülmüştür.



Şekil 59. Tabliye yer değiştirme



Şekil 60. Kule yer değiştirme

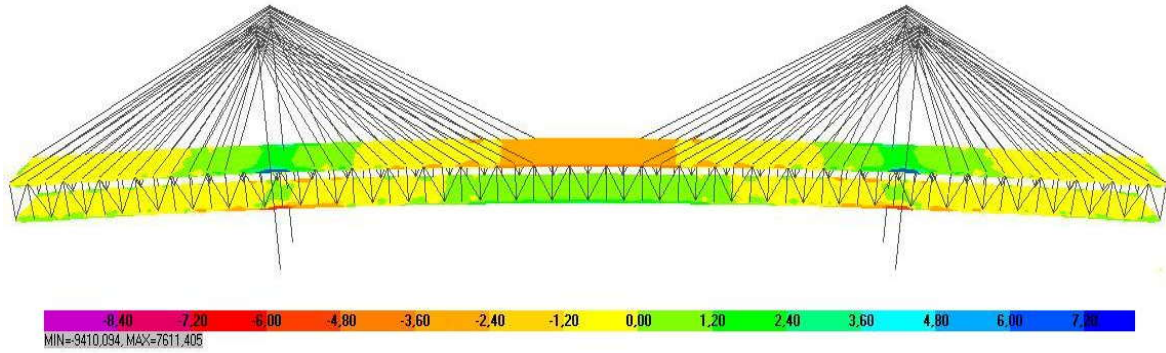
Tabliye orta noktasının en küçük yer değıştirme değeri 0,242 m ile fan tip modelde oluşmuştur. En büyük değeri ise 0,264 m ile harp tip modelde meydana gelmiştir. Kule tepe noktası yer değıştirmesinin en küçük değeri 0,062 m ile fan tip kablolu köprü modelinde, en büyük değeri ise 0,066 m ile harp tip modelde oluşmuştur. Kablo düzenlerinden dolayı fan tip ve yarı harp tip modelde kablolar kulenin üst bölgelerine bağlandıklarından ötürü tabliyenin ve kulelerin yer değıştirmeleri harp tip modele nazaran azalmaktadır.

Her bir kule, harp tip modelde 73173 kN, yarı harp tip modelde 75197 kN ve fan tip modelde 74440 kN eksenel yük taşımaktadır. Kulelerde oluşan kesme kuvvetleri ve momentler bakımından en küçük değeri 15404 kN ve 180545 kNm ile fan tip modelde oluşmuştur. Harp tip modelde kule eksenel yükü en az çıkarken, kesme kuvveti ve moment bakımından fan tip model en az değere sahip olmuştur ( Tablo 3).

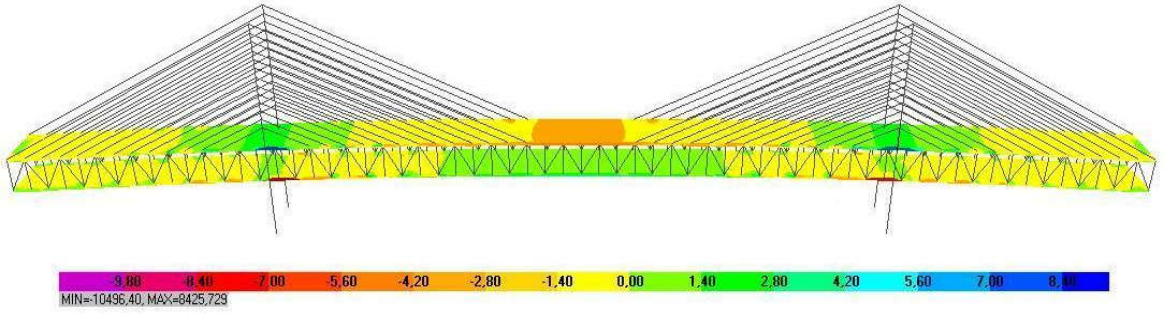
Tablo 3. Alt tabliye hizasında kulelerde oluşan moment ve kesme kuvvetleri

| MODEL TİPİ    | KESME KUVVETİ<br>(kN) | MOMENT<br>(kNm) |
|---------------|-----------------------|-----------------|
| FAN TİP       | 15404                 | 180545          |
| YARI HARP TİP | 15943                 | 188456          |
| HARP TİP      | 16898                 | 201662          |

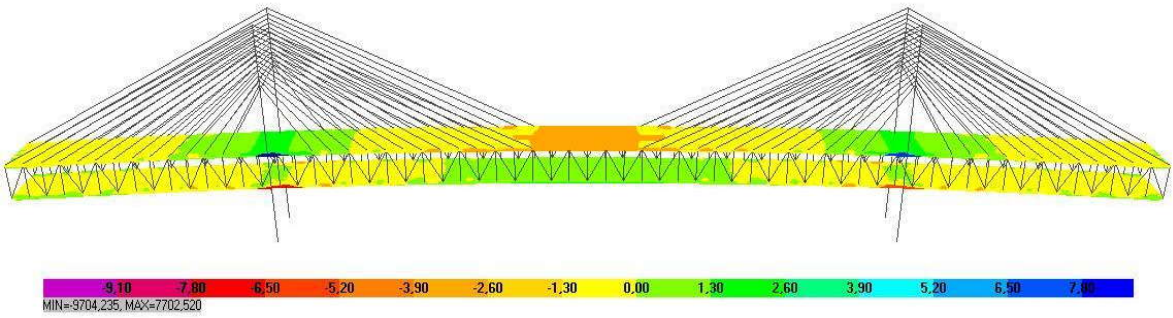
Çalışmanın amacına uygun olarak yapılan çözümlerden elde edilen tabliye eksenel kuvvetleri, fan tip model için Şekil 61’de, harp tip model için Şekil 62’de ve yarı harp tip model için Şekil 63’ te verilmiştir.



Şekil 61. Fan tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri



Şekil 62. Harp tip modelin tabliye aksenal kuvvetleri



Şekil 63. Yarı harp tip modelin tabliye aksenal kuvvetleri

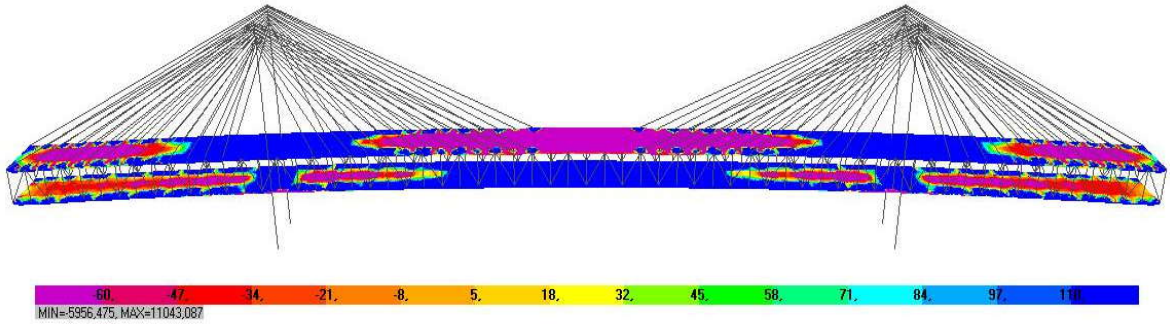
Kablolu köprülerde kablolar, tabliyeye belirli bir açı ile bağlandığından her bir kablodaki kuvvetin yatay ve düşey olmak üzere iki bileşeni vardır. Kablo tabliye arası açı, fan tip kablolu köprüde en büyüktür. Tabliye kablo arası açı büyüdükçe kablonun tabliyede oluşturduğu yatay kuvvet azalmakta düşey kuvvet artmaktadır. Şekil 61, şekil 62 ve şekil 63' te görüldüğü üzere, en büyük basınç kuvvetleri, alt tabliye kule birleşim bölgesinde, fan tip modelde 9410 kN/m, yarı harp tip modelde 9704 kN/m ve harp tip modelde 10496 kN/m değerinde oluşmuştur. Aynı şekilde en büyük çekme kuvvetleri de üst tabliye kule birleşim bölgelerinde, fan tip modelde 7611 kN/m, yarı harp tip modelde 7702 kN/m ve harp tip modelde 8425 kN/m değere sahip olmuştur.

Tek tabliyeli kablolu köprülerde kuvvet dağılımı, üst tabliyede görüldüğü gibi tabliye orta bölgesinin basınca, kule birleşim bölgesinin ise çekmeye çalışması şeklindedir. Ancak ikinci tabliye eklendiği zaman alt tabliyenin, üst tabliyenin tersine, orta bölgede çekmeye kule birleşim bölgesinde ise büyük kısmının basınca çalıştığı görülmüştür. Tabliyede oluşan düşey kuvvetler ise tabliyede moment oluşturmaktadır. Ancak her bir kablonun

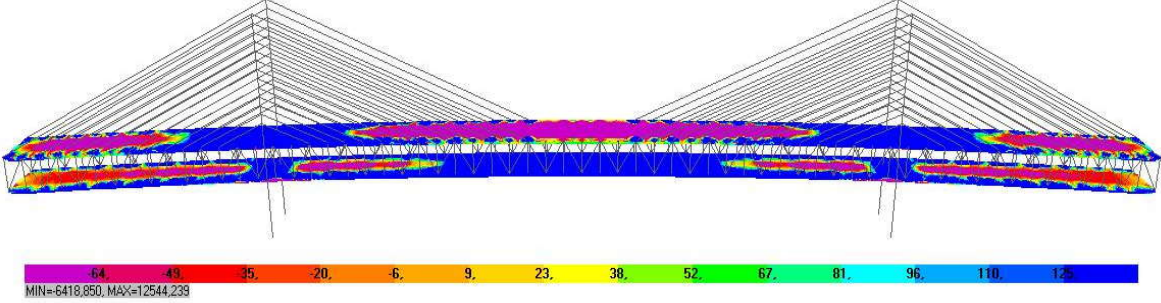


tabliyeye bağlandığı noktada bulunan düşey kafes sistem çubukları, kabloların düşey kuvvetlerini almakta ve bu sayede tabliye momentlerinin çok ufak değerlerde kalmasını sağlamaktadır.

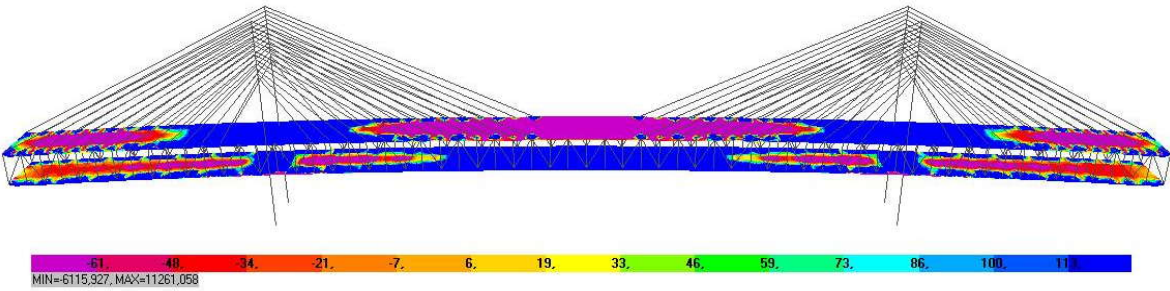
Söz konusu köprü tipleri için köprü tabliyelerinde oluşan gerilme dağılımları sırasıyla, fan tip model için Şekil 64' de, harp tip model için Şekil 65'te ve yarı harp tip model için Şekil 66' da verilmiştir.



Şekil 64. Fan tip modelin tabliye gerilme dağılımı



Şekil 65. Harp tip modelin gerilme dağılımı

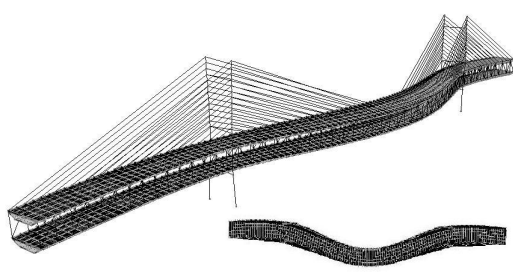


Şekil 66. Yarı harp tip modelin gerilme dağılımı

Statik yükler altında tabliyelerde oluşan en büyük gerilmeler, tabliye orta ve kule birleşim bölgelerinde oluşmuştur. En büyük basınç gerilmeleri, alt tabliye kule birleşim bölgesinde, fan tip modelde  $5956 \text{ kN/m}^2$ , yarı harp tip modelde  $6115 \text{ kN/m}^2$  ve harp tip modelde  $6418 \text{ kN/m}^2$  değerinde oluşmuştur. En büyük çekme gerilmeleri ise üst tabliye kule birleşim bölgesinde, fan tip modelde  $11043 \text{ kN/m}^2$ , yarı harp tip modelde  $11261 \text{ kN/m}^2$  ve harp tip modelde  $12544 \text{ kN/m}^2$  değerinde oluşmuştur. Gerilme dağılımı açısından da fan tip model statik yükler altında en kararlı yapıyı oluşturmuştur.

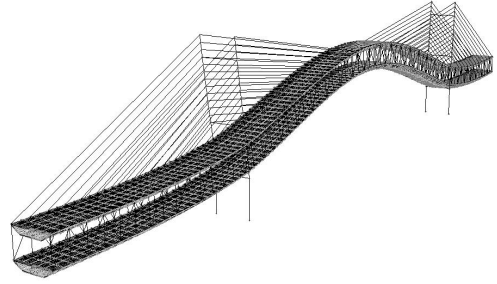
### 3.2. Dinamik Analiz Sonuçları

Bu çalışma kapsamında çözümlenmesi yapılan çift tabliyeli kablolu köprülere ait ilk 20 modun şekilleri ve periyotları Şekil 67, Şekil 68 ve Şekil 69’ da verilmiştir.



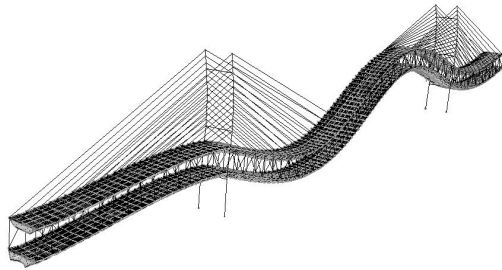
Mod: 1

1. yatay mod periyot: 2,1 sn



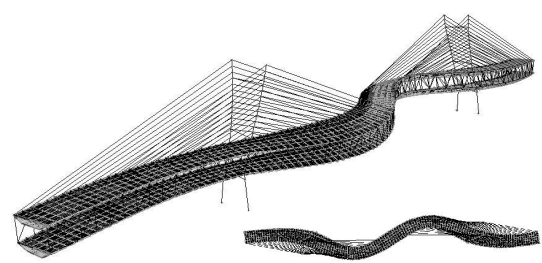
Mod: 2

1. düşey mod periyot: 1,68 sn



Mod: 3

2. düşey mod periyot: 0,86 sn

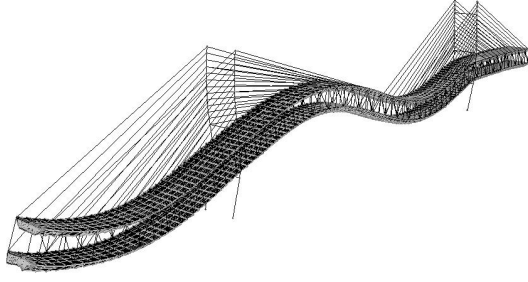


Mod: 4

2. yatay mod periyot: 0,79 sn

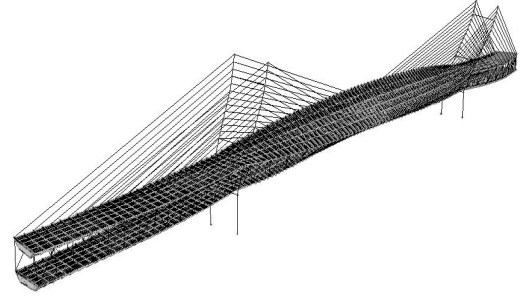
Şekil 67. Harp tip kablolu köprü modelinin doğal periyotları ve mod şekilleri

Şekil 67' nin devamı



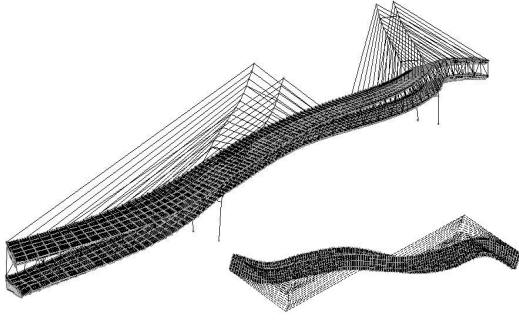
Mod: 5

3. düşey mod periyot: 0,76 sn



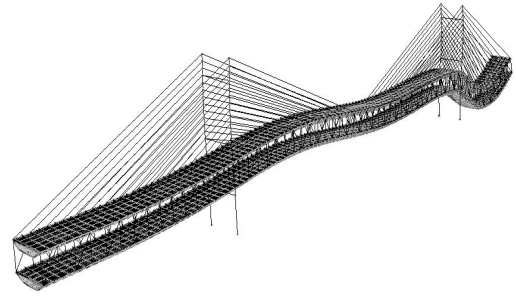
Mod: 6

1. burulma modu periyot: 0,71 sn



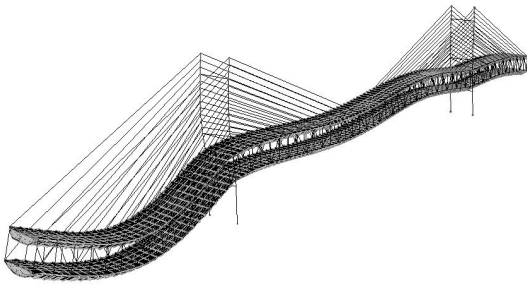
Mod: 7

3. yatay ve kule modu periyot: 0,64 sn



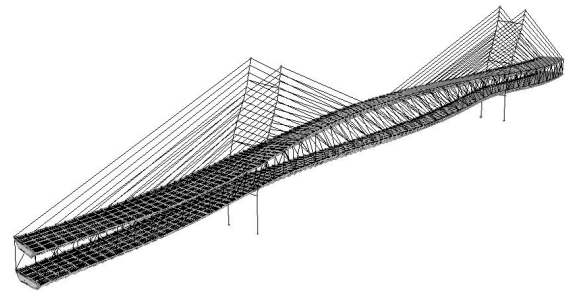
Mod: 8

kenar tabliye düşey modu periyot: 0,61 sn



Mod: 9

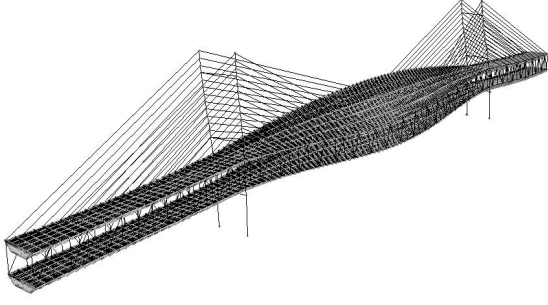
Kenar tabliye düşey modu periyot: 0,59 sn



Mod: 10

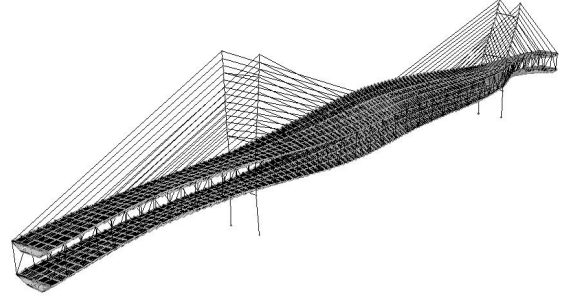
2. burulma modu periyot: 0,58 sn

Şekil 67' nin devamı



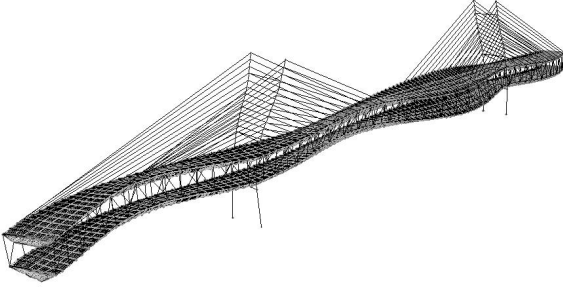
Mod: 11

3. burulma modu periyot: 0,53 sn



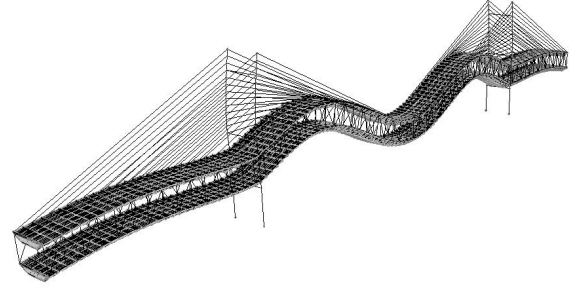
Mod: 12

yatay ve burulma modu periyot: 0,52 sn



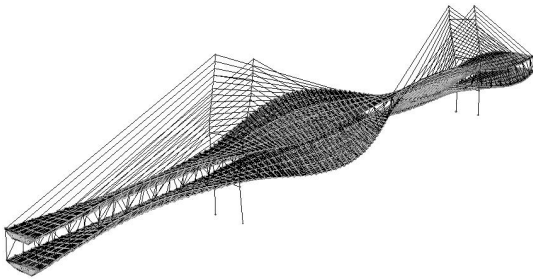
Mod: 13

4. yatay mod periyot: 0,48 sn



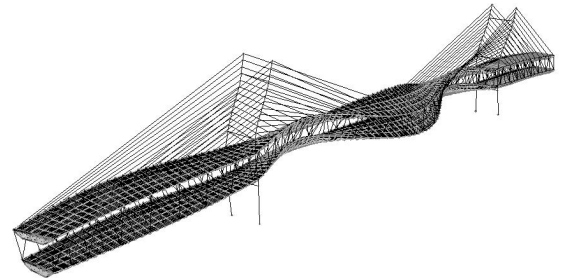
Mod: 14

4. düşey mod periyot: 0,47 sn



Mod: 15

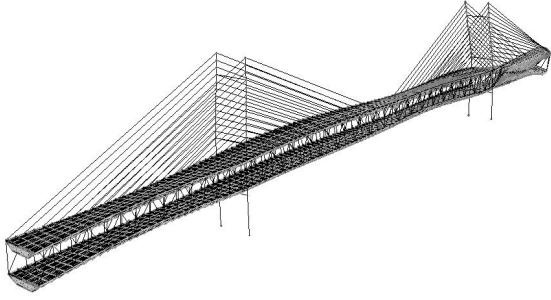
4. burulma modu periyot: 0,45 sn



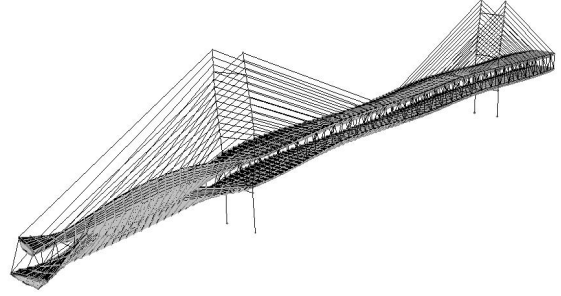
Mod: 16

5. burulma modu periyot: 0,40 sn

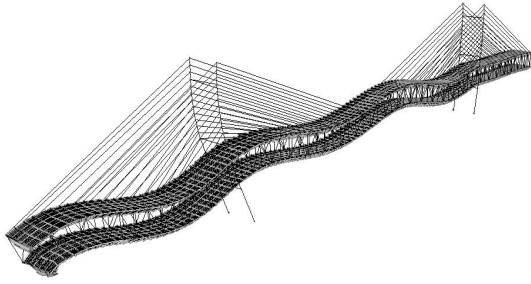
Şekil 67' nin devamı



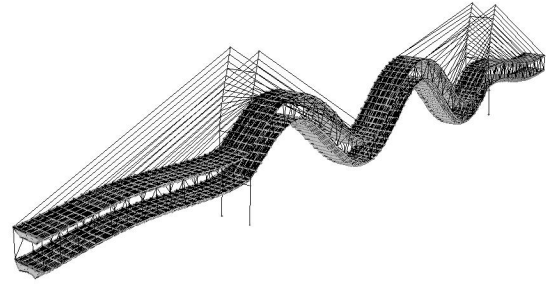
Mod: 17  
Kenar tabliye burulma modu  
periyot: 0,39 sn



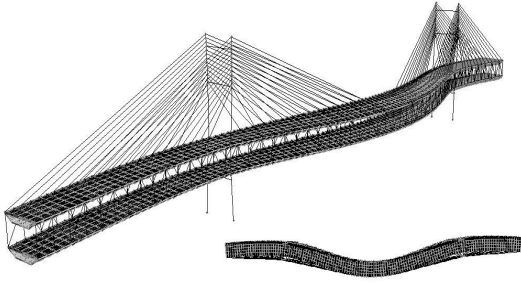
Mod: 18  
Kenar tabliye burulma modu  
periyot: 0,37 sn



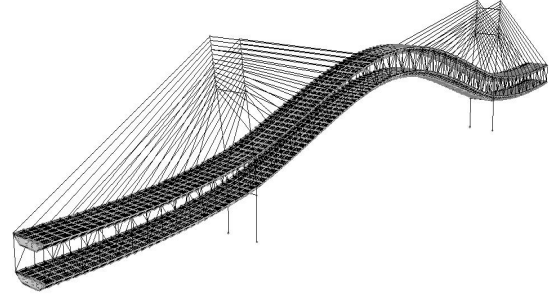
Mod: 19  
5. düşey mod periyot: 0,35 sn



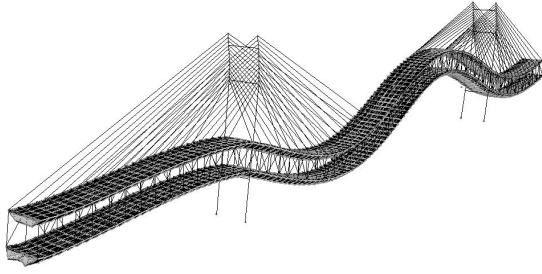
Mod: 20  
6. düşey mod periyot: 0,33 sn



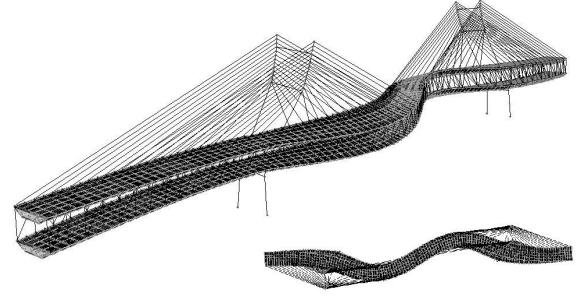
Mod: 1  
1. yatay mod periyot: 2,14 sn



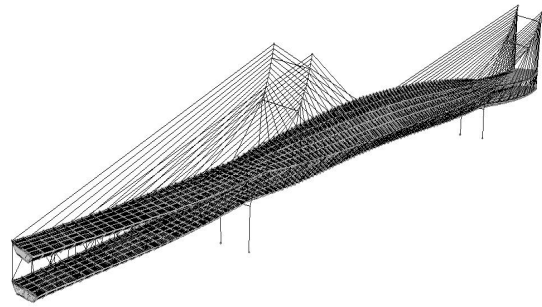
Mod: 2  
1. düşey mod periyot: 1,64 sn



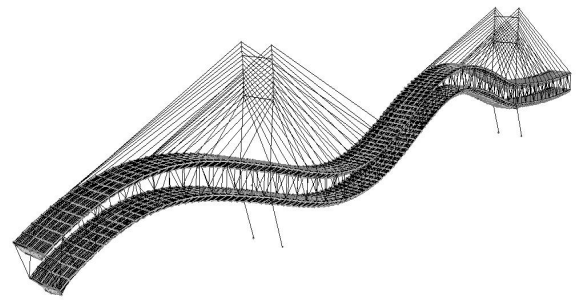
Mod: 3  
2. düşey mod periyot: 0,85 sn



Mod: 4  
2. yatay mod periyot: 0,82 sn



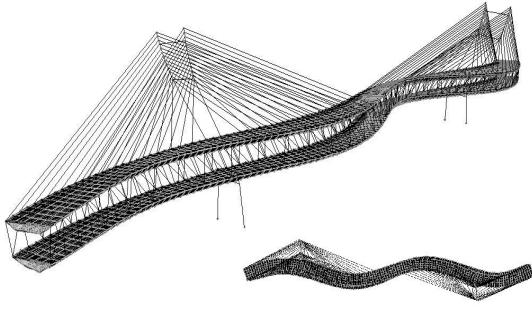
Mod: 5  
1. burulma modu periyot: 0,78 sn



Mod: 6  
3. düşey mod periyot: 0,75 sn

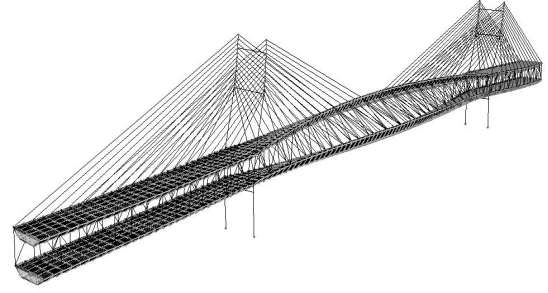
Şekil 68. Yarı harp tip kablolu köprü modelinin doğal periyotları ve mod şekilleri

Şekil 68' in devamı



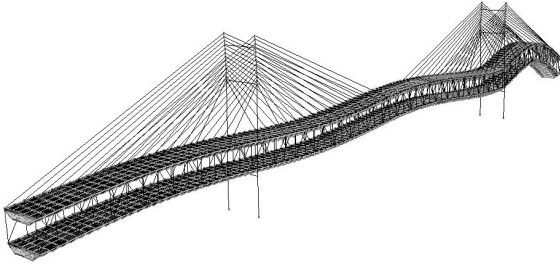
Mod: 7

3. yatay ve kule modu periyot: 0,72 sn



Mod: 8

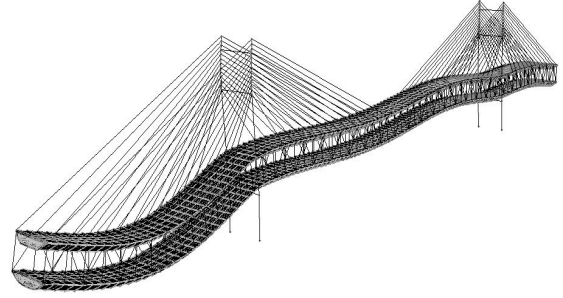
2. burulma modu periyot: 0,61 sn



Mod: 9

Kenar tabliye düşey modu

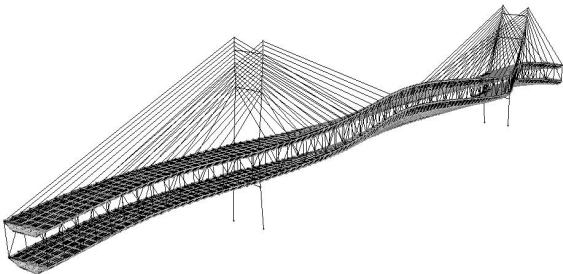
periyot: 0,6 sn



Mod: 10

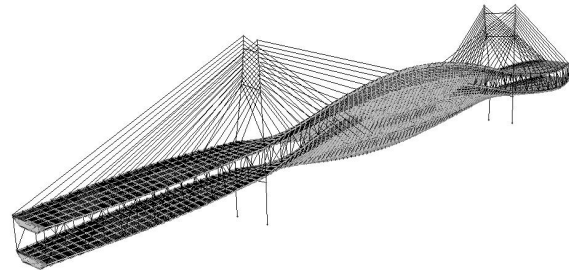
Kenar tabliye düşey modu

periyot: 0,58 sn



Mod: 11

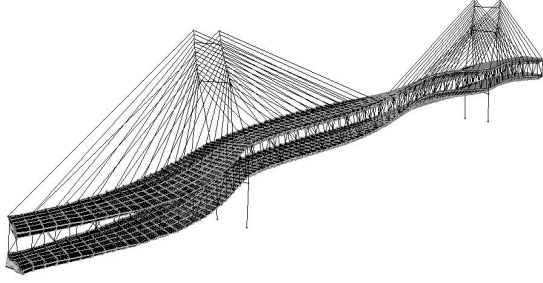
3. burulma modu periyot: 0,54 sn



Mod: 12

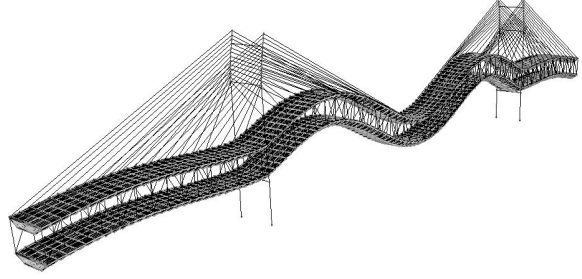
4. burulma modu periyot: 0,52 sn

Şekil 68'in devamı



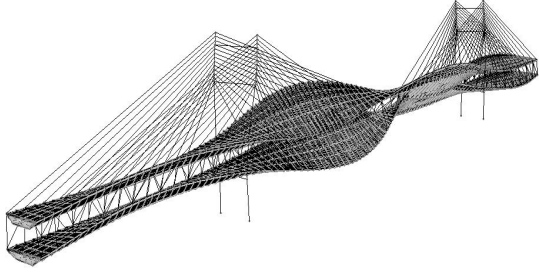
Mod: 13

4. yatay mod periyot: 0,49 sn



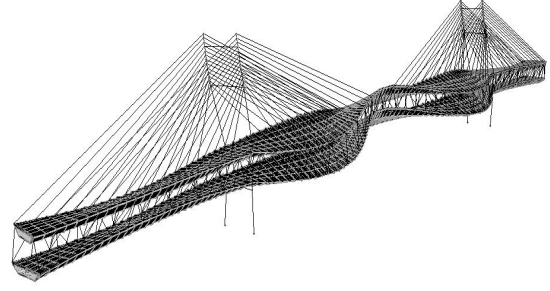
Mod: 14

4. düşey mod periyot: 0,46 sn



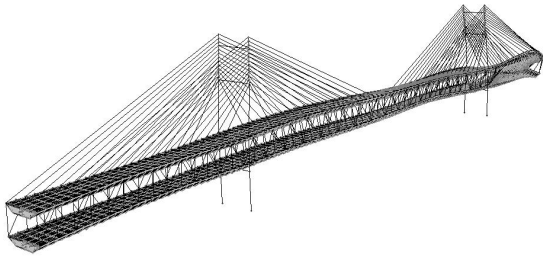
Mod: 15

5. burulma modu periyot: 0,45 sn



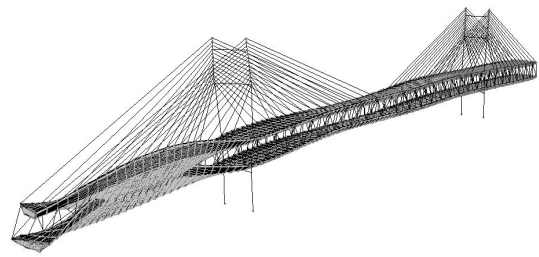
Mod: 16

6. burulma modu periyot: 0,39 sn



Mod: 17

Kenar tabliye burulma modu  
periyot: 0,38 sn

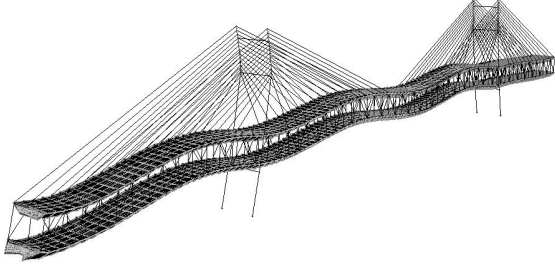


Mod: 18

Kenar tabliye burulma modu  
periyot: 0,37 sn

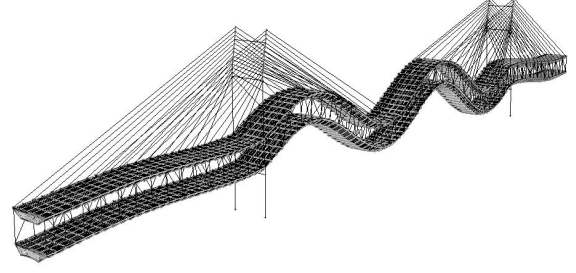


Şekil 68' in devamı



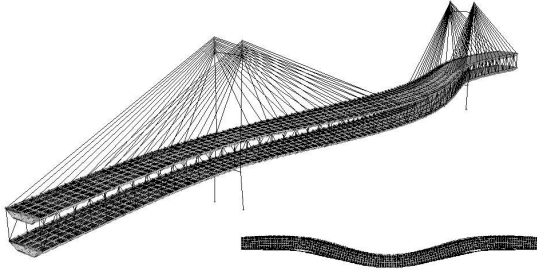
Mod: 19

5. düşey mod periyot: 0,35 sn



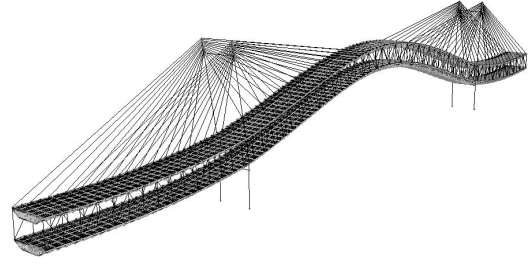
Mod: 20

6. düşey mod periyot: 0,32 sn



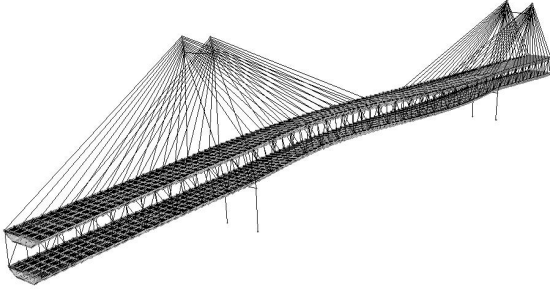
Mod: 1

1. yatay mod periyot: 2,14 sn



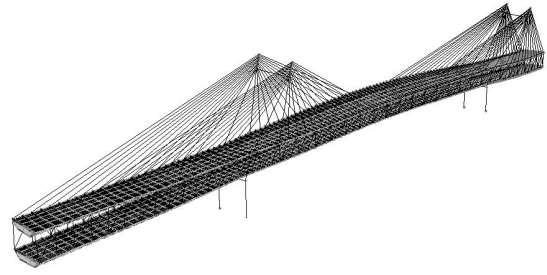
Mod: 2

1. düşey mod periyot: 1,62 sn



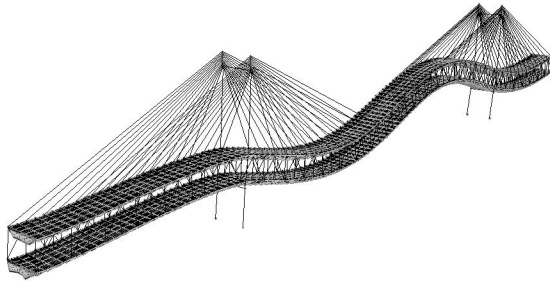
Mod: 3

2. yatay ve kule modu periyot: 0,89 sn



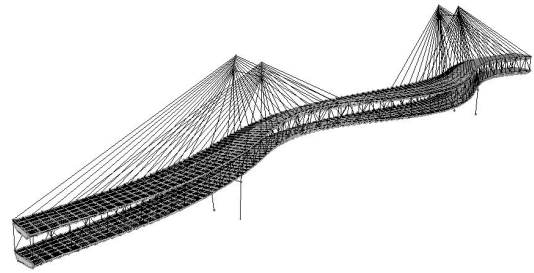
Mod: 4

1. burulma ve kule modu periyot: 0,88 sn



Mod: 5

2. düşey mod periyot: 0,84 sn

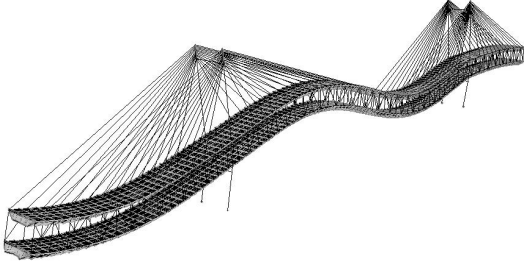


Mod: 6

3. yatay mod periyot: 0,76 sn

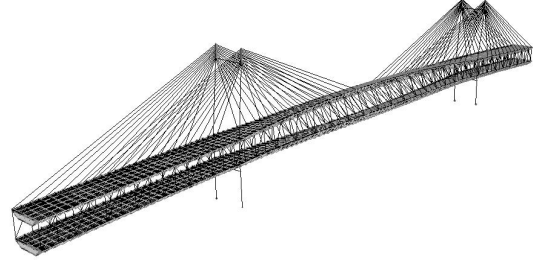
Şekil 69. Fan tip kablolu köprü modelinin doğal periyotları ve mod şekilleri

Şekil 69' un devamı



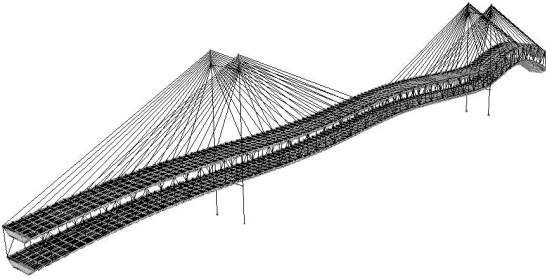
Mod: 7

3. düşey mod periyot: 0,74 sn



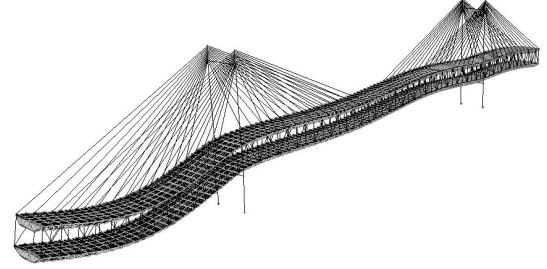
Mod: 8

2. burulma modu periyot: 0,63 sn



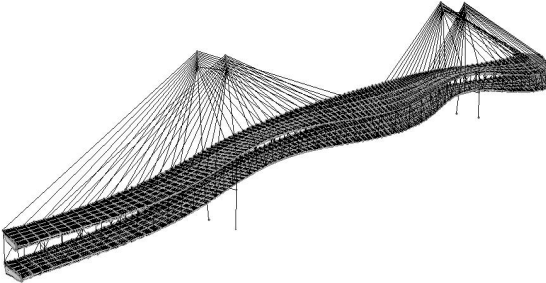
Mod: 9

Kenar tabliye düşey modu  
periyot: 0,59 sn



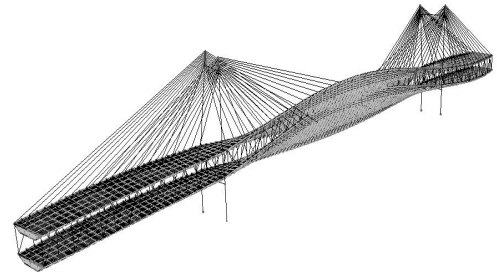
Mod: 10

Kenar tabliye düşey modu  
periyot: 0,57 sn



Mod: 11

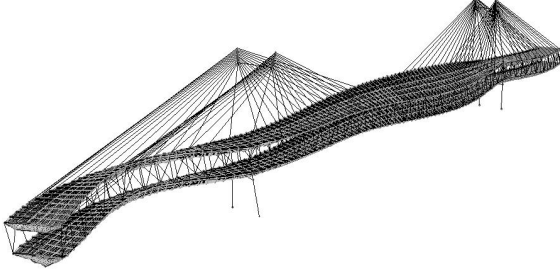
3. burulma modu periyot: 0,55 sn



Mod: 12

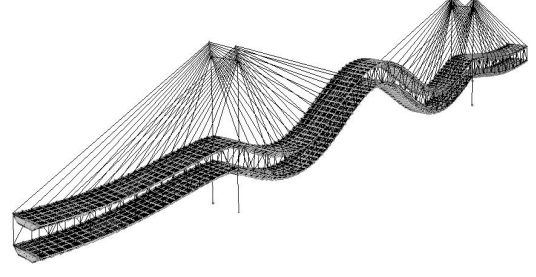
4. burulma modu periyot: 0,52 sn

Şekil 69' un devamı



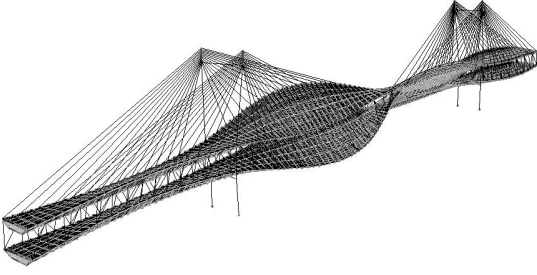
Mod: 13

5. burulma modu periyot: 0,50 sn



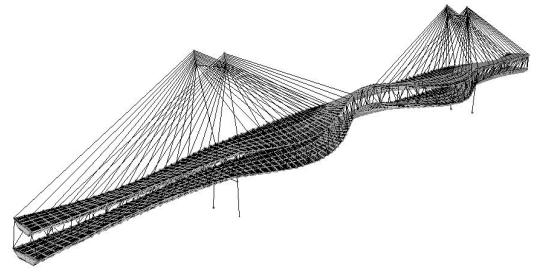
Mod: 14

4. düşey mod periyot: 0,46 sn



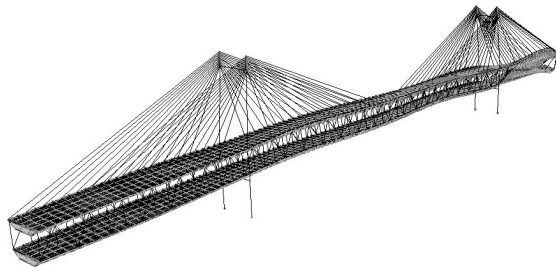
Mod: 15

6. burulma modu periyot: 0,45 sn



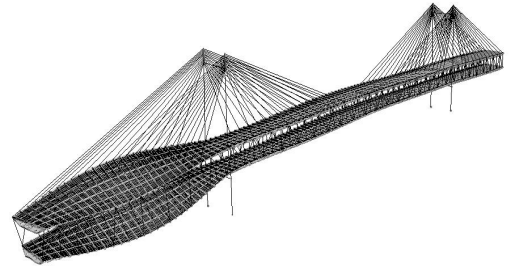
Mod: 16

7. burulma modu periyot: 0,40 sn



Mod: 17

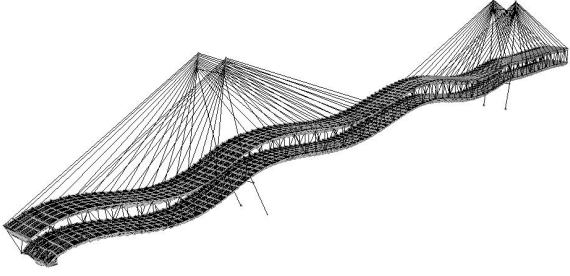
Kenar tabliye burulma modu  
periyot: 0,39 sn



Mod: 18

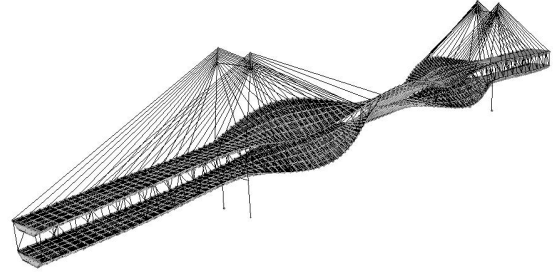
Kenar tabliye burulma modu  
periyot: 0,38 sn

Şekil 69' un devamı



Mod: 19

5. düşey mod periyot: 0,35 sn



Mod: 20

8. burulma modu periyot: 0,32 sn

Elde edilen değerlere göre harp tip model ile yarı harp tip model dinamik etki altında daha az yanıl deformasyona uğrarken fan tip modelin yanıl ve burulma modları daha erken modlarda oluşmuştur. Fan tip modelin kablo uzunluklarının fazla olması kablo eğiminin artmasına ve bu sebeple kabloların diğer modellere göre daha fazla gevşemesine neden olmaktadır. Daha fazla gevşeyen kablolar da, tabliye hareketini daha az kısıtlamaktadır. Bu yüzden tabliye hareketi fan tip modelde daha belirgin hissedilmektedir. Gerek mod şekilleri gerekse doğal periyot değerleri bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir [13, 28]. Ancak çift tabliyeli kablolu köprüler üzerine çok az sayıda çalışma bulunduğundan ve bu çalışmalardaki modellerin farklılıklarından dolayı tek tabliyeli köprülerde olduğu gibi çift tabliyeli köprülerde de farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Mesnetlenme şartlarından dolayı ilk mod köprünün boyuna doğrultusunda oluşabilmektedir [30, 31]. İkinci ve sonraki modlar ise bu çalışmada da görüldüğü gibi sırasıyla yatay mod, düşey mod ve burulma modu olarak sıralanmaktadır. Sistemdeki mesnet sayısı azaltıldığında sistemin hareket kabiliyeti artmakta ve daha esnek olmaktadır.

İki tabliyenin birbirine bağlanması amacıyla düşey ve çapraz yerleştirilen kafes elemanlar tabliyelerin birlikte çalışmasını sağlamıştır. Ancak tabliye genişliğinin toplam tabliye yüksekliğine oranı 1'e yaklaştığından özellikle modal analizde görüldüğü üzere sistemin burulma özelliği önem kazanmıştır. Tek tabliyeli kablolu köprülerde genel olarak yanıl modlar, düşey modların ardından gelmekte bu nedenle tabliyenin dinamik analizi

neticesinde tabliye düşey yer değiştirmesi yanal yer değiştirmeden büyük çıkmaktadır. Çift tabliyeli kablolu köprülerin özellikle tabliye bağlantısını sağlayan kafes sistemin tabliyeye nazaran çok narin olması nedeniyle tabliyelerin birbirinden bağımsız çalışması durumu oluşabilmekte ve buda tabliye sisteminin yanal hareket ve burulma karakteristiğini artırmaktadır.

Çalışmada oluşturulan çift tabliyeli kablolu köprü modellerinin sismik yükler altında yapısal çözümlemesi neticesinde elde edilen kablo kuvvetleri Tablo 4' te verilmiştir.

Tablo 4. Nonlineer dinamik analiz neticesinde elde edilen kablo kuvvetleri

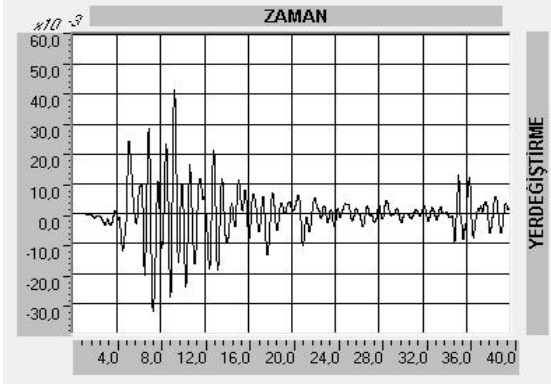
| KABLO NO | YARI HARP TİP<br>(kN) | FAN TİP<br>(kN) | HARP TİP<br>(kN) |
|----------|-----------------------|-----------------|------------------|
| O1       | 2486                  | 3048            | 2553             |
| O2       | 1664                  | 1766            | 1808             |
| O3       | 1605                  | 1673            | 1723             |
| O4       | 1662                  | 1696            | 1731             |
| O5       | 1704                  | 1722            | 1709             |
| O6       | 1761                  | 1767            | 1686             |
| O7       | 1674                  | 1663            | 1535             |
| O8       | 1652                  | 1638            | 1458             |
| O9       | 1641                  | 1592            | 1416             |
| O10      | 1549                  | 1453            | 1295             |
| O11      | 1452                  | 1275            | 1237             |
| O12      | 1251                  | 1004            | 1081             |
| O13      | 1011                  | 695             | 1035             |
| K1       | 4471                  | 4442            | 3902             |
| K2       | 2591                  | 2577            | 2245             |
| K3       | 2148                  | 2157            | 1860             |
| K4       | 1823                  | 2098            | 1701             |
| K5       | 1858                  | 2123            | 1763             |

Tablo 4' ün devamı

|     |      |      |      |
|-----|------|------|------|
| K6  | 1899 | 2141 | 1811 |
| K7  | 1716 | 1901 | 1648 |
| K8  | 1694 | 1825 | 1638 |
| K9  | 1596 | 1658 | 1558 |
| K10 | 1506 | 1482 | 1507 |
| K11 | 1325 | 1208 | 1376 |
| K12 | 1139 | 928  | 1305 |
| K13 | 834  | 594  | 1138 |

Bu Tablodan görüldüğü üzere, en uzun kablolar olan O1 ve K1 kablolarında en küçük kuvvet değerleri harp tip ve yarı harp tip modellerde oluşmuştur. Orta açıklıkta, en fazla zorlanan O1 kablosunda en küçük kuvvetler, yarı harp tip modelde 2468 kN ve harp tip modelde 2553 kN değerinde oluşurken, kenar açıklıkta, en fazla zorlanan K1 kablosunda en küçük kuvvet, 3902 kN ile harp tip modelde oluşmuştur. Dinamik analiz sonucunda toplam kablo kuvveti göz önüne alındığında, statik analiz sonuçlarından farklı olarak, harp tip kablolu köprü modelinde en az kuvvet gözlemlenmiştir. Fan tip modelde ise en büyük kuvvet oluşmuştur.

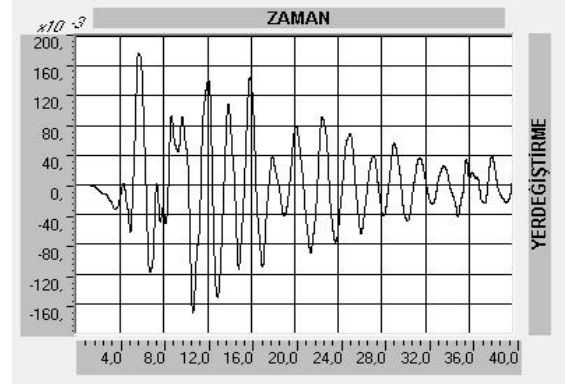
Çalışmada modellenen kablolu köprü tiplerinin İzmit-Yarımca deprem kayıt istasyonundan alınan veriler yardımıyla zaman-tanım alanında yapılan dinamik analizi neticesinde elde edilen değerler harp tip model için Şekil 70'de, yarı harp tip model için Şekil 71' de ve fan tip model için Şekil 72' da verilmiştir.



Min : -0,0325 m

Max : 0,0415 m

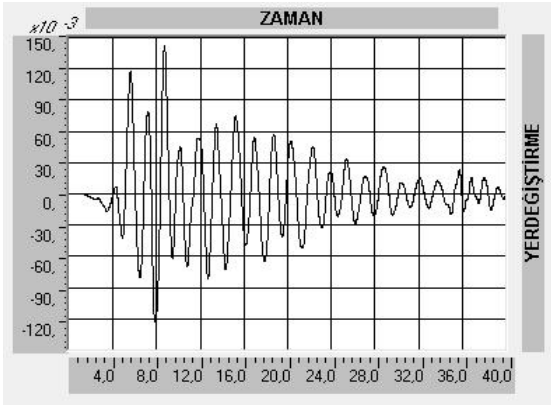
Tabliye orta noktası x yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,172 m

Max : 0,177 m

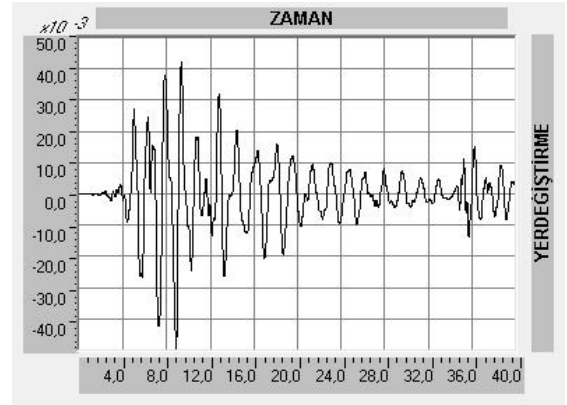
Tabliye orta noktası y yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,124 m

Max : 0,143 m

tabliye orta noktası z yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,047 m

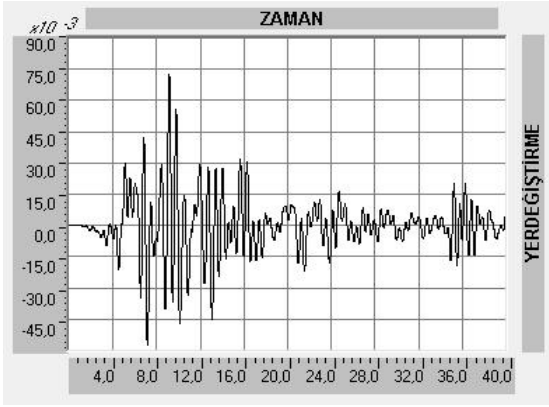
Max : 0,043 m

Kule tepe noktası x yönü yer  
değişirmesi

Şekil 70. Harp tip kablolu köprü modeline ait dinamik analiz sonuçları



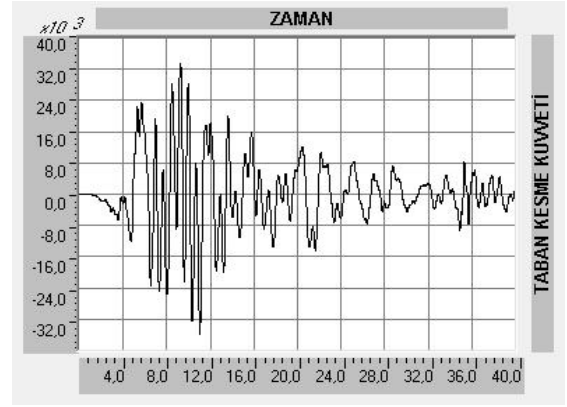
Şekil 70' in devamı



Min : -0,058 m

Max : 0,073 m

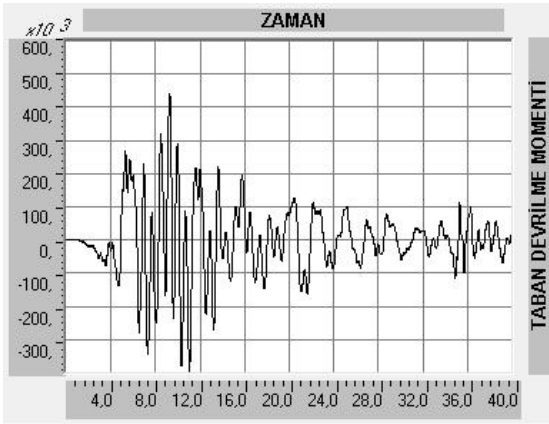
Kule tepe noktası y yönü yer değiştirmesi



Min :  $3,574 \cdot 10^4$  kN

Max :  $3,355 \cdot 10^4$  kN

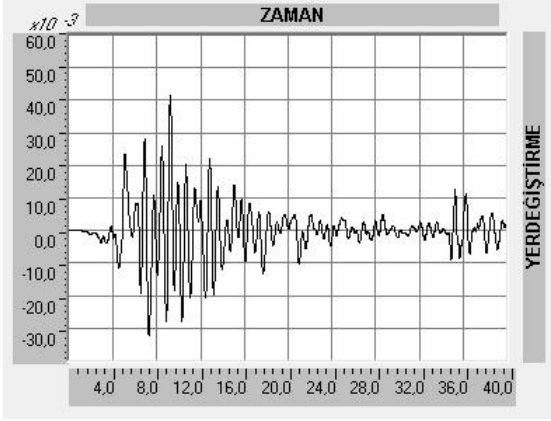
Kule taban kesme kuvveti



Min :  $3,997 \cdot 10^5$  kNm

Max :  $4,397 \cdot 10^5$  kNm

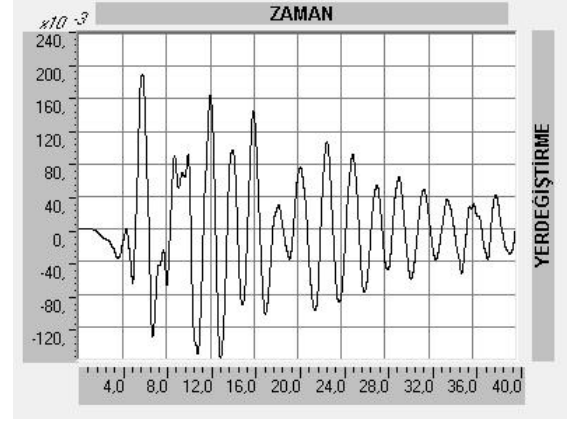
Kule devrilme momenti



Min : -0,0321 m

Max : 0,0414 m

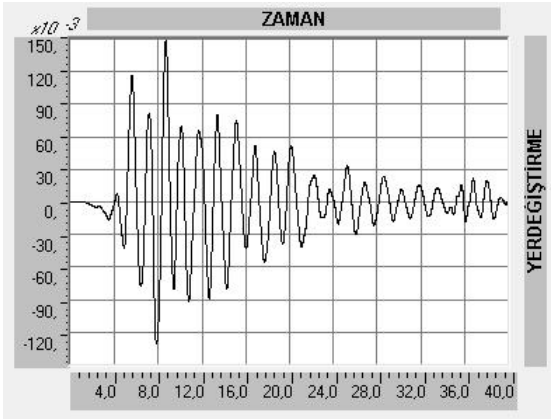
Tabliye orta noktası x yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,159 m

Max : 0,190 m

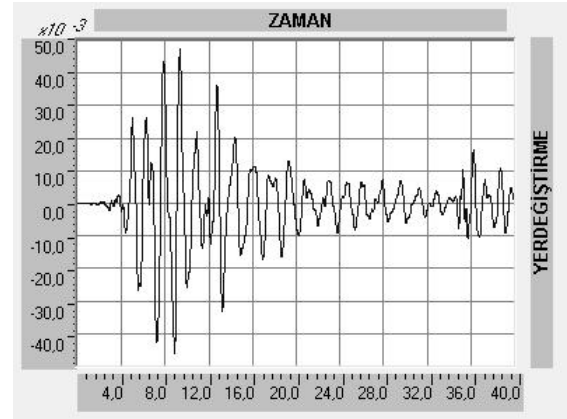
Tabliye orta noktası y yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,131 m

Max : 0,148 m

Tabliye orta noktası z yönü yer  
değişirmesi



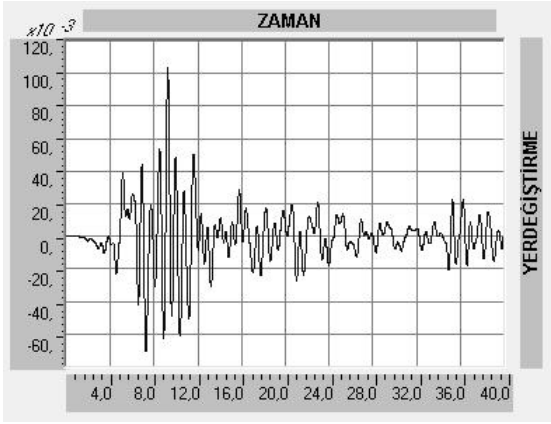
Min : -0,046 m

Max : 0,05 m

Kule tepe noktası x yönü yer  
değişirmesi

Şekil 71. Yarı harp tip kablolu köprü modeline ait dinamik analiz sonuçları

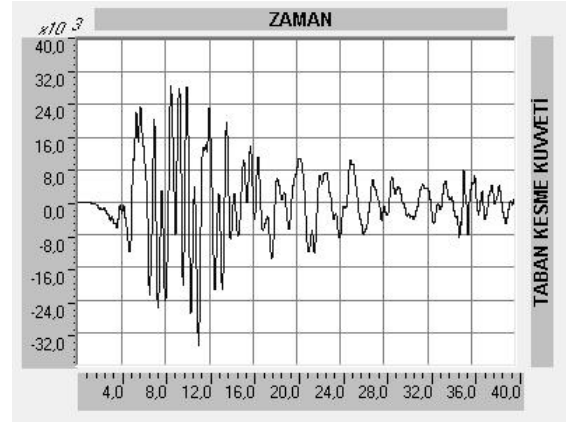
Şekil 71' in devamı



Min : -0,071 m

Max : 0,10 m

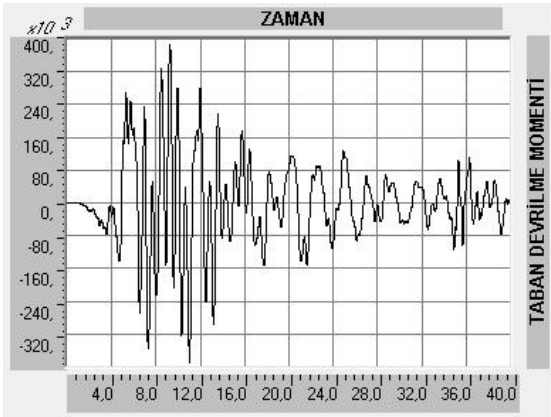
Kule tepe noktası y yönü yer değiştirmesi



Min :  $3,501 \cdot 10^4$  kN

Max :  $2,872 \cdot 10^4$  kN

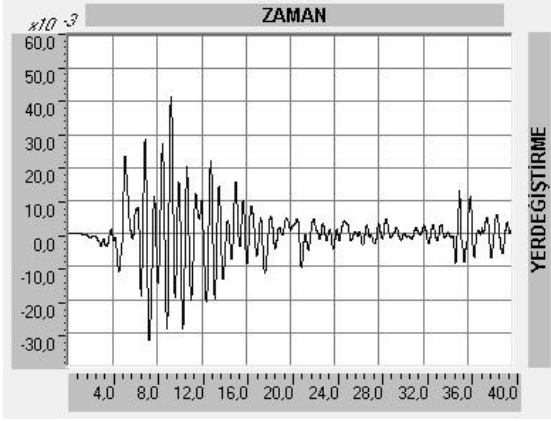
Kule taban kesme kuvveti



Min :  $3,881 \cdot 10^5$  kNm

Max :  $3,852 \cdot 10^5$  kNm

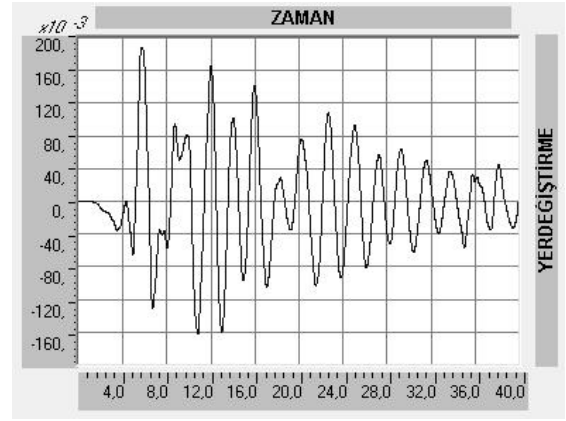
Kule devrilme momenti



Min : -0,0325 m

Max : 0,0414 m

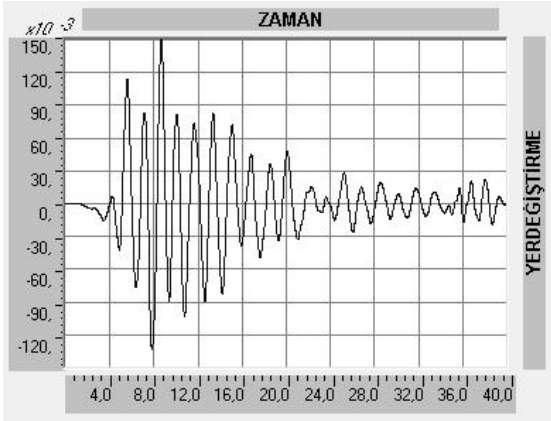
Tabliye orta noktası x yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,162 m

Max : 0,188 m

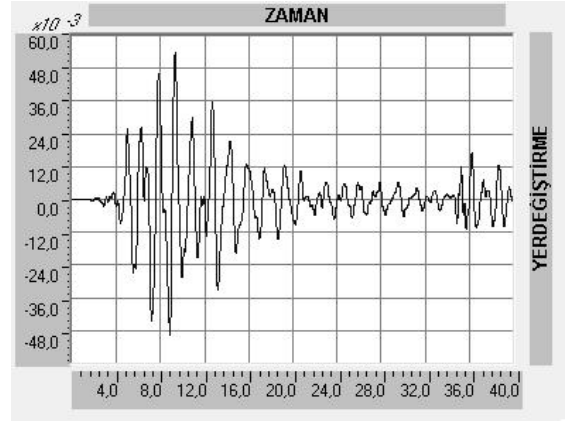
Tabliye orta noktası y yönü yer  
değişirmesi



Min : -0,133 m

Max : 0,150 m

Tabliye orta noktası z yönü yer  
değişirmesi



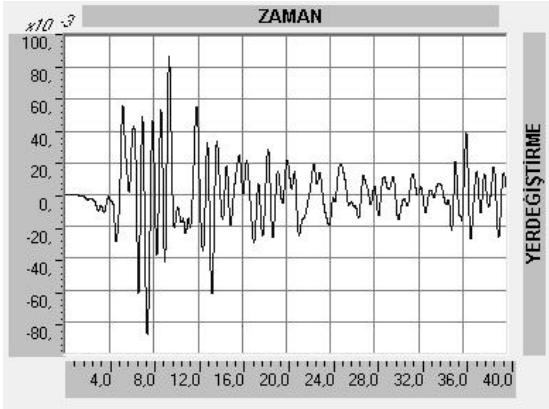
Min : -0,050 m

Max : 0,054 m

Kule tepe noktası x yönü yer  
değişirmesi

Şekil 72. Fan tip kablolu köprü modeline ait dinamik analiz sonuçları

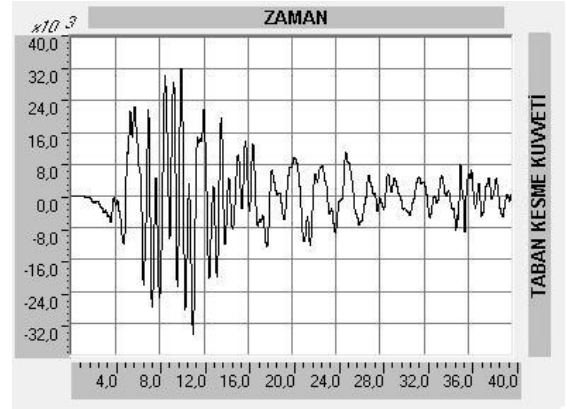
Şekil 72' nin devamı



Min : -0,087 m

Max : 0,087 m

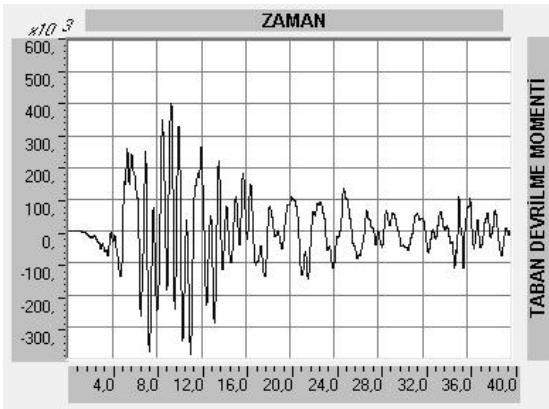
Kule tepe noktası y yönü yer değiştirmesi



Min :  $3,479 \cdot 10^4$  kN

Max :  $3,223 \cdot 10^4$  kN

Kule taban kesme kuvveti



Min :  $3,856 \cdot 10^5$  kNm

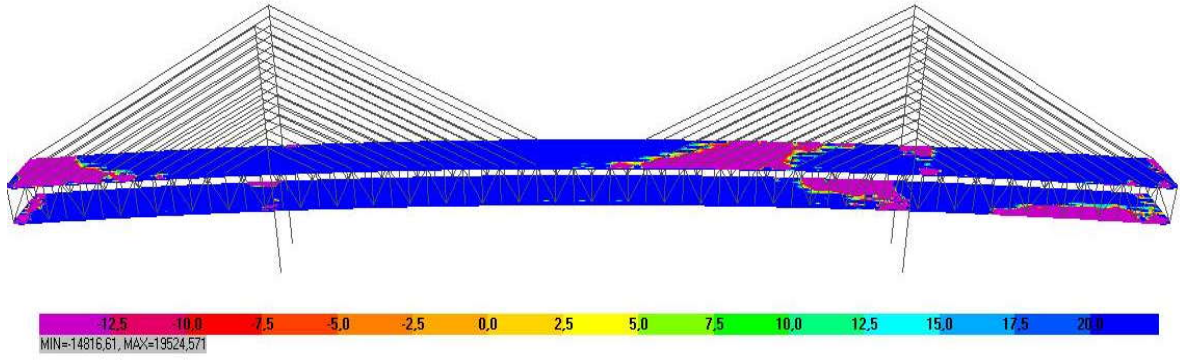
Max :  $4,029 \cdot 10^5$  kNm

Kule devrilme momenti

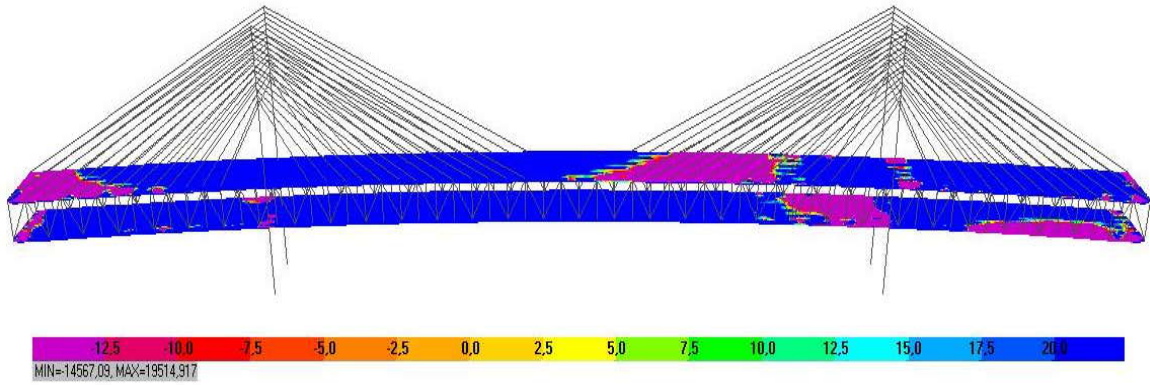
Zaman-tanım alanında yapılan dinamik analiz neticesinde harp tip model de tabliyenin, x yönünde 0,0415 m, y yönünde 0,177 m ve z yönünde 0,143 m yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Aynı şekilde yarı harp tip modelde tabliye, x yönünde 0,0414 m, y yönünde 0,19 m ve z yönünde 0,148 m yer değişirmiştir. Fan tip modelde ise tabliyenin, x yönünde

0,0414 m, y yönünde 0,188 m ve z yönünde 0,15 m yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Kule tepe noktaları ise harp tip modelde, x yönünde 0,047 m, y yönünde 0,073 m, yarı harp tip modelde, x yönünde 0,05 m, y yönünde 0,10 m ve fan tip modelde, x yönünde 0,054 m ve y yönünde 0,087 m yer değiştirmiştir. Gerek tabliye orta noktası gerekse kule tepe noktası yer değiştirmeleri bakımından harp tip kablolu köprünün sismik yükler altında diğer modellerden daha durağan davranış sergilediğini görülmüştür. Ancak harp tip modelde oluşan  $3,574 \cdot 10^4$  kN kule taban kesme kuvveti ve  $4,397 \cdot 10^5$  kNm kule devrilme momenti değerleri diğer modellerden daha büyük çıkmıştır. Yarı harp tip modelde ise kule devrilme momenti  $3,881 \cdot 10^5$  kNm ile en küçük değerde oluşmuştur.

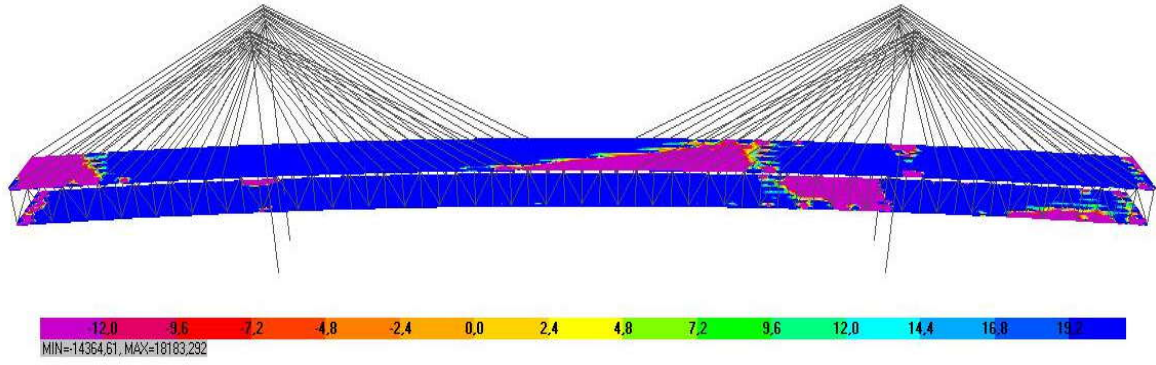
Çalışmada oluşturulan modellerin dinamik yükler altında yapısal çözümlemesinden elde edilen tabliye eksenel kuvvetleri harp tip model için Şekil 73' de, yarı harp tip model için Şekil 74' te ve fan tip model için Şekil 75' te verilmiştir.



Şekil 73. Harp tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri



Şekil 74. Yarı harp tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri



Şekil 75. Fan tip modelin tabliye eksenel kuvvetleri

Yer hareketi düzgün olmayan üç boyutlu bir kuvvet olarak yapılara etkir. Bu nedenle yer hareketinin herhangi bir anında oluşan yapı tepkileri Şekil 73, Şekil 74 ve Şekil 75' te görüldüğü üzere, statik yükler altındaki tepkiler gibi simetrik olamazlar. Modeller arasında tabliye tepkilerinin karşılaştırılması amacıyla, tabliyenin boyuna doğrultudaki en büyük yer değiştirmesinin olduğu, yer hareketinin 9,22' nci saniyesindeki tabliye eksenel kuvvetleri kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında her üç modelde de benzer bölgelerde kuvvetlerin olduğu gözlemlenmiştir. En büyük çekme kuvveti harp tip modelde 14816 kN/m, yarı harp tip modelde 14567 kN/m ve fan tip modelde 14364 kN/m, en büyük basınç kuvveti ise harp tip modelde 19524 kN/m, yarı harp tip modelde 19514 kN/m ve fan tip modelde 18183 kN/m değerinde oluşmuştur. Zaman-tanım alanında yapılan çözümleme sonucunda elde edilen tabliye eksenel kuvvetleri için harp tip ve yarı harp tip modellerin değerlerinin birbirine çok yakın olduğu, fan tip modelin değerlerinin ise diğer iki modelden küçük çıktığı görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çift tabliyeli kablolu köprülerin davranışlarını incelemek için gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

1 – Lineer olmayan statik çözümleme neticesinde orta açıklıkta ve kenar açıklıklarda en fazla zorlanan kabloların en uzun kablolar olduğu görülmüştür. En büyük kablo kuvvetleri harp tip modelde, en küçük kablo kuvvetleri ise fan tip modelde oluşmuştur. Orta açıklıkta en uzun kabloda, harp tip modelde oluşan kablo kuvveti, fan tip modelden % 15, yarı harp tip modelden ise % 10 daha fazladır. Kenar açıklıktaki en uzun kabloda, harp tip modelde oluşan kablo kuvveti, fan tip modelden % 6, yarı harp tip modelden ise % 4 daha fazladır. Bu sonuç, fan tip kablolu köprü modelinde, statik yükler için daha küçük kesitli kablo kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak daha küçük kesitin tabliye deformasyonuna etkisinin incelenmesi gerekmektedir.

2 – Statik yükler altında tabliyelerdeki en küçük yer değiştirme değeri yarı harp tip modelde, en büyük değer ise harp tip modelde oluşmuştur. Tabliye orta noktalarında oluşan en büyük değerler, harp tip modelde, yarı harp tip modelden % 9, fan tip modelden ise % 6 daha fazladır. Kule tepe noktaları yer değiştirmeleri bakımından ise fan tip modelin değerleri en küçük çıkmıştır. Kule tepe noktası yer değiştirmeleri, harp tip modelde, fan tip modelden %6, yarı harp tip modelden ise % 4 daha fazladır. Bu netice, çift tabliyeli fan tip kablolu köprünün statik yükler altında yarı harp ve harp tip kablolu köprülerden daha durağan davranış sergilediğini göstermiştir.

3 – Kulelerde oluşan toplam eksenel kuvvet harp tip modelde en küçük değerde oluşurken, moment ve kesme kuvvetleri fan tip modelde en küçük çıkmıştır. Kule eksenel kuvvetleri harp tip modelde, fan tip modelden % 2, yarı harp tip modelden ise % 3 daha azdır. Kesme kuvvetleri harp tip modelde, fan tip modelden % 10, yarı harp tip modelden ise % 6 daha fazladır. Moment değerleri içinde harp tip model, fan tip modelden, % 12, yarı harp tip modelden ise % 7 daha büyük değere sahiptir. Bu sonuç, fan tip modelin, statik yükler altında, aynı boyutlardaki harp tip modelden daha küçük kesitli kuleler kullanılarak inşa edilebileceğini ve ekonomi sağlanabileceğini göstermiştir.

4 – Kablolu köprülerde, kabloların eğik konumu nedeniyle tabliyede eksenel kuvvetler oluşmaktadır. Tabliyede oluşan en küçük eksenel çekme ve eksenel basınç kuvvetleri fan



tip modelde, en büyük tabliye aksel kuvvet değerleri ise harp tip modelde oluşmuştur. Harp tip modelde oluşan en büyük aksel basınç kuvvetleri, fan tip modelden % 12, yarı harp tip modelden % 8 daha fazladır. En büyük çekme kuvvetleri ise harp tip modelde, fan tip modelden % 11, yarı harp tip modelden ise % 9 daha fazladır.

5 – Statik yükler altında tabliyelerde oluşan en büyük gerilmeler, tabliye orta ve kule birleşim bölgelerinde oluşmuştur. En büyük basınç gerilmeleri harp tip modelde, fan tip modelden % 8, yarı harp tip modelden % 5 daha fazladır. En büyük çekme gerilmeleri ise harp tip modelde, fan tip modelden % 14, yarı harp tip modelden % 12 daha büyüktür. Tabliyelerdeki en büyük ve en küçük gerilme değerleri fan tip modelde en küçük değerlerde oluşmuştur. Bu sonuç, fan tip modelin statik yükler altında yukarıdaki maddelerin de desteği ile en kararlı yapıyı oluşturduğunu göstermektedir.

6 – Çalışmada oluşturulan modellere ait ilk 20 mod incelenmiş ve harp tip ile yarı harp modellerin mod şekillerinin benzer olduğu, fan tip modelin mod şekillerinin ise farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Harp tip model ile yarı harp tip model dinamik etki altında daha az yanal deformasyona uğrarken fan tip modelin daha fazla yanal hareket yapmaktadır. Harp ve yarı harp tip modeller de düşey modlar ilk modlarda oluşurken fan tip modelde ilk modlar yanal ve burulma modları olmuş, düşey modlar ise sonraki modlarda oluşmuştur. Tüm modellerde, ilk modlar yatay yönde oluşmuştur. Harp ve yarı harp tip modellerde 2. ve 3. modlar düşey modlar iken, fan tip modelde 3. modda burulma oluşmuştur. Çift tabliyeli kablolu köprüler de tabliye bağlantısını sağlayan kafes sistemin tabliyelere göre narin olması, tabliyelerin birbirinden bağımsız çalışmasına neden olabilmektedir. Bu özellikte tabliye sisteminin yanal hareket ve burulma karakteristiğini artırmaktadır. Fan tip modelde, tabliyeyi destekleyen kablolar, kulenin en üst bölgesine bağlanmaları ve diğer modellerden uzun olmaları nedeniyle düşey olmayan yükler altında, diğer modellerdeki kablolardan daha fazla şekil değiştirme yapmaktadırlar. Bu sebepten fan tip modelde tabliyeler daha fazla yanal hareket ve burulma etkisi altında kalmaktadır. Böylece fan tip modelde yanal ve burulma modları diğer modellerden fazla oluşmuştur. Bu sonuç, harp ve yarı harp tip modellerin dinamik yükler altında daha kararlı davranış sergilediğini göstermiştir.

7 – Lineer olmayan dinamik çözümleme neticesinde de en fazla zorlanan kabloların orta açıklıkta ve kenar açıklıklardaki en uzun kablolar olduğu görülmüştür. En küçük kablo kuvvetleri harp tip ve yarı harp tip modellerde oluşmuştur. Orta açıklıkta en uzun kabloda,

harp tip modelde oluşan kablo kuvveti, fan tip modelden % 19 daha az, yarı harp tip modelden ise % 3 daha fazladır. Kenar açıklıktaki en uzun kabloda, harp tip modelde oluşan kablo kuvveti, fan tip modelden % 14, yarı harp tip modelden ise % 15 daha azdır. Bu sonuç, harp tip modelin deprem yükü gibi düzgün yayılı olmayan yükler altında diğer modellerden daha rijit davrandığını göstermektedir.

8 – Dinamik yükler altında tabliyelerdeki en küçük yer değiştirme değeri harp tip modelde oluşmuştur. Tabliye orta noktalarında oluşan en büyük yer değiştirme değerleri, harp tip modelde, yarı harp tip modelden yatayda % 7, düşeyde % 3, fan tip modelden ise yatayda % 6, düşeyde % 4 daha azdır. Tüm modellerde tabliye boyuna yer değiştirme değerleri eşit çıkmıştır. Kule tepe noktaları yer değiştirmeleri bakımından da harp tip modelin değerleri en küçük çıkmıştır. Kule tepe noktası yer değiştirmeleri, harp tip modelde, yarı harp tip modelden boyuna yönde % 6, yatayda % 37, fan tip modelden ise boyuna yönde % 15, yatayda % 19 daha azdır. Bu netice, çift tabliyeli harp tip kablolu köprünün dinamik yükler altında yarı harp ve fan tip kablolu köprülerden daha durağan davranış sergilediğini göstermiştir.

9 – Dinamik yükler altında kule taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentleri harp tip modelde en büyük çıkmıştır. Kule taban kesme kuvveti, harp tip modelde yarı harp tip modelden % 2, fan tip modelden % 3 daha fazladır. Kule devrilme momentleri ise harp tip modelde, yarı harp tip modelden % 13, fan tip modelden % 9 daha fazladır.

10 – Dinamik yükler altında tabliyelerde oluşan gerilmeler karşılaştırıldığında en küçük değerlerin fan tip modelde oluştuğu görülmüştür. En büyük çekme gerilmeleri harp tip modelde, fan tip modelden % 3, yarı harp tip modelden % 2 daha fazladır. En büyük basınç gerilmeleri ise harp tip modelde, fan tip modelden % 7 daha büyük, yarı harp tip model ile aynı değerlerde oluşmuştur.

Statik yükler altında fan tip kablolu köprü modeli hem yer değiştirmeler hem de gerilmeler bakımından diğer modellerden üstün iken dinamik yükler altında harp tip kablolu köprü modelinin daha kararlı davrandığı gözlemlenmiştir. Özellikle son yıllarda deprem riski bulunan bölgelerde inşa edilen kablolu köprülerin harp ve yarı harp tiplerde yapılmış olması da bunun bir göstergesidir. Statik yükler altında fan tip modelin diğer modellerden kararlı olması, bu tipin deprem riskinin az olduğu bölgelerde daha uygun olmaktadır.

Çalışmada kullanılan çift tabliyeli kablolu köprü modelleri orta uzunlukta olduğundan, modeller arasında yer değiştirmeler ve kuvvetler bakımından çok büyük farklar gözlemlenmemiştir. Ancak açıklık boyutu arttıkça yer değiştirme ve kuvvet değerleri artacağından, uzun açıklıklarda modeller arasında, oluşacak değerler büyük farklılıklar gösterebilmektedir.

Harp tip ve yarı harp tip kablolu köprülerin sismik yükler altında fan tip kablolu köprülerden daha durağan olmalarına karşın fan tip kablolu köprülerin eleman kuvvet ve momentleri daha azdır.

Genellikle, kablo destekli köprüler, inşa edildikleri bölgelerde, boyutları ve önemleri bakımından, o bölgenin sembolü olmaktadır. Bu özellikte, köprülerin estetik bakımından güzel olmasını gerektirmektedir. Yapısal açıdan kıyaslanan üç tip model içerisinde harp tip modelin, estetik görünümünün diğer tiplerden güzel olması, bu tipin daha fazla tercih sebebi olmasını sağlamaktadır.

Çift tabliyeli kablolu köprüler üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, seçilen köprü tipleri ve enkesit boyutları için geçerlidir. Bu sonuçların çift tabliyeli tüm kablolu köprülere uyarlanması için, farklı açıklık ve enkesit boyutlarında çok sayıda kablolu köprünün statik ve farklı deprem yüklemesi altında dinamik analizlerinin yapılması gerekmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Walther, R., Cable Stayed Bridges, First Edition, Thomas Telford, London, 1985
2. Yazıcı, A., Değişik Düzende Eğik Kablolu Köprülerin Yapısal Çözümlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991.
3. Soyluk, K., Kablolu Köprülerin Stokastik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1997.
4. Gimsing, N.J., Cable Supported Bridges (Concept and Design). Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 1998.
5. Troitsky, M.S., Cable-Stayed Bridges. Second Edition, BSP Professional Books, London, 1988.
6. Pfeil, M.S., Battista, R.C. ve Mergulhao, A.J.R., Stress Concentration in Steel Bridge Orthotropic Decks, Journal of Constructional Steel Research, 61 (2005) 1172-1184.
7. Yarnold, M.T., Wilson, J.L., Jen, W.C. ve Yen, B.T., Local Buckling Analysis of Trapezoidal Rib Orthotropic Bridge Deck System, Bridge Structures, 3 (2007) 93-103.
8. Cheng, L. ve Karphari, V.M., Fatigue Behavior of a Steel-Free FRP-Concrete Modular Bridge Deck System, Journal of Bridge Engineering, ASCE ( July 2006).
9. Park, K.T., Hwang, Y.K., Lee, Y.H. ve Kim, S.M., Performance Verification of a New Pultruded GFRP Bridge Deck-to-Girder Connection System, Composite Structures 81 (2007) 114-127.
10. Zhang, Y. ve Cai, C.S., Load Distribution and Dynamic Response of Multi-Girder Bridges With FRP Decks, Engineering Structures 29 (2007) 1676-1689.
11. Chen, W. ve Duan, L., Bridge Engineering Handbook, CRC Pres, New York, 2000.
12. Bangash, M.Y.H., Prototype Bridge Structures (Analysis and Design), Thomas Telford, London, 1999.
13. Lei, X. ve Noda, N.A., Analysis of Dynamic Response of Vehicle and Track Coupling System With Random Irregularity of Track Vertical Profile, Journal of Sound and Vibration. 258 (2002) 147-165.

14. Song, W.K. ve Kim, S.E., Analysis of the Overall Collapse Mechanism Of Cable Stayed Bridges With Different Cable Layouts, Engineering Structures. 29 (2007) 2133-2142.
15. Bruno, D., Greco, F. ve Lonetti, P., Dynamic Impact Analysis of Long Span Cable Stayed Bridges Under Moving Loads, Engineering Structures. 32 (2007) 464-480.
16. Ren, W.X., Peng, X.L. ve Lin, Y.Q., Experimental and Analytical Studies on Dynamic Characteristics of a Large Span Cable Stayed Bridge, Engineering Structures. 27 (2005) 535-548.
17. Guo, W.H. ve Xu, Y.L., Fully Computerized Approach to Study Cable Stayed Bridge-Vehicle Interaction, Journal of Sound and Vibration. 248 (2001) 745-761.
18. Freire, A.M.S., Negro, J.H.O. ve Lopes, A.V., Geometrical Nonlinearities On the Static Analysis of Highly Flexible Steel Cable Stayed Bridges, Engineering Structures. 84 (2006) 2128-2140.
19. Wu, Q., Takahashi, K., Okabayashi, T. ve Nakamura, S., Response Characteristics of Local Vibrations in Stay Cables on an Existing Cable-Stayed Bridge, Journal of Sound and Vibration. 261 (2003) 403-420.
20. Khana, R.A., Dattab, T.K. ve Ahmad, S., Seismic Risk Analysis of Modified Fan Type Cable Stayed Bridges, Engineering Structures. 28 (2006) 1275-1285.
21. Xua, Y.L., Zhang, N. ve Xia, H., Vibration of Coupled Train and Cable Stayed Bridge System in Cross Winds, Engineering Structures. 26 (2004) 1389-1406.
22. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Third Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2005
23. American Institute of Steel Construction, Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges. First Edition, American Institute of Steel Construction, Inc., New York, 1963
24. Corte, W.D. ve Bogaert P.V., The Effects of Shear Deformations in Floorbeams on the Moment Distribution in Orthotropic Plated Bridge Decks, Journal of Constructional Steel Research, 62 (2006) 1007-1015.
25. Morghental, G., Cable Stayed Bridges-Earthquake Response and Passive Control, Yüksek Lisans Tezi, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, 1999.

26. Ramarao, M.V., Analysis of Cable Stayed Bridges by Fuzzy-Finite Element Modelling, Doktora Tezi, Osmania University, India, 2004.
27. Reich, Y. ve Fenves S.J., A System That Learns to Design Cable Stayed Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE ( July 1995).
28. Brockenbrough, R.L. ve Merritt, F.S., Structural Steel Designer's Handbook, The MacGraw-Hill, Inc., New York, 2006.
29. American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction Load and Resistance Factor Design. Third Edition, American Institute of Steel Construction, Inc., New York, 2001
30. Ganey, T., Yamazaki, F., Ishizaki, H. ve Kitazawa, M., Response Analysis of the Higashi Kobe Bridge and Surrounding Soil in the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Earthquake Engng. Struct. Dyn., 27 (1998) 557-576.
31. Siringoringo, D.M. and Fujino, Y., Observed Dynamic Performance of the Yokohama-Bay Bridge from System Identification Using Seismic Records, Struct. Control Health Monit. 13 (2006) 226–244.
32. Virlogeux, M., Recent Evolution of Cable Stayed Bridges, Engineering Structures. 21 (1999) 737-755.

## ÖZGEÇMİŞ

Olcaý EĞRİBOYUN 1982 yılında Eskişehir’ de doğdu. İlköğrenimini Balıkesir Fevzi Çakmak ilköğretim Okulu’ unda, Orta ve lise öğrenimini Balıkesir Ticaret odası Lisesi ve Ankara Dikmen Lisesi’ nde tamamladı. 2000-2001 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ nde lisans öğrenimine başladı. İnşaat Mühendisliği Bölümü’ nden 16 Haziran 2004 tarihinde mezun oldu. 2005 yılında Tekirdağ’ da vatani görevini tamamladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü’ sü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitime başladı. Bekar olan EĞRİBOYUN, iyi derecede İngilizce ve bilgisayar bilmektedir.