

**ZAMANA BAĞLI ÇEVRESEL ETKİLER İÇİN KONSOL DİLİMLER  
HALİNDE İNŞA EDİLEN KABLOLU KÖPRÜLERİN LİNEER  
OLMAYAN ANALİZİ**

**Tolga Gökhan DİRİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2009**

Tolga Gökhan DİRİ tarafından hazırlanan ZAMANA BAĞLI ÇEVRESEL ETKİLER İÇİN KONSOL DİLİMLER HALİNDE İNŞAA EDİLEN KABLOLU KÖPRÜLERİN LİNEER OLMAYAN ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Kurtuluş SOYLUK .....  
Tez Danışmanı, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Mekanik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Tekin GÜLTOP .....  
İnşaat Mühendisliği-Mekanik, Gazi Üniversitesi  
Doç.Dr. Kurtuluş SOYLUK .....  
İnşaat Mühendisliği-Mekanik, Gazi Üniversitesi  
Prof.Dr. Mehmet Emin TUNA .....  
Mimarlık-Yapı Bilgisi, Gazi Üniversitesi  
Prof.Dr. Ali İhsan ÜNAY .....  
T.E.F-Yapı Bölümü-Restorasyon, Gazi Üniversitesi  
Doç.Dr. Özgür ANIL .....  
İnşaat Mühendisliği-Mekanik, Gazi Üniversitesi

Tarih: 24 / 06 / 2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

Tolga Gökhan DİRİ

**ZAMANA BAĞLI ÇEVRESEL ETKİLER İÇİN KONSOL DİLİMLER  
HALİNDE İNŞA EDİLEN KABLOLU KÖPRÜLERİN LİNEER OLMAYAN  
ANALİZİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Tolga Gökhan DİRİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2009**

**ÖZET**

**Bu tez çalışmasında kablolu köprülerin konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkilerin dikkate alındığı lineer olmayan analizi gerçekleştirilmiştir.**

**Bu amaçla örnek sistem olarak seçilen Quincy Bayview kablolu köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli için, tabliyenin modellenmesine bağlı olarak üç ayrı analitik model oluşturulmuştur. Böylece kablolu köprülerde yaygın olarak kullanılan çubuk tabliye eleman ve rijit bağlantı eleman yaklaşımı, tabliyenin plak olarak modellenmesi suretiyle tahkik edilmiştir. Quincy Bayview köprüsünün lineer olmayan analizi, dengeli konsol yöntemi ile inşa edilmesi durumu için LARSA 2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilmiştir. Köprünün konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda, söz konusu program ile köprünün inşa aşamasının gelişimini gösteren adımları içeren bir dizi inşa adımının analizi yapılmıştır. Analiz aşaması, inşaat aşaması ve servis aşaması olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Analizlerde inşaat aşaması için 970 günde tamamlanan 33 dilim ve servis aşaması için 3 dilimden oluşan 6 aylık, 1**

yıllık ve 10 yıllık dilimler dikkate alınmıştır. Böylece oluşturulan köprü sonlu eleman modelleri hem kendi ağırlığı altında, hem de çevresel etkenler dikkate alınarak çözümlenmiş ve elde edilen köprü tepkileri çevresel etkenler açısından karşılaştırılmıştır.

**Bilim Kodu** : 911.1.029  
**Anahtar Kelimeler** : Kablolu köprü, çevresel etkenler, dengeli konsol yöntemi, zamana bağlı analiz  
**Sayfa Adedi** : 111  
**Tez Yöneticisi** : Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK

**TIME DEPENDENT NONLINEAR ANALYSIS OF SEGMENTALLY  
ERECTED CABLE STAYED BRIDGES**

**(M.Sc. Thesis)**

**Tolga Gökhan DİRİ**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**June 2009**

**ABSTRACT**

**In this thesis time dependent nonlinear analysis of segmentally erected cable stayed bridges are performed for the environmental conditions of creep, shrinkage and aging of concrete and relaxation of steel. With this aim, depending on the modelling of the bridge deck, three different analytical models are used to obtain the 3D finite element model of the Quincy Bayview cable-stayed bridge which is considered as a numerical example in the study. So, the modeling method of using frame deck elements and rigid link elements for cable-stayed bridge decks are verified by considering plate elements for the deck. The nonlinear staged construction analysis of the Quincy Bayview bridge is performed with the finite element code LARSA 2000. A series of construction stages, which show the construction progress of the bridge, are analyzed with this code. The analysis phase is divided into two phases: The construction phase and the service phase. In the analyses, while 33 stages which cover 970 days are considered for the construction phase, 3 stages which lasts up to 10 years are used for the service phase. The analytical models of the selected numerical example are solved by considering the self weight and the enviromental conditions. The bridge responses are then compared with respect to the enviromental conditions.**

**Science Code : 911.1.029**

**Key Words : Cable stayed bridge, enviromental conditions, cantilever method, time depent analysis.**

**Page Number: 111**

**Adviser : Assoc. Prof. Dr. Kurtuluş SOYLUK**

## TEŞEKKÜR

Zamana Bağlı Çevresel Etkiler İçin Konsol Dilimler Halinde İnşa Edilen Kablolu köprülerin Lineer Olmayan Analizi konulu çalışmaya bana önererek, çalışmamı başından sonuna kadar sürekli takip edip, çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK'a ve bu çalışmada bilgi, tecrübe ve yardımlarından yararlandığım RUA Engineering Ltd.Şti'nin sahibi Barbaros SARICI Bey'e, LARSA şirketi yetkililerine ve özellikle LARSA şirketi teknik danışmanı Ali KARAKAPLAN Bey'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince beni sabır ve sevgiyle destekleyen eşime ve tüm aile fertlerime müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize yararlı olmasını gönülden dilerim.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	6
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	8
1.3. Kablolü Köprülere Günümüzden Örnekler .....	10
1.3.1. Le Point De Normandie Köprüsü.....	10
1.3.2. Napoleon Bonaparte Köprüsü.....	11
1.3.3. Sunshine Skyway Köprüsü.....	11
1.3.4. Tataru Köprüsü.....	12
1.3.5. Yokohama Köprüsü.....	13
1.3.6. Rama VIII Köprüsü.....	14
1.3.7. Millau Viyadüğü.....	15

**Sayfa**

1.4. Kablolu Köprülerin Geometrik Biçimi.....	16
1.4.1. Enine doğrultuda kablo düzenlenmesi .....	17
1.4.2. Yol boyu kablo yerleştirilmesi.....	19
1.4.3. Kuleler.....	20
1.4.4. Üst yapı tipleri.....	21
1.4.5. Kablolar.....	22
1.5. Kablolu Köprülerin Yapım Metodları.....	24
1.5.1. Kademeli inşa yöntemi.....	24
1.5.2. İttirme yöntemi.....	25
1.5.3. Dengeli konsol yöntemi.....	26
1.6. Kablolu Köprülerde Matematik Modelleme.....	28
1.6.1. Geometrik olarak lineer olmayan analiz formülasyonu.....	28
1.7. Kablolu Köprülerde Zamana Bağlı Analiz.....	30
1.7.1. Zamana bağlı etkiler.....	30
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	38
2.1. Quincy Bayview Köprüsü Yapısal Özellikleri.....	38
2.2. Quincy Bayview Köprüsünün Analitik Modeli.....	39
3. BULGULAR VE İRDELEMELER .....	58
3.1. Köprü Yol Boyunca Oluşan Yerdeğiştirmeler.....	59
3.1.1. 1.ve 2. Modelin köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması.....	61
3.1.2. 2.ve 3. Modelin köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması.....	64

**Sayfa**

3.2. Kule Yüksekliği Boyunca Oluşan Yatay Yerdeğiştirmeler.....	67
3.2.1. Model 1 ve Model 2’de kule yüksekliği boyunca oluşan yatay yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.....	70
3.2.2. Model 2 ve Model 3’de kule yüksekliği boyunca oluşan yatay yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.....	73
3.3. Köprü Tabliyesinde Oluşan Eleman Kuvvetleri.....	76
3.3.1. Eğilme momenti.....	76
3.3.2. Kesme kuvveti.....	77
3.4. Kule Yüksekliği Boyunca Oluşan Eleman Kuvvetleri.....	78
3.4.1. Eğilme momenti.....	78
3.4.2. Normal kuvvet.....	80
3.4.3. Kesme kuvveti.....	82
3.5. Köprü Tabliyesinde Oluşan Gerilmeler.....	84
3.6. Dilimler Halindeki Yapım Aşaması ve Servis Aşaması Süresince Düğüm Noktaları Yerdeğiştirmelerinin Değişimi.....	86
3.6.1. Model 1.....	87
3.6.2. Model 2.....	92
3.6.3. Model 3.....	97
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	111

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Dünyadaki merkez açıklığına göre kablolu köprüler.....	16
Çizelge 2.1. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait kabloların kesit özellikleri.....	41
Çizelge 2.2. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri (1.Model).....	42
Çizelge 2.3. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri (2.Model).....	42
Çizelge 2.4. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri (3.Model).....	43
Çizelge 2.5. Konsol dilimlerin LARSA 2000'de oluşturulması.....	52

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kablo köprülerin genel çalışma prensibi .....	5
Şekil 1.2. Tekil düzlem sistem .....	17
Şekil 1.3. Çift düzlem sistem .....	18
Şekil 1.4. Üçlü düzlem sistem.....	18
Şekil 1.5. Kablo düzenlenmesine bağlı sistemler .....	19
Şekil 1.6. Kule tipleri .....	20
Şekil 1.7. Çelik ana kiriş tipleri .....	21
Şekil 1.8. Beton ana kiriş tipleri.....	21
Şekil 1.9. Kompozit üst yapı ana kirişinin James River Köprüsü'ndeki uygulama .....	22
Şekil 1.10. Tel grupları .....	23
Şekil 1.11. Çelik halatlar .....	23
Şekil 1.12. Paralel tel grupları .....	24
Şekil 1.13. Kademeli inşa yöntemi için uygulanma.....	25
Şekil 1.14. İttirme (push out) yöntemi için uygulanma .....	26
Şekil 1.15. Dengeli konsol yöntemi için uygulanma .....	27
Şekil 1.16. Kiriş elemana ait yerdeğiştirmeler .....	29
Şekil 1.17. Sünme gerilme-şekildeğişim grafikleri .....	31
Şekil 1.18. Tendon gerilme-gevşeme grafiği .....	36
Şekil 1.19. Betonun yaşlanmaya bağlı şekildeğiştirmesi .....	37
Şekil 2.1. Quincy Bayview Köprüsü'nün tabliye kesiti.....	39

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.2. 1.Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün eşdeğer tabliye kesiti .....	39
Şekil 2.3. Ana giriş.....	40
Şekil 2.4. 2.Model için köprünün tabliye kesiti.....	40
Şekil 2.5. 3. Model için köprünün tabliye kesiti.....	41
Şekil 2.6. Kablolu sistemin kulelerinin çubuk elemanlarla modellenmesi.....	44
Şekil 2.7. Quincy Bayview Köprüsü'nün kulelerinin genel görüntüsü (Model 1).....	45
Şekil 2.8. Quincy Bayview Köprüsü'nün kulelerinin genel görüntüsü (Model 2-Model 3)).....	46
Şekil 2.9. Taşıyıcı elemanların kule-tabliye birleşiminde gösterilmesi .....	47
Şekil 2.10. Quincy Bayview Köprüsü'nün X-Z görüntüsü.....	47
Şekil 2.11. 1.Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün 3 boyutlu modeli.....	48
Şekil 2.12. 2. Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün 3 boyutlu modeli.....	48
Şekil 2.13. 3. Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün 3 boyutlu modeli.....	48
Şekil 2.14. Dilim 1-4 genel gösterimi.....	54
Şekil 2.15. Dilim 5-12 genel gösterimi.....	55
Şekil 2.16. Dilim 13-22 genel gösterimi.....	56
Şekil 2.17. Dilim 23-33 genel gösterimi.....	57
Şekil 3.1. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	60
Şekil 3.2. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2).....	60
Şekil 3.3. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	61
Şekil 3.4. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2) .....	62

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.5. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2) .....	62
Şekil 3.6. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2) .....	63
Şekil 3.7. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2) .....	63
Şekil 3.8. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2) .....	64
Şekil 3.9. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	65
Şekil 3.10. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	65
Şekil 3.11. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	66
Şekil 3.12. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	66
Şekil 3.13. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	67
Şekil 3.14. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	68
Şekil 3.15. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2).....	69
Şekil 3.16. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	69
Şekil 3.17. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2).....	70
Şekil 3.18. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2).....	71

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.19. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2).....	71
Şekil 3.20. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2).....	72
Şekil 3.21. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2).....	72
Şekil 3.22. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	73
Şekil 3.23. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	74
Şekil 3.24. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	74
Şekil 3.25. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	75
Şekil 3.26. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3).....	75
Şekil 3.27. Köprü yolboyu eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	76
Şekil 3.28. Köprü yolboyu kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	77
Şekil 3.29. Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	79
Şekil 3.30. Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 2).....	79
Şekil 3.31. Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	80
Şekil 3.32. Kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	81
Şekil 3.33. Kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması (Model 2).....	81



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.34. Kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	82
Şekil 3.35. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1).....	83
Şekil 3.36. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 2).....	83
Şekil 3.37. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	84
Şekil 3.38. Köprü yolboyu $S_{xx}$ gerilme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	85
Şekil 3.39. Köprü yolboyu $S_{yy}$ gerilme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3).....	86
Şekil 3.40. Köprüde kullanılan düğüm noktalarının gösterimi .....	86
Şekil 3.41. 3 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1).....	89
Şekil 3.42. 111 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1).....	90
Şekil 3.43. 15 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1).....	90
Şekil 3.44. 20 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1).....	91
Şekil 3.45. 145 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1).....	91
Şekil 3.46. 30 düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1).....	92
Şekil 3.47. 3 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2).....	94
Şekil 3.48. 111 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2).....	95
Şekil 3.49. 15 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2).....	95

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.50. 20 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2).....	96
Şekil 3.51. 145 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2).....	96
Şekil 3.52. 30 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2).....	97
Şekil 3.53. 3 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3).....	100
Şekil 3.54. 111 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3).....	100
Şekil 3.55. 15 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3).....	101
Şekil 3.56. 20 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3).....	101
Şekil 3.57. 145 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3).....	102
Şekil 3.58. 30 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3).....	102

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 1.1. Le Point De Normandie Köprüsü (Fransa) .....	10
Resim 1.2. Na poleon Bonaparte Köprüsü (ABD).....	11
Resim 1.3. Sunshine Skyway Köprüsü (ABD) .....	12
Resim 1.4. Tataru Köprüsü (Japonya).....	13
Resim 1.5. Yokohama Köprüsü (Japonya) .....	14
Resim 1.6. Rama VIII Köprüsü (Thailand).....	14
Resim 1.7. Millau Viyadüğü (Fransa) .....	15

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$A_0$	Kablonun şekil değiştirmemiş durumdaki en kesit alanı
$A_c$	Betonarme elemanın kesit alanı
$A_s$	Kayma alanı
$\beta_a$	Başlangıç tersinmez sünme şekil değişimi fonksiyonu
$\beta_d$	Zamanla gecikmiş elstisite fonksiyonu
$\beta_f$	Zamanla gecikmiş plastisite fonksiyonu
$\beta_s$	Hayali derinliğin ve zamanın fonksiyonudur
$c$	Sabit
$E$	Young Modülü
$\epsilon_{xx}$	Normal şekil değiştirmeler
$\epsilon_{s1}$	Çevresel neme bağlı şekildeğişim değeri
$\epsilon_{s2}$	Hayali derinliğe bağlı şekildeğişim değeri
$\{F\}$	Dış kuvvet vektörü
$\{F_{eff}\}$	Bilinmeyen serbestlik derecelerini etkileyen etkili kuvvet vektörü
$f_s$	t anındaki çelikteki gerilme
$f_{si}$	İlk çelik gerilme değeri
$f_{sy}$	0.001 sapma ile akma gerilmesi değeri

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>G</b>	Kayma modülünü
<b>K</b>	Sistem rijitliği
<b>[k<sub>E</sub>]</b>	Elastik rijitlik matrisini
<b>[k<sub>G</sub>]</b>	Geometrik rijitlik matrisini
<b>P</b>	Uygulanan kuvvet
<b>t</b>	Gözlem süresi
<b>τ</b>	İlk yükleme zamanı
<b>t<sub>0</sub></b>	Yükleme altındaki betonun yaşı
<b>t</b>	Gerilme verildikten sonraki saat cinsinden zaman değeri
<b>U<sub>i</sub></b>	Şekil değiştirme enerjisi
<b>v</b>	Yerdeğiştirme
<b>v<sub>x</sub></b>	X eksenindeki yerdeğiştirme değeri
<b>v<sub>y</sub></b>	Y eksenindeki yerdeğiştirme değeri
<b>{v}</b>	Yerdeğiştirme vektörü
<b>y</b>	Kirişin tarafsız ekseninden ölçülen uzaklık
<b>φ<sub>d</sub></b>	Gecikmiş elastisite katsayısı ve 0,4'e eşittir
<b>φ<sub>f</sub></b>	Gecikmiş plastisite katsayısı
<b>U<sub>c</sub></b>	Betonarme elemanın kesit uzunluğu
<b>λ</b>	Nem faktörü
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>DSİ</b>	Devlet Su İşleri

## 1.GİRİŞ

Kablolu köprüler, asma köprülerle birlikte köprü sistemleri ailesi içinde büyük açıklıkları geçmeye uygunlukları ile diğer köprü türlerinden ayırt edilme özelliği taşırlar. Günümüzde 150 m. ile 1500 m.( ve daha uzun) arasındaki açıklık değerleri için uygulanabilir çözümler oluşturmaktadırlar. Yapılan bir çalışma; 150-1500 m. açıklıklı köprülerin toplam uzunluğunun, dünyada inşa edilmiş köprülerin toplam uzunluğuna oranının 5/6 olduğunu göstermektedir.

Kablo sistemli köprüler özellikle geniş nehirler, derin vadiler ve arada ayak yapılmasına elverişli olmayan geniş otoyol geçişlerinde ideal bir çözüm olmaktadır. Çoğunlukla bu tür köprüler deniz trafiğine açık nehirlerde bu koşulların sağlanabildiği, açıklığın su yüzeyinden yeterli yükselikte olduğu durumlarda inşa edilebilmektedir.

Kablolu köprülerin uygulanabilirliğinin ekonomik olabilmesi; açıklıkların kule yüksekliklerine oranına, kablo sayısı ve eğimlerine, üst yapının türü ve birbiri ile olan karşılıklı etkileşimlerine bağlıdır. Simetrik olmayan iki açıklıklı köprüler için, yapılmış örneklerin incelenmesi sonucunda büyük açıklığın küçük açıklığa oranının, toplam açıklığın %60-70 'i oranında olduğu ortaya çıkmaktadır. Küçük açıklığı mesnetleyen kabloların, tek grup halinde toplanarak kara ayağına ya da ağırlık bloklarına ankrajlanması sonucunda bu değer %80 e ulaşabildiği ise yine mevcut uygulamalardan çıkarılabilecek bir diğer sonuçtur.

Üç açıklıklı köprülerde ise orta açıklığın toplam açıklığın yaklaşık %55'i oranında olduğu benzer bir inceleme sonucunda saptanabilir. Bu tür köprülerde kenar açıklık uzunlukları ve kablo düzeni çoğunlukla simetrik olmaktadır.

Kablolu köprü kavramı çok zengin geometrik düzenlemelere olanak vermektedir. Kabloların düzeni, üstyapı türü, kulelerin türü; estetik, arazinin topografyası ve birçok zorunluluğa uygun olabilecek şekilde ayarlanabilir.

İlk inşa edilen kablolu köprülerin çoğu yıkılmış olup, 20. yüzyıla kadar başarılı bir şekilde uygulanamamışlardır. Yıkılma sebepleri; kablolu köprülerin gerçek yapı davranışının yanlış anlaşılmasından ve yapım aşamasındaki bazı hatalardan kaynaklanmıştır. Örneğin, kabloları oluşturmak için demir ve zincir gibi uygun olmayan malzemelerin kullanılması ve kullanılan malzemelerin alanlarının genelde yetersiz oluşu, söz konusu sistemlerin büyük ölçüde yıkılmasına neden olmuştur. Bu sistemlerde kullanılan kablolar yapım aşamasında gerginleştirilmemiş ve kablolar görevlerini etkileyen yükler altında, ancak bütün sistem önemli derecede deformasyon yaptıktan sonra yerine getirmeye başlamışlardır. Böylelikle, kablolu köprülerin fazla esnek olmalarının yanı sıra güvenli olmadıkları sonucuna varılmış ve kablolu köprülerin inşası bırakılmıştır. Kablolu köprülerdeki hatalar üzerinde çalışan ve kablolu köprü inşası yerine asma köprüleri öneren Navier olmuştur. Navier'in önerisi ile köprü mühendisliğinde kablolu köprü inşasına yönelim olmuştur [1-4].

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. Yeni sistem kablolu köprüler önce Alman mühendisler arasında, daha sonrada birçok ülkede kabul görmüştür [2].

Sitka Harbor ve Pasco Kennewick köprüleri, kablolu köprü tasarımlarında estetik kavramlarının oynadığı ve oynayabileceği rolü gösteren örnekler olmaları açısından önemli veriler içermektedirler. Değişik kablolu köprü formlarının, maliyet açısından dikkate alınması gereken farklar doğurmaması, tasarımcılarına geniş bir seçim serbestliği getirmektedir.

Modern mühendisliğin kilometre taşları olan bu köprülerden sonra birçok mühendis konuyla ilgilenmeye başlar ve dünya seksenli yıllarda ve doksanların ilk yansında bu türde yapılan azımsanamayacak sayıda uygulamalara sahne olur.

Tarihsel süreç içerisinde kullanılan taşıyıcı sistemler incelendiğinde; kablo düzeni açısından, son yıllarda büyüyen açıklık değerleriyle birlikte, yelpaze türü düzenlemenin radyal türü karşısında baskın olduğu görülmektedir. Gelişen bilgisayar

olanakları yardımıyla, sistemin yüksek dereceden hiperstatik olmasının günümüzde hesaplamalar açısından bir zorluk olmaktan çıkması, tabliyenin daha çok sayıda kablo ile mesnetlenmesine yönelimi sağlamıştır. Bu eğilim, daha narin tabliye elemanlarının oluşmasına yol açtığından, burkulmanın ve hareketli tekil yüklerin oluşturacağı yerel deformasyonların sınırlandırılması koşullarının kesit büyüklüklerinin belirlenmesinde çok daha önemli hale gelmesine neden olmuştur. Tabliyelerin hafiflemesi, hareketli yüklerin toplam yük içerisindeki oranını yükselttiğinden, yorulma problemleri önem kazanmış ve hareketli yükün zati yük karşısındaki düşük oranı varsayımıyla ileri sürülmüş, tabliye davranışına ilişkin kabullerin gözden geçirilmesi noktasına gelinmiştir. 1987 yılı istatistikleri itibariyle; 1976 yılına kadar yapılan 58 köprünün sadece yedi tanesinin orta açıklığı 305m'nin üzerindeyken, bunu takip eden 11 yıl içinde inşa edilen 27 köprünün 14 tanesi 305m'nin üzerinde orta açıklık uzunluğuna sahiptir. 1976-87 Yılları arasında beton ve öngerilmeli beton tabliyelerin, çelik tabliyeler karşısında ağırlıklı duruma geçtiği de yine aynı istatistiklerde görülmektedir. Son yıllarda konu ile ilgili yürütülen araştırmaların karakterleri incelendiğinde; çelik tabliyeli köprüler açısından, narinliğin ve yer değiştirmelerin büyük olmasının ortaya çıkarttığı lineer olmayan davranış özelliklerine; beton tabliyeli köprülerde ise rötre, sıcaklık değişimi ve malzeme mukavemetinin zamana bağlı değişiminden kaynaklanan etkilerin daha ayrıntılı incelenmesine yönelik eğilimlerin var olduğu görülmektedir. Ayrıca göreceli olarak büyük açıklıklı köprülerin günümüze kadar büyük fırtınalar ve depremler geçirmemiş olmaları konu ile ilgili gözlemlerin oluşmasına olanak sağlamadığından, bu konuların daha dikkatle ele alınmasını ve özel araştırmaları zorunlu kılmaktadır.

Yüzyılın son otuz yılı içerisinde hızlı bir yayılım gösteren kablolu köprüler, yeni fikirlerin nasıl ve ne tür ortamlarda ortaya çıktığı ile ilgili bazı değerlendirmeler yapma fırsatını da yaratmaktadır. Bir kavram olarak bu tür köprüler, Almanya'da savaş sonrası döneminin oluşturduğu sosyal ihtiyaçların baskısıyla ortaya atılmış ve geliştirildikleri ortamda ekonomik olabilme koşulunu sağladıkları için kabul görmüşlerdir. Dönemin ekonomik koşulları içerisinde bu köprülerin daha ucuz bir çözüm olabilecek kafes köprüler karşısında göz ardı edilmemiş olmasının altında ise kafes köprüleri görsel nedenlerle beğenmemiş olan bir estetik anlayışı yatmaktadır.



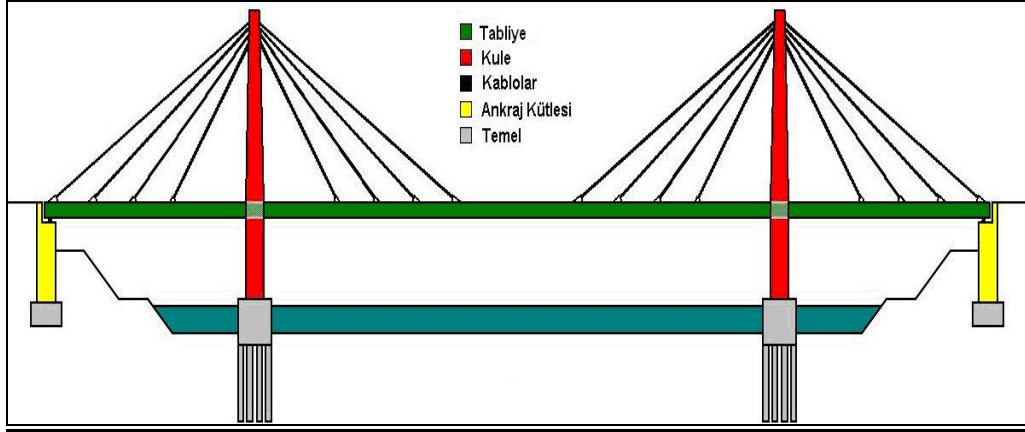
Başka bir ifade ile, tasarımcı ve bürokratların yeni form arayışlara sürükleyen neden salt bir ekonomi anlayışı değil, aynı zamanda görünüm açısından çekici bir ürün oluşturma sorumluluğudur.

Kablolu köprüler sayesinde çok açıklıklı mesafeler rahatlıkla geçilebilmekte ve yapısal verimliliğine ek olarak estetik açıdan da bu köprüler güzel sonuçlar vermektedir. Kablolu köprülerin gelişimindeki en büyük etken, kuşkusuz çelik kablolardır. El ile yapılan telleri 14.yüzyılda Avrupa’da makinede çekilen teller izlemiştir. Bugünkülere benzeyen ilk çelik kablo ise 1834 yılında Albert Dishinger isimli bir Alman tarafından geliştirilmiştir. Çelik kabloların geliştirilmesi ve taşıyıcı sistem malzemesi olarak kullanılmaya başlamasıyla, kablolu köprülerde büyük gelişmeler olmuştur [6].

Konunun gelişmesinde etkili olmuş diğer iki faktör ise Almanya'daki tasarım yarışmaları ve mühendislik eğitimi sistemidir. Störmsund, Duesseldorf North, Duisburg köprülerinin tümü tasarım-inşa yarışmaları (design-construction competitions) sonucunda ortaya çıkmışlardır. Bu sayede değişik taşıyıcı sistemler ayrıntılı yayınlarla açıkça karşılaştırılmış, yeni formların karşılaştırmalı maliyetleri belirlenebilmiştir.

Bu yeni yapı türü yavaş yavaş tüm ülkeleri etkisi altına alarak, 150-650 m ve daha büyük açıklıklarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Amerika, Avrupa, Japonya ve daha birçok farklı ülkeye 70’den fazla inşa edilmiştir. Günümüzde ise kablolu köprüler, 650 m’ye kadar olan açıklıklarda daha ekonomik ve estetik bir şekilde uygulanmaktadır.

Kablolu köprülerin çalışma prensibi Şekil 1.1’de basitçe verilmektedir. Kablolu köprülerde genellikle iki taşıyıcı kule ile tabliyeleri kulelere bağlayan kablolar bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Kablolu köprülerin genel çalışma prensibi

Klasik asma köprüden farklı olarak, kablolu köprülerde köprü tabliyesi kulelere doğrudan bağlıdır. Çoğul kablo düzenlemenin birçok avantajı vardır. İlk olarak, tabliye konsol dilim metoduyla kulelere bağlanarak ardışık olarak tabliyelerin bağlanmasını sağlar. İkinci olarak, kabloların çok sayıda kullanımı ile kule ve tabliyede bulunan ankrāj noktalarındaki tekil kuvvetler azalır. Ayrıca, bu ankrājlar tabliyeyi askıya alma noktaları arasında momentlerin azalmasını sağlar. Üçüncü olarak, kablolu köprülerin yapım aşamasında oluşabilecek hasarın veya zararın herhangi bir zamanda köprü yapısını ve modelini bozmadan kolayca düzeltilebilmesine imkan sağlamaktadır. Son olarak, kablo sayısının artırılması, mükemmel aerodinamik denge sistemi ve dolayısıyla farklı doğal frekansların oluşmasını sağlamaktadır [6].

Kablolu köprüler kule, kablo ve tabliye gibi değişik davranış gösteren elemanlardan oluşmaktadır. Dış kuvvetler altında özellikle kablolar büyük çekme kuvvetine maruz kaldıklarından bu kuvvetlerin eleman rijitlik matrislerine etkisi büyük olmaktadır. Yapı elemanlarının geometrik olarak lineer olmayan davranışı olarak adlandırılan bu özelliğın kablolu köprülerin analizinde dikkate alınması gerekmektedir [6].

### 1.1. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Kablolu köprülerin statik analizleri konusunda günümüze dek birçok yöntem kullanılmıştır. Kablolu köprüler bazı analistler tarafından, bir yaklaşım olarak lineer çekmeye çalışan kabloları sahip, lineer yapı sistemleri olarak kabul edilmiştir [11, 16]. Bu kabulün yetersiz olduğu birçok araştırmacı tarafından ispatlanmıştır [7,17-22]. Kablolar, kendi ağırlıklarından kaynaklanan sehimlerindeki değişim nedeni ile lineer olmayan bir davranış göstermektedirler. Kablolu köprü sistemlerinde var olan ana kirişte, kablolardaki çekme kuvvetini karşılamak üzere büyük eksenel kuvvetler oluşmaktadır. Ana kirişteki bu büyük eksenel kuvvet ile eğilme deformasyonu arasındaki etkileşimden dolayı, geometrik olarak lineer olmayan etki ortaya çıkmaktadır [17, 20, 21, 23]. Kabloları ön çekme verilmesinin etkisi de bazı analistler tarafından dikkate alınmıştır [17].

Kablolu köprülerin üç boyutlu yapı olarak analizi oldukça karmaşık bir problemdir. Bununla birlikte, köprü tabliyesinin sınır şartları ile ilgili olarak yapı analistleri tarafından yapılan basitleştirici kabuller ile problem iki boyutlu analiz durumuna indirgenmek istenmiştir [18, 20, 21]. Analizlerde tesir çizgileri kullanılması çok az sayıdaki araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmacıların çoğu tepkinin lineer bölgede olduğunu kabul etmişlerdir [11]. Araştırmacıların bir kısmı ise, hareketli yüklerin yaklaşık konumunu tespit için lineer analiz ile elde edilen tesir çizgilerini kullanarak ve daha sonra lineer olmayan statik analiz ile lineer olmayan analizler gerçekleştirmişlerdir [17, 21, 23].

Kablolu köprülerin zamana bağlı lineer olmayan analizleri, son yıllara kadar nispeten az çalışılmış iken, son yıllarda pek çok araştırmacının üzerinde dikkatle durduğu konu haline gelmiştir.

Fleming (1979), kablolu köprülerin lineer olmayan analizleri üzerinde durmuş ve kablodaki başlangıç çekmesinin, eleman ağırlığının ve hareketli yüklerin etkilerini dikkate alan bir bilgisayar programı ile kablolu köprülerin analizini yapmayı amaçlamıştır [21]. Bu çalışmada köprü 2 boyutlu modellenerek, zamana bağlı

değişimler de dikkate alınarak analiz yapılmıştır. Çubuk eleman olarak modellenen köprüde öngerme telleri kullanılmamıştır. Bu yüzden sadece beton elemanların zamana bağlı olan sünme ve rötre durumları ile çelik olarak modellenen kabloların köprü inşası sırasında gevşeme yapması durumları incelenmiştir. Sonuçlarda ise köprü elemanlarının standart hallerdeki durumlarının zamana bağlı kıyaslanması yapılmıştır.

Cluyet ve Shepherd (1990), kablolu köprülerin lineer olmayan analizleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. 2 açıklıklı, tek kuleli ve 2 boyutlu olarak modelledikleri kablolu köprüde, öngerme çubuklarını tanımladıkları kutu kesit döşemede kullanmışlardır. Zamana bağlı etkileri değerlendirmek için kule ve döşemeler beton, kablolar öngerme çubukları ile aynı malzemeden tanımlamışlardır. Çalışmadaki amaç köprü yapılırken zamanın ve dış etmenlerin malzemelere dolayısıyla köprüye olan etkilerini irdelemek olmuştur. Çalışma sonrasında sünme, rötre ve gevşeme etkilerinin kablolu köprü üzerinde oluşturacağı etkileri karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır [49].

Cruz ve arkadaşları (1998), kablolu köprülerin lineer olmayan zamana bağlı analizlerini ve dilimler halinde inşalarını içeren bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada her iki kenar açıklığı 86,89 m ve merkez açıklığı 137,16 m olan üç açıklı bir betonarme köprü kullanmışlardır. Köprü sistemi öngermeli olarak tasarlanan tabliyeler ile iki orta ayak ve iki kenar ayağa sahiptir. Sistem 3 boyutlu olarak modellenerek, zamana bağlı ve dilimler halinde inşaatını içeren analizler gerçekleştirmiştir. Konsol dilimler halinde ilerleyen inşaat metodu ile köprü inşasının bittiği anda ve 8000 günlük servis süresi için yol boyu moment değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca yıllar geçtikçe orta açıklıkta oluşan gerilme değerleri de kıyaslanmıştır. Araştırmada tendonların gevşemesi durumunda ve betonarme elemanların rötre ve sünme durumlarında gerilme ve momentlerde oluşan değişim incelenmiştir [50].

Antonio R.Mari (2000), köprü tabliyelerinin öngermeli ve öngermesiz durumlarının zamana bağlı oluşturduğu yerdeğişimleri irdelemiştir. İki boyutlu olarak

modellenen köprüde tabliyeler özel bir şekilde üç boyutlu olarak modellenmiştir. Döşemenin üst ve alt flanjlarda tendonlar ayrı ayrı tanımlanmıştır. Sistemin kendi ağırlığı altında yapılan analiz sonrasında öngermeli durumda alt flanjda oluşan gerilme ve yerdeğiştirmeler zamana bağlı olarak kıyaslanmıştır. Aynı şekilde bu işlemler üst flanj için de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tendonlarda oluşan gerilmelerin zaman içerisindeki değişimleri de irdelenmiştir. Araştırmada esas olarak öngirme kuvvetindeki değişimlerin gerilmelere ve yerdeğiştirmelere etkisi değerlendirilmiştir [51].

Sajid Abbas (1993), iki açıklı tek kuleli bir kablolu köprü sisteminin dilimler halinde inşa edilmesi durumunda, zamana bağlı etkiler için analizini gerçekleştirmiştir [6]. Zamana bağlı etkiler olarak rötne, sünme ve gevşeme dikkate alınırken, köprü iki boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışma sonucunda kule ve tabliyede karşılaştırmalar yapılarak, zaman bağlı etkenlerin tepkiler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında kablolu köprülerin konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkilerin dikkate alındığı lineer olmayan analizi yapılmaktadır. Daha önceki konu ile ilgili olarak yapılmış çalışmalarda da belirtildiği gibi çalışmalarda genellikle iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiş olup, nispeten kısa açıklıklı kablolu köprü örnekleri incelenmiştir. Ancak kablolu köprülerin üç boyutlu davranış sergilemeleri ve son yıllarda merkez açıklıklarının oldukça artması, söz konusu köprülerin uzun açıklıklar için üç boyutlu olarak modellenerek çevresel etkenler için incelenmesini gerekli kılmıştır. Ayrıca kablolu köprülerin üç boyutlu modellenmesinde yaygın olarak kullanılan çubuk tabliye eleman ve rijit bağlantı elemanları yaklaşımı, tabliyenin plak olarak modellenmesi suretiyle tahkik edilmektedir. Kablolu köprülerin belirtilen çevresel etkenler için analizi gerçekleştirilirken konular bölümler halinde incelenmiştir.

Birinci bölümde konu ile ilgili çalışmalar sunulduktan sonra, kablolu köprülere ait güncel örnekler sunulmuş ve daha sonra kablolu köprülerin geometrik düzenlemelerinden ve temel özelliklerinden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde tez çalışmasına konu olacak ABD'de inşa edilen Quincy Bayview Kablolu Köprüsü tanıtılmış ve köprünün matematik modeli oluşturulmuştur. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli için tabliyenin modellenmesine bağlı olarak üç ayrı model tercih edilmiştir.

Üçüncü bölümde Quincy Bayview Kablolu Köprüsünün zamana çevresel etkiler için konsol dilimler halinde analizi ile elde edilen bulgular sunulmuş ve irdelenmiştir. Bu bölümde tabliye ve kuleler için yerdeğiştirmeler, eğilme momentleri, normal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve gerilmeler elde edilmiştir. Elde edilen tabliye ve kule tepki değerleri Model 1, Model 2, Model 3 için karşılaştırılmıştır. Tabliyenin çubuk eleman olarak çözümlenmesi ile plak eleman olarak çözümlenmesi durumları karşılaştırılarak, plak çözüm metoduyla çözümün gerçekçiliği gösterilmeye çalışılmıştır.

Quincy Bayview Kablolu Köprüsünün zamana çevresel etkiler için konsol dilimler halinde analizi sonucu çıkarılabilecek sonuçlar ve öneriler dördüncü bölümde sunulmuştur.

### 1.3. Kablolu Köprülere Ait Günümüzden Örnekler

#### 1.3.1. Le Point De Normandie Köprüsü

Yapımı 1995 de tamamlanan köprü Fransa'daki Honfleur ve Le Havre bölgelerini birleştirmektedir. Köprü'nün ana açıklığı 930 m ve köprü yüksekliği su seviyesinden itibaren 55 m'dir. Köprü'nün kablolu köprü yapılmasına karar verilmesinde 3 ana faktör göz önünde bulundurulmuştur.

1. Köprü'nün çok ağır olması sebebiyle, köprü ayaklarına ankraj yapılamayacağı kanısına varılarak kablolu bir sistem yapılmasına karar verilmiştir.
2. Köprü'nün çok ağır olmayan bir trafik yükünü taşıyacak olması,
3. Köprü'nün yapıldığı yerdeki nehrin ayaklar için çok derin olması kablolu bir sistem tercihi ne neden olmuştur.

Köprü 465 milyon \$'a mal olmuştur. Yapımında 70.000 m<sup>3</sup> den fazla beton ve 19.000 tondan fazla çelik kullanılmıştır. 180 den fazla kablo kullanılmış ve yapımı 20 Ocak 1995 de tamamlanmıştır (Resim 1.1).



Resim 1.1. Le Point De Normandie Köprüsü (Fransa)

### 1.3.2. Napoleon Bonaparte Köprüsü

Genelde Napoleon Bonaparte köprüsü olarak da bilinen bu köprü Florida'daki St. Johns nehri üzerinde bulunmaktadır. 3.220 m uzunluğunda ve nehir seviyesinden 75 m yüksekliğindeki köprü Jacksonville'in kuzeyi ile Arlington ve Beaches bölgelerini birleştirmektedir. 1989 yılında açılan köprü basit kablolu köprülere en güzel örneklerden biri olarak gösterilmektedir ( Resim 1.2).



Resim 1.2. Napoleon Bonaparte Köprüsü (ABD)

### 1.3.3. Sunshine Skyway Köprüsü

Haziran 1982'de Florida'da yapımına başlanan köprü 6,4 km uzunluğunda ve Tampa Bay nehrinin üzerindedir. Köprü'nün tabliyesi "precast deck superstructure" olarak tanımlanan yerinde döküm metoduyla gerçekleştirilmiştir. Tasarımı Figg ve Muller tarafından yapılmıştır. Köprü'nün merkez açıklığı 400 m, yüksekliği ise 58.8 m'dir. 20.000 araç kapasiteli köprü'nün maliyeti ise ~245 milyon \$ olmuştur (Resim 1.3).





Resim 1.3. Sunshine Skyway Köprüsü (ABD)

#### **1.3.4. Tatara Köprüsü**

Japonya'da 1 Mayıs 1989 yılında hizmete giren Tatara köprüsü 1480 m açıklığındadır. İlk olarak 1973 yılında asma köprü olarak planlanan Tatara Köprüsü, 1989 yılında kablolu köprü olarak tasarlanmıştır (Resim 1.4). Kuleler çelik olup 220 m dir. Merkez açıklığı 890 m, kenar açıklıkları 164,5 m ve 257,5 m'dir. Köprü'nün yapımı yaklaşık 6 yıl sürmüştür. Böyle olunca teknolojik gelişmeleri uygulama testine imkan sağlamıştır.



Resim 1.4. Tatarabashi Köprüsü (Japonya)

### 1.3.5. Yokohama Köprüsü

Japonya Yokohama’da yer alan köprü 27 Eylül 1989’da trafiğe açılmıştır. Köprü 460 m açıklığındadır. (Resim 1.5) “H” şeklindeki kulelere tabliyeler 176 adet kablo ile bağlanmıştır. Köprü, Yokohama Limanını altında bulundurmaktadır ve şehrin giriş kısmında 860 m altı şeritli oto yolunu ve yaya yolunu taşımaktadır. Turistik görünümüyle dünyadaki etkileyici kablolu köprülerdendir.



Resim 1.5. Yokohama Köprüsü (Japonya)

### 1.3.6. Rama VIII Köprüsü

Thailand'da 20 Eylül 2002'de trafiğe açılmıştır. Toplam uzunluğu 2.45 km ve orta açıklığı 300 m'dir. Kuleler üzerine altın işlemler oldukça dikkat çekicidir. Köprü adını, Chakri hanedanının sekizinci hükümdarının adı Ananda Mahidol'dan almıştır. Turistlerin çok büyük ilgisini çeken görkemli bir köprüdür (Resim 1.6).



Resim 1.6 Rama VIII Köprüsü (Thailand)

### 1.3.7. Millau Viyadüğü

Dünyanın en yüksek kablolu köprüsü olan Millau Köprüsü, Fransa'nın güneyinde yer alan Millau yakınlarındaki Tarn nehri üzerinde yer almaktadır. Köprü'nün toplam uzunluğu 2.460 m, merkez açıklıkları yaklaşık 350 m ve kulelerinin yükseklikleri P1: 94,5 m, P2: 245 m, P3: 221 m, P4: 144 m, P5: 137 m, P6:112 m ve P7: 78 m'dir. 14 Aralık 2004'de trafiğe açılan köprü 39 ayda inşaatı tamamlanmıştır. Köprü'nün yüksekliği Eifel Kulesinden biraz fazla ve New York'ta 2001 yılında yıkılan Empire State binalarından 38 m daha kısadır.



Resim 1.7. Millau Viyadüğü (Fransa)

Günümüze kadar yapılan uzun açıklıklı kablolu köprülere ait örnekler Çizelge 1.1’de verilmektedir.

Çizelge 1.1 Dünyadaki merkez açıklığına göre kablolu köprüler

Köprünün Adı	Merkez Açıklığı (m)	Ülke	Yapım Yılı
Sutong	1088	Çin	2008
Stonecutters	1018	Hong Kong	2009
Tatara	890	Japonya	1999
Normandie	856	Fransa	1993
Third Nanjing Yangtze	648	Çin	2005
Second Nanjing Yangtze	628	Çin	2001
Baishazhou	618	Çin	2000
Qingzhou	605	Çin	2001
Meiko-Chuo	590	Japonya	1997
Skarsundet	530	Norveç	1991
Tsurumi-koro	510	Japonya	1995
Ikuchi	490	Japonya	1991
Higashi-kobe	485	Japonya	1994
Alex Frazer	465	Kanada	1986
Second Hoogly	457	Hindistan	1992

#### 1.4. Kablolu Köprülerin Geometrik Biçimi ve Kabloların Düzenlenmesi

Kablolu köprüler, geometrik biçimleri, tasarımcının yaratıcılığına bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir. Kablolu köprülerin mimari estetik açısından ön plana çıkması, kablo düzenlemesine, kule çeşidine ve üst yapı çeşidine bağlı olarak gerçekleşmiştir.

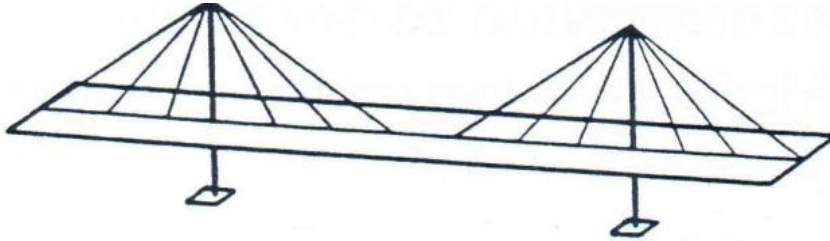
Kablo düzenlemesinin, köprünün yapısal performansı, inşaat metodu ve projenin değeri üzerindeki etkilerine bağlı olarak, tasarımda öne çıkan bir unsur olduğu açıktır.

### 1.4.1. Enine doğrultuda kablo düzenlenmesi

#### Tekil düzlem sistem

Estetik açıdan, kabloların tekil düzleminin duruşu mümkün olduğunca görsel çaprazlamalardan kaçınılarak inşa edilmelidir. Tekil düzlemlili inşa edilen bu tür sistemlerde köprü ortadan asıldığında yolculuk edenlerin görüş açılarını engellememektedir.

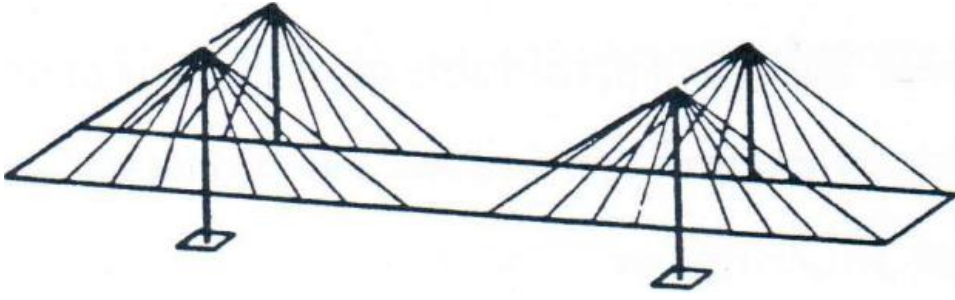
Ayrıca, burulmaya karşı koyacak rijit kirişler kullanılmalıdır. Çünkü bu kirişler burulma kuvveti arttığında asimetrik oluşan yüklere ancak kutu kesitli halleriyle karşı koyabilirler. Elbette bunun sonucu olarak maliyette bir artma meydana gelecektir. Diğer bir deyişle, burulmalı rijit tabliye ikinci mertebe momentlerini azaltır ve yapının aerodinamik stabilitesine katkıda bulunur.



Şekil 1.2 Tekil düzlem sistem

#### Çift düzlem sistem

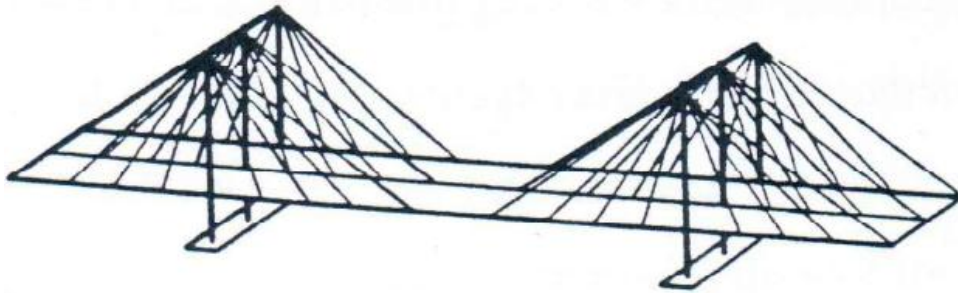
Bu tür sistemlerde kablolar simetrik açıdan daha uygundur. Çift düzlemlili tabliyeler, kablolar ile kulelere çift askılı olarak bağlanmaktadır. Bu sistemlerin inşası gerçekten basit ve ekonomiktir. Eğimli kablolu düzlemlilerde, kule yüksekliğinin artırılmasına veya tabliyenin çaprazlama boyutlarının artırılmasına neden olabilir. Bu durumda çaprazlama rijitliğinin ve yapının stabilitesinin artırılması gerekir. Kulelerin inşası, eğik kablolu sistemlere oranla daha karmaşıktır.



Şekil 1.3 Çift düzlem sistem

#### Üçlü düzlem sistem

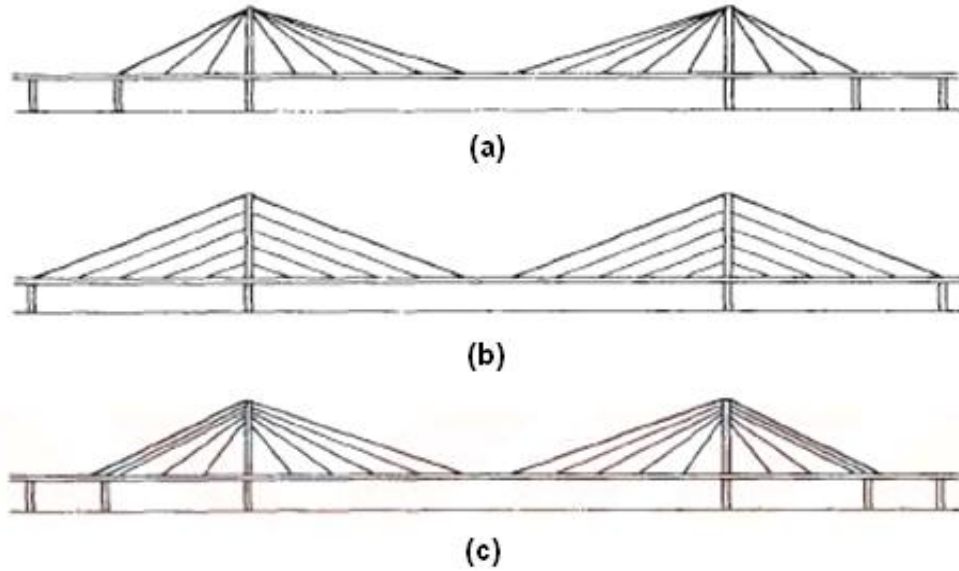
Bu tür sistemler ise daha geniş karayollarını taşırlar. Bu da çaprazların eğilme momentlerinin yol boyu daha fazla olmasını sağlar. Böyle olunca maliyeti düşünülerek bu tür köprülerin yapımından kaçınılmalıdır.



Şekil 1.4 Üçlü düzlem sistem

### 1.4.2. Yol boyu kablo düzenlemesi

Yol boyunca yerleştirilmiş basit kablo örnekleri Şekil 1.5’de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Kablo düzenlenmesine bağlı sistemler

a) yelpaze sistem, b) paralel sistem, c) radyal sistemi

#### Yelpaze sistem

Basit Yelpaze Sistemi kulenin tepesinde tüm askıları bir araya getirir. Bu nedenle köprü ana kirişlerinde maksimum eğilme açıları oluşur. Bu düzenleme ile, kablolar tarafından döşemede karşılanan aksel kuvvetler azaltılmaktadır. Tasarımda ve kule başlıklarının yapımındaki maliyetin fazla oluşu bu düzenlemenin eksik yönünü oluşturmaktadır.

#### Paralel sistem

Bu düzenleme ile kablolar, kule yüksekliği boyunca düzgün yayılır ve birbirlerine paralel olacak şekilde düzenlenir.

- Kablo kesişiminin çok az olması nedeniyle estetik açıdan göze hoş gelir. Örneğin Duesseldorf’deki Tamms’ın tasarladığı Rhine Köprüsü.



- Kablo bağlantıları kule yüksekliği boyunca dağıtılır, bu nedenle kule tasarımı oldukça etkileyicidir.
- Kablo bağlantı düzenlemeleri basittir ve kule A-Şeklinde bir yapıda tasarlanıp inşa edilebilir.

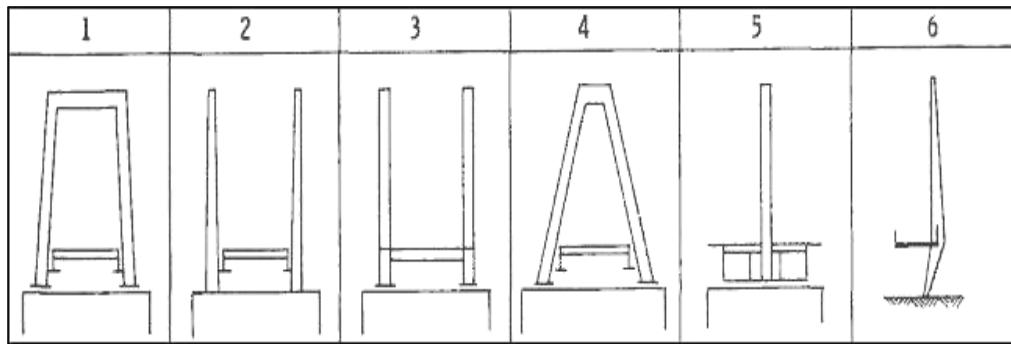
### Radyal sistem

Aslında en ideal çözüm olan radyal ve basit yelpaze sisteminden oluşan karma bir sistemdir. Kulenin daha üst kısmında askıların gerilimi ve bağlantı detayları daha basittir. Yük taşıma mekanizması, kulenin alt kısımlarında basamak basamak daha da eğimli hale gelince daha etkileyici bir sonuç ortaya çıkarmaktadır.

### **1.4.3 Kuleler**

Kule şekilleri; kablo bağlantı tipi, inşaat alanı, estetik ve ekonomik durumlara bağlıdır. Bazı kule şekilleri Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Kulelerin şekli çok basit olabilir. Leonhardt'a göre boşta duran destek kuleleri ile 488 m'den fazla açıklıklar desteklenebilir.

Kulelerin yüksekliği birçok faktöre bağlıdır. Bunların en önemlileri; kablo bağlantıları, ekonomik nedenler ve tecrübedir. Leonhard'a göre, merkez açıklığın %20-%25'i kule yüksekliği için iyi bir orandır [12].



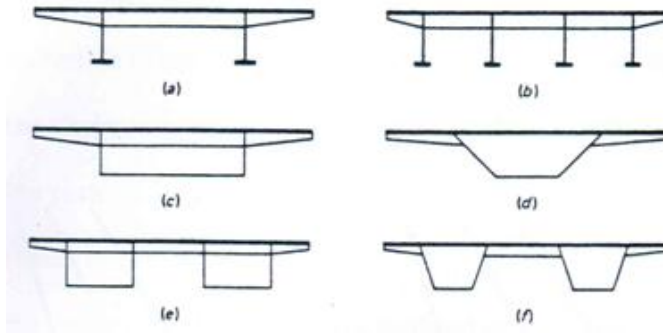
Şekil 1.6 Kule tipleri

#### 1.4.4. Üst yapı tipleri

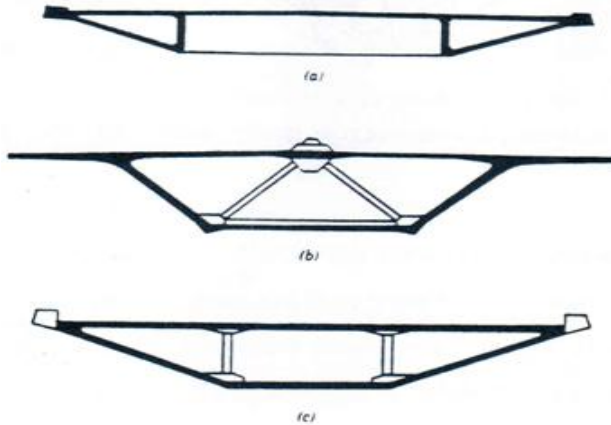
Üst yapı ve köprü tabliyesi için ekonomik etkilere ve yapım metodlarına bağlı olarak farklı seçenekler söz konusudur.

##### Çelik ana kiriş

Şekil 1.7’de çeşitli çapraz bölümlerin kullanıldığı, çelik ana kirişler gösterilmiştir.(a) ve (b)’de çok düzenli ana kiriş bağlantıları gösterilmiştir. Bunlar düşük burulma rijitliklerine sahip sistemlerdir. (c), (d) ve (e) daha alışılmış, burulma rijitliğine sahip, kutu kesitli ana kirişler gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Çelik ana kiriş tipleri



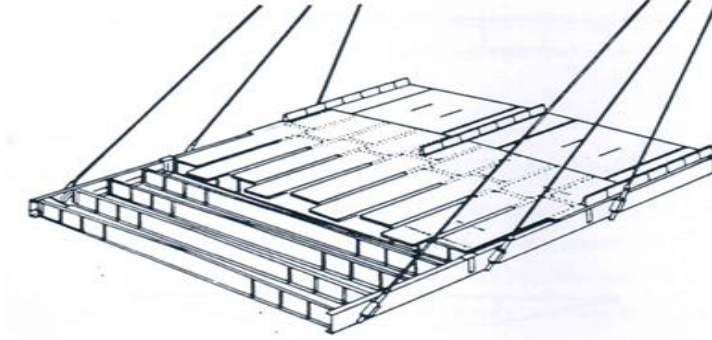
Şekil 1.8 Beton ana kiriş tipleri

### Beton ana kiriş

Beton tabliyeler kablo askılı köprülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tabliye parçaları ya prefabrik olabilir ya da yerinde döküm olabilir. Betonun kullanıldığı bölümler; ana kirişlerin bulunduğu kutu kesitler ve tabliyelerdir.(Şekil 1.8.)

### Kompozit ana kiriş

Yapı çeliği ve betonun bir arada kullanıldığı bölümlerdir. Bu bölümlerin en önemli avantajı; çelik parçaların inşasının rahatlığı ve zati ağırlığında ve maddi değerinde oldukça büyük bir azalma olmasıdır. Şekil 1.9'da Virjinya'daki James River Köprüsü buna bir örnektir.



Şekil 1.9 Kompozit üst yapı ana kirişinin James River Köprüsü'ndeki uygulaması

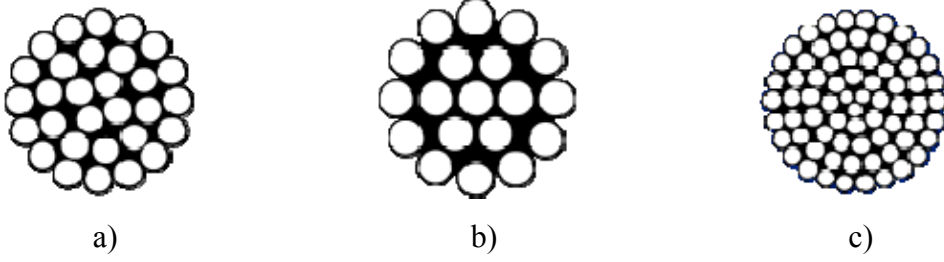
### **1.4.5 Kablolar**

Kablolu sistemlerdeki kablo terimi, esnek (fleksibl) bir çekme elemanını ifade eden genel anlamda bir terimdir. Kabloların yapımında kullanılan teller, sıcakta haddelenmiş yüksek karbonlu çelik çubukların soğukta çekilmesi suretiyle üretilirler. Korozyona karşı korunmalarını sağlamak için teller bir tabaka saf çinko ile kaplanarak galvanize edilirler.

Kablolu köprü uygulamalarında halen kablo olarak kullanılan başlıca elemanlar:

### Tel grupları

Bir merkez tel etrafında helisel olarak sarılan bir ya da daha çok tabakalı telden oluşur (Şekil 1.10)

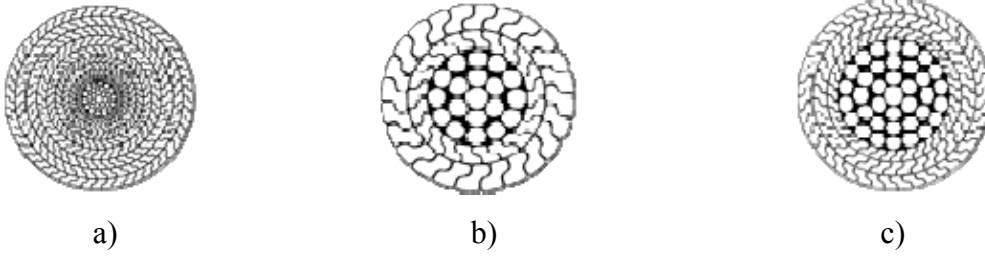


Şekil 1.10. Tel grupları

a)otuz çubuklu, b)on dokuz çubuklu, c)yetmiş bir çubuklu

### Çelik halatlar

Tel gruplarının bir çekirdek etrafında helisel olarak sarılmasıyla elde edilirler.

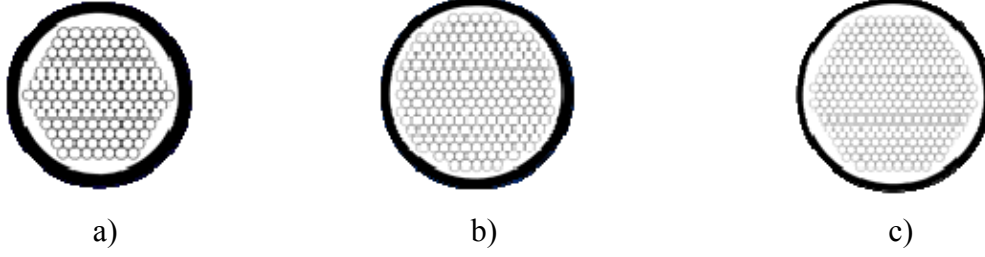


Şekil 1.11. Çelik halatlar

a)çok sıra sarmalı, b)iki sıra sarmalı, c)üç sıra sarmalı

### Paralel tel grupları

Tellerin helisel olarak sarılmayıp, paralel bir düzende bir araya gelmesiyle elde edilir.



Şekil 1.12. Paralel tel grupları

a)beşgen çift sarmalı, b)altıgen, c)beşgen tek sarmalı

### 1.5. Kablolü Köprülerin Yapım Yöntemleri

Kablolu köprülerin inşaatı için yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıdaki gibidir:

- 1- Kademeli İnşa Yöntemi
- 2- İttirme Yöntemi
- 3- Dengeli Konsol Yöntemi

Yapım tekniğine etki eden faktörler ise;

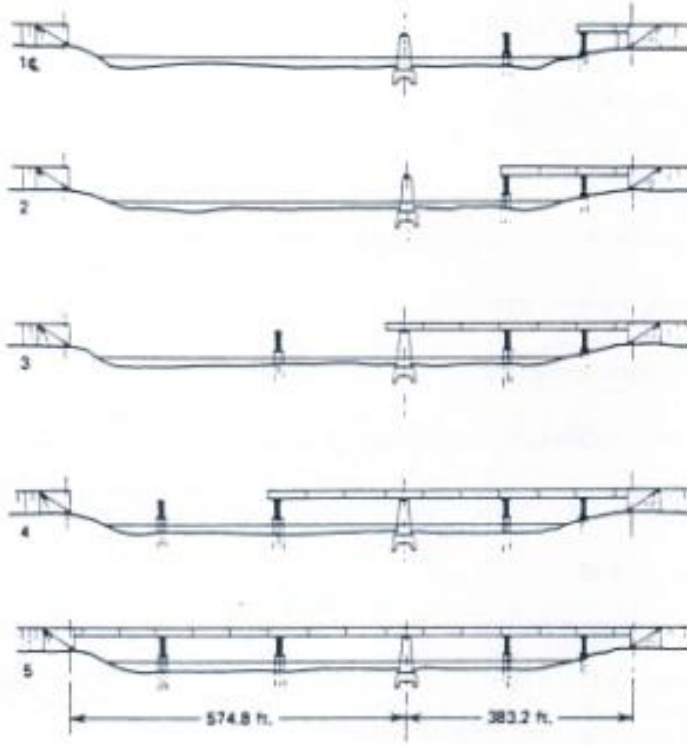
- 1- Projenin tahmini maliyeti.
- 2- Yapının geometrisi ve final gerilmeleridir.

#### 1.5.1. Kademeli inşa yöntemi

Kademeli inşa yöntemi ile montajda; köprünün altında yer alan alçak ve geçici ayaklar köprü trafiğine karışmayacak şekilde dizayn edilir ve kullanılır. Böylelikle yapının geometrisini kontrol altına almak daha kolay olur.

Kademeli inşa yöntemi için uygulanmış bir örnek:

Batı Almanya Maxau'da Rhine Köprüsü için yol üst yapısı montajı, ilk olarak kenar ayak üzerinde başlamıştır. Bu kısım köprünün mesneti görevini üstlenmiştir. Daha sonraki aşamada ise 2 adet geçici orta ayak kullanılmıştır. Bunlardan ilki toprağa basmaktadır, diğeri ise nehir içinde yer almaktadır. Nehrin ortasında ise kalıcı bir kule orta ayak yer almaktadır. Her biri yaklaşık olarak 20 m uzunluğunda ve 27,5 ton ağırlığındadır.



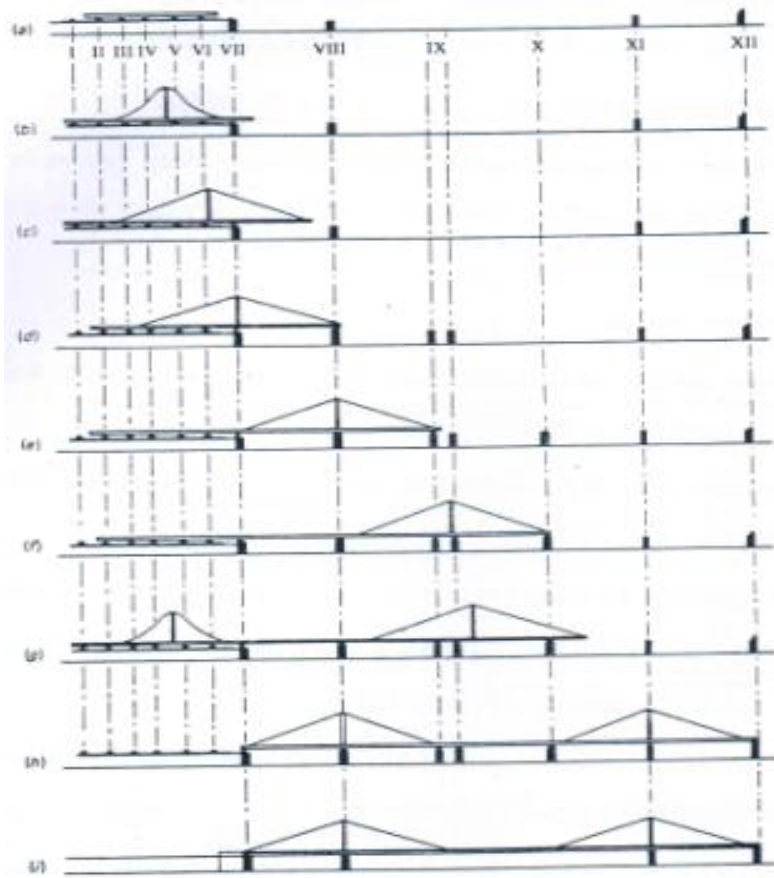
Şekil 1.13 Kademeli inşa yöntemi için uygulanma

### 1.5.2. İttirme yöntemi

Bu metodun kullanımı ise, köprü aşağısındaki trafiğe karışmaması dikkate alınarak yapılır. Bu yöntemde köprü tabliyesinin büyük bölümü silindirik iskele yardımıyla ittirilerek montaj ve inşa gerçekleştirilir. Tabliye her bir ayaktan ittirilerek merkeze veya bazı örneklerde olduğu gibi bir ayaktan diğer ayağa kadar tüm yol boyunca ittirilerek inşaat tamamlanır.

#### İttirme yöntemi için uygulanmış bir örnek:

Batı Almanya'daki Julicher Strasse Köprüsü, Duesseldorf'a geçişi sağlayan otoyolu üzerinde bulunduran birkaç yolun kesiştiği bir köprü örneğidir. Merkez açıklığı 100 m ve her bir açıklığı 32 m'dir.



Şekil 1.14 İttirme (Push Out) yöntemi için uygulanma

### 1.5.3. Dengeli konsol yöntemi

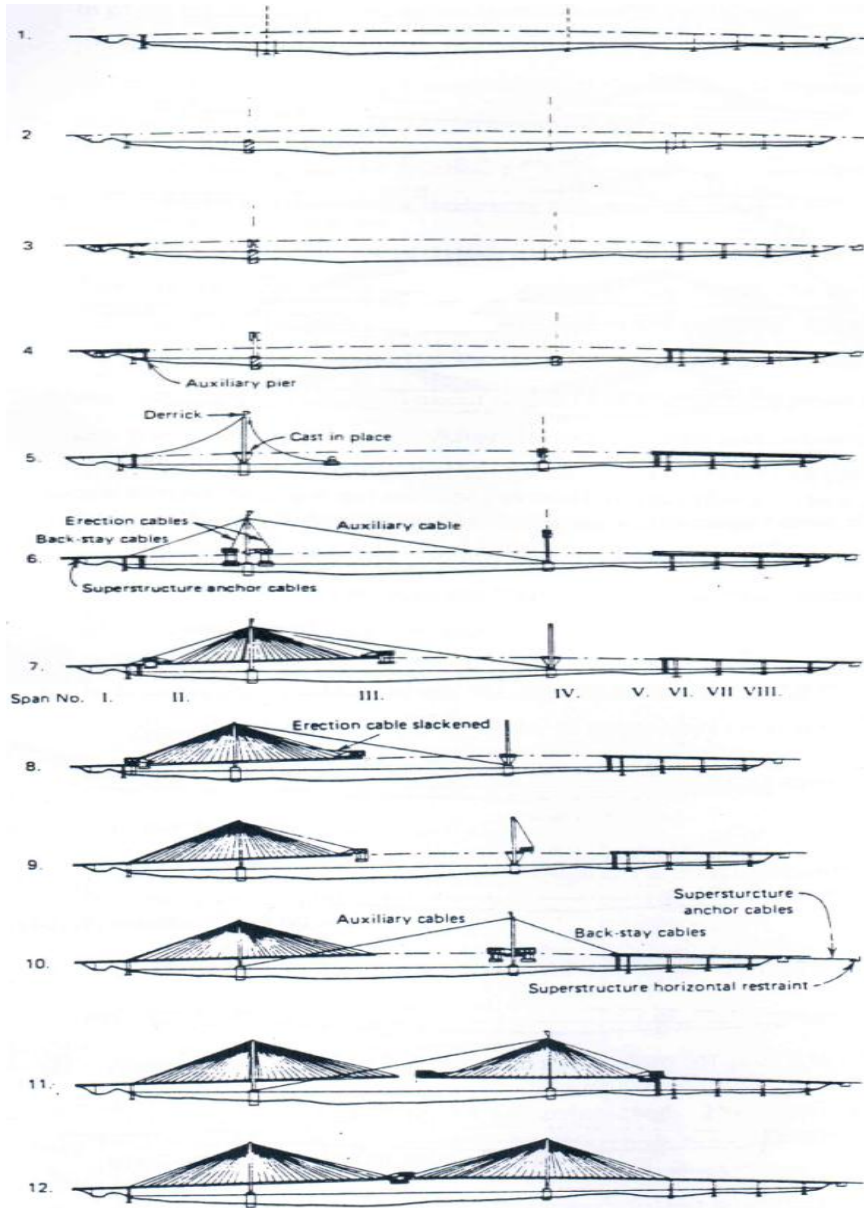
Prefabrik elemanların konsol dilimler halinde birbirlerine öngerilimle bağlanması yoluyla beton köprü yapımı uygulana gelen köprü inşa yöntemleri arasında en avantajlılarından biridir. Bu yöntemle, köprü tabliyesi küçük parçalar halinde prefabrike hazırlanmış elemanların şantiyede birleştirilmesi ile inşa edilir. Bu çeşit köprülerin yapımındaki artış, şantiye işçiliği düzeyinin yükselmesi, hızlanmış inşaat yapımı, daha iyi kalite kontrolü ve en uygun malzeme kullanımı ile gerçekleşebilir. Bununla birlikte, herhangi yeni bir teknik uygulamadaki kadar bu köprülerle ilgili olarak da dikkat isteyen bazı tasarım ve yapım problemleri vardır.

Bununla birlikte; dengeli konsol yöntemi, kablolu köprülerin inşaatında sıcaklık etkilerini önemseyerek oluşturulan bir yöntemdir. Bu yöntemin avantajları;

- Çok ekonomiktir.
- Köprü açıklığı fazla derin vadiler veya nehirlerde inşası zor ve pahalı olması ise dezavantajıdır.

Dengeli konsol yöntemi için uygulanmış bir örnek:

Washington'da yer alan Kolombiya Nehri üzerindeki Pasco-Kennewick Köprüsü dünyada bilinen ilk örnektir.



Şekil 1.15 Dengeli konsol yöntemi için uygulanma



## 1.6. Kablolu Köprülerde Matematik Modelleme

### 1.6.1. Geometrik olarak lineer olmayan analiz formülasyonu

Yapılara etki eden kuvvetler belli bir düzeyin altında kaldıkları sürece yapının lineer davranışını bozmazlar. Ancak, yük belirli bir düzeye çıkınca malzemenin elastisite modülü ile yapı elemanının mesnetleniş şekli ve atalet momentlerine bağlı olarak yapı lineer olmayan davranış gösterebilir. Bu lineer olmama durumu, yapı elemanlarının ve sonuç olarak yapının rijitlik matrisinin yük düzeyine bağlı olarak değişmesinden kaynaklanır. Yapının bilinen lineer rijitlik matrisine gelen katkıya geometrik rijitlik matrisi ve lineer rijitlik matrisiyle toplamına da sistem rijitlik matrisi denir. Bu tür lineer olmama durumunun hesaplara katılmasıyla yapılan analize ikinci mertebeye hesaba veya geometrik olarak lineer olmayan analiz denir (Aksoğan, 1986). Lineer olmayan analizin zorunlu olduğu durumlarda rijitlik matrisi her yük adımında yeniden oluşturulur.

Büyük yer değiştirme yapan yapılarda kuvvet denge denklemleri yapının şekil değiştirmiş hali üzerinde yazılır. Bunun anlamı;

$$P=K.v \quad (1.1)$$

şeklindeki lineer bağıntının artık geçerli olmadığıdır. Burada P, uygulanan kuvveti; K, sistem rijitliğini; v, yer değiştirmeyi göstermektedir (Eş.1.1).

Geometrideki değişimlerin etkilerini hesaba katmak amacıyla, her adımı yükteki artışa karşılık gelen bir dizi lineer işlemle lineer olmayan problem incelenerek v yerdeğiştirmeleri için çözümler elde edilebilir. Ancak, büyük sehimler nedeniyle, şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntıları lineer olmayan terimler içermektedir. Bu terimlerin hesaplanarak [K] rijitlik matrisine eklenmesi gerekmektedir [54].

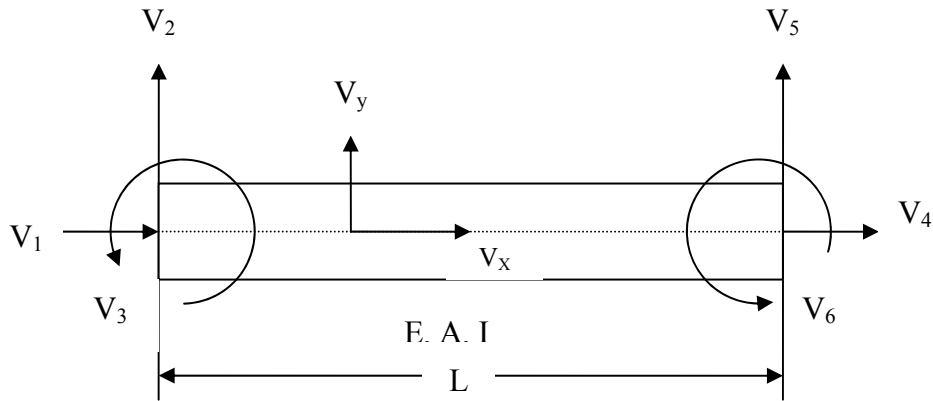
Şekil değiştirme-yerdeğiştirme bağıntılarındaki lineer olmayan terimler,  $[k]$  eleman rijitlik matrisinin;

$$[k]=[k_E]+[k_G] \quad (1.2)$$

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

$$[K]=[K_E]+[K_G] \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $[K]$  sistem rijitlik matrisini,  $[K_E]$  sistem rijitlik matrisinin elastik bileşenini,  $[K_G]$  sistem rijitlik matrisinin geometrik bileşenini göstermektedir. Aşağıda verilen kiriş eleman için elastik ve geometrik rijitlik matrisleri, (E.ş.1.4), (E.ş.1.5) denklemleri ile tanımlanmaktadır [54].



Şekil 1.16. Kiriş elemana ait serbestlik dereceleri

$$[k_E]= \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$[k_G]= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} \\ 0 & \frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{6F}{5L} & \frac{F}{10} & 0 & \frac{6F}{5L} & -\frac{F}{10} \\ 0 & \frac{F}{10} & -\frac{FL}{30} & 0 & -\frac{F}{10} & \frac{2FL}{15} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Burada  $F = \frac{EA}{L}(V_4 - V_1) \cong$  sabittir.

## 1.7. Kablolu Köprülerde Zamana Bağlı Analiz

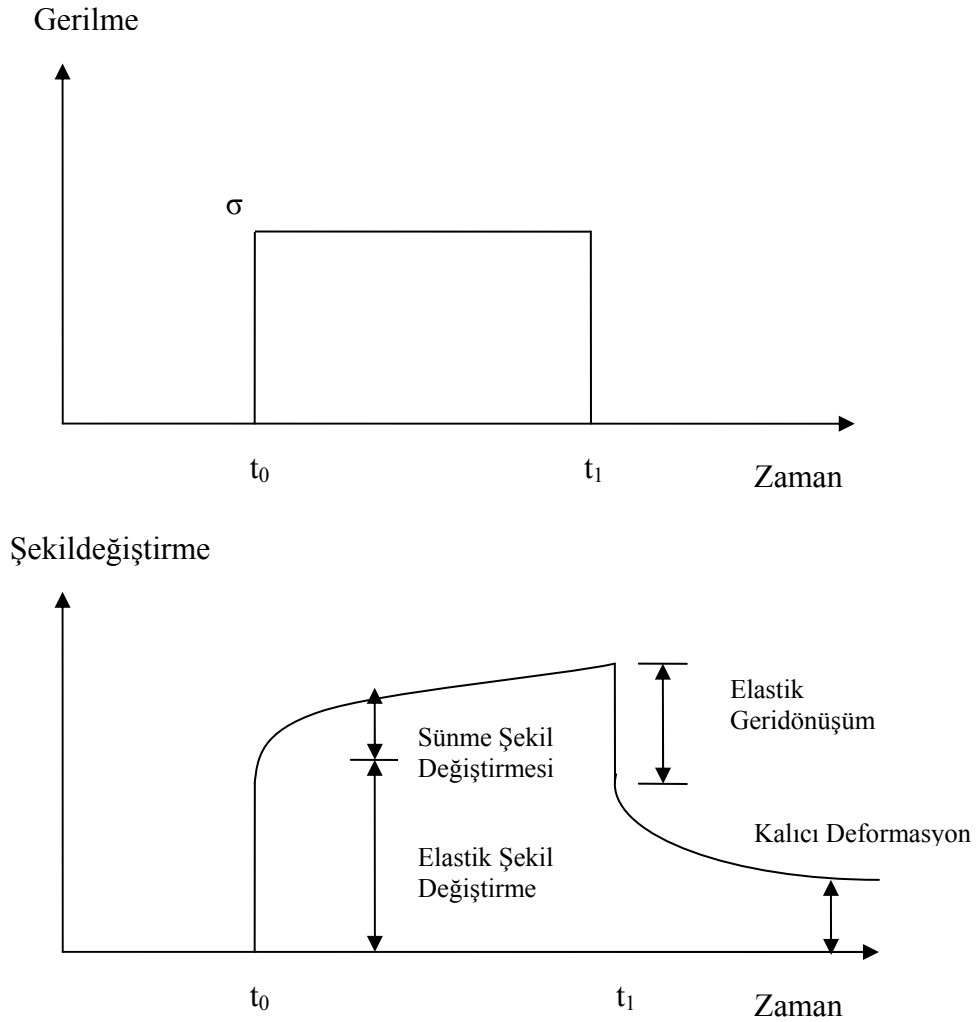
### 1.7.1. Zamana bağlı etkenler

#### Sünme

Betonda sünme sabit gerilme altında şekil değiştirmelerin zamanla artması olarak tanımlanmaktadır. Betonun yüklenmesi ile, ani olarak gelişen bir elastik

şekildeğiştirme ortaya çıkmaktadır. Yüklemenin sabit kalması durumunda, zamana bağlı olarak ek sünme şekildeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Böylelikle oluşan toplam sünme şekildeğiştirmesi ani olarak gelişen elastik şekildeğiştirmenin iki yılda üç katı mertebesinde olabilmektedir. Yükleminin kaldırılmasıyla eş zamanlı olarak şekil değıştirme geri kazanılmaktadır.

Bu durumu takiben başlangıçtaki sünme şekil değıştirmesinin ancak belli bir bölümünün geri kazanıldığı aşamalı bir evre gelmektedir (Şekil 1.17) [1].



Şekil 1.17. Sünme gerilme-şekildeğişim grafikleri

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

Betonda ortaya çıkan sünme aşağıdaki faktörlerden etkilenmektedir.

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

Matematiksel olarak, t anında etkiyen  $\sigma$  gerilmesinden dolayı t anındaki sünme şekildeğişirmesi  $\varepsilon^c$ ;

$$\varepsilon^c(t) = \varphi(t, \tau) \varepsilon_e \quad (1.6)$$

bağlantısıyla tanımlanmaktadır. Burada,  $\varphi(t, \tau)$  sünme katsayısı olup, sünme şekildeğişirmesinin ani olarak ortaya çıkan elastik şekildeğişirmeye oranıdır.

Sünme için LARSA 2000 programında da sünme katsayısı olarak CEB-FIP 78 tarafından önerilen;

$$\varphi(t, t_0) = \beta_a(t_0) + \varphi_d \beta_d(t - t_0) + \varphi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad (1.7)$$

Bağıntısı kullanılmaktadır. Burada;

$t$  : Gözlem zamanı.

$t_0$  : Yükleme altındaki betonun yaşı.

$\beta_a$  : Başlangıç tersinmez sünme şekil değişimi fonksiyonu.

$\beta_d$  : Zamanla gecikmiş elstisite fonksiyonu.

$\beta_f$  : Zamanla gecikmiş plastisite fonksiyonu.

$\varphi_d$  : Gecikmiş elstisite katsayısı (0,4).

$\varphi_f$  : Gecikmiş plastisite katsayısı.

Tüm bu kabuller ortam sıcaklığının 20°C olduğu durumlarda geçerlidir. Eğer ki farklı bir sıcaklık durumunda inşa yapılması yani ortalama sıcaklığın 20°C'den çok farklı bir değer olması durumunda zaman ortam sıcaklığına bağlı olarak aşağıdaki gibi düzeltilir.

$$\Delta t = \frac{\alpha}{30} \sum_0^m (T_m + 10) \Delta t_m \quad (1.8)$$

$\alpha$  : Çimento cinsine bağlı bir katsayı olup.

$\alpha = 1$  : Normal çimentolu beton için,

$\alpha = 2$  : Çabuk sertleşen çimentolu beton için,

$\alpha = 3$  : Çabuk sertleşen ve yüksek mukavemetli çimentolu beton için kullanılır.

$\beta_a(t_0)$  fonksiyonu;

$$\beta_a(t_0) = 0.8 \left( 1 - \frac{f_c'(t_0)}{f_c'(28)} \right) \quad (1.9)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.  $R_c(t_0)$  ve  $R_c(\infty)$  değerleri, betonun  $t_0$  ve  $t \rightarrow \infty$  anlarındaki basınç mukavemetidir. Buna göre;

$$\beta_a(t_0) = 0.95 t_0^{-0.3} - 0.1 \quad (1.10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Buradan;

$\varphi_f$ ; Gecikmiş plastisite katsayısı iki farklı katsayının çarpımı ile ifade edilebilir:

$$\varphi_f = \varphi_{f1} \varphi_{f2} \quad (1.11)$$

$\varphi_{f1}$ ; çevre neminin bir fonksiyonu olarak, 0,8(beton su altında ise) -3,0 (beton çok kuru bir havaya maruz ise) arasında değerler almaktadır.

$\varphi_{f2}$ ; elemanın kalınlığına ( $d_f$ ) bağlı olarak değişen bir fonksiyondur.

$$d_f = \lambda \frac{2A_c}{U_c} \text{ mm} \quad (1.12)$$

Burada;

$A_c$  : Betonarme elemanın kesit alanı.

$U_c$  : Betonarme elemanın kesit uzunluğu.

$\lambda$  : Nem faktörü olup 30 (beton su altında ise)-1,0(beton kuru bir havaya maruz ise) arasında değişmektedir.

$$\varphi_{f2} = 1,1089 + 0,8469e^{-0,027d_f} \quad (1.13)$$

$$\beta_d(t - t_0) = 0,28 + 0,5 \tan^{-1} \left[ 0,011(t - t_0)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (1.14)$$

Buna benzer olarak  $\beta_f$  fonksiyonu da;

$$\beta_f(t) = 1 - e^{-(A_f t)^{\beta_f}} \quad (1.15)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

$$A_f(t) = 0,078e^{-1,22 \log d_f} \quad (1.16)$$

$$B_f(t) = 0,528e^{-0,13 \log d_f} \quad (1.17)$$

### Rötre

Dış yüklerden ve ısıl etkilerden bağımsız olarak, zamana bağlı olarak beton hacminde oluşan değişim betonun rötresi olarak tanımlanmaktadır. Rötre betonun kurummasına bağlı olarak ortaya çıkan su kaybından kaynaklanan hacim değişimidir. Rötreye bağlı olarak ortaya çıkacak şekil değiştirmeler betondaki su çimento oranından önemli derecede etkilenmekte olup, büyük oranlar için ciddi şekilde artmaktadır. Rötre şekildeğiştirmeleri ayrıca betonda kullanılan agrega türüne, bağıl neme ve beton elemanın boyutuna bağlı değişmektedir.

Rötre durumunda betonarme elemanda  $(t - \tau)$  zaman aralığında meydana gelen şekildeğiştirme değeri;

CFB-FIB 78'e göre;

$$\varepsilon_s(t, \tau) = \varepsilon_{s0} [\beta_s(t) - \beta_s(\tau)] \quad (1.18)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Burada;

t : Gözlem anındaki betonun yaşı,

$\tau$  : Zaman aralığının başlangıcındaki betonun yaşı,

$$\varepsilon_{s0} = \varepsilon_{s1} \varepsilon_{s2} \quad (1.19)$$

$\varepsilon_{s1}$  : Çevresel neme bağlı şekildeğiştirme değeri.

$\varepsilon_{s2}$  : Hayali derinliğe bağlı şekildeğiştirme değeri.

$\beta_s$  : Hayali derinliğin ve zamanın fonksiyonudur.

Yukarıdaki fonksiyonlar için Krsitek tarafından verilen analitik ifadeler aşağıdaki gibidir [2].

$$\varepsilon_{s2} = 0,7001 + 0,6292e^{-0,0046d_f} \quad (1.20)$$

$$\beta_s(t) = 1 - e^{-(A_s t) B_s} \quad (1.21)$$

$$A_s = 3,16e^{-2,98 \log d_f} \quad (1.22)$$

$$B_s = 0,18e^{0,49 \log d_f} \quad (1.23)$$

### Gevşeme

Öngermeli tendonlar ve kablolardaki çeliklerde ortaya çıkan gevşemenin hesabı için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$\frac{f_s}{f_{si}} = 1 - \frac{\log t}{c} \left( \frac{f_s}{f_{sy}} - 0,55 \right) \quad (1.24)$$

Burada;

$f_s$  : t anındaki çelikteki gerilme.

$f_{si}$  : İlk çelik gerilme değeri.

$f_{sy}$  : 0,001 sapma ile akma gerilmesi değeri.

$t$  : Gerilme verildikten sonraki saat cinsinden zaman değeri.

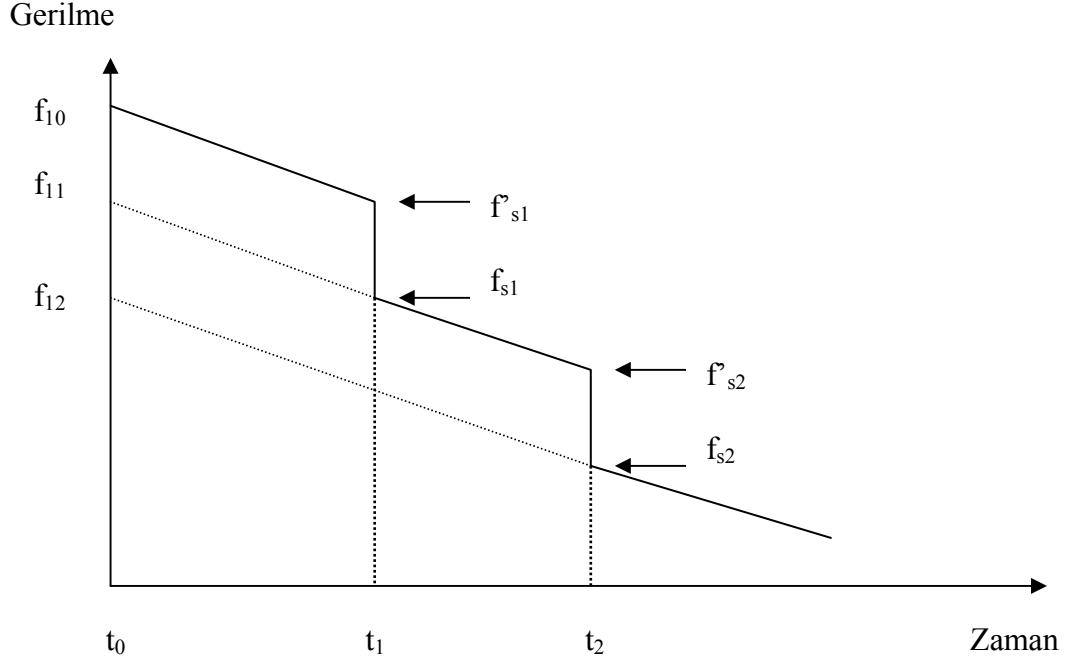
$c$  : Sabit.

Bu denklem sadece dikkate alınan zaman aralığında şekildeğiştirmenin sabit olması durumunda geçerlidir.



$\frac{f_s}{f_{sy}}$  değeri 0,55'den küçük olmamalıdır. Gevşeme sonucunda hiçbir kayıp oluşmaz

ise  $f_{si} = 0,55 \cdot f_{sy}$  'dir [2].



Şekil 1.18. Tendon gerilme-gevşeme grafiği

### Betonun yaşlanması

Beton bir elemanın,  $t_{n-1}$ 'den  $t_n$ 'e kadar olan zaman aralığında sabit bir gerilme altında yaşlanmaya bağlı şekil değişim artışı " $\delta\epsilon_a$ " aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$\delta\epsilon_a = \sigma \left[ \frac{1}{E(t_{n-1})} - \frac{1}{E(t_n)} \right] \quad (1.25)$$

Betonun yaşlanmasını en iyi Şekil 1.19'da anlatılmaktadır.  $t_1$ 'den  $t_2$ 'ye kadar olan zaman aralığında sabit gerilme altındaki beton bir eleman dikkate alınır, betonun elastisite modülü zamana bağlı olarak değişecektir.

$E_1$ : Beton elemanın  $t_1$  anındaki elastisite modülü.

$E_2$ : Beton elemanın  $t_2$  anındaki elastisite modülü.

$\varepsilon$  : Toplam şekildeğiştirme değeri olması durumunda, gerilme şekildeğiştirme ilişkisi kullanılarak  $t_2$  anındaki beton gerilme değeri;

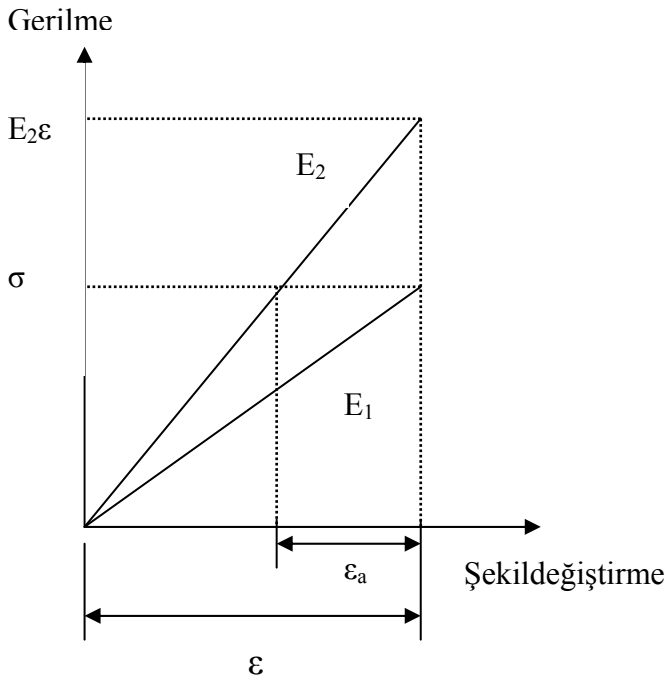
$$\sigma = E_2 \varepsilon \quad (1.26)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir.

Ancak, burada gerilme değeri yukarıdaki denklemde ifade edildiği gibi artmamakta ve tersine sabit kalmaktadır. Dolayısıyla bu denklemin aşağıdaki gibi düzeltilmesi gerekmektedir.

$$\sigma = E_2 (\varepsilon - \varepsilon^a) \quad (1.27)$$

Betondaki yaşlanma hayali bir şekildeğiştirme olup, betondaki herhangi bir fiziksel deformasyona karşılık gelmemektedir. Bu bakımdan betonun yaşlanması, elastisite modülündeki değişime imkan tanıyan gerilme şekil değıştirme bağıntısındaki toplam şekildeğiştirmedeki düzeltme ile dikkate alınmaktadır [2].



Şekil 1.19. Betonun yaşlanmaya bağlı şekildeğiştirmesi

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

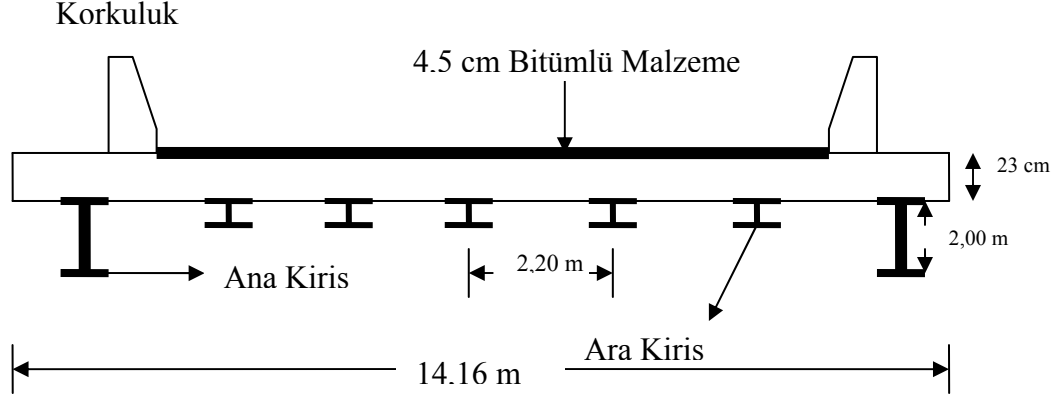
### 2.1. Quincy Bayview Köprüsü Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada zamana bağlı etkiler için konsol dilimler halinde inşa edilen kablolu köprülerin lineer olmayan analizinin yapılması amacıyla örnek sistem olarak ABD’de inşa edilmiş Quincy Bayview Köprüsü seçilmiştir. Üç açıklıklı olan köprünün merkez açıklığı 274 m ve kenar açıklıklar 134’er m olup toplam açıklığı 542 m’dir. Quincy Bayview Köprüsü, Mississippi nehri üzerinde, Quincy eyaletinde Illions bölgesinde yer almaktadır. İnşasına 1983 yılında başlanmış ve 1987 yılında tamamlanmıştır. Köprünün doğu ve batı yer alan 2 adet kulesi vardır. Bu kulelerin yükseklikleri 70’er m’dir. Köprüde doğu kulesinde 28 ve batı kulesinde simetrik olarak 28 adet çelik kablo bulunmaktadır.

Köprü tabliyesi betonarme olup 23 cm kalınlığındadır. Tabliyenin üst flanjinin orta noktasında köprü yolboyunca devam edecek şekilde ardgerme telleri (tendonlar) kullanılmıştır. 19 adet telden oluşan ve her bir telinin alanı  $0,00096 \text{ m}^2$  olan ve ilk germe kuvveti olarak 1160 ton olan çelikler kullanılmıştır. Tabliyeyi oluşturan çelik ana kiriş “I” kesitlidir ve köprünün bir ucundan diğer ucuna kadar sürekli olarak uzanmaktadır. Tabliyede ayrıca 2,20 m aralıklarla 5 adet çelik “I” kesitli ara kirişler kullanılmaktadır. Kablolu köprülerde en çok tercih edilen sistem, Quincy Bayview Köprüsünde olduğu gibi ana kirişin bir uçtan diğer uca kadar sürekli olarak uzandığı sistemlerdir.

Köprü sistemine ait kule mesnetleri ankastre olarak alınırken, kenar mesnetlerde sadece düşey eksen (z) etrafındaki ve enine eksen (y) etrafındaki dönme serbestlikleri mevcuttur. Köprü eksen (x) etrafındaki dönme ile üç eksen doğrultusundaki ötelenmeler tutulmuştur. Dikkate alınan bu sınır koşulları çalışmada dikkate alınacak analizler için uygundur. Ancak, deprem hareketi gibi büyük kuvvetlerin etkimesi durumunda uç mesnetlerde ve doğudaki tabliye-ayak birleşim noktasında köprü eksen boyunca ötelenmenin serbest bırakılması köprü tabliyesinin kendisinden beklenen fonksiyonu doğru bir şekilde yapabilmesi için daha uygun olacaktır.

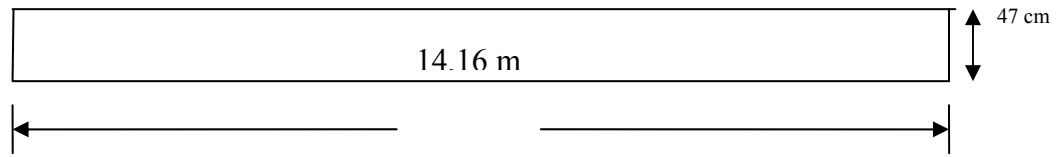
## 2.2. Quincy Bayview Köprüsünün Analitik Modeli



Şekil 2.1. Quincy Bayview Köprüsü'nün tabliye kesiti

Quincy Bayview Kablolu Köprüsüne ait ana ve ara kiriş çelik malzemedendir, kuleler, tabliyeler ve kule ayakları betonarme olarak inşa edilmiştir. Bu çalışmada tabliye için 3 ayrı matematik model dikkate alınmıştır.

1. Modelde (kompozit malzemedendir oluşan tabliyede) ana kirişler, tabliye ve ara kirişler eşdeğer bir beton çubuk eleman ile modellenmiştir (Şekil 2.2). Tabliyenin çubuk elemanlar ile temsil edildiği bu modelde, kabloları tabliyeye bağlamak için rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır ve böylece tabliyenin rijit bir şekilde kulelere bağlantısı sağlanmıştır.

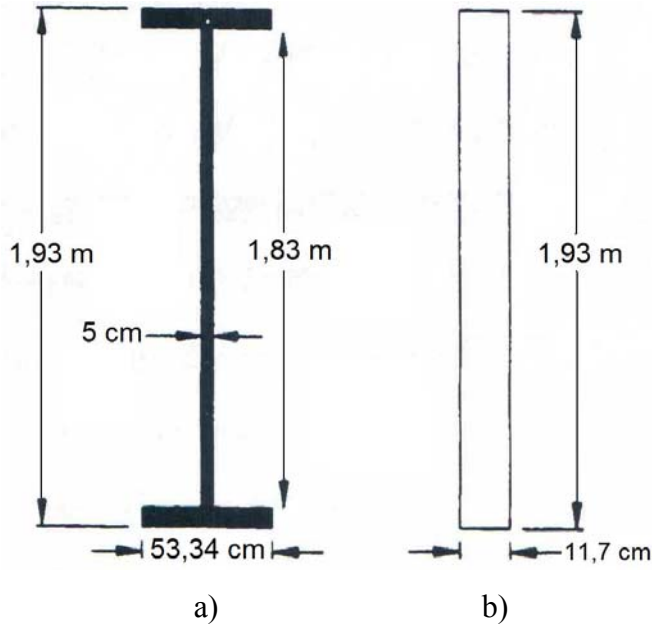


Şekil 2.2. 1. Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün eşdeğer tabliye kesiti

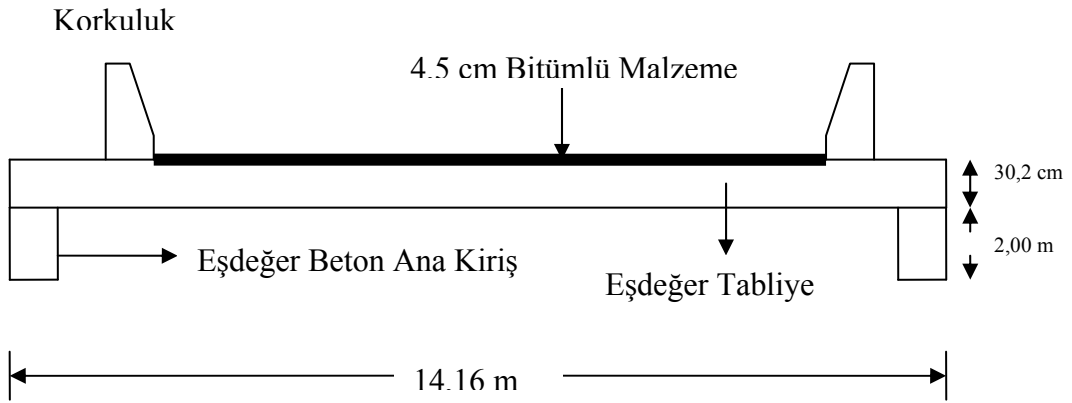
2. Modelde ise rijitlik bağlantılarının yerine plak elemanları kullanılarak rijitlik sağlanmıştır. Plak elemanlar rijit diyafram şeklinde davranış göstereceklerinden, rijit bağlantı elemanlarına gerek kalmamıştır.

Tabliyenin düzlem elemanı ile tanımlanması sayesinde, ana kirişler tabliye kenarlarında boydan boya tanımlanabilmiştir. Ana kirişler Şekil 2.3'de görüldüğü

gibi eşdeğer beton eleman ile tanımlanırken, tabliye ve ara kirişler yine daha önceki gibi eşdeğer beton eleman ile modellenmiştir.



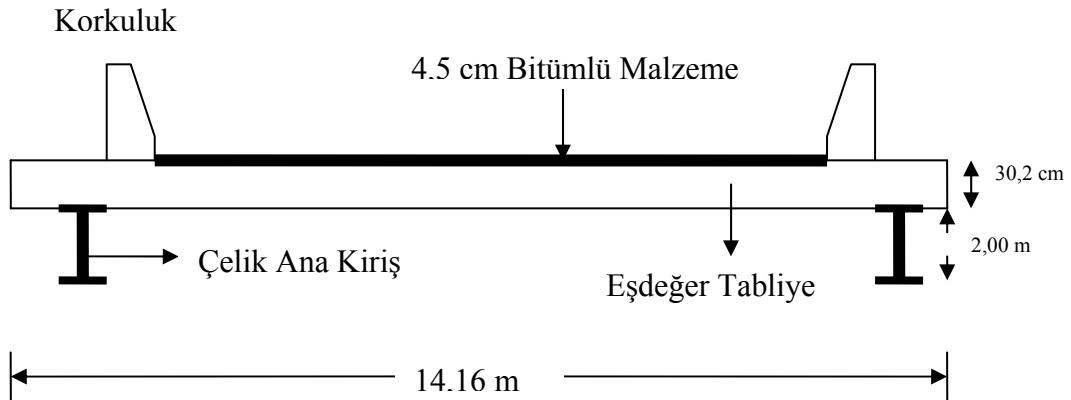
Şekil 2.3. Ana kiriş  
a) orijinal kesiti, b) eşdeğer kesiti



Şekil 2.4. 2.Model için köprünün tabliye kesiti

3.Modelde ise 2.modelden farklı olarak ana kirişler çelik "I" kesitli olarak modellenmiştir (Şekil 2.5).

Ayrıca her üç modelde de kulelerden tabliyeye uzanan kablolar ile tabliyede mevcut olan tendonlar çelik malzeme ile modellenmiştir.



Şekil 2.5. 3.Model için köprünün tabliye kesiti

Quincy Bayview Köprüsü'ne ait kabloların kesit özellikleri Çizelge 2.1'de verilirken, 1.Modele, 2.Modele ve 3.Modele ait kesit özellikleri sırasıyla Çizelge 2.2, Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait kabloların kesit özellikleri

ELEMAN NO	KESİT ADI	MALZEME	KESİT ALANI (m <sup>2</sup> )	ELASTİSİTE MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (ton/m <sup>3</sup> )
125,127,149,151,173,175,177,179	KABLO 1	CELİK	0,009	21100000	7,85
126,128,129,131,145,147,150,152,165,167,169,171,174,176,178,180	KABLO 2	CELİK	0,007	21100000	7,85
130,132,146,148,166,168,170,172	KABLO 3	CELİK	0,005	21100000	7,85
133 – 144 ,153 – 164	KABLO 4	CELİK	0,0035	21100000	7,85

Çizelge 2.2. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri  
(1.Model)

ELEMAN NO	KESİT ADI	MALZEME	ELASTİSİTE MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	POISSON ORANI	KESME MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (ton/m <sup>3</sup> )	KESİT ALANI (m <sup>2</sup> )	Izz (m <sup>4</sup> )	Iyy (m <sup>4</sup> )
1-29	Tabliye	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	6	148,63	2,49
30-35, 63-68	KULE K-1	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	17,88	129,5	16,34
36,37,69, 70	KULE K-2	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	8,77	3,53	15,26
38-53, 71-85 ,210	KULE K-3	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	7,06	3,4	13,98
54-56, 60-62, 86-91 97-124, 181- 218	rijit eleman	rijit eleman	2100000000	0,02	1029411765	0	60	129,5	163,4
57,58,59, 92, 93,94	Kule Üst Yapısı	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	6,36	13,33	7,34
95,96	Kule Alt Yapısı	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	7,24	13,95	8,2

Çizelge 2.3. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri  
(2.Model)

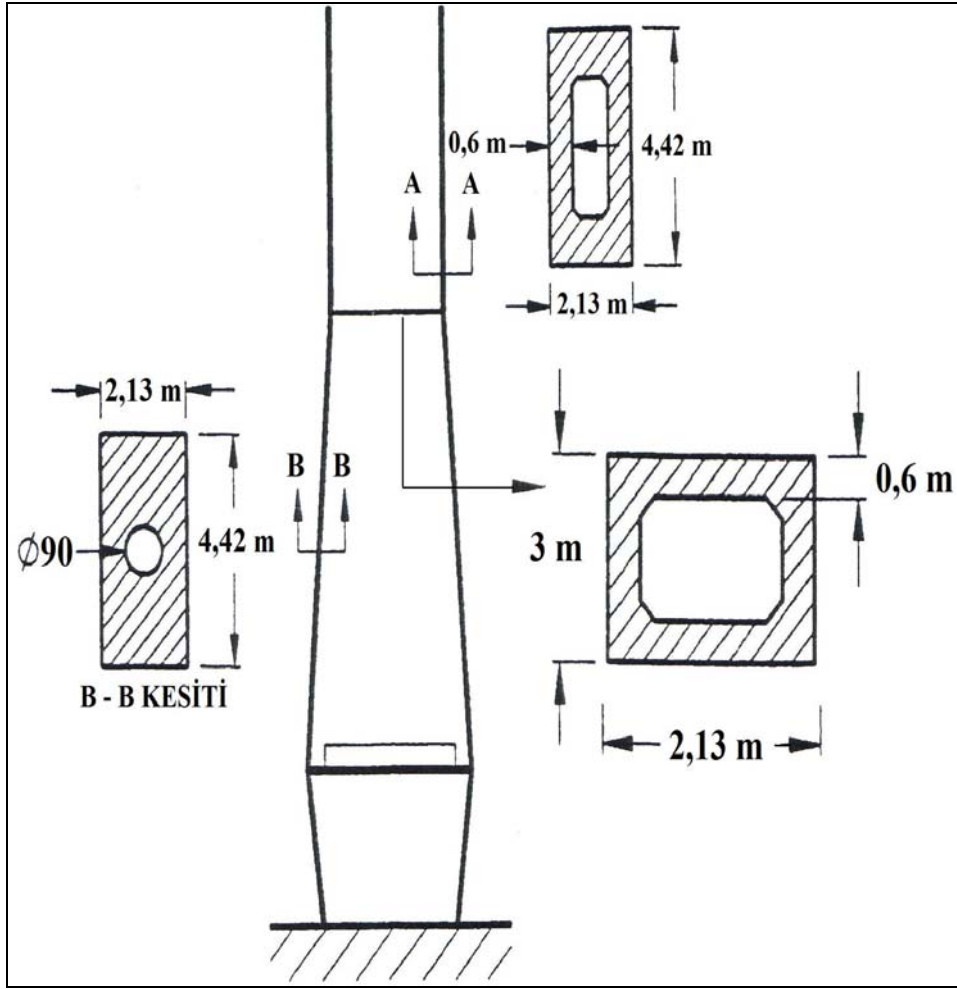
ELEMAN NO	KESİT ADI	MALZEME	ELASTİSİTE MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	POISSON ORANI	KESME MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (ton/m <sup>3</sup> )	KESİT ALANI (m <sup>2</sup> )	Izz (m <sup>4</sup> )	Iyy (m <sup>4</sup> )
1-29	Tabliye	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	4,0153	61,84	0,50
30 - 35 , 63 - 68	KULE K-1	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	17,88	129,5	16,34
36 ,37,69 ,70	KULE K-2	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	8,77	3,53	15,26
38 -53 , 71 - 85 ,210	KULE K-3	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	7,06	3,4	13,98
57,58,59,92, 93,94	Kule Üst Yapısı	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	6,36	13,33	7,34
95,96	Kule Alt Yapısı	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	7,24	13,95	8,2
219 - 222	Ana Kiriş	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	1,9759	44,65	0,65

Çizelge 2.4. Quincy Bayview Köprüsü'ne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri  
(3.Model)

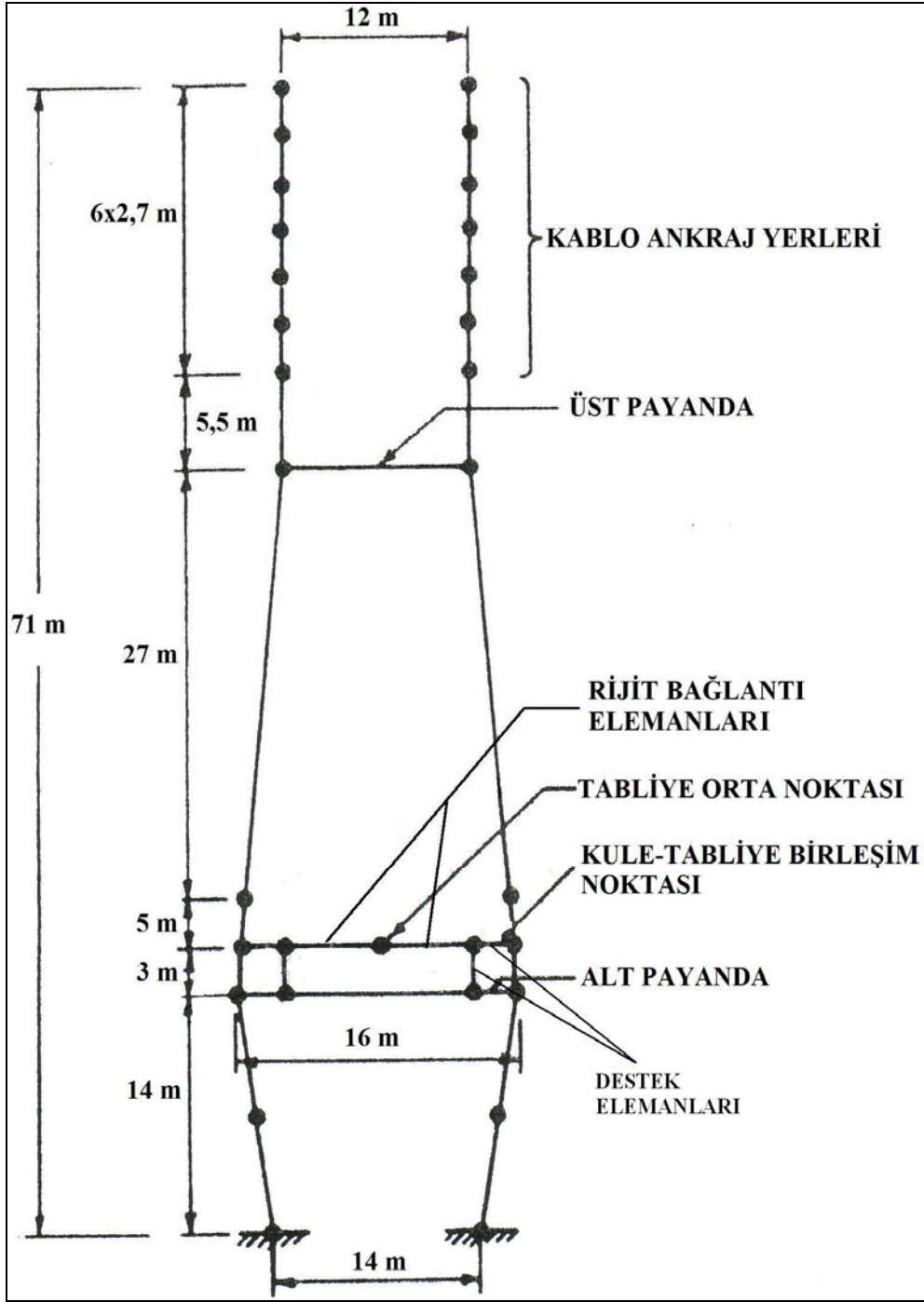
ELM. NO	KESİT ADI	MLZ.	E. MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	POISSON ORANI	KESME MODULÜ (ton/m <sup>2</sup> )	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (ton/m <sup>3</sup> )	KESİT ALANI (m <sup>2</sup> )	Izz (m4)	Iyy (m4)
1-29	Tabliye	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	4,0153	61,84	0,50
30 – 35 ,63 – 68	KULE K-1	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	17,88	129,5	16,34
36 ,37 ,69 ,70	KULE K-2	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	8,77	3,53	15,26
38 -53 71 – 85 210	KULE K-3	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	7,06	3,4	13,98
57,58,59, 92,93,94	Kule Üst Yapısı	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	6,36	13,33	7,34
95, 96	Kule Alt Yapısı	BETON	3140000	0,25	1256000	1,974	7,24	13,95	8,2
219 – 222	Ana Kiriş	CELİK	21100000	0,3	8115384,62	7,85	1,9759	44,65	0,65

Kablolu köprü sistemine ait kuleler çubuk elemanlarla modellenmiştir (Şekil 2.6). Model 1 için oluşturulan kule sonlu eleman modeli Şekil 2.7’de verilirken, Model 2 ve Model 3 için oluşturulan sonlu eleman modelleri Şekil 2.8’de verilmektedir.

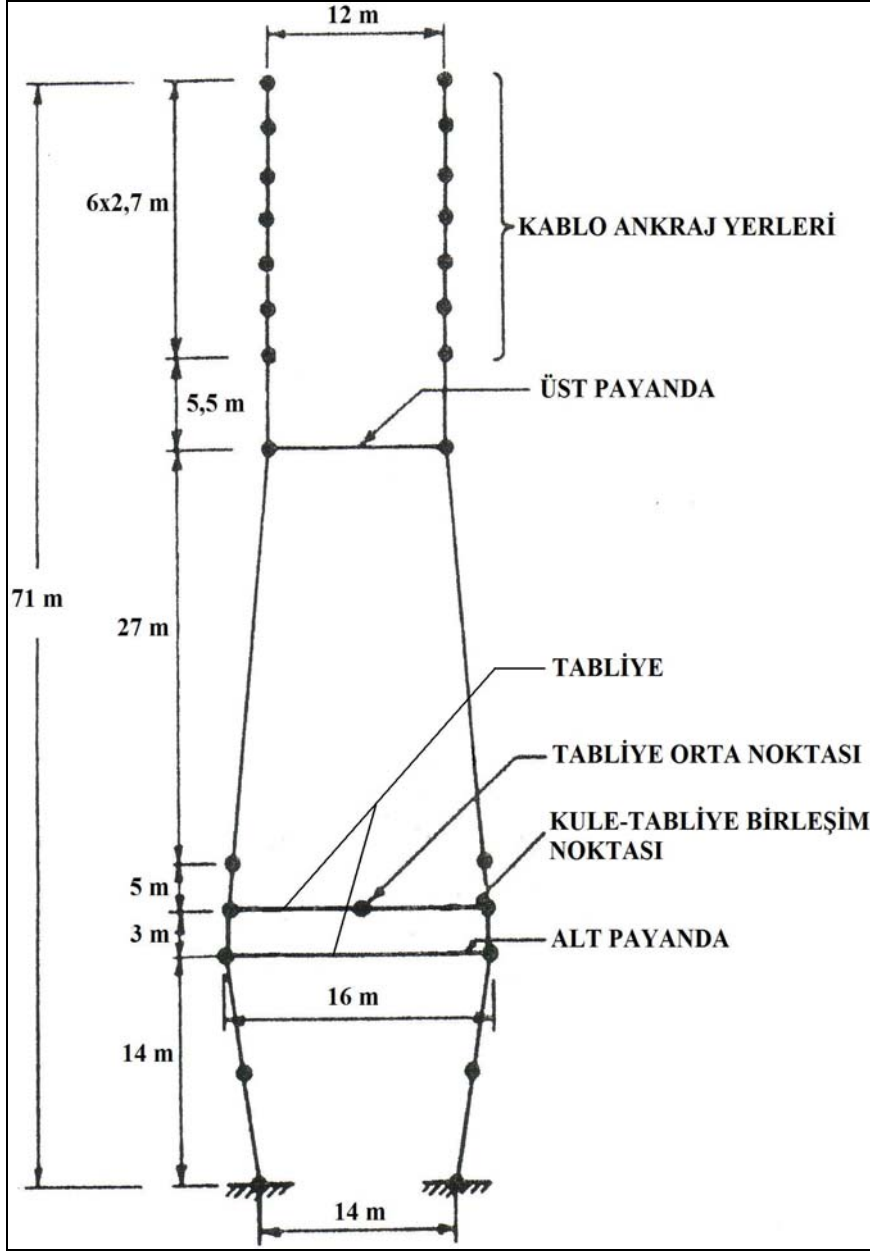




Şekil 2.6. Kablolı sistemin kulelerinin çubuk elemanlarla modellenmesi



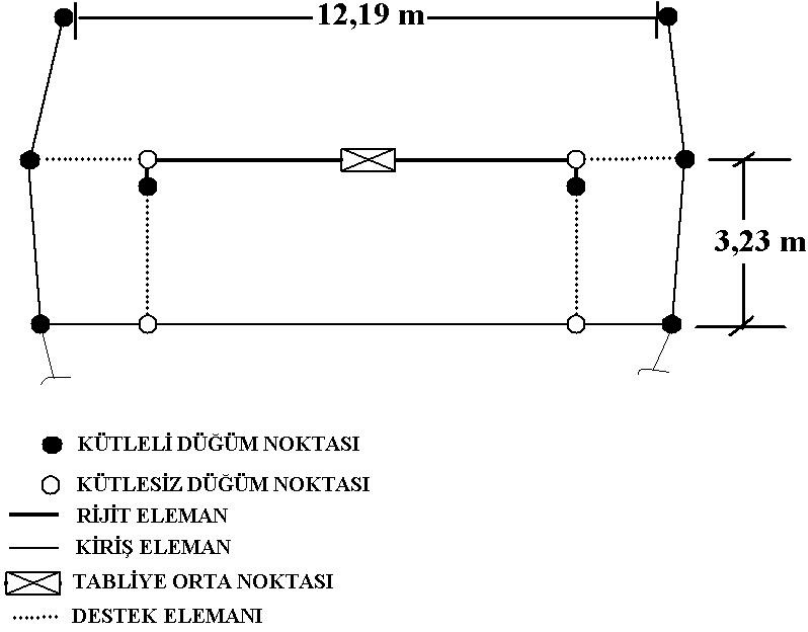
Şekil 2.7. Quincy Bayview Köprüsü'nün kulelerinin genel görüntüsü (Model 1)



Şekil 2.8. Quincy Bayview Köprüsü'nün kulelerinin genel görüntüsü  
(Model 2 – Model 3)

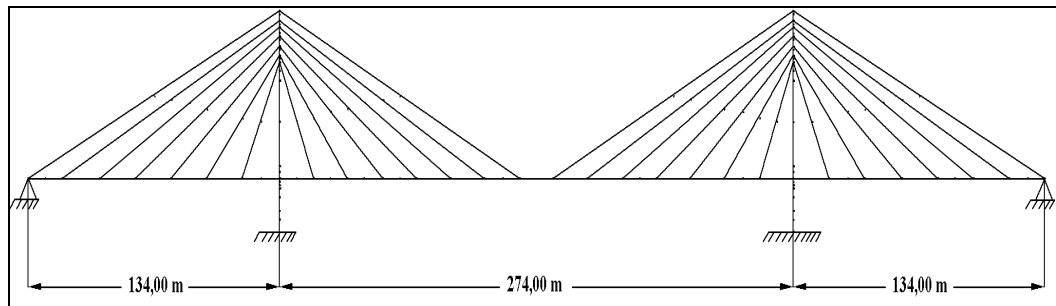
Zamana bağlı çevresel etkiler gibi düşük genlikli dinamik tepkilere neden olacak analizler için, tabliye ve kule arasında rölatif ötelenme hareketlerinin olmayacağı düşünülmüştür. Bu bakımdan tabliye-kule birleşiminde sadece enine oluşan ( $y$ ) etrafındaki dönmenin var olacağı kabul edilmiştir. Kule-tabliye birleşimi 4 adet destek linki kullanılarak modellenmiştir. Linklerin ikisi tabliyeyi alt payandaya

bağlayan düşey eksenli elemanlar olup, diğer ikisi de tabliyeyi kulelere bağlayan elemanlardır [48].

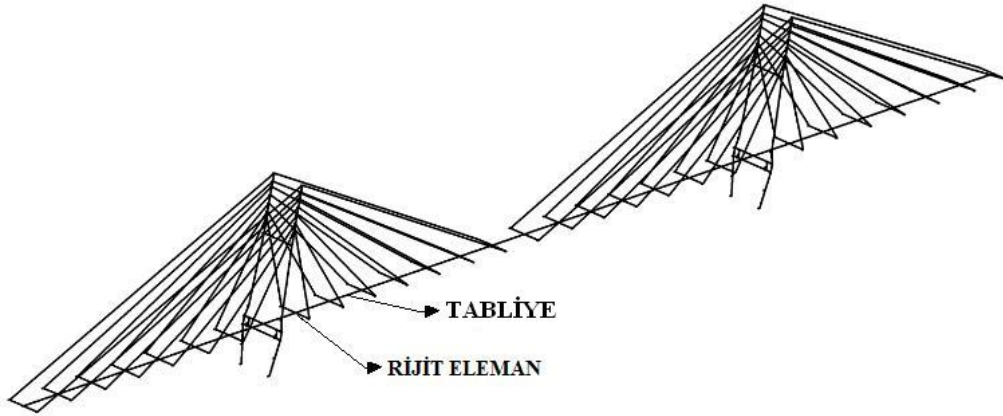


Şekil 2.9. Taşıyıcı Elemanların kule-tabliye birleşiminde gösterilmesi

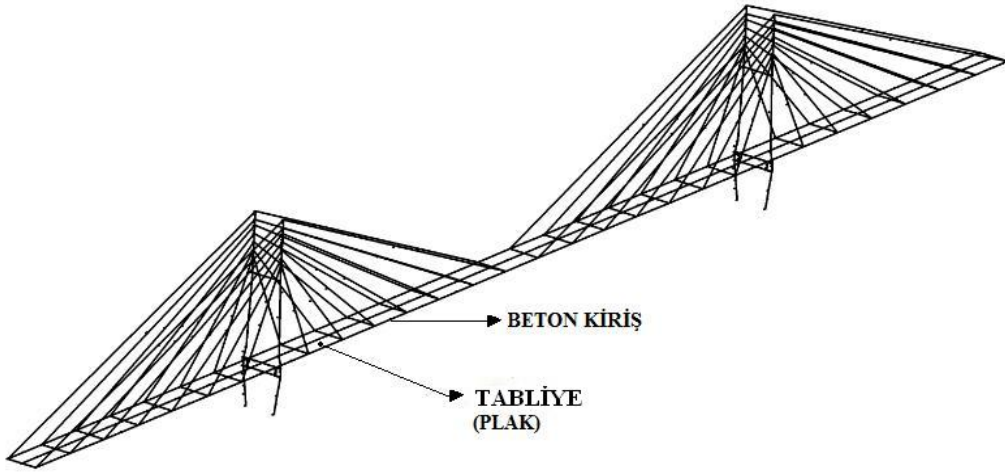
Quincy Bayview köprüsünün iki boyutlu modeli Şekil 2.10'da verilirken, Model 1, Model 2 ve Model 3'e ait üç boyutlu modeller Şekil 2.11-2.13'de verilmektedir.



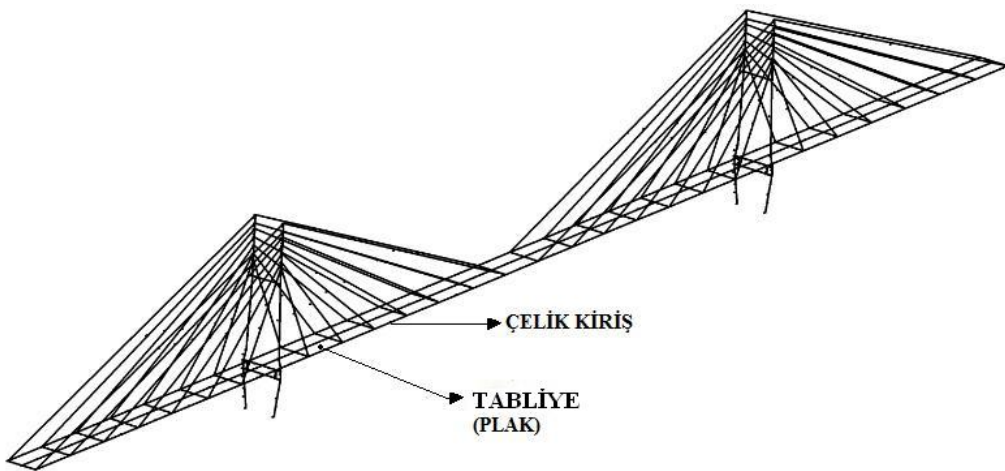
Şekil 2.10. Quincy Bayview Köprüsü'nün X-Z görüntüsü



Şekil 2.11. 1. Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün 3 boyutlu modeli



Şekil 2.12. 2. Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün 3 boyutlu modeli



Şekil 2.13. 3. Model için Quincy Bayview Köprüsü'nün 3 boyutlu modeli

Quincy Bayview Köprüsü'nün konsol dilimler halinde yapım analizi (construction stayed analysis) 3-D olarak seçilen matematik model esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Her biri konsol eleman olarak inşa edilen köprünün dilimleri kendi ağırlıkları ve çevresel etkenler için analiz edilmiştir [44].

Sonlu eleman metoduyla oluşturulan ilk model LARSA 2000 adlı programda 154 nokta ve 222 tane çubuk eleman ile modellenmiştir [53]. Birinci modelde; tabliye, ara kiriş ve ana kirişlerden oluşan eşdeğer bir çubuk sistem kullanılmıştır. Rijit bağlantı elemanları, köprü yol boyunca kulelerden tabliyeye uzanan kablolarla bağlantıyı sağlamıştır (Şekil 2.11).

İkinci model ise ilk modelden farklı olarak rijit bağlantı elemanları yerine, plak elemanlar ile tanımlanmış ve ana kirişler beton ve ara kirişler ile tabliye eşdeğer beton olarak modellenmiştir. Kablolar 2. Model'de tabliyelerin düğüm noktalarından kulelere bağlanarak modellenmiştir. Ana kirişler ise tabliyenin her iki kenarında yol boyunca devam edecek şekilde düğüm noktaları arasına yerleştirilmiştir (Şekil 2.12). Üçüncü modelde ise ikinci modelden farklı olarak ana kirişler çelik olarak modellenmiştir (Şekil 2.13).

Bu çalışmada Quincy Bayview Kablolu Köprüsünün konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda, betondaki sünme, rötne ve yaşlanma ile çelik malzemedeki gevşeme etkileri için lineer olmayan analizi üzerinde durulmaktadır.

Bilindiği gibi bazı malzemelerde düşük sıcaklıklarda ve küçük yükler altında dahi malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramı zamana bağlıdır. Plastisite teorisinde dahi malzemelerin davranışları incelenirken, zaman etkisi genellikle dikkate alınmamaktadır. Oysa bazı malzemelerde zamanın etkisi ihmal edilemeyecek derecede önemli olabilmektedir. Bu duruma örnek olarak betondaki sünme, rötne ve yaşlanma ile çelikteki gevşeme etkileri verilebilir. Betondaki sünme sabit gerilme altında şekil değiştirmelerin zamanla artması olarak tanımlanırken, çelikteki gevşeme şekil değiştirmeler sabit iken gerilmelerin zamanla azalması olarak tanımlanmaktadır. Bunun yanında betonda görülen rötne, beton elemanların

hacimlerinin zamanla azalması olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada tabliye ve kulelerde kullanılan beton malzeme için sünme ve rötire etkileri dikkate alınırken, kablolar ve tabliyedeki tendonlar ile ana kirişlerdeki çelik malzeme için gevşeme etkileri dikkate alınmaktadır.

Bu etkilere ek olarak beton dayanımının ilk günden 28 güne kadar önemli bir değişim göstermesi nedeniyle, bu dayanım değişiminin beton elastisite modülü üzerindeki etkisi de çalışmada yaşlanma ile dikkate alınmaktadır.

Betondaki sünme şekildeğiştirmesi sadece zaman bağlı olmayıp, rutubet, kür koşulları ve betonun yaşı da farklı oranlarda etkili olabilmektedir.

Betondaki hacim azalması zamanla beton birleşimindeki suyun buharlaşması ile gerçekleşmektedir. Betondaki kuruma ise rutubete, çevre sıcaklığına ve beton elemanın şekline ve boyutuna bağlıdır.

Öngerme kuvvetinde önemli bir azalmaya neden olması nedeniyle, çelik elemanda ortaya çıkacak gevşeme etkilerinin proje aşamasında dikkate alınması oldukça önemlidir. Gevşemenin mertebesi çelik türüne ve miktarına bağlı olmakla birlikte, zaman ve ilk germe kuvveti daha etkin parametrelerdir.

Quincy Bayview Köprüsünün lineer olmayan analizi, dengeli konsol yöntemiyle (konsol dilimler halinde) inşa edilmesi durumu için LARSA 2000 sonlu eleman programı ile gerçekleştirilecektir. Köprünün dilimler halinde inşa edilmesi durumunda, söz konusu program ile köprünün inşa aşamasının gelişimini gösteren adımları içeren bir dizi inşa adımının analizi gerçekleştirilmektedir. Dilimler halinde inşa durumunu içeren analiz, her adımda kullanıcı tarafından belirlenen yapım işlerini otomatik olarak uygulayarak konumunu oluşturan (retain) lineer olmayan statik bir analiz çeşididir. Oluşturulan yapım adımlarının her birinde yapıda zamanla çevresel etkenlerden oluşacak değişimler tanımlanabilmektedir.

Dilimler halinde inşaa analizinin lineer olmayan bir analiz olması nedeniyle, kablo gibi lineer olmayan elemanları içeren kablolu köprüler gibi yapı sistemlerinde geometrik lineer olmayan etkiler dikkate alınmaktadır. Her bir inşaa adımında köprünün deformasyon yapmış şekli dikkate alınarak, belirtilen her bir yapım adımı için lineer olmayan statik analiz yapılmaktadır. Bu arada yine her adımda zamana bağlı etkilerin (sünme, rötre, yaşlanma ve gevşeme) malzemeye olan etkisi de dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte köprünün kendi ağırlığı her bir adımda uygulanabilirken, tendonların kullanıldığı adımlarda ard germe işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

Dengeli konsol yönteminde, inşaa durumunda köprü dilim dilim oluşturulmakta ve daha sonra birleştirilmektedir. Bu aşamada her bir inşaa adımında köprü düğüm noktalarının konumu köprünün deformasyon şekline göre yeniden belirlenmektedir.

Lineer olmayan analizde denge denklemleri, önceden bilinmeyen ve uygulanan yüklerle değişecek olan köprünün deforme olmuş geometrisine bağlı olarak belirlenmektedir. Dolayısıyla rijitlik matrisi bilinmeyen yerdeğıştirmelere bağlıdır ve böylece elde edilecek denklem tanımı lineer olmayan bir denklemdir. Bu aşamada lineer olmayan analizde bir çözüm elde edilebilmesi için bir iterasyon yöntemi tercih edilmelidir. LARSA'da kullanılan iterasyon yöntemi Newton-Raphson yöntemidir.

Lineer olmayan statik analiz ile geometrik bakımdan lineer olmayan etkiler köprüye ait yerdeğıştirmeler için yapılan iteratif çözümler ile dikkate alınırken, yakınsamanın sağlanması ile analiz sonlandırılmaktadır.

Bu çalışmada yerdeğıştirme için yakınsama kriteri olarak %1'lik bir hata payı dikkate alınmıştır. Bu hata payına bağlı olarak, son iterasyonda tüm serbestlik derecelerine karşılık gelen yerdeğıştirme değerleri %1'den az bir değışim gösterir ise analiz sonlandırılmaktadır.



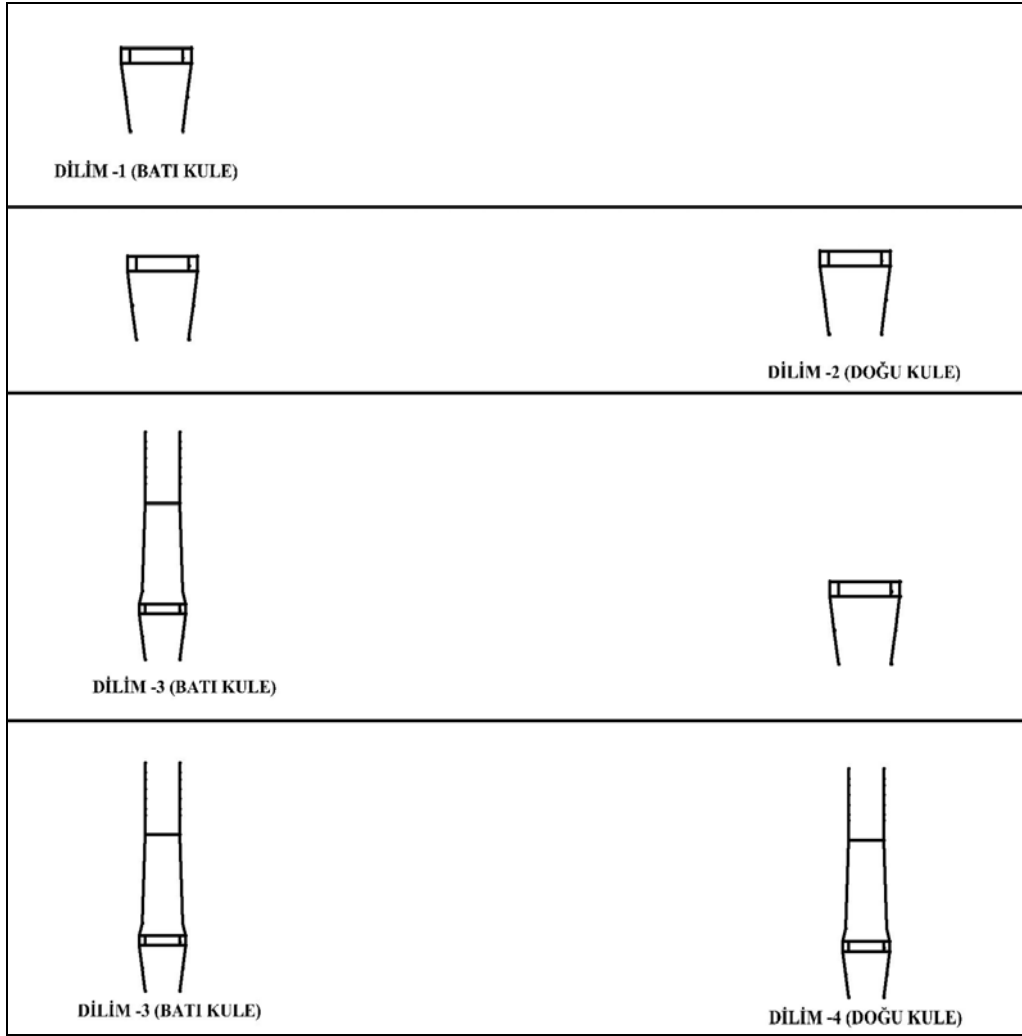
Şekil 2.14-2.20’de Quincy Bayview Köprüsünün konsol dilimler halinde dilim dilim inşaat sıralaması görülmektedir. Her bir adımda gerçekleştirilen inşaat işleri de Çizelge 2.5’de belirtilmektedir.

Çizelge 2.5. Konsol Dilimlerin LARSA 2000’de oluşturulması

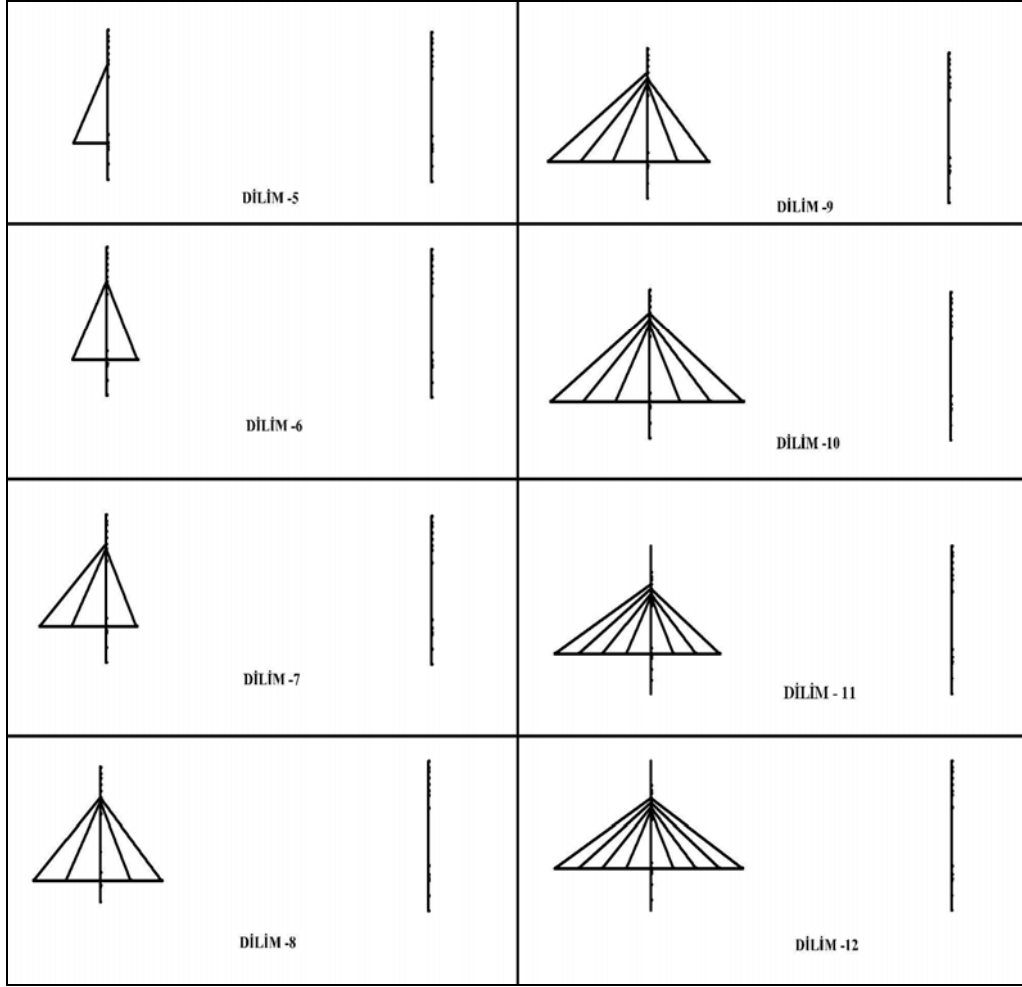
<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 1, day 10           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+KULE 1 ALT</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 2, day 20           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+KULE 2 ALT</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 3, day 60           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+KULE 1 UST</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 4, day 100           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+KULE 2 UST</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 5, day 130           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 1 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 6, day 160           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 2 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 7, day 190           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 3 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 8, day 220           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 4 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 9, day 250           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 5 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 10, day 280           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 6 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 11, day 310           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 7 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 12, day 340           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 8 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 13, day 370           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 9 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 14, day 400           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 10 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 15, day 430           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 11 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 16, day 460           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 12 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 17, day 490           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 13 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 18, day 520           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+BATI 14 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 19, day 550           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 1 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 20, day 580           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 2 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 21, day 610           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 3 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 22, day 640           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 4 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 23, day 670           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 5 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 24, day 700           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 6 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 25, day 730           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 7 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 26, day 760           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 8 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 27, day 790           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 9 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 28, day 820           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 10 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 29, day 850           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 11 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 30, day 880           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 12 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 31, day 910           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 13 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stage 32, day 940           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+DOGU 14 DOS.</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>Stage 33, day 970           <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1               <ul style="list-style-type: none"> <li>+ORTA</li> <li>KENDI AGIRLIGI (f=1,00)</li> <li>TENDON Stressed</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>6 AY, day 1150</li> <li>1 YIL, day 1515</li> <li>10 YIL, day 5165</li> </ul>	

Görüleceği üzere, analiz aşaması inşaat ve servis aşamaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. 970 günde tamamlanan köprünün inşaat aşaması süresince, köprüye ait ayak, kule, kablo, tabliye ve tendonlar konsol dilimler halinde kısım kısım oluşturularak birleştirilmiş ve Quincy Bayview köprüsünün inşaat aşaması tamamlanmıştır. Şekil 2.14-2.17’de görüleceği gibi inşaat aşaması 33 kısım inşaatından oluşmaktadır. Bunun yanında her bir dilim inşaatında, Çizelge 2.5’de belirtilen inşaat işleri gerçekleştirilmektedir. İnşaat aşaması tamamlandıktan sonra, servis aşaması için analizler başlamaktadır. Bu aşamada da inşaat aşamasındaki gibi zaman bağlı çevresel etkiler (sünme, rötre, gevşeme) dikkate alınmaktadır. Çizelge 2.5’de görüleceği üzere servis aşaması için, inşaat aşamasının sonlanmasını takip eden 6 ay, 1 yıl ve 10 yıl süreçleri kapsayan 3 yeni dilim eklenmiştir.

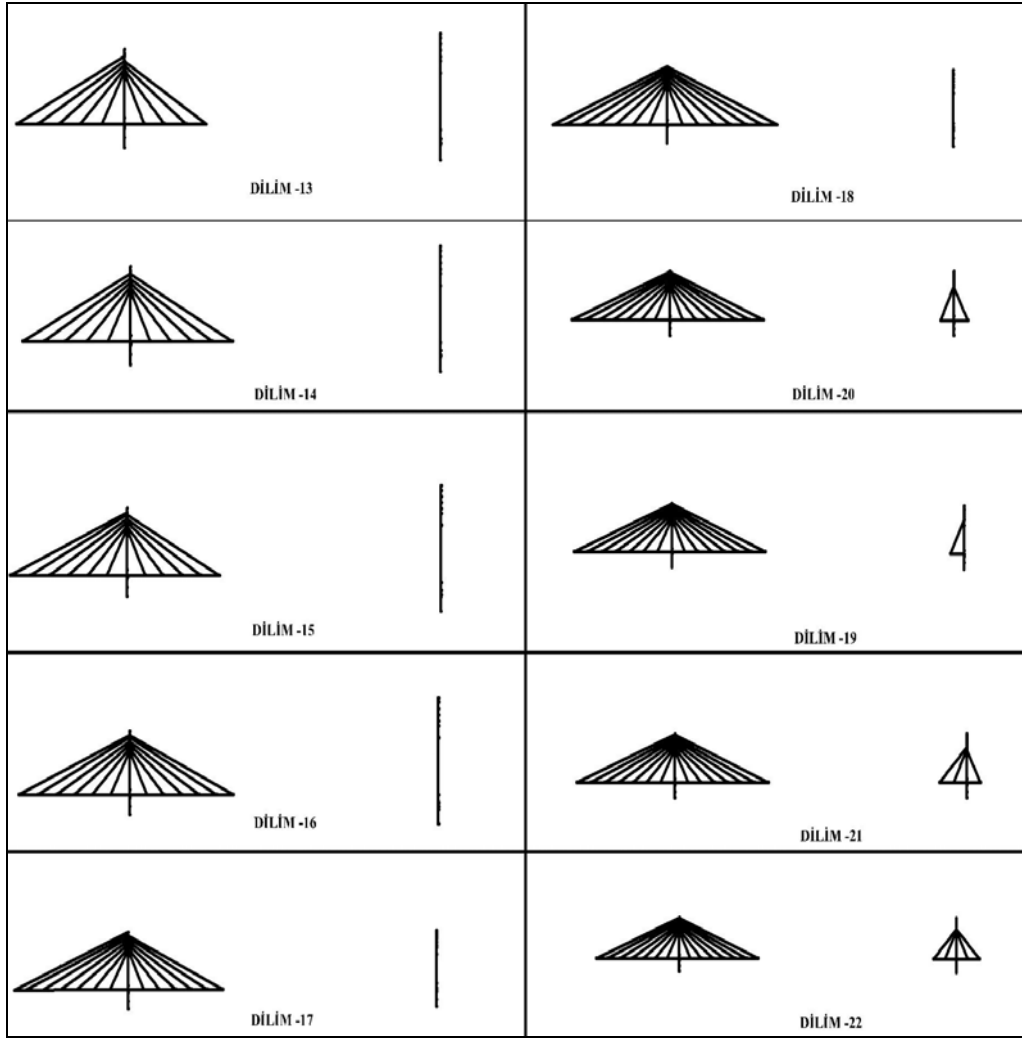
Şekil 2.14-2.17’de görüleceği gibi Quincy Bayview köprüsünün konsol dilimler halinde inşası ilk olarak batı kulesinin ayakları ile başlamakta ve daha sonra doğu kulesinin ayakları ile devam etmektedir. Daha sonra sırasıyla batı ve doğu kulelerinin tamamlanmasının ardından, 5-18 dilimleri arasında tabliye dilimler halinde kablolar vasıtasıyla batı kulesine birleştirilmektedir. Bu aşamaları takiben 19-32 dilimleri arasında tabliye yine dilimler halinde kablolar vasıtasıyla doğu kulesine birleştirilmektedir. Köprünün yapım aşaması 33. dilimde doğu ve batı köprü bölümlerinin birleştirilmesiyle tamamlanmaktadır.



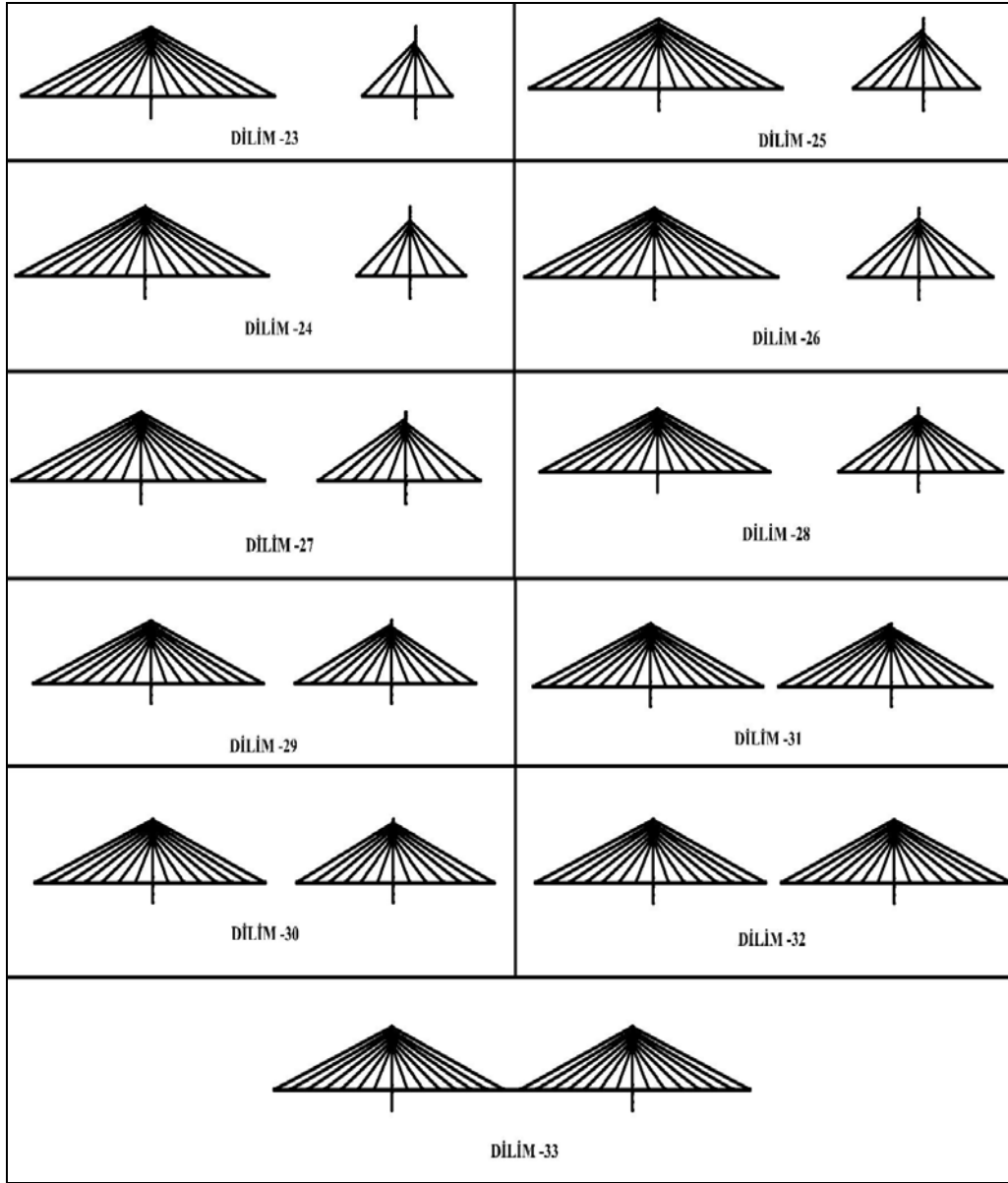
Şekil 2.14. Dilim 1-4 genel gösterimi



Şekil 2.15. Dilim 5-12 genel gösterimi



Şekil 2.16. Dilim 13-22 genel gösterimi



Şekil 2.17. Dilim 23-33 genel gösterimi

### 3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu çalışmada örnek sistem olarak Quincy Bayview kablolu köprüsünün konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda; sünme, rötne, gevşeme ve yaşlanma gibi zamana bağlı çevresel etkiler için lineer olmayan analizi gerçekleştirilmektedir.

Bu amaçla üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulan Quincy Bayview köprüsünün tabliyesi için daha önceki bölümde açıklanan üç farklı model dikkate alınmaktadır.

Model 1 : Tabliye, ana kirişler ve ara kirişler eşdeğer beton çubuk elemanlar ile modellenerek, kabloları tabliyeyi bağlamak için rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır.

Model 2 : Rijit bağlantı elemanları yerine plak eleman kullanılarak tabliye rijitliği sağlanmıştır. Ana kirişler beton çubuk elemanlarla tanımlanırken, tabliye ve ara kirişler eşdeğer beton düzlem elemanlar ile modellenmiştir.

Model 3 : Model 2'den farklı olarak ana kirişler "I" kesitli çelik çubuk elemanlar ile modellenmiştir.

Bunun yanında her üç model için de kuleler beton, kablolar ve tendonlar ise çelik malzeme ile modellenmiştir. Tendonlar ard germe işlemine tabi tutularak tabliye içerisinde kullanılmıştır. Tendonlar zaman içerisinde gevşerler ve bunun sonucunda da yerdeğiştirmelerde ve kesit etkilerinde değişimler meydana gelir.

Burada Quincy Bayview köprüsünün her üç model içinde analizleri hem yapım aşaması hem de 10 yıla kadarki servis aşaması için gerçekleştirilmiş ve elde edilen köprü yerdeğiştirmeleri, eleman kuvvetleri ve gerilmeleri karşılaştırılmıştır.

Her üç modelde de köprü inşasının tamamlanmasından sonra, köprü elemanlarının zamana ve ortam şartlarına bağlı olarak mevcut yerdeğiştirmelerine ek yerdeğiştirmeler oluşur. Zamana bağlı çevresel etkiler olarak tanımlanan rötne,

sünme, gevşeme ve yaşlanma sırasıyla “E.ş.1.7”, “E.ş.1.18”, “E.ş.1.24” ve “E.ş.1.25” ile hesaplanmaktadır.

Amaçlanan bu analizler için özellikle son yıllarda uzun açıklıklı kablolu köprü sistemlerinin tasarımında yaygın olarak kullanılan LARSA 2000 bilgisayar programı tercih edilmiştir [53].

### 3.1. Köprü Yol Boyunca Oluşan Düşey Yerdeğiştirmeler

Köprü tabliyesinin hem plak hem de rijit bağlantı elemanları ile modellenmesi durumunda, dikkate alınan tüm modellerde yapım aşaması için, sünme (S), rötre (R), gevşeme (G) ve yaşlanma (Y) etkilerinin dikkate alınmaması durumundaki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri, yapım aşaması ile 6 ay, 1 yıl ve 10 yıllık servis süreleri için S-R-G-Y etkilerinin dikkate alınması durumundaki tabliye düşey yerdeğiştirmeleri ile karşılaştırılmaktadır (Şekil 3.1-3.3).

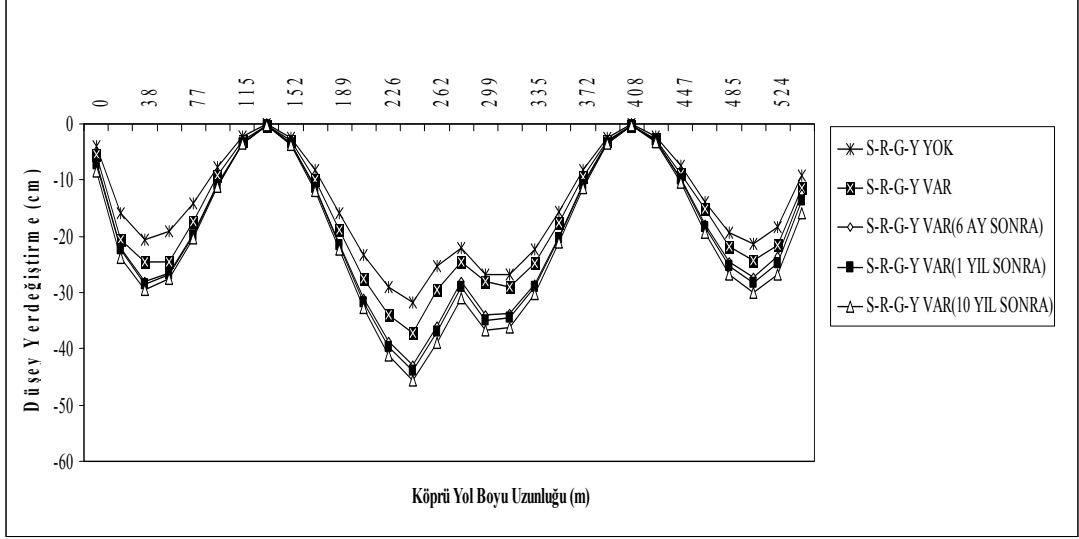
Her üç model için de benzer bir değişim elde edilmiş olup, çevresel etkilerin yerdeğiştirmeler üzerinde önemli etkilerinin olduğu ve yerdeğiştirmeleri artırdığı gözlenmektedir. Bunun yanında 10 yıllık servis süresi dikkate alındığında 6 aylık servis süresinden sonra yerdeğiştirmelerde küçük artışlar olmuştur.

Yapım aşaması sonunda çevresel etkenlerin dikkate alınması durumunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin, çevresel etkenlerin dikkate alınmaması durumundaki yerdeğiştirmelerden daha büyük olduğu dikkati çekmektedir. Model 1 için tabliye orta noktasında çevresel etkenlerin dikkate alınması durumunda düşey yerdeğiştirmedeki artış %16 olurken, Model 2 için %19 ve Model 3 için %41’lik artışlar belirlenmiştir.

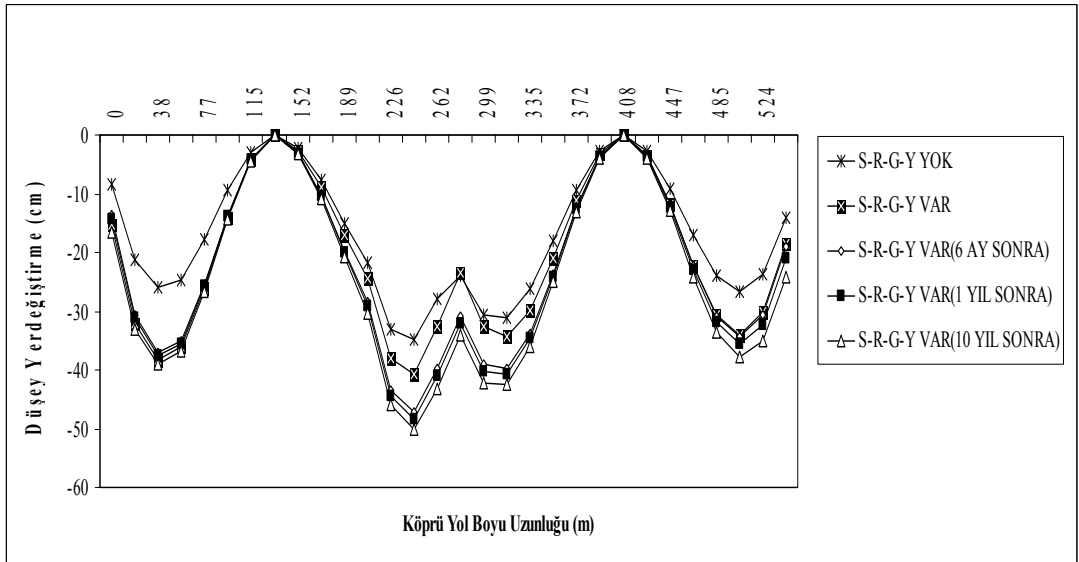
Model 1 için tabliye orta noktasında 6 aylık servis süresi için çevresel etkenler dikkate alınarak belirlenen yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen durumdaki yerdeğiştirmeden %22 daha fazladır. Model 2 ve Model 3 için elde edilen bu oranlar ise sırasıyla %22 ve %12’dir.



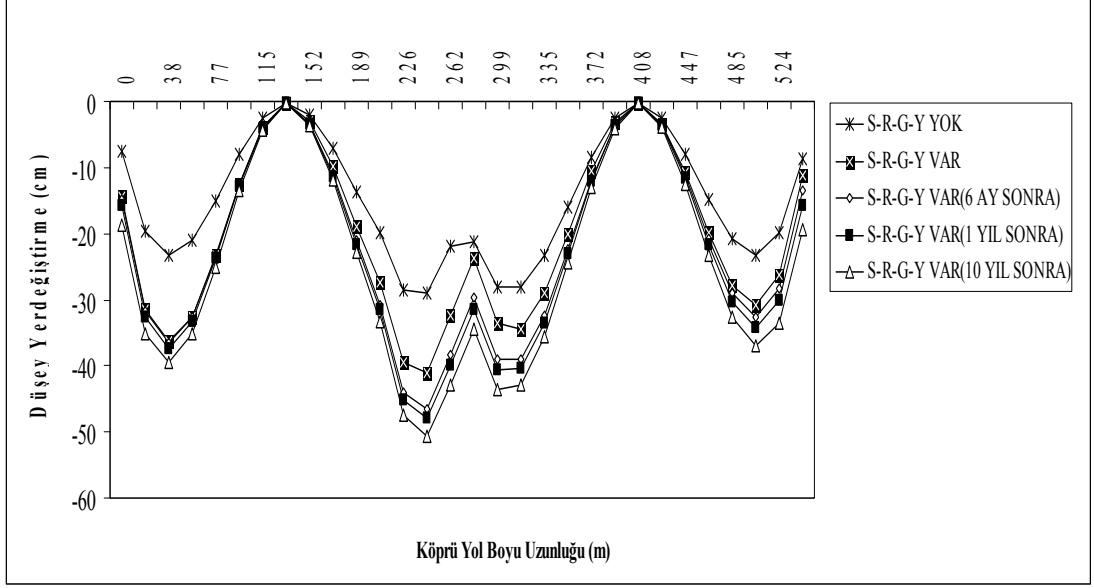
Bunun yanında 10 yıllık servis süresi sonunda çevresel etkenler de dikkate alındığında, tabliye orta noktasında 6 aylık servis süresine oranla Model 1 için %9, Model 2 için %8 ve Model 3 için %9 daha fazla yerdeğiştirme elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1)



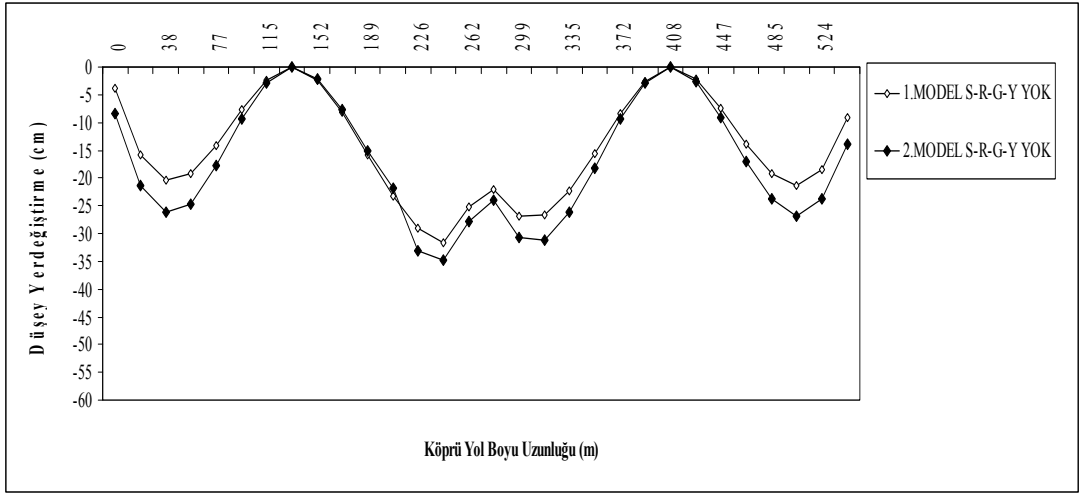
Şekil 3.2. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)



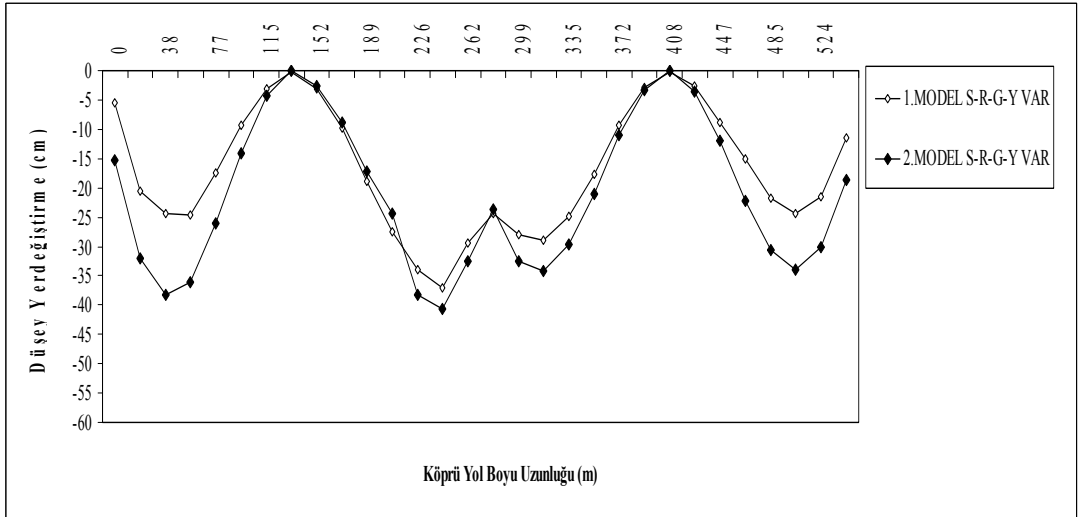
Şekil 3.3. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)

### 3.1.1. 1.ve 2. Modelin köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması

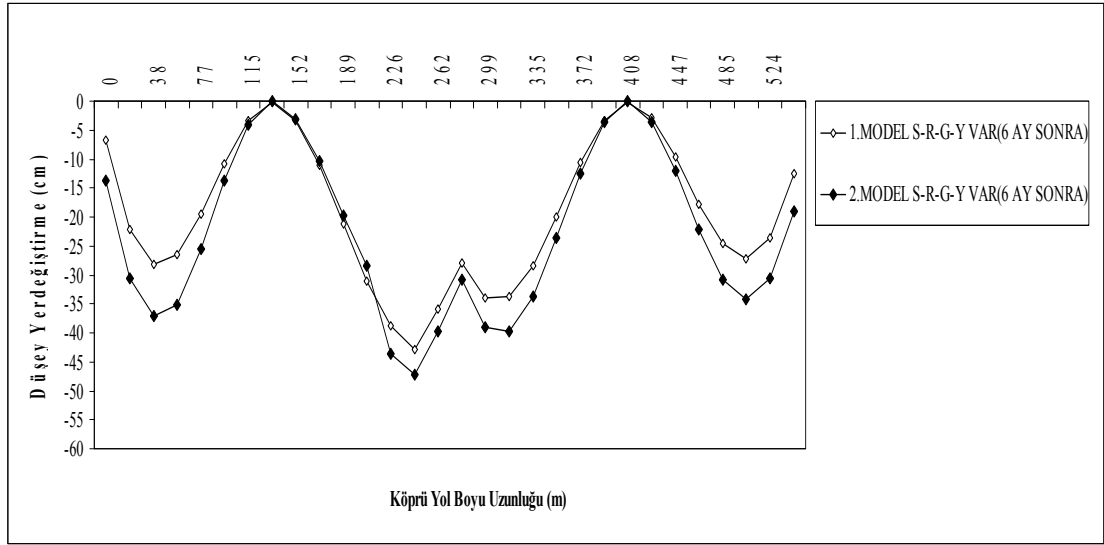
Her iki model dikkate alındığında, tabliyenin plak eleman olarak tanımlanarak modellenip analizi yapılan 2.modelde oluşan düşey yerdeğiştirmeler, genel olarak çubuk eleman olarak tanımlandığı 1.modelden elde edilen yerdeğiştirmelerden daha büyük çıkmaktadır. İki model için elde edilen yerdeğiştirmeler arasında küçük farklılıklar söz konusu olup, tabliye orta noktasında Model 2 ile elde edilen yerdeğiştirme değeri Model 1'e oranla tüm durumlar için yaklaşık %10 daha fazla olmaktadır. Tabliyenin çubuk elemanlarla tanımlandığı ve tabliyeyi kulelere bağlayabilmek için rijit elemanlarının kullanıldığı Model 1 için elde edilen çözümlerin, tabliyenin plak eleman ile tanımlanarak diyafram davranışı sağlandığı daha elastik bir modelleme ile elde edilen çözümlerden belli bir oranda büyük olması oldukça makuldür.



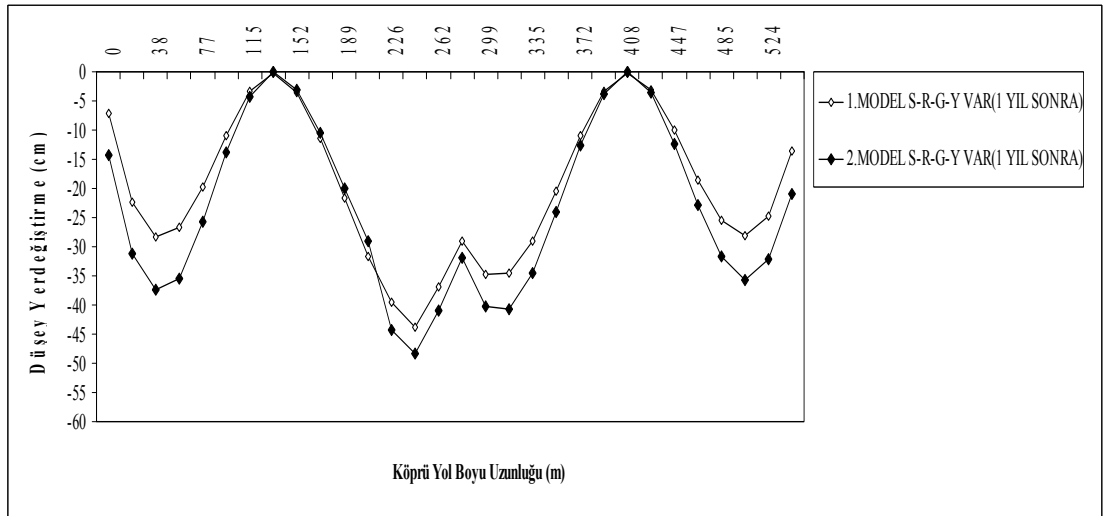
Şekil 3.4. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



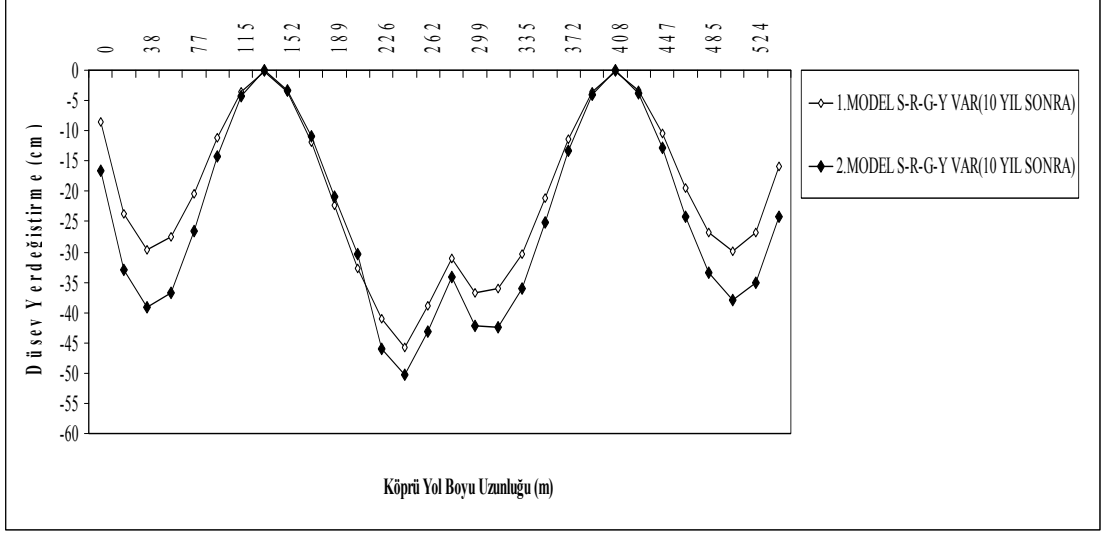
Şekil 3.5. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



Şekil 3.6. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



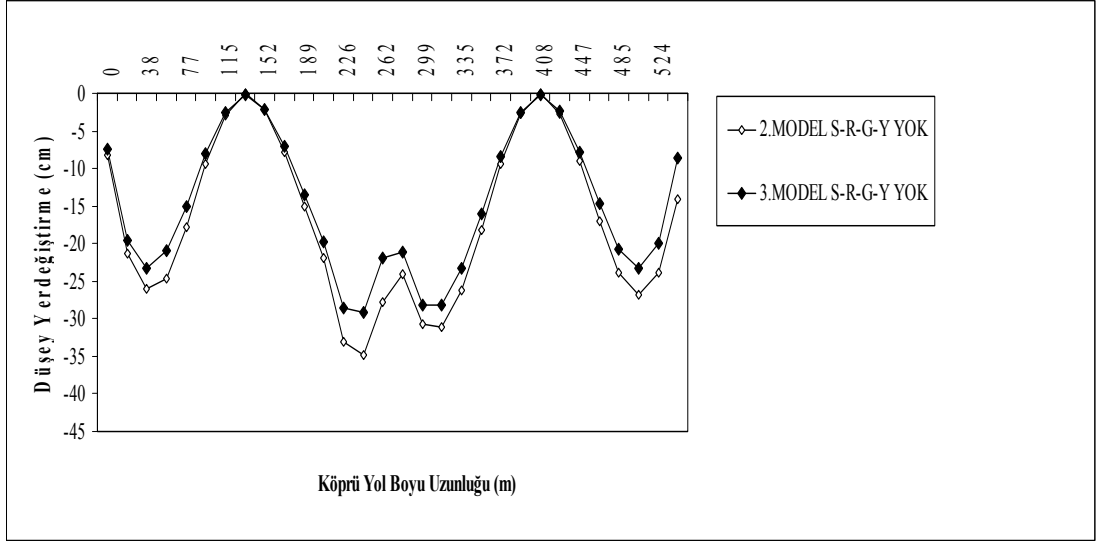
Şekil 3.7. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



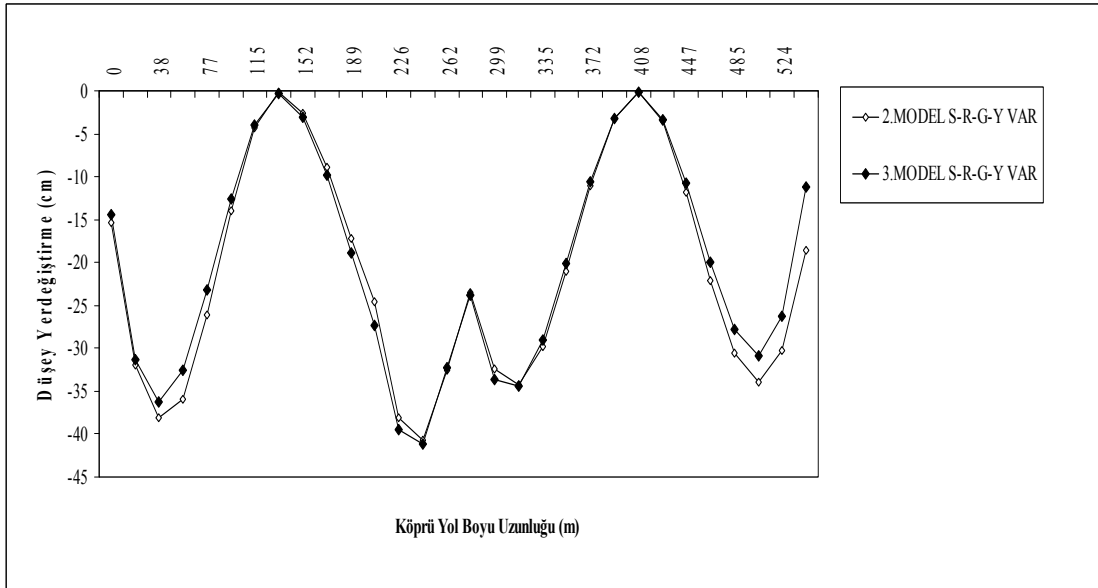
Şekil 3.8. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)

### 3.1.2. 2.ve 3. Modelin köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin Karşılaştırılması

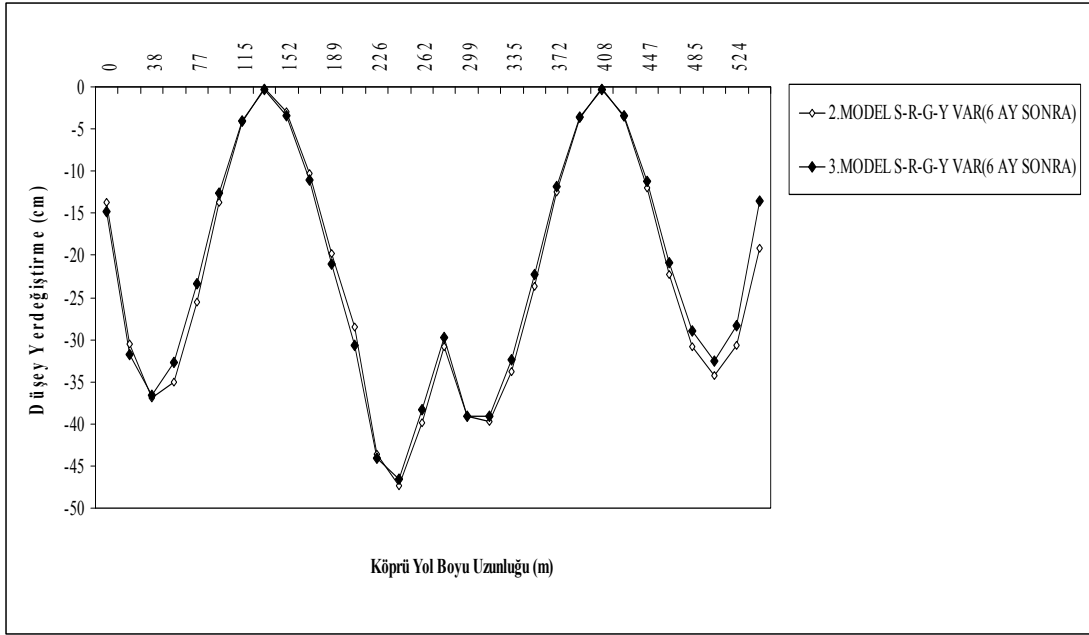
Köprüye ait ana kirişlerin gerçekte çelik olması nedeniyle, Model 3’de dikkate alınan bu durum, ana kirişin eşdeğer beton olarak tanımlandığı Model 2 ile Şekil 3.9-3.13’de karşılaştırılmaktadır. Görüleceği üzere Model 2 için elde edilen yerdeğiştirmeler Model 3 sonuçlarından az da olsa büyük çıkmaktadır. Tabliye orta noktasında iki model arasında çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumda %27 gibi bir fark ortaya çıkarken, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması ile 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri sonunda bu oran yaklaşık %2 olmuştur. Beton ana kirişler yerine Model 3’de daha rijit davranış göstermesi beklenen çelik kullanılması bu sonucu doğallandırmaktadır.



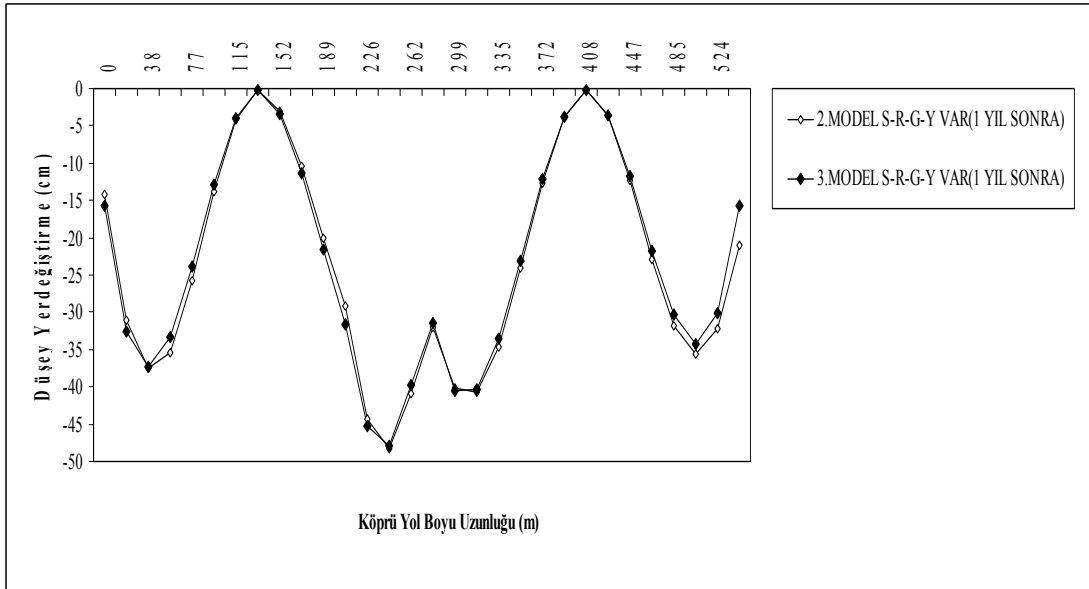
Şekil 3.9. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



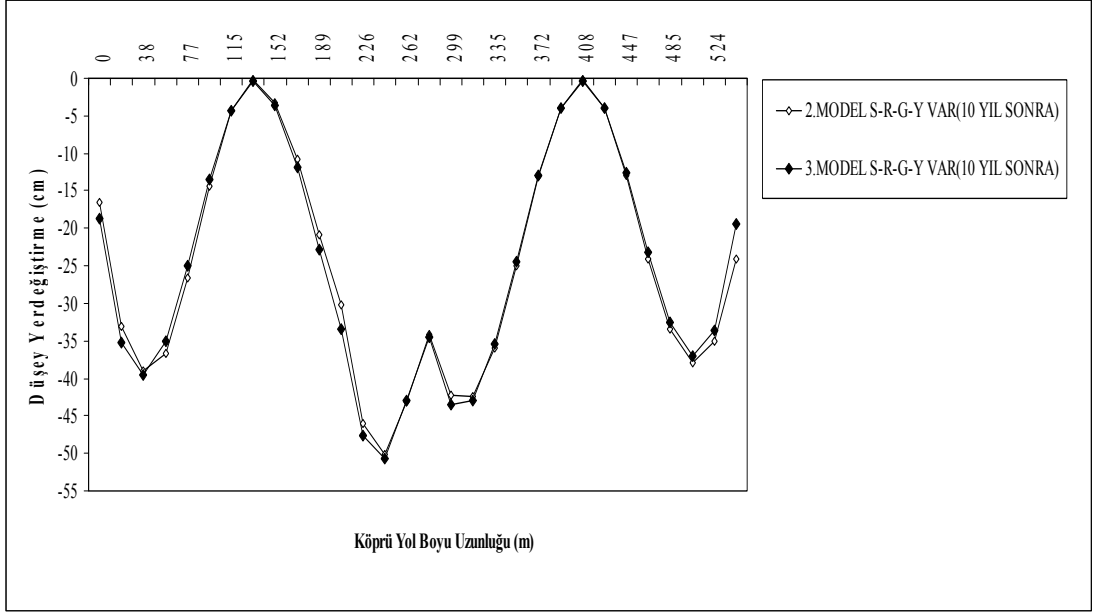
Şekil 3.10. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



Şekil 3.11. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



Şekil 3.12. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



Şekil 3.13. Köprü yol boyu düşey yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)

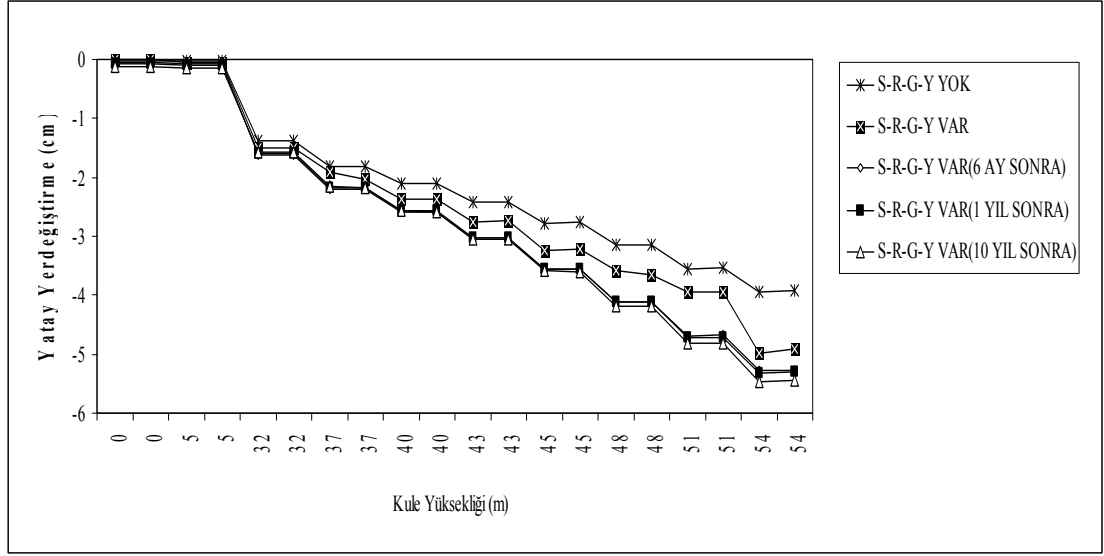
### 3.2. Kule Yüksekliği Boyunca Oluşan Yatay Yerdeğiştirmeler

Şekil 3.14, 3.15 ve 3.16'da Quincy Bayview Köprüsü'nün kendi ağırlığı altında ve zamana bağlı çevresel etkenlerin dikkate alınması durumunda lineer olmayan analizle hesap edilen kule yatay yerdeğiştirmeleri görülmektedir.

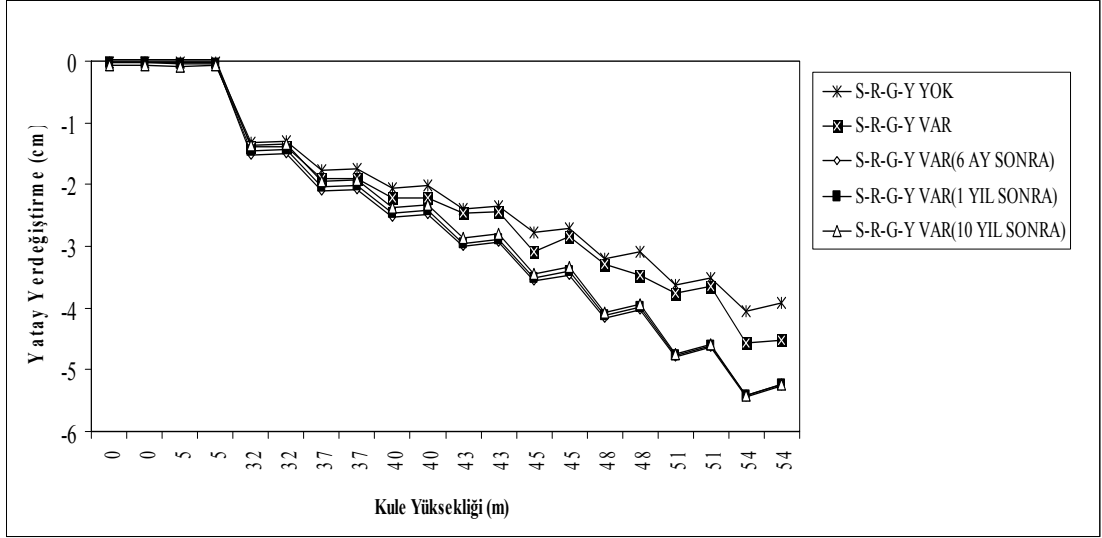
Her üç model için de zamana bağlı çevresel etkenler ve köprünün kendi ağırlığı dikkate alınarak konsol dilimler halinde tasarlanan Quincy Bayview köprüsünün lineer olmayan analizi sonucu elde edilen kule yatay yerdeğiştirmeleri, sadece köprünün kendi ağırlığı dikkate alınarak belirlenen yerdeğiştirmelerden daha büyük olmuştur. Böylelikle yapım aşaması sonunda çevresel etkilerin dikkate alındığı durumda kule tepe noktasından elde edilen yerdeğiştirme değeri Model 1 için, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı yapım aşaması için belirlenen yerdeğiştirmeden %26 daha büyük olmuştur. Bu oran Model 2 için %15 ve Model 3 için %15 olarak belirlenmiştir. Ayrıca çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis aşaması için kule tepe noktasında elde edilen yerdeğiştirme değeri, yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı yerdeğiştirmeden Model 1



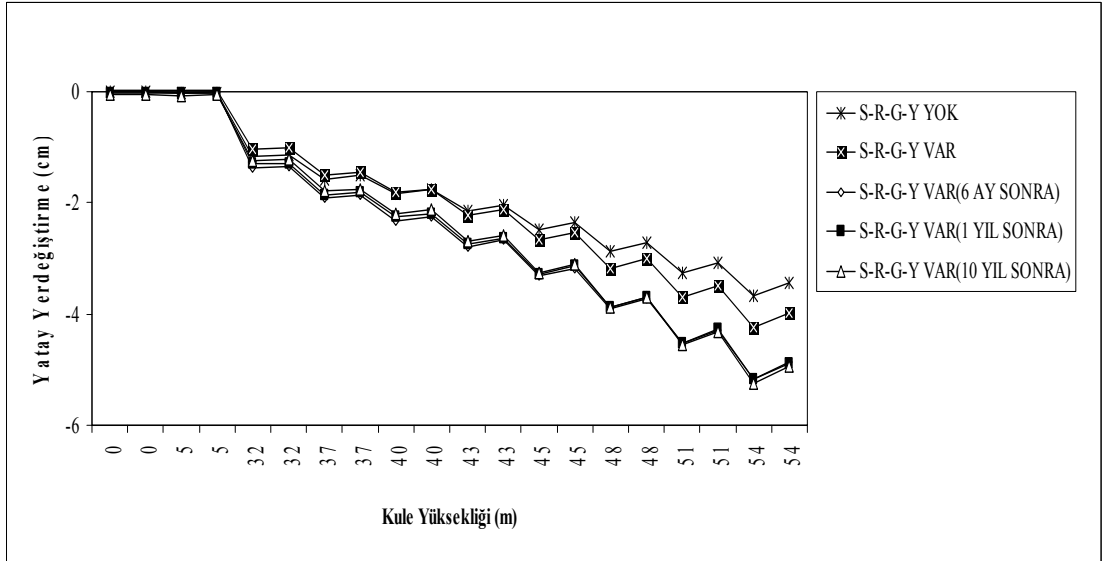
için %7, Model 2 için %16 ve Model 3 için %23 daha büyük olmaktadır. Şekil 3.14-3.15-3.16'dan görüleceği üzere 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri için elde edilen yerdeğiştirmeler neredeyse aynıdır. Başka bir ifade ile çevresel etkenlerin kule yerdeğiştirmeleri üzerindeki etkileri servis aşamasında önemsiz olmaktadır. Şekillerde ortaya çıkan süreksizlik, tabliyenin kulelere sıralı olarak sol ve sağ taraftan dilim dilim eklenmesi ile açıklanabilir.



Şekil 3.14. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1)



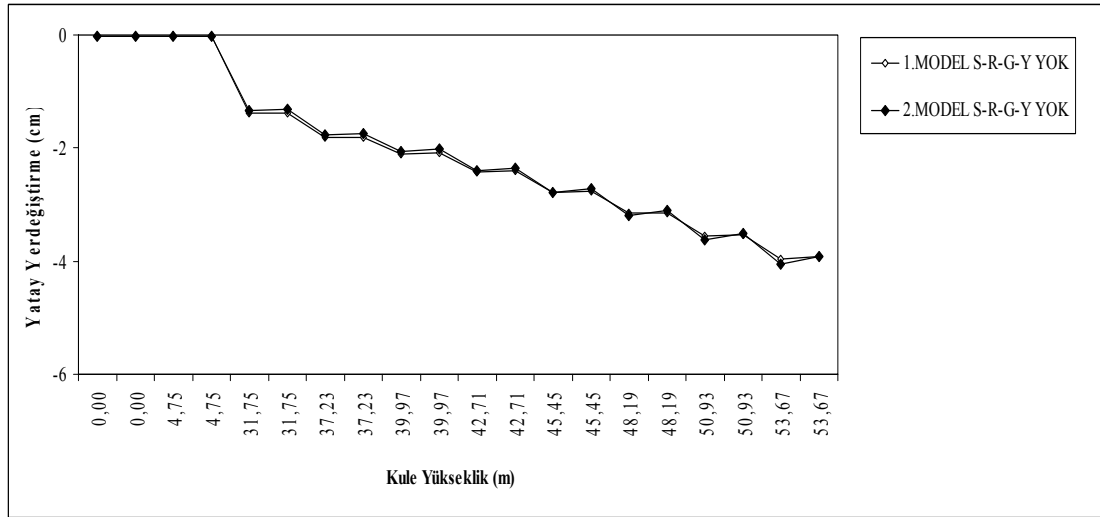
Şekil 3.15. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)



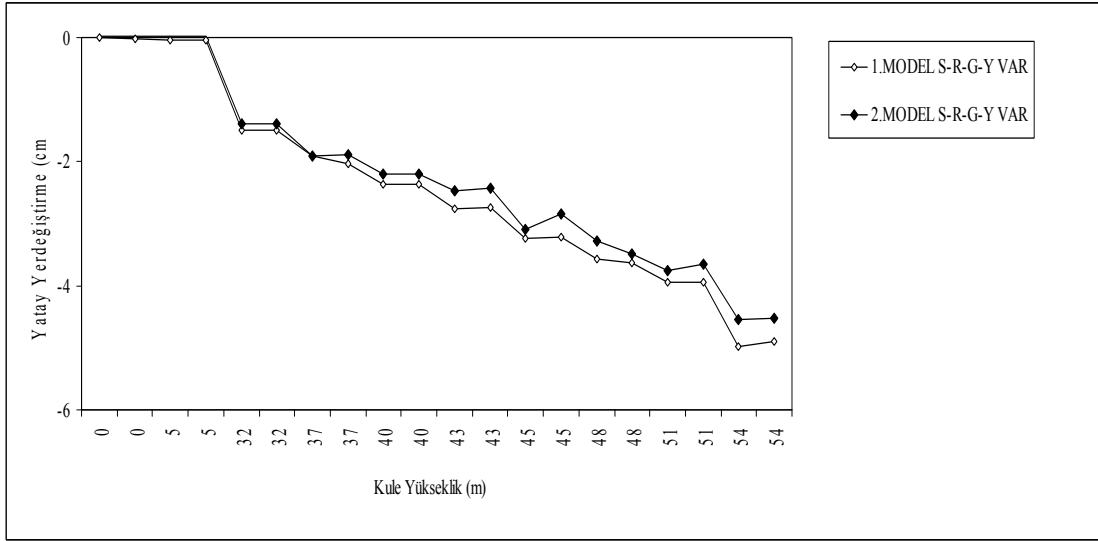
Şekil 3.16. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)

### 3.2.1. Model 1 ve Model 2 ile kule yüksekliği boyunca belirlenen yatay yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması

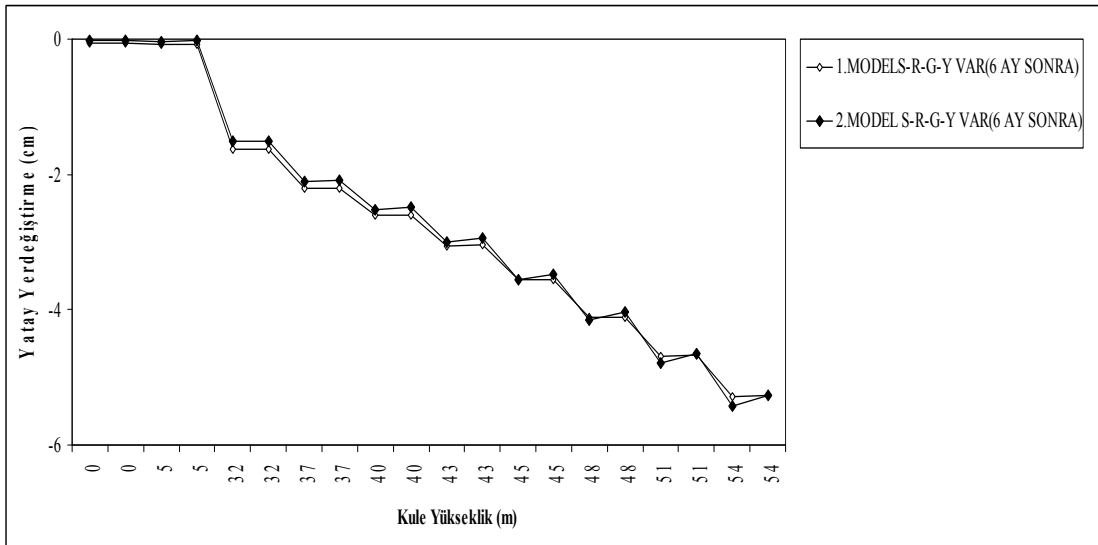
şekil 3.17-3.21’de görüldüğü üzere, her iki model ile köprü kulesi için elde edilen yatay yerdeğiştirmeler hemen hemen üst üste çakışmaktadır. Dolayısıyla, çubuk eleman ile modellenen köprü tabliyesi ile düzlem eleman olarak modellenen tabliye dikkate alınarak yapılan çözümlerin kulelerin üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.



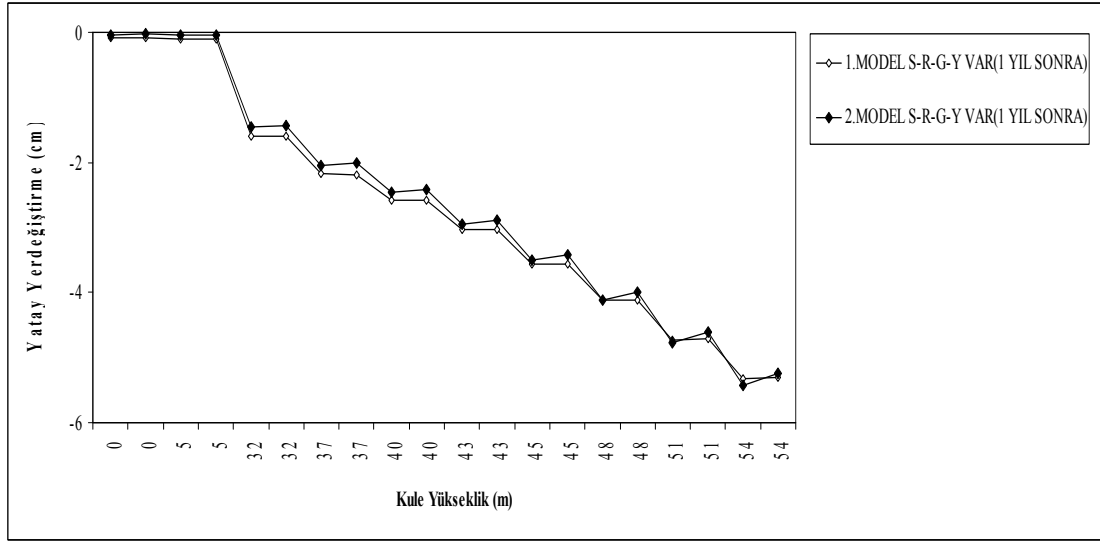
şekil 3.17. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



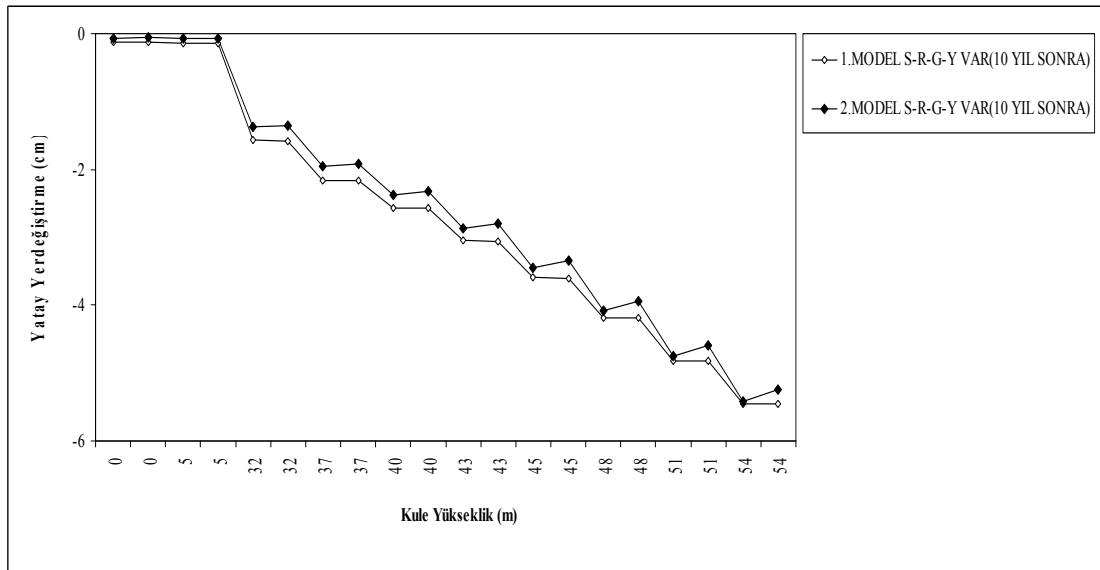
Şekil 3.18. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



Şekil 3.19. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



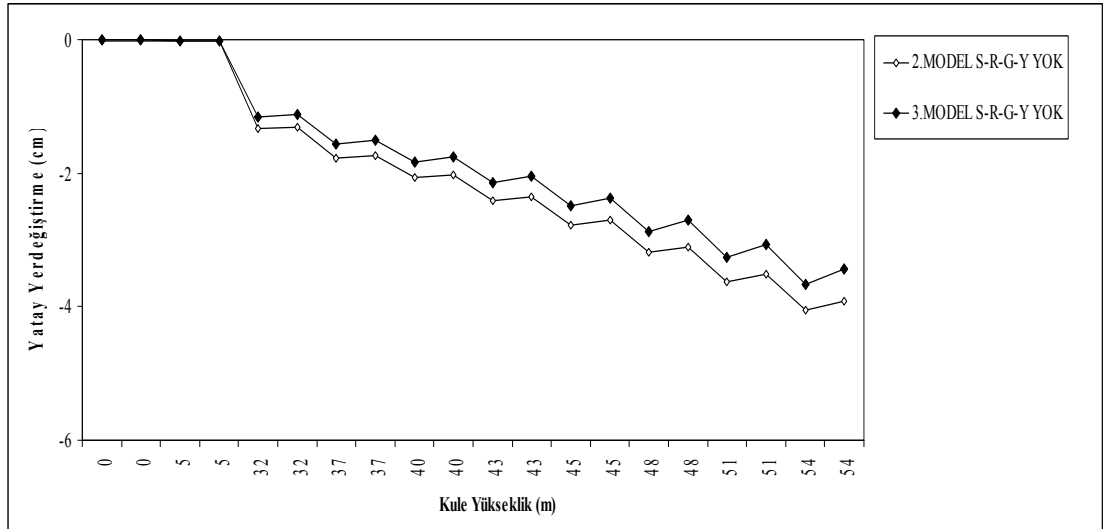
Şekil 3.20. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)



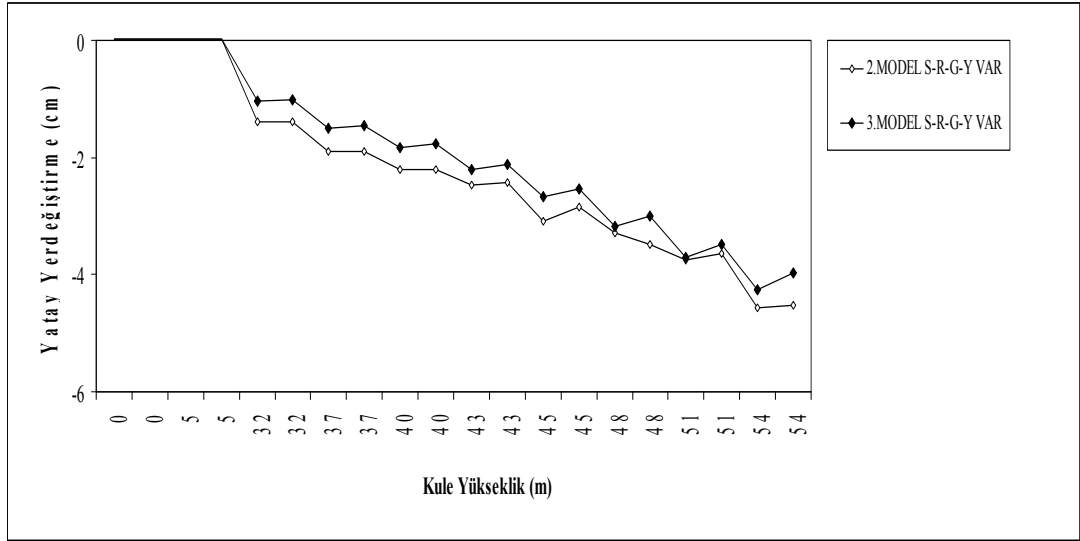
Şekil 3.21. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 1 ve Model 2)

### 3.2.2. Model 2 ve Model 3 ile Kule Yüksekliği Boyunca Belirlenen Yatay Yerdeşistirmelerin Karşılaştırılması

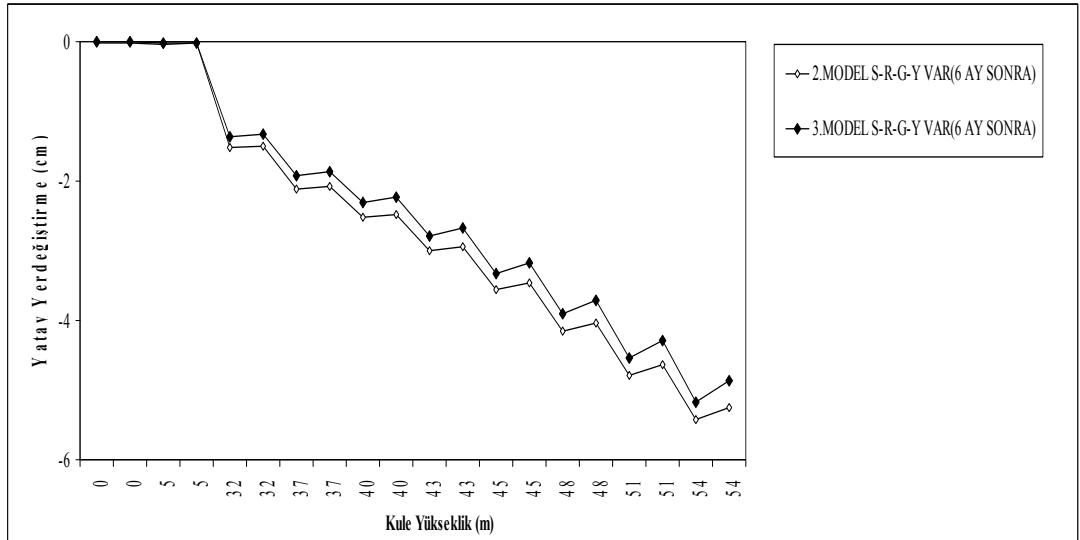
Tabliye ana kirişlerinin beton ve elik olarak modellenmesi ile elde edilen kule yatay yerdeşistirmeleri Şekil 3.22-3.26’da karşılaştırılmaktadır. elik ana kiriş olarak tanımlanan Model 3’ün Model 2’ye göre daha rijit olması, Model 2 için elde edilen yerdeşistirmelerin daha büyük olmasını doğallaştırmaktadır. Bununla birlikte her iki model için elde edilen czmler arasındaki fark büyük mertebelerde değildir. Kule tepe noktasında elde edilen fark tüm durumlar için ortalama %10’dur.



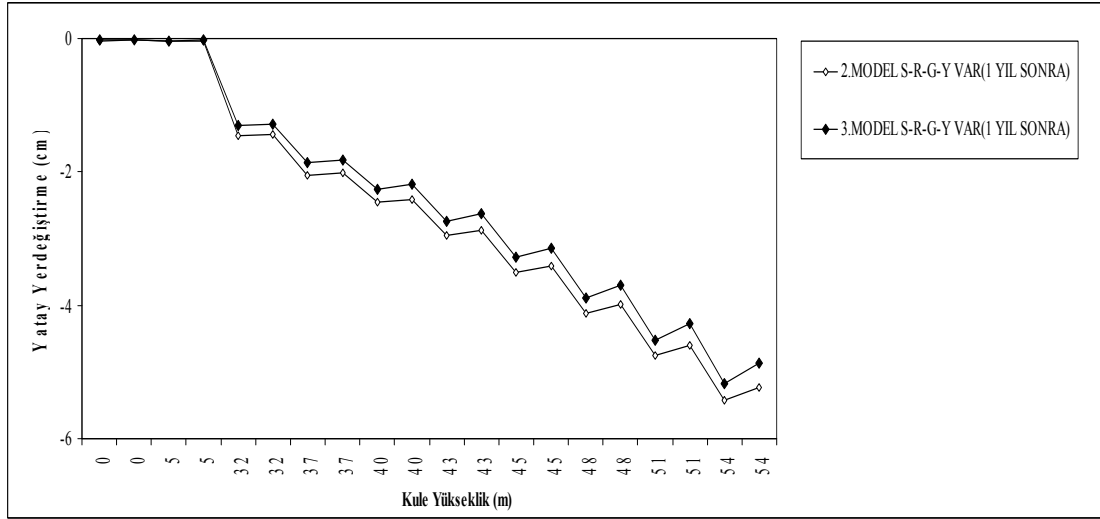
Şekil 3.22. Kule yüksekliği boyunca yerdeşistirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



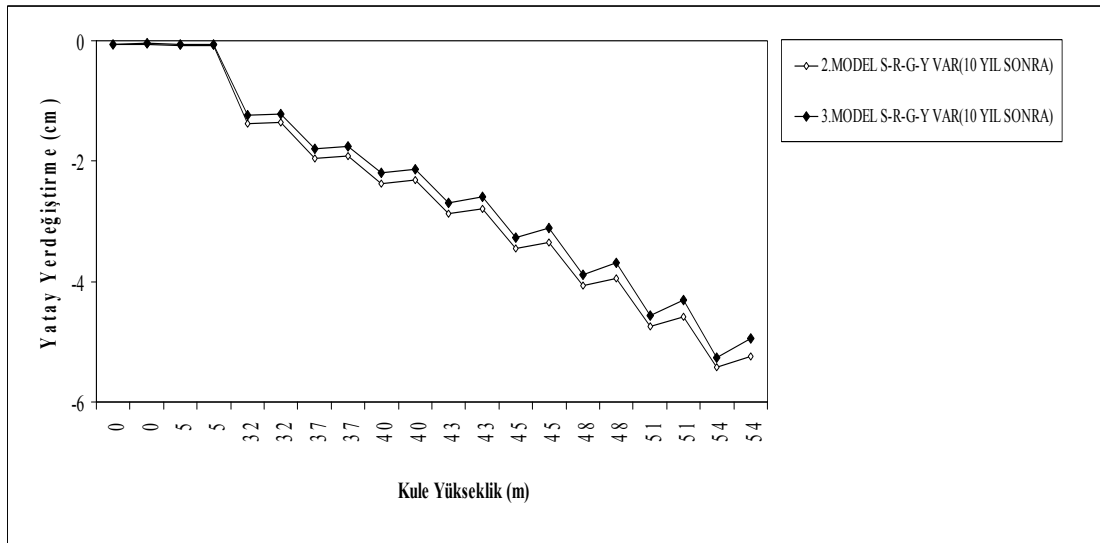
Şekil 3.23. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



Şekil 3.24. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



Şekil 3.25. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



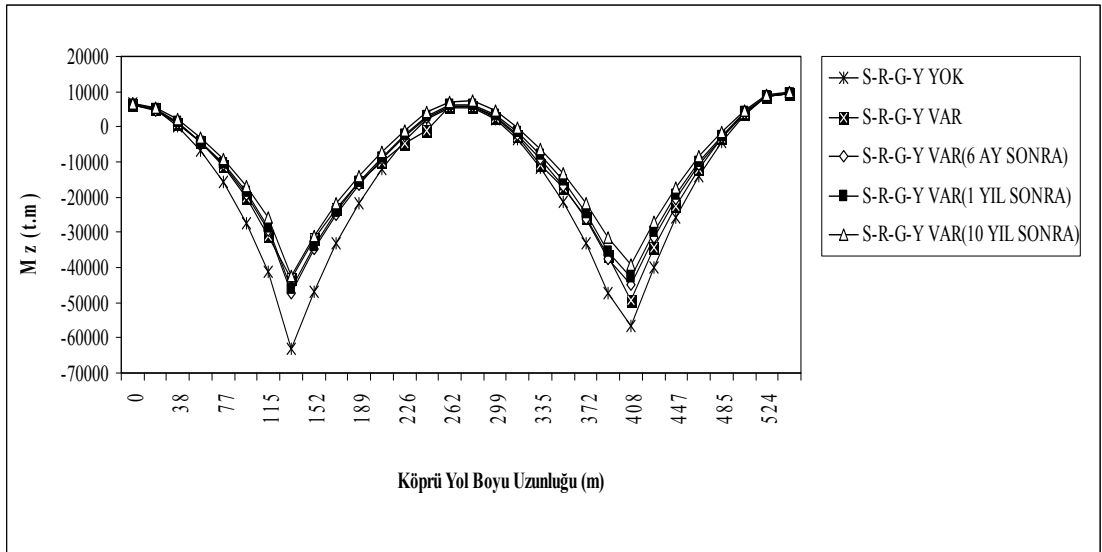
Şekil 3.26. Kule yüksekliği boyunca yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması (Model 2 ve Model 3)



### 3.3. Köprü Tabliyesinde Oluşan Eleman Kuvvetleri

#### 3.3.1.Eğilme momenti

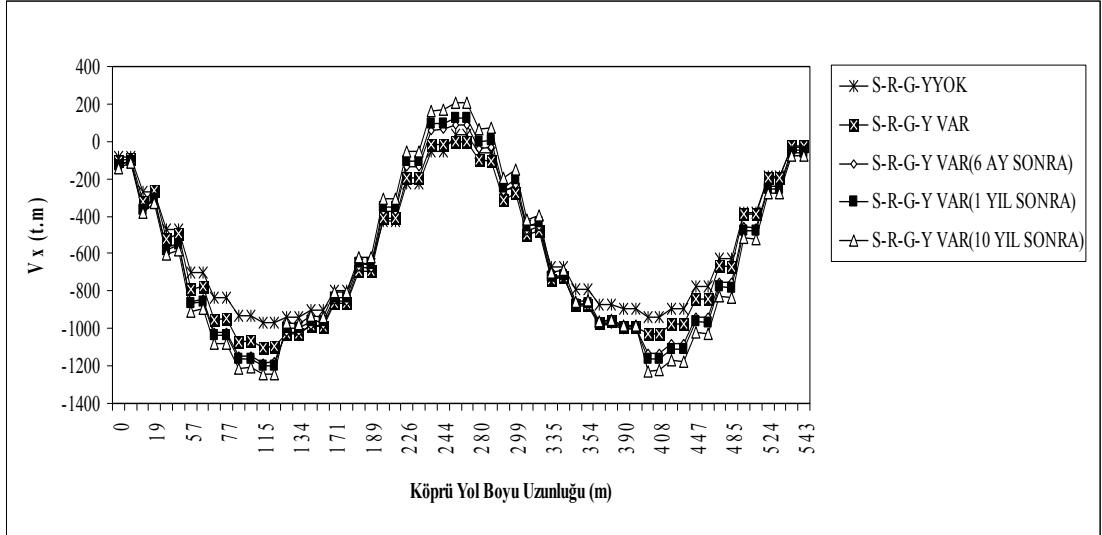
Tabliye boyunca elde edilen eğilme momenti değişimi Şekil 3.27’de görülmektedir. Görüleceği üzere çevresel etkenlerin eğilme momenti üzerindeki etkilerinin tabliye orta noktasında ve kenar açıklıklarda fazla olmadığını, en büyük etkisinin maksimum moment değerlerinin elde edildiği tabliye kule birleşim noktalarında olduğu görülmektedir. Bu noktalarda çevresel etkenlerin dikkate alınmasının yerdeğiştirmeleri azalttığı görülmektedir. Çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumda batı kulesi- tabliye birleşim noktasında elde edilen eğilme momenti değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen eğilme momentlerinden %32 daha büyük olmuştur. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis aşaması için batı kulesi-tabliye birleşim noktasında belirlenen eğilme momenti değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen eğilme momenti değerinden %10 daha büyük çıkmıştır. Ayrıca 6 aylık ve 10 yıllık servis süreleri için belirlenen momentler arasındaki fark minimal düzeyde olup, batı kule – tabliye birleşim noktasında %10 gibi bir fark söz konusudur.



Şekil 3.27. Köprü yolboyu eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1)

### 3.3.2. Kesme kuvveti

Tabliye boyunca elde edilen kesme kuvveti diyagramının incelenmesinden merkez açıklık ortası hariç, çevresel etkenlerin dikkate alınması durumundaki kesme kuvvetlerinde artış ortaya çıktığı gözlenmektedir.(Şekil 3.28) Çevresel etkenlerin tabliye kesme kuvvetleri üzerinde genellikle fazla bir etkisinin olmadığı anlaşılmalı birlikte, batı kulesi – tabliye birleşim noktasında ortaya çıkan maksimum kesme kuvveti için çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumda elde edilen kesme kuvveti değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için hesaplanan kesme kuvveti değerinden %14 daha küçük olmuştur. Yine aynı noktada çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis aşaması için belirlenen kesme kuvveti değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen kesme kuvvetinden %7 daha büyük çıkmıştır. Bunun yanında servis süresinin 6 ay servis aşaması için belirlenen kesme kuvveti değeri, 10 yıllık servis süresinden elde edilen kesme kuvveti değerinden %6 küçük çıkmıştır.

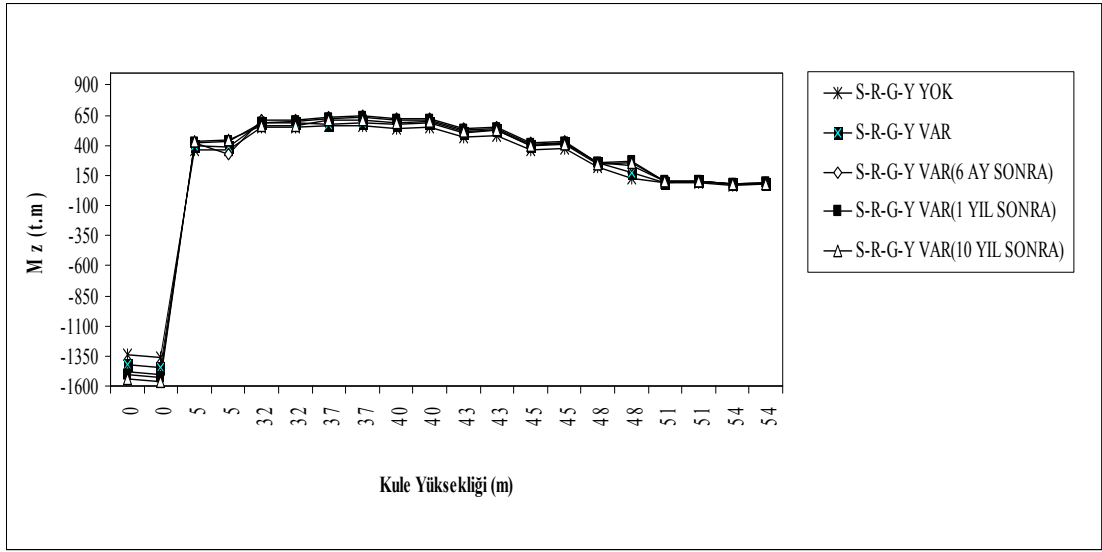


Şekil 3.28. Köprü yolboyu kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırması (Model 1)

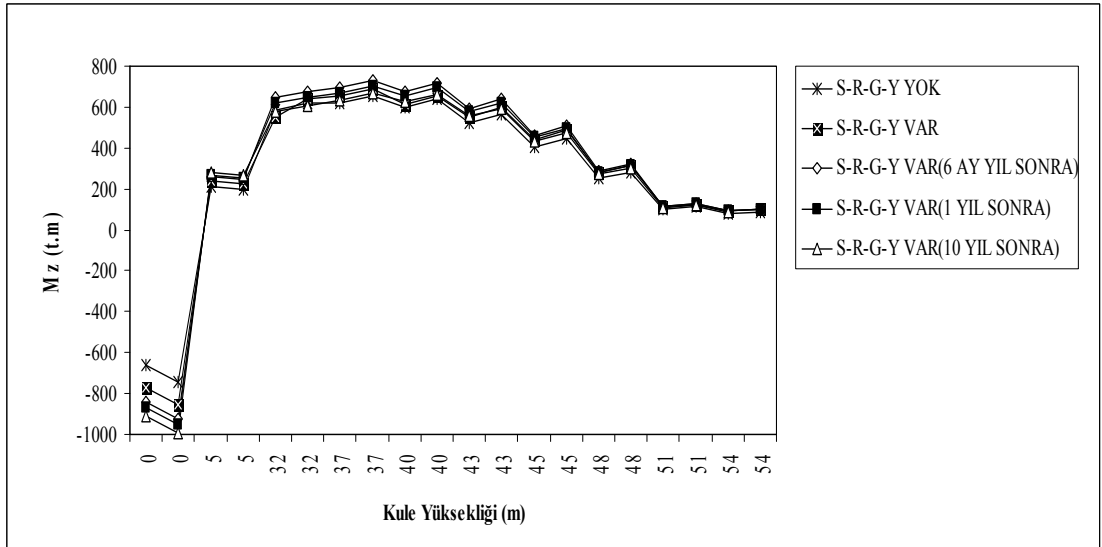
### 3.4. Kule Yüksekliği Boyunca Oluşan Eleman Kuvvetleri

#### 3.4.1. Eğilme momenti

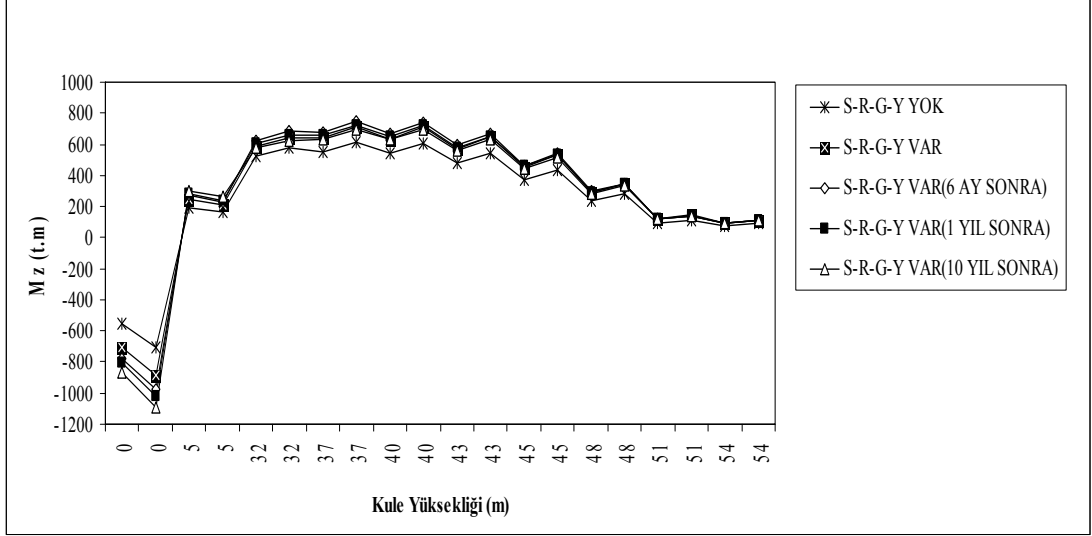
Her üç model ile batı kulesi için elde edilen eğilme momentlerinin değişimi çevresel etkenlere bağlı olarak Şekil 3.29-3.30-3.31’de karşılaştırılmaktadır. Her üç model için de benzer bir değişim elde edilmiş olup, çevresel etkenlerin genellikle kule yüksekliği boyunca eğilme momenti üzerinde çok etkili olmadığı gözlenebilmektedir. Bununla birlikte kule taban noktasında çevresel etkenlerin dikkate alınmasının kesme kuvvetlerini belli bir oranda artırdığı anlaşılmaktadır. Model 1 ile çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen eğilme momenti değeri kule taban noktasında, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki eğilme momenti değerinden %6 büyük olurken, Model 2 için bu oran %17 ve Model 3 için %28’dir. Bunun yanında Model 1 için çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis süresi için kule taban noktasında belirlenen eğilme momenti değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için elde edilen moment değerinden %4 daha büyük çıkmıştır. Aynı şekilde Model 2 ve Model 3 için belirlenen oranlar sırasıyla %9 ve %10’dur. Ayrıca 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri için çevresel etkenlere bağlı olarak elde edilen değişimler birbirine oldukça yakın çıkmıştır.



Şekil 3.29. Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1)



Şekil 3.30. Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)

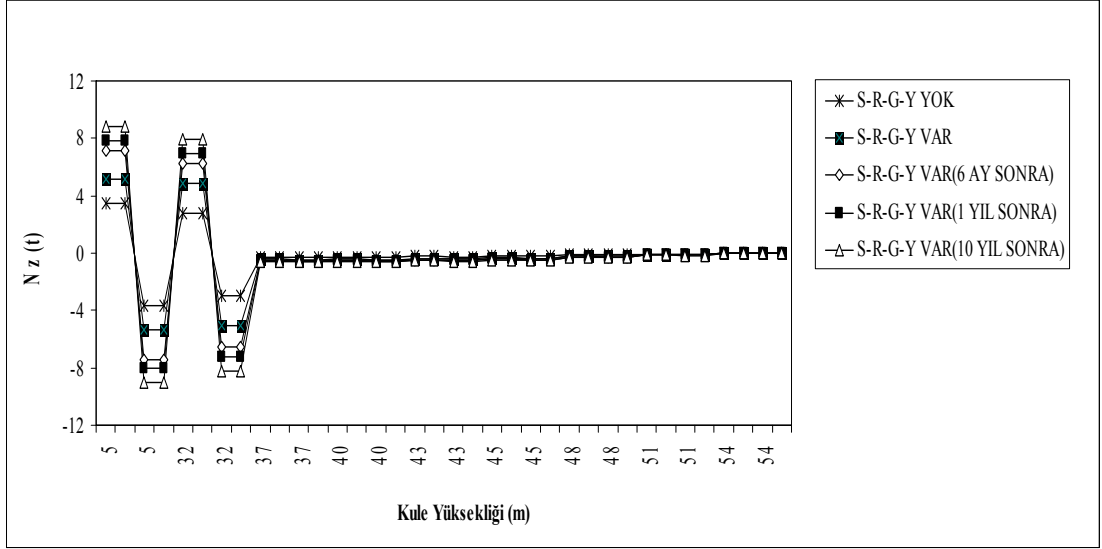


Şekil 3.31. Kule yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)

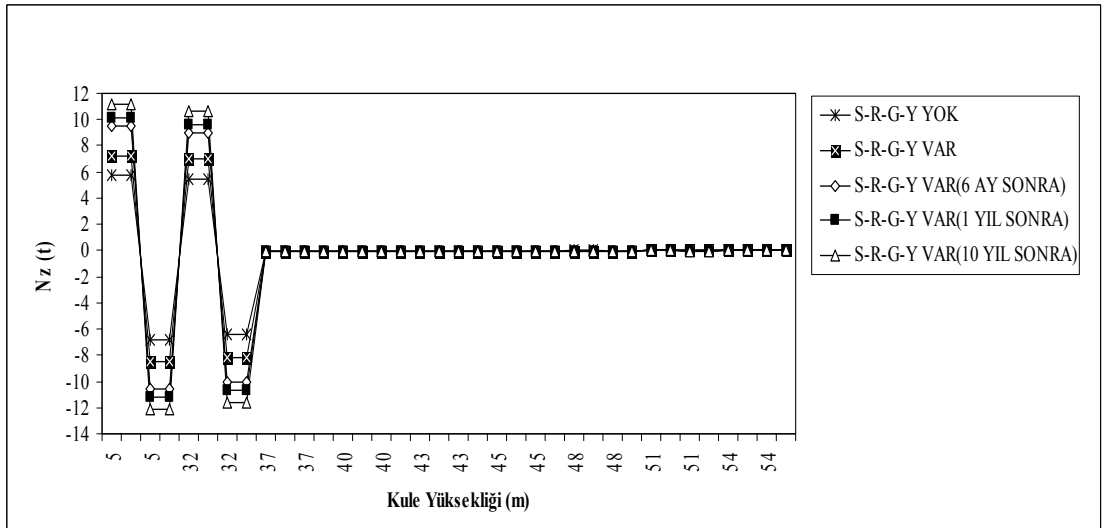
### 3.4.2. Normal kuvvet

Çevresel etkenlerin batı kulesi normal kuvvet diyagramı üzerindeki etkisi, dikkate alınan her üç model için belirlenerek Şekil 3.32-3.34'de sunulmaktadır. Elde edilen değişim her üç model için de paralellik içerisinde olup, belirli bir kule yüksekliğine kadar çevresel etkenlerin kule normal kuvvetlerini artırdığı gözlenmektedir. Her üç modelde de kule yüksekliğinin 37. metresinden sonra normal kuvvetler sifıra yakın olmuştur. Bununla birlikte 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri için elde edilen normal kuvvet diyagramları arasında küçük bir fark olup, zamanla çevresel etkenlerin etkisinin devam ettiği anlaşılmaktadır. Model 1'de, kule taban noktasında 10 yıllık servis süresi için elde edilen normal kuvvet değeri, 6 aylık servis süresi için elde edilen normal kuvvet değerinden %23 daha fazla iken, Model 2'de bu oran %18, Model 3'de ise %17'dir. Yine kule taban noktasında çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için Model 1'de belirlenen normal kuvvet değeri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki normal kuvvetten %49 daha fazla olmaktadır. Model 2 ve Model 3'de de benzer şekilde bu oran sırasıyla %26 ve %31 olarak belirlenmiştir. Kule taban noktasında çevresel etkenleri dikkate alındığı 6 aylık servis süresi için belirlenen normal kuvvet değeri, yine çevresel etkenlerin

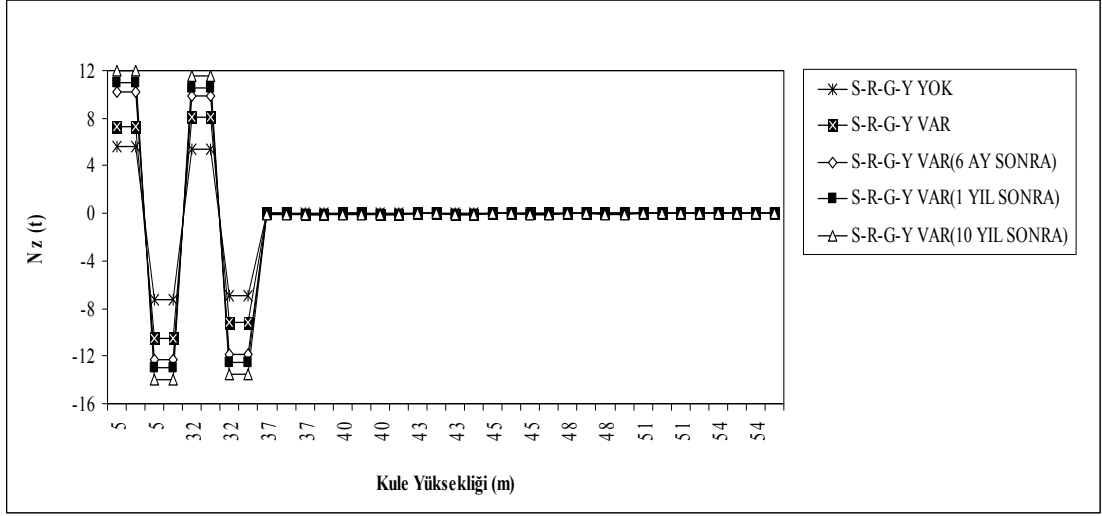
dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen normal kuvvet değerinden Model 1 için %39, Model 2 için %31 ve Model 3 için %40 daha büyük çıkmıştır.



Şekil 3.32. Kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması (Model 1)



Şekil 3.33. Kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)



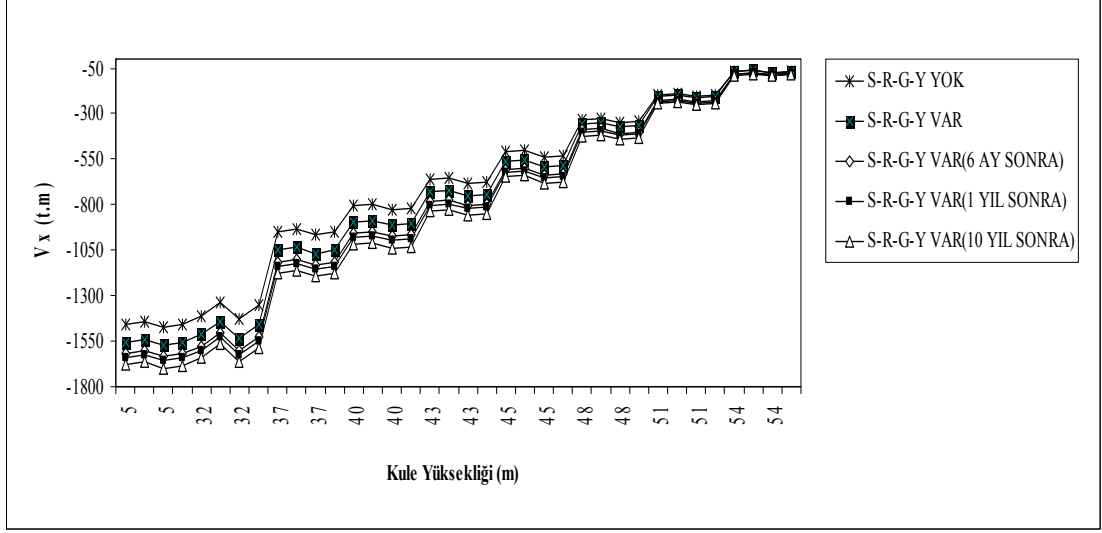
Şekil 3.34. Kule yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)

### 3.4.3. Kesme kuvveti

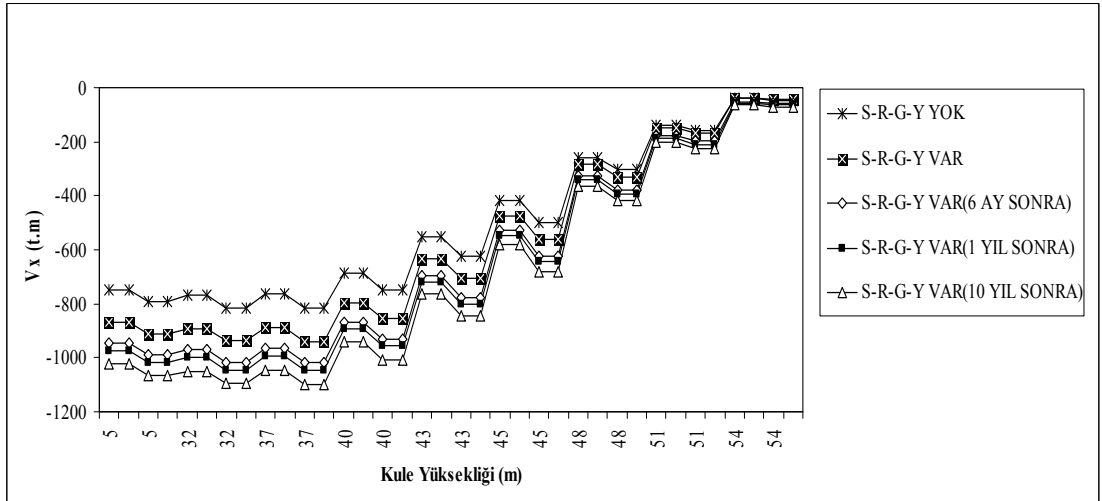
Sünme, rötne, gevşeme ve yaşlanma gibi çevresel etkenlerin batı kulesi kesme kuvveti üzerindeki etkileri çalışmada dikkate alınan her üç model için Şekil 3.35-3.37'de gözlenmektedir. Her üç model için de elde edilen değişim paralellik göstermekle birlikte, Model 2 ve Model 3'de çevresel etkenlerin etkisinin daha büyük olduğu görülmektedir. Dikkate alınan tüm modellerde görüleceği üzere, yıllara bağlı olarak beton ve çelik elemanlarda çevresel etkenler ile oluşacak değişimler sebebiyle kesme kuvvetlerinde artışlar meydana gelmiştir.

Kule taban noktasında çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için elde edilen kesme kuvveti değeri Model 1'de, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki kesme kuvveti değerinden %7 daha fazla olurken, Model 2'de bu oran %16 ve Model 3 için %27 olmaktadır. Yine kule taban noktasında çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis süresi için belirlenen kesme kuvveti değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen kesme kuvveti değerinden Model 1 için %4, Model 2 için %8 ve Model 3 için %10 daha büyük çıkmıştır. Ayrıca, yine kule taban noktasında Model 1 için 10 yıllık servis süresi için elde edilen kesme kuvveti değeri, 6 aylık servis süresi için elde edilen kesme kuvveti

değerinden %4 daha büyük olmuştur. Model 2 ve Model 3 için elde edilen oranlar ise sırasıyla %8 ve %12'dir.

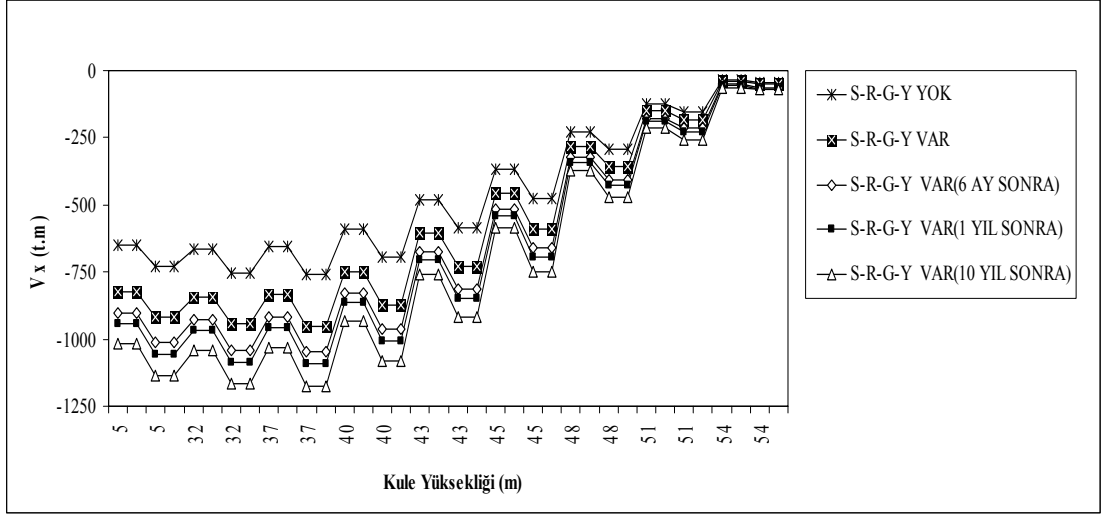


Şekil 3.35. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 1)



Şekil 3.36. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 2)



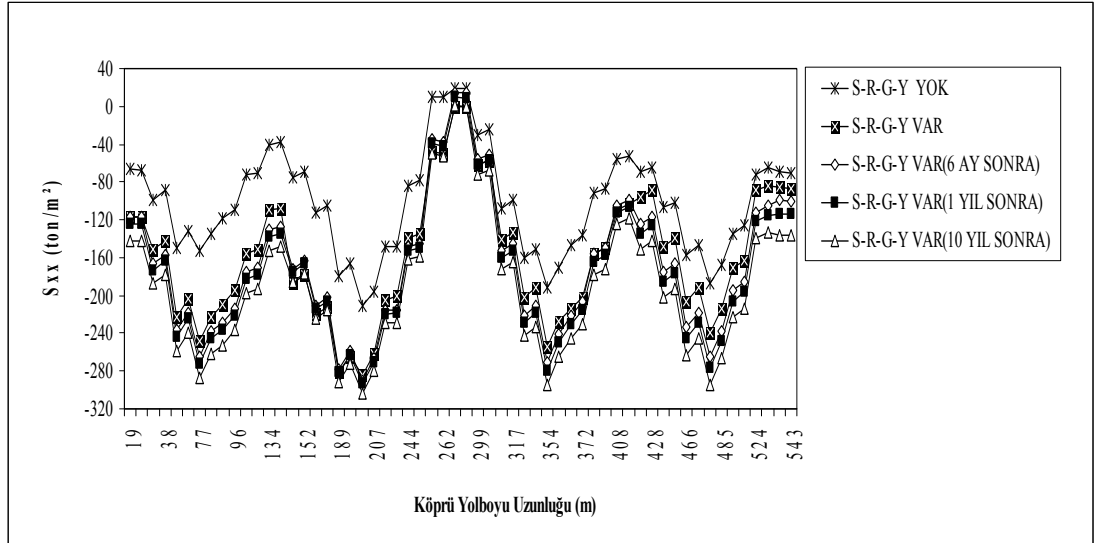


Şekil 3.37. Kule yüksekliği boyunca kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)

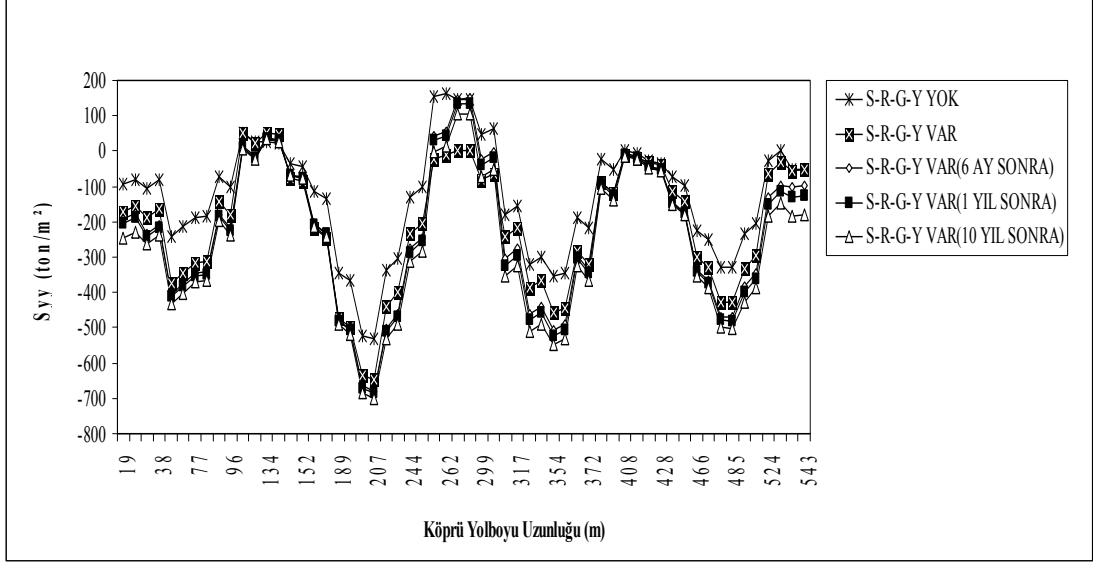
### 3.5. Köprü Tabliyesinde Oluşan Gerilmeler

Daha önce de ifade edildiği gibi Quincy Bayview köprüsüne ait en gerçekçi model Model 3'dür. Model 3 ile Quincy Bayview köprüsünün tabliyesi düzlem elemanlar ile tanımlanırken, ana kirişler gerçekte olduğu gibi "I" kesitli çelik çubuk elemanlar ile tanımlanmıştır. Burada çevresel etkenlerin tabliye gerilme bileşenleri üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu amaçla da Şekil 3.38-3.39'da  $S_{xx}$  ve  $S_{yy}$  gerilme bileşenleri karşılaştırılmaktadır.  $S_{xx}$  gerilme bileşeni için 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri için çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumlardaki gerilme değerleri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki gerilme değerlerinden önemli oranda daha büyük çıkmıştır. En büyük  $S_{xx}$  gerilme değerinin elde edildiği tabliye noktasında, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen gerilme değeri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki gerilme değerinden %34 daha büyük çıkmıştır. Bununla birlikte çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis süresi için aynı noktada belirlenen gerilme değeri, yine çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen gerilme değerinden %2 daha büyük olmuştur. Ayrıca, yine aynı noktada 10 yıllık servis süresi için belirlenen gerilme değeri, 6 aylık servis süresi için belirlenen gerilme değerinden %4 daha büyük çıkmıştır.

$S_{yy}$  gerilme bileşenleri için elde edilen değişim,  $S_{xx}$  gerilme bileşenleri için elde edilen değişime benzemekle birlikte,  $S_{yy}$  gerilme bileşeni için çevresel etkenlerin özellikle belirli noktalarda daha az etkili olduğu gözlenmektedir.  $S_{yy}$  gerilme bileşeni için en büyük gerilme değerinin elde edildiği tabliye noktasında, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen gerilme değeri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki gerilme değerinden %22 daha büyük çıkmıştır. Bunun yanında çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis süresi için aynı noktada belirlenen  $S_{yy}$  gerilme değeri, çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen gerilme değerinden %5 daha büyük olmuştur. Yine aynı noktadaki 10 yıllık servis süresi için belirlenen gerilme değeri, 6 aylık servis süresi için belirlenen gerilme değerinden %3 daha büyük çıkmıştır.



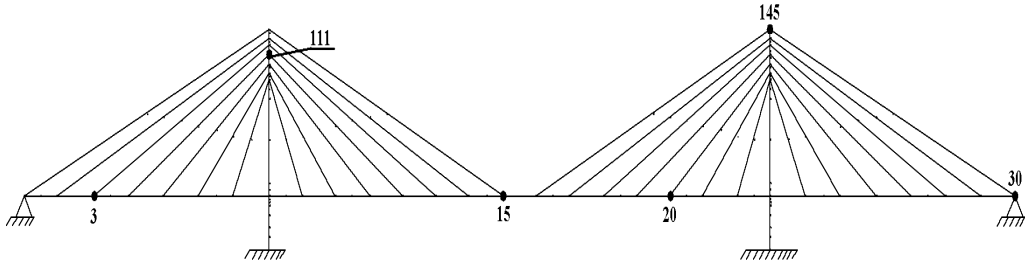
Şekil 3.38. Köprü yolboyu  $S_{xx}$  gerilme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)



Şekil 3.39. Köprü yolboyu  $S_{yy}$  gerilme değerlerinin karşılaştırılması (Model 3)

### 3.6. Konsol Dilimler Halindeki Yapım Aşaması ve Servis Aşaması Süresince Düğüm Noktaları Yerdeğiştirmelerinin Değişimi

Bu bölümde seçilen bazı noktaların (Şekil 3.40) dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince yerdeğiştirme bileşenlerinin değişimi incelenmektedir.



Şekil 3.40. Köprüde kullanılan düğüm noktalarının gösterimi

### 3.6.1. Model 1

Şekil 3.41’de 3 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 3 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 13. dilim olarak kuleye bağlanmıştır ve bu nedenle 13.dilimden sonraki aşamalarda 3 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirmelerin hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmelerden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %39 kadar daha büyük çıkmıştır.

6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen oran %40 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %45 olmaktadır.

111 nolu batı kulesine ait yatay yerdeğiştirmenin dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşamasına bağlı olarak değişimi Şekil 3.42’de görülmektedir. Görüleceği gibi 111 nolu noktaya ait kule elemanı, kuleye 5.dilimde bağlandığından, bu dilime kadarki yerdeğiştirmeler sıfır iken, bu dilimden sonra yerdeğiştirmeler bir artış göstermektedir. Dilim dilim yapım aşaması devam ederken, 17.dilim aşamasına yakın dilimlerde yerdeğiştirme değeri 6 cm’ye kadar çıkarken, 19.dilimden sonra bu noktanın bir dengeye ulaştığı gözlenmektedir. İnşaat aşaması süresince çevresel etkenlerin yerdeğiştirmeleri artırdığı gözlenen, servis aşaması süresince çevresel etkenlerin bu düğüm noktası üzerinde önemli bir etkisi gözükmemektedir.

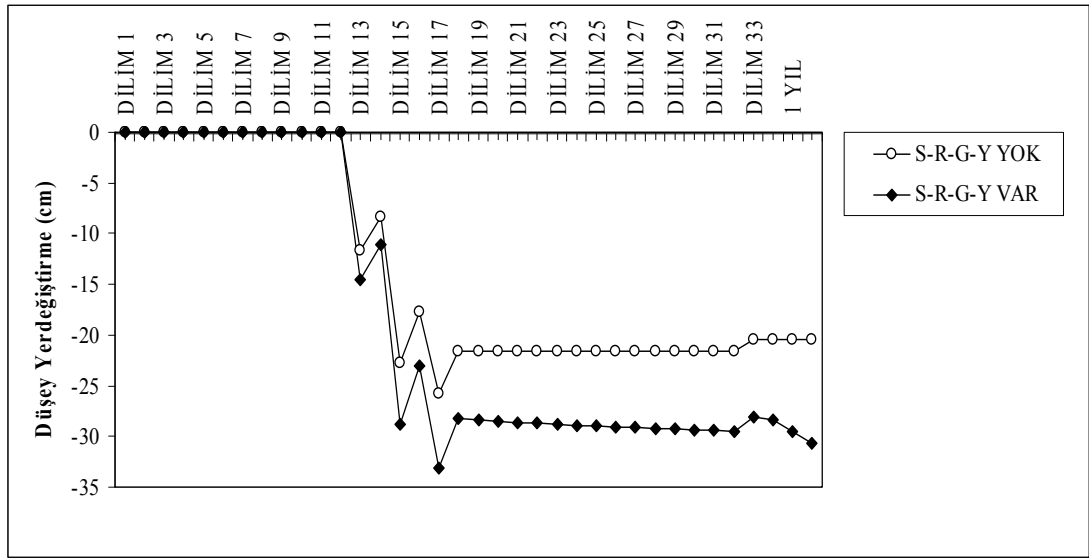
Şekil 3.43’de 15 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 15 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 18. dilim yani batı kulesine en son dilim olarak bağlanmıştır ve bu nedenle 18.dilimden sonraki aşamalarda, 15 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme hem yapım aşaması hem de servis aşaması

süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmeden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %42 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %48 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %59 olmaktadır.

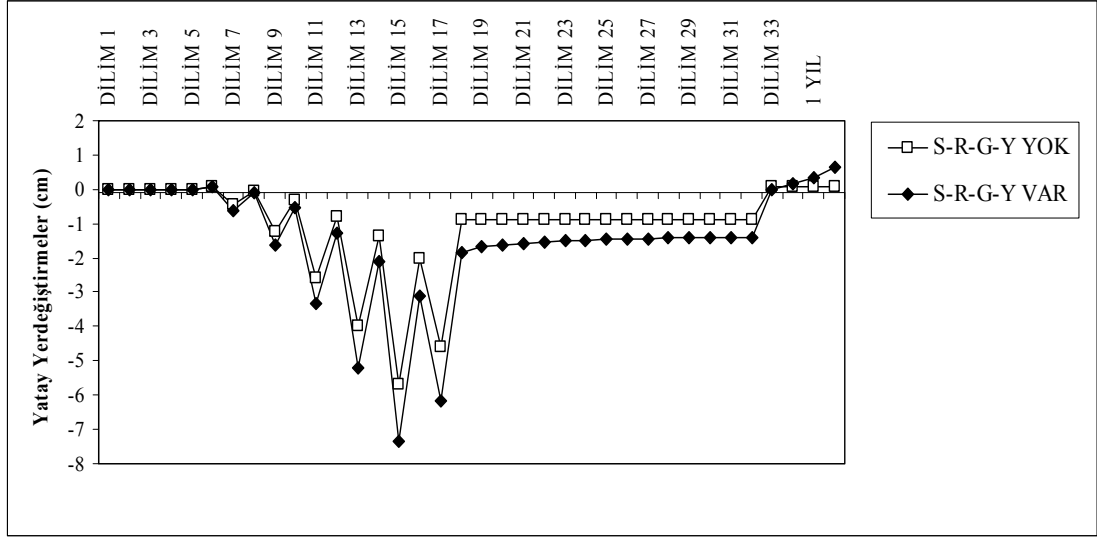
Şekil 3.44’de 20 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 20 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 23. dilim olarak kuleye bağlanmıştır ve bu nedenle 23.dilimden sonraki aşamalarda 20 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmeden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %29 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %32 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %53 olmaktadır.

145 nolu doğu kulesine ait yatay yerdeğiştirmenin dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşamasına bağlı olarak değişimi şekil 3.45’de görölmektedir. Görüleceği gibi 145 nolu noktaya ait kule elemanı, kuleye 4.dilimde bağlandığından, bu dilime kadarki yerdeğiştirmeler sıfır iken, 4.dilimden 19.dilime kadar yani doğu kulesine tabliyelerin bağlanmaya başlanmasından sonra yerdeğiştirmelerde bir artış görölmektedir. İnşaat aşaması süresince çevresel etkenlerin yerdeğiştirmeleri artırdığı gözlenirken, yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %30 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %33 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %35 olmaktadır.

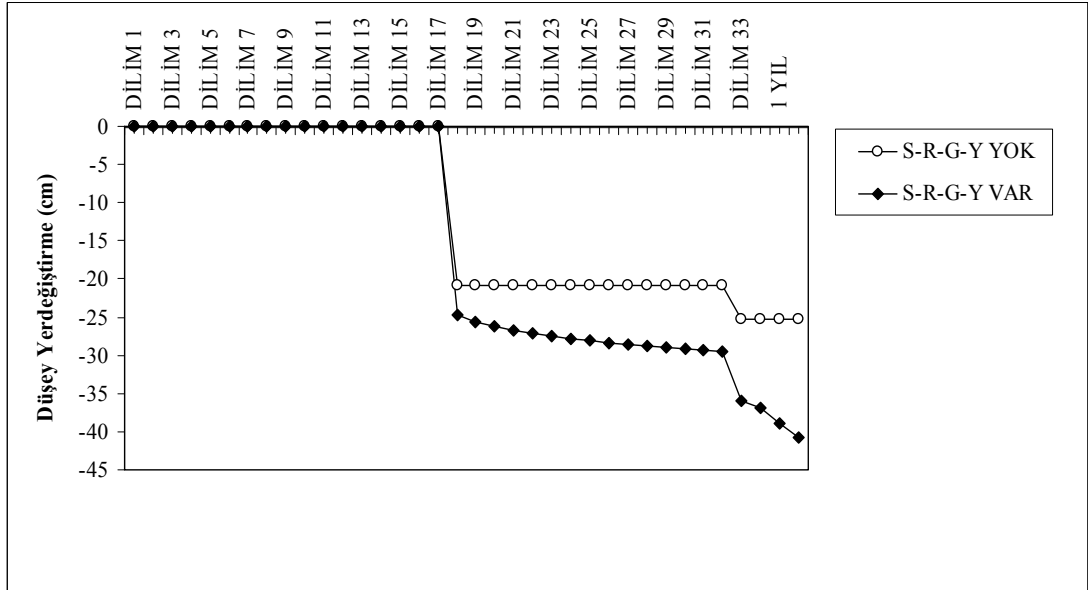
30 nolu tabliye noktasına ait hesaplanan yerdeğiştirmenin dilim aşamalarına bağlı olarak değişimi Şekil 3.46'da verilmektedir. 30 nolu nokta 32.dilimde tamamlandığından, bu noktaya kadarki yerdeğiştirmeler sıfır olmuştur. 33.dilim sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edilmesi durumunda elde edilen yerdeğiştirmeye oranla %36 fazla olurken, 6 aylık servis aşaması sonunda bu oran %50, 1 yıl sonunda %73 ve 10 yıl sonunda %90 olmuştur.



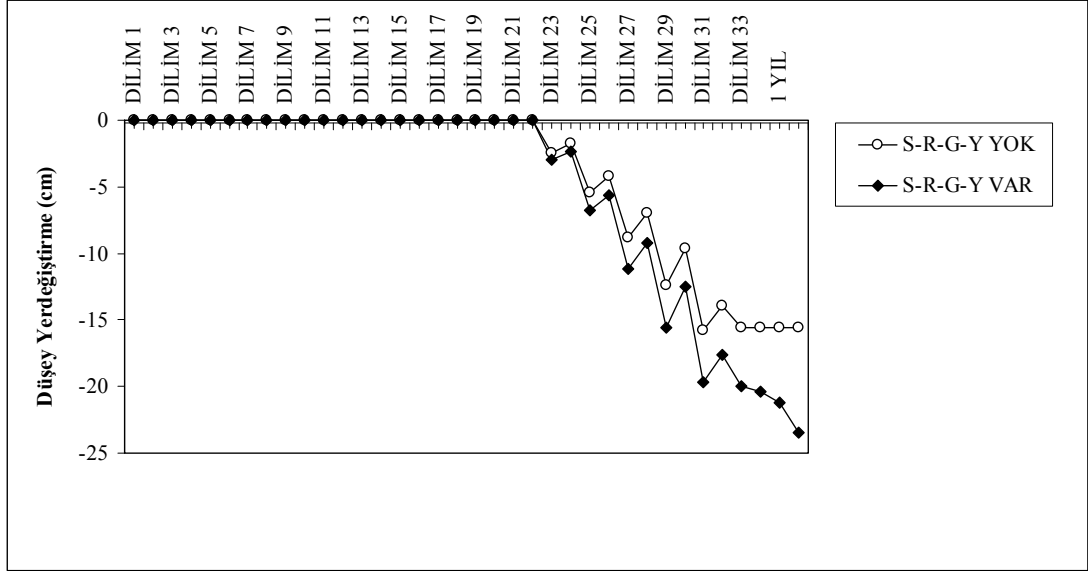
Şekil 3.41. 3 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1)



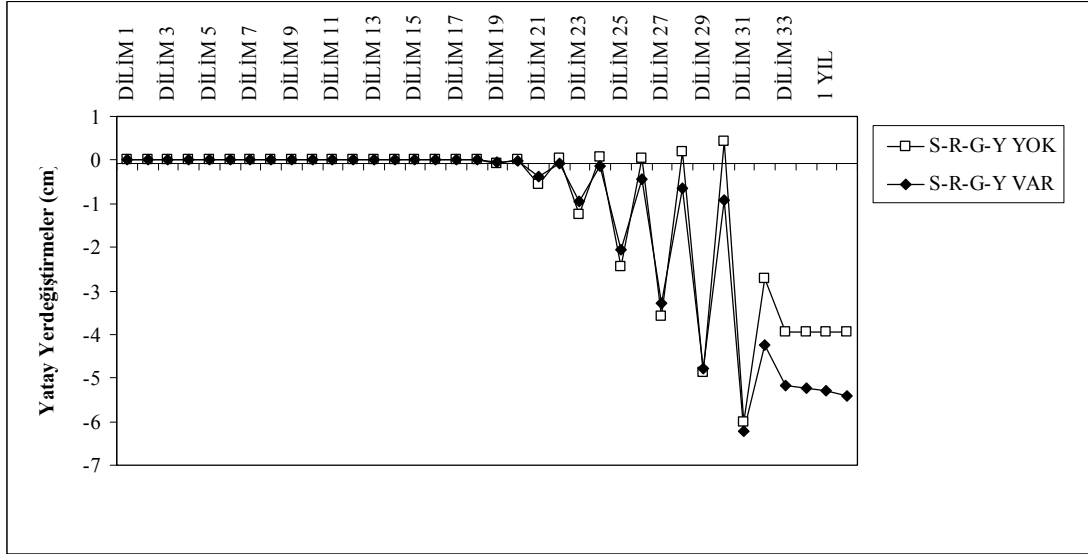
Şekil 3.42. 111 Nolu düğüm noktasında yerdeğişirme değerinin karşılaştırılması (Model 1)



Şekil 3.43. 15 Nolu düğüm noktasında yerdeğişirme değerinin karşılaştırılması (Model 1)

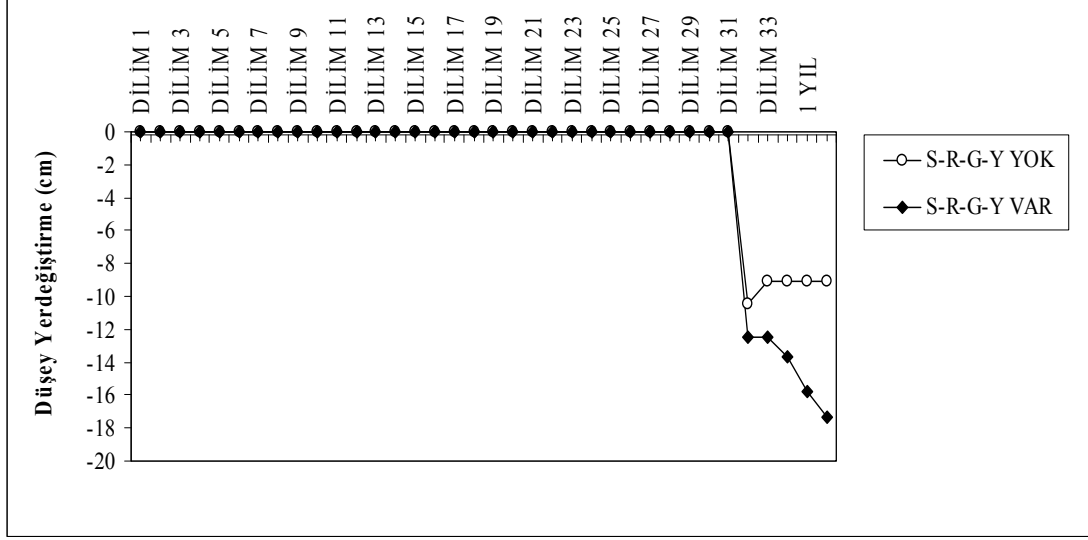


Şekil 3.44. 20 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1)



Şekil 3.45. 145 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 1)





Şekil 3.46. 30 Nolu Düğüm Noktasında Yerdeğiştirme Değerinin Karşılaştırılması (Model 1)

### 3.6.2. Model 2

Şekil 3.47'de 3 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. Model 1'de de olduğu gibi benzer durumda, 3 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 13. dilim olarak kuleye bağlanmıştır ve bu nedenle 13.dilimden sonraki aşamalarda 3 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirmelerin hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmelerden daha büyük çıkmıştır. Yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %42 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %44 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %58 olmaktadır.

111 nolu batı kulesine ait yatay yerdeğiştirmenin dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşamasına bağlı olarak değişimi Şekil 3.48'de görülmektedir. Görüleceği gibi 111 nolu noktaya ait kule elemanı, Model 1'de olduğu gibi kuleye 5.dilimde bağlandığından, bu dilime kadarki yerdeğiştirmeler sıfır iken, bu dilimden sonra

yerdeşiftirmeler bir artış göstermektedir. Dilim dilim yapım aşaması devam ederken, 17.dilim aşamasına yakın dilimlerde yerdeşiftirme değeri 7 cm'ye kadar çıkarken, 19.dilimden sonra bu noktanın bir dengeye ulaştığı gözlenmektedir.

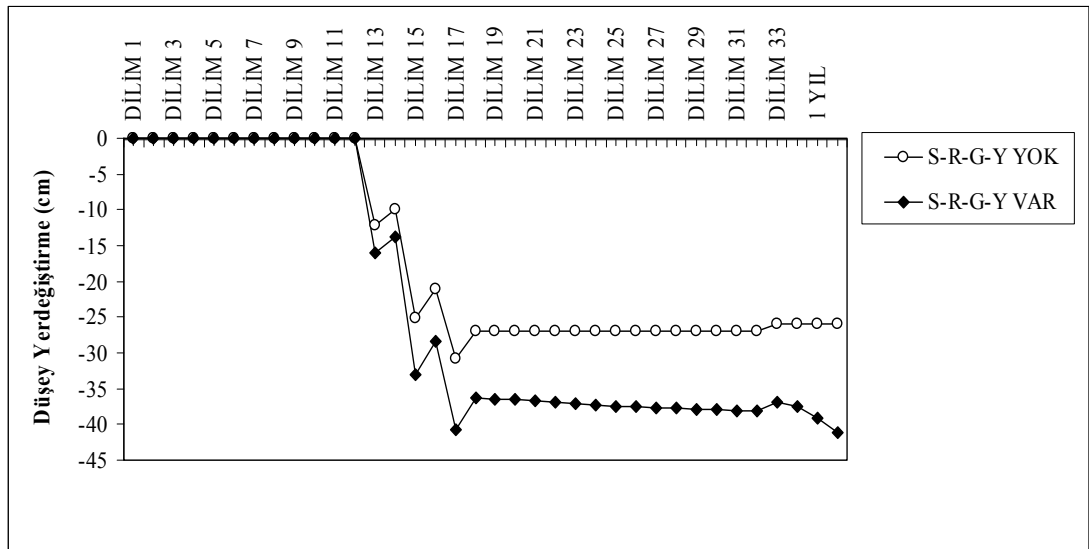
şekil 3.49'da Model 2'ye ait 15 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeşiftirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 15 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 18. dilim yani batı kulesine en son dilim olarak bağlanmıştır ve bu nedenle 18.dilimden sonraki aşamalarda 15 nolu düğüm noktasının yerdeşiftirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeşiftirme hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeşiftirmeden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeşiftirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeşiftirmeden %44 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %47 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %66 olmaktadır.

şekil 3.50'de 20 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeşiftirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 20 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 23. dilim olarak kuleye bağlanmıştır ve bu nedenle 23.dilimden sonraki aşamalarda 20 nolu düğüm noktasının yerdeşiftirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeşiftirme hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeşiftirmeden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeşiftirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeşiftirmeden %30 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %33 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %44 olmaktadır.

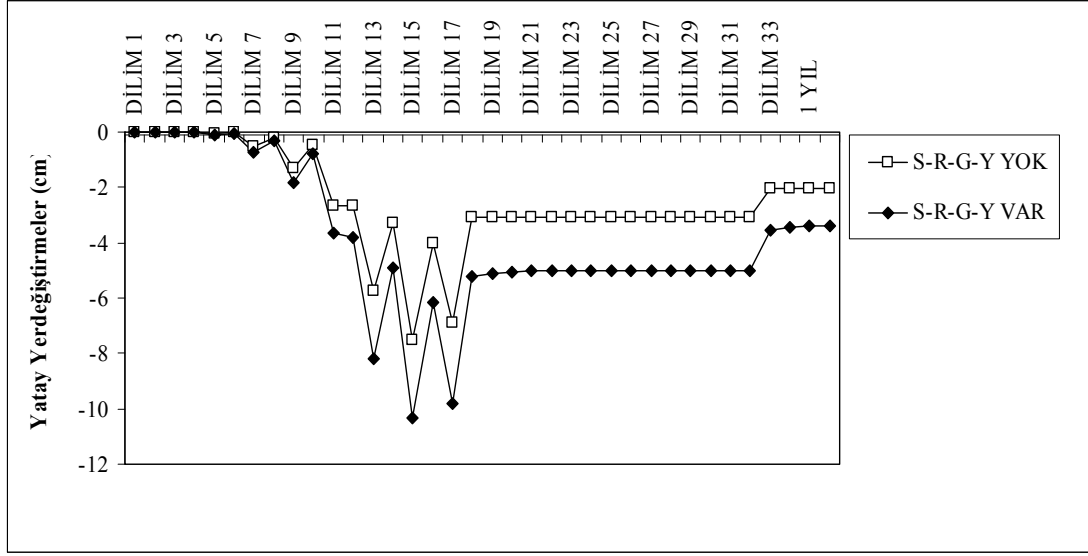
145 nolu doğu kulesine ait yatay yerdeşiftirmenin dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşamasına bağlı olarak değişimi şekil 3.51'de görölmektedir. Görüleceği

gibi 145 nolu noktaya ait kule elemanı, kuleye Model 1’de olduğu gibi 4.dilimde bağlandığından, bu dilime kadarki yerdeğiştirmeler doğu kulesine tabliyelerin bağlanmaya başladığı 19.dilime kadar sıfır iken, bu dilimden sonra yerdeğiştirmelerde bir artış olduğu görölmektedir. İnşaat aşaması süresince çevresel etkenlerin yerdeğiştirmeleri artırdığı gözlenirken, yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %15 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %34 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %37 olmaktadır.

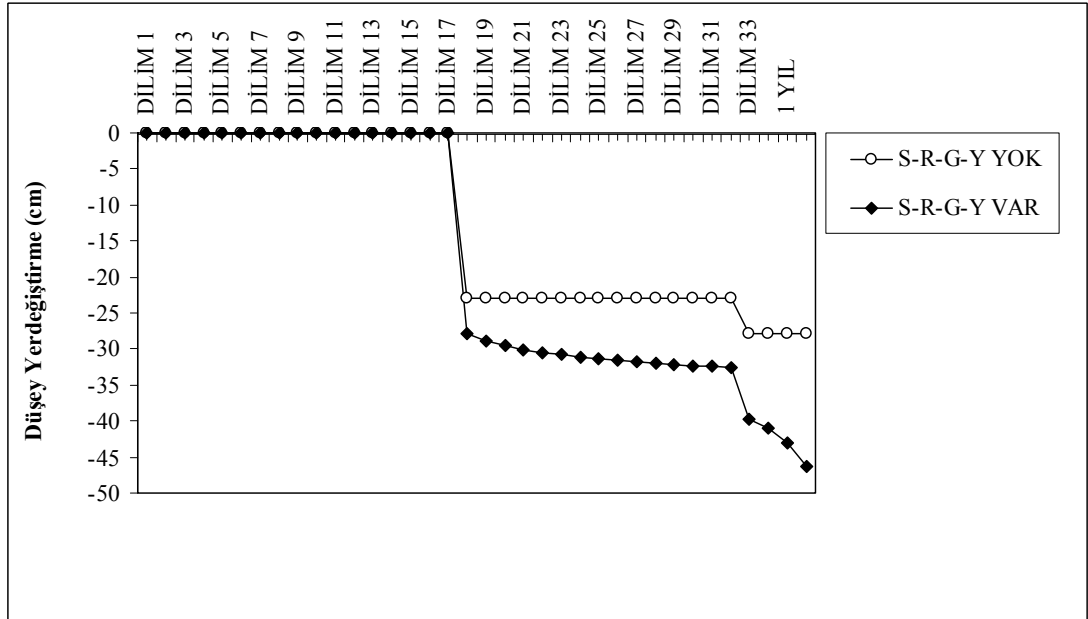
30 nolu tabliye noktasına ait hesaplanan yerdeğiştirminin dilim aşamalarına bağlı olarak değişimi şekil 3.52’de verilmektedir. 30 nolu nokta 32.dilimde tamamlandığından, bu noktaya kadarki yerdeğiştirmeler sıfır olmuştur. 33.dilim sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edilmesi durumunda elde edilen yerdeğiştirmeye oranla %36 fazla olurken, 6 aylık servis aşaması sonunda bu oran %49, 1 yılsonunda %71 ve 10 yılsonunda %101 olmuştur.



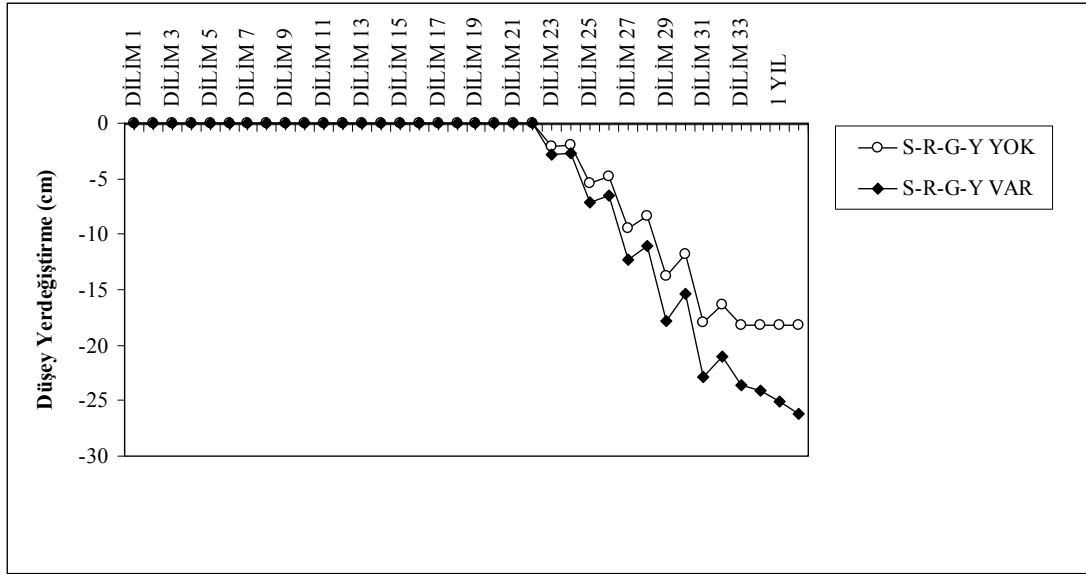
şekil 3.47. 3 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2)



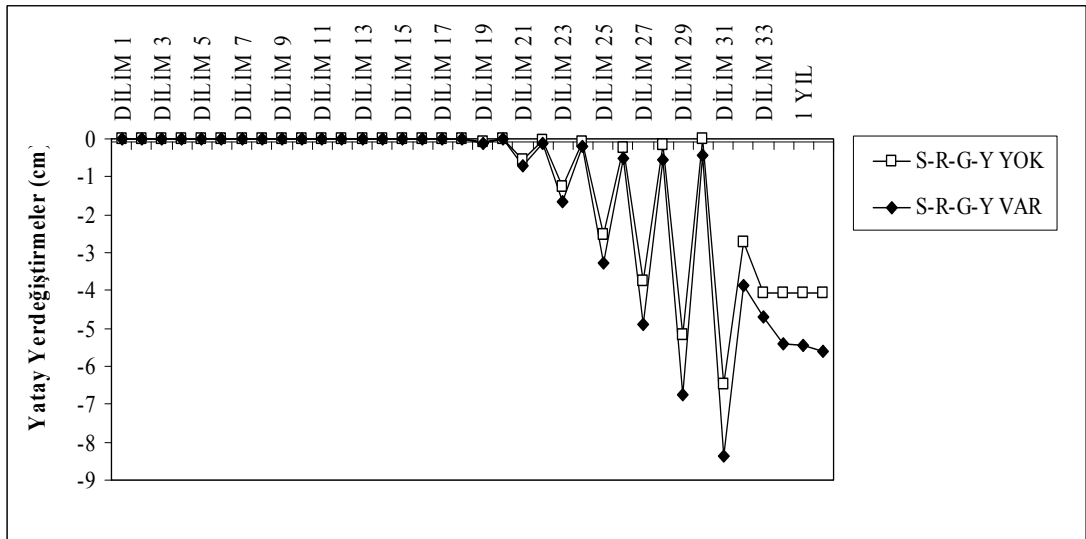
Şekil 3.48. 111 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2)



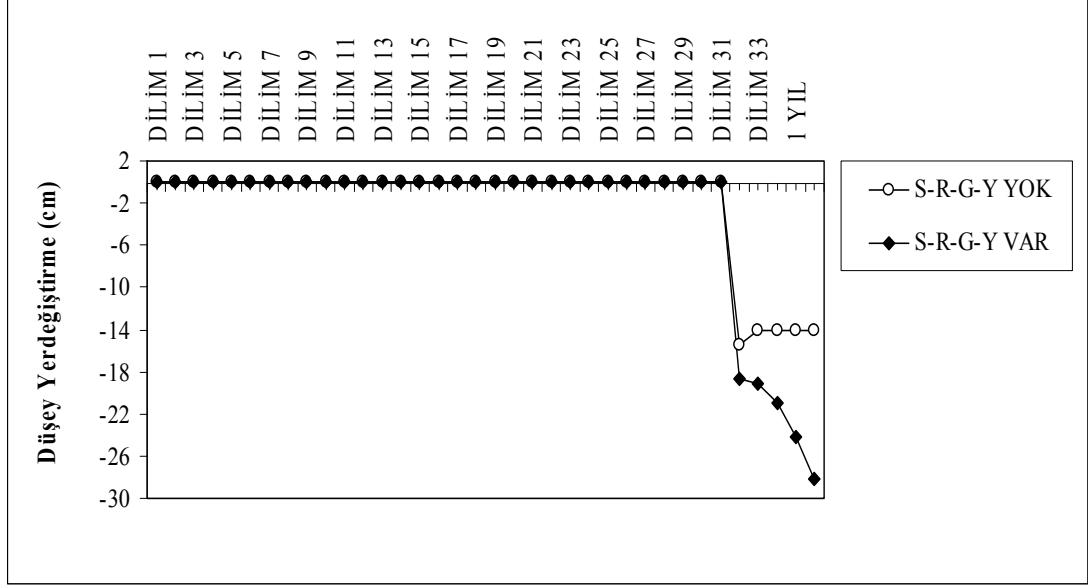
Şekil 3.49. 15 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2)



Şekil 3.50. 20 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2)



Şekil 3.51. 145 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2)



Şekil 3.52. 30 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 2)

### 3.6.3. Model 3

Şekil 3.53’de 3 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. Model 1 ve Model 2’de de olduğu gibi benzer durumda, 3 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 13. dilim olarak kuleye bağlanmıştır ve bu nedenle 13.dilimden sonraki aşamalarda 3 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirmelerin hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmelerden daha büyük çıkmıştır. Yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %57 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %60 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %77 olmaktadır.

111 nolu batı kulesine ait yatay yerdeğiştirmenin dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşamasına bağlı olarak değişimi Şekil 3.54’de görülmektedir. Görüleceği gibi 111 nolu noktaya ait kule elemanı, Model 1ve Model 2’de olduğu gibi kuleye

5.dilimde bağlandığından, bu dilime kadarki yerdeğiştirmeler sıfır iken, bu dilimden sonra yerdeğiştirmeler bir artış göstermektedir. Dilim dilim yapım aşaması devam ederken, 17.dilim aşamasına yakın dilimlerde yerdeğiştirme değeri 7 cm'ye kadar çıkarken, 19.dilimden sonra bu noktanın bir dengeye ulaştığı gözlenmektedir.

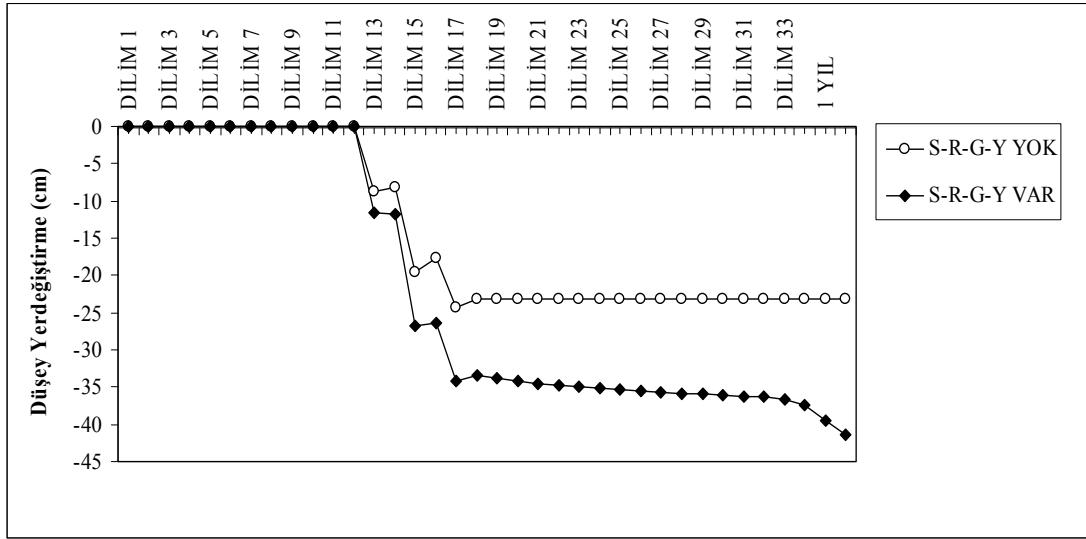
şekil 3.55'de Model 3'e ait 15 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 15 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 18. dilim yani batı kulesine en son dilim olarak bağlanmıştır ve bu nedenle 18.dilimden sonraki aşamalarda 15 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmeden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %75 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %82 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %103 olmaktadır.

şekil 3.56'da 20 nolu tabliye düğüm noktasının düşey yerdeğiştirmesi dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşaması süresince gösterilmektedir. 20 nolu düğüm noktasını içeren tabliye kısmı, görüleceği gibi 23. dilim olarak kuleye bağlanmıştır ve bu nedenle 23.dilimden sonraki aşamalarda 20 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirmeleri ortaya çıkmaktadır. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme hem yapım aşaması hem de servis aşaması süresince, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmeden daha büyük çıkmıştır. 970 gün ve 33 dilimle tamamlanan yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %39 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %44 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %58 olmaktadır.

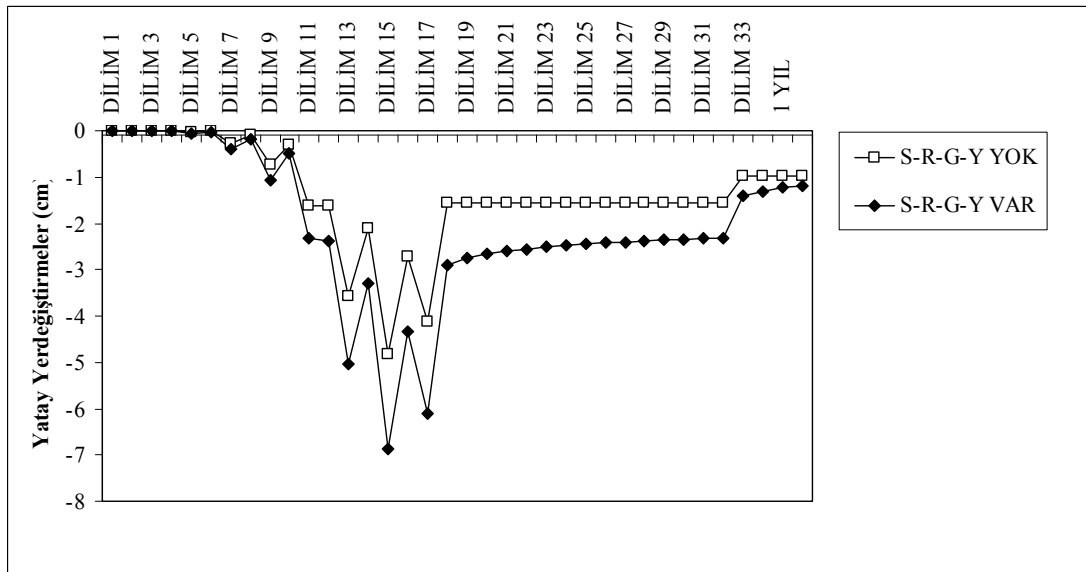
145 nolu doğu kulesine ait yatay yerdeğiştirmenin dilimler halindeki yapım aşaması ve servis aşamasına bağlı olarak değişimi Şekil 3.57’de grlmektedir. Görüleceği gibi 145 nolu noktaya ait kule elemanı, kuleye Model 1 ve Model 2’de olduğu gibi 4.dilimde bağlandığından, bu dilime kadarki yerdeğiştirmeler sıfır ve doğu kulesine tabliyelerin bağlanmaya başladığı 19.dilime kadar da yerdeğiştirmeler sıfırdır. 19.dilimden sonra yerdeğiştirmelerde bir artış göstermektedir. İnşaat aşaması süresince çevresel etkenlerin yerdeğiştirmeleri artırdığı gözlenirken, yapım aşaması sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumdaki yerdeğiştirmeden %41 kadar daha büyük çıkmıştır. 6 aylık servis aşaması sonunda elde edilen aynı oran %42 olurken, 10 yıllık servis aşaması sonrasındaki oran %46 olmaktadır.

30 nolu tabliye noktasına ait hesaplanan yerdeğiştirmenin dilim aşamalarına bağlı olarak değişimi Şekil 3.58’de verilmektedir. 30 nolu nokta 32.dilimde tamamlandığından, bu noktaya kadarki yerdeğiştirmeler sıfır olmuştur. 33.dilim sonundaki çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirme, çevresel etkenlerin ihmal edilmesi durumunda elde edilen yerdeğiştirmeye oranla %36 fazla olurken, 6 aylık servis aşaması sonunda bu oran %44, 1 yılsonunda %79 ve 10 yılsonunda %111 olmuştur.

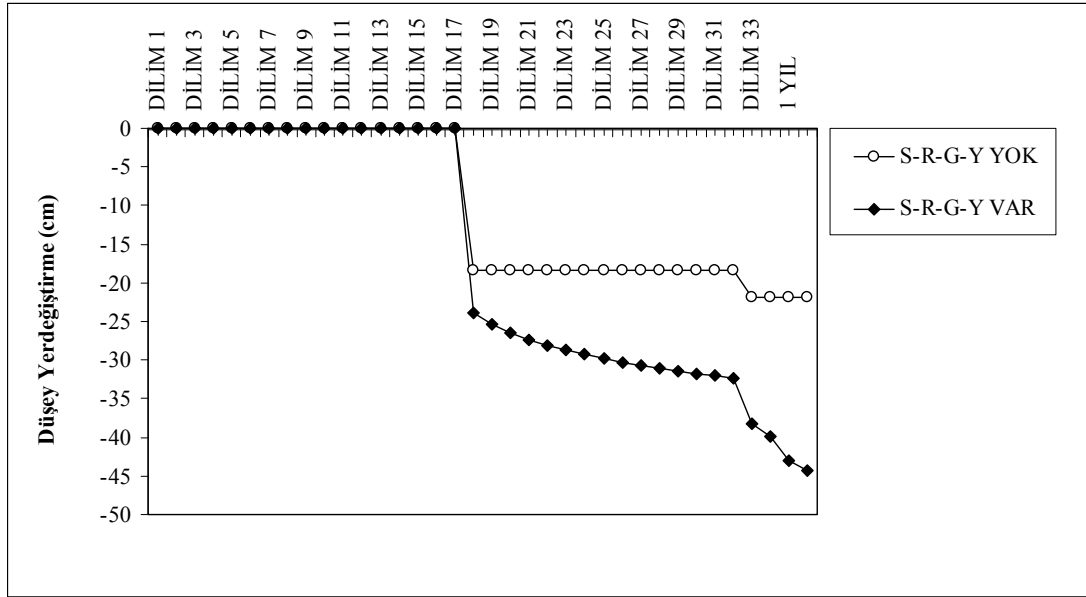




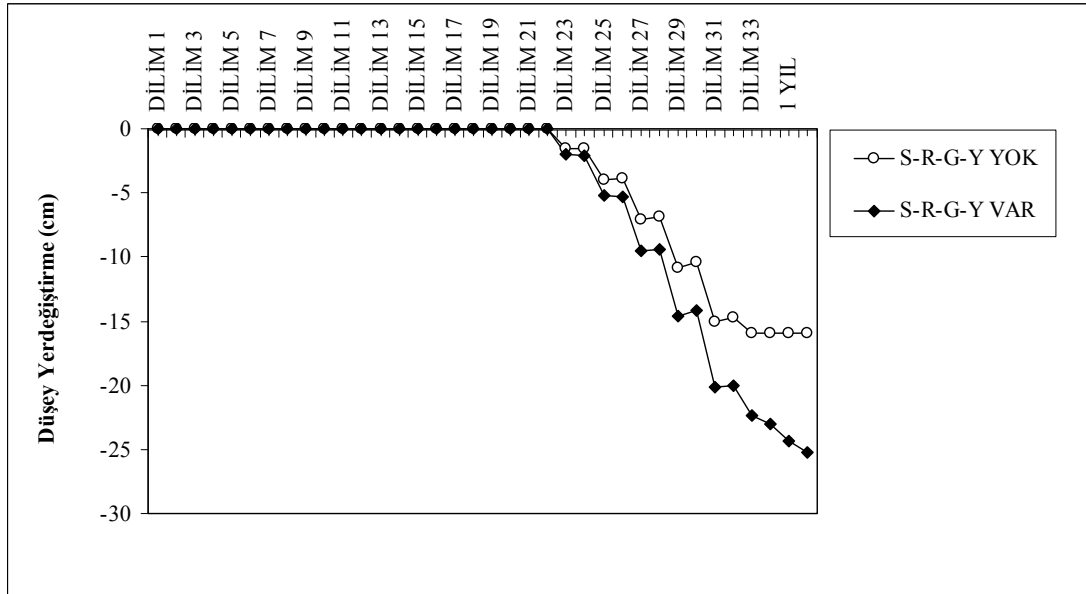
Şekil 3.53. 3 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3)



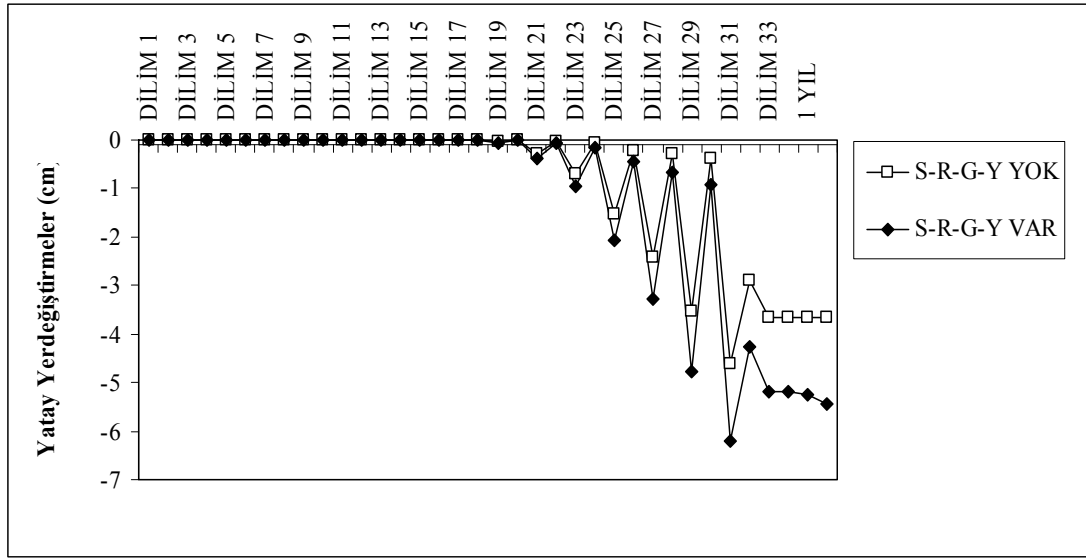
Şekil 3.54. 111 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3)



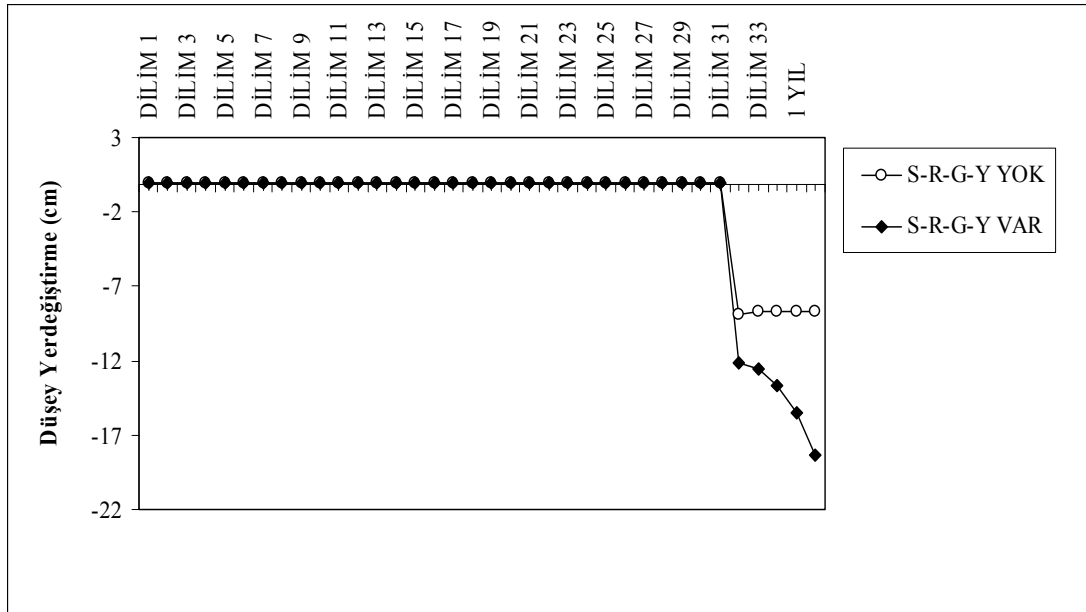
Şekil 3.55. 15 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3)



Şekil 3.56. 20 Nolu düğüm noktasında yerdeğiştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3)



Şekil 3.57. 145 Nolu düğüm noktasında yerdeğıştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3)



Şekil 3.58. 30 Nolu düğüm noktasında yerdeğıştirme değerinin karşılaştırılması (Model 3)

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada örnek sistem olarak seçilen Quincy Bayview kablolu köprüsünün betonun sünmesi, rötresi ve yaşlanması ile çelikteki gevşeme gibi zamana bağlı etkiler için konsol dilimler halinde inşa edilmesi durumunda lineer olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulurken tabliyenin modellenmesinde üç farklı model kullanılmıştır. Model 1’de tabliye, ana kirişler ve ara kirişler eşdeğer beton çubuk elemanlar ile modellenerek, kabloları tabliyeye bağlamak için rijit bağlantı elemanları kullanılmıştır. Model 2’de ise, rijit bağlantı elemanları yerine plak eleman kullanılarak tabliye rijitliği sağlanmıştır. Ana kirişler beton çubuk elemanlarla tanımlanırken, tabliye ve ara kirişler de eşdeğer beton düzlem elemanlar ile modellenmiştir. Son olarak Model 3’de, Model 2’den farklı olarak ana kirişler “I” kesitli çelik çubuk elemanlar ile modellenmiştir. Ayrıca her üç model için de kuleler beton, kablolar ve tendonlar çelik malzeme ile modellenmiştir. Tendonlar ise ardgerme işlemine tabi tutularak tabliye içerisine yerleştirilmiştir.

Böylece oluşturulan köprü sonlu eleman modelleri hem kendi ağırlığı altında hem de çevresel etkiler dikkate alınarak çözümlenmiş ve elde edilen köprü yerdeğiştirmeleri, eleman kuvvetleri ve gerilmeleri çevresel etkenler açısından karşılaştırılmıştır. Analizler, köprünün konsol dilimler halinde oluşturulduğu düşünülerek, hem 970 günlük yapım aşaması hem de 10 yıla kadarki servis aşaması dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Dikkate alınan üç sonlu eleman modeli için de tabliye ve kulelerde yerdeğiştirmeler için benzer bir değişim elde edilmiş olup, çevresel etkenlerin yerdeğiştirmeler üzerinde önemli etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, 10 yıllık bir servis süresi dikkate alındığında, 6 aylık servis süresinden sonra yerdeğiştirmelerde küçük artışlar olmuştur. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için elde edilen tabliye ve kule yerdeğiştirmeleri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğiştirmelerden genellikle büyük çıkmıştır. Her iki analiz ile belirlenen yerdeğiştirmeler arasındaki farklar dikkate alınan tüm modellerde yaklaşık ortalama

olarak %18'ler mertebesindedir. 6 aylık servis süresi için çevresel etkenler dikkate alınarak belirlenen yerdeğişirmeler ile çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki yerdeğişirmeler arasındaki fark gerek tabliye açıklığı boyunca ve gerekse kule yüksekliği boyunca değişkenlik göstermektedir. Aradaki fark üç modelde de ortalama %14'dür. Ayrıca çevresel etkenler dikkate alındığında 10 yıllık servis süresi sonunda elde edilen yerdeğişirme değerleri, 6 aylık servis süresi sonunda elde edilen yerdeğişirme değerlerine yakın olup, aradaki fark her üç modelde de ancak ortalama %6'dır.

Tabliyenin plak eleman ile tanımlandığı Model 2 ile, tabliyenin çubuk eleman olarak tanımlandığı Model 1 için tabliyede elde edilen yerdeğişirmeler yakın çıkmıştır. İki model arasındaki farklılık %20 mertebesindedir. Ancak aradaki bu fark oldukça normaldir. Çünkü tabliyenin çubuk elemanlarla tanımlandığı ve tabliyeyi kulelere bağlayabilmek için rijit bağlantı elemanlarının kullanıldığı Model 1 için elde edilen çözümlerin, tabliyenin plak eleman ile tanımlanarak diyafram davranışı sağladığı daha elastik bir modelleme ile elde edilen çözümlerden belli bir oranda büyük olması beklenen bir durumdur. Bunun yanında her iki model için kulelerde elde edilen yerdeğişirmeler hemen hemen üst üste çakışmıştır. Dolayısıyla, çubuk eleman ile modellenen köprü tabliyesi ile düzlem eleman olarak modellenen tabliye dikkate alınarak yapılan çözümlerin kule yerdeğişirmeleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Tabliyenin düzlem eleman ile modellendiği Model 2(Beton ana kiriş) ve Model 3 (Çelik ana kiriş) için elde edilen tabliye ve kule yerdeğişirmeleri oldukça yakın çıkmıştır. Model 3 ile elde edilen yerdeğişirmeler ortalama olarak Model 2 sonuçlarından %18 daha küçük çıkmıştır. Beton ana kiriş yerine daha rijit davranış göstermesi beklenen çelik ana kiriş kullanılması bu sonucu doğallaştırmaktadır.

Her üç model ile elde edilen tabliye ve kulelerdeki eleman kuvvetleri benzer bir değişim göstermiş olup, genellikle çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumda elde edilen eleman kuvvetleri, çevresel etkenlerin ihmal edildiği durumda elde edilen eleman kuvvetlerinden daha büyük çıkmaktadır. Tabliye eğilme momentleri için tersi

bir durum söz konusu olup çevresel etkenlerin dikkate alınmasıyla moment değerleri azalmıştır. Tabliye kule birleşim noktasında her iki durum arasındaki fark %10 mertebesinde dir.

Bunun yanında çevresel etkenlerin artırdığı eleman kuvvetleri en belirgin olarak kulelerdeki kesme kuvvetleri üzerinde görülmektedir. Burada çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için elde edilen kesme kuvveti değerleri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki kesme kuvveti değerlerinden %17 daha büyük olabilmektedir. Çevresel etkenlerin dikkate alındığı 6 aylık servis aşaması için belirlenen kesme kuvveti değerleri, yine çevresel etkenlerin dikkate alındığı yapım aşaması için belirlenen kesme kuvvetlerinden yaklaşık olarak %7 daha büyük çıkmıştır. Ayrıca, 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri için belirlenen eleman kuvvetleri genellikle çok yakın olup, yaklaşık olarak %10 gibi bir fark söz konusudur.

Tabliyenin düzlem elemanlar ile tanımlandığı Model 3 ile hesaplanan gerilme bileşenleri için yapım aşaması, 6 aylık, 1 yıllık ve 10 yıllık servis süreleri için çevresel etkenlerin dikkate alındığı durumlardaki gerilme değerleri, çevresel etkenlerin dikkate alınmadığı durumdaki gerilme değerlerinden önemli oranda daha büyük çıkabilmektedir. İki durum arasındaki fark %34 mertebelerine kadar ulaşmıştır. Bunun yanında 10 yıllık servis süresi ve 6 aylık servis süreleri için belirlenen gerilme bileşenleri arasında %5'e varan farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, bu tür uzun açıklıklı kablolu köprü sistemlerin analizleri yapılırken çevresel etkenlerin analiz sonuçları üzerinde etkisi olduğu unutulmamalı ve analizlerde dikkate alınmalıdır.

Kablolu köprülerin üç boyutlu modellenmesinde kullanılan rijit bağlantı elemanı ve plak modellenmesi ile yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar yakın çıkması, literatürde yaygın olarak kullanılan rijit bağlantı elemanı modellenmesinin çevresel etkenler açısından uygun bir model olduğuna işaret etmektedir.

Bunun yanında, dikkate alınan tabliye modellemelerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin de ileride incelenmesi, kablolu köprülerin davranışlarının daha iyi anlaşılması açısından önemlidir.

## KAYNAKLAR

1. Podolyn, W., "Cable-stayed versus classical suspension bridge", *Transportation Engr. Journal*, 102: 291-310 (1975).
2. Troitsky, M.S., "Cable-stayed bridges", 2<sup>nd</sup> edition, *BSP Professional Books*, London, 108-132 (1988).
3. Krishna, P., Arya, A.S., T.P., "Effect of cable stiffness on cable-stayed bridges", *Journal of Structural Engineering*, 111: 2008-2020 (1985).
4. Podolyn, Jr.W. ve Fleming, J.F., "Historical development of cable stayed bridges", *Journal of Structural Division*, 98: 2079-3095 (1972).
5. Narayan A, "Deflection analysis of prestressed concrete segmental cable-stayed bridges", Yüksek Lisans Tezi, *Concordia University*, Quebec, 14-35 (1983).
6. Abbas S, "Nonlinear geometric material and time dependant analysis of segmentally erected, three dimensional cable stayed bridges", Doktora Tezi, *Department of Civil Engineering, University of California*, Berkeley, 44-83 (1993).
7. Gimsing, N.J., "Cable supported bridges (concept and design)", 1<sup>st</sup> edition, *John Wiley and Sons*, New York, 76-112 (1983).
8. Pugsley, S.A., "The theory of suspension bridges", 2<sup>nd</sup> edition, *Edward Arnold*, London, 32-63 (1968).
9. Walther, R., "Cable-stayed bridges", first edition, *Thomas Telford*, London, 12-76 (1985).
10. Paskalov, T. ve Garevski, M., "Static and dynamic analysis of cable-stayed bridges", *International Seminar on Computer-Aided Design of Earthquake Resistant Engineering Structures*, Skopje, 1-27 (1985).
11. O'conner C., "Design of bridge superstructures", 1<sup>st</sup> edition, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 17-108 (1971).
12. "Design manual for orthotropic steel plate deck bridges", 1<sup>st</sup> edition, *American Institute of Steel Construction, Inc.*, New York, 24-124 (1963).
14. Tappin, R.G.R. ve Clark, P.J., "Jindo and Dolsan Bridges design" *Proc. Instn Civ. Engrs.*, 78: 1281-1300 (1985).
16. Rees, A. ve Kim, S.J., "Jindo and Dolsan Bridges construction", *Proc. Instn Civ. Engrs.*, 78: 1301-1324 (1985).



17. Garevski, M., Brownjohn, J.M.W., Blakeborough, A. ve Severn R.T., "Resonance-search tests on a small-scale model of a cable-stayed bridge", *Engineering Struct.*, 13: 59-66 (1991).
18. Hegab, H.I.A., "Energy analysis of cable stayed bridges", *Journal of Structural Engineering*, 110: 1182-1194 (1986).
19. Baron, F. ve Lien, S.H., "Analytical studies of a cable stayed girder bridge", *Computers and Structures*, 23: 443-465 (1973).
20. Morris, N.F., "Dynamic analysis of cable-stiffened structures", *Journal of the Structural Division*, 14: 971-981 (1974).
21. Fleming, J.F., "Nonlinear static analysis of cable-stayed bridge structures", *Computers and Structures*, 10: 621-635 (1979).
22. Lazar, B.E., "Stiffness analysis of cable-stayed bridges", *Proceedings of Structural Division*, 98: 1605-1612 (1972).
23. Tang, M.C., "Analysis of cable stayed girder bridges", *Proceedings of Structural Division*, 97: 1481-1495 (1971).
24. Lazar, B.E., Troitsky, M.S. ve Doughlass, M. McC, "Load balancing analysis of cable stayed bridges", *Proceedings of Structural Division*, 98: 1725-1740 (1972).
25. Tang, Man-Chung, "Design of cable-stayed girder bridges", *Proceedings of Structural Division*, 98: 1789-1802 (1972).
26. Goschy, B., "Dynamics of cable stayed pipe bridges", *Acier-Stahl-Steel*, 26: 277-282 (1961).
27. Morris, N.F., "The use of modal superposition in nonlinear Dynamics", *Computers and Structures*, 7: 65-72 (1977).
28. Pugsley, S.A., "The theory of suspension bridges", second sdition, *Edward Arnold*, London, 54-81 (1968).
29. Celasun, H.S., "Asma köprüler", *İ.D.M.M. Akademisi Yayın Müd. Basımevi*, İstanbul, 16-34 (1981).
30. Bulson, P.S., Caldwell, J.B., Severn, R.T., "Engineering structures developments in the twentieth century", *The University of Bristol Pres*, Bristol, 54-77 (1983).
31. Abo-Hamid, M. and Utku, S., "Analytical study of suspension bridge flutter", *Journal of Engineering Mechanics*, 56: 537-550 (1978).

32. “İşletmeye açılışının 10. yıl dönümünde İstanbul Boğaziçi Köprüsü”, *T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü*, İstanbul, 12-26 (1983).
33. Dumanoglu, A.A. and Sevem, R.T., “Asynchronous seismic analysis of modern suspension bridges, Part 1: Free Vibration”, *University of Bristol*, Bristol, 34-43 (1985).
34. Brownjohn, J.M.W., Dumanoglu, A.A. and Sevem, R.T., “Ambient vibration survey of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) suspension bridge”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 21: 907-924 (1992).
35. Dumanoglu, A.A., Brownjohn, J.M.W. and Sevem, R.T., “Seismic analysis of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) suspension bridge”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21: 881-906 (1992).
36. Merritt, F.S., “Standard Handbook for civil engineers”, third edition, *McGraw-Hill*, New York, 21-65 (1983).
37. Routh, E.J., “Dynamics of systems of rigid bodies”, 6<sup>th</sup> edition, *MacMillan and Co.*, New York, 8-23 (1905).
38. Steinman, D.B., “Modes and natural frequencies of suspension bridge oscillations”, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 11: 148-160 (1959).
39. Devenport, A.G., “A Statistical Approach to the treatment of wind loading on tall masts and suspension bridges”, *Ph.D. Thesis, University of Bristol*, Bristol, (1961).
40. Walshe, D.E. and Rayner, “D.V., A further aerodynamic investigation for the proposed River Severn Suspension Bridge”, *N.P.L. Aerodynamic Division*, London, (1962).
41. Frazer, R.A. and Scruton, C, “A summarised account of the severn bridge aerodynamic investigation”, *N.P.L. Report*, London, 231-265 (1952).
42. Abdel-Ghaffar, A.M., “Vertical vibration analysis of suspension bridges”, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 10: 2053-2075 (1980).
43. Ohshima, H., Şato, K. ve Watanabe, N., “Structural analysis of suspension bridges”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 110: 392-404 (1984).
44. Abdel-Ghaffar, A.M. and Rubin, L.I., “Nonlinear free vibrations of suspension bridges: Theory”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 109: 313-329 (1983).
45. Abdel-Ghaffar, A.M. and Rubin, L.I., “Nonlinear free vibrations of suspension bridges: Application”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 109: 330-345 (1983).

46. Brownjohn, J.M.W., "Observations on non-linear dynamic characteristics of suspension bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23: 1351-1367 (1994).
47. Brownjohn, J.M.W., Dumanoğlu, A.A., Sevem, R.T. ve Blakeborough, A., "Ambient vibration survey of the bosporus suspension bridge", *Report No.UBCE-EE-88-1, University of Bristol*, Bristol, 121-144 (1988).
48. Bendat, S.J. ve Piersol, A.G., "Random Data: Analysis and measurement procedures", first edition, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 33-87 (1971).
49. N.C.Cluyet ve R.Shepherd, "Analysis of concrete cable-stayed bridges for creep, shrinkage and relaxation effects", *Department of Civil Engineering, California State Polytechnic University*, Pomona, U.S.A, 110-134 (1994).
50. P.J.S.Cruz, A.R.Mari ve P.Roca, "Non-linear analysis of segmentally constructed structures", *Journal of Structural Engineering*, 10: 112-176 (1998).
51. Antonio R.Mari, "Numerical simulation of the segmental construction of three dimensional concrete frames", *Engineering Structures*, Barcelona, 10: 585-596 (2000).
52. Wilson Jc and Gravelle W, "Modelling of cable-stayed bridge for dynamic analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20: 707-721, (1991)
53. "The Complete Package For Bridge Design and Construction", *LARSA 2000*, New York, 3-66 (2008)
54. Premieniecki, J.S., "Theory of matrix structural analysis", 1<sup>st</sup> edition, *McGraw-Hill, Inc*, New York 110-145 (1968)
55. V.Kristek and Z.P.Bazant, "Shear lag effect and uncertainty in concrete box girder creep", *J.struct.Eng.ASCE* 113: 557-574 (1987).
56. Wong, YC, "Geometric nonlinear behaviour of cable-stayed bridges", Doktora Tezi, *University of Colorado*, Colorado, 30-62 (1993)

## ÖZGEÇMİŞ

### *Kişisel Bilgiler*

Soyadı, adı : DİRİ, Tolga Gökhan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 14.12.1981 Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 219 76 24  
 Faks : -  
 e-mail : [tgokhandiri@hotmail.com](mailto:tgokhandiri@hotmail.com)

### **Eğitim**

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Müh. Bölümü	2009
Lisans	Erciyes Üniversitesi/ İnşaat Müh. Bölümü	2005
Lise	Fethiye-Kemal Mumcu Anadolu Lisesi	2000

### **İş Deneyimi**

Yıl	Yer	Görev
2007-.....	DSİ	Tatbikat Mühendisi
2005-2007	KEY Proje	Proje Mühendisi

### **Yabancı Dil**

İngilizce

### **Hobiler**

Futbol, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol, Sinema, Tiyatro, Seyahat.