

# MESNETLERİNDEN FARKLI YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ KABLOLU KÖPRÜLERİN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Eda AVANOĞLU SICACIK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2011

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, kablolu köprü türü uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik davranışının, yapı-zemin etkileşimi (YZE) ve yer hareketindeki değişim etkileri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla yer hareketi değişim bileşenlerinden, korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi ile bu etkilerin birlikte dikkate alındığı analiz durumları için, farklı yer hareketleri üretilmiş ve bu yer hareketleri etkisindeki üst yapının dinamik davranışı yapı-zemin etkileşimi açısından incelenmiştir. Oluşturulan tüm yer hareketi ivmesi kayıtları, 0.5g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle, Eurocode 8'e uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Yapı-zemin etkileşimi, sistemi yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Alt sistem yaklaşımında üst yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak ele alınmış ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denge denklemleri, daha sonra üst yapı-zemin ara kesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilmiştir. Uygulama amacıyla Güney Kore'de inşa edilen Jindo Kablolu Köprüsü seçilmiştir. Deprem hareketinin değişimine bağlı olarak tanımlanan analizler için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği iki farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Çalışmadan edilen sonuçlar, hem yapı zemin etkileşiminin hem de yer hareketi değişim bileşenlerinin yapısal köprü

tepkilerini önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermiştir. Bu bakımdan uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik analizi yapılırken, yapı-zemin etkileşiminin ve yer hareketindeki değişim etkilerinin dikkate alınması önem arz etmektedir. Bu amaçlarla hazırlanan tez, aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır.

Birinci bölümde genel bilgiler üzerinde durulmakta olup, konunun önemi ile ilgili bilgiler verilmektedir.

İkinci bölümde çalışmanın amacı, konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar ve çalışmanın kapsamı hakkında bilgiler verilmektedir.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılacak yer hareketlerinin elde edilmesi ile ilgili teorik formülasyon üzerinde durulurken, uygulama amacı ile seçilen köprünün analitik modeli de oluşturulmaktadır. Ayrıca, yer hareketindeki değişim ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınabilmesi için geliştirilen bilgisayar programı ile ilgili açıklamalara da bu bölümde yer verilmektedir.

Dördüncü bölümde ise, yer hareketi değişim etkilerinin ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınan kablolu köprü sistemine etkisi elde edilen yapısal tepkilere bağlı olarak irdelenmektedir. Beşinci bölümde çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar ile öneriler verilirken, bu bölümü kaynaklar izlemektedir.

**Bilim Kodu: 911.1.029**

**Anahtar Kelimeler:** Kablolu köprü, yer hareketi değişim bileşenleri, yapı-zemin etkileşimi, filtre edilmiş beyaz gürültü, spektral yoğunluk fonksiyonu, dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi, zemin etkisi, alt sistem yaklaşımı, empedans fonksiyonu.

**Sayfa Adedi: 251**

**Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK**

**SOIL-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS OF CABLE-STAYED  
BRIDGES SUBJECTED TO MULTIPLE-SUPPORT EXCITATIONS**

**(Ph. D. Thesis)**

**Eda AVANOĞLU SICACIK**

**GAZI UNIVERSTY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**June 2011**

**ABSTRACT**

**In this study, it is intended to determine the effects of soil-structure interaction (SSI) and multiple-support excitation on the dynamic characteristics of the seismic response of cable-stayed bridges. For this purpose, ground motion time histories are simulated for multiple-support excitation, depending on the spatially varying components of incoherence, wave-passage and site-response effects. Each simulated time-history is generated to be compatible with the Eurocode 8 response spectrum normalized to 0.5g PSA. The substructure method which partitions the total soil-structure system into two substructures: the structural system and the soil system, is used to treat the soil-structure interaction problem. In order to investigate the soil-structure interaction effect on the response of cable-stayed bridges under multiple-support excitation, two-dimensional model of an existing bridge (Jindo Bridge) is used to represent the superstructure. To emphasize the relative importance of the spatial variability effects of the earthquake ground motion, bridge responses are determined for the fixed base bridge model which neglects the soil-structure interaction effect and for the bridge model which includes the soil-structure interaction effect. It is observed that both of the soil-structure interaction and spatially varying ground motions have important effects on the structural responses. The parametric study of the relative importance of the soil-bridge interaction in the presence of spatial variability components of the ground motion shows that the**

**multiple-support excitation and soil-structure interaction should be considered in the dynamic analyses of cable-stayed bridges. The thesis prepared with this purpose includes the following chapters.**

**In the first chapter, general information about the subject is given and the importance of the matter is outlined.**

**In the second chapter, the aim of the study, previous studies about the subject and information about the content of the study are given.**

**In the third chapter, the theoretical formulation about simulating ground motions is given along with the construction of the finite element model of the selected cable-stayed bridge. The flowchart of the modified computer program which includes the spatial variability of ground motion and the soil-structure interaction effect is also defined in this chapter.**

**In the fourth chapter, the influence of the soil-bridge interaction and spatial varying ground motion effects on the selected cable-stayed bridge model is discussed depending on the obtained structural responses. As the results and recommendations obtained from the analyses are given in chapter five, this chapter is followed by the references.**

**Science Code: 911.1.029**

**Key Words: Cable-stayed bridge, spatially varying ground motion components, soil-structure interaction, filtered white noise, spectral density function, wave-passage effect, incoherence effect, site-response effect, substructure method, impedance functions.**

**Page Number: 251**

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

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca sabrı, değerli katkıları ve yardımlarıyla her aőamada beni yönlendiren ve cesaretlendiren, beni yetiőtiren değerli tez hocam Doç. Dr. Kurtuluş Soyuluk'a teőekkürlerimi borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca bana her zaman destek olan annem Ayőe Avanoğlu'na sabrı, emeği ve tüm fedakarlıkları içi teőekkürlerimi sunarım. Doktora çalıőmam sırasında bana gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı oğlum Doruk'a, eőim Volkan'a ve kardeőlerim Aslıhan ve Burcu Avanoğlu'na teőekkürlerimi sunarım. Doktora tezim boyunca "Yurt İçi Doktora Burs Programı" kapsamında destek veren TUBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Baőkanlıęı'na teőekkürü borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Amaç.....	3
2.2. Konu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	3
2.2.1. Üniform olmayan yer hareketi için köprü sistemlerinin dinamik analizi konusunda yapılmış çalışmalar.....	3
2.2.2. Köprü sistemlerinin dinamik analizinde üniform olmayan yer hareketi ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar.....	7
2.2.3. Temel-zemin etkileşiminin empedans fonksiyonları ile dikkate alındığı çalışmalar .....	11
2.3. Çalışmanın Kapsamı .....	12
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	15
3.1. Yer Hareketinin Elde Edilmesi .....	15
3.2. Hareket Denklemi .....	31
3.3. Kablolu Köprüler .....	43
3.3.1. Kablolu köprülerin temel özellikleri .....	43

**Sayfa**

3.3.2. Kablolu köprünün yapısal özellikleri .....	46
3.3.3. Kablolu köprünün analitik modeli .....	48
3.4. Geliştirilen Bilgisayar Programı .....	50
4. BULGULAR VE İRDELEMELER .....	54
4.1. Köprünün Mesnetlendiği Zeminin Homojen Olması Halinde Yapı-Zemin Etkileşim Etkisinin İncelenmesi .....	54
4.2. Homojen Zeminlerde Farklı Yer Hareketi Hızları İçin Köprü Dinamik Davranışının İncelenmesi.....	69
4.2.1. Yapı–zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda (ANKR) farklı yer hareket hızları için elde edilen yapısal tepkilerin karşılaştırılması .....	74
4.2.2. Yapı–zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda (YZE) farklı yer hareketi hızları için yapısal tepkilerin karşılaştırılması .....	85
4.3. Homojen zeminlerde deprem hareketi değişim bileşenlerinin etkisinin incelenmesi .....	96
4.3.1. Homojen sert zemin ortamında deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi .....	97
4.3.2. Homojen orta zemin ortamında deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi .....	138
4.3.3. Homojen yumuşak zemin ortamında deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi .....	172
4.4. Zemin Koşullarının Değişmesi Durumunda Deprem Hareketi Değişim Bileşenlerinin Etkisinin İncelenmesi .....	206
4.4.1. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi..	212
4.4.2. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi..	215
4.5. Zemin Koşullarının Değişimine Bağlı Olarak Köprünün Dinamik Davranışının İncelenmesi.....	222

**Sayfa**

4.5.1. Ankastre mesnetli durumda köprünün dinamik davranışının incelenmesi.....	222
4.5.2. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün dinamik davranışının incelenmesi.....	227
4.5.3. Yapı-zemin etkileşiminin ve zemin şartlarındaki değişimin yapısal sistem davranışına etkisi .....	231
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	235
KAYNAKLAR .....	243
ÖZGEÇMİŞ .....	250

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Chichi depremi yumuşak zemin (TAP051W) kaydı spektral yoğunluk fonksiyonunun FBG modeli ile karşılaştırılması .....	18
Şekil 3.2. Chichi depremi orta zemin (HWA033N) kaydı spektral yoğunluk fonksiyonunun FBG modeli ile karşılaştırılması .....	18
Şekil 3.3. Chichi depremi sert zemin (ILA027E) kaydı spektral yoğunluk fonksiyonunun FBG modeli ile karşılaştırılması .....	19
Şekil 3.4. Filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeline ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu .....	20
Şekil 3.5. Korelasyon etkisinin frekansa bağlı olarak değişimi .....	22
Şekil 3.6. Şekil fonksiyonu .....	25
Şekil 3.7 a Homojen sert zemin etkisinde elde edilmiş ivme-zaman kaydı.....	30
b İvme kaydının çift integrasyonundan elde edilmiş yerdeğiştirme zaman kaydı.....	30
Şekil 3.8. a Eksen düzeltilmesi yapıldıktan sonra elde edilen ivme zaman kaydı.....	30
b İvme kaydının çift integrasyonundan elde edilmiş eksen düzeltilmesi yapılmış yerdeğiştirme zaman kaydı.....	30
Şekil 3.9. Temel ve serbestlikler .....	37
Şekil 3.10. Kabloların lineer olmayan etkisi.....	45
Şekil 3.11. Jindo Köprüsü genel görünümü .....	48
Şekil 3.12. Jindo köprüsünün 2 boyutlu matematik modeli.....	49
Şekil 3.13. Bilgisayar programı akış diyagramı.....	53
Şekil 4.1. Üniform yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi .....	54
Şekil 4.2. Sert zemin ortamı için üretilen yer hareketi ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonunun filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile karşılaştırılması .....	57

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.3. Orta zemin ortamı için üretilen yer hareketi ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonunun filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile karşılaştırılması .....	57
Şekil 4.4. Yumuşak zemin ortamı için üretilen yer hareketi ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonunun filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile karşılaştırılması .....	58
Şekil 4.5. Tasarım Spektrumu .....	58
Şekil 4.6. a. Sert zemin ortamı için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması .....	59
b. Orta zemin ortamı için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması.....	59
c. Yumuşak zemin ortamı için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.7. Homojen sert zemin a. ivme-zaman b. yerdeğiştirme-zaman grafikleri....	60
Şekil 4.8. Homojen orta zemin a. ivme-zaman b. yerdeğiştirme-zaman .....	60
Şekil 4.9. Homojen yumuşak zemin a. ivme-zaman b. yerdeğiştirme-zaman .....	61
Şekil 4.10. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri.....	65
Şekil 4.11. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri .....	65
Şekil 4.12. Tabliye dinamik eğilme momentleri.....	66
Şekil 4.13. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri.....	66
Şekil 4.14. Jindo Kulesi eksenel kuvvetleri .....	67
Şekil 4.15. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri .....	67
Şekil 4.16. Jindo Kulesi tepe noktası dinamik yatay yerdeğiştirme zaman grafiği ...	68
Şekil 4.17. Merkez açıklık orta nokta dinamik düşey yerdeğiştirme zaman grafiği..	68
Şekil 4.18. Üniform olmayan yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi.....	69
Şekil 4.19. C Zemin sınıfı için üretilen yer hareketine ait ( $V_{app}=250$ m/s) hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması .....	71
Şekil 4.20. Homojen orta zemin ( $V_{app}=250$ m/s) ivme-zaman grafikleri.....	72

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.21. Homojen orta zemin ( $V_{app}=250$ m/s) yerdeğiştirme-zaman grafikleri...	73
Şekil 4.22. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri.....	76
Şekil 4.23. Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmeleri .....	76
Şekil 4.24. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri.....	77
Şekil 4.25. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri.....	77
Şekil 4.26. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR) .....	80
Şekil 4.27. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)..	80
Şekil 4.28. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	81
Şekil 4.29. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	81
Şekil 4.30. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR) .....	83
Şekil 4.31. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)....	83
Şekil 4.32. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	84
Şekil 4.33. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	84
Şekil 4.34. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE).....	87
Şekil 4.35. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE) .....	87
Şekil 4.36. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) .....	88
Şekil 4.37. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) .....	88
Şeki 4.38. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE).....	90
Şekil 4.39. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE) .....	90
Şekil 4.40. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) .....	91
Şekil 4.41. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) .....	91
Şekil 4.42. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi .....	94
Şekil 4.43. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme değişimi.....	94

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.44. Tabliye toplam eğilme moment değişimi .....	95
Şekil 4.45. Jino Kulesi toplam eğilme moment değişimi.....	95
Şekil 4.46. Üniform ve üniform olmayan yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi .....	98
Şekil 4.47. Sert zemin ortamında genel durum için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması .....	100
Şekil 4.48. Genel durum için homojen sert zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri.....	101
Şekil 4.49. Genel durum için homojen sert zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme zaman grafikleri .....	102
Şekil 4.50. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B).....	105
Şekil 4.51. Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B) .....	105
Şekil 4.52. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B).....	106
Şekil 4.53. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B).....	106
Şekil 4.54. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR) .....	109
Şekil 4.55. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR) .....	109
Şekil 4.56. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR).....	110
Şekil 4.57. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR).....	110
Şekil 4.58. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı B, ANKR) .....	111
Şekil 4.59. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı B, ANKR).....	111
Şekil 4.60. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR) .....	113
Şekil 4.61. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR)..	113
Şekil 4.62. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR).....	114
Şekil 4.63. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR).....	114

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.64. Tabliye orta noktası düşey yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (ANKR).....	116
Şekil 4.65. Kule tepe noktası yatay yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (ANKR).....	117
Şekil 4.66. Kule alt bölümündeki bir düğüm noktasına yatay yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (ANKR) .....	117
Şekil 4.67. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE).....	120
Şekil 4.68. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE) ...	120
Şekil 4.69. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE) .....	121
Şekil 4.70. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE) .....	121
Şekil 4.71. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE).....	123
Şekil 4.72. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE) .....	123
Şekil 4.73. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE) .....	124
Şekil 4.74. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE) .....	124
Şekil 4.75. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi .....	127
Şekil 4.76. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi .....	127
Şekil 4.77. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme değişimi.....	128
Şekil 4.78. Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi .....	128
Şekil 4.79. Tabliye orta noktası düşey yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (YZE) .....	130
Şekil 4.80. Kule tepe noktası düşey yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (YZE) .....	130
Şekil 4.81. Kule alt bölümündeki bir düğüm noktasının yatay yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (YZE).....	131
Şekil 4.82. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri.....	133
Şekil 4.83. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri .....	133

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.84. Tabliye dinamik eğilme momentleri .....	134
Şekil 4.85. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri .....	134
Şekil 4.86. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri.....	136
Şekil 4.87. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri .....	136
Şekil 4.88. Tabliye dinamik eğilme momentleri .....	137
Şekil 4.89. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri .....	137
Şekil 4.90. Üniform ve üniform olmayan yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi .....	138
Şekil 4.91. Orta zemin ortamında genel durum için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması .....	140
Şekil 4.92. Genel durum için homojen orta zemin ortamında elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	141
Şekil 4.93. Genel durum için homojen orta zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme-zaman grafikleri.....	142
Şekil 4.94. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C).....	144
Şekil 4.95. Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C) .....	144
Şekil 4.96. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C).....	145
Şekil 4.97. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C).....	145
Şekil 4.98. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR) .....	147
Şekil 4.99. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	147
Şekil 4.100. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	148
Şekil 4.101. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	148
Şekil 4.102. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı C, ANKR) .....	149
Şekil 4.103. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı C, ANKR).....	149
Şekil 4.104. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR) .....	151

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.105. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR) 151	
Şekil 4.106. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)..... 152	
Şekil 4.107. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)..... 152	
Şekil 4.108. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)..... 155	
Şekil 4.109. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE) . 155	
Şekil 4.110. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) ..... 156	
Şekil 4.111. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) ..... 156	
Şekil 4.112. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı C, YZE) ..... 157	
Şekil 4.113. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı C, YZE) ..... 157	
Şekil 4.114. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)..... 159	
Şekil 4.115. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE) ... 159	
Şekil 4.116. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) ..... 160	
Şekil 4.117. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE) ..... 160	
Şekil 4.118. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi ..... 163	
Şekil 4.119. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi ..... 163	
Şekil 4.120. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme değişimi..... 164	
Şekil 4.121. Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi ..... 164	
Şekil 4.122. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri..... 167	
Şekil 4.123. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri ..... 167	
Şekil 4.124. Tabliye dinamik eğilme momentleri ..... 168	
Şekil 4.125. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri ..... 168	
Şekil 4.126. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri..... 170	
Şekil 4.127. Kule dinamik yatay yerdeğiştirmeleri..... 170	

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.128. Tabliye dinamik eğilme momentleri .....	171
Şekil 4.129. Kule dinamik eğilme momentleri .....	171
Şekil 4.130. Üniform ve üniform olmayan yer hareketi etkisindeki köprü sistemi .	172
Şekil 4.131. Yumuşak zemin ortamında genel durum için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması.....	174
Şekil 4.132. Genel durum için homojen yumuşak zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri .....	175
Şekil 4.133. Genel durum için homojen yumuşak zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme zaman grafikleri .....	176
Şekil 4.134. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D) .....	178
Şekil 4.135. Jindo kulesi zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D) ....	178
Şekil 4.136. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D).....	179
Şekil 4.137. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D).....	179
Şekil 4.138. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR) ....	181
Şekil 4.139. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR) .....	181
Şekil 4.140. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR) .....	182
Şekil 4.141. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR) ....	182
Şekil 4.142. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı D, ANKR) .....	183
Şekil 4.143. Jindo dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı D, ANKR).....	183
Şekil 4.144. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR).....	185
Şekil 4.145. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR)	185
Şekil 4.146. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR) .....	186
Şekil 4.147. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR) .....	186
Şekil 4.148. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE) .....	189

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.149. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE) .	189
Şekil 4.150. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	190
Şekil 4.151. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	190
Şekil 4.152. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	191
Şekil 4.153. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	191
Şekil 4.154. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	193
Şekil 4.155. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE) ...	193
Şekil 4.156. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	194
Şekil 4.157. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE).....	194
Şekil 4.158. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi .....	197
Şekil 4.159. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi .....	197
Şekil 4.160. Kule toplam yatay yerdeğiştirme değişimi .....	198
Şekil 4.161. Kule toplam eğilme momenti değişimi.....	198
Şekil 4.162. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri.....	201
Şekil 4.163 Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri .....	201
Şekil 4.164. Tabliye dinamik eğilme momentleri.....	202
Şekil 4.165. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri.....	202
Şekil 4.166. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri.....	204
Şekil 4.167. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri .....	204
Şekil 4.168. Tabliye dinamik eğilme momentleri.....	205
Şekil 4.169. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri.....	205
Şekil 4.170. Üniform olmayan yer hareketi etkisindeki köprü sistemi.....	207

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.171. Heterojen zemin ortamında üretilen yer hareket ivmesi hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması .....	209
Şekil 4.172. BBDD zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri.....	210
Şekil 4.173. BBDD zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri.....	211
Şekil 4.174. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (ANKR) .....	213
Şekil 4.175. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (ANKR) .....	213
Şekil 4.176. Tabliye dinamik eğilme momentleri (ANKR).....	214
Şekil 4.177. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (ANKR).....	214
Şekil 4.178. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (ANKR).....	215
Şekil 4.179. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (YZE).....	217
Şekil 4.180. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (YZE).....	217
Şekil 4.181. Tabliye dinamik eğilme momentleri (YZE) .....	218
Şekil 4.182. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (YZE ) .....	218
Şekil 4.183. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi .....	220
Şekil 4.184. Tabliye dinamik eğilme momenti değişimi .....	220
Şekil 4.185. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme değişimi.....	221
Şekil 4.186. Jindo kulesi dinamik eğilme momenti değişimi .....	221
Şekil 4.187. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Genel durum, ANKR).....	225
Şekil 4.188. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Genel durum, ANKR).....	225
Şekil 4.189. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Genel durum, ANKR).....	226
Şekil 4.190. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri (Genel durum ANKR).....	226
Şekil 4.191. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Genel durum, ANKR).....	227
Şekil 4.192. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Genel durum, YZE) .....	229

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.193. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Genel durum, YZE)...	229
Şekil 4.194. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Genel durum, YZE) .....	230
Şekil 4.195. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri (Genel durum, YZE) .....	230
Şekil 4.196. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Genel durum, YZE).....	231
Şekil 4.197. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri.....	233
Şekil 4.198. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri .....	233
Şekil 4.199. Tabliye dinamik eğilme momentleri .....	234
Şekil 4.200 Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri .....	234

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Çeşitli zemin türleri için spektral yoğunluk fonksiyonu filtre parametreleri [60]. .....	17
Çizelge 3.2. Zemin sınıfına göre davranış spektrum parametreleri [61]......	27
Çizelge 3.3. Jindo köprüsüne ait çeşiti elemanların kesit özellikleri .....	47
Çizelge 3.4. Jindo Köprüsünde kullanılan kabloların kesit özellikleri .....	47
Çizelge 4.1 Zemin özellikleri [61] .....	55

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>A</b>	Kablo kesit alanı
<b>a<sub>0</sub></b>	Boyutsuz frekans parametresi
<b>a<sub>g</sub></b>	Zemin sınıfı için maksimum referans yer hareket ivmesi
<b>[C]</b>	Sönüm matrisi
<b>[C<sub>ss</sub>]</b>	Üst yapı sönüm matrisi
<b>[C<sub>sb</sub>]</b>	Üst yapı-temel etkileşim yüzeyi sönüm matrisi
<b>[C<sub>bb</sub>]</b>	Etkileşim yüzeyi sönüm matrisi
<b>d<sub>lm</sub></b>	Mesnet noktaları arasındaki yatay uzaklık
<b>d<sub>lm</sub><sup>L</sup></b>	Dalga yayılma doğrultusunda mesnet noktaları arasındaki mutlak yatay izdüşüm uzaklığı
<b>E</b>	Kablo elastisite modülü
<b>E<sub>eq</sub></b>	Kablo eşdeğer elastisite modülü
<b>{F}</b>	Genelleştirilmiş kuvvet vektörü
<b> H<sub>g</sub>(w) <sup>2</sup></b>	Kanai-Tajimi filtre fonksiyonu
<b> H<sub>f</sub>(w) <sup>2</sup></b>	Clough-Penzien filtre fonksiyonu
<b>Im</b>	Sanal kısım
<b>[K]</b>	Rijitlik matrisi
<b>[K<sub>ss</sub>]</b>	Üst yapı rijitlik matrisi
<b>[K<sub>sb</sub>]</b>	Üst yapı-temel etkileşim yüzeyi rijitlik matrisi

$[K_{bb}]$	Etkileşim yüzeyi rijitlik matrisi
$K_I(i\omega)$	Empedans (dinamik rijitlik) matrisi
$L$	Kablo yatay izdüşüm uzaklığı
$l$	Mod sayısı
$[M]$	Kütle matrisi
$[M_{ss}]$	Üst yapı kütle matrisi
$[M_{sb}]$	Üst yapı-temel etkileşim yüzeyi kütle matrisi
$[M_{bb}]$	Etkileşim yüzeyi kütle matrisi
$n$	Toplam serbestlik derecesi
$n_s$	Üst yapı serbestlik derecesi
$n_b$	Temel-zemin etkileşim yüzeyi serbestlik derecesi
$P(t)$	Polinom fonksiyonu
$Re$	Reel kısım
$S$	Zemin parametresi
$S_e(T)$	Elastik tasarım spektrumu
$S_{ug}(\omega)$	Yerdeğiştirme spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_{üg}(\omega)$	Yer hareket ivmesinin spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_{ügl} \text{ ügm}(\omega)$	$l$ ve $m$ mesnet noktalarındaki yer hareket ivmelerinin spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_0$	Spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değeri
$T$	Hareket süresi
$t$	Zaman
$T_B$	Ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının alt sınırı
$T_C$	Ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının üst sınırı
$T_D$	Sabit yerdeğiştirme davranışının elde edileceği periyot sınırı
$\ddot{u}(t)$	Yer hareket ivmesi
$V_{app}$	Görünen dalga yayılma hızı

$\{\ddot{u}_i(t)\}$	Rasgele işlem örnekleri
$\{u\}$	Yerdeğiştirme vektörü
$\{u_s^t\}$	Üst yapı toplam yerdeğiştirme vektörü
$\{u_b^t\}$	Etkileşim yüzeyi toplam yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{u}\}$	Hız vektörü
$\{\dot{u}_s^t\}$	Üst yapı toplam hız vektörü
$\{\dot{u}_b^t\}$	Etkileşim yüzeyi toplam hız vektörü
$\{\ddot{u}\}$	İvme vektörü
$\{\ddot{u}_s^t\}$	Üst yapı toplam hız vektörü
$\{\ddot{u}_b^t\}$	Etkileşim yüzeyi toplam hız vektörü
$u_b^d$	Yapı-zemin etkileşim yüzeyi dinamik yerdeğiştirme vektörü
$u_s^{qs}$	Zahiri-statik yerdeğiştirme vektörü
$u_g$	Serbest zemin yüzeyi yerdeğiştirme vektörü
$\{U\}$	Genelleştirilmiş yerdeğiştirme vektörü
$V_s$	Kayma dalgası hızı
$W$	Dairesel frekans
$w_g$	Zemin doğal frekansı
$w_f$	Filtre doğal frekansı
$\Delta w$	Frekans aralığı
$W_N$	Üst kesim frekansı
$\{\phi\}$	Modal vektör
$\alpha$	Korelasyon faktörü
$\gamma_c$	Kablo birim hacim ağırlığı
$\gamma_{lm}(w)$	Korelasyon faktörü
$ \gamma_{lm}(w) ^k$	Mesnetlere etkileyen yer hareketleri arasındaki korelasyon etkisi

$\theta_{lm}(w)^d$	Yer hareketi yayılma etkisi
$\theta_{lm}(w)^z$	Zemin etkisi
$\sigma_{üg}^2$	Yer hareket ivmesinin varyansı
$\xi$	Sönüm oranı
$\xi_g$	Zemine ait sönüm oranı
$\xi_g$	Filtre sönüm oranı
$\gamma_I$	Önem katsayısı
$\eta$	Sönüm düzeltme katsayısı
$\xi(t)$	Şekil fonksiyonu

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ANKR</b>	Ankastre model
<b>EC8</b>	Eurocode 8
<b>FBG</b>	Filtre edilmiş beyaz gürültü
<b>YZE</b>	Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model

## 1. GİRİŞ

Yapıların deprem anındaki davranışlarının bilinmesi doğabilecek hasarların asgari düzeye indirilmesini sağlar. Bu nedenle yapıların dinamik analizi yapılırken seçilen matematik modelin yapının dinamik davranışını etkileyen parametreleri içermesi ve yapı davranışını doğru bir şekilde temsil etmesi gerekmektedir.

Herhangi bir mühendislik yapısının dinamik analizi için yer hareketinin belirlenmesi, mühendisler için en zor işlemlerden bir tanesidir. Bir yapı sisteminin deprem hareketinden kaynaklanan dinamik davranışını belirlemek amacı ile dinamik analiz yapılırken, genellikle yapının tüm mesnet noktalarının aynı anda ve aynı yer hareketine maruz kaldığı kabul edilmektedir. Bu yaklaşımda deprem dalgalarının sonsuz hızla yayıldığı kabul edilirken, yayılma esnasında yer hareketindeki değişim dikkate alınmamaktadır. Ancak köprüler, barajlar, boru hatları ve nükleer santraller gibi uzun açıklıklı ve büyük sitemlerin mesnetlerine etkileyen yer hareketi farklılık gösterecektir. Uzun açıklıklı köprü sistemlerinin yumuşak zemin koşullarında ve deprem bölgelerinde inşa edilmesi söz konusu yapı sistemlerinin detaylı dinamik analizlerinin yapılmasını önemli kılmaktadır. Uzun açıklıklı köprü sistemlerinin mesnetlerine etkileyen yer hareketleri genlik, frekans içeriği ve varış zamanı açısından farklılık göstereceği ve buna bağlı olarak da üniform yer hareketi kabulü ile belirlenen yapı tepkilerini değiştireceği açıktır. Deprem dalgalarının sonlu hızla yayılması, dinamik yerdeğiştirmelere ek olarak zahiri-statik yerdeğiştirmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dinamik yerdeğiştirmeler atalet kuvvetlerinden kaynaklanırken, zahiri-statik yerdeğiştirmeler mesnet noktalarının farklı hareketinden kaynaklanmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirmeler zamana bağımlıdırlar ve atalet kuvvetlerinden kaynaklanan gerilmelere ek olarak yeni gerilmelere neden olmaktadır.

Uzun açıklıklı köprü sistemlerinin yumuşak zemin ortamında da inşa edilmesi nedeniyle, köprü sisteminin üzerine oturduğu zemin ile olan etkileşiminin köprünün dinamik davranışını etkileyebileceği de düşünülmelidir. Zeminin topolojik özelliklerine bağlı olarak yer hareketi değişebileceği gibi, zemin-yapı etkileşimi üst

yapı davranışında da önemli değişikliklere neden olacaktır. Dinamik yapı-zemin etkileşimi, kablolu köprülerin gerçekçi dinamik analizlerinde dikkate alınması gereken en önemli hususlardan bir tanesidir. Bu bakımdan, kablolu köprülerin dinamik analizleri yapılırken, yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketi değişim etkilerinin dikkate alınması önemlidir. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi, sistemi yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır.

Deprem hareketinin karmaşık yapısına bağlı olarak ortaya çıkan değişimi, genellikle uygunluk fonksiyonu ile dikkate alınmaktadır. Uygunluk fonksiyonu; korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi bileşenlerinden oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yer hareketinin yayılma ve değişim etkileri ile yapı-zemin etkileşiminin uzun açıklıklı bir kablolu köprü sisteminin dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Analizlerde kullanılacak yer hareketleri oluşturulurken, yer hareketinin değişim etkilerinin dikkate alındığı Hao ve arkadaşları [1] tarafından önerilen simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Rasgele titreşim teorisine dayalı bu yöntem ile bölgenin zemin durumuna bağlı olarak tanımlanan spektral yoğunluk fonksiyonu ve davranış spektrumu uyumlu yer hareketleri oluşturulmaktadır. Yer hareketinin değişimi bu çalışmada dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkisi ile dikkate alınmıştır. Bilindiği gibi korelasyon etkisi, deprem hareketinin düzgün olmayan faylar boyunca çok değişik kaymalar sonucunda meydana gelmesi ve ortaya çıkan yerdeğiştirme dalgalarının rasgele sayılabilecek sayısız yansıma ve kırılmaya uğraması ile açıklanmaktadır. Dalga yayılma etkisi, deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşınca kadar geçen zaman farkından doğmaktadır. Zemin etkisi ise farklı mesnet noktalarındaki yerel zemin şartlarının farklılığından kaynaklanmaktadır.

## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1. Amaç**

Bu tez çalışmasında yer hareketinin yayılma ve değişim etkileri ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması suretiyle, uzun açıklıklı bir kablolu köprü sisteminin dinamik analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Günümüze kadar konu ile ilgili yapılmış çalışmalar, yer hareketi değişiminin ve yapı-zemin etkileşiminin önemine vurgu yapıp, birçok yapısal sonuç ortaya koymuştur. Ancak yer hareketi değişim bileşenleri ve yapı-zemin etkileşiminin kablolu köprülerin dinamik davranışı üzerindeki göreceli etkilerinin incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Yer hareketi değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin köprü sistemleri üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelediği birçok çalışma mevcuttur. Ancak, problemin yer hareketi değişiminin ve yapı-zemin etkileşiminin göreceli etkileri kapsamında ele alındığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

### **2.2. Konu İle İlgili Yapılmış Çalışmalar**

#### **2.2.1. Üiform olmayan yer hareketi için köprü sistemlerinin dinamik analizi konusunda yapılmış çalışmalar**

Abdel-Ghaffar ve Rubin mesnetlerinde, aralarında korelasyon olan ve olmayan farklı yer hareketi etkisindeki asma köprülerin düşey doğrultudaki davranışlarını rasgele titreşim teorisi ile incelemişlerdir. Bu tür yapıların açıklıklarına benzer mesafelerde kaydedilmiş yer hareketleri dikkate alınarak spektral yoğunluk fonksiyonları elde edilmiş ve köprü mesnet noktalarına uygulanmıştır. Çalışmada korelasyonun sonuçları etkilediği görülmüştür [2].

Garevski ve arkadaşları belirli bir hızla yayılan eş zamanlı yer hareketi için kablolu bir köprünün dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan çeşitli deterministik yöntemler ile yapının dinamik davranışı belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda kablolu köprüler yüzlerce metre uzunluğunda olduğundan, yer hareketinin

bir mesnetten diğesine saniyeler sonra ulaşacağı ve böylece yapının dinamik etkiler yanında zahiri statik etkilere de maruz kalacağı belirtilm ve her iki etkinin de analizlerde dikkate alınması gereği vurgulanmıştır [3].

Zerva çalışmasında iki ve üç açıklıklı kirişlerin değışerek yayılan yer hareketi etkisindeki davranışlarını incelemiştir. Yer hareketini stokastik yöntemle elde ederken mesnetler arasındaki korelasyon etkisini dikkate almıştır. Çalışma sonucunda yapının dinamik özelliklerine, dikkate alınan yapı tepkisine, yapı tepkisinin dikkate alındığı noktaya, yapının doğal frekansı ile yer hareketinin doğal frekansı arasındaki ilişkiye ve mesnetler arasındaki korelasyonun derecesine bağılı olarak mesnetler arasındaki korelasyonun sonuçları değıştirdiğini belirtmiştir [4].

Der Kiureghian ve Neuenhofer değışen yer hareketi etkisindeki çok serbestlik dereceli sistemlerin dinamik analizi için rasgele titreşim teorisine dayalı yeni bir davranış spektrum yöntemi geliştirmişlerdir. Dalga yayılma etkisi, artan mesafe ile birlikte azalan korelasyon etkisi ve zemin şartlarındaki değışimden kaynaklanan yer hareketinin değışimi dikkate alınmıştır. Geliştirilen yöntem iki açıklıklı bir kiriş sistemi üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, değışen yer hareketi durumunda elde edilen tepki değerlerinin üniform harekete oranla daha küçük tepki değerleri oluşturduğu ifade edilmekle birlikte, rijit yapılarda ve ani korelasyon kaybının olduğu durumlarda zahiri-statik bileşenlerdeki artış dolayısıyla farklı sonuçların elde edilebileceğı vurgulanmaktadır [5].

Nazmy ve Abdel-Ghaffar çalışmalarında üç boyutlu uzun açıklıklı köprü sistemlerin değışerek yayılan yer hareketi etkisinde dinamik davranışını incelemiştir. Farklı yer hareketi kayıtları eş zamanlı ve eş zamanlı olmayan mesnet hareketi olarak uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda üniform ve üniform olmayan yer hareketi etkisinde elde edilen tepkiler karşılaştırıldığında, üniform olmayan yer hareketinin uzun açıklıklı köprü sistemlerin dinamik analizinde dikkate alınması gerektiğı vurgulanmıştır [6].

Zerva çalışmasında yeraltı ve yer üstü boru hattı yapılarının dinamik davranışına yer hareketindeki değişimin etkilerini incelemiştir. Yer hareketindeki değişim korelasyon ve dalga yayılma etkileri ile dikkate alınmıştır. Düşük yer hareketi yayılma hızlarında, yapısal tepkilerin daha fazla etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, değişerek yayılan yer hareketinin en önemli etkisinin zahiri-statik eleman kuvvetlerinde meydana geldiği gözlenmiştir [7].

Harichandran ve arkadaşları çalışmalarında değişen yer hareketi etkisindeki Golden Gate Asma köprüsü ve iki tane kemer köprünün stasyonier ve stasyonier olmayan tepkilerinin incelemiştir. Üniform ve değişen yer hareketi durumları için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda üniform yer hareketinin bu tür uzun açıklıklı köprüler için genellikle kabul edilebilir olmadığı belirtilmektedir. Ayrıca stasyonier olmayan etkilerin asma köprülerde dahil edilmesi gereği vurgulanırken, kemer köprülerde ihmal edilebileceği ifade edilmektedir [8].

Der Kiureghian çalışmasında deprem hareketinin değişimini tanımlamak için teorik bir model geliştirmiştir. Söz konusu model deprem hareketindeki değişimin üç farklı etkisini dikkate almaktadır. 1. Heterojen zemin ortamında deprem dalgalarının yayılması ve söz konusu dalgaların yayıldıkları kaynaktan itibaren değişikliğe uğraması. 2. Deprem dalgalarının farklı mesnetlere farklı zamanlarda ulaşmasından kaynaklanan dalga yayılma etkisi. 3. Farklı mesnetlerdeki farklı zemin cinsinden kaynaklanan zemin etkisi. Parametrik bir çalışma yapılmak suretiyle zemin etkisinin, ani değişim gösteren zemin şartlarında inşa edilmiş kısa ve orta uzunluktaki yapılar için önemli olabileceği vurgulanırken, dalga yayılma etkisinin uzun açıklıklı esnek yapılar için daha önemli olduğu belirtilmektedir [9].

Rassem ve arkadaşları çalışmalarında mesnetlerinde farklı yer hareketine maruz asma köprülerin dinamik analizini incelemiştir. Yer hareketindeki değişim zemin etkisi (yumuşak ve sert zemin) ile dikkate alınmıştır. Yer hareketindeki değişimin yapı davranışını önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür [10].

Ghobarah ve arkadaşları çalışmalarında genel güç iletim kanallarının değişen yer hareketi etkisinde dinamik analizini incelemişlerdir. Yer hareketinin değişiminde dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınmıştır. Dalga yayılma etkisinin dikkate alınmasının yapı davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür [11].

Soyluk ve arkadaşları [12], Soyluk ve Dumanoglu [13], Dumanoglu ve Soyluk [14], Soyluk ve Dumanoglu [15], ve Dumanoglu ve Soyluk [16], çalışmalarında kablolu köprülerin stokastik, asinkronize ve antiasinkronize analizlerini ayrı ayrı gerçekleştirmişlerdir. Asinkronize ve antisinkronize analiz için çeşitli yer hareketi yayılma hızları dikkate alınmıştır. Her bir analiz ile elde edilen yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda yer hareketinin sonlu yayılma hızının sonuçlar üzerinde önemli etkilerinin olduğu vurgulanmıştır.

Dumanoglu ve Soyluk çalışmalarında kablolu köprü sistemlerin stokastik davranışına yer hareketindeki değişimin etkisini incelemişlerdir. Yer hareketindeki değişim korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi olarak dikkate alınmıştır. Zemin etkisi ayrıca detaylı incelenmiştir. Yer hareketi değişim parametrelerinin her birinin yapısal tepkiler üzerinde önemli etkisi olduğu, bu nedenle gerçekçi bir analiz için yer hareketindeki değişimin dikkate alınması gerektiği sonucuna varmışlardır [17].

Soyluk çalışmasında, uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik davranışına yer hareketindeki değişimin etkilerini spektral analiz yaklaşımına dayanan rasgele titreşim analizi ve tepki spektrumu yöntemleri ile incelemiştir. Yer hareketindeki değişim korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkileri ile dikkate alınmıştır. Sonuçlar filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin yer hareketini gerçeğe yakın olarak modelleyebildiğini göstermiştir. Rasgele titreşim analizinde yapı tepkilerinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunun şiddet ve içeriğine bağlı olduğu sonucuna varmıştır [18].

Sextos ve arkadaşları çalışmalarında asinkronize yer hareketi etkisindeki on iki açıklıklı verem bir köprü sistemini incelemişlerdir. Yer hareketinin değişimi ile ilgili

olarak, gerçek yer hareketi ve Eurocode 8 spektrumu ile uyumlu üç farklı senaryo oluşturularak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir [19].

Ferreira ve Negrao çalışmalarında Guadiana köprüsünün üç boyutlu modelinin zaman tanım alanındaki çözümünde yer hareketinin değişiminin de dikkate alındığı bir yöntem önermişlerdir. Yer hareketindeki değişim farklı dalga yayılma hızları ve zemin özellikleri ile dikkate alınmıştır. Sonuçlar yer hareketindeki değişimin sonuçları önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir [20].

Bai ve arkadaşları çalışmalarında çelik kemer köprülerin değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki dinamik davranışını incelemişlerdir. Yer hareketi yapıya yatay ve düşey doğrultuda etki ettirilmiştir. Yer hareketindeki değişim dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkileri ile dikkate alınmıştır. Sonuçlar üniform yer hareketi etkisi altında elde edilen yapı davranışı ile karşılaştırıldığında, yer hareketindeki değişimin yerel zemin koşullarındaki farklılık ile beraber dikkate alınması durumunda sonuçları arttırdığı görülmüştür. Bunun yanında yer hareketi değişim bileşenlerinin her birinin yapısal tepkiler üzerinde önemli etkilerinin olduğu gözlenmiştir [21].

### **2.2.2. Köprü sistemlerinin dinamik analizinde üniform olmayan yer hareketi ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar**

Takemiya ve arkadaşları zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı kablolu köprü sisteminin dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında üç boyutlu köprü modelini adım adım integrasyon tekniğini kullanarak analiz etmişlerdir. Alt sistem yöntemini frekans alanında kullanmışlardır [22].

Gupta ve Kumar çalışmalarında kablolu köprülerin yapı-zemin etkileşim analizi incelemişlerdir. Üst yapı sonlu eleman yöntemi ile modellenmiş, zemin ortamı elastik, izotropik ve homojen ortam olarak dikkate alınmıştır. Temel-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının yapısal esnekliği önemli derecede değiştiği görülmüştür [23].

Kawano ve Furukawa çalışmalarında kablolu köprü sistemlerinin davranışlarını zemin-yapı etkileşimi etkisindeki dinamik davranışının belirlenmesi için alt sistem yaklaşımının kullanıldığı rasgele titreşim yöntemi kullanılmıştır. Zemin-yapı etkileşimi empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır. Zemin-yapı etkileşiminin ve zemin özelliklerinin kablolu köprü dinamik davranışı üzerinde önemli etkilerinin olduğu görülmüştür [24].

Betti ve arkadaşları, deprem hareketinin sonlu yayılma hızının dikkate alındığı uzun açıklıklı asma köprü sistemlerinin yapı-zemin etkileşimi açısından analizini mümkün kılan dinamik bir yöntem önermiştir. Yapı-zemin etkileşimi empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda yer hareketi değişiminin ve kinematik yapı-zemin etkileşiminin dinamik yapı davranışı açısından oldukça önemli olduğu belirtilmiştir [25].

Zheng ve Takeda, çalışmalarında ana kaya üzerinde derin zemin tabakaları üzerindeki kablolu köprü sistemin dinamik zemin yapı etkileşimini incelemişlerdir. Zemin-yapı etkileşimi sonlu eleman yöntemi kullanılarak, kütle yay modeli ile dikkate alınmıştır. Rijitlik ve temel derinliği parametrelerinin zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkileri incelemiş ve analiz sonuçları zemin-yapı etkileşiminin sonuçları etkilediğini göstermiştir [26].

Saadeghvaziri ve arkadaşları çalışmalarında mevcut köprülerde yapı-zemin etkileşiminin dinamik davranışa olan etkisini incelemişlerdir. Yapı-zemin etkileşiminin boyuna doğrultuda köprü davranışını önemli oranda etkilediği ve bu yüzden analizlerde dikkate alınması gerektiği sonucuna varmışlardır [27].

Keshishian çalışmasında köprü türü uzun açıklıklı yapıların rasgele titreşim analizi ile çözümünde yer hareketindeki değişim ve yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemiştir. Yer hareketindeki değişim korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi ile dikkate alınmıştır. Rasgele titreşim teorisine bağlı olarak geliştirilen yöntem ile gerçekleştirilen analizler sonucunda, yer hareketindeki değişimin köprü davranışı

üzerinde daha etkili olduğu ve yapı-zemin etkileşiminin sonuçları küçültebileceği gibi, arttırabileceği de gözlenmiştir [28].

Kappos ve arkadaşları çalışmalarında betonarme köprülerin zemin-yapı etkileşimini incelemişlerdir. Örnek model olarak dört açıklıklı betonarme otoyol köprüsü modellemişlerdir. Köprü ve temel sonlu eleman yöntemi ve yay-sönümleyiciler kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada zemin-yapı etkileşiminin tasarım aşamasındaki etkisi incelenmiştir [29].

Chaudhary ve Fujino çalışmalarında seçtikleri köprü modelleri için zemin-yapı etkileşiminin etkisini 18 deprem kaydı için incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda zemin-yapı etkileşimin köprü davranışı üzerindeki etkisinin zayıf zeminde daha belirgin olduğu ve yapı-zemin etkileşiminin zemin kayma modülünden çok köprü ayağı eğilme rijitliği oranı ve yatay temel rijitliği ile ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır [30].

Spyrakos ve Vlassis deprem anında yapı-zemin etkileşiminin önemini belirlemek amacıyla, köprü zemin sistemi yerine basitleştirilmiş bir model kullanmışlardır. Hangi durumlarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması gerektiğini incelemişlerdir. Yapı-zemin etkileşiminin güvenli ve ucuz tasarım için gerekli olduğu sonuçlarına varılmıştır [31].

Sextos ve arkadaşları gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, toplam uzunluğu 200 m. olan dört açıklıklı bir karayolu köprüsünün dinamik davranışını yer hareketi değişim bileşenleri, zemin etkisi ve yapı-zemin etkileşimi açısından parametrik olarak incelemişlerdir. Yapı zemin etkileşimi sonlu eleman yöntemi kullanılarak yay ve sönümleyicilerle dikkate alınmıştır [32].

Tangaonkar ve Jangid çalışmalarında deprem izolasyonlu üç açıklıklı karayolu köprüsünün yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, yapısal tepkileri hangi parametrelerin etkilediğini ve hangi durumlarda yapı-zemin etkileşiminin önemini arttırdığını

belirlemeye çalışmışlardır. Temel ayakları etrafındaki zemin, frekanstan bağımsız katsayılarla modellenmiş ve analizler zaman tanım alanında kompleks modal analiz yöntemi ile yapılmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin hesaplara dahil edilmesinin güvenliği arttırdığı ve tasarım maliyetini düşürdüğü görülmüştür [33].

Chouw ve Hao yumuşak ve orta zemin koşullarında farklı yer hareketi yayılma hızları dikkate alınarak belirlenen yer hareketi değişimi ile yapı-zemin etkileşiminin, komşu iki köprü çerçevesinin çarpışması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Üst yapı ve zemin ortamı sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Yer hareketinin değişimini içeren yer hareketleri, Japon tasarım spektrumuna ve ampirik bir uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak oluşturulmuştur [34].

Chouw ve Hao bir başka çalışmalarında, yakın kaynak etkisini de içeren yer hareketi değişiminin ve yapı-zemin etkileşiminin, iki köprü çerçevesinden oluşan sistem üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Zemin yapı etkileşimi alt sistem yaklaşımı ile dikkate alınmış, üst yapı ve zemin sonlu ve sınır elemanlar yöntemi ile modellenmiştir [35].

Soneji ve Jangid ana kaya üzerindeki tabakalı zemin üzerine rijit kazık temel gruplarıyla mesnetlenmiş kablolu köprü sisteminin dinamik davranışına, yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Kazık temel-zemin etkileşimi sürekli yay ve sönümleyicilerle modellenmiş, zaman tanım alanında doğrusal integrasyon yöntemi ile çözüm yapılmıştır. Kazık temel etrafındaki zeminin köprü davranışını önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür [36].

Allam dalga yayılma etkisi ile yapı-zemin etkileşiminin düzlem çerçeve sistemlerinin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yer hareketi, uygun bir filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak elde edilmiştir. Zemin-yapı etkileşimi empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır [37].

Dicleli ve Erhan çalışmasında hareketli yük etkisinden dolayı integral köprülerde oluşan eylemsizlik kuvvetine yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Yapı-

zemin etkileşimi üst yapı modellenirken kenar ayak dolgusu ve temel etrafındaki zeminin dikkate alınması ile analizlere dahil edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin etkisi birçok farklı parametre (köprü boyutu, köprü ayağı yüksekliği ve kalınlığı, kazık temel yerleşimi ve boyutu, açıklık sayısı ve farklı zemin özellikleri) için incelenmiştir. Analizlerin sonuçları yapı-zemin etkileşiminin eylemsizlik kuvvetleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. [38].

### **2.2.3. Temel-zemin etkileşiminin empedans fonksiyonları ile dikkate alındığı çalışmalar**

Wong ve Luco homojen ve elastik zemin üzerindeki yüzeysel temellerin empedans fonksiyonlarını elde etmişlerdir. Dikdörtgen temellerin farklı geometrik oranları, farklı sönüm oranları ve farklı doğrultuda yer hareketleri için titreşim modlarına ait empedans fonksiyonu değerlerini tablolar halinde elde etmişlerdir [39].

Luco ve Mita değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki yüzeysel dairesel temellerin davranışını incelemişlerdir ve empedans fonksiyonlarını elde etmişlerdir [40].

Gazetas ve Tassoulas farklı geometrik şekillere sahip gömülü temellerin yanal titreşimleri için kesin çözüm yöntemleri önermişlerdir [41, 42]. Apsel ve Luco tabakalı zemin ortamına yüzeysel ve gömülü biçimde oturan dairesel temellerin dış yük ve moment etkisindeki davranışlarını integral çözüm teknikleri kullanarak incelemişlerdir ve empedans fonksiyonlarını elde etmişlerdir [43].

Mita ve Luco çalışmalarında homojen elastik zemine gömülü rijit kare temellerin ötelenme, dönme ve bağlaşıklık ötelenme-dönme empedans fonksiyonlarını karma çözüm tekniği kullanarak elde etmişlerdir [44].

Gazetas homojen zemin ortamında yüzeysel, kısmen ve tamamen gömülü farklı geometrik özelliklere sahip temellerin tüm titreşim modları için empedans formüllerini elde etmişlerdir [45]. Bu [46], Bu ve Lin [47] titreşim frekansının geniş

bir aralığında ( $0 \leq a_0 \leq 10$ ) sadece kare temellerin empedans fonksiyonlarını bulmak için bazı çalışmalar yapmışlardır.

Çelebi ve arkadaşları çalışmalarında temel-zemin arakesitinin dinamik rijitliğini ve geometrik sönümünü gösteren empedans fonksiyonlarının sayısal değerleri, radyasyonun önemli olduğu geniş bir frekans aralığında rijit ve dikdörtgen olarak tanımlanan temelin yüzeysel ve gömülü olması durumları için elde etmişlerdir. Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin alt sisteminin malzeme özellikleri homojen, izotrop ve doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır [48].

Liou ve Chung çalışmalarında geliştirdikleri yöntem ile tabakalı zemine gömülü dairesel temellerin ötelenme, dönme ve bağlaşık ötelenme ve dönme empedans fonksiyonlarını elde etmişlerdir. Empedans fonksiyonlarını tabakalı zeminde üç boyutlu dalga denklemlerinin silindirik koordinatlarda çözüm yöntemi ile elde etmişlerdir [49].

Padron ve arkadaşları eğik kazık temellerin empedans fonksiyonlarını sınır ve sonlu elemanlar yöntemlerini beraber kullanarak elde etmişlerdir. Ötelenme, dönme ve bağlaşık ötelenme ve dönme empedans fonksiyonlarını tek kazık temel ve kazık temel grupları için tablolar halinde oluşturmuşlardır. Zemin homojen, vizkoelastik, izotropik yarı uzay olarak dikkate alınmış, kazıklar Euler-Bernoulli kirişleri şeklinde modellenmiştir. Farklı sayıda kazık temel grupları, farklı kazık-zemin rijitlik oranları için sonuçlar elde etmişlerdir [50].

### **2.3. Çalışmanın Kapsamı**

Bu tez çalışmasında deprem hareketi değişim bileşenleri ile yapı-zemin etkileşiminin uzun açıklıklı bir kablolu köprü sistemin dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmektedir. Yer hareketi oluşturulurken, yer hareketinin değişim etkisinin dikkate alındığı Hao ve arkadaşları [1] tarafından önerilen simülasyon yöntemi kullanılmaktadır. Yer hareketi değişim bileşenleri dalga yayılma etkisi,

korelasyon etkisi ve zemin etkisi olarak dikkate alınmıştır. Yapı-zemin etkileşimi sistemi yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Bu amaçla oluşturulan bölümlerin özetleri aşağıda verilmektedir.

Birinci bölümde genel bilgiler üzerinde durulmakta olup, konunun önemi, konu ile ilgili bilgiler verilmektedir.

İkinci bölümde çalışmanın amacı, konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar ve çalışmanın kapsamı hakkında bilgiler verilmektedir.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılacak yer hareketlerinin elde edilmesi ile ilgili teorik formülasyon ve bilgiler, hareket denklemlerinin sonlu eleman formülasyonu, yapı-zemin etkileşiminin dinamik analize dahil edilmesi ile ilgili formülasyon ve genel bilgilere yer verilmektedir. Çalışmaya konu olan kablolu köprülerin temel özelliklerinden ve uygulama için seçilen köprüye ait yapısal özellikler ve köprünün analitik modeli bu bölümde oluşturulmaktadır. Ayrıca yer hareketindeki değişim ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınabilmesi için geliştirilen bilgisayar programı ile ilgili açıklamalara da bu bölümde yer verilmektedir.

Dördüncü bölümde ise değişerek yayılan yer hareketi ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınan kablolu köprü sistemine etkisi tabliye ve kulede elde edilen yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerinin karşılaştırılması ile incelenmektedir. Bu bölümde önce köprü sisteminin oturduğu zeminin homojen olması durumunda, uniform yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak incelenmektedir. Dalga yayılma etkisi, farklı yer hareketi hızları dikkate alınarak homojen orta zeminde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ve ihmal edilmesi durumunda incelenmektedir. Daha sonra homojen sert, orta ve yumuşak zeminde yer hareketi değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin etkisi üzerinde durulmaktadır. Üçüncü bölümün sonunda ise homojen olmayan zemin ortamında yer hareketi değişim bileşenleri tek tek ve birlikte dikkate alınarak yapı-

zemin etkileşiminin dikkate alınması ve ihmal edilmesi durumunda elde edilen yapısal tepkiler karşılaştırılmaktadır.

Beşinci bölümde çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar ile öneriler verilirken, bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

### 3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Yer Hareketinin Elde Edilmesi

Deprem kayıtlarının elde edilebileceği üç kaynaktan bahsetmek mümkündür: Yapay yollar kullanılarak oluşturulan tasarım ivme spektrumu uyumlu kayıtlar, kaynak ve dalga yayılımı özellikleri fiziksel olarak benzeştirilmiş (simüle edilmiş) kayıtlar ve gerçek depremlerden elde edilen kayıtlar [51]. Kablolu köprü türü uzun açıklıklı yapıların dinamik analizinde üniform yer hareketi kullanmak doğru sonuçlar vermeyecektir. Yer hareketindeki değişimin kablolu köprülerin dinamik analizindeki etkilerinin incelendiği bu çalışmada, kullanılan yer hareketleri simülasyon yöntemi ile elde edilecektir. Böylece yer hareketi değişim parametreleri olan dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve zemin etkisi tek tek ve birlikte dikkate alınarak farklı yer hareketi senaryoları üretilmiş olunacaktır. Daha sonra, üretilen yer hareketlerine bağlı olarak üst yapının yer hareketindeki değişime ne oranda duyarlı olduğu belirlenecektir.

Yer hareketi oluşturulması aşamasında, Hao ve arkadaşları [1] tarafından önerilen simülasyon yöntemi esas alınmıştır. Bu yöntemde, yer hareketi değişiminin dikkate alınarak belirlendiği yer hareketine ait ivme-zaman eğrileri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak oluşturulmaktadır. Belirtilen yönteme göre, yer hareketi önceden tanımlı spektral yoğunluk fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonuna bağlı olacak şekilde belirlenmektedir. Deprem hareketinin sıfır ortalamaya sahip stasyoner bir işlem olduğu ve bilinen bir spektral yoğunluk fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonuna sahip olduğu kabul edilerek, yer hareketinin yayılması esnasında uğrayacağı değişim dikkate alınarak yer hareketi oluşturulması, aşağıda belirtilen şekilde gerçekleştirilecektir.

Mesnetlere etkiyen yer hareketi, mesnet noktaları arasındaki yer hareket ivmesinin karşıt spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [52-56].

$$S_{\ddot{u}_{gl}\ddot{u}_{gm}}(w) = \gamma_{lm}(w) \sqrt{S_{\ddot{u}_{gl}\ddot{u}_{gl}}(w) * S_{\ddot{u}_{gm}\ddot{u}_{gm}}(w)} \quad (3.1)$$

Burada  $\gamma_{lm}(w)$  uygunluk fonksiyonu,  $S_{\ddot{u}_{gl}\ddot{u}_{gm}}(w)$  l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmelerinin karşıt spektral yoğunluk fonksiyonunu,  $\ddot{u}_g(t)$  yer hareket ivmesini göstermektedir. Zeminin homojen olması durumunda ( $S_{\ddot{u}_{gl}\ddot{u}_{gl}}(w) = S_{\ddot{u}_{gm}\ddot{u}_{gm}}(w) = S_{\ddot{u}_g}(w)$ ) yukarıdaki ifade,

$$S_{\ddot{u}_{gl}\ddot{u}_{gm}}(w) = \gamma_{lm}(w) S_{\ddot{u}_g}(w) \quad (3.2)$$

şekline yazılabilecektir. Yer hareketi ivmesi için bu çalışmada Clough ve Penzien [57] tarafında düzeltilerek elde edilen Filtre Edilmiş Beyaz Gürültü (FBG) spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılacaktır. Bu fonksiyon

$$S_{\ddot{u}_g(w)} = S_o |H_g(w)|^2 |H_f(w)|^2 \quad (3.3)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada,

$$|H_g(w)|^2 = \frac{w_g^4 + 4\xi_g^2 w_g^2 w^2}{(w_g^2 - w^2)^2 + 4\xi_g^2 w_g^2 w^2} \quad (3.4)$$

ve

$$|H_f(w)|^2 = \frac{w^4}{(w_f^2 - w^2)^2 + 4\xi_f^2 w_f^2 w^2} \quad (3.5)$$

zemine ait filtre fonksiyonlarını gösterirken,  $w_g$  ve  $\xi_g$  sırasıyla zemine ait doğal frekansı ve sönüm oranını,  $w_f$  ve  $\xi_f$  ikinci filtreye ait doğal frekansı ve sönüm oranını,  $S_o$  beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değerini göstermektedir [58,59].

Sert, orta ve yumuşak zemin durumları için filtre parametreleri olarak Çizelge 3.1'de verilen değerler önerilmektedir.

Çizelge 3.1. Çeşitli zemin türleri için spektral yoğunluk fonksiyonu filtre parametreleri [60].

Zemin cinsi	$w_g$ (rad/s)	$\xi_g$	$w_f$ (rad/s)	$\xi_f$
Sert	15,0	0,6	1,5	0,6
Orta	10,0	0,4	1,0	0,6
Yumuşak	5,0	0,2	0,5	0,6

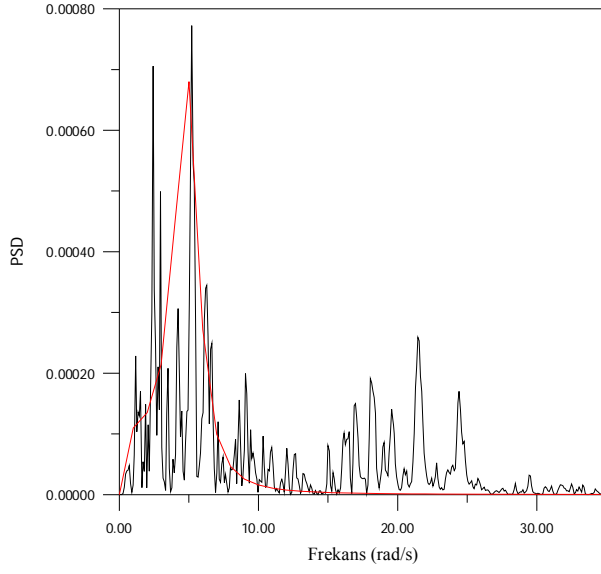
Bu çalışmada zemin cinsi olarak sert, orta ve yumuşak (EC8 [61] zemin sınıfı B, C ve D) zemin seçilmiştir. Der Kiureghian [60] tarafından önerilen yer ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır.

$S_0$  değeri,

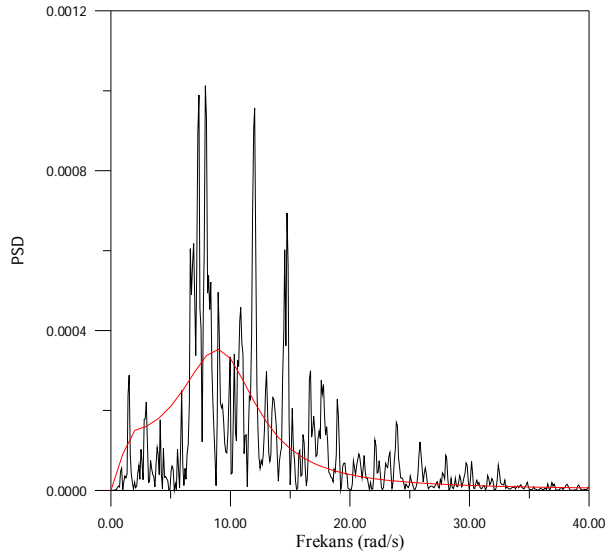
$$S_0 = \frac{\sigma_{\ddot{u}_g}^2}{\int_0^\infty |H_g(w)|^2 |H_f(w)|^2 dw} = \frac{\sigma_{\ddot{u}_g}^2}{\Phi} \quad (3.6)$$

ifadesi ile elde edilebilmektedir [58]. Burada  $\sigma_{\ddot{u}_g}^2$  yer hareket ivmesinin varyansını göstermektedir.

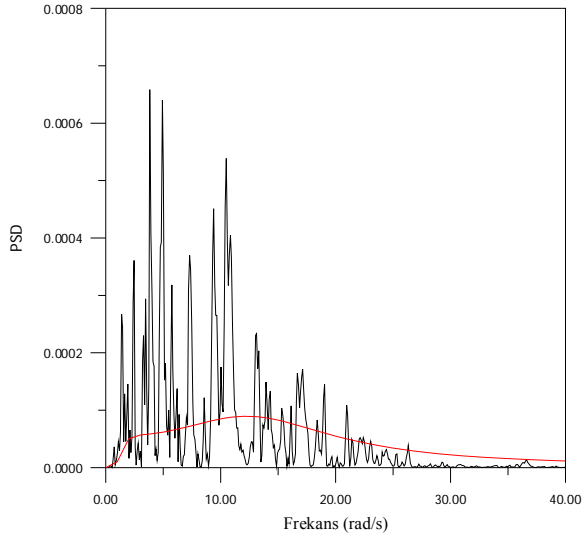
Şekil 3.1-3'te ChiChi depremi TAPO51W, HWA033N ve ILAO27E ivme kayıtları spektral yoğunluk fonksiyonlarının filtre edilmiş beyaz gürültü modeline ait spektral yoğunluk fonksiyonları ile karşılaştırılması görülmektedir. Eş. 3.6 yardımı ile  $S_0$  değeri, her bir zemin cinsi için, yer hareket ivmesi varyans değerleri 1999 ChiChi Tayvan depreminin sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında kayıt edilen ILAO27E, HWA033N ve TAPO51W bileşenlerinin enerjilerine (varyanslarına) eşitlenmek suretiyle belirlenmektedir.



Şekil 3.1. Chichi depremi yumuşak zemin (TAP051W) kaydı spektral yoğunluk fonksiyonunun FBG modeli ile karşılaştırılması



Şekil 3.2. Chichi depremi orta zemin (HWA033N) kaydı spektral yoğunluk fonksiyonunun FBG modeli ile karşılaştırılması



Şekil 3.3. Chichi depremi sert zemin (ILA027E) kaydı spektral yoğunluk fonksiyonunun FBG modeli ile karşılaştırılması

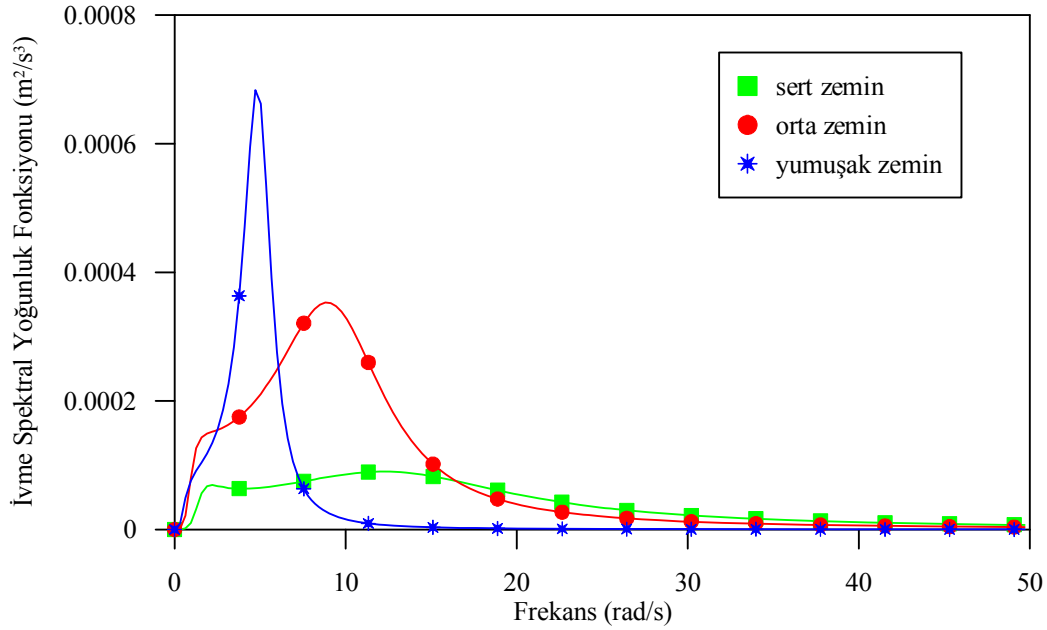
Der Kiureghian [60] tarafından önerilen filtre parametreleri kullanılarak  $S_0$  değerleri her bir zemin türü için aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$S_0 \text{ sert} = 0,0000485 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

$$S_0 \text{ orta} = 0,000128 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

$$S_0 \text{ yumuşak} = 0,0000933 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

Eş. 3.3 ile gösterilen Clough-Penzien [57] yer hareketi modeli için çalışmada kullanılan sert, orta ve yumuşak zemin türleri için elde edilen ivme spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeline ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu

Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Eş 3.1'de kullanılan uygunluk fonksiyonu  $\gamma_{lm}(w)$  yer hareketinin değişimini frekans alanında tanımlar ve i ve j mesnet noktalarındaki yer hareket ivmeleri için uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [9].

$$\begin{aligned} \gamma_{lm}(w) &= |\gamma_{lm}(w)|^k \gamma_{lm}(w)^d \gamma_{lm}(w)^z \\ &= |\gamma_{lm}(w)|^k \exp[i(\theta_{lm}(w)^d + \theta_{lm}(w)^z)] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Uygunluk fonksiyonu boyutsuz olup kompleks bir ifadedir.  $0 \leq |\gamma_{lm}(w)| \leq 1$  aralığında kalmaktadır ve  $\ddot{u}_l(t)$  ve  $\ddot{u}_m(t)$  işlemleri arasındaki istatistiksel bağımlılığı ifade etmektedir.  $\gamma_{lm}(w)$  terimlerinin üsleri şeklinde gösterilen k, d ve z harfleri sırası ile korelasyon etkisini, dalga yayılma etkisini ve zemin etkisini ifade etmektedir.

Eş. 3.7'de  $|\gamma_{lm}(w)|^k$  mesnetlere etkiyen yer hareketleri arasındaki korelasyon etkisini ifade etmektedir. Korelasyon etkisi, deprem hareketinin düzgün olmayan faylar boyunca çok değişik kaymalar sonucunda meydana gelmesi ve ortaya çıkan yerdeğiştirme dalgalarının rasgele sayılabilecek sayısız yansıma ve kırılmadan

geçmesi ile açıklanmaktadır. Bu çalışmada Harichandran ve Vanmarcke [62] tarafından önerilen korelasyon modeli kullanılmıştır. Kullanılan korelasyon modeli,

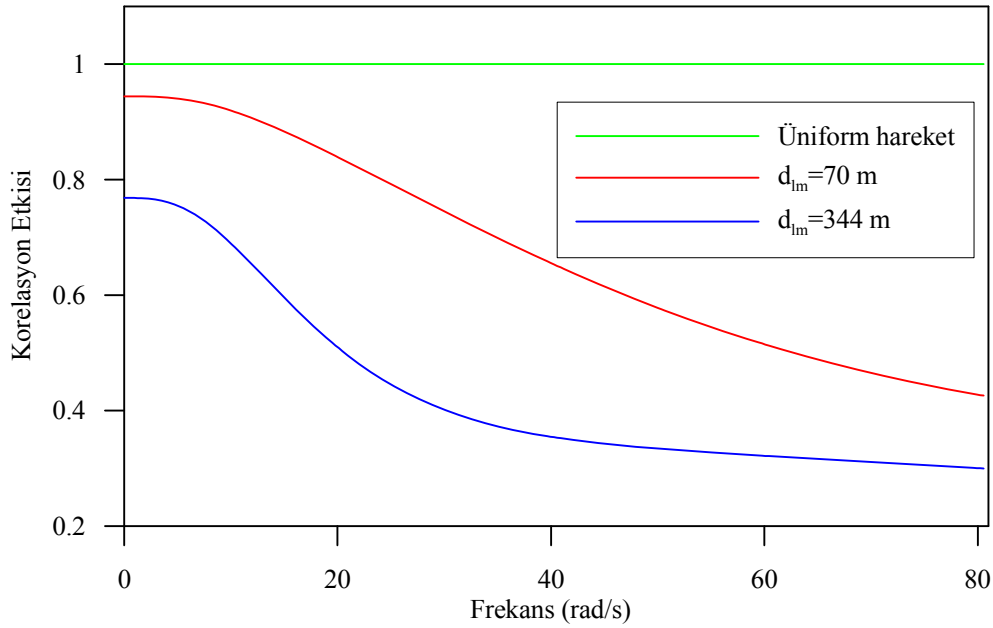
$$|\gamma_{lm}(w)|^k = A e^{\frac{-2d_{lm}}{\alpha\theta(w)}(1-A+\alpha A)} + (1-A) e^{\frac{-2d_{lm}}{\theta(w)}(1-A+\alpha A)} \quad (3.8)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada;

$$\theta(w) = k \left[ 1 + \left( \frac{w}{2\pi f_0} \right)^b \right]^{-1/2} \quad (3.9)$$

ifadesi ile verilirken,  $d_{lm}$  mesnetler arasındaki yatay uzaklığın mutlak değerini göstermektedir.  $A$ ,  $\alpha$ ,  $k$ ,  $f_0$  ve  $b$  amprik sabitlerdir. Bu sabitler için Harichandran [7] tarafından önerilen  $A=0,636$ ,  $\alpha=0,0186$ ,  $k=31200$ ,  $f_0=1,51\text{Hz}$  ve  $b=2,95$  değerleri kullanılmıştır.

Şekil 3.5'te köprü mesnetleri arasındaki mesafeler için elde edilen korelasyon etkisinin frekansa bağlı değişimi görülmektedir. Korelasyonun etkisinin her iki durum içinde artan frekansla azaldığı görülmektedir. Mesnetler arasındaki mesafe arttıkça korelasyonun etkisi azalmaktadır. Üniform yer hareketine karşılık gelen durumda ise korelasyonun tüm frekanslar için bire eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5. Korelasyon etkisinin frekansa bağlı olarak değişimi

Eş. 3.7'deki  $|\gamma_{lm}(w)|^d$  terimi ise yer hareketi yayılma etkisini içermektedir. Dalga yayılma etkisi deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşınca kadar geçen zaman farkından kaynaklanmaktadır.

$$\theta_{lm}(w)^d = -\frac{w d_{lm}^L}{v_{app}} \quad (3.10)$$

Burada  $v_{app}$  görünen dalga yayılma hızını,  $d_{lm}^L$  dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığını göstermektedir.

Bu çalışmada dalga yayılma hızları orta zemin için  $v_{app}=250$  m/s, 500 m/s, 1200 m/s ve sonsuz sert zemin için  $v_{app}=1500$  m/s ve sonsuz, yumuşak zemin için ise  $v_{app}=400$  m/s ve sonsuz hız değerleri kullanılacaktır.

Eş. 3.7'deki son terim ise mesnet noktalarındaki yerel zemin özelliklerinin farklılığından kaynaklanan zemin etkisini göstermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [63].

$$\theta_{lm}(w)^z = \tan^{-1} \frac{Im[H_l(w)H_m(-w)]}{Re[H_l(w)H_m(-w)]} \quad (3.11)$$

Burada  $H_l(w)$  ve  $H_m(-w)$  l ve m mesnet noktalarındaki zemine ait frekans davranış fonksiyonlarını göstermektedir.

Güç spektral yoğunluk matrisi  $-\bar{w}_N \leq \bar{w} \leq \bar{w}_N$  frekans aralığında uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak

$$\hat{S}(\bar{w}) = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_{12}(i\bar{w}, d_{12}^l, d_{12}^t) & \dots & \gamma_{1n}(i\bar{w}, d_{1n}^l, d_{1n}^t) \\ \gamma_{21}(i\bar{w}, d_{21}^l, d_{21}^t) & 1 & \dots & \gamma_{2n}(i\bar{w}, d_{2n}^l, d_{2n}^t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1}(i\bar{w}, d_{n1}^l, d_{n1}^t) & \gamma_{n2}(i\bar{w}, d_{n2}^l, d_{n2}^t) & \dots & 1 \end{bmatrix} S_{\ddot{u}_g}(\bar{w}) \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $S_{\ddot{u}_g}(\bar{w})$  Eş. 3.3 ile tanımlanırken,  $w_n$ , dairesel frekansı, n yapı sistemine etkileyen farklı yer hareketi ivmesi sayısını göstermektedir.

Güç spektral yoğunluk matrisi pozitif tanımlı bir Hermit matrisi olduğu için, Cholesky yöntemi kullanılarak  $\hat{S}(\bar{w})$  matrisi, kompleks bir alt üçgen matrisi  $L(i\bar{w}_k)$  ile  $L^H(i\bar{w}_k)$  Hermit matrisinin çarpımı şeklinde tanımlanabilir.

$$\hat{S}(\bar{w}) = L(i\bar{w}_k)L^H(i\bar{w}_k)S_{\ddot{u}_g}(\bar{w}) \quad (3.13)$$

$$L(i\bar{w}) = \begin{bmatrix} l_{11}(\bar{w}) & 0 & \dots & 0 \\ l_{21}(\bar{w}) & l_{22}(\bar{w}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1}(\bar{w}) & l_{n2}(\bar{w}) & \dots & l_{nn}(\bar{w}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

şeklinde tanımlanırken, burada

$$l_{ii}(\bar{w}) = \left[ 1 - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}(i\bar{w}) l_{ik}^*(i\bar{w}) \right]^{1/2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.15)$$

$$l_{ij}(i\bar{w}) = \frac{\gamma_{ij}(i\bar{w}) - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik}(i\bar{w}) l_{jk}^*(i\bar{w})}{l_{jj}(\bar{w})} \quad j=1,2,\dots,i \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilir.

$$\hat{S}_{ij}(i\bar{w}_k)\Delta\bar{w} = S_{\ddot{u}_g}(\bar{w}_k) \sum_{m=1}^j L_{im}(i\bar{w}_k) L_{jm}^*(i\bar{w}_k) \Delta\bar{w} \quad k=1,2,\dots,N \quad (3.17)$$

Üniform olmayan yer hareketi oluşturmak için öncelikle, tanımlanan spektral yoğunluk fonksiyonları ile uyumlu stasyonere rasgele işlem örnekleri  $\ddot{u}_1(t)$ ,  $\ddot{u}_2(t)$ , ...,  $\ddot{u}_n(t)$  oluşturulmaktadır. Bu durumda,

$$\ddot{u}_i(t) = \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^N A_{ik} \cos[\bar{w}_l t + \beta_{ik}(\bar{w}_l) + \phi_{kl}] \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.18)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Burada  $w_1 = \Delta w$ ,  $\Delta w = w_N/N$ ,  $w_N$  üst kesim frekansını,  $\phi_{kl}(w_l)$   $0-2\pi$  aralığında üniform dağılım gösteren rasgele faz açısını,  $A_{ik}(\bar{w}_l)$  ve  $\beta_{ik}(\bar{w}_l)$  ise oluşturulan yer hareketlerinin genlik ve faz açılarını göstermektedir.  $\phi_{kl}$  ve  $\phi_{rs}$   $k=r$  ve  $l=s$  olması dışında istatistiksel olarak bağımsız olmalıdır.

$$A_{ij}(\bar{w}_k) = \sqrt{4S_{\ddot{u}_g}(\bar{w}_k)\Delta\bar{w}} |l_{ij}(i\bar{w}_k)| \quad 0 \leq \bar{w}_k \leq \bar{w}_N \quad (3.19)$$

$$\beta_{ij}(\bar{w}_k) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}|l_{ij}(i\bar{w}_k)|}{\text{Re}|l_{ij}(i\bar{w}_k)|} \right) \quad 0 \leq \bar{w}_k \leq \bar{w}_N \quad (3.20)$$

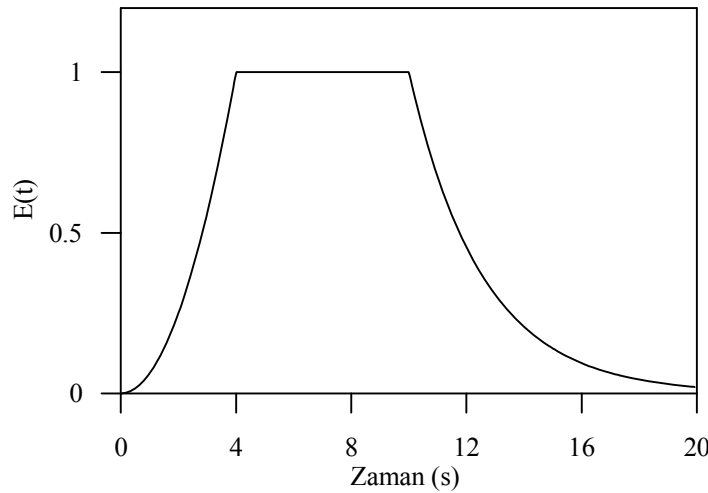
Deprem hareketi stasyonere olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyonere olmayan yer hareket ivmeleri, stasyonere olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyonere olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılmasından elde edilmektedir.

$$a_k(t) = \xi(t)\ddot{u}_k(t) \quad (3.21)$$

Şekil fonksiyonu, yer hareketinin zaman tanım alanında etkili olduğu düşünülen süre içerisinde titreşime başlaması, dominant titreşim bölgesi ve titreşimin azalmaya başlaması olarak üç bölümde tanımlanabilir. Dominant titreşim bölgesine kadar olan kısım parabolik, dominant titreşim bölgesi sabit ve titreşimin azalmaya başladığı bölge üssel fonksiyonlarla tanımlanmıştır. Literatürde kullanılan bir çok şekil fonksiyonu mevcuttur [64-65]. Bu tez çalışmasında Şekil 3.6'da görülen [66] şekil fonksiyonu kullanılacaktır.

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 \leq t \leq t_n \\ \exp(-0,394(t - t_n)) & t_n < t \end{cases} \quad (3.22)$$

Burada  $t_0$  ve  $t_n$  dominant deprem titreşim bölgesindeki stasyoner bölümüm başlangıç ve bitiş sürelerini göstermektedir. Çalışmada Şekil 3.6'da görülen şekil fonksiyonu  $t_0=4s$  ve  $t_n=10s$  değerleri ile kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Şekil fonksiyonu

$\ddot{u}_i(t)$  örnekleri oluşturmak için Eş. 3.18 yerine  $\ddot{u}_i(t)$ 'nin Fourier dönüşümünü almak suretiyle frekans alanındaki aşağıdaki ifade kullanılabilir.

$$\ddot{U}_i(i\bar{w}_k) = \sum_{m=1}^i B_{im}(\bar{w}_k) [\cos\alpha_{im}(\bar{w}_k) + i\sin\alpha_{im}(\bar{w}_k)] \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.23)$$

Burada,

$$B_{im}(\bar{w}_k) = \frac{1}{2} A_{im}(\bar{w}_k) \quad (3.24)$$

$$\alpha_{im}(\bar{w}_k) = \beta_{im}(\bar{w}_k) + \phi_{mk} \quad (3.25)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareket ivme kayıtları, %2 sönüm oranı için ve 0.5g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle, Eurocode 8 (EC 8) (2004)'e [61] uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. EC 8, elastik davranış spektrumunu yapının periyoduna bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlamaktadır.

$$0 \leq T \leq T_B \quad S_e(T) = a_g S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (2,5\eta - 1) \right] \quad (3.26)$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = 2,5 a_g S \eta \quad (3.27)$$

$$T_C \leq T \leq T_D \quad S_e(T) = 2,5 a_g S \eta \left[ \frac{T_C}{T} \right] \quad (3.28)$$

$$T_D \leq T \leq 4s \quad S_e(T) = 2,5 a_g S \eta \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \quad (3.29)$$

$$a_g = \gamma_I a_g R \quad (3.30)$$

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (3.31)$$

$S_e(T)$  =Elastik tasarım spektrumu

$T$  = tek serbestlik dereceli sistemin titreşim periyodu

$a_g$  = zemin sınıfı için maksimum referans yer hareket ivmesi

$\gamma_I$  = önem katsayısı

$T_B$  = ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının alt sınırı

$T_C$  = ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının üst sınırı

$T_D$  = sabit yerdeğiştirme davranışının elde edileceği periyot sınırı

$S$  = zemin parametresi

$\eta$  = sönüm düzeltme katsayısı ( $\eta = 1$ , %5 sönüm oranı için)

Davranış spektrumu ile uyumlu yer hareket ivmesi oluşturulurken, sert orta ve yumuşak zemin cinsleri için EC 8’de tanımlanan B, C ve D türü zemin sınıfları dikkate alınacaktır [61].

Çizelge 3.2. Zemin sınıfına göre davranış spektrum parametreleri [61]

Zemin sınıfı	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
A	1,00	0,15	0,40	2,00
B	1,20	0,15	0,50	2,00
C	1,15	0,20	0,60	2,00
D	1,35	0,20	0,80	2,00
E	1,40	0,15	0,50	2,00

0.5g’ye göre normalizasyonu yapılmış ivme kaydından sönüm oranı üst yapı ile aynı olacak şekilde davranış hız spektrumu ( $S_{pv}^a(\xi_s, T)$ ) elde edilir. Elde edilen hız spektrumu dikkate alınan zemin cinsi için EC8’e göre elde edilen tasarım hız spektrumu ( $S_{pv}(\xi_s, T)$ ) ile karşılaştırılır. Bu iki spektrum eğrisi tam olarak üst üste çakışmayacaktır. Tasarım hız spektrumu ile uyumlu bir spektrum eğrisi elde edebilmek için ivme kaydından elde edilen hız spektrumu üzerinde düzeltmeler yapılması gerekmektedir. Dikkate alınan periyot sınırları içinde tasarım hız spektrumu ve ivme kaydının davranış hız spektrumu arasındaki oran hesaplanır. Daha sonra Fourier dönüşümü ile frekans alanında elde edilen ivme kaydı, hız spektrumları arasındaki oranı ifade eden katsayı ile çarpılır. Düzeltilmiş ivme kaydı ters fourier dönüşümü ile tekrar zaman tanım alanına çevrilir ve tekrar hız spektrumu elde edilerek tasarım hız spektrumu ile karşılaştırılır [67]. Çalışmada elde edilen ivme kayıtlarından EC8 ile uyumlu kayıtlar elde edebilmek için üç iterasyonun yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Yukarıda anlatılan yöntem ile gerek üniform gerekse dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkilerine bağlı olarak değişim gösteren durumlar için yer hareketleri üretilecektir.

Değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki sistemlerin dinamik analizinde yapısal tepkiler zahiri-statik ve dinamik tepkilerin toplamından oluşmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirmelerin hesabında yer ivmesinin integrasyonu ile elde edilen yerdeğiştirmeler kullanılmaktadır. Elde edilen yer hareketi ivme kaydının doğrudan integrasyonu sonucunda kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler oluşabilmektedir. Kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler hesaplanan tepkilerde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bunun için elde edilen ivme-zaman eğrilerine eksen düzeltilmesi yapılması gerekmektedir [63].

Eksen düzeltilmesi bir eğri yaklaşırma yöntemi ile yapılabilmektedir. Eğri yaklaşırma yönteminde düşük dereceli polinomlar kullanılmaktadır. İvme zaman kaydına uygulanacak eksen düzeltilmesi için bu çalışmada aşağıda ifade edilen polinom kullanılmıştır.

$$\ddot{u}_{cg}(t) = \ddot{u}_g(t) - P(t) \quad (3.32)$$

Burada  $\ddot{u}_g(t)$ , eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme değerlerini,  $P(t)$  ise eksen düzeltilmesi için seçilen polinom fonksiyonunu göstermektedir.  $P(t)$  fonksiyonunu dördüncü dereceden bir polinom olarak seçilmesi durumunda

$$P(t) = a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sırasıyla yerdeğiştirme, hız ve ivme kayıtlarının eksen düzeltilmesinde kullanılacak fonksiyonlar aşağıdaki gibi olacaktır.

$$u_{cg}(t) = u_g(t) - (a_1 t^4 + a_2 t^3 + a_3 t^2 + a_4 t) \quad (3.34)$$

$$\dot{u}_{cg}(t) = \dot{u}_g(t) - (4a_1 t^3 + 3a_2 t^2 + 2a_3 t + a_4) \quad (3.35)$$

$$\ddot{u}_{cg}(t) = \ddot{u}_g(t) - (12a_1t^2 + 6a_2t + 2a_3) \quad (3.36)$$

Bu ifadelerdeki  $a_1$ - $a_4$  katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı dinamik analiz çalışmalarında sistemin başlangıç yerdeğiştirme ve hız değerleri sıfır olacağı için  $a_4$  katsayısı sıfır olacaktır. Diğer katsayıların belirlenmesinde en küçük kareler metodu kullanılmaktadır. En küçük kareler yönteminde değerlerin seçilen polinoma uzaklıklarının karelerinin toplamı minimum olmaktadır. Eş. 3.36 kullanılarak,

$$E = \int_0^{t_t} \{\ddot{u}_g(t) - (12a_1t^2 + 6a_2t + 2a_3)\}^2 dt \quad (3.37)$$

şeklde ifade edilmektedir. Burada  $t_t$  ivme kaydının toplam süresini, E ise toplam hatayı göstermektedir.  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  katsayıları E'nin minimum olması şartından elde edilir. Buna göre

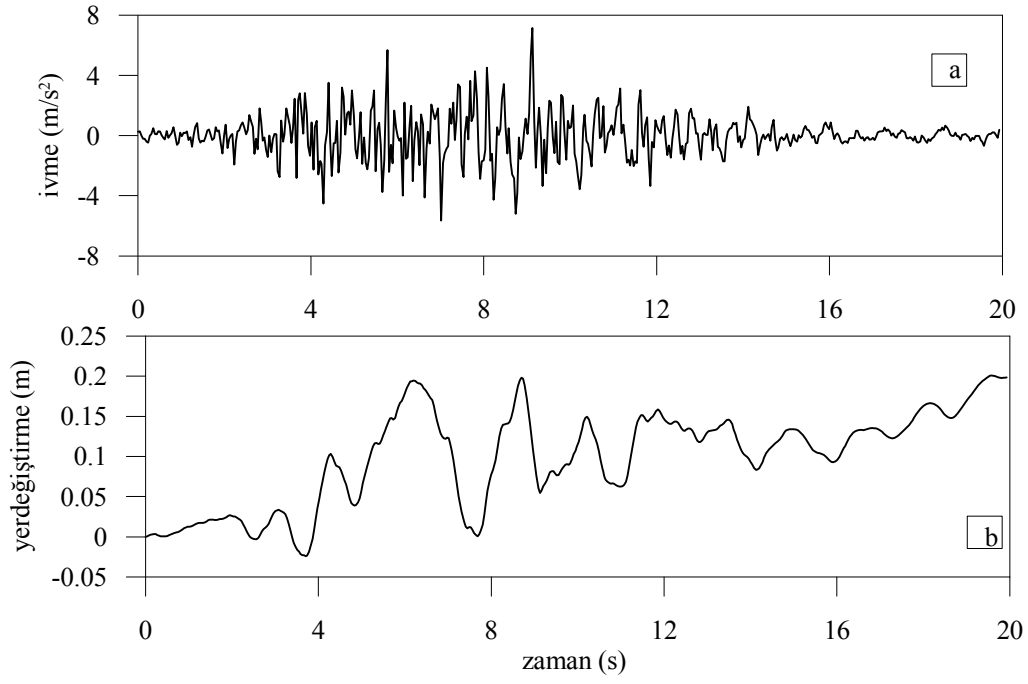
$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = -2 \int_0^{t_t} 12t^2 \{\ddot{u}_g(t) - (12a_1t^2 + 6a_2t + 2a_3)\} dt = 0 \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_2} = -2 \int_0^{t_t} 6t \{\ddot{u}_g(t) - (12a_1t^2 + 6a_2t + 2a_3)\} dt = 0 \quad (3.39)$$

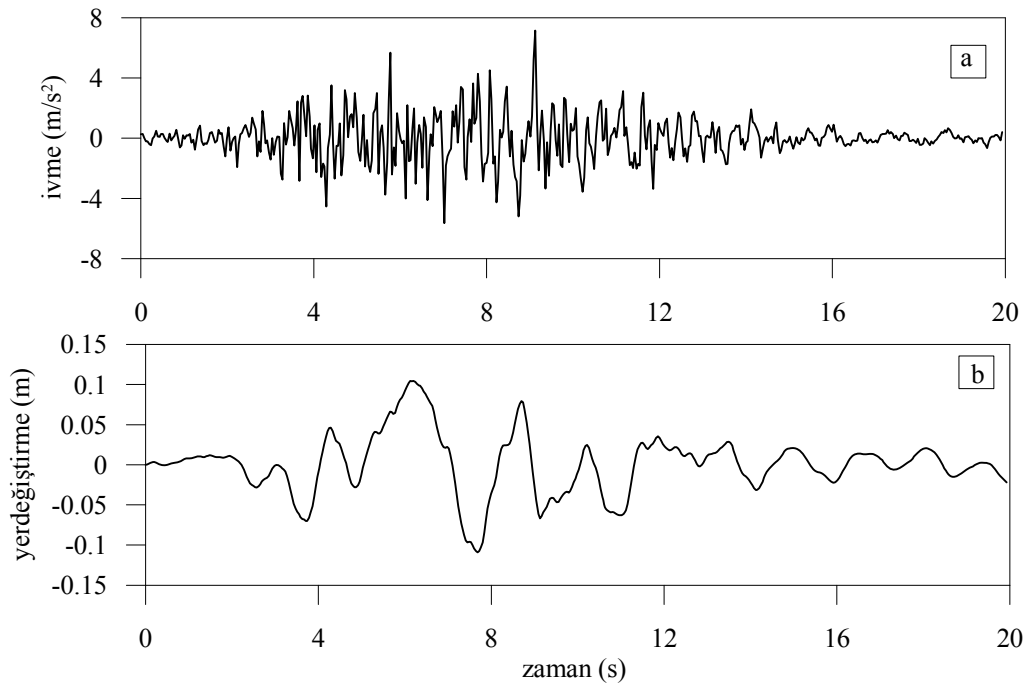
$$\frac{\partial E}{\partial a_3} = -2 \int_0^{t_t} 2 \{\ddot{u}_g(t) - (12a_1t^2 + 6a_2t + 2a_3)\} dt = 0 \quad (3.40)$$

olmalıdır.  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  katsayıları Eş. 3.38, 3.39, 3.40 da gerekli işlemler yapılarak bulunur [69].

Çalışmada simülasyon yöntemi ile elde edilen ivme-zaman kayıtlarına, Chiu (1997) tarafından önerilen yöntem takip edilerek Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır [70]. Eksen düzeltilmesi yapılan ivme kaydının çift integrasyonundan elde edilen yerdeğiştirme kaydına Eş. 3.34 ile tekrar eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 3.7-8'de homojen sert zemin için elde edilen üniform yer hareketine ait eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme ve yerdeğiştirme kaydı ile eksen düzeltilmesi yapıldıktan sonra elde edilen ivme ve yerdeğiştirme kaydı görülmektedir.



Şekil 3.7 (a) Homojen sert zemin etkisinde elde edilmiş ivme-zaman kaydı  
(b) İvme kaydının çift integrasyonundan elde edilmiş yerdeğiştirme zaman kaydı



Şekil 3.8. (a) Eksen düzeltilmesi yapıldıktan sonra elde edilen ivme zaman kaydı  
(b) İvme kaydının çift integrasyonundan elde edilmiş eksen düzeltilmesi yapılmış yerdeğiştirme zaman kaydı

Çalışmada yer hareketinin süresi 20 saniye olarak alınırken, simülasyon işlemi yapılırken maksimum frekans 160 Hz ve kesilme frekansı 80 Hz alınmıştır. Yer hareket ivmesi ters fourier dönüşüm yöntemi ile frekans alanında oluşturulurken, her bir simülasyon için toplam  $N=512$  terim kullanılmaktadır. İteratif bir yöntemle uniform yer hareketi, dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkileri dikkate alınmak suretiyle, her bir durum için EC 8 spektrum uyumlu yer hareket ivmesi kayıtları elde edilecektir.

Çalışmada kullanılan yöntemde, yer hareketleri elde edilirken anakaya için üretilen yer hareketinden, anakaya üzerindeki zemine ait filtre parametrelerine bağlı olarak serbest zemin yüzeyi yer hareket ivmeleri elde edilmektedir. Kullanılan yöntemde zeminin lineer davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Zeminin lineer olmayan etkisinin dikkate alınması durumunda yapısal sistem davranışının ne oranda değiştiğini görmek için, zeminin lineer olmayan özelliğini dikkate alarak tabakalı zeminlerin deprem hareketi etkisindeki davranışını inceleyen EERA [71] programı kullanılarak yer hareketleri üretilmiştir. EERA programında anakaya yer hareketi olarak, geliştirilen program ile anakaya için elde edilen ivme kaydı kullanılmıştır. Anakaya üzerinde bir zemin tabakası olduğu kabul edilerek sert zemin (B zemin sınıfı) ve yumuşak zemin (D zemin sınıfı) için serbest zemin yüzeyi yer hareket ivmeleri elde edilmiştir. Geliştirilen bilgisayar programından ve EERA programından elde edilen ivme kayıtları ekisinde, periyodu köprü kulesi periyoduna ( $T=0,36$  s) eşit tek serbestlik dereceli bir sistemin dinamik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, zeminin lineer olmayan özelliğinin dikkate alınması durumunda sert zemin ortamında maksimum yatay yerdeğiştirme değerini %2, yumuşak zemin ortamında ise % 38 arttırdığı görülmüştür.

### **3.2.Hareket Denklemi**

Yapı sistemlerinin klasik dinamik analizinde yapının oturduğu zeminin genellikle şekil değiştirmeyen, rijit bir ortam olduğu ve yapının tüm mesnet noktalarının aynı anda aynı yer hareketine maruz kaldığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla yapı

temelinin zemine ankastre bağı bir sistem olduğu ve yer hareketinin de zemin ya da yapıdan etkilenmediği ve yapı mesnetine doğrudan etkidiği düşünölmektedir. Eğer yapı hafif ve mesnetlendiği zemin sert zemin ise dinamik analizi yukarıda bahsedilen kabullerle yapmak uygun olabilir.

Nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, köprüler ve barajlar gibi depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen yapı sistemleri, günümüzde zorunlu olarak aktif deprem bölgelerinde yapılmaktadır. Bu tür yapıların gerekli bazı durumlarda, çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde inşa edilmesi zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki karşılıklı dinamik etkileşim probleminin konusunu oluşturmaktadır. Bu bölgedeki yapının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin sisteminin dinamik özelliklerinin anlaşılması gerekmektedir. Yapı ve zemin arasındaki karşılıklı etkileşim sonucu, yapısal davranış önemli ölçüde değişebileceği gibi zemin içindeki yer sarsıntısı hareketi de yapı civarında değişime uğrar. Zemine gömülü olsun olmasın yapıların dinamik hesabında yapı ve zemin ilişkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Zemin-yapı etkileşim problemleri doğrudan çözüm yöntemi (direct method) ve alt sistem yaklaşımı (substructure) yöntemi ile ele alınmaktadır.

Doğrudan çözüm yönteminde dinamik yükleme etkisi altındaki zemin-yapı sisteminde, yerdeğiştirme, mod şekilleri ve kesit tesirleri zaman ve frekansa bağı olarak tek adımda sonlu elemanlar metodu kullanılarak bulunmaktadır. Zamana bağı çözümlerde hareket denklemi modal analiz ve doğrudan integrasyon yöntemi ile çözülmektedir. Frekans alanında ise hareket denklemi frekansın bir fonksiyonu olarak çözümlüp Fourier dönüşümü uygulanarak zamana bağı değerlere geçilmektedir [72].

Alt sistem yaklaşımında üst yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak ele alınır ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denge denklemleri, daha sonra üst yapı zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Zeminin bağımsız bir ortam olarak incelenmesi ile, yapı-zemin arakesitindeki

serbestlik dereceleri cinsinden elde edilen temel ortamının rijitlik matrisi ve etkin yük vektörü daha sonra yapının dinamik dengesinde göz önüne alınır. Dış yüklerin etkisi altındaki temelin hareketlerini belirlemek ve bunun sonucunda da zemin ve temel özelliklerini dikkate alarak üst yapının yerdeğiştirme bileşenlerinin hesaplanması çözüm aşamalarını oluşturur [73].

Alt sistem yaklaşımının en önemli aşaması, temel-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen temellerin davranışının incelenmesinde kullanılan temel ortamının empedans büyüklüklerinin belirlenmesidir. Yapı-zemin etkileşim problemleri, temel-zemin sisteminin kompleks dinamik rijitliklerini gösteren empedans fonksiyonları ile değerlendirilmektedir. Empedans fonksiyonları temel ortamının rijitlik düzeyini ya da başka bir ifade ile zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğini gösteren frekans alanında tanımlı kompleks ifadelerdir. Kullanılan yöntemde frekans tanım alanının tercih edilmesinin ana nedeni, sistemden dışarıya doğru yayılan ve zeminin sonsuzluğu nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için eşdeğer anlamda kullanılan geometrik sönümü adı verilen ve malzeme sönümü ile ilgisi bulunmayan bir sönüm mekanizmasının, çözümün zaman alanında yapılması durumunda analitik ifadelere katılmasının kolay olmayışdır [73].

Bu çalışmada tüm yapı-zemin etkileşim sistemini, yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem (substructure method) yaklaşımı dikkate alınacaktır.

Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki üst yapı için hareket denklemi yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{p(t)\} \quad (3.40)$$

Burada  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  ve  $\{u\}$  ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini,  $p(t)$  ise dış kuvvet vektörünü göstermektedir. Sistemin toplam serbestlik derecesi ( $n = n_s + n_b$ ),

sadece üst yapıya ait serbestlik dereceleri ( $n_s$ ) ve temel-zemin etkileşim yüzeyindeki serbestlik derecelerinin ( $n_b$ ) toplamından oluşmaktadır. Eş. 3.40, üst yapı ve üst yapı-zemin etkileşim serbestlik dereceleri cinsinden alt kısımlara bölünerek,

$$\begin{pmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^t \\ \dot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (3.41)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $[M_{ss}]$ ,  $[C_{ss}]$  ve  $[K_{ss}]$  sırasıyla üst yapı kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir.  $[M_{sb}]$ ,  $[C_{sb}]$  ve  $[K_{sb}]$  üst yapı ile temel etkileşim yüzeyindeki kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $[M_{bs}]$ ,  $[C_{bs}]$  ve  $[K_{bs}]$  ise sırasıyla  $[M_{sb}]$ ,  $[C_{sb}]$  ve  $[K_{sb}]$  ifadelerinin transpozelerini ifade etmektedir.  $[M_{bb}]$ ,  $[C_{bb}]$  ve  $[K_{bb}]$  matrisleri ise etkileşim yüzeyindeki kütle, sönüm ve rijitlik matrislerine karşılık gelmektedir.  $\{\ddot{u}_s^t\}$ ,  $\{\dot{u}_s^t\}$  ve  $\{u_s^t\}$  sırasıyla üst yapı toplam ivme, hız ve yerdeğiştirmeleri vektörlerini,  $\{\ddot{u}_b^t\}$ ,  $\{\dot{u}_b^t\}$  ve  $\{u_b^t\}$  etkileşim yüzeyindeki toplam ivme, hız ve yerdeğiştirmeleri vektörlerini göstermektedir. Üst yapıya ait serbestlikler, bilinmeyen serbestlik dereceleri ve etkileşim yüzeyindeki serbestlikler, bilinen serbestlik dereceleri olarak tanımlanabilir.

Toplam yerdeğiştirme vektörü, zahiri-statik ve dinamik bileşenlere bağlı olarak,

$$\begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_s^d \\ u_b^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_s^{qs} \\ u_g \end{Bmatrix} \quad (3.42)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\{u_b^d\}$  yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki yerdeğiştirme vektörünü ve  $u_g$  serbest zemin yüzeyindeki değişen yer hareketi vektörünü ifade etmektedir.

Zahiri-statik yerdeğiştirme bileşenleri, Eş. 3.42 ve Eş. 3.41'de yerine yazılıp dinamik etkilere ait ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörleri sıfır alınarak ihmal edildiğinde zahiri-statik yerdeğiştirme bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$u_s^{qs} = -K_{ss}^{-1} K_{sb} u_g \quad (3.43)$$

Eş. 3.41’de kütle matrisinde  $[M_{sb}]$  ve  $[M_{bs}]$  matrislerinin sıfırdan farklı terimi çok azdır. Dolayısıyla, depremden dolayı meydana gelen etki kuvvet vektörüne katkısı çok az olacağından ihmal edilebilir [57]. Özellikle kütle matrisinin toplu kütleli sistem olarak modellendiği durumlarda (diagonal kütle matrisi)  $[M_{sb}]$  matrisi sıfır olmaktadır.

Eş. 3.43 ve Eş. 3.41’de yerine koyulup tekrar düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^d \\ \ddot{u}_b^d \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^d \\ \dot{u}_b^d \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^d \\ u_b^d \end{Bmatrix} = \\ & - \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} -K_{ss}^{-1}K_{sb}\ddot{u}_g \\ \ddot{u}_g \end{Bmatrix} - \begin{pmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} -K_{ss}^{-1}K_{sb}\dot{u}_g \\ \dot{u}_g \end{Bmatrix} - \\ & \begin{pmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} -K_{ss}^{-1}K_{sb}u_g \\ u_g \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.44)$$

eşitliği elde edilir.

Eş. 3.44’ün sağ tarafındaki sönüm ile ilgili terimler sönüm matrisi rijitlik matrisi ile orantılı ise sıfır olacaktır. Sönümün rijitlikle orantılı olmaması durumunda bile sönüm kuvvetleri, rijitlik ve atalet kuvvetleri ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmakta ve ihmal edilebilmektedir. Bu durumda Eş. 3.44 tekrar düzenlenirse,

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^d \\ \ddot{u}_b^d \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^d \\ \dot{u}_b^d \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^d \\ u_b^d \end{Bmatrix} = \\ & \begin{Bmatrix} M_{ss}K_{ss}^{-1}K_{sb}\ddot{u}_g \\ -M_{bb}\ddot{u}_g \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.45)$$

eşitliği elde edilir. Eş. 3.45 frekans alanında yazılırsa Eş. 3.46 elde edilir.

$$\left\{ -w^2 \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} + iw \begin{pmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{pmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} u_s^d(iw) \\ u_b^d(iw) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sb} \ddot{u}_g(iw) \\ -M_{bb} \ddot{u}_g(iw) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b(iw) \end{Bmatrix} \quad (3.46)$$

Burada etkileşim kuvvetleri ( $P_b(iw)$ ) empedans matrisi cinsinden ( $K_I(iw)$ ) cinsinden ifade edilebilir. Etkileşim kuvvetleri,

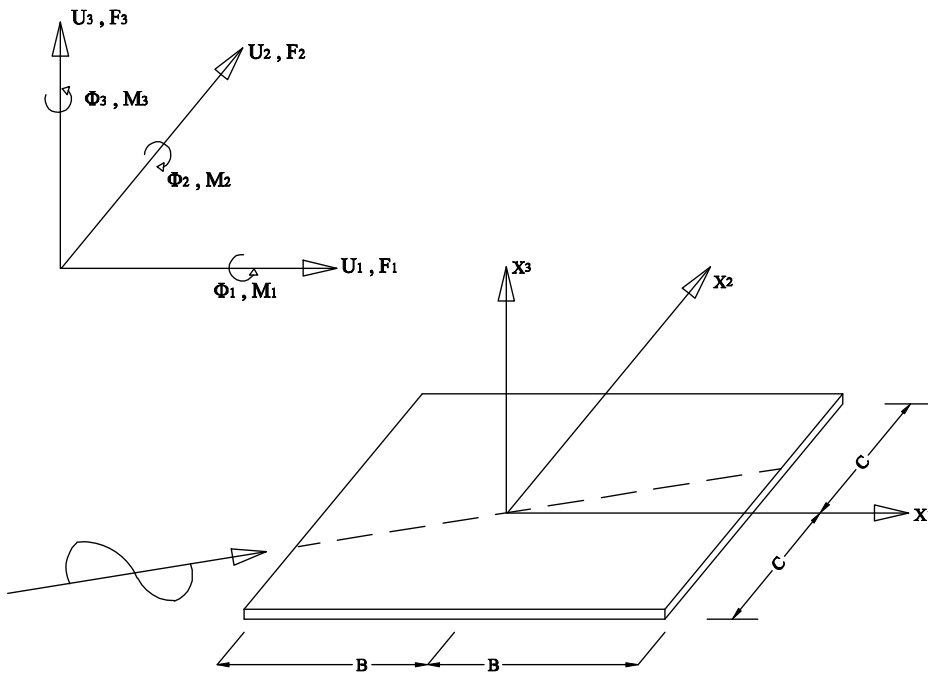
$$-P_b(iw) = K_I(iw)u_b^d(iw) \quad (3.47)$$

şeklinde ifade edilebilir.

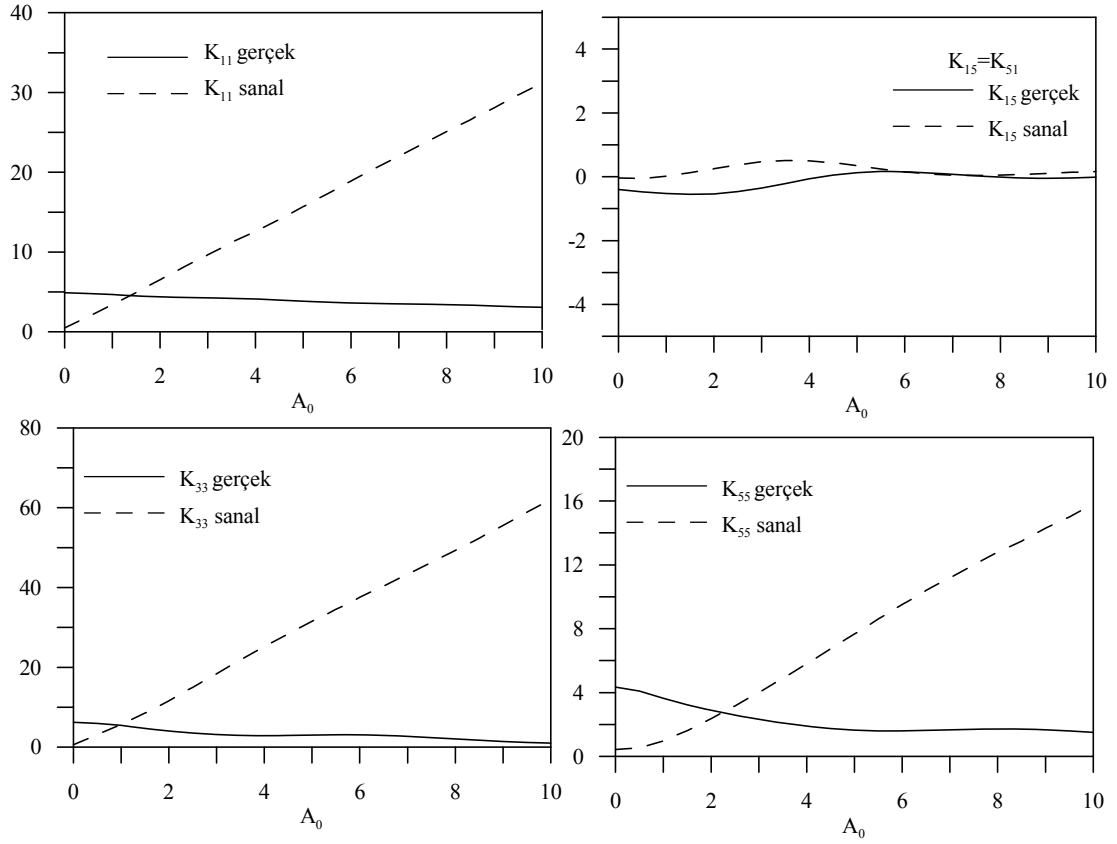
Aralarında etkileşim olmadığı kabul edilen n tane temel için empedans matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$K_I(iw) = \begin{pmatrix} K_{I1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{I2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & K_{In} \end{pmatrix} \quad (3.48)$$

Bu çalışmada Wong ve Luco tarafından yüzeysel kare temeller için elde edilen empedans fonksiyonu değerleri kullanılacaktır. Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin alt sistemi homojen, izotropik ve lineer elastik olarak tanımlanmaktadır. Analizlerde kullanılan temel geometrisi ve dikkate alınan serbestlikler Şekil 3.9'da verilmektedir. Şekil 3.10'da köprü mesnetlerinde dikkate alınan serbestlik dereceleri ile ilgili yatay-düşey ötelenme ve dönme terimleri için dikkate alınan empedans fonksiyonlarına ait grafikler verilmektedir.



Şekil 3.9. Temel ve serbestlikler



Şekil 3.10.  $K_{11}$ ,  $K_{15}=K_{51}$ ,  $K_{33}$ ,  $K_{55}$  empedans fonksiyonları ( $B/C=1$ ,  $\xi=5\%$ )

Dış kuvvetler ve temeli hareketi arasındaki ilişki

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (3.49)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada  $K$ , temel empedans matrislerini göstermektedir.

Genelleştirilmiş kuvvet ve genelleştirilmiş yerdeğiştirme vektörleri

$$\{F\} = \left( F_1, F_2, F_3, \frac{M_1}{L}, \frac{M_2}{L}, \frac{M_3}{L} \right)^T \quad (3.50)$$

$$\{U\} = (U_1, U_2, U_3, L\varphi_1, L\varphi_2, L\varphi_3)^T \quad (3.51)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.  $\{F\}$  ve  $\{U\}$  genelleştirilmiş kuvvet ve yerdeğiştirme vektörünü göstermektedir.  $L$  ise alanı dikdörtgen temel alanına eşit eşdeğer dairesel temel yarıçapını göstermektedir.

$$L = \left(\frac{ABC}{\pi}\right)^{1/2} \quad (3.52)$$

Dikdörtgen temel simetrik olduğu için, rijitlik matrisi de bu durum için simetrik olacaktır.

$$[K] = GL \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & K_{15} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{42} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{51} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Empedans matrisinin  $K_{ij}$  terimleri kompleks terimlerdir ve temelin B/C oranına, zeminin Poisson ve sönüm oranına bağlı olarak elde edilmiş tablolardan boyutsuz frekans oranına bağlı bir denklem haline getirilmiş ve aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$K_i(iw) = K(a_0) + iK(a_0) \quad (3.54)$$

Boyutsuz frekans katsayısı;

$$A_0 = \frac{wL}{\beta} \quad (3.55)$$

şeklinde ifade edilirken,

$$\beta = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2} \text{ kayma dalgası hızını göstermektedir.}$$

Çalışmada iki boyutlu köprü modeli kullanıldığından, köprü temelini zeminle etkileşimi olduğu kabul edilen düğüm noktaları kule ayaklarında üç serbestlik derecesi ile (yatay ve düşey ötelenme ve dönme), diğer mesnet noktalarında iki serbestlik derecesi (yatay ve düşey ötelenme) ile dikkate alınmıştır. Köprü

temellerine ait empedans matrisleri için Wong ve Luco tarafından %5 sönüm oranı için ve  $B/C=1$  oranı için belirlenmiş değerler kullanılmıştır [39].

Eş. 3.47, Eş. 3.46'da yerine koyulduğunda hareket denkleminin frekans alanındaki ifadesi,

$$\begin{aligned} & \left\{ -w^2 \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} + iw \begin{pmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} + K_I \end{pmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} u_s^d(iw) \\ u_b^d(iw) \end{Bmatrix} = \\ & \begin{Bmatrix} M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sb} \ddot{u}_g(iw) \\ -M_{bb} \ddot{u}_g(iw) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.56)$$

şeklini alır.

Yukarda verilen formülasyonda viskoz sönüm için yazılmıştır. Histeretik sönüm yaklaşımı dikkate alındığında, rijitlik matrisi aşağıdaki şekilde dikkate alınacaktır.

$$K^* = (1 + iG)K \quad (3.57)$$

Burada Eş. 3.56 tekrar düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} & -w^2 \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ss}^* & K_{sb}^* \\ K_{bs}^* & K_{bb}^* + K_I \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^d(iw) \\ u_b^d(iw) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_s K_{ss}^{-1} K_{sb} \ddot{u}_g(iw) \\ -M_b \ddot{u}_g(iw) \end{Bmatrix} \\ & (3.58) \end{aligned}$$

ifadesi elde edilir.

Deprem mühendisliği problemlerinde alışılmış derecedeki küçük sönüm oranları için  $\xi^2$  terimi ihmal edilebilir ve  $G = 2i\xi^2 + 2\xi\sqrt{1 + \xi^2}$  ifadesi  $G = 2\xi$  olur. Histeretik sönüm oranı frekanstan bağımsızdır ve tüm üst yapı için sabit bir değerdir.

Eş. 3.58’de sol taraftaki matris ifadeler toplanırsa alt sistem yaklaşımında üst yapı için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{pmatrix} I_{ss}(i\omega) & I_{sb}(i\omega) \\ I_{bs}(i\omega) & I_{bb}(i\omega) + K_I(i\omega) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^d(i\omega) \\ u_b^d(i\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_{ss}K_{ss}^{-1}K_{sb}\ddot{u}_g(i\omega) \\ -M_{bb}\ddot{u}_g(i\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.59)$$

Eş. 3.59’daki  $I_{ij}(i\omega)$  matrisleri kütle, rijitlik ve sönüm matrislerinin toplamından meydana gelmektedir.

Toplam serbestlik derecesi üst yapıya ait serbestlikler  $n_s$  ve yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki serbestlik derecelerinin  $n_b$  toplamından meydana gelmektedir. Üst yapı serbestlik dereceleri çok büyük olduğu zaman hareket denklemini oluşturan matrislerin boyutu büyüyecek ve çözüm aşamasında zorluklara neden olacaktır. Bu bakımdan Eş. 3.59 doğrudan çözmek yerine önce sadece üst yapı için titreşim modları hesaplanır;

$$[K_{ss} - \omega^2 M_{ss}] \phi_s = 0 \quad (3.60)$$

Eş. 3.60’da  $[K_{ss}], [M_{ss}]$  sırasıyla üst yapı için rijitlik ve kütle matrislerini göstermektedir. Yukarıda verilen özdeğer probleminin çözümünden  $l$  tane mod için ( $l \ll n_s$ ) yapının doğal frekansları  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l$  ve ilgili mod titreşim şekilleri  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_l$  elde edilir. Üst yapı serbestlikleri için elde edilen mod vektörleri birleştirilirse Eş. 3.61’deki mod matrisi elde edilir.

$$\Phi = (\phi_1, \phi_2 \dots \phi_l) \quad (3.61)$$

Dinamik yerdeğiştirme vektörü

$$\begin{pmatrix} u_s^d \\ u_b^d \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & Y \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_b \end{Bmatrix} = [Q]\{Y\} \quad (3.62)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $I$   $n_b \times n_b$  boyutunda birim matrisi ve  $\gamma = -K_{ss}^{-1}K_{sb}$  etkileşim katsayı matrisini göstermektedir.

Eş. 3.62, Eş. 3.45'te yerine koyulup, her iki tarafı  $[Q]^T$  ile çarpılarak düzenlenirse;

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{array}{cccc} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_l \end{array} \right] \Phi^T M_{ss} \gamma \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \\
 & \left[ \begin{array}{cccc} \gamma^T M_{ss} \Phi & & & \\ & \gamma^T M_{ss} \gamma + M_{bb} & & \\ & & & \end{array} \right] \\
 & \left[ \begin{array}{cccc} 2\xi_1 w_1 m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2\xi_2 w_2 m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2\xi_l w_l m_l \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \\
 & \left[ \begin{array}{cccc} 0 & & & \\ & 0 & & \\ & & & \\ & & & 0 \end{array} \right] \\
 & \left[ \begin{array}{cccc} w_1^2 m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2^2 m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & w_l^2 m_l \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} = -Q^T \begin{pmatrix} M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} -K_{ss}^{-1} K_{sb} \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_g \end{Bmatrix} + \\
 & Q^T \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \tag{3.63}
 \end{aligned}$$

denklemini elde edilir.

Eş. 3.63 ile gösterilen hareket denklemi frekans alanına dönüştürülürse, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \left[ -w^2 \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_l \\ \gamma^T M_{ss} \Phi & & & \gamma^T M_{ss} \gamma + M_{bb} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Phi^T M_{ss} \gamma \\ \\ \\ \end{pmatrix} \right] + \\
& \left( \begin{pmatrix} w_1^2 m_1 + 2i\xi_1 w_1 \bar{w} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & w_l^2 m_l + 2i\xi_l w_l \bar{w} m_l \\ 0 & & & S_l(iw) \end{pmatrix} \begin{matrix} 0 \\ \\ \\ 0 \end{matrix} \right) \begin{matrix} \{u_s(i\bar{w})\} \\ \{u_b(i\bar{w})\} \end{matrix} = \\
& Q^T \begin{Bmatrix} M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sb} \\ -M_{bb} \end{Bmatrix} \ddot{u}_g(i\bar{w}) \tag{3.64}
\end{aligned}$$

Böylece  $n_s+n_b$  serbestlik derecesine sahip sistem  $l+n_b$  serbestlik derecesine indirgenmiş olmaktadır [1].

### 3.3.Kablolu Köprüler

#### 3.3.1. Kablolu köprülerin temel özellikleri

Kablolu köprüler kabloların ana kirişe bağlandıkları noktalardan, kablolar ile elastik olarak desteklenen lineer olmayan sistemler olup; döşeme ile birlikte çalışan ana kirişten, basınca çalışan kablolardan oluşan üç boyutlu sistemlerdir.

Kablolu köprü sistemlerinin temel yapısal karakteristiği; kulelerin tepelerinden uzanan öngermeli yada sonradan çekme verilmiş kablolar ile, asal kirişin bir bütün olarak çalışmasıdır. Çekmeye çalışan kablolardan gelen yatay basınç kuvvetlerinin kirişler tarafından alınması alt yapıda önemli bir ekonomi sağlamaktadır. Kablolu köprülerdeki kulelerin ve asal kirişin; kabloların neden olduğu büyük eksenel basınç kuvvetleri ile birlikte eğilmeye maruz kalması kablolu köprülerin ayırt edici özelliğidir.

Yüksek mukavemetli çelikten oluşan ortotropik plak döşeme kullanılması ile, özellikle son yıllarda, kablolu köprülerin merkez açıklığı arttırılmıştır. Nitekim son yıllarda

inşa edilen kablolu köprülerin merkez açıklığı 1088 m'ye (Sutong Köprüsü) kadar ulaşmıştır.

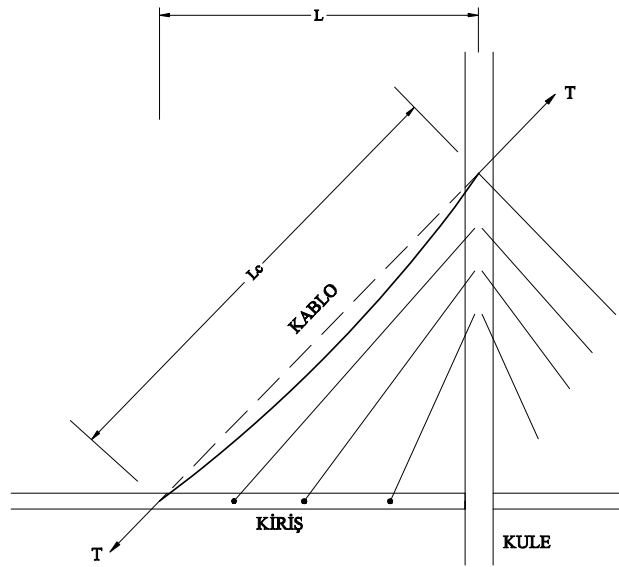
Kabloların tepelerinde toplandığı A-Çerçeve tipindeki kulelerde yapı rijitliği ve stabilitesi artmaktadır. Böylece tabliye ve her iki düzlemdeki kablo sistemleri eğilmeye karşı birbirlerine rijit olarak bağlanmış bir sistem şeklinde çalışırlar. A-çerçeve tipindeki kuleler, yüksek burulma rijitlikleri sayesinde kablolu köprüler için daha çok tercih edilmektedirler.

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

- 1- Kabloların öz ağırlıklarından kaynaklanan sehimlerden dolayı, lineer olmayan eksenel kuvvet deformasyon ilişkisi.
- 2- Eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki kule ve uzunlamasına doğrultudaki kiriş elemanları için, lineer olmayan eksenel kuvvet-deformasyon ve eğilme momenti deformasyon ilişkisi.
- 3- Bu tür yapılar için servis yükleri altında olabileceği gibi, çevresel yüklerden de kaynaklanabilecek büyük yerdeğiştirmelerin neden olduğu geometri değişimleri [74].

Kablolu köprülerde kullanılan kablolar, trafik yüklerini ve tabliye ağırlığını kulelere aktarması nedeniyle, oldukça önemli bir işleve sahiptir. Düşey doğrultuda olmayan tüm kablolar kendi ağırlığı altında sehim yapar. Kablolu köprülerde kabloların eksenel rijitlikleri, kablolarda oluşan bu sehim nedeniyle değişmektedir. Kabloya gelen eksenel kuvvet arttıkça, sehim azalmakta ve bu durumda kablonun eksenel rijitliği de artış göstermektedir. Dolayısıyla, kablo eksenel rijitliği kablodaki eksenel kuvvetin fonksiyonu olarak lineer olmayan bir değişim göstermektedir. Kablolardaki lineer olmayan bu etki, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi eşdeğer elastisite modülü ile tanımlanan, eşdeğer düz bir kafes eleman ile dikkate alınabilmektedir. Bu yaklaşım hem hesap kolaylığı, hem de gerçek davranışı yansıtabilmesi nedeniyle köprü

mühendisleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Eşdeğer elastisite modülü kavramı ile malzeme ve geometri kaynaklı deformasyon etkileri birlikte dikkate alınabilmeli ve böylece eşdeğer çubuk elemanın aksel rijitliğinin gerçek eğrisel kablunun aksel rijitliğine eşit olması sağlanmalıdır. Kablunun eşdeğer veya ideal elastisite modülü Ernst [75] tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.10. Kabloların lineer olmayan etkisi

$$E_{eş} = \frac{E}{1 + \left[ \frac{(wL)^2 AE}{12T^3} \right]} \quad (3.65)$$

Burada, E kablo elastisite modülünü, w kablo birim uzunluğunun ağırlığını, L kablo yatay izdüşüm uzunluğunu, A kablo kesit alanını ve T kablodaki çekme kuvvetini göstermektedir [74].

### 3.3.2. Kablolu köprünün yapısal özellikleri

Bu çalışmada uzun açıklıklı köprü sistemlerinin değişen yer hareketi etkisi için dinamik analizi yapılması amacıyla örnek sistem olarak Rendel Palmer ve Tritton tarafından projelendirilen ve Güney Kore’de inşa edilen Jindo köprüsü seçilmiştir. Söz konusu köprü Jindo Adası ile ana kıtayı birbirine bağlamaktadır. Şekil 3.11’de genel bir şekli görülen Jindo Köprüsü, 344 m olan ana açıklık ve 70’er m olan iki kenar açıklık olmak üzere, toplam üç açıklıktan oluşmaktadır. Kablolar yelpaze şeklinde düzenlenmiş olup, A-Çerçeve tipindeki kulelerin tepelerinde toplanmışlardır. Kullanılan kabloların çapları 56 mm, 67 mm, 76 mm ve 87 mm’dir. Her bir kule 24 kablo taşımaktadır ve kulelerin mesnetlendikleri ayaklar üzerindeki yükseklikleri 69 m’dir. Söz konusu kuleler burulma rijitliklerinin büyüklükleri sayesinde birçok kablolu köprünün yapımında kullanılmıştır.

Çelik ana kiriş altıgen biçimlidir ve köprünün bir ucundan diğer ucuna kadar sürekli olarak uzanır. Kablolu köprülerde en çok tercih edilen sistem, Jindo köprüsünde olduğu gibi ana kirişin bir uçtan diğer uca kadar sürekli olarak uzandığı sistemlerdir. Jindo köprüsü için ana kıtadaki ayak üzerinde köprü eksenini doğrultusundaki hareket engellenirken, Jindo adası tarafındaki ayak üzerinde ve diğer mesnetlerde söz konusu doğrultudaki hareket serbest bırakılmıştır.

Gelgit olayına bağlı akımlar, Jindo köprüsü ayaklarına ait temellerin deniz içerisinde inşasını oldukça güç ve pahalı bir duruma getirmiştir. Bu sebepten dolayı, üzerlerine köprü ayaklarının inşa edileceği temellerin karada inşa edilmesine karar verilmiştir. Tappin Jindo köprüsünün inşa edildiği bölgenin jeolojik yapısının volkanik (proklastik) ve tüffit kayaç karışımı olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca ana kıta tarafında mevcut olan fayların yer yer kil ile dolu olduğu belirtilmektedir.

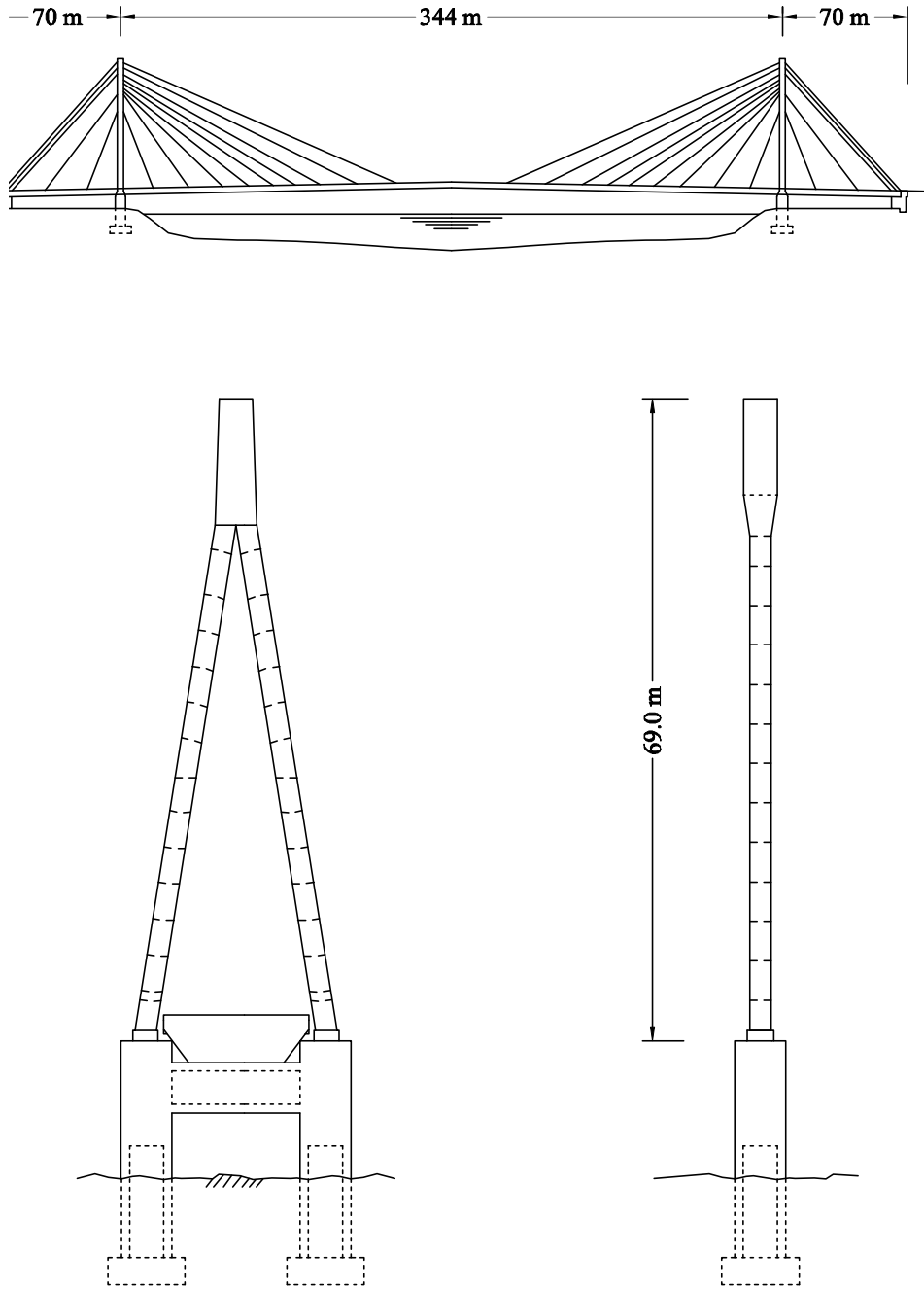
Jindo kablolu köprüsüne ait ana kiriş ve kuleler çelik malzemedен inşa edilmiştir. Hesaplarda Jindo kablolu köprüsü için sönüm oranı %2 olarak alınmıştır. Kablolu köprüler için sönüm küçük olup yaklaşık olarak % 1-2 civarındadır. Jindo köprüsüne ait elemanların seçilen kesit özellikleri Çizelge 3.3-4’te verilmektedir [74].

Çizelge 3.3. Jindo köprüsüne ait çeşiti elemanların kesit özellikleri

Atalet momenti (m <sup>4</sup> )	Alan (m <sup>2</sup> )	Elastisite modülü (kN/m <sup>2</sup> )	Kayma modülü (kN/m <sup>2</sup> )	Eleman
1,210	0,827	205 000 000	78 846 154	Tabliye
0,519	0,416	205 000 000	78 846 154	Tabliye
0,536	0,464	205 000 000	78 846 154	Tabliye
121,420	35,600	210 000 000	9051724,1	Köprü ayağı
0,591	0,658	205 000 000	78 846 154	Kule
0,569	0,608	205 000 000	78 846 154	Kule
0496	0,541	205 000 000	78 846 154	Kule
0,451	0,473	205 000 000	78 846 154	Kule
0,818	0,647	205 000 000	78 846 154	Kule

Çizelge 3.4. Jindo Köprüsünde kullanılan kabloların kesit özellikleri

Alan(m <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )
0,02010	154 000 000
0,00556	153 600 000
0,00428	156 100 000
0,00756	147 600 000
0,01004	142 400 000

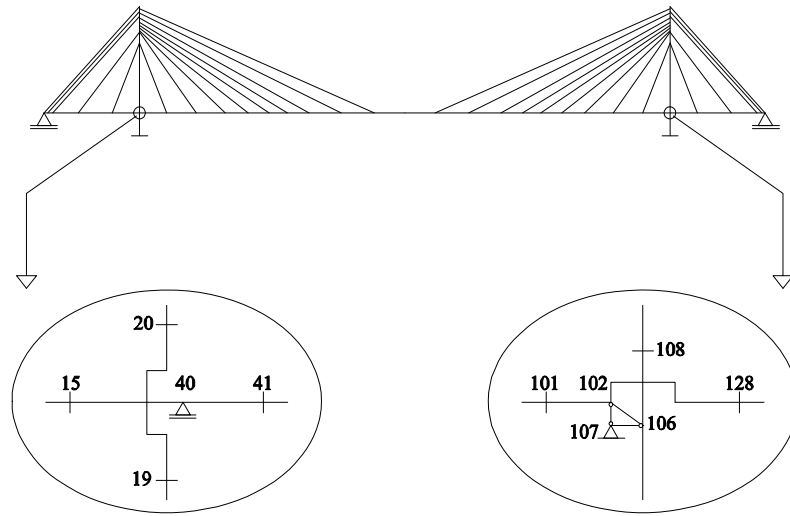


Şekil 3.11. Jindo Köprüsü genel görünümü

### 3.3.3. Kablolu köprünün analitik modeli

A-çerçeve tipindeki kuleler, kablolar ve tabliye üç boyutlu bir yapı sistemi oluştururlar. İki boyutlu analiz sonucu bulunan mod biçimleri ile üç boyutlu analiz sonucu bulunan mod biçimlerinin uyum içerisinde oldukları gösterildiğinden [72],

Jindo köprüsünün rasgele olan deprem etkisinden oluşacak dinamik davranışını belirlemek amacı ile düşey düzlemdeki iki boyutlu analizi yapılacaktır. Seçilen düşey düzlem modelinde bir düğüm noktasının, yatay ve düşey doğrultudaki ötelenmeler ile bir dönmeden oluşan toplam üç serbestlik derecesi vardır.



Şekil 3.12. Jindo köprüsünün 2 boyutlu matematik modeli

Seçilen sonlu eleman modeli 420 tane serbestlik derecesi ile temsil edilmektedir. Hareket denklemi ötelenme ve dönme serbestlik derecelerini içerecek şekilde yazılabilmektedir. Ancak, dönme serbestlik derecelerine ait dinamik tepkiler ötelenme serbestlik derecelerine bağlı olduklarından, dönme serbestlik derecelerine karşılık gelen kütle atalet momenti veya dış yük yok ise, hareket denkleminde dönme serbestlik derecelerini ihmal edecek statik yoğunlaştırma yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemin kullanılabilmesi atalet kuvveti oluşturacak kütle olmasına bağlıdır. Böylece kullanılan 420 tane serbestlik derecesi statik yoğunlaştırma yöntemi ile, 39 tane ana serbestlik derecesine indirgenmiştir.

Ana giriş ve kuleler 139 tane eleman kullanılarak temsil edilirken, kablolar 28 kafes elemanla gösterilmiş olup, söz konusu eğik kabloların lineer olmayan özellikleri eşdeğer elastisite modülü ile dikkate alınmaktadır.

Çalışmada dikkate alınan Jindo Kablolü Köprüsünün kendi ağırlığı ve deprem hareketi altındaki çözümleri sonucunda elde edilen kablo eksenel kuvvetleri karşılaştırılmış ve köprünün kendi ağırlığından kaynaklanan kablo eksenel kuvvetlerinin, deprem etkisi için elde edilen eksenel kuvvetlere oranla çok daha fazla olduğu görülmüştür. Tüm kablolar dikkate alındığında, deprem hareketinin etkimesi ile kablo eksenel kuvvetlerinde ortalama %15 kadar bir artış gözlenmiştir. Deprem hareketine bağlı olarak en kısa kabloda %30, ortalama uzunluktaki bir kabloda %13 ve en uzun kabloda %12 gibi bir artış olmuştur. Aslında deprem hareketi nedeniyle kablolarda çok büyük eksenel kuvvetler ortaya çıkmamıştır. Ancak köprünün kendi ağırlığından dolayı, en kısa kabloda ortaya çıkan eksenel kuvvetler diğer kablolardaki kuvvetlere göre önemli derecede daha küçüktür. Bu nedenle, deprem hareketi nedeniyle bu kablolarda büyük eksenel kuvvetler ortaya çıkmamasına rağmen, kendi ağırlığından kaynaklanan eksenel kuvvetlerin küçük olması, deprem hareketinin kablo eksenel kuvvetini %30 oranında arttırmasına neden olmuştur.

Elde edilen bu sonuçlar, kablolardaki sehime bağlı değişimlerin neden olduğu lineer olmayan etkilerin daha çok köprünün kendi ağırlığından kaynaklandığını, deprem hareketi durumunda lineer olmayan bu etkinin nispeten daha küçük olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, köprünün kendi ağırlığından kaynaklanan lineer olmayan etkiler eşdeğer elastisite modülü ile dikkate alınırken, deprem hareketi için kabloların lineer davranış gösterdiği kabul edilmiştir.

### **3.4. Geliştirilen Bilgisayar Programı**

Üniform yer hareketi etkisindeki yapı sistemlerinin stokastik analizi STOCAL [76] bilgisayar programı ile yapılabilmektedir. Ancak söz konusu programda yer

hareketinin mesnet noktaları arasındaki değişimi ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamaktadır. Deprem hareketinin değişim bileşenlerinden korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkilerini dikkate alarak yer hareketinin elde edilmesi, yapı-zemin etkileşiminin analizlerde dikkate alınması ile ilgili ilaveler STOCAL programına yapılmak suretiyle, geliştirilen bilgisayar programı (SSI) ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı yapı sistemlerinin değişen yer hareketi etkisindeki deterministic dinamik analizi yapılabilmektedir. SSI bilgisayar programı Fortran dilinde programlanmış olup, Fortran Visual Workbench ortamında çalışmaktadır.

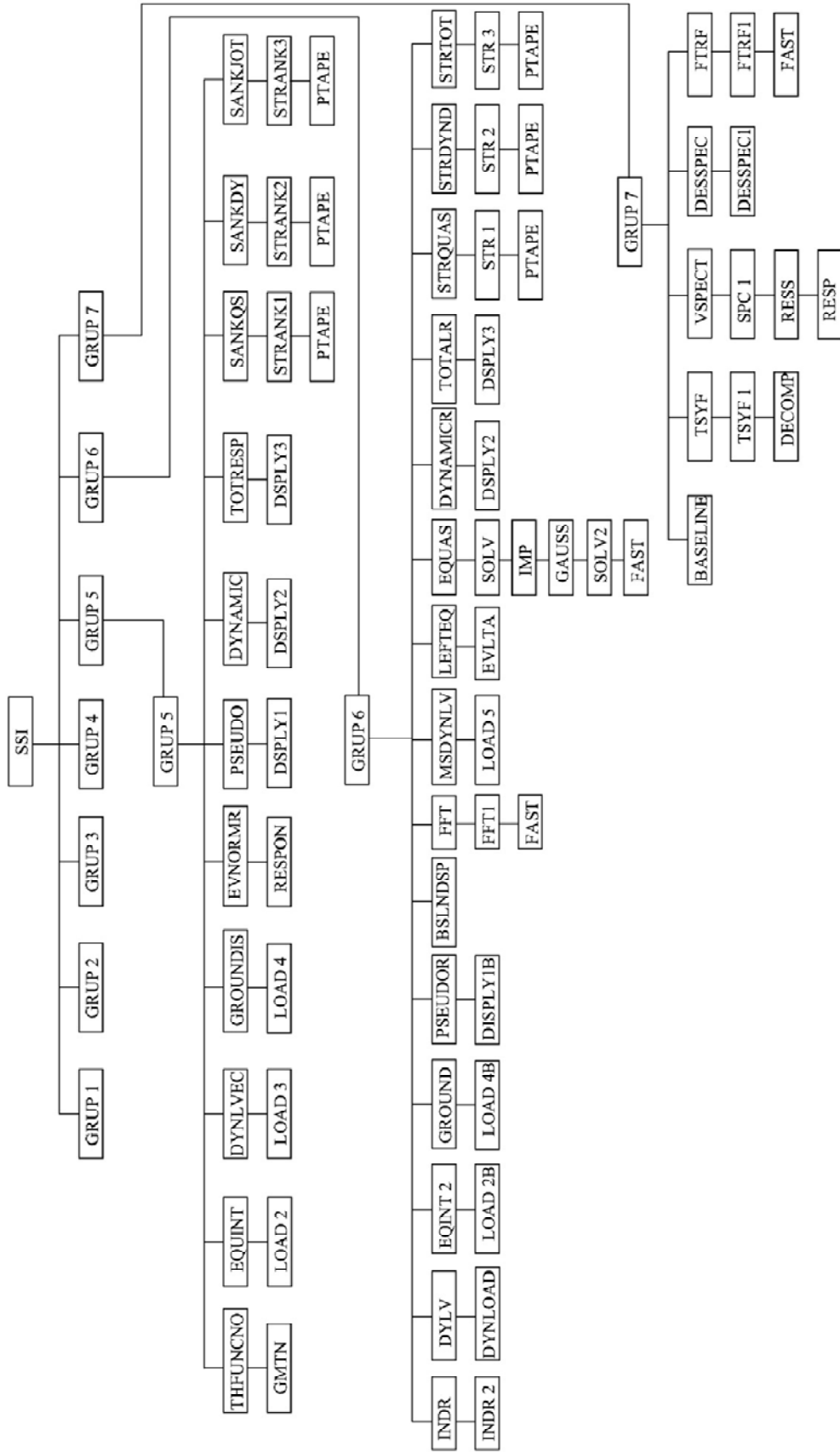
Bu çerçevede geliştirilen SSI programının akış diyagramı Şekil 3.13'te verilmektedir. Şekildeki kutular alt programlar gösterirken, aralardaki çizgiler alt programlar arasındaki bağlantıya işaret etmektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre sistemlerin deterministik analizi ile ilgili olarak yapılan ilaveler GROUP5 alt programı altında yapılırken, yapı-zemin etkileşim analizi için gerekli olan ilaveler GROUP6 alt programı altında yapılmıştır. Bunun yanında Hao [1] tarafından önerilen yöntemle ilgili olarak yer hareketi üretilmesi ile ilgili ilaveler GROUP7 alt programında gerçekleştirilmiştir. Böylece geliştirilen bilgisayar programının temel içeriği aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Özdeğer ve özvektörler STOCAL programında Jacobi yöntemiyle hesaplanmaktadır.
- Hao tarafından önerilen ve yer hareketi değişim parametrelerine bağlı olarak Eş. 3.23 ile TSYF alt programında yer hareketi üretilmektedir. Yine aynı alt programda, deprem hareketinin stasyoner olmayan karakteristiği Eş. 3.21 ile belirlenmektedir. Böylece elde edilen yer hareketinin hız spektrumunu VSPECT alt programında hesaplanırken, seçilen tasarım spektrumuna ait hız spektrumu DESSPC alt programında hesaplanmaktadır. Daha sonra FTRF alt programında, üretilen yer hareketi ile tasarım hız spektrumu ile üretilen yer hareketine ait hız spektrumu arasındaki oran  $(S_{pv}(\xi_s, T)/S_{pv}^a(\xi_s, T))$  çarpılmak sureti ile yer hareketi tanımlanan tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmektedir. Frekans alanında gerçekleştirilen bu işlemler daha sonra ters fourier dönüşümü ile zaman

alanına dönüştürülmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydına BSLNACC alt programında Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır.

- Yapı-zemin etkileşim probleminin çözümünde kullanılan Eş. 3.64'ün sağ tarafı DYLV ve MSDLV alt programlarında hesaplandıktan sonra, FFT alt programında fourier dönüşümü alınarak frekans alanına dönüştürülmektedir.
- Zemin yerdeğiştirmeleri GRDSP alt programında hesaplandıktan sonra, Eş. 3.43 ile tanımlanan zahiri-statik yerdeğiştirmeler PSEUDOR alt programında hesaplanmaktadır. Eksen düzeltilmesi yapılmış ivme kaydından elde edilen yerdeğiştirme kaydına BSLNDISP alt programında Eş. 3.34 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Zahiri-statik eleman kuvvetleri ise STRQUAS alt programında hesaplanmaktadır.
- Eş. 3.64'ün sol tarafı LEFTEQ alt programında oluşturulduktan sonra, Eş. 3.64 EQUAS alt programında çözümlenmektedir. Daha sonrada ters fourier dönüşümü ile zaman alanına geçiş yapılmaktadır.
- Eş. 3.62 ile tanımlanan dinamik yerdeğiştirmeler DYNAMICR alt programında belirlendikten sonra, dinamik eleman kuvvetleri STRDYN alt programı ile bulunmaktadır.
- Eş. 3.42 ile verilen toplam yerdeğiştirmeler TOTALR alt programında hesaplanırken, toplam eleman kuvvetleri STRTOT alt programında belirlenmektedir.
- Ankastre durum (yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği durum) içinde benzer işlem adımları takip edilmektedir. Ankastre durum için yapılan ilaveler SAP4 [77] programı esas alınarak yapılmıştır.

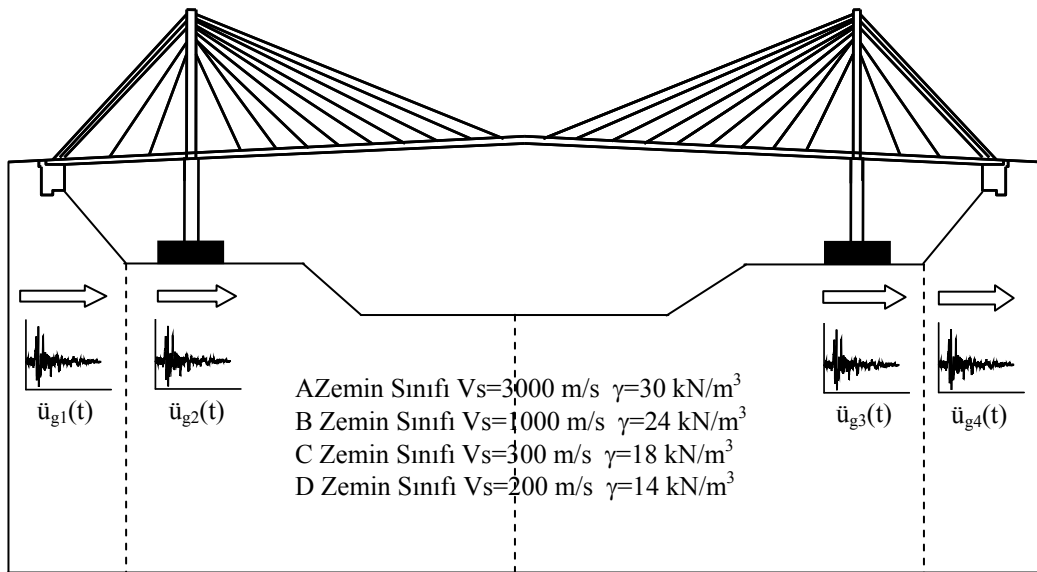


Şekil 3.13. Bilgisayar programı akış diyagramı

## 4. BULGULAR VE İRDELEMELER

### 4.1. Köprünün Mesnetlendiği Zeminin Homojen Olması Halinde Yapı-Zemin Etkileşim Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde çalışmada dikkate alınan kablolu köprü sisteminin mesnetlendiği zeminin homojen olduğu kabul edilerek, üniform yer hareketi etkisindeki köprünün dinamik analizi, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak incelenmektedir. Bu amaçla, farklı zemin özellikleri için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durum ve yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Çalışma boyunca elde edilecek sonuçlar yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri mutlak maksimum değerleridir.



Şekil 4.1. Üniform yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi

Zemin ortamının homojen kabul edildiği ve yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı analizlerde Çizelge 4.1.'de belirtilen zemin özellikleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.1 Zemin özellikleri [61]

Zemin Cinsi	Zemin grubu tanımı	Birim hacim ağırlık $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Kayma Dalgası Hızı $V_s$ (m/s)	Sönüm Oranı ( $\xi$ )
Anakaya (A)	Kaya ve kayaya benzer jeolojik oluşumlar	30	3000	0,05
Sert Zemin (B)	Sıkı kum, çakıl veya sert kil	24	1000	0,05
Orta Zemin (C)	Sıkı veya orta sıkı kum, çakıl veya sert kil	18	300	0,05
Yumuşak Zemin (D)	Gevşek-orta kohezyonsuz zemin	14	200	0,05

Çalışma boyunca yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı analizlerde kullanılan model için 'YZE' ve yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği modeller için 'ANKR' kısaltmaları kullanılacaktır.

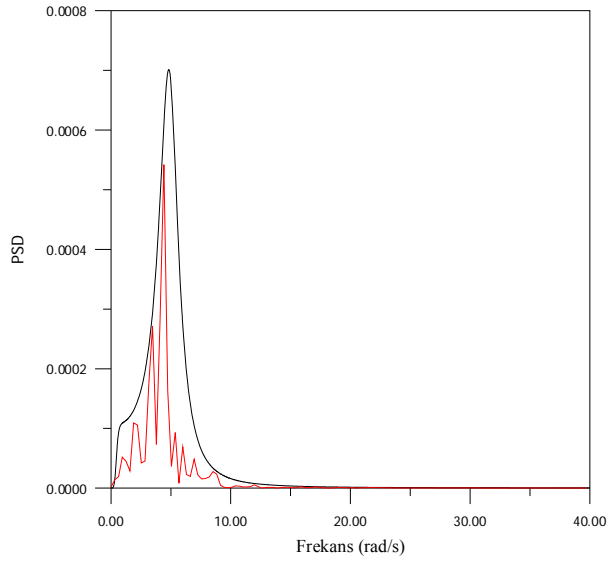
Analizlerde kullanılan yer hareketleri homojen zemin kabulü ile dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınmadan elde edilmiştir. Tasarım spektrumu ile uyumlu yer hareket ivmesi oluşturulurken, anakaya, sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri için EC8'de tanımlanan A, B, C ve D türü zemin sınıf özellikleri dikkate alınmıştır.

Köprü mesnetlerinin homojen sert, orta, yumuşak ve ana kaya zemin özelliklerinde olması durumunda dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınmadan yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği ankastre modeller için analizlerde kullanılmak üzere  $N=512$  terim,  $\Delta t = 0,039$  s için toplam 20 s'lik ivme kayıtları oluşturulurken aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir.

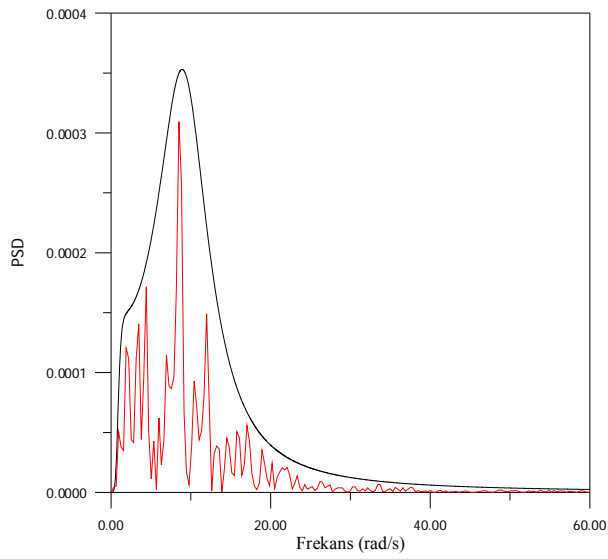
Kullanılacak yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak (Eş. 3.1) elde edilmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu için

Çizelge 3.1’de verilen filtre parametleri kullanılmaktadır. Filtre edilmiş beyaz gürültü güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile B, C ve D zemin sınıfı için elde edilen yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonlarının karşılaştırılması Şekil 4.2-4’te görülmektedir.

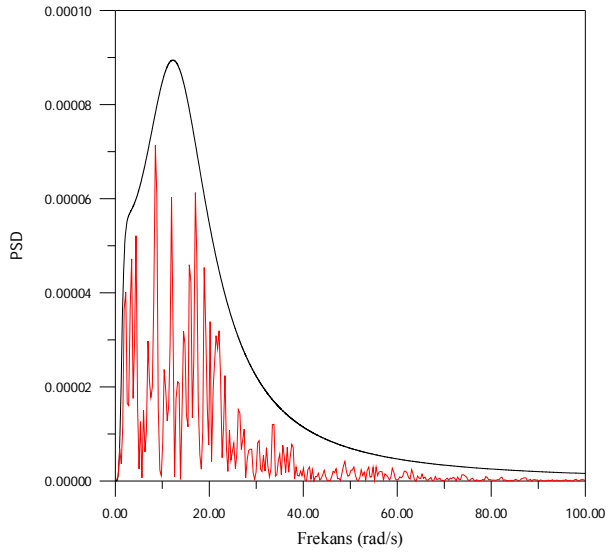
1. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Bu bölümde kullanılacak yer hareketleri dalga yayılma ve korelayon etkileri dikkate alınmadan homojen zemin özellikleri için elde edilmiştir. Bu nedenle dalga yayılma hızının sonsuz olduğu ve mesnetler arasında korelasyon kaybının olmadığı kabul edilmektedir.
2. Deprem hareketi stasyoner olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyoner olmayan yer hareket ivmeleri, stasyoner olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılmasından elde edilmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydı Eş. 3.22 ile gösterilen şekil fonksiyonu ile çarpılmaktadır.
3. Elde edilen ivme kayıtları %2 sönüm oranı için ve 0,5g PSA’ya göre normalize edilmek suretiyle EC8 ile uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Bu bölümde kullanılan A, B, C ve D zemin türleri için EC8’de tanımlanan tasarım spektrumları Şekil 4.5.’te verilmektedir. Şekil 4.6’da B, C ve D zemin sınıfları için elde edilen yer hareketi hız spektrumu ile EC8 tasarım hız spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir.
4. Elde edilen ivme kayıtlarına Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 4.7-9’da B, C ve D zemin sınıfları için eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman değişimleri görülmektedir.



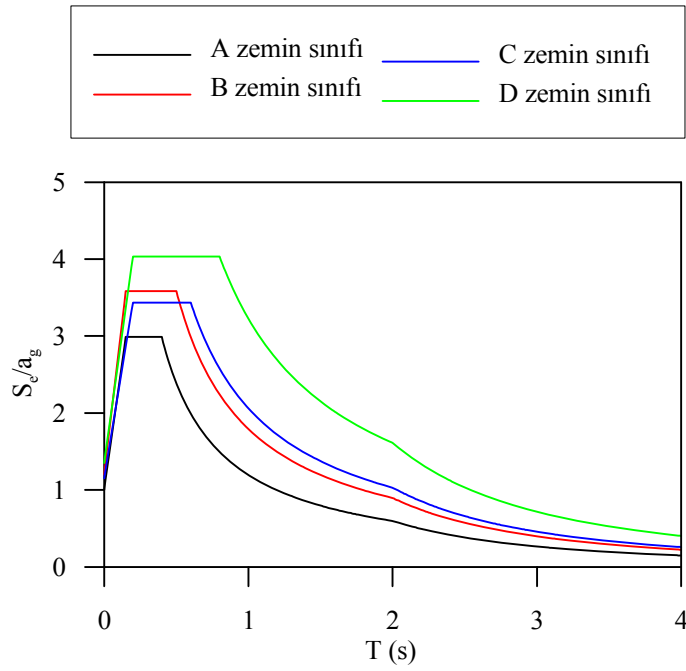
Şekil 4.2. Sert zemin ortamı için üretilen yer hareketi ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonunun filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile karşılaştırılması



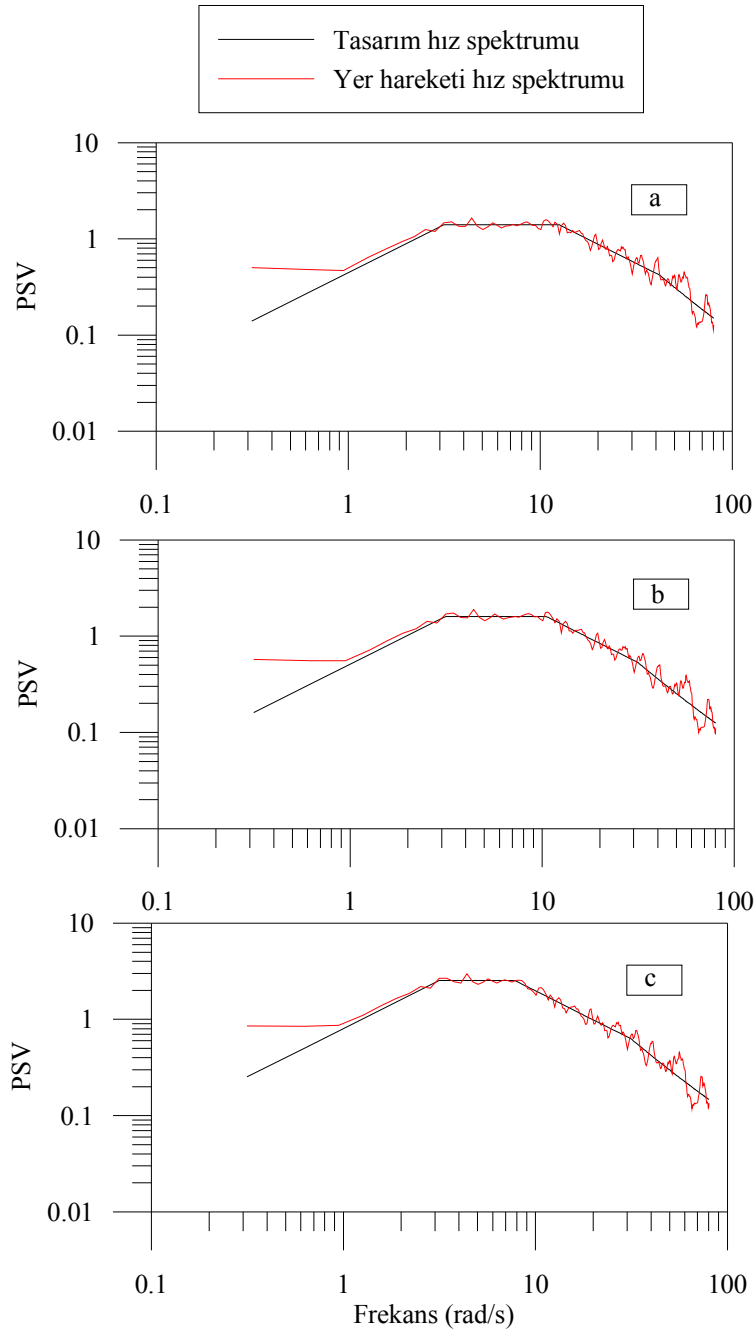
Şekil 4.3. Orta zemin ortamı için üretilen yer hareketi ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonunun filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile karşılaştırılması



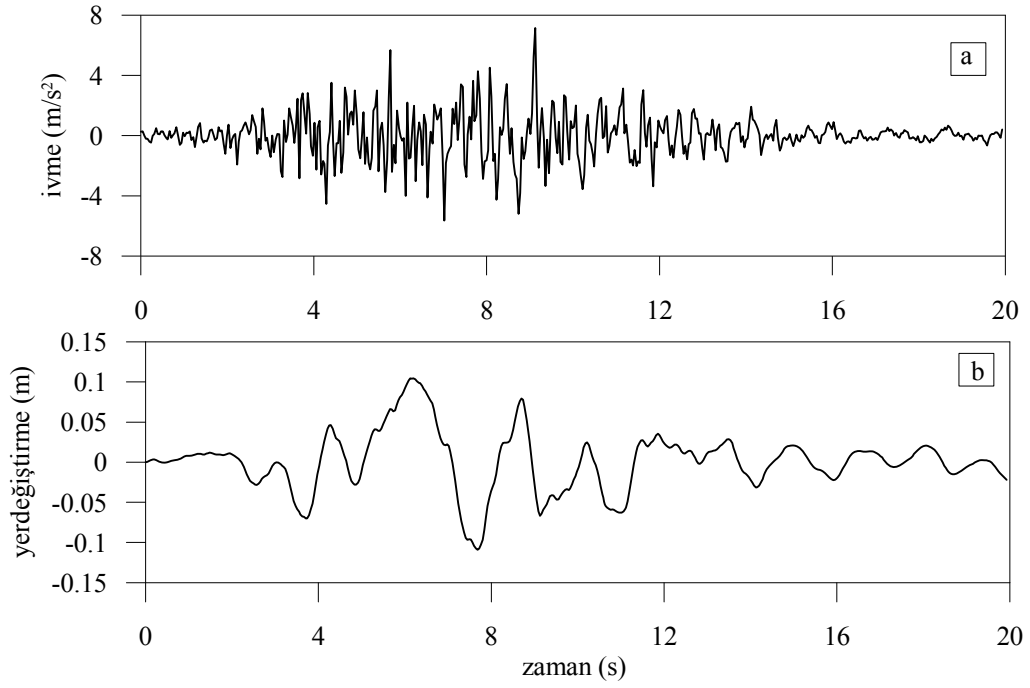
Şekil 4.4. Yumuşak zemin ortamı için üretilen yer hareketi ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonunun filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile karşılaştırılması



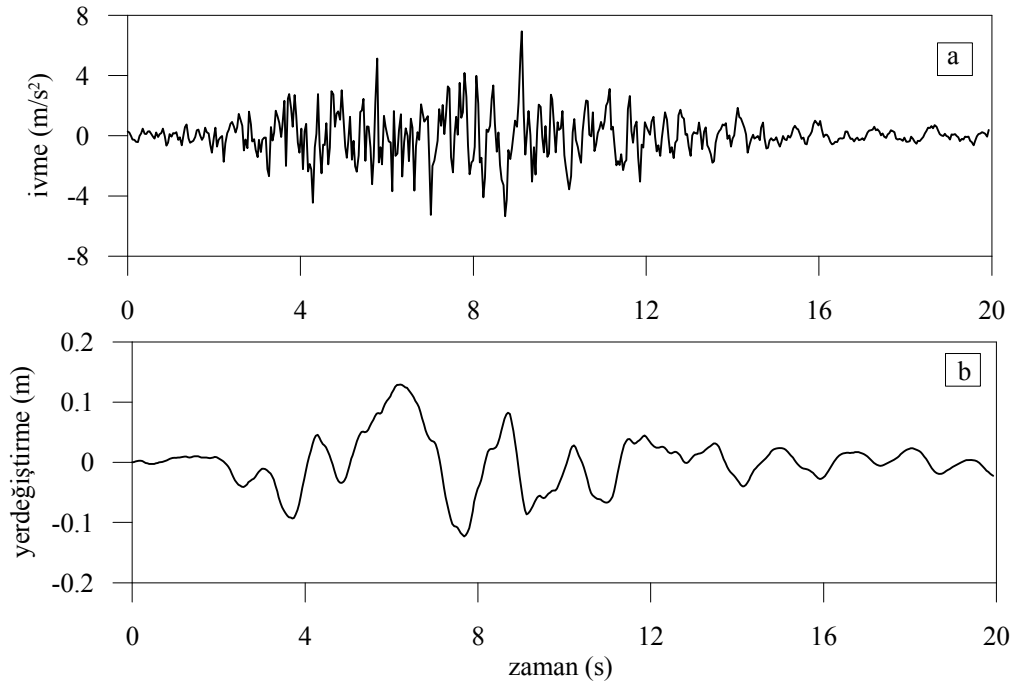
Şekil 4.5. Tasarım Spektrumu



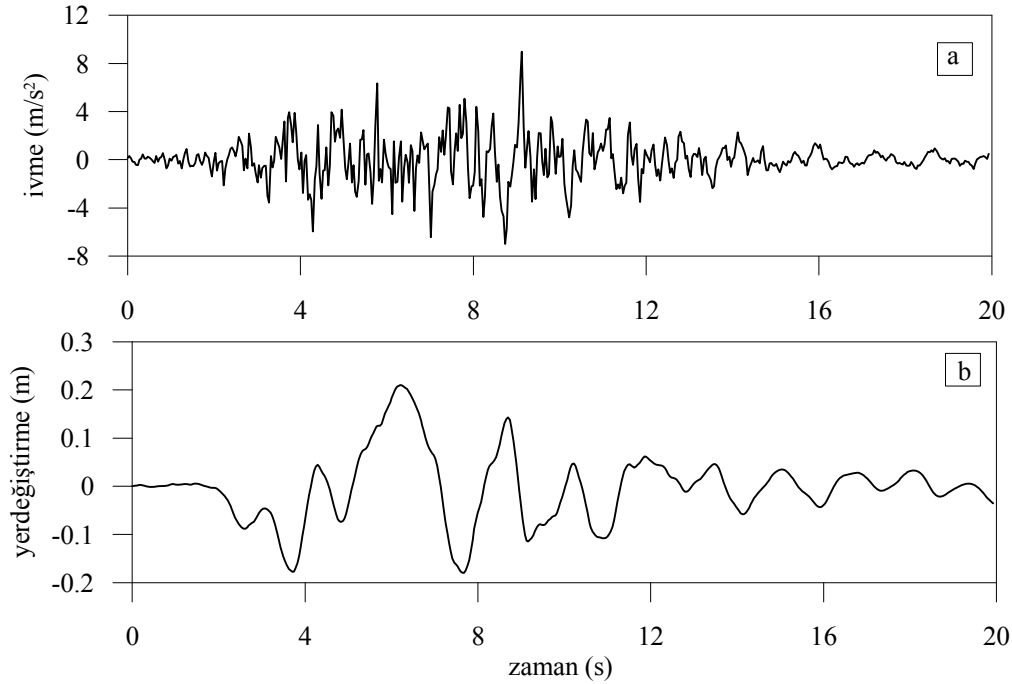
Şekil 4.6. a. Sert zemin ortamı için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması  
 b. Orta zemin ortamı için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması  
 c. Yumuşak zemin ortamı için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması



Şekil 4.7. Homojen sert zemin a) ivme-zaman b) yerdeğiştirme-zaman grafikleri



Şekil 4.8. Homojen orta zemin a) ivme-zaman b) yerdeğiştirme-zaman



Şekil 4.9. Homojen yumuşak zemin a) ivme-zaman b) yerdeğiştirme-zaman

Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki sistemlerin, yapı-zemin etkileşimi analizinin çözümü için bu çalışmada dikkate alınan işlem adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Üst yapı temel sistemi için rijitlik, sönüm ve kütle matrisleri oluşturulmaktadır. Etkileşim katsayı matrisi ( $\gamma = -K_{SS}^{-1}K_{Sb}$ ) elde edilmektedir.
2. Temel ve zemin özellikleri kullanılarak empedans matrisleri (Eş. 3.53) oluşturulmaktadır.
3. Eş. 3.45 ile gösterilen hareket denklemi frekans alanına dönüştürüldükten sonra (Eş. 3.46), frekans alanında elde edilen empedans matrisleri eklenerek (Eş. 3.59) elde edilmektedir.
4. Köprü sisteminin analizi için dikkate alınması gereken serbestlik derecesi fazla olduğu için ilk önce modların ayrıştırılması yöntemi kullanılarak sadece üst yapı için titreşim modları Eş. 3.60 ile hesaplanmaktadır.
5. Eş. 3.60 ile verilen özdeğer probleminin çözümünde  $l$  tane mod için ( $l \ll n_s$ ) yapının doğal frekansları  $w_1, w_2, \dots, w_l$  ve ilgili mod titreşim şekilleri

- $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_l$  elde edilir. Üst yapı serbestlikleri için elde edilen mod vektörleri birleştirildiğinde Eş. 3.61'deki mod matrisi elde edilmektedir.
6. Dinamik yerdeğiştirme vektörü mod matrisi ve etkileşim katsayı matrisine bağlı olarak Eş. 3.62'de ki gibi ifade edilebilir. Eş. 3.62, Eş. 3.45'te yerine koyulup, her iki tarafı  $[Q]^T$  ile çarpılarak, frekans alanına dönüştürüldüğünde Eş. 3.64 elde edilmektedir. Böylece Eş. 3.59 üst yapı için 1 tane serbestlik derecesine indirgenmiş olmaktadır.
  7. Eş. 3.64  $\omega = 0, \dots, \omega_{max}$  aralığında her bir  $\Delta\omega$  frekans adımı için çözümü yapılmaktadır.
  8. Tüm serbestlik derecelerinin frekans alanındaki tepkileri hesaplandıktan sonra, ters fourier dönüşümü ile zaman alanındaki tepkiler elde edilmektedir.

Böylece, yukarıda tanımlanan işlem adımları takip edilerek EC8'de [61] tanımlanan A, B, C ve D türü zemin ortamlarında yer hareketi değişiminin ihmal edildiği durumda yer hareketleri üretilmiş ve çalışmaya konu olan kablolu köprü sistemi belirlenen yer hareketlerine bağlı olarak yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak çözümlenmiştir.

Bu şekilde tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme bileşenleri için elde edilen değişim Şekil 4.10'da görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre durumda merkez açıklıkta elde edilen tabliye düşey yerdeğiştirmeleri oldukça küçük olup, A zemin sınıfı için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumdaki yerdeğiştirmelere oldukça yakın çıkmıştır. En büyük yerdeğiştirmeler tabliye açıklığı boyunca genellikle D zemin sınıfı (yumuşak zemin) için elde edilmiştir. Bu artışlar ataletsel köprü-zemin etkileşiminden kaynaklanmıştır. Yapı-zemin etkileşiminden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin etkisi anakaya ve sert zemin durumlarında çok fazla olmadığından, ankastre ve yapı-zemin etkileşimi için elde edilen sonuçlar yakın çıkmıştır. Bunun yanında, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda B zemin sınıfı için merkez açıklıkta elde edilen en büyük yerdeğiştirme değeri 18 cm iken, C ve D zemin sınıfı için 30 cm civarında olmuştur.

Şekil 4.11’de Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme bileşeninin değişimi görölmektedir. Kule yüksekliği boyunca yine en küçük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda ankastre durum için elde edilirken, en büyük yerdeğiştirmeler ise yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı D zemin sınıfı (yumuşak zemin) için elde edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre durum için kule yüksekliği boyunca elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme değeri 10 cm iken yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı A, B, C ve D zemin sınıfları için elde edilen en büyük yerdeğiştirmeler sırasıyla 18, 26, 44 ve 51 cm olmuştur. B, C ve D zemin sınıfları için elde edilen tepkilerin büyük olması, yapı-zemin etkileşiminin önemine işaret etmektedir.

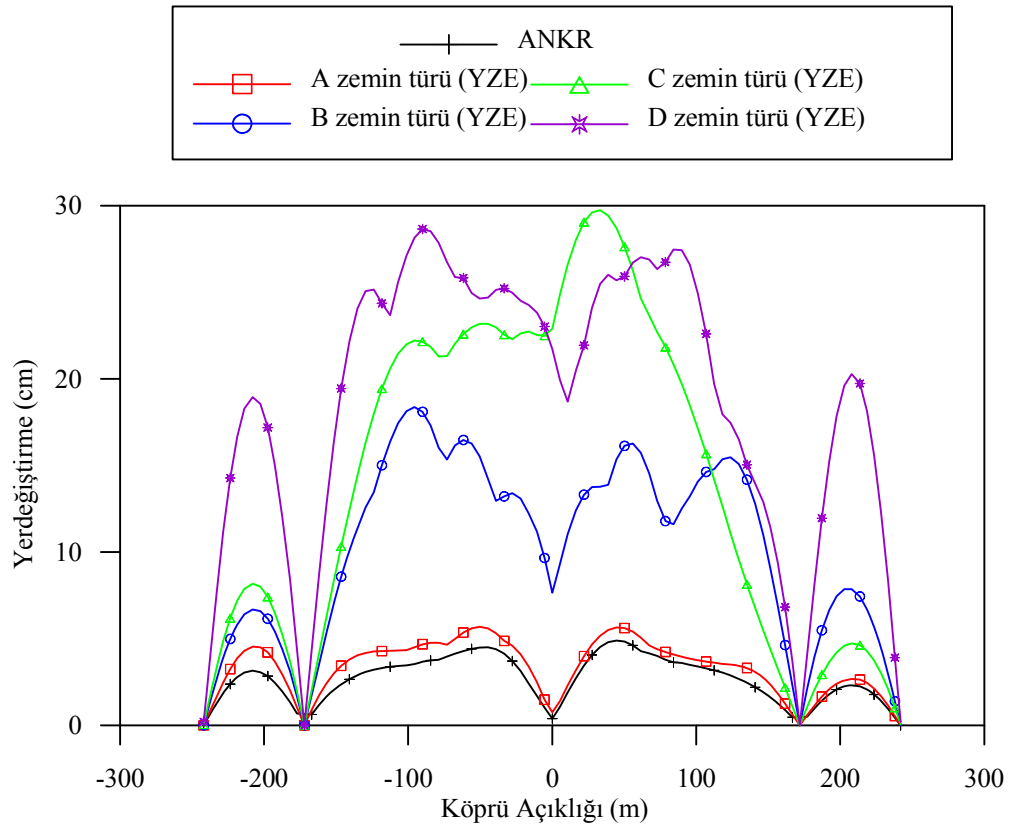
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te sırasıyla tabliye dinamik eğilme momenti ve kesme kuvveti bileşenlerinin değişimi görölmektedir. Tabliye dinamik yerdeğiştirmelerinde olduğu gibi, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda elde edilen eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerine en yakın değerler yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı A zemin sınıfı için elde edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda B, C ve D zemin sınıfları için elde edilen yapısal tepkiler, önceki iki duruma göre elde edilen tepkilerden büyüktür. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı A, B, C ve D zemin sınıfları için tabliye merkez açıklığında elde edilen en büyük eğilme momentleri, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen eğilme momentlerinden sırasıyla %55, %249, %146, ve %560 büyük çıkmıştır. B zemin sınıfı için elde edilen tabliye eğilme momenti ve kesme kuvvetlerinin, C zemin sınıfı için elde edilen değerlerden büyük olması dikkat çekici bir durum olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te sırasıyla kule dinamik eğilme momenti ve eksenel kuvvet bileşenlerinin değişimi görölmektedir. Yine, kule dinamik yatay yerdeğiştirmelerinde olduğu gibi, zemin özelliği zayıfladıkça yapı-zemin etkileşiminin etkisi daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Eğer dikkate alınan zemin anakaya gibi çok rijit bir zemin ise, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması sonuçları çok fazla değiştirmemektedir.

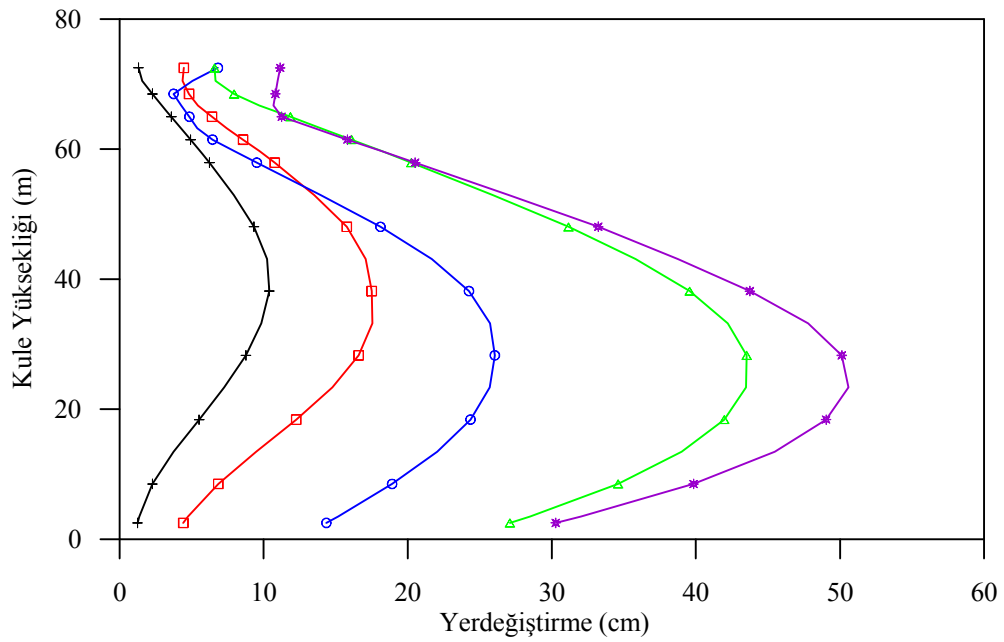
Daha önce yapılan çalışmalar dinamik yerdeğiştirmeler için ilk birkaç modun etkili olduğunu gösterirken, eleman kuvvetleri için yüksek modların etkin olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada üniform yer hareketine bağlı olarak C zemin türü için elde edilen yerdeğiştirmeler B zemin türü için elde edilen yerdeğiştirmelerden daha büyük çıkarken, eleman kuvvetleri için B zemin türüne bağlı olarak elde edilen tepkiler daha büyük çıkmıştır. B ve C zemin türleri için EC8' de [61] tanımlanan tasarım ivme spektrumu (Bknz. şekil 4.5) incelendiğinde, yerdeğiştirmeler üzerinde etkin olacak ilk üç yapısal moda ait periyot değerleri (2,23 s, 1,53 s ve 1,04 s) C zemin türünün spektral ivme değerinin daha büyük olduğu periyot bölgesine denk geldiği görölmektedir. Aynı şekilde, eleman kuvvetleri üzerinde etkin olacak yüksek modlara ait periyot değerleri (6. Mod=0,53 s- 15. Mod=0,35 s) B zemin türünün spektral ivme değerinin daha büyük olduğu periyot bölgesine rastlamaktadır.

şekil 4.16'da Jindo Kulesi tepe noktası için dinamik yerdeğiştirme-zaman grafiği verilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmaması durumunda kule tepe noktası için elde edilen toplam yerdeğiştirme bileşeni çok küçük çıkmaktadır. Bu yerdeğiştirmelere en yakın değerler, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı A zemin sınıfı için elde edilmiş ve D zemin sınıfına yaklaştığça yerdeğiştirmeler büyümüştür. Benzer değişim merkez açıklık orta noktası için şekil 4.17'de verilen düşey yerdeğiştirme-zaman grafiğinde de görölmektedir. şekil 4.16'da D zemin sınıfı için kayıt boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler en büyük olurken, şekil 4.17'de en büyük yerdeğiştirmeler kayıt boyunca D (yumuşak) ve C (orta) zemin koşullarında elde edilmiştir.

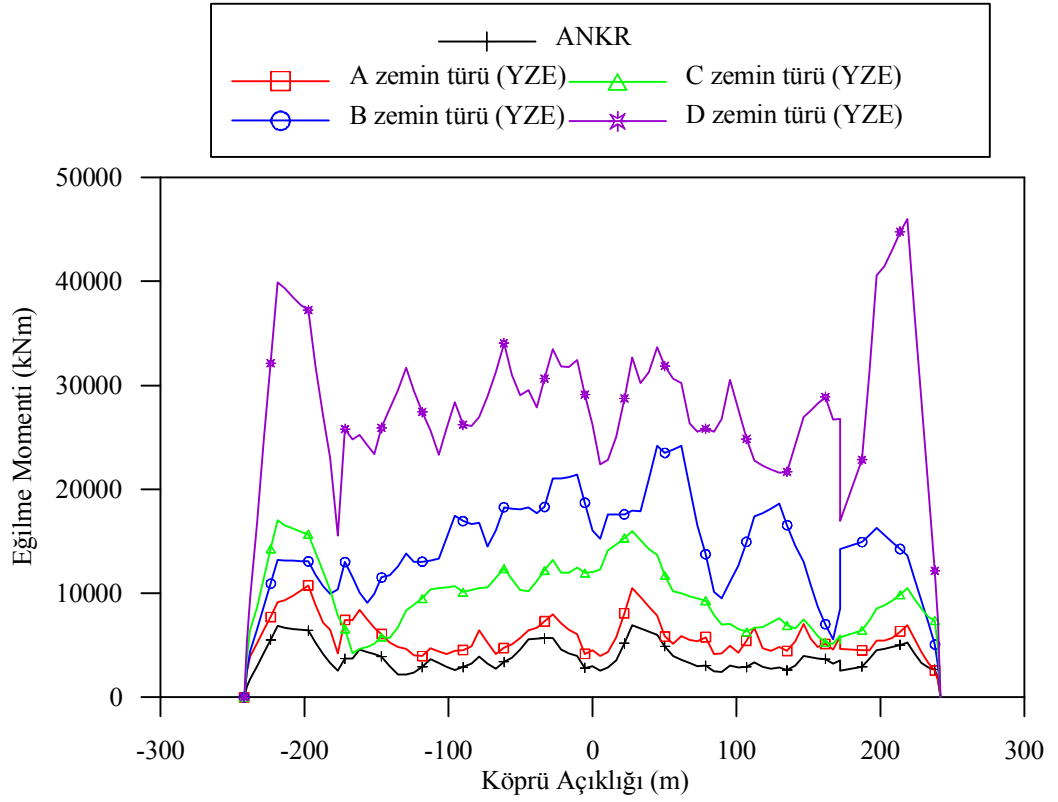
Kablolu köprülerin dinamik analizinde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması yapısal tepkileri genellikle arttırmaktadır. Bu etkinin özellikle orta-yumuşak zemin koşullarında daha belirgin olduğu, anakaya ve sert zemin özelliklerinde azaldığı görölmektedir. Bu artışlar ataletsel köprü-zemin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, yapı-zemin etkileşimi kablolu köprülerin dinamik analizinde dikkate alınmalıdır.



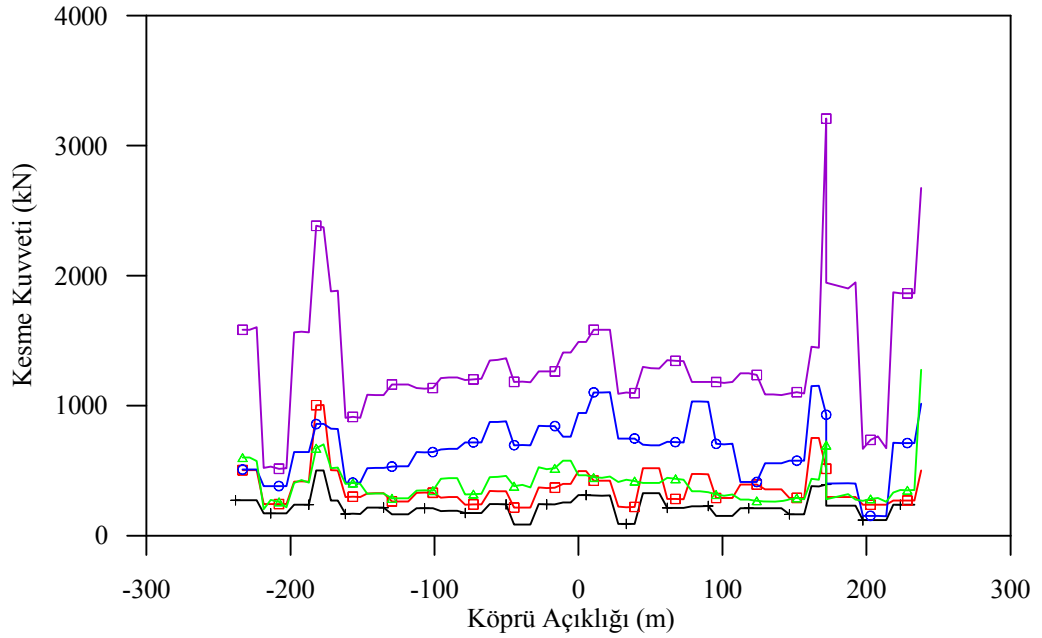
Şekil 4.10. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



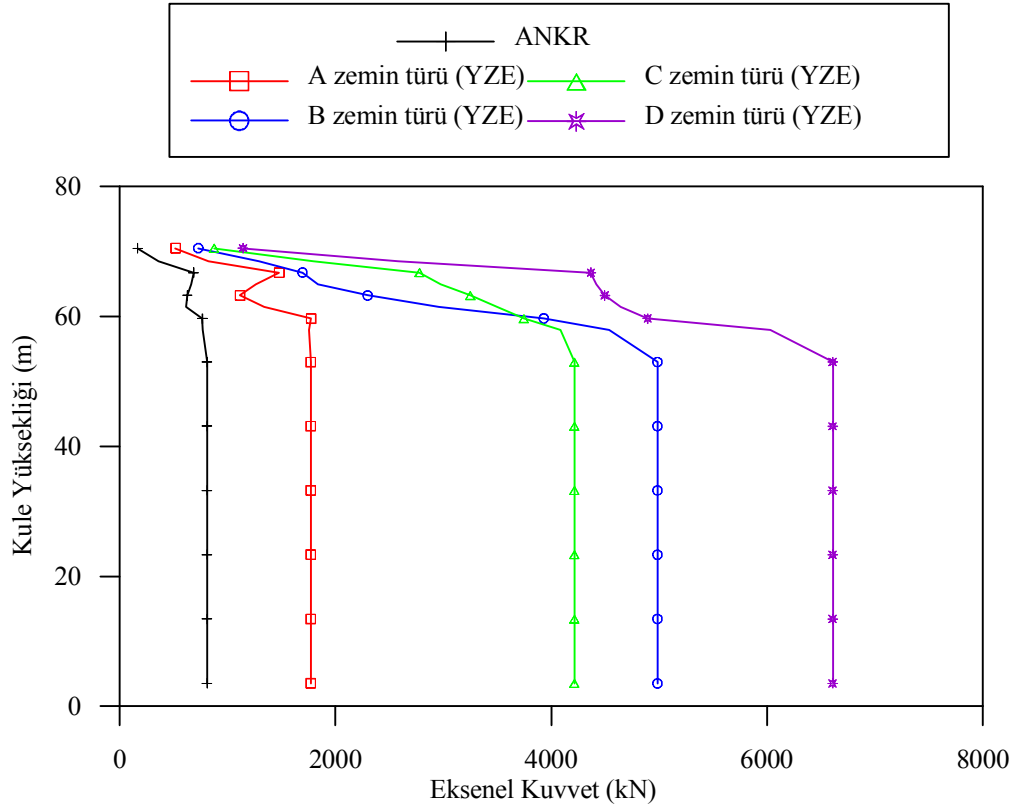
Şekil 4.11. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



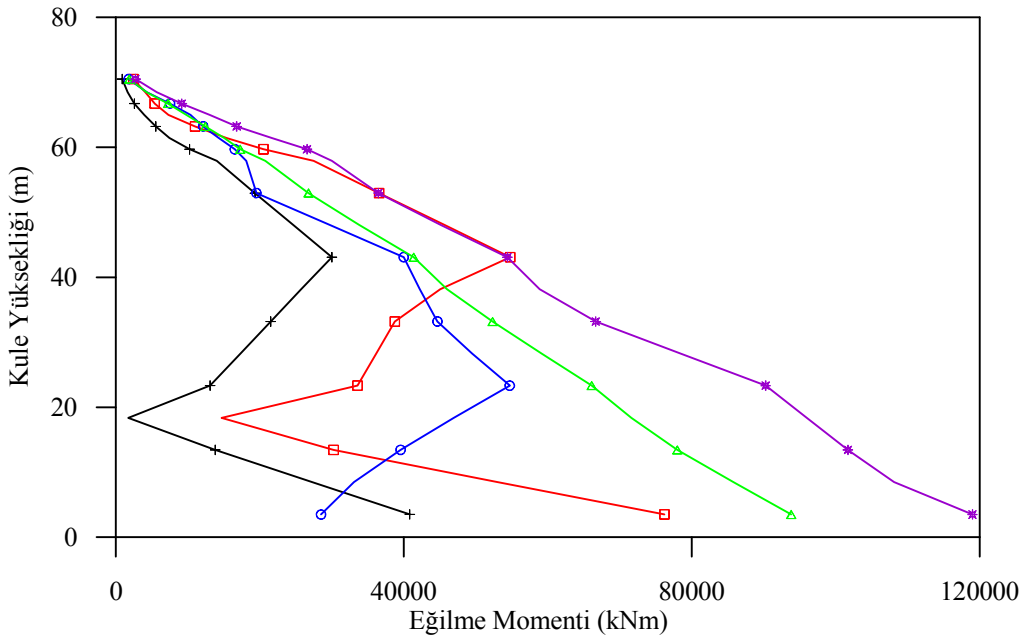
Şekil 4.12. Tabliye dinamik eğilme momentleri



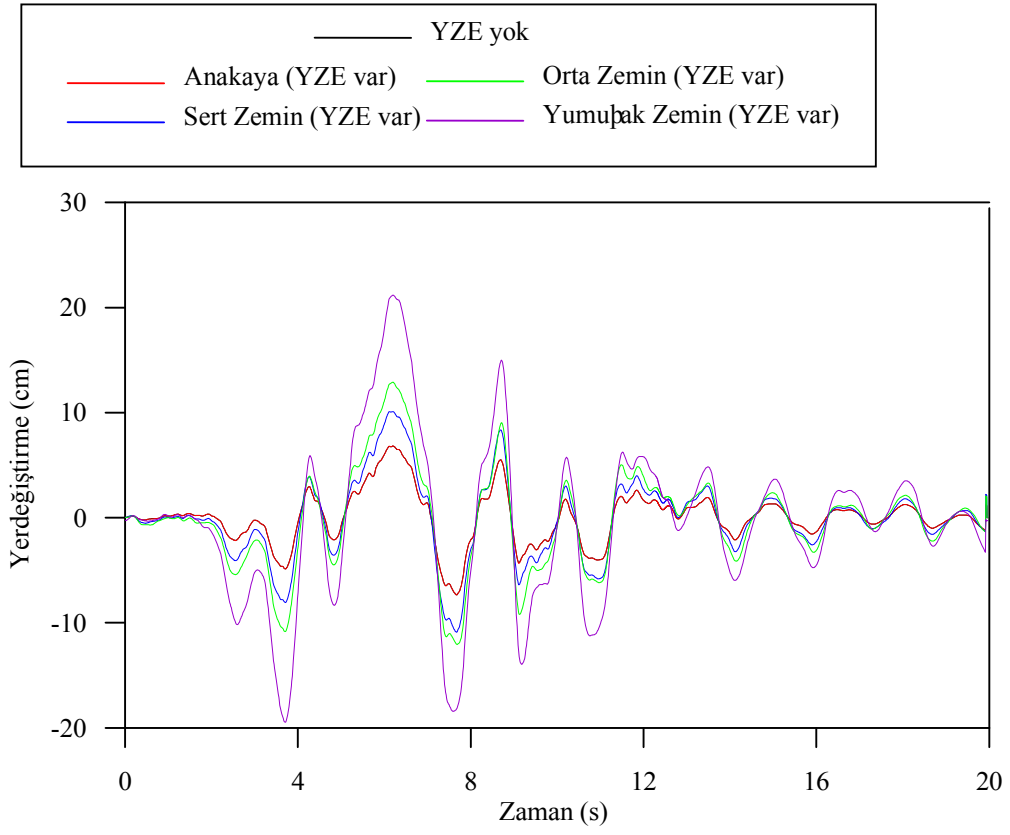
Şekil 4.13. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri



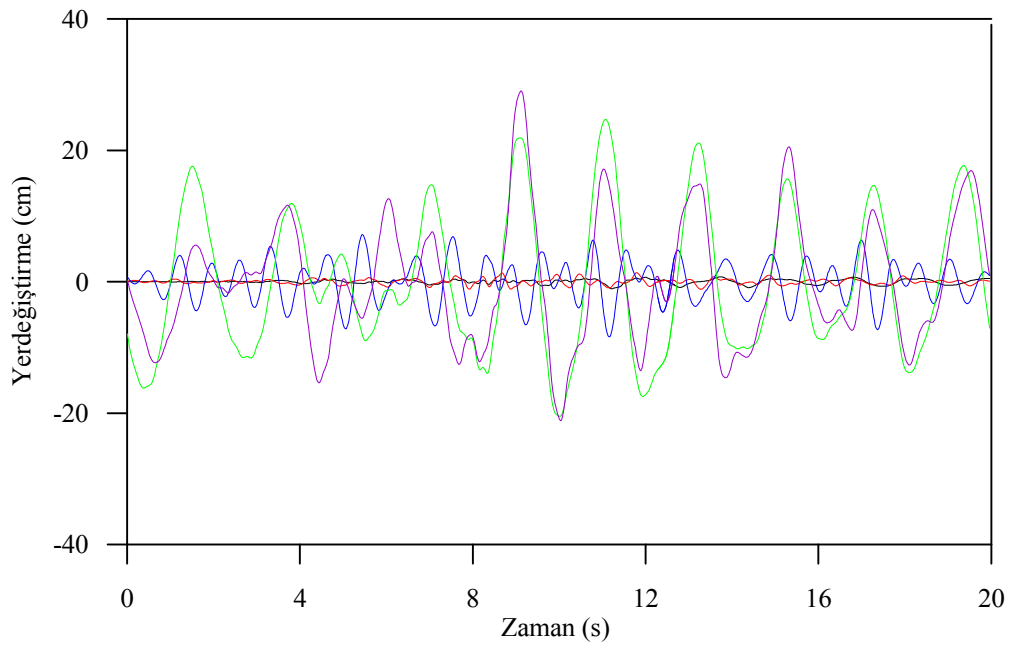
Şekil 4.14. Jindo Kulesi aksel kuvvetleri



Şekil 4.15. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri



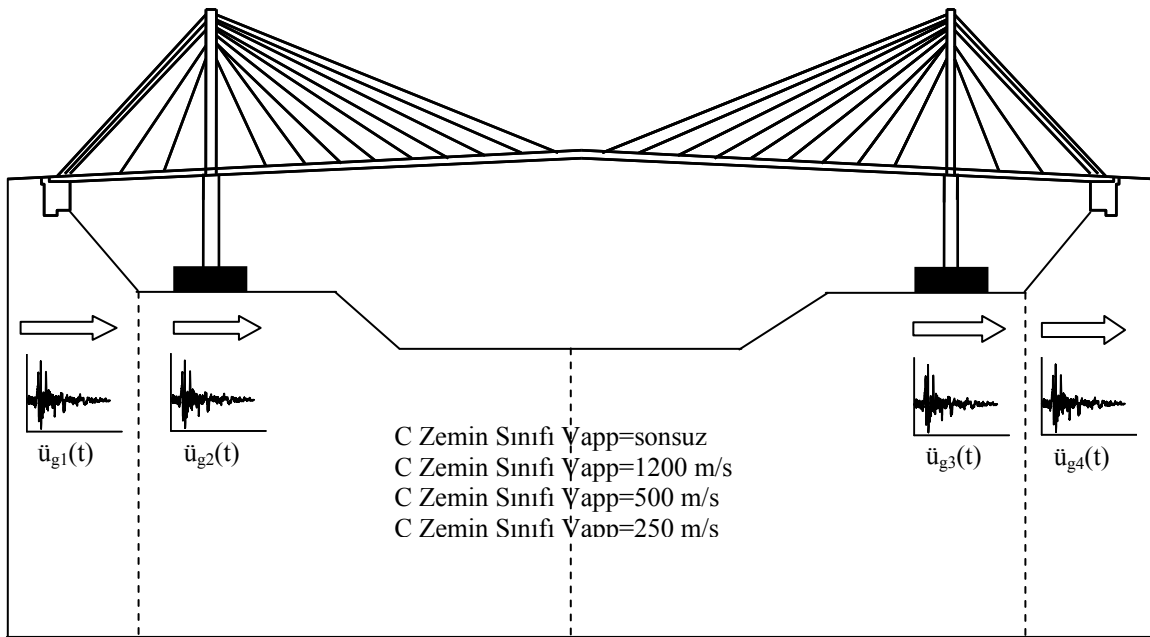
Şekil 4.16. Jindo Kulesi tepe noktası dinamik yatay yerdeğiştirme zaman grafiği



Şekil 4.17. Merkez açıklık orta nokta dinamik düşey yerdeğiştirme zaman grafiği

#### 4.2.Homojen Zeminlerde Farklı Yer Hareketi Hızları İçin Köprü Dinamik Davranışının İncelenmesi

Bu bölümde köprü sisteminin mesnetlendiği zemin ortamının C zemin sınıfı (orta zemin) olduğu kabul edilerek, yer hareketinin yayılma hızına bağlı olarak köprünün davranışı incelenmektedir. Analizlerde kullanılacak yer hareketleri C zemin sınıfı için sadece dalga yayılma etkisi dikkate alınarak elde edilecektir. Yer hareketi yayılma hızının  $V_{app}=\text{sonsuz}$ , 1200 m/s, 500 m/s ve 250 m/s alınması durumunda elde edilen yer hareketleri için, köprü sisteminin yapısal tepkileri yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği ankastre modellere bağlı olarak incelenmektedir.

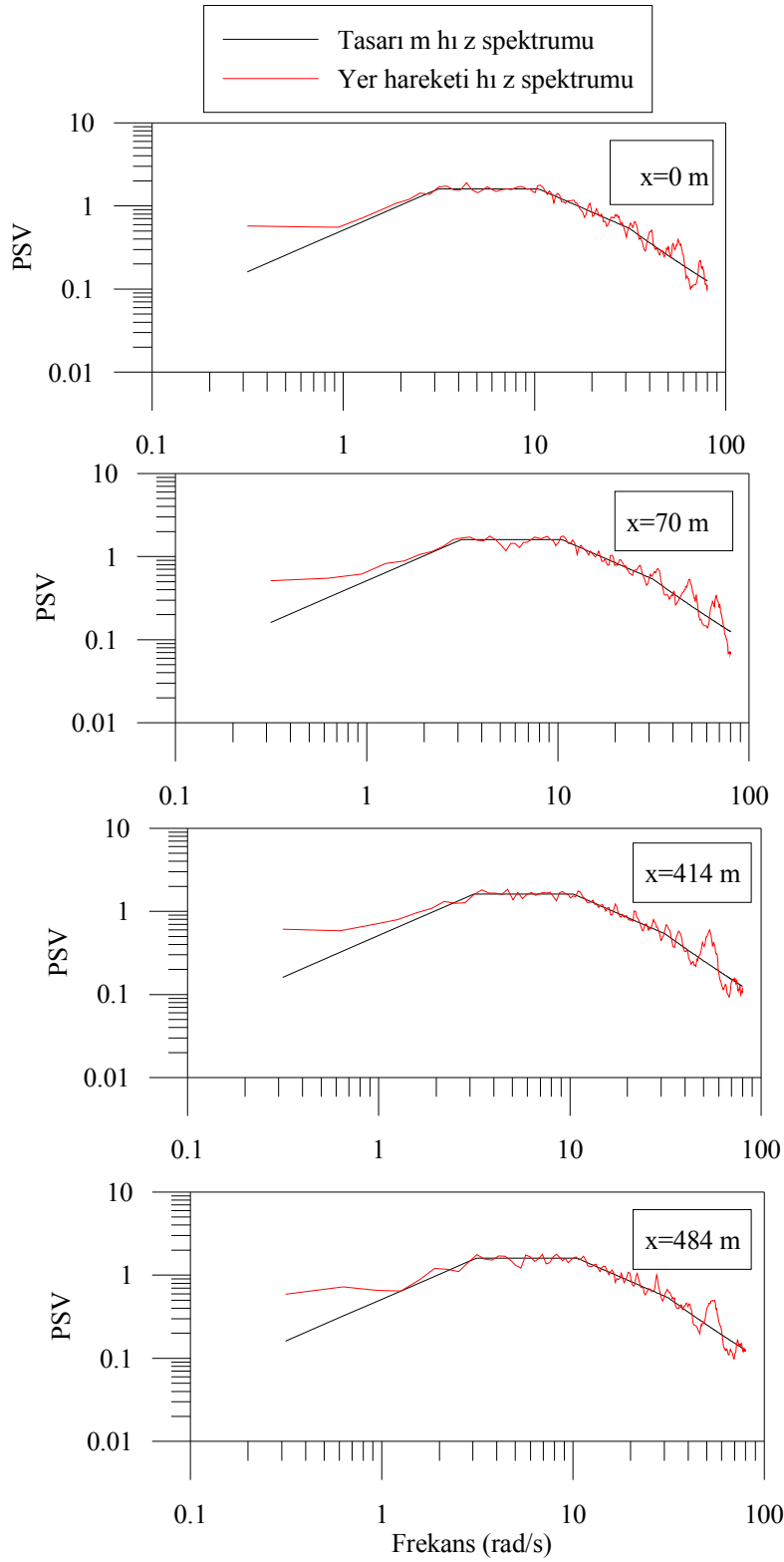


Şekil 4.18. Üniform olmayan yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi

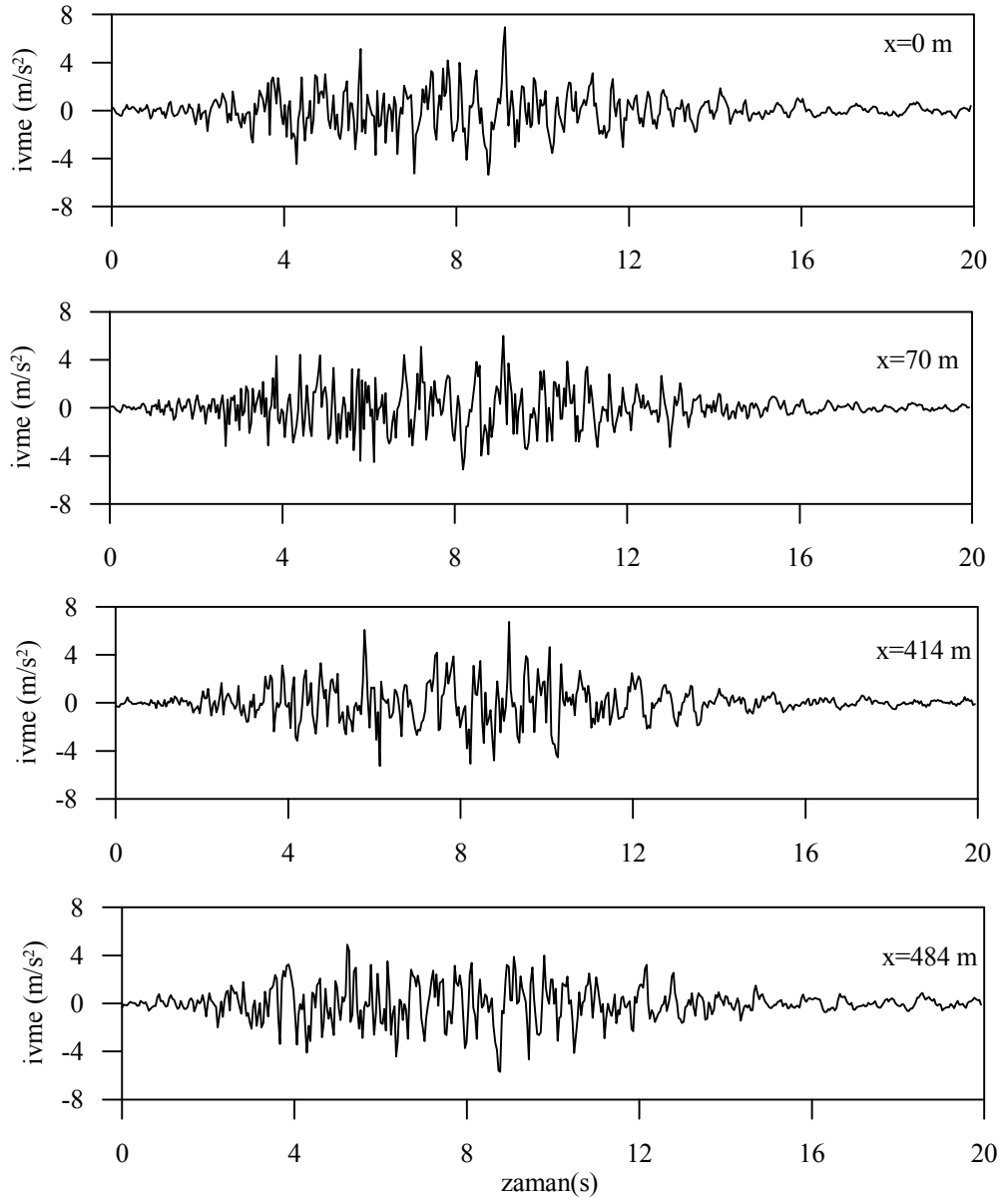
Köprü mesnetlerinin homojen orta zemin ortamında mesnetlenmesi durumunda dalga yayılma hızının 250 m/s değeri için, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği (ankastre) modellere ait analizlerde kullanılmak üzere  $N=512$  terim,  $\Delta t = 0,039$  s için toplam 20 s'lik ivme kayıtları oluşturulurken, aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir.

Kullanılacak yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak (Eş. 3.1) elde edilecektir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu için Çizelge 3.1’de orta zemin cinsi için verilen filtre parametreleri kullanılmaktadır.

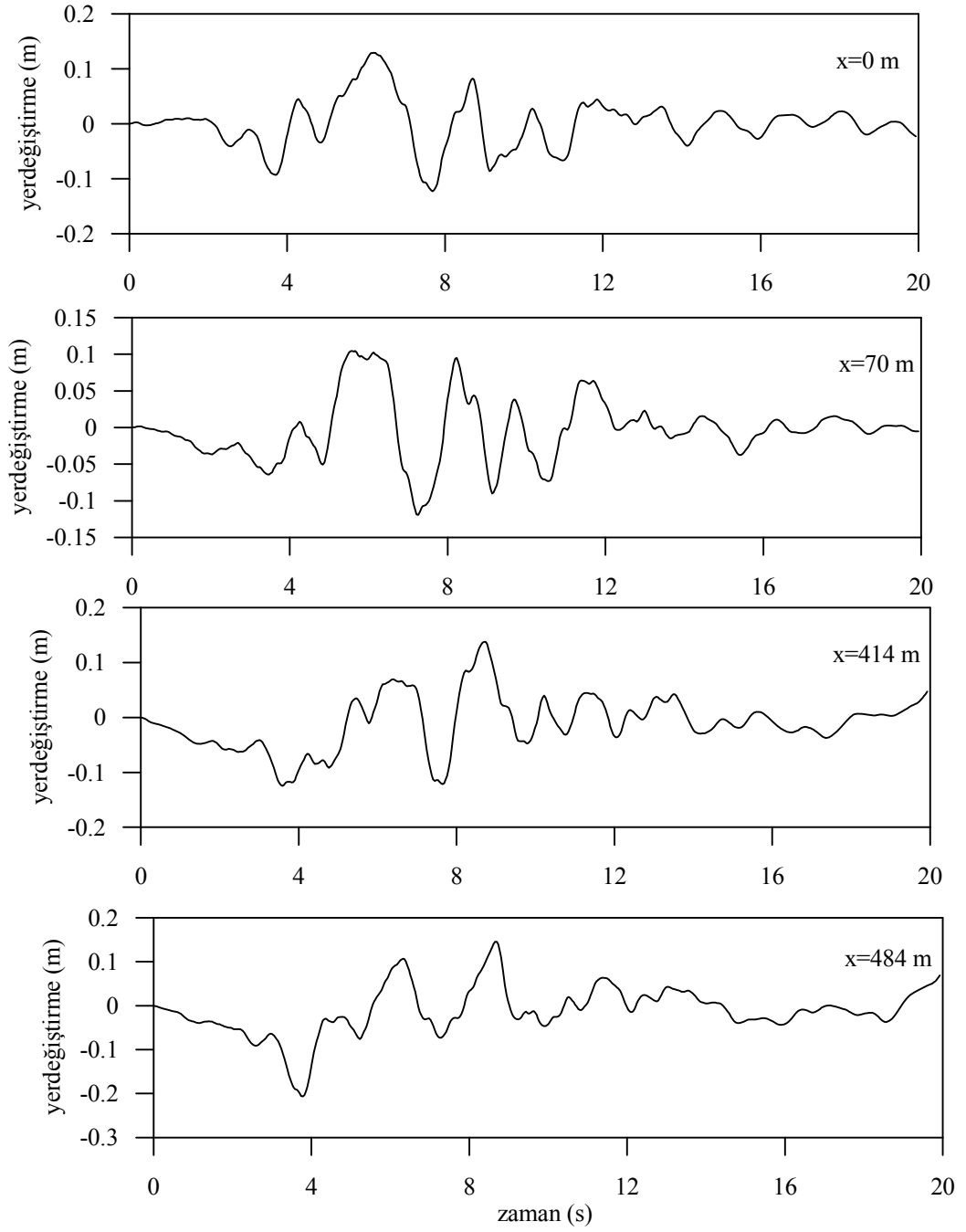
1. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Bu bölümde kullanılacak yer hareketleri C zemin sınıfı için korelasyon etkisi dikkate alınmadan sadece dalga yayılma etkisi dikkate alınarak elde edilmektedir. Dalga yayılma etkisi uygunluk fonksiyonunda Eş. 3.10 ile dikkate alınmaktadır.
2. Deprem hareketi stasyoner olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyoner olmayan yer hareket ivmeleri, stasyoner olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılmasından elde edilmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydı Eş. 3.22 ile gösterilen şekil fonksiyonu ile çarpılmaktadır.
3. Elde edilen ivme kayıtları %2 sönüm oranı için ve 0,5g PSA’ya göre normalize edilmek suretiyle EC8 ile (Zemin cinsi C) uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Yer hareketi yayılma hızınının 250 m/s olması durumu için yapı mesnetlerine etki ettirilecek yer hareketlerine ait hız spektrumu ile EC8 tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması Şekil 4.19’da verilmektedir.
4. Elde edilen ivme kayıtlarına Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 4.20-21’de mesnetlere etkileyen yer hareketlerine ait eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.19. C Zemin sınıfı için üretilen yer hareketine ait ( $V_{app}=250$  m/s) hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması



Şekil 4.20. Homojen orta zemin ( $V_{app}=250$  m/s) ivme-zaman grafikleri



Şekil 4.21. Homojen orta zemin ( $V_{app}=250$  m/s) yerdeğiştirme-zaman grafikleri

#### 4.2.1. Yapı–zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda (ANKR) farklı yer hareket hızları için elde edilen yapısal tepkilerin karşılaştırılması

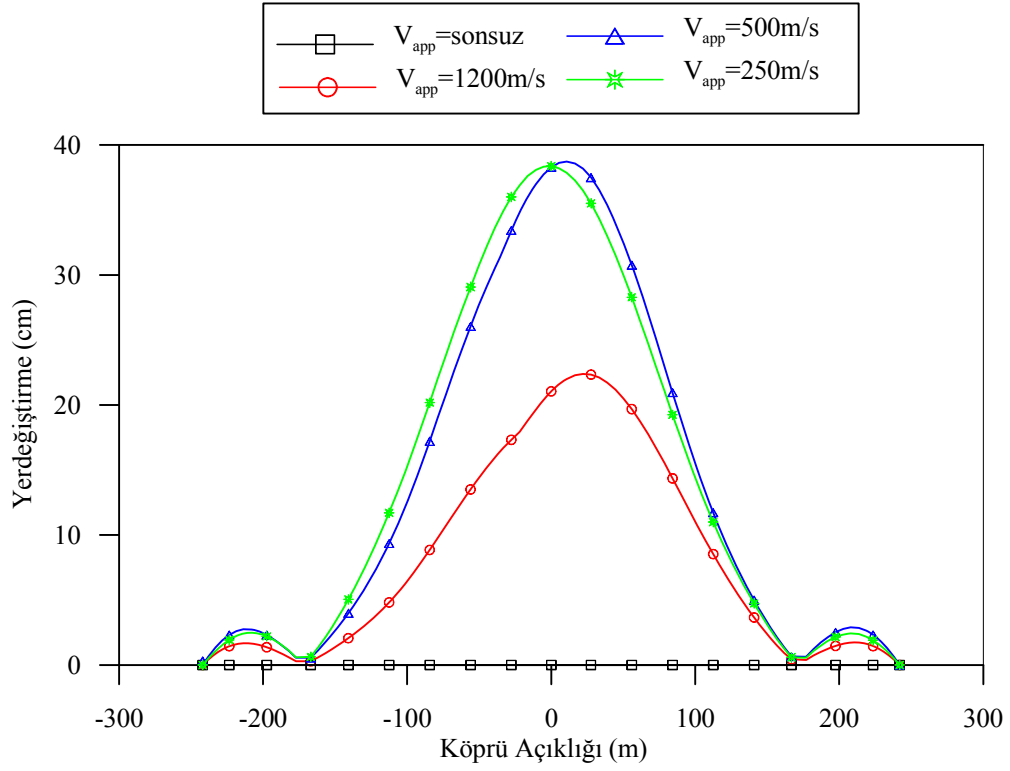
Köprü mesnetlerinin homojen orta zemin (Zemin sınıfı C) üzerinde inşa edildiği düşünülerek, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda yer hareketi yayılma hızının,  $V_{app}=\infty$ , 1200 m/s, 500 m/s ve 250 m/s alınması durumunda elde edilen yer hareketi etkisindeki köprü sistemin yapısal tepkileri yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler cinsinden karşılaştırılmaktadır.

Şekil 4.22’de yatay doğrultuda etkiyen yer hareketinin farklı dalga yayılma hızları için, elde edilen zahiri-statik tabliye düşey yerdeğiştirme değişimi görülmektedir. Üniform yer hareketi için rijit cisim hareketi söz konusu olduğundan, zahiri-statik düşey yerdeğiştirme bileşenleri sıfır çıkmıştır. Merkez açıklıkta yer hareketi yayılma hızınının 500 m/s ve 250 m/s olması durumunda en büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Yer hareketi yayılma hızınının 1200 m/s olması durumunda tabliye orta açıklığında elde edilen en büyük yerdeğiştirme 21 cm dir ve bu değer yer hareketi yayılma hızınının 250 m/s ve 500 m/s olması durumunda elde edilen en büyük yerdeğiştirme değerlerinden %45 daha küçüktür.

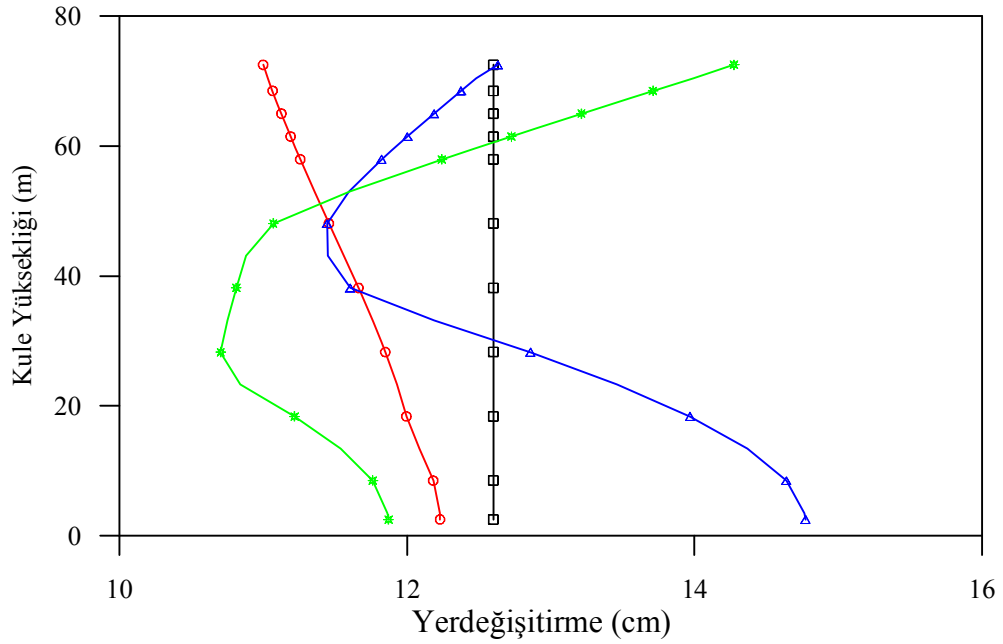
Şekil 4.23’te Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirme bileşenin değişimi görülmektedir. Üniform yer hareketi için kule yüksekliği boyunca 13 cm.’lik sabit bir yerdeğiştirme elde edilmiştir. Yer hareketi yayılma hızınının 1200 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme 11-12 cm arasında değişmektedir. Yer hareketi yayılma hızınının 500 m/s ve 250 m/s olması durumunda ise yerdeğiştirme değerleri 11-15 cm arasında değişmektedir. Dört hız değişkeni içinde yerdeğiştirmelerde önemli bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

Şekil 4.24-25’te tabliye ve kuledeki eğilme momenti değişimi görülmektedir. Tabliye ve kulede üniform yer hareketi için rijit cisim hareketi söz konusu olacağından, elde edilen eğilme momenti değerleri sıfırdır. Zahiri-statik tabliye eğilme momenti için elde edilen değişim, tabliye düşey yerdeğiştirmeleri için elde edilen değişimle

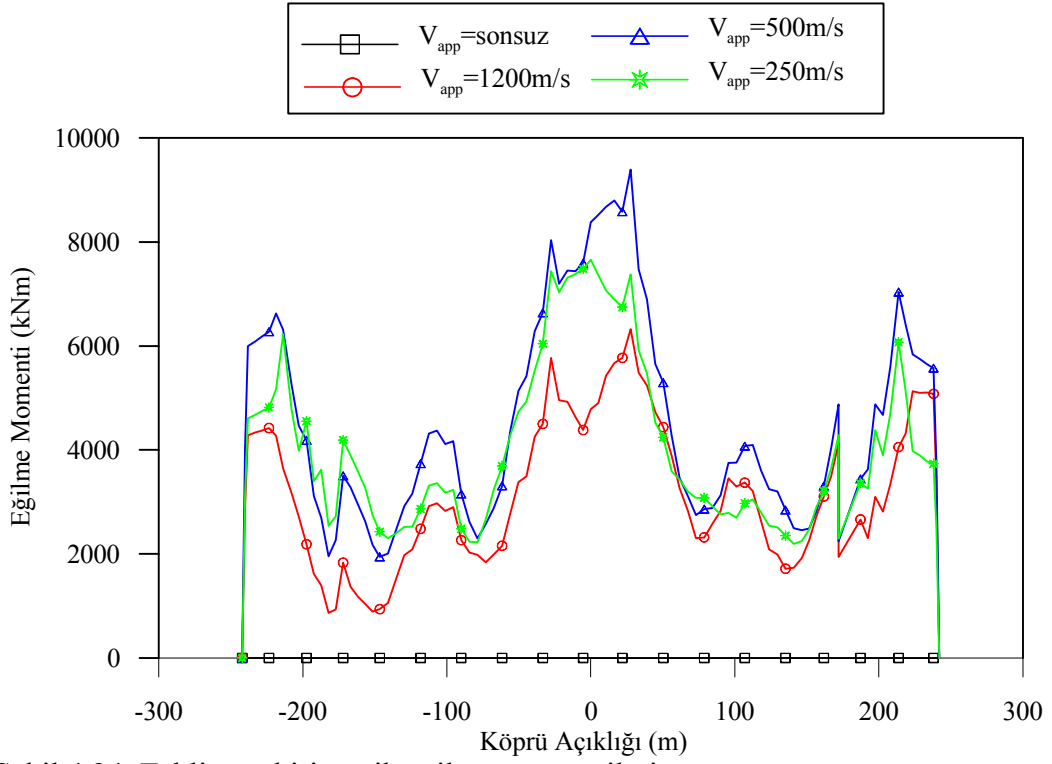
benzerdir. Görüleceği üzere, hızın azalması ile eğilme momenti değerleri genellikle artmaktadır. Tabliye eğilme momenti değişiminden görüleceği gibi hızın 500 m/s ve 250 m/s olması durumunda elde edilen moment değerleri birbirine yakın olup en büyük değerleri almaktadır. Zahiri-statik kule eğilme momenti kule yüksekliğinin büyük bir bölümünde azalan yer hareketi yayılma hızı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Kule taban noktasında en büyük eğilme momenti yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda 11600 kNm olarak elde edilmiştir. Bu değer, aynı noktada yer hareketi yayılma hızının sırasıyla 500 m/s ve 1200 m/s olması durumunda elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %14 ve %124 daha büyüktür.



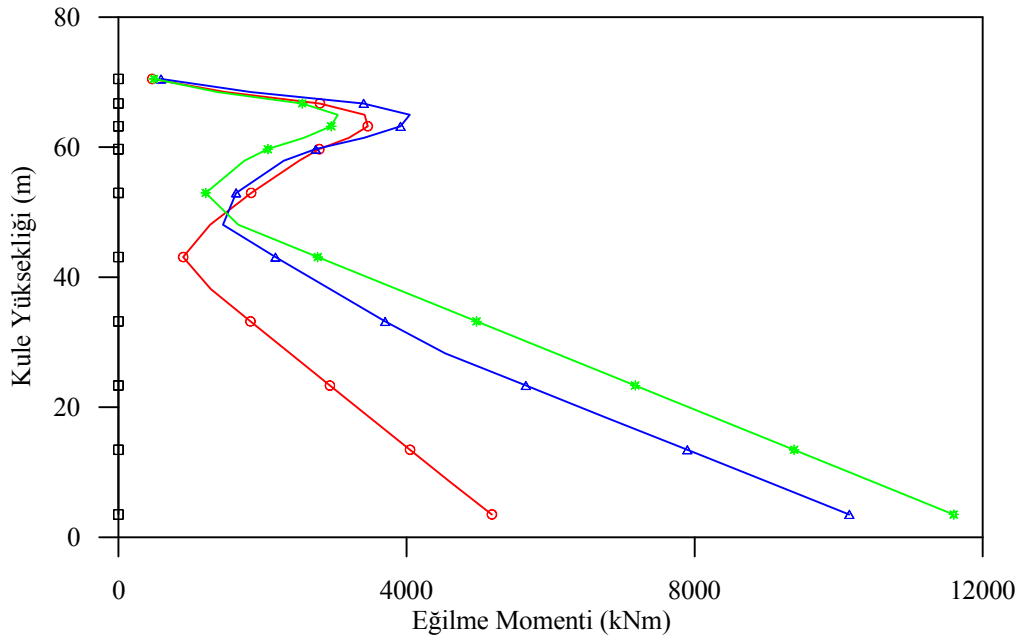
Şekil 4.22. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.23. Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.24. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri



Şekil 4.25. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri

Şekil 4.26'da tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme bileşeni, farklı yer hareketi yayılma hızları için karşılaştırılmaktadır. Şekilden dinamik yerdeğiştirme bileşeninin azalan hızla ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Tabliye düşey yerdeğiştirme değeri yer hareketinin sonsuz hızla yayılması durumunda tabliye orta noktasında çok küçük olurken, yer hareketi yayılma hızının sonlu olması durumunda elde edilen yerdeğiştirmeler en büyük olmaktadır. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda tabliye orta noktasında 156 cm.'lik bir yerdeğiştirme elde edilmiştir. Hızın 250 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değeri hızın 1200 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirmeden %117, hızın 500 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değerinden %39 daha büyüktür.

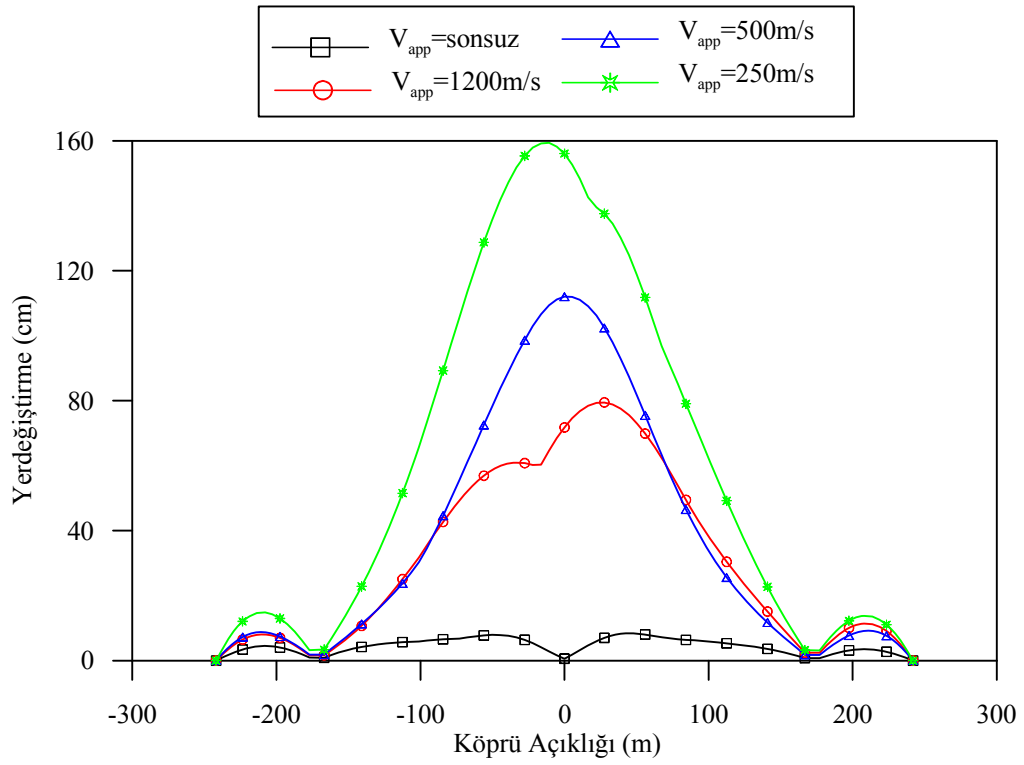
Şekil 4.27'de Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme bileşeninin farklı yer hareketi yayılma hızları için değişimi görülmektedir. Tabliye düşey yerdeğiştirme grafiğinde olduğu gibi en büyük yatay yerdeğiştirme değeri kule tepe noktasında yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme değeri yer hareketi yayılma hızının 1200 m/s ve 500 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden sırasıyla %121 ve %63 daha büyük çıkmıştır.

Şekil 4.28'de tabliye dinamik eğilme momenti değerlerinin farklı yer hareketi yayılma hızları için değişimi görülmektedir. Tabliye düşey ve kule yatay yerdeğiştirme grafiklerinde olduğu gibi, azalan yer hareketi yayılma hızı ile ters orantılı eğilme momenti değişimi görülmektedir. En büyük eğilme momenti orta açıklıkta yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında elde edilen en büyük eğilme momenti değerleri yer hareketi yayılma hızının 250 m/s, 500 m/s, 1200 m/s ve sonsuz olması durumunda sırasıyla 50585 kNm, 36410 kNm, 22441 kNm ve 3588 kNm olarak elde edilmiştir.

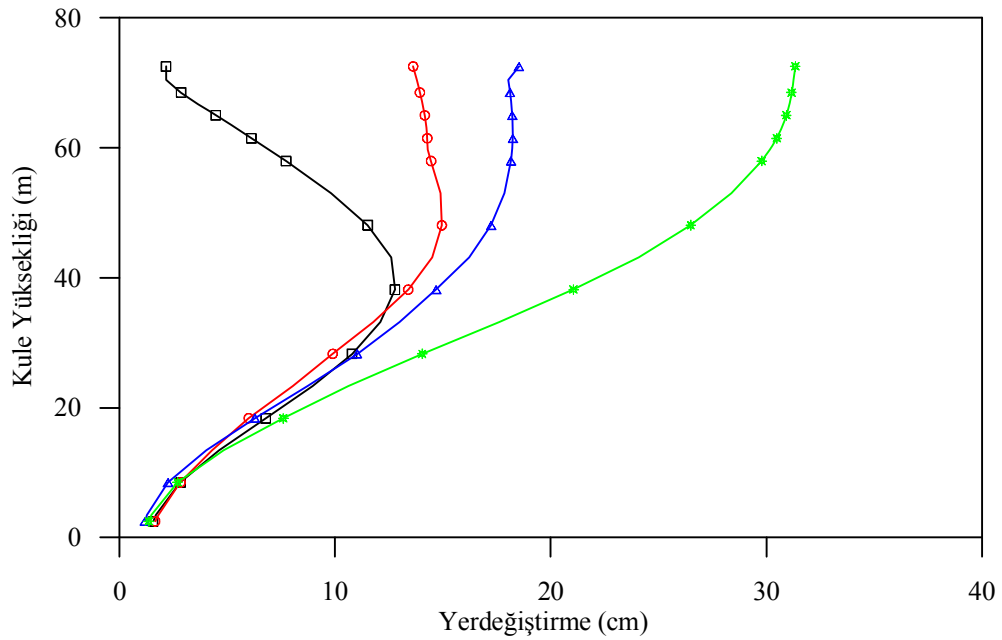
Şekil 4.29'da Jindo kulesi dinamik eğilme momenti değerlerinin farklı yer hareketi yayılma hızları için değişimi görülmektedir. Kule yüksekliğinin ilk 20 metre ve son 20 metrelik bölümünde yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilen eğilme momentleri en büyük olurken, kule orta bölgesinde en büyük eğilme

momenti yer hareketi hızın sonsuz kabul edildiği üniform yer hareketi durumu için elde edilmiştir. Dört hız değişkeni için eğilme momenti en büyük değerini kule taban noktasında almaktadır. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda kule taban noktasında elde edilen eğilme momenti değeri aynı noktada yer hareketi yayılma hızının sonsuz, 1200 m/s ve 500 m/s olması durumunda elde edilen değerlerden sırasıyla %28, %31 ve %17 daha büyük çıkmıştır.

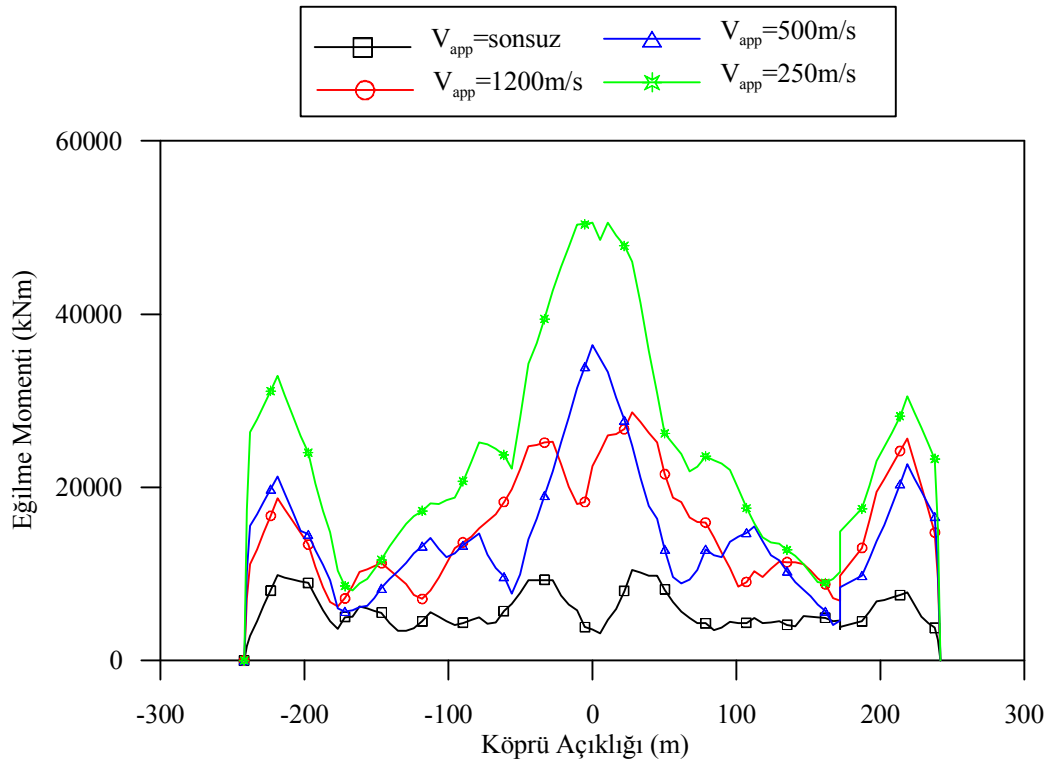
Üniform yer hareketi için antisimetrik modların yapı davranışına herhangi bir katkısı olmamaktadır. Bunun yanında, üniform olmayan yer hareketi, antisimetrik modlar üzerinde etkili olmakta ve böylece ilave deformasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, dalga yayılma etkisine bağlı olarak belirlenen yer hareketleri için elde edilen dinamik tepkilerdeki artışları, simetrik olmayan yüksek modların etkisi ile açıklamak mümkündür.



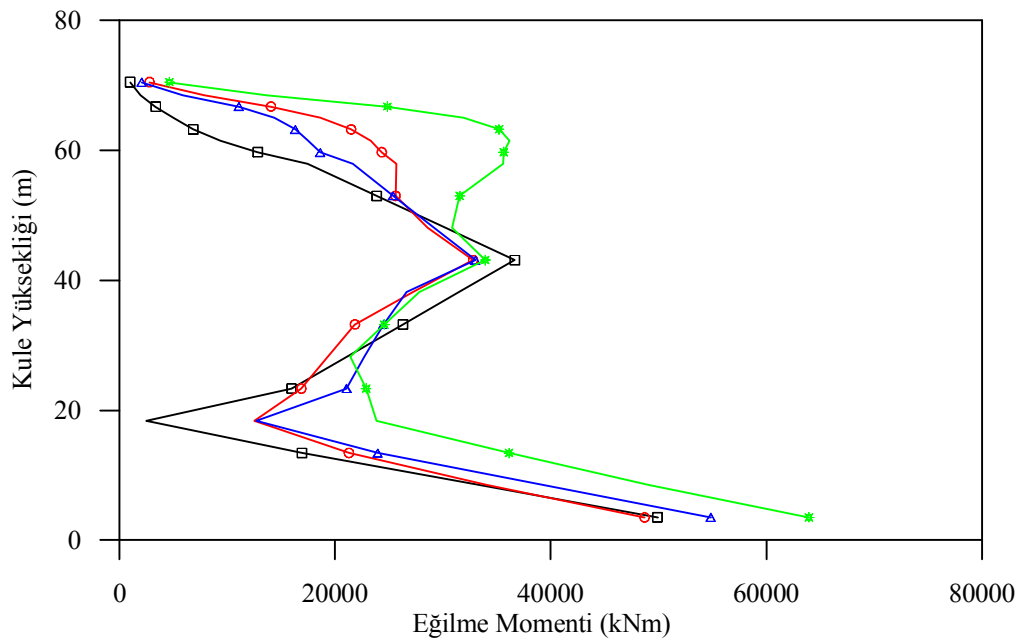
Şekil 4.26. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.27. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.28. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



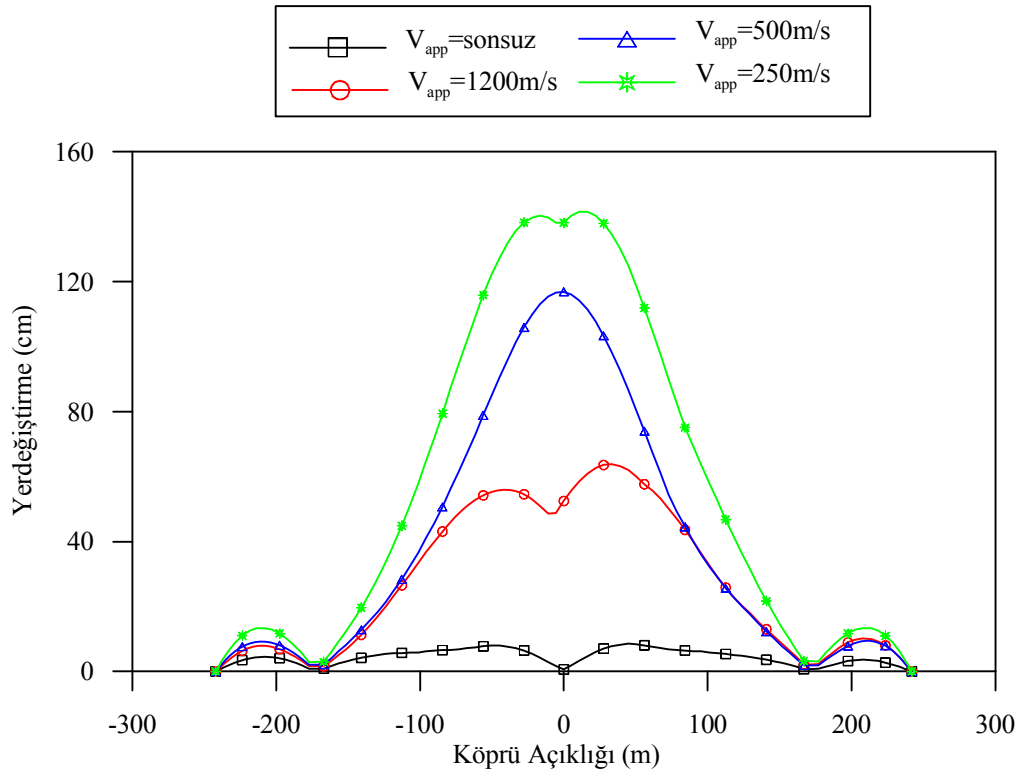
Şekil 4.29. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)

Şekil 4.30'da tabliye toplam yerdeğiştirme bileşenlerinin farklı yer hareketi yayılma hızları için değişimi görülmektedir. En büyük yerdeğiştirme değeri yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda merkez açıklıkta 142 cm olarak elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değeri yer hareketi yayılma hızının 500 m/s ve 1200 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %18 ve %160 daha büyüktür. Üniform yer hareketi için tabliye açıklığı boyunca en küçük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir.

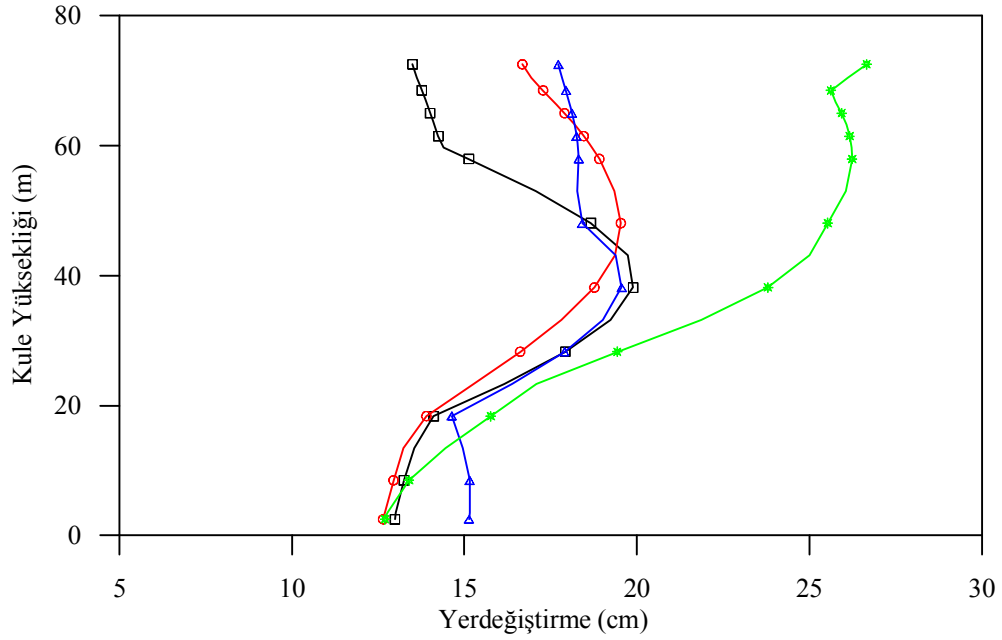
Şekil 4.31'de Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme bileşenlerinin yer hareketi yayılma hızına göre değişimi görülmektedir. Kule yatay yerdeğiştirmesi için en büyük yerdeğiştirme, kule tepe noktasında yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilirken, bu noktadaki en küçük yerdeğiştirme yer hareketi yayılma hızının sonsuz kabul edildiği üniform yer hareketi durumunda elde edilmiştir. Dinamik yatay yerdeğiştirmelerin değişiminden farklı olarak, dört hız değişkeni için de kule taban noktasındaki yerdeğiştirme değerleri, zahiri-statik yerdeğiştirme bileşenine bağlı olarak artış göstermiştir.

Şekil 4.32-33'te tabliye ve kule eğilme momenti değişimleri görülmektedir. Dinamik eğilme momenti grafiklerinde olduğu gibi, toplam tabliye eğilme momenti değerleri azalan hızla ters orantılı olarak değişmektedir ve en büyük değerler tabliye orta noktasında ve kule taban noktasında elde edilmektedir.

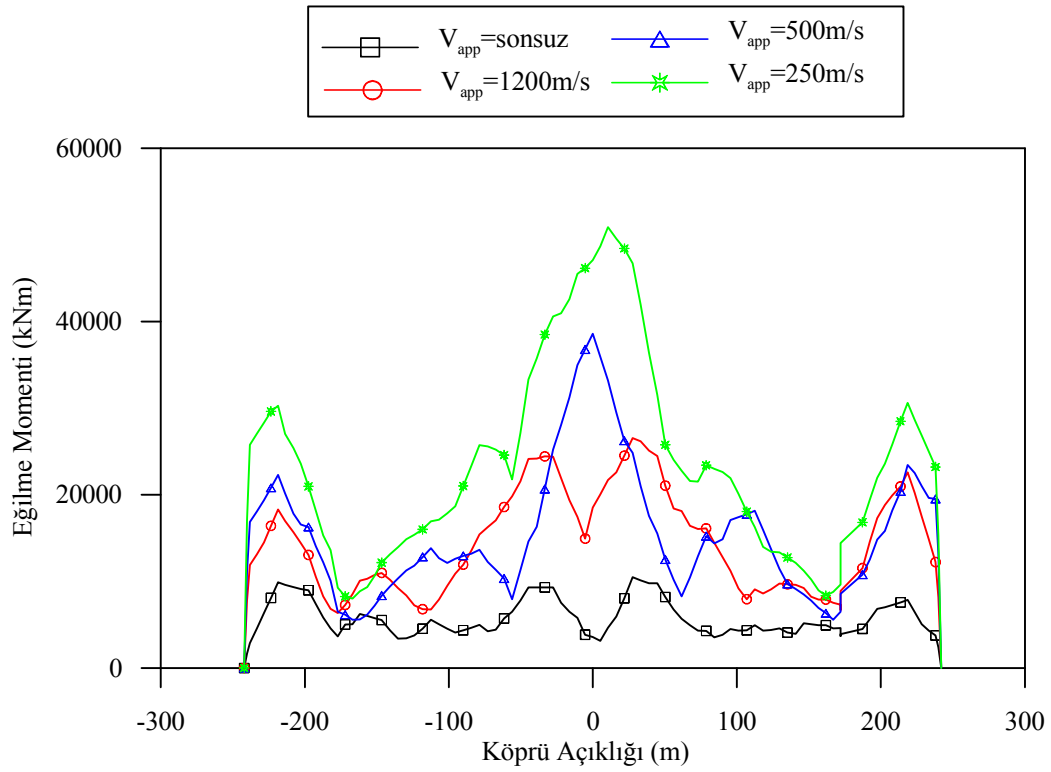
Zahiri-statik, dinamik ve toplam tepki değerlerinin karşılaştırıldığı şekiller incelendiğinde, dinamik tepki bileşeninin zahiri-statik tepki bileşenine oranla önemli derecede toplam tepki bileşenine katkı sağladığı anlaşılmaktadır.



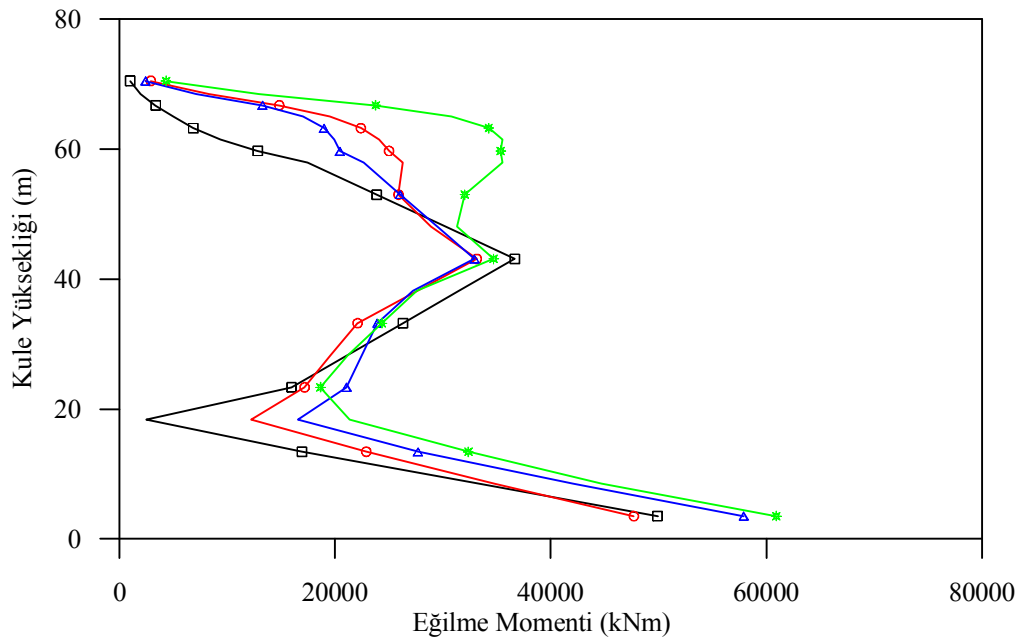
Şekil 4.30. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.31. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.32. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.33. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)

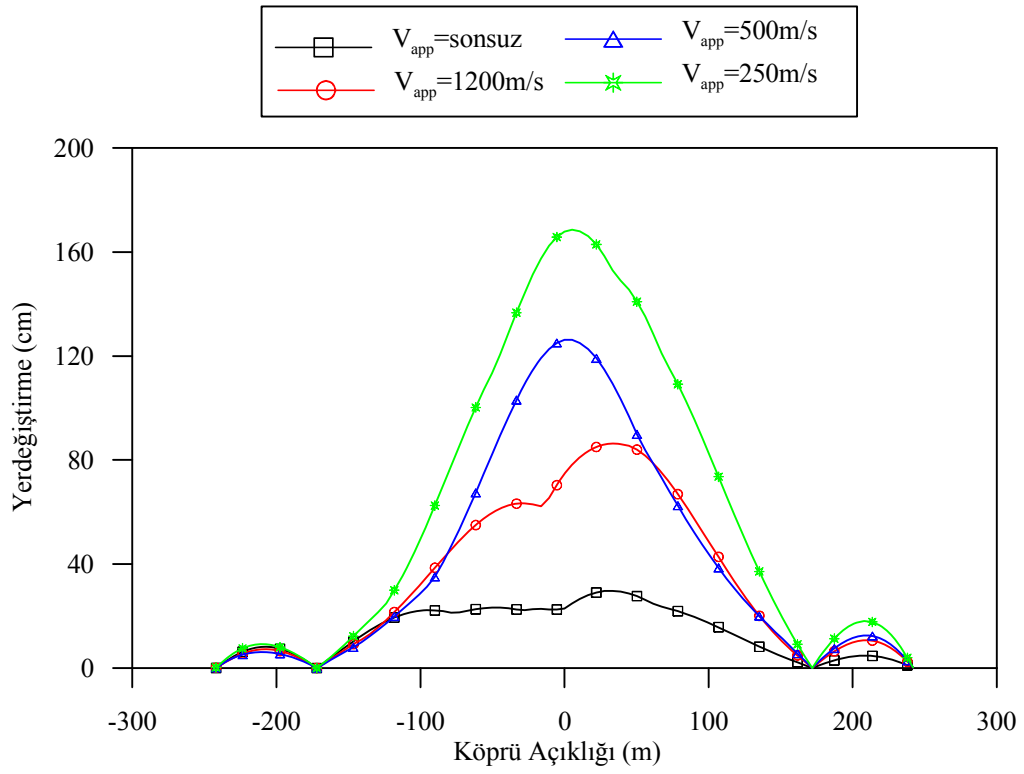
#### 4.2.2. Yapı–zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda (YZE) farklı yer hareketi hızları için yapısal tepkilerin karşılaştırılması

Bu bölümde, dikkate alınan köprü sistemi yapı-zemin etkileşimi açısından incelenmektedir. Bu amaçla, köprünün mesnetlendiği zemin C zemin sınıfı olduğu kabul edilerek, yer hareketi yayılma hızı olarak sonsuz, 1200 m/s, 500 m/s ve 250 m/s değerleri dikkate alınmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile yapısal zahiri-statik tepki bileşenleri herhangi bir değişime uğramayacağından bu bölümde dinamik ve toplam yapı tepkileri incelenmektedir.

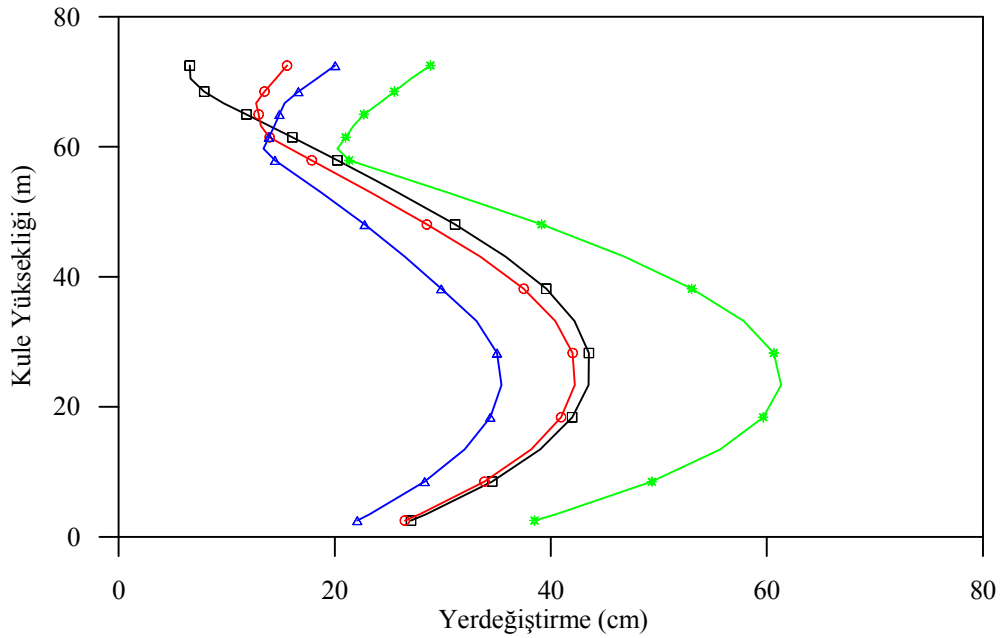
Şekil 4.34’de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı (YZE) sistemde farklı yer hareketi yayılma hızları için elde edilen tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme bileşenleri görülmektedir. En büyük tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değeri tabliye orta noktasında yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda 168 cm olarak elde edilmiştir. Bu değer hızın 1200 m/s ve 500 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden sırasıyla %124 ve %33 oranla daha büyük olarak elde edilmiştir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük yerdeğiştirmeler en küçük hız değeri için, en küçük yerdeğiştirmeler ise üniform yer hareketi için elde edilmiştir.

Şekil 4.35’de Jindo kulesinin farklı yer hareketi yayılma hızları için dinamik yatay yerdeğiştirme bileşenleri karşılaştırılmaktadır. En büyük kule yatay yerdeğiştirme değerleri kule yüksekliği boyunca yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Kule yüksekliğinin en üst bölümünde yerdeğiştirme hızla ters orantılı olarak değişmektedir. Bu bölümde en büyük yerdeğiştirmeler yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilirken, en küçük yerdeğiştirme değerleri yer hareketinin sonsuz hızla yayılması durumunda (üniform yer hareketi) elde edilmiştir. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilen en büyük yerdeğiştirme değeri aynı noktada üniform yer hareketi için elde edilen yerdeğiştirmeden %42 daha büyüktür.

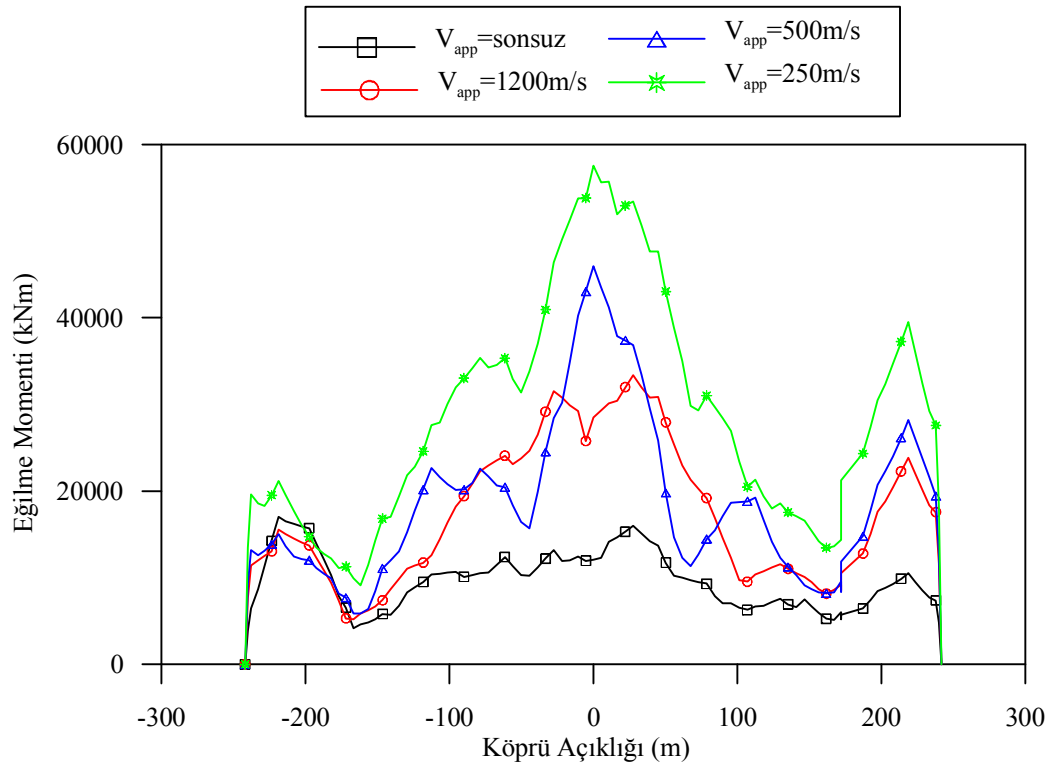
Şekil 4.36-37’de tabliye dinamik eğilme momenti ve Jindo kulesi dinamik eğilme momenti bileşenlerine ait grafikler görülmektedir. Tabliye dinamik eğilme momentlerinin hızla ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. En büyük eğilme momenti orta açıklıkta yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Orta açıklıkta yer hareketi yayılma hızının sonsuz, 1200 m/s, 500 m/s ve 250 m/s olması durumunda elde edilen en büyük eğilme momentleri sırasıyla 17042 kNm, 33356 kNm, 45916 kNm ve 57551 kNm’dir. Kule eğilme momenti değişimi incelendiğinde en büyük eğilme momenti değerlerinin kule taban noktasında elde edildiği görülmektedir. Kule yüksekliği boyunca en büyük eğilme momenti değerleri yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Diğer üç hız değişkeni için kule yüksekliği boyunca birbirine yakın moment değerleri elde edilmiştir.



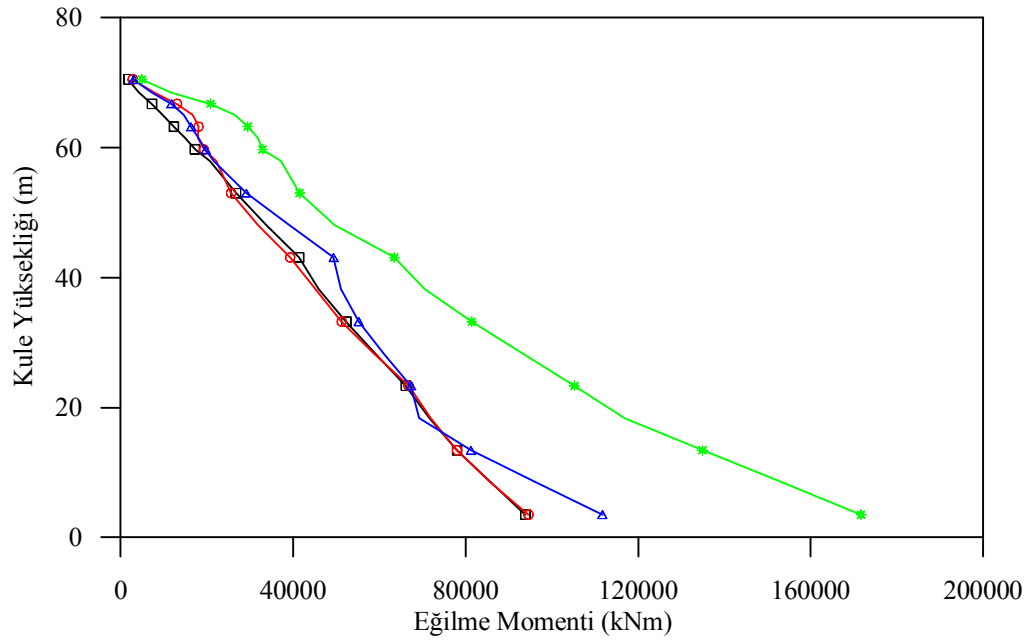
Şekil 4.34. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.35. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.36. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)



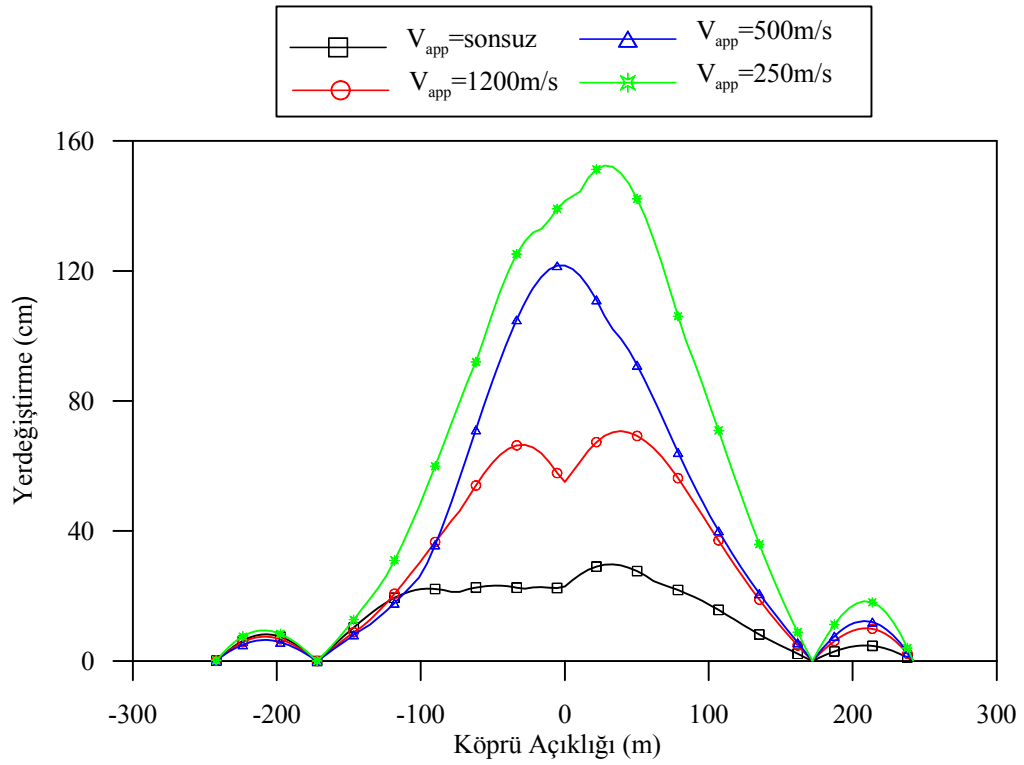
Şekil 4.37. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)

Şekil 4.38’de tabliye toplam düşey yerdeğiştirme bileşenin farklı yer hareketi yayılma hızları için değişimi görülmektedir. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda merkez açıklık orta noktasında elde edilen yerdeğiştirme değeri 142 cm olarak elde edilmiştir. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda tabliye orta noktasında elde edilen yerdeğiştirme değeri, yer hareketi yayılma hızının 500 m/s olması durumunda aynı noktada elde edilen yerdeğiştirmeden %16 büyükken hızın 1200 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirmeden %158 ve yer hareketinin sonsuz hızla yayılması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değerinden %517 daha büyüktür.

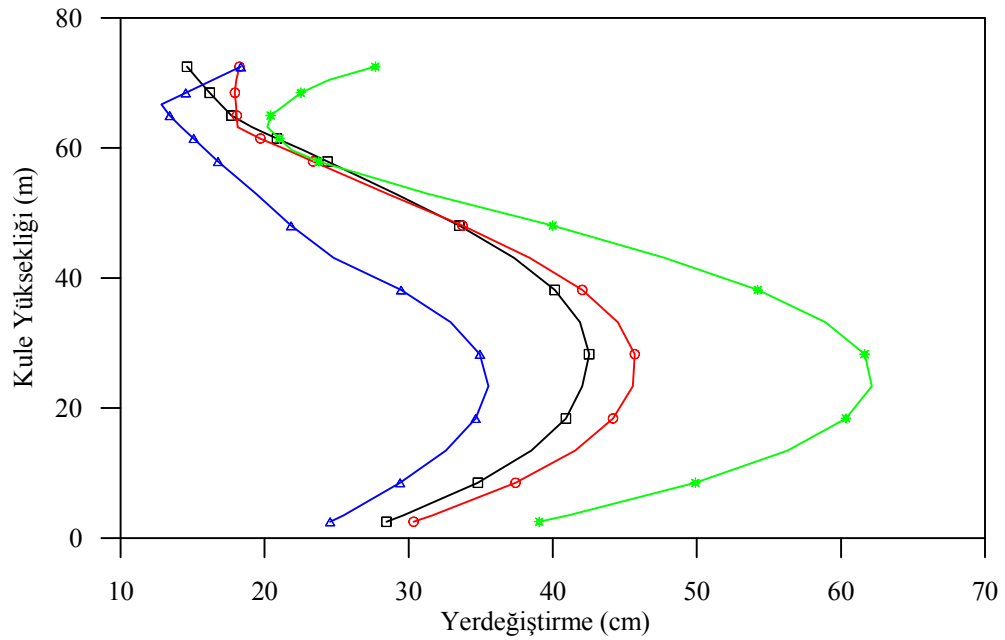
Şekil 4.39’da Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme bileşenin farklı yer hareketi hızları için değişimi görülmektedir. Kule dinamik yatay yerdeğiştirmeleri için gözlenen değişim, toplam yerdeğiştirmeler için elde edilen değişime benzerdir. Kule yüksekliği boyunca en büyük yerdeğiştirmeler yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilmiştir. Yer hareketi yayılma hızının 250 m/s olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme en büyük yerdeğiştirme değeri, aynı noktada üniform yer hareketi için aynı noktada elde edilen yerdeğiştirme değerinden %48 daha büyüktür. Kule yüksekliğinin üst bölümünde ise yerdeğiştirme değerleri azalan hızla ters oratılıdır.

Şekil 4.40-41’de tabliye ve Jindo kulesi eğilme momenti değişimi görülmektedir. Tabliye dinamik eğilme momenti için gözlenen değişim, toplam tabliye eğilme momenti değerleri için de benzer olup, azalan hızla ters orantılı olarak değişmekte ve en büyük değerler tabliye orta noktasında elde edilmektedir. Kule dinamik eğilme momentin hıza bağlı değişimi incelendiğinde, burada en büyük eğilme momenti değeri tabanda yer hareketi yayılma hızının 250 m/sn olması durumunda elde edilmiştir.

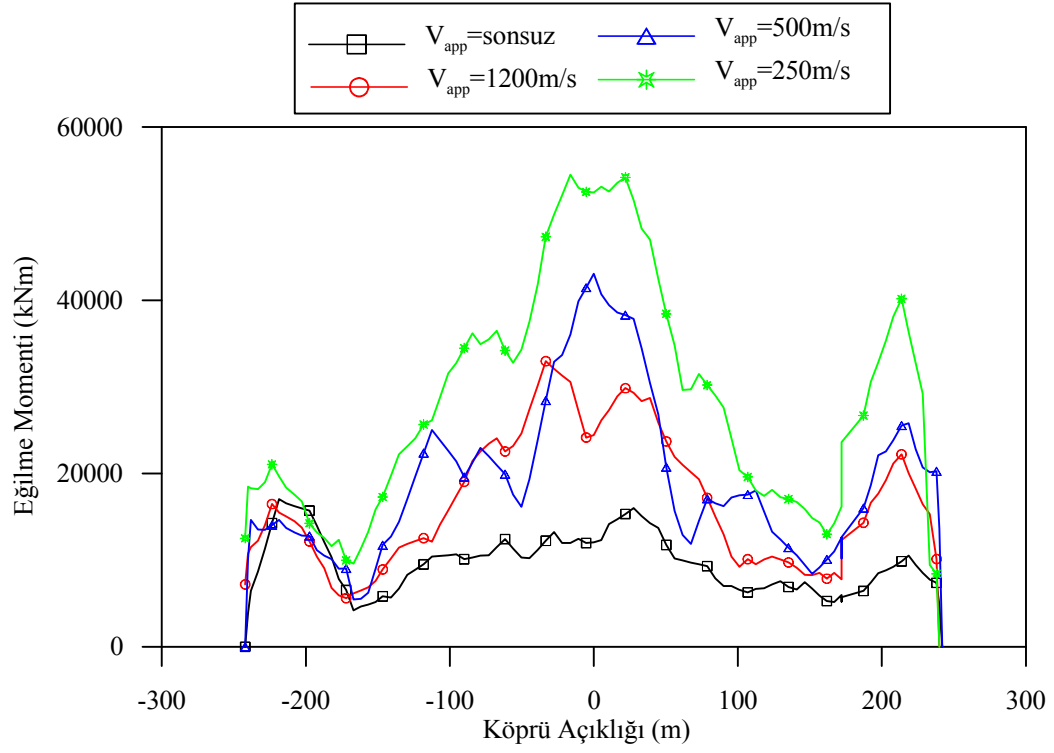
Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplam tepkiye katkı oranları incelendiğinde, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumdakine benzer olarak toplam tepkilerin büyük oranda dinamik bileşenden meydana geldiği anlaşılmaktadır.



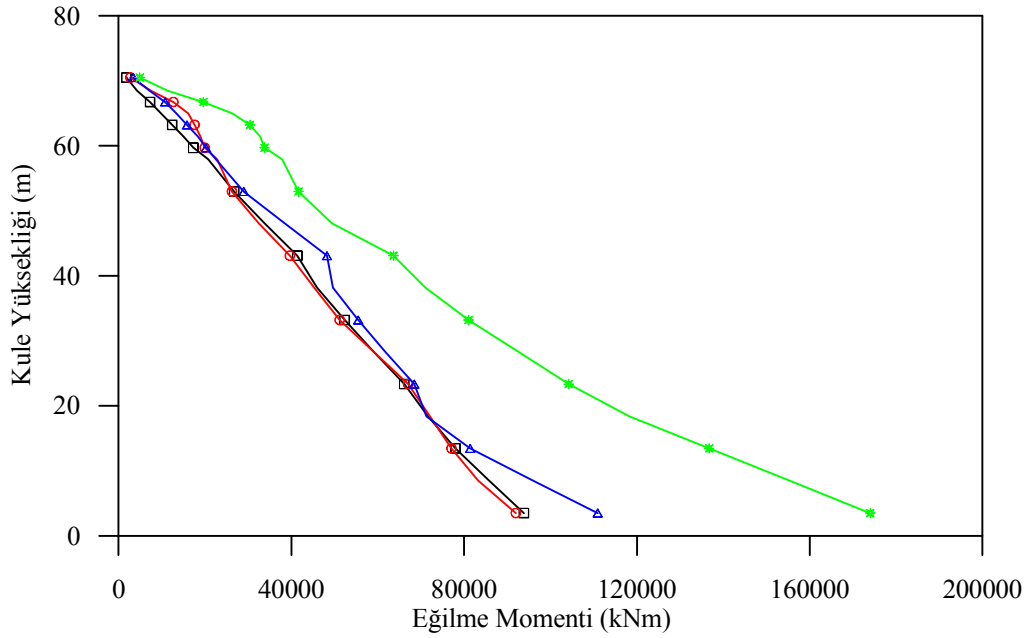
Şeki 4.38. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.39. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.40. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.41. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)

Yapı-zemin etkileşiminin üst yapı dinamik davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla, yapı-zemin etkileşiminin analize dahil edilmesi ve ihmal edilmesi durumunda toplam yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Karşılaştırmalar, yer hareketi yayılma hızının  $V_{app} = \infty$ , 1200 m/s ve 250 m/s olması durumunda elde edilen yer hareketleri için yapılmıştır.

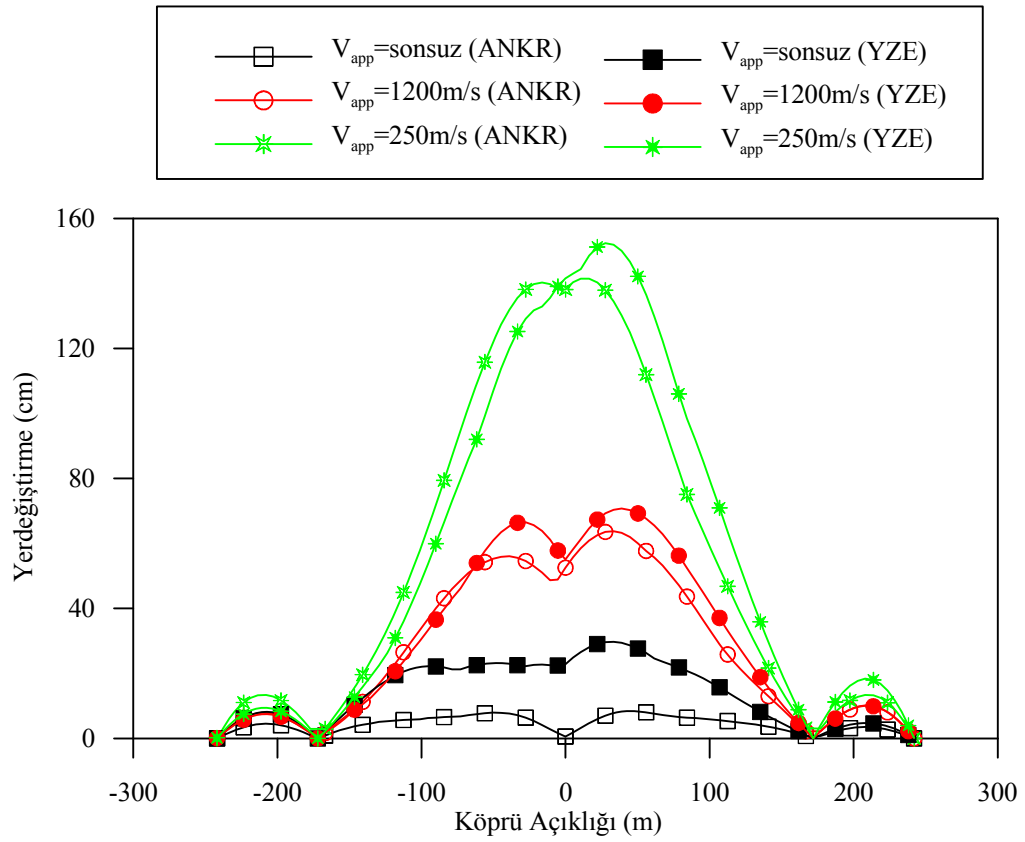
Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı (YZE) ve yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği durumda (ANKR) elde edilen tepkiler genellikle artan hız değerleri ile birlikte azalmaktadır.

Şekil 4.42'de yapı-zemin etkileşimi ve farklı yer hareketi yayılma hızları için elde edilen tabliye toplam düşey yerdeğiştirme bileşenlerinin değişimi görülmektedir. Görüleceği üzere gerek yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve gerekse etkileşimin ihmal edildiği ankastre durumda tabliye düşey yerdeğiştirme değerleri artan hız ile birlikte azalmaktadır. Ayrıca tüm hız değerleri için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda elde edilen yerdeğiştirmeler genellikle ankastre durum için elde edilen yerdeğiştirmelerden büyük çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin en çok, yer hareketi yayılma hızının sonsuz olduğu üniform yer hareketi durumunda etkili olduğu görülmüştür. Ankastre durum için tabliye orta noktasında sıfıra yakın bir yerdeğiştirme elde edilirken, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda aynı noktada 23 cm'lik yerdeğiştirme gözlenmiştir. Bunun yanında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda, yer hareketi yayılma hızının 250 m/s ve 1200 m/s değerleri için tabliye orta noktasında elde edilen yerdeğiştirme değerleri, ankastre sisteme oranla sırasıyla %3 ve %4 daha büyük çıkmıştır.

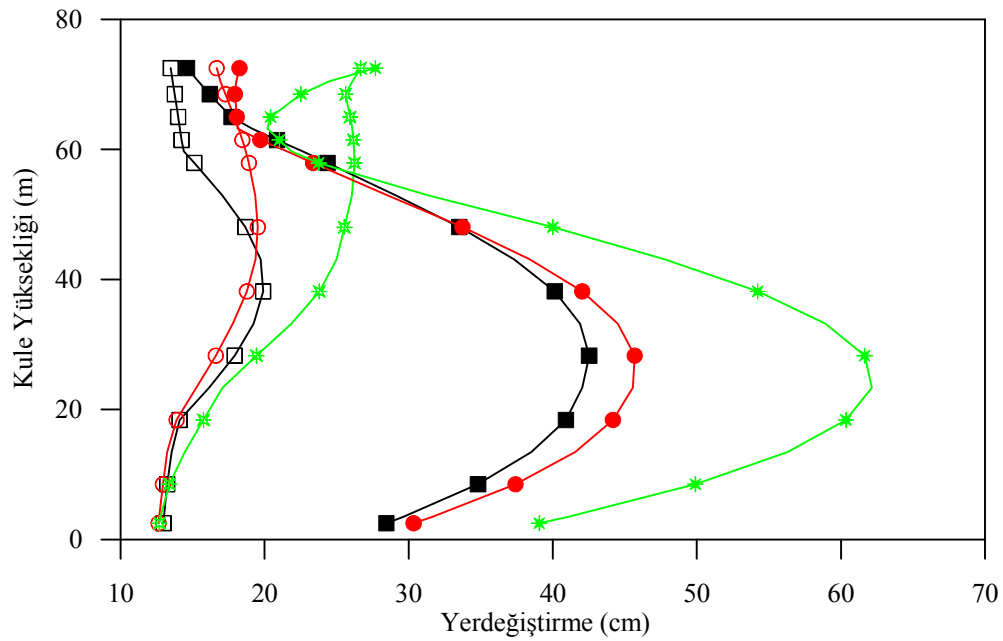
Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri, yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketi yayılma hızına bağlı olarak Şekil 4.43'te karşılaştırılmaktadır. Ankastre durumda en büyük yerdeğiştirmeler genellikle kule tepe noktasında gözlenirken, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda kule yüksekliği boyunca orta noktalarda tespit edilmiştir. Kule yatay yerdeğiştirmeleri üzerinde hem yer hareketi yayılma hızının, hem de yapı-zemin etkileşiminin etkisi olduğu gözlenirken, yapı-zemin etkileşiminin

etkisinin daha belirgin olduğu açıkca gör÷lmektedir. Yer hareketinin sonsuz hızla 1200 m/s hızla ve 250 m/s hızla yayılması durumunda en büyük yerdeğiştirmelerin elde edildiği noktada yapı-zemin etkileşimi yerdeğiştirmeleri sırasıyla %163, %207 ve %265 oranında arttırmıştır.

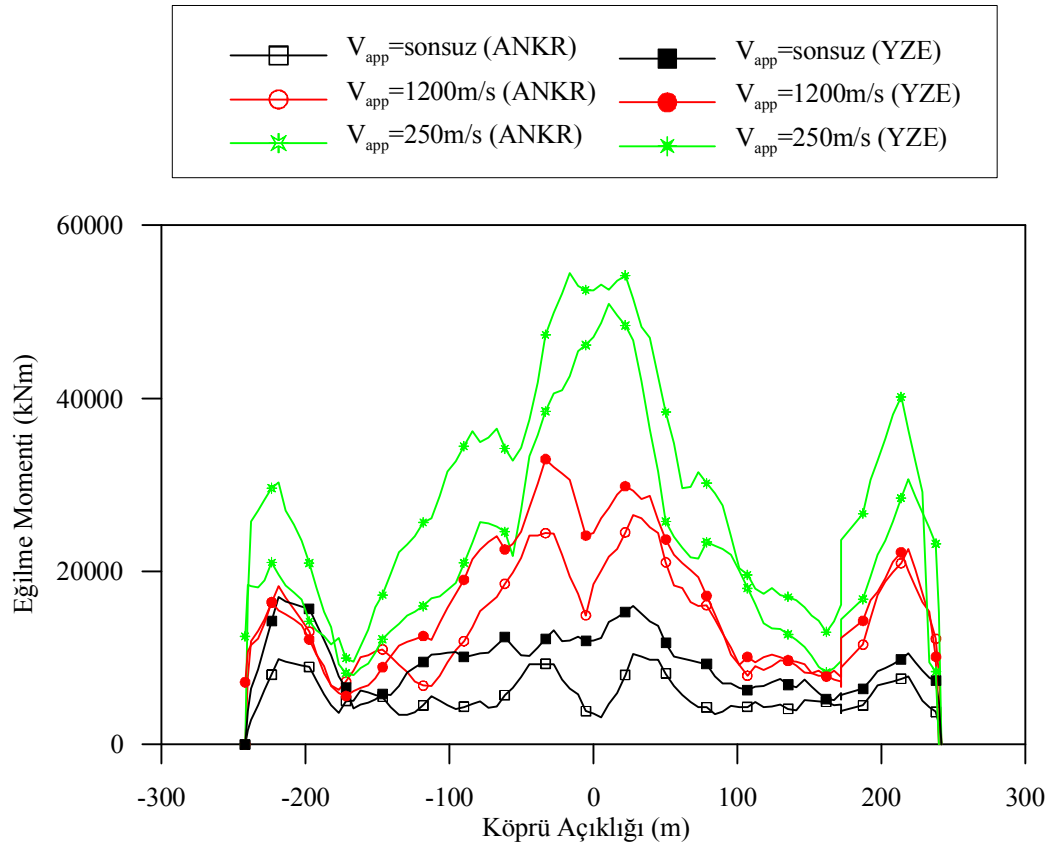
Yapı-zemin etkileşimi ve farklı yer hareketi yayılma hızları için elde edilen toplam tabliye eğilme momenti ve Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi Şekil 4.44-45'de verilmektedir. Eğilme momentleri için elde edilen değişim, yerdeğiştirmeler için elde edilen değişime benzerdir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması, tabliye ortasındaki eğilme momentlerini  $V_{app}=\text{sonsuz}$ , 1200 m/s ve 250 m/s hız değerleri için, ankastre duruma göre sırasıyla %236, %32 ve %11 oranında arttırmıştır.



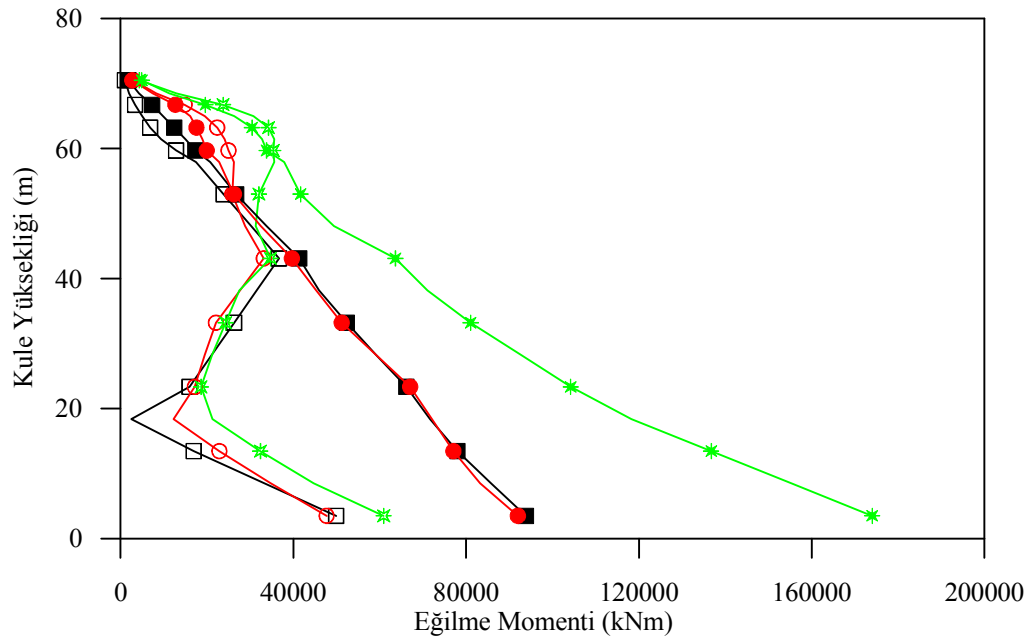
Şekil 4.42. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.43. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.44. Tabliye toplam eğilme moment değişimi



Şekil 4.45. Jino Kulesi toplam eğilme moment değişimi

### 4.3. Homojen zeminlerde deprem hareketi değişim bileşenlerinin etkisinin incelenmesi

Bu bölümde kablolu köprünün inşa edildiği zemin ortamının köprü açıklığı boyunca homojen olduğu kabul edilerek, değişerek yayılan yer hareketi etkisi için dinamik analiz yapılmaktadır. Bu amaçla zemin ortamının homojen olduğu kabul edilerek, aşağıda belirtilen, üç farklı zemin sınıfı için analizler yapılmıştır.

- 1- B zemin sınıfı
- 2- C zemin sınıfı
- 3- D zemin sınıfı

Zemin ortamının homojen olması durumunda mesnet noktaları arasındaki yer hareket ivmesi karşıt spektral yoğunluk fonksiyonu Eş. 3.1 ile ifade edilmiştir. Eş. 3.7 ile yazılan uygunluk fonksiyonunda zemin etkisini gösteren  $\gamma_{lm}(w)^2$  terimi zemin homojen olduğu için birim olacaktır. Bu bölümde deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin beraber dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketlerinin üst yapıya uygulanmasıyla elde edilen yapısal tepkiler, yapı–zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlarda ayrı ayrı incelenecektir. Bu amaçla aşağıda belirtilen durumlar için dinamik analizler yapılacaktır.

1. Durum: Üniform yer hareketine karşılık gelmektedir. Köprü sisteminin mesnetleri aynı yer hareketine maruz kalırken, yer hareketinin sonsuz hızla yayıldığı düşünölmektedir.
2. Durum: Sadece dalga yayılma etkisi dikkate alınmaktadır. Bu durumda l ve m mesnet noktaları arasındaki yer hareketleri arasında tam bir korelasyon olduğu kabul edilmektedir. Başka bir ifade ile yer hareketi yayılması esnasında sayısız yansıma ve kırılmadan geçmesine rağmen, farklı mesnet noktalarındaki yer hareketlerinin aynı olduğu düşünölmektedir. Ancak deprem hareketinin sonlu yayılma hızı ile deprem hareketinin mesnetlere ulaşma zamanı aynı olmayacaktır.

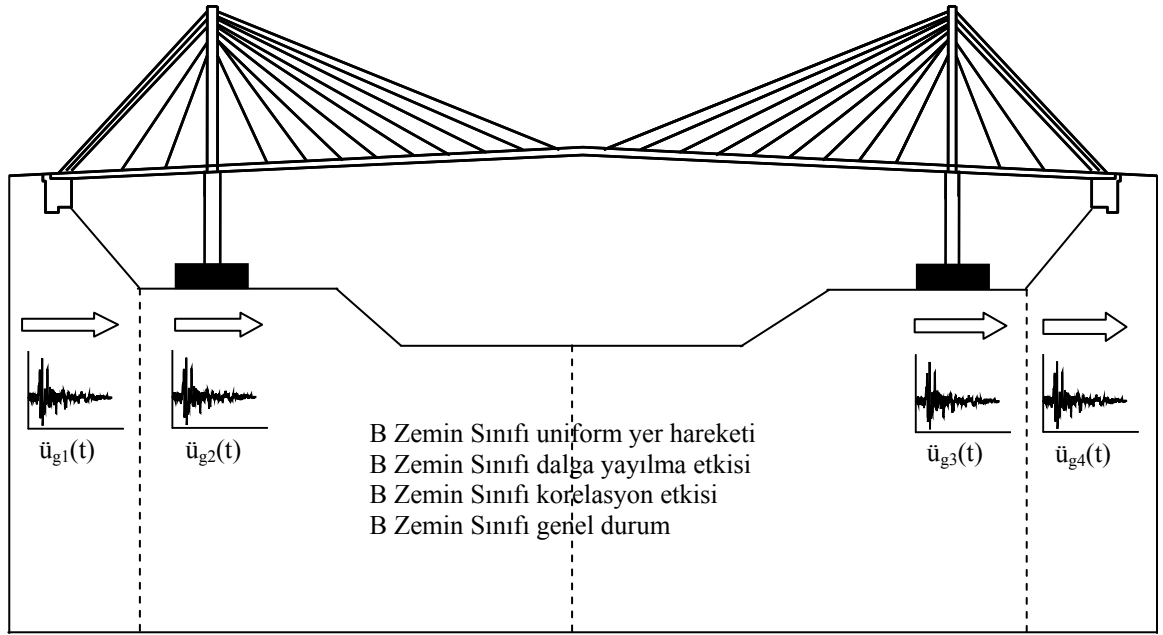
3. Durum: Sadece korelasyon etkisi dikkate alınmaktadır. Bu durumda yer hareketinin sonsuz hızla yayıldığı kabul edilirken, mesnetlerdeki yer hareketleri arasında korelasyon etkisinin olduğu düşünülmektedir.
4. Durum: Deprem hareketinin dalga yayılma ve korelasyon etkisinin birlikte dikkate alındığı durum.

Deprem hareketinin Jindo Adasındaki mesnet noktasından ana kıtadaki mesnet noktasına doğru yayıldığı kabul edilmektedir. Davranış spektrumu ile uyumlu yer hareket ivmesi oluşturulurken sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri için EC8’de tanımlanan B, C ve D türü zemin sınıf özellikleri dikkate alınmıştır.

Çalışma boyunca yer hareketi elde edilirken sadece dalga yayılma etkisi dikkate alındığında (Durum 2) ‘dalga yayılma etkisi’, sadece korelasyon etkisi dikkate alındığında (Durum 3) ‘korelasyon etkisi’ ve dalga yayılma ile korelasyon etkileri beraber dikkate alındığında ‘genel durum’ olarak adlandırılacaktır.

#### **4.3.1. Homojen sert zemin ortamında deprem hareketi değişim bileşelerinin yapısal sistem davranışına etkisi**

Bu bölümde köprünün mesnetlendiği zeminin homojen sert zemin (Zemin sınıfı B) olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkilerinin beraber dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, elde edilen yapısal tepkilere ait zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler ayrı ayrı incelenmektedir.



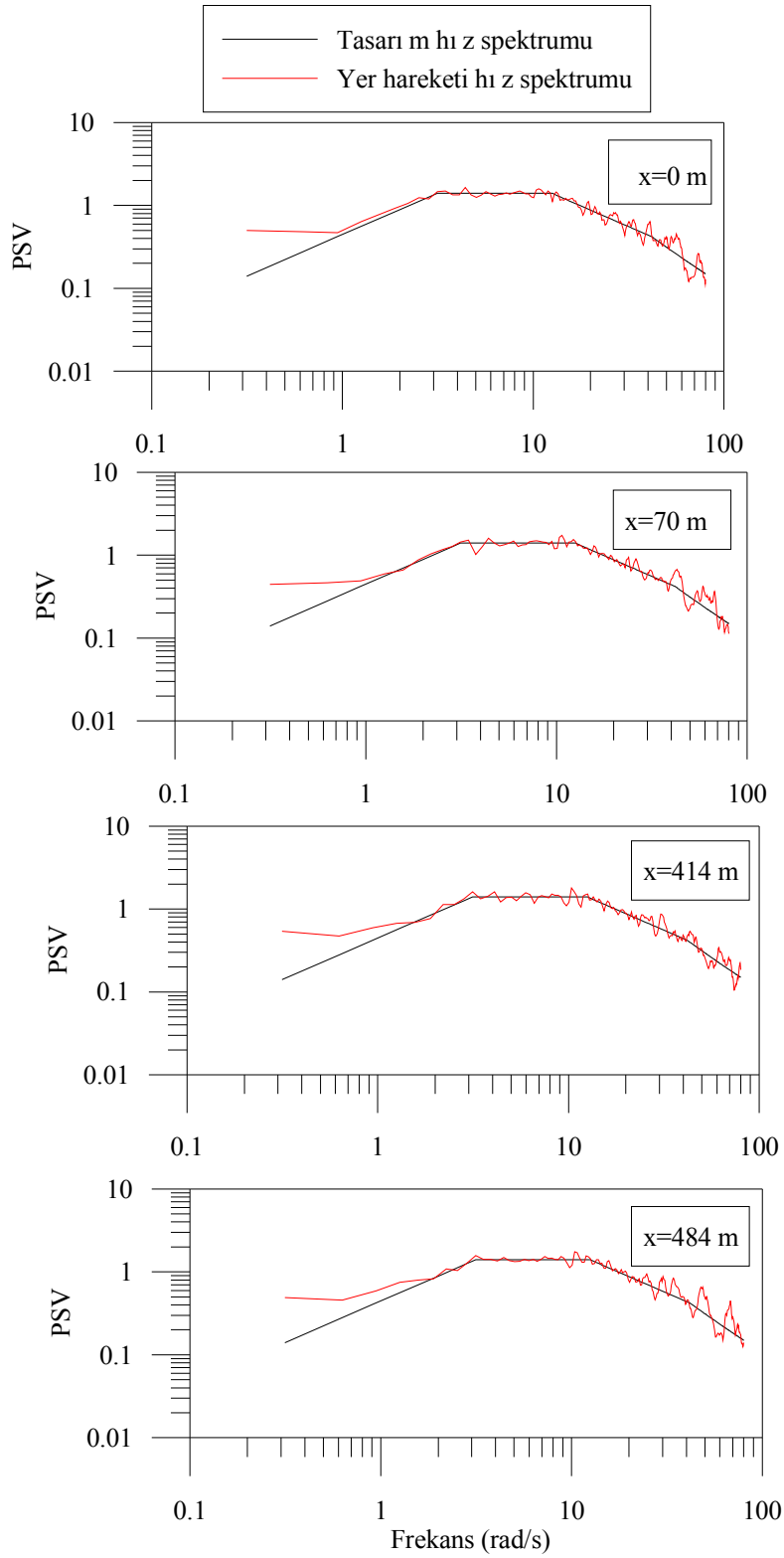
Şekil 4.46. Ünlform ve üniformalmayan yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi

Köprü mesnetlerinin homojen sert zemin ortamında (zemin sınıfı B) olması durumunda dalga yayılma ( $V_{app}=1500$  m/sn) ve korelasyon etkilerinin beraber dikkate alınması durumunda  $N=512$  terim,  $\Delta t = 0,039$  s için toplam 20 s'lik ivme kayıtları oluşturulurken aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir.

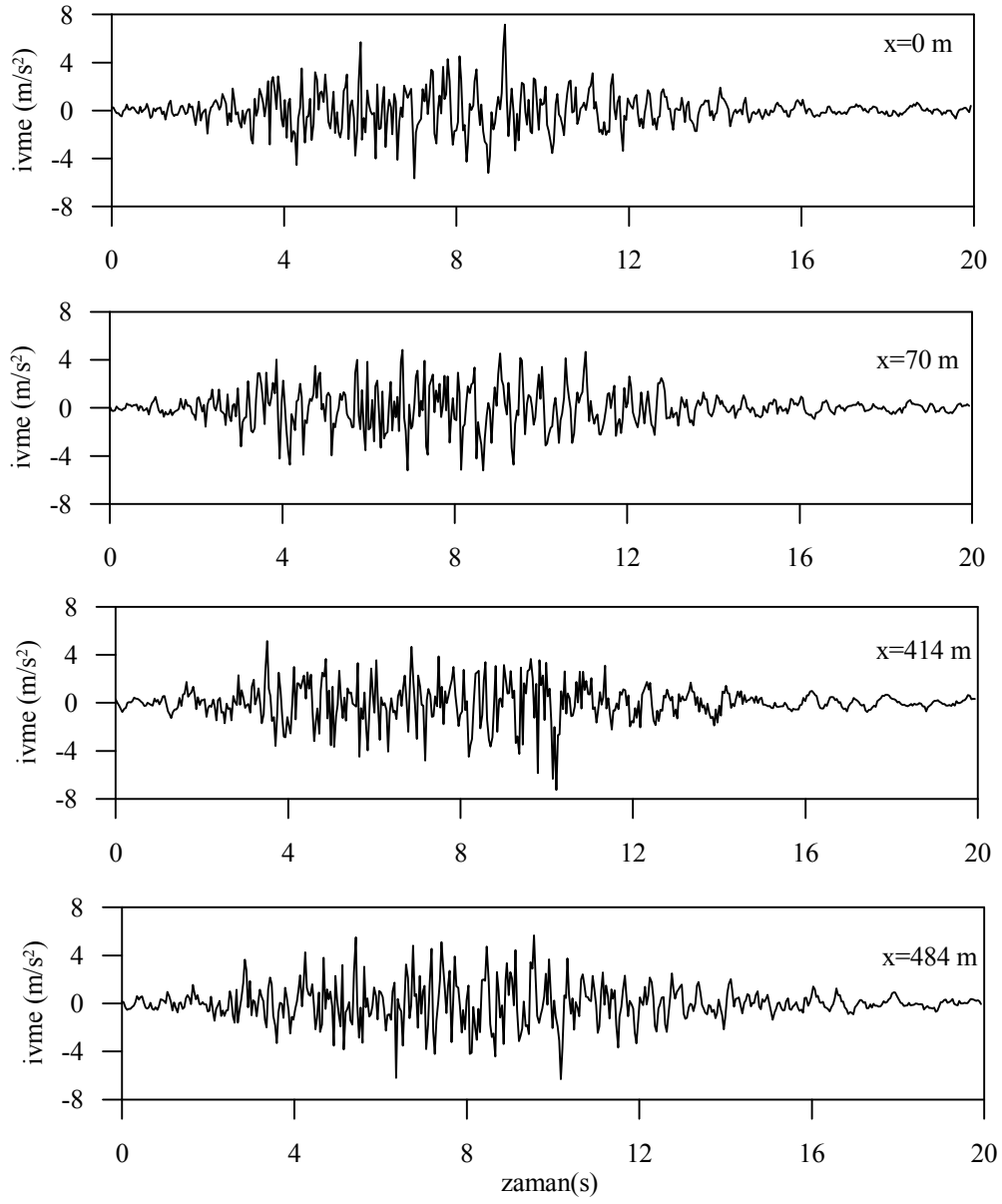
Kullanılacak yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları, Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak (Eş. 3.1) elde edilmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu için Çizelge 3.1.'de verilen filtre parametreleri kullanılmaktadır.

1. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Uygunluk fonksiyonundaki (Eş. 3.7) korelasyon modeli için Harichandran ve Vanmarcke tarafından önerilen korelasyon modeli kullanılmaktadır. Eş. 3.8'de gösterilen korelasyon modeli için amirik sabitleri için  $A=0,636$ ,  $\alpha=0,0186$ ,  $k=31200$ ,  $f_0=1,51$ Hz ve  $b=2,95$  değerleri kullanılmaktadır. Dalga yayılma etkisi ise uygunluk fonksiyonunda Eş. 3.10 ile dikkate alınmaktadır.

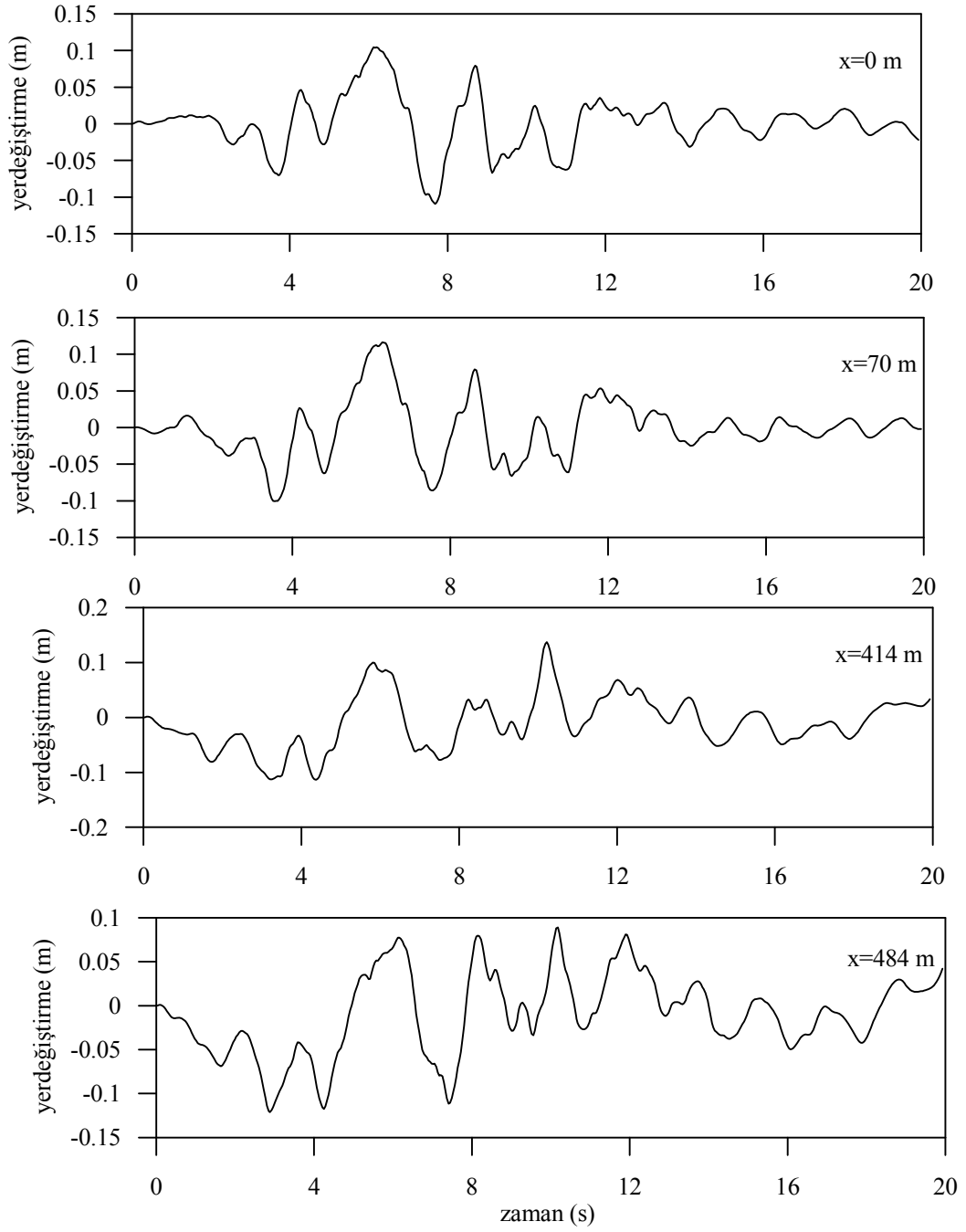
2. Deprem hareketi stasyoner olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyoner olmayan yer hareket ivmeleri, stasyoner olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılmasından elde edilmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydı Eş. 3. 22 ile gösterilen şekil fonksiyonu ile çarpılmaktadır.
3. Elde edilen ivme kayıtları %2 sönüm oranı için ve 0,5g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle EC8 ile uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Şekil 4.47'de B zemin sınıfı için genel durum etkisinde elde edilen yer hareketi hız spektrumu ile EC8 tasarım hız spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir.
4. Elde edilen ivme kayıtlarına Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 4.48-49'da genel durumda B zemin sınıfı için elde edilen yer hareketine ait eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.47. Sert zemin ortamında genel durum için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması



Şekil 4.48. Genel durum için homojen sert zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri



Şekil 4.49. Genel durum için homojen sert zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme zaman grafikleri

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre durumda deprem hareketi değişim bileşenlerinin sert zemin ortamında incelenmesi

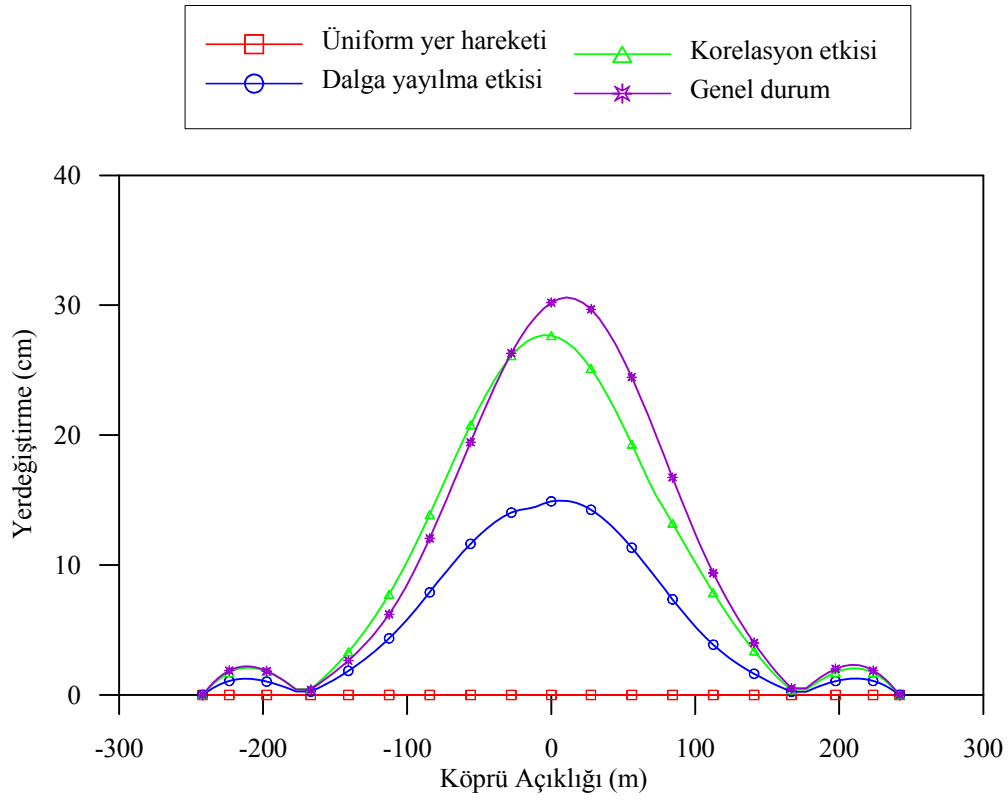
Bu bölümde köprünün mesnetlendiği zeminin B zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait yapısal tepkiler için zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler ayrı ayrı incelenecektir.

Gerek yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği, gerekse dikkate alındığı her iki model için de zahiri-statik yapısal tepkiler birbirine eşit olacaktır. Bu bağlamda tabliye ve Jindo kulesi için hesaplanan yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri dikkate alınan analiz durumları için Şekil 4.50-53'te karşılaştırılmaktadır. Üniform yer hareketi durumunda rijit cisim hareketi söz konusu olacağından, zahiri-statik eleman kuvvetleri sıfır olarak elde edilmiştir. Bunun yanında yatay doğrultuda uygulanan yer hareketi nedeniyle tabliye düşey yerdeğiştirmeleri sıfır olurken, kule yatay yerdeğiştirmeleri kule yüksekliği boyunca sabit olmaktadır.

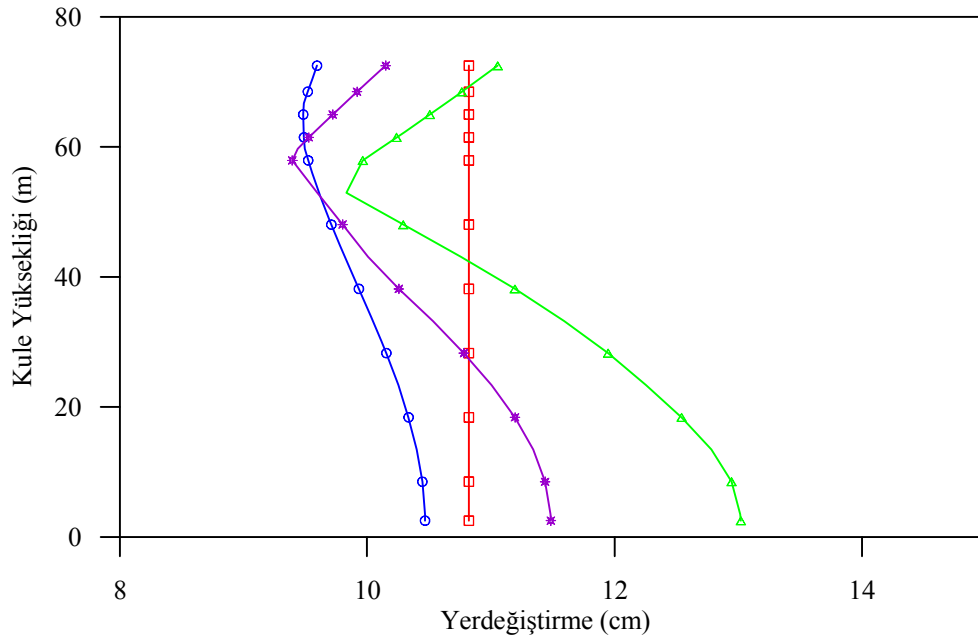
Korelasyon etkisi, dalga yayılma etkisi ve her iki etkinin birlikte dikkate alındığı analiz durumları için elde edilen zahiri-statik tepki değerlerinin incelenmesi sonucunda, genellikle dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerin en küçük olduğu görülürken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı durumdaki tepki değerleri en büyük olmaktadır. Kule yüksekliği boyunca, yatay yerdeğiştirme değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Ancak, kule tepkileri için elde edilen değişim kule yüksekliği boyunca farklılık göstermektedir. Kule yüksekliği boyunca korelasyon etkisi için en büyük tepki değerlerinin ortaya çıkabildiği gözlenmiştir.

Tabliye orta noktasında korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin dikkate alınarak belirlendiği yerdeğiştirme değeri, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin ayrı ayrı dikkate alındığı analiz durumları için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %7 ve %100 daha büyük çıkmıştır. Kule taban noktasında korelasyon etkisinin dikkate

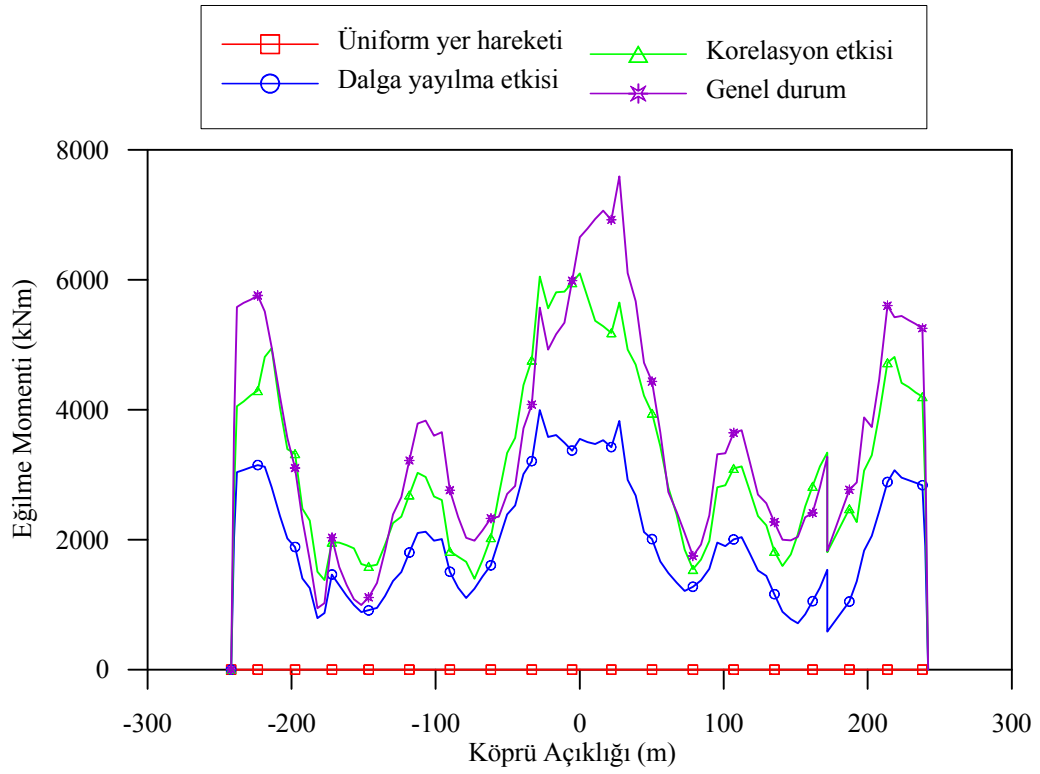
alınarak belirlendiği eğilme momenti değeri, dalga yayılma etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı durum için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %73 ve %15 daha büyük çıkmıştır.



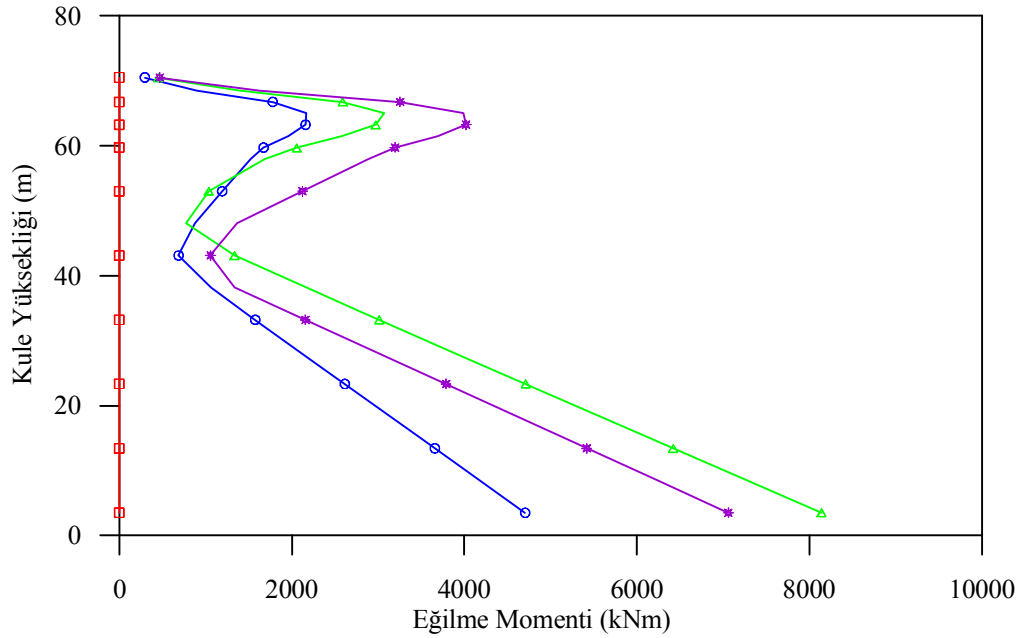
Şekil 4.50. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B)



Şekil 4.51. Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B)



Şekil 4.52. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B)



Şekil 4.53. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B)

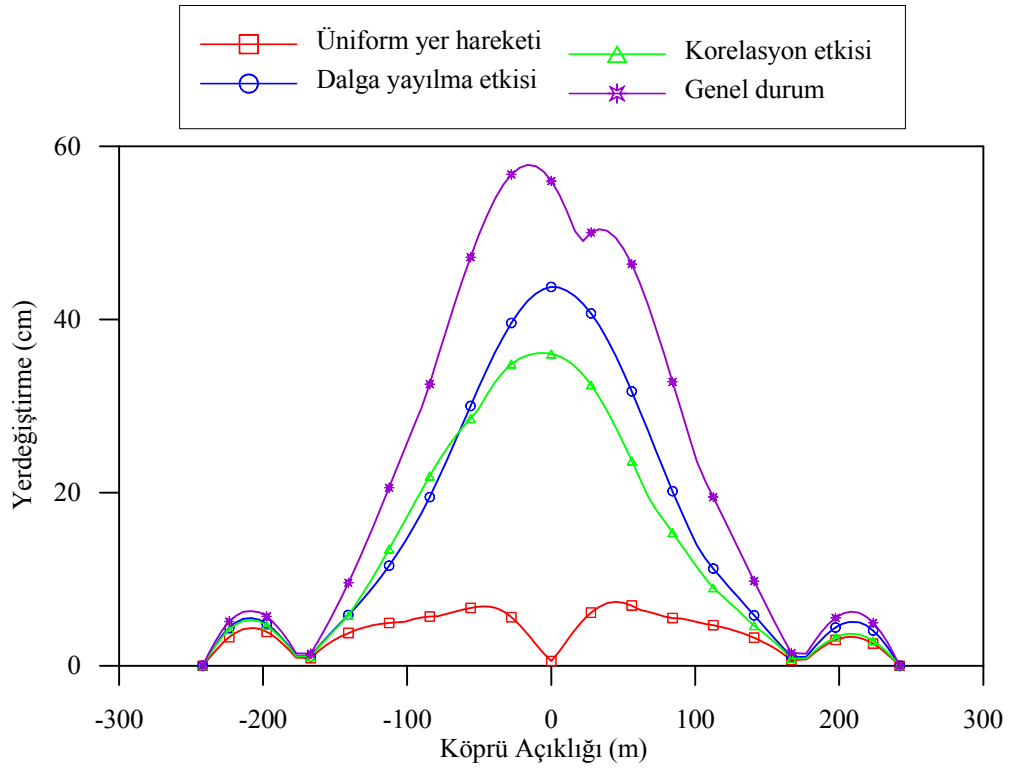
Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilerek, köprü sisteminin zemine ankastre olarak mesnetlendiği model için gerçekleştirilen analizler ile elde edilen dinamik tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.54-59'da karşılaştırılmaktadır. Genel olarak üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Ayrıca, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler genellikle korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerden büyük çıkmaktadır.

Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yerdeğiştirme değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %27 ve %56 daha büyük çıkmıştır. Bununla birlikte, kule tepe noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yatay yerdeğiştirme değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %50 ve %71 daha büyük olduğu görülmüştür. Farklı analiz durumları için kule yüksekliği boyunca belirlenen eğilme momenti değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Kule taban noktasında genel durum etkisinde elde edilen eğilme momenti değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %6 ve %5 daha büyük çıkarken, üniform yer hareketi için elde edilen momentten %1 daha büyük çıkmıştır.

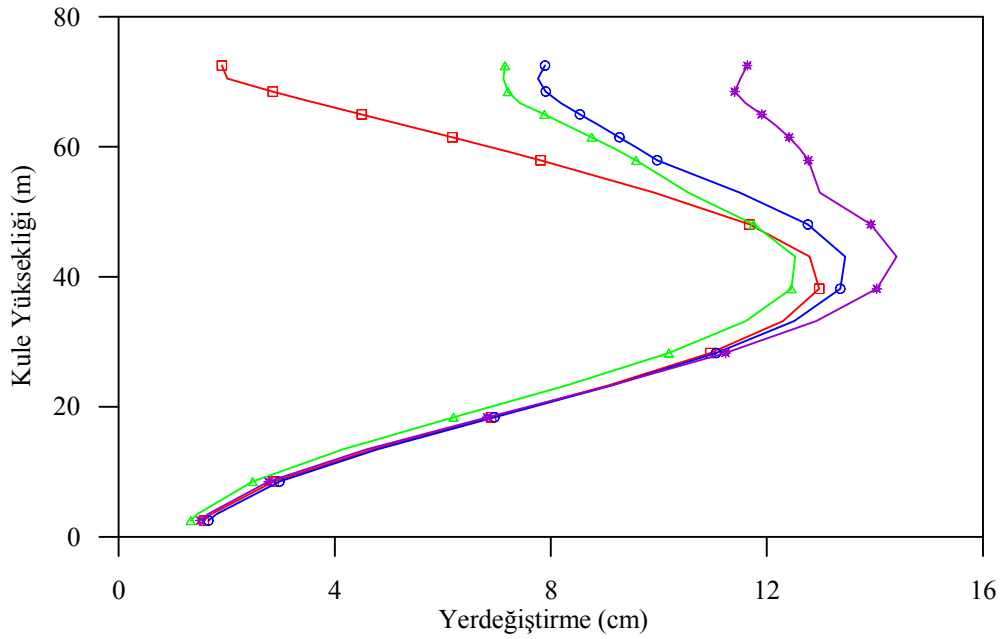
Şekil 4.58'de tabliye dinamik kesme kuvveti değişimi görülmektedir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük kesme kuvvetleri genellikle genel durum etkisi için elde edilirken, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen kesme kuvvetleri eğilme momenti grafiğinde olduğu gibi birbirine yakın bulunmuştur. En küçük kesme kuvveti değerleri ise genellikle üniform yer hareketi durumunda elde edilmiştir.

Şekil 4.59'da Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvet değişimi görülmektedir. Kule dinamik eğilme momenti grafiğinde dört durum için elde edilen moment değişimi birbirine yakın olurken, eksenel kuvvet grafiğinde genel durum için elde edilen eksenel kuvvetler diğer durumlara göre daha büyüktür. En küçük eksenel kuvvet

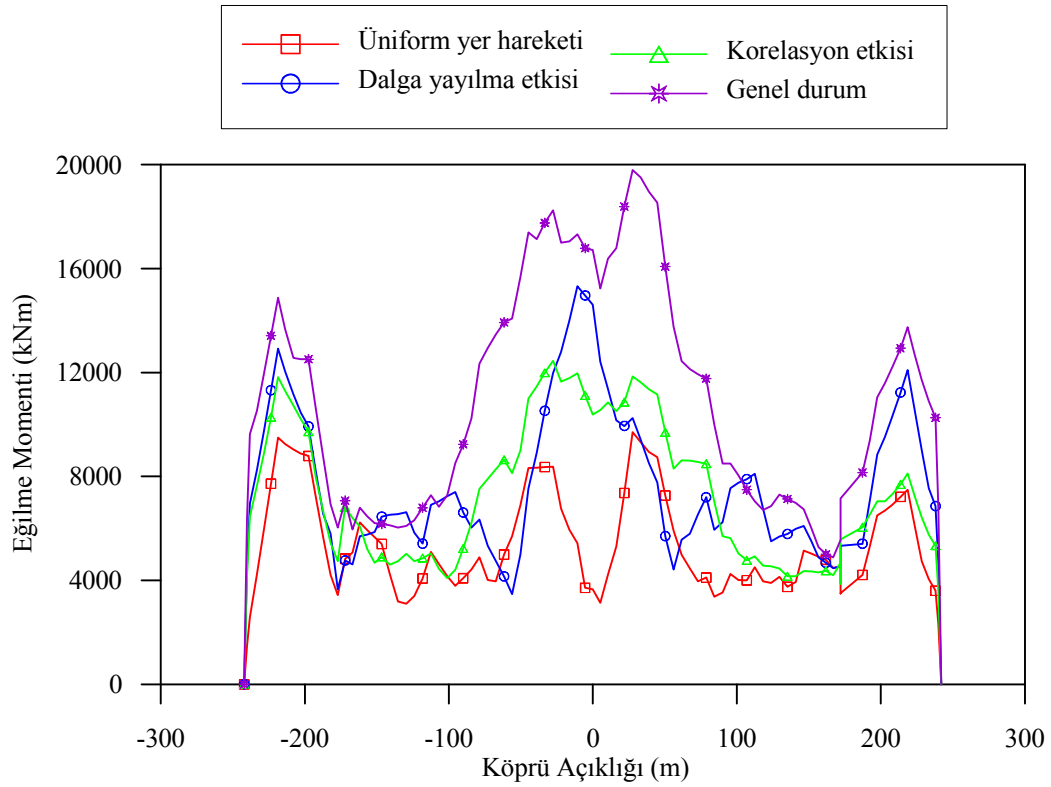
değerleri üniform yer hareketi durumunda elde edilmiştir. Dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen aksenal kuvvet değişimi birbirine yakındır. Üniform yer hareketi durumunda etkili olmayan antisimetrik modların, dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği üniform olmayan yer hareketleri için etkili olduğu burada da gözlenmektedir.



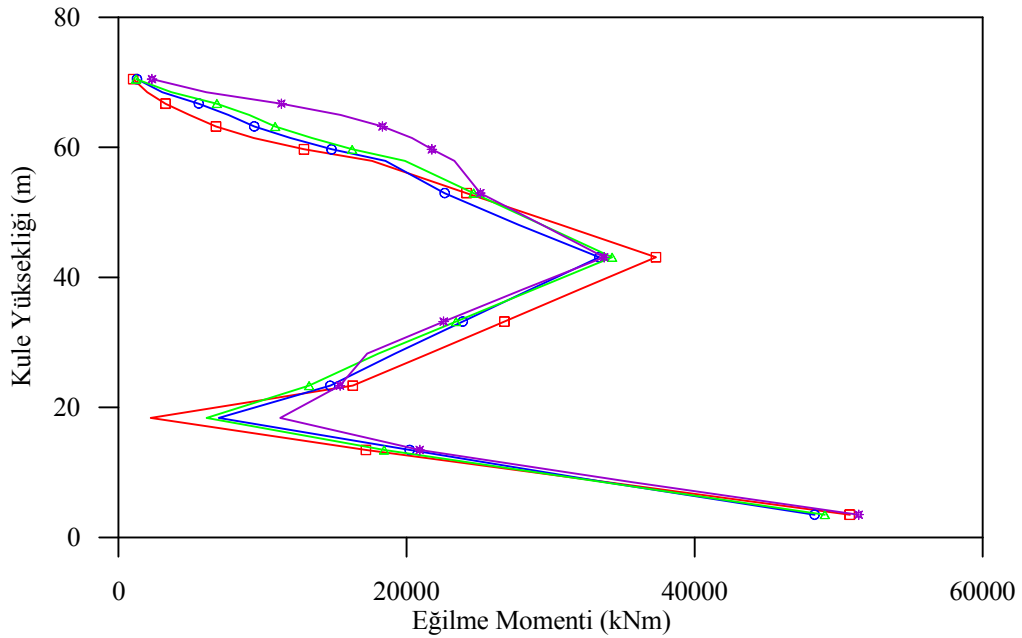
Şekil 4.54. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



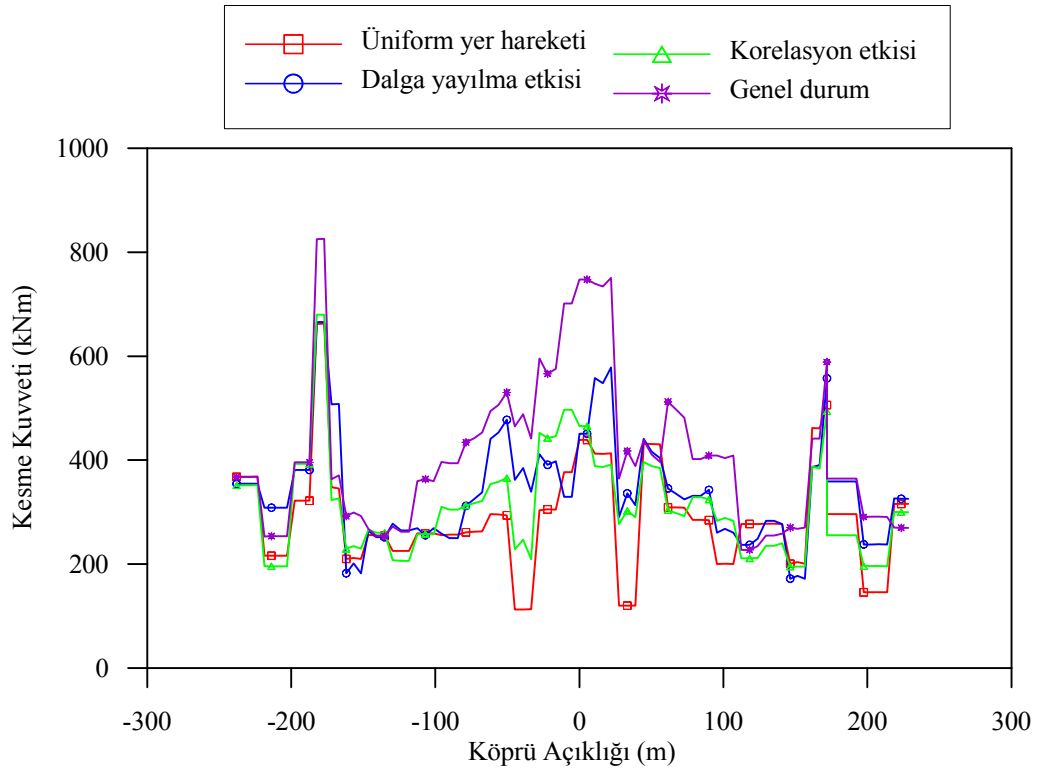
Şekil 4.55. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



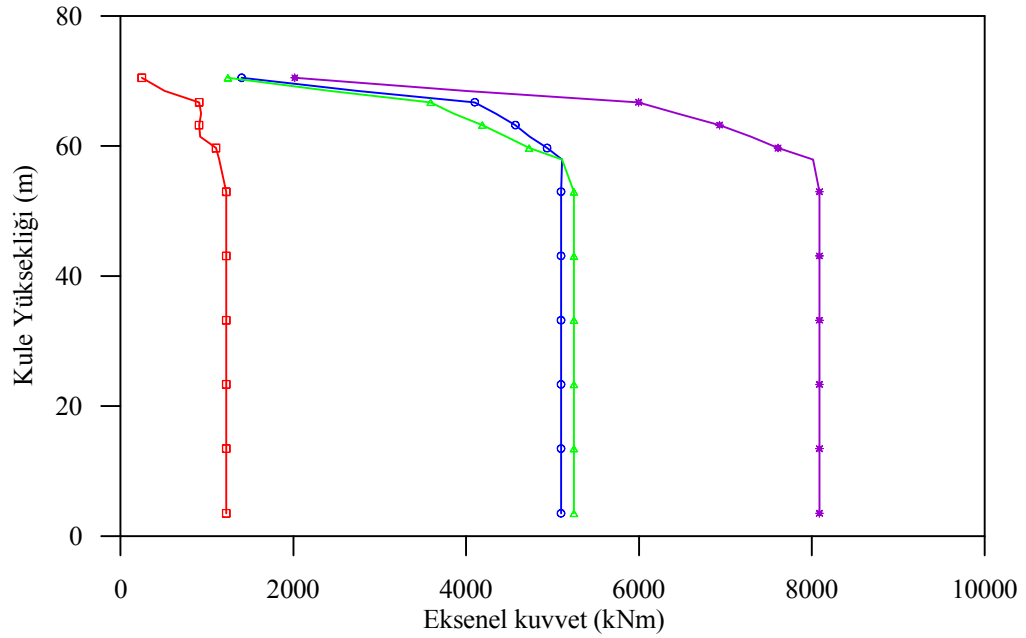
Şekil 4.56. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



Şekil 4.57. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



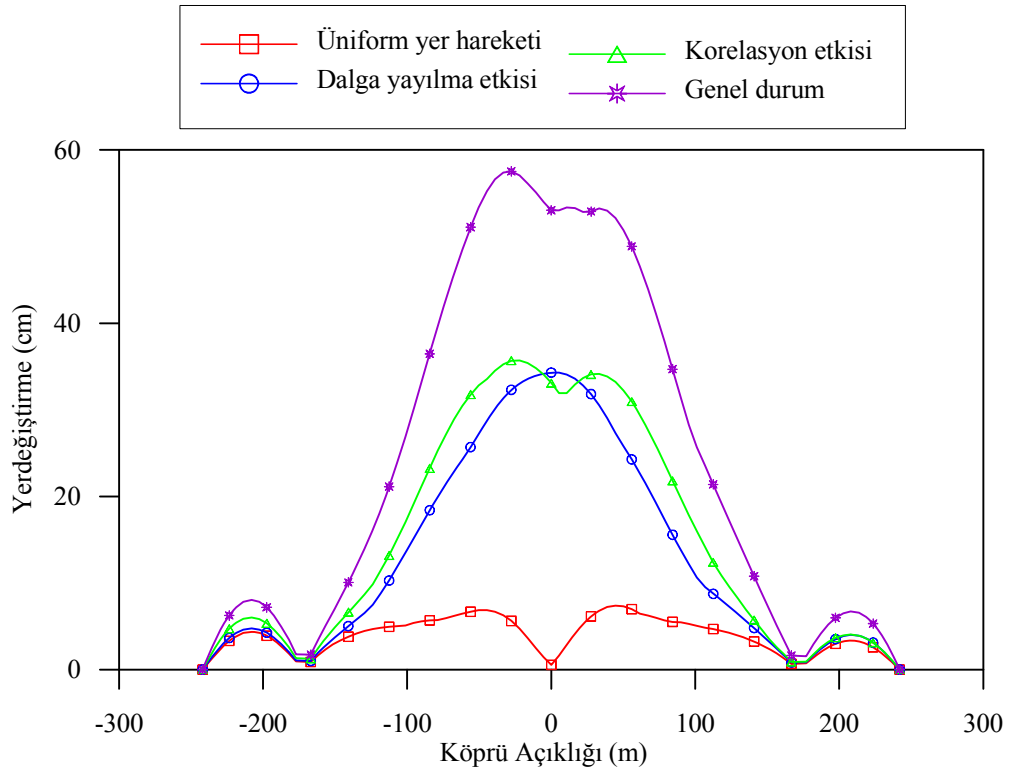
Şekil 4.58. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



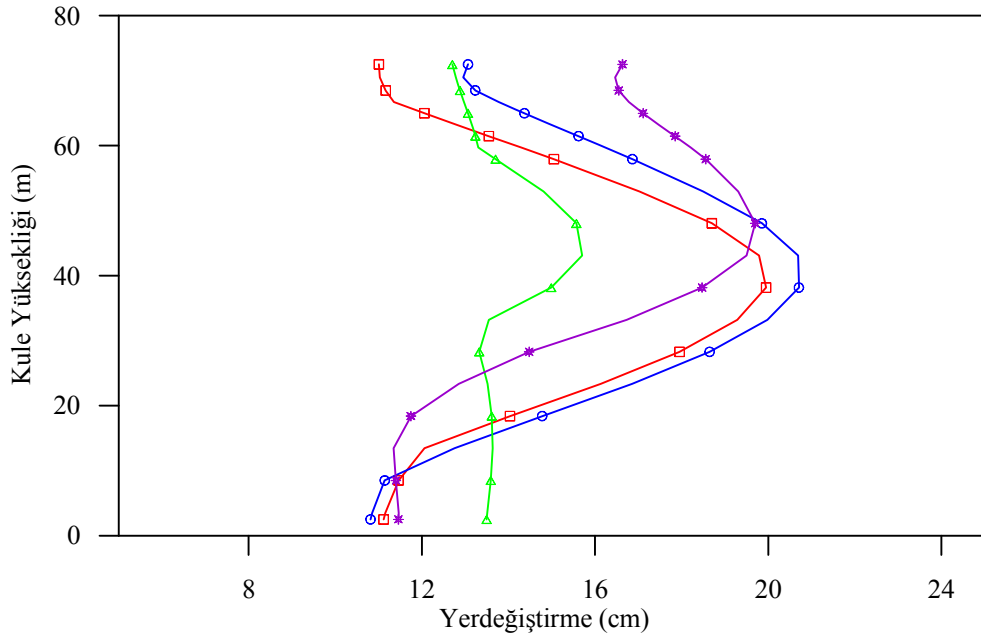
Şekil 4.59. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı B, ANKR)

Zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplamından oluşan toplam yapısal tepkiler Şekil 4.60-63'te karşılaştırılmaktadır. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiş olup, üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Ayrıca, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler genellikle korelasyon etkisi için elde edilen tepkilere yakın çıkmaktadır.

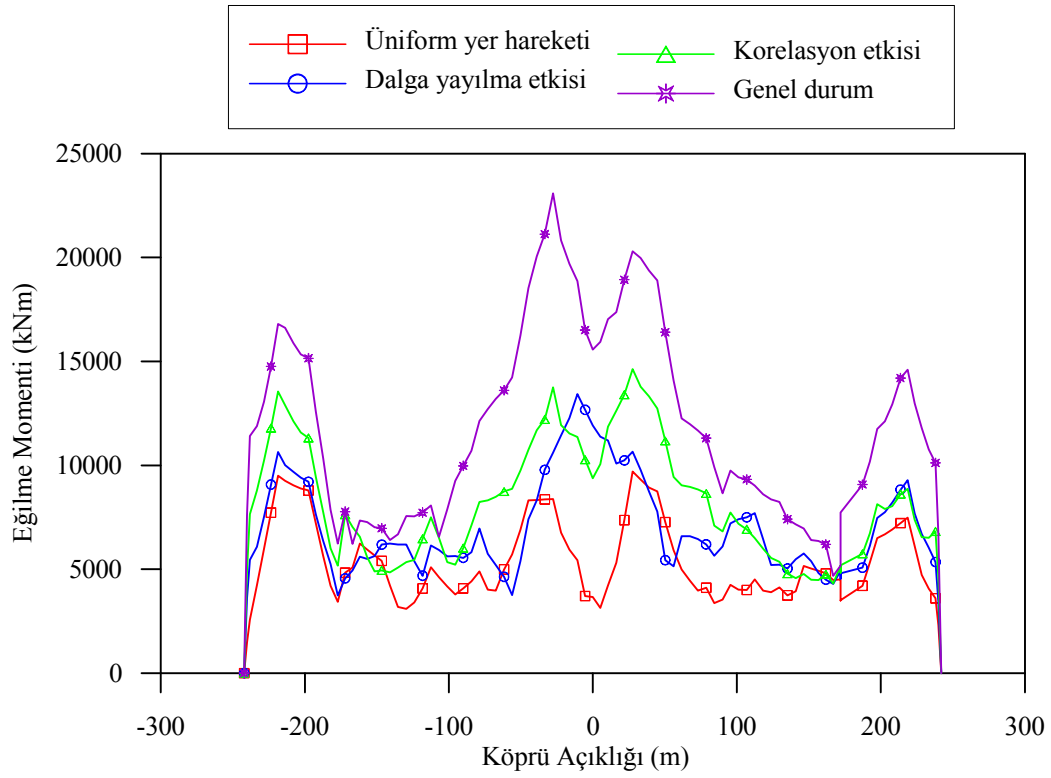
Tabliye boyunca korelasyon etkisi için belirlenen düşey yerdeğiştirme değeri, dinamik yerdeğiştirmeler için elde edilen değişimden farklı olarak zahiri-statik bileşenin etkisiyle dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirmeden az da olsa büyük çıkmıştır. Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yerdeğiştirme değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %56 ve %61 daha büyük çıkmıştır. Kule yüksekliği boyunca elde edilen yatay yerdeğiştirmeler incelendiğinde özellikle kule alt bölümünde sadece dalga yayılma etkisi için en büyük yerdeğiştirmeler gözlenirken, kule üst bölümünde genel durumda elde edilen değerler en büyük çıkmıştır. Kule tepe noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yatay yerdeğiştirme değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden %31 daha büyük çıkmıştır. Tabliye orta noktası için belirlenen eğilme momentleri karşılaştırıldığında, dalga yayılma ve korelasyon etkisinin birlikte dikkate alındığı genel durum etkisinde elde edilen eğilme momenti değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %31 ve %66 daha büyük çıkmıştır. Farklı analiz durumları için kule yüksekliği boyunca belirlenen eğilme momenti değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Kule taban noktasında genel durum etkisi için elde edilen eğilme momenti değeri, sadece dalga yayılma ve sadece korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %19 ve %5 daha büyük çıkarken, üniform yer hareketi için elde edilen momentten %14 daha büyük çıkmıştır.



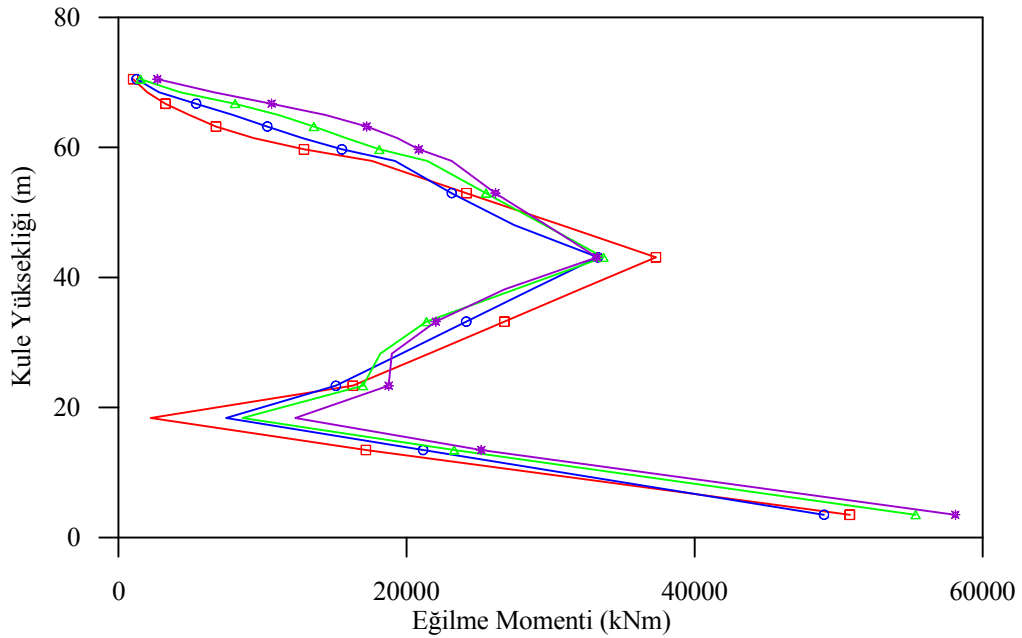
Şekil 4.60. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



Şekil 4.61. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



Şekil 4.62. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR)



Şekil 4.63. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, ANKR)

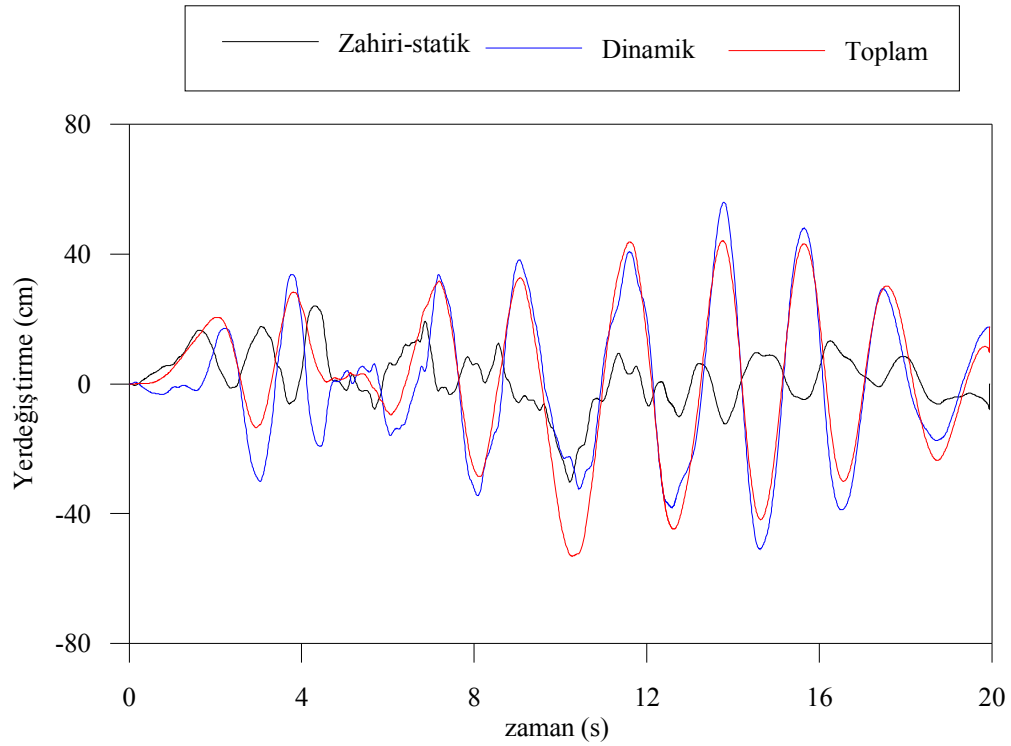
Daha önce de ifade edildiği gibi toplam tepkiler, zahiri-statik ve dinamik tepkilerin toplamından oluşmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği köprü modeli için elde edilen zahiri-statik, dinamik ve toplam tepkiler incelendiğinde, toplam tepkilere en büyük katkıyı genellikle dinamik bileşenin sağladığı anlaşılmaktadır. Toplam tepkiler, bazı durumlarda dinamik tepkilerden büyük olurken, bazı durumlarda küçük olabilmektedir. Örnek olarak genel durumda tabliye orta noktası düşey yerdeğiştirmesi için elde edilen zahiri-statik, dinamik ve toplam yerdeğiştirme zaman grafikleri Şekil 4.64'de karşılaştırılmaktadır. Burada da görüleceği üzere, toplam yerdeğiştirmeye en büyük katkıyı dinamik bileşen sağlamıştır. Ayrıca dikkat edilecek olursa, genellikle dinamik bileşen toplam yerdeğiştirmeden daha büyüktür. Dinamik bileşenin toplam tepkiden daha büyük olması, dikkate alınan t anlarındaki zahiri-statik bileşenin işaretinin dinamik bileşenin işaretinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Dikkat edilecek olursa, en büyük zahiri statik yerdeğiştirme t=10 saniyede 30 cm olurken, en büyük dinamik yerdeğiştirme t=14 saniyede 56 cm ve en büyük toplam yerdeğiştirme t=10 saniyede 53 cm olarak ortaya çıkmıştır. Tabliye ve kulede yerdeğiştirme ve eleman kuvvetler için çizilen grafikler mutlak maksimum tepkiler için çizildiğinden, burada gözlenen maksimum tepki değerleri ayrıca Şekil 4.50, Şekil 4.54 ve Şekil 4.60'da sırasıyla 30 cm, 56 cm ve 53 cm olarak görülmektedir.

Şekil 4.65'te genel durum için kule tepe noktası için elde edilen zahiri-statik, dinamik ve toplam yerdeğiştirme-zaman değişimleri karşılaştırılmaktadır. Genel durum için, tabliye orta noktası için elde edilen düşey yerdeğiştirme-zaman değişiminden farklı olarak zahiri-statik tepki bileşenin toplam yerdeğiştirmeye katkısının daha fazla olduğu görülmektedir. Esnek olan tabliyeye oranla daha rijit olan kulede, zahiri-statik tepki bileşenin toplam tepkiye önemli katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

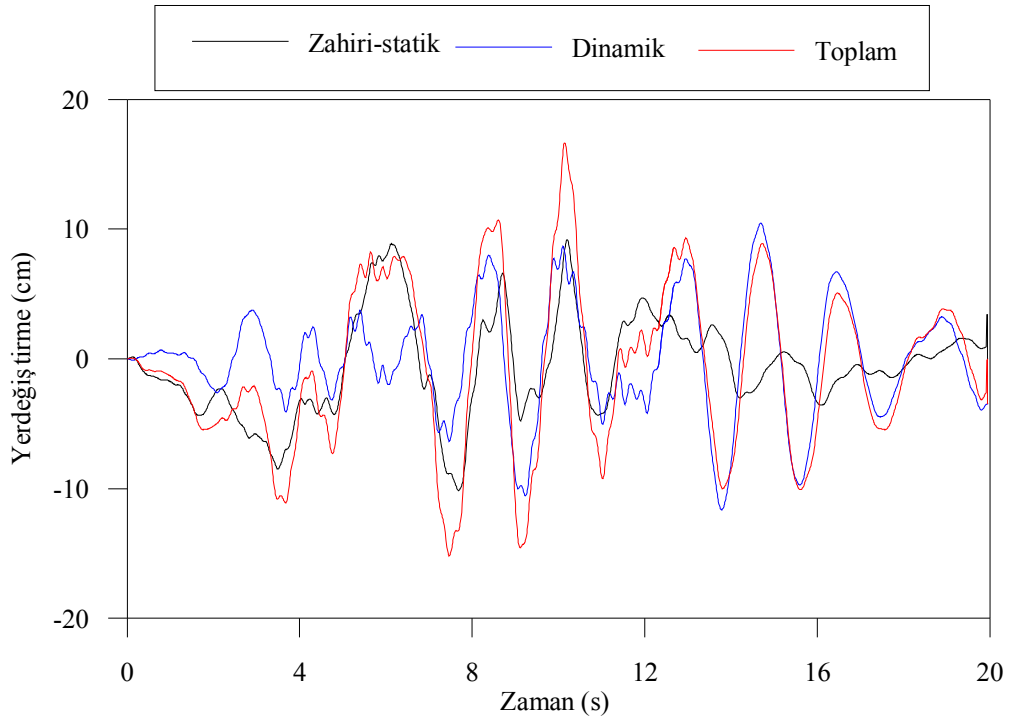
Bunun yanında, köprü sistemine ait daha rijit bir bölüm olan kule alt bölümüne ait bir noktanın yerdeğiştirme-zaman değişimi, zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler cinsinden Şekil 4.66'da verilmektedir. Görüleceği gibi, oldukça rijit olan bu köprü

bölümünde toplam yerdeğıştirmeler tamamen zahiri-statik bileşenden oluşurken, dinamik bileşenin neredeyse hiçbir katkısı olmamaktadır.

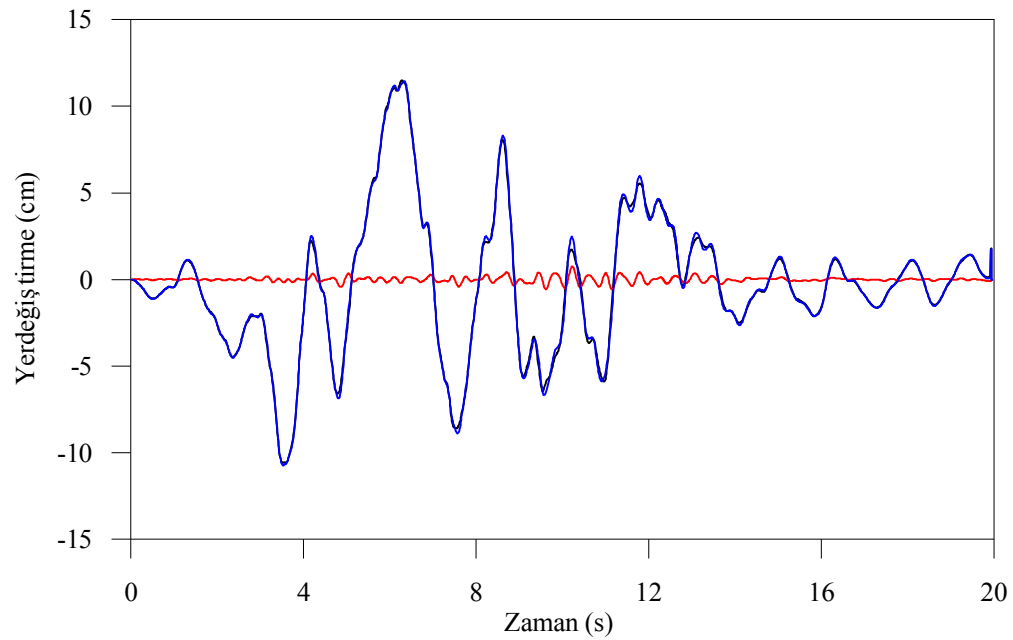
Dolayısıyla, esnek olan köprü bölümlerinde dinamik bileşenin etkisi öne çıkarken, rijit olan köprü bölümlerinde zahiri-statik bileşenin etkisi öne çıkmaktadır.



Şekil 4.64. Tabliye orta noktası düşey yerdeğıştirme-zaman bileşenlerinin değışim grafiğı (ANKR)



Şekil 4.65. Kule tepe noktası yatay yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (ANKR)



Şekil 4.66. Kule alt bölümündeki bir düğüm noktasına yatay yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (ANKR)

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin sert zemin ortamında incelenmesi

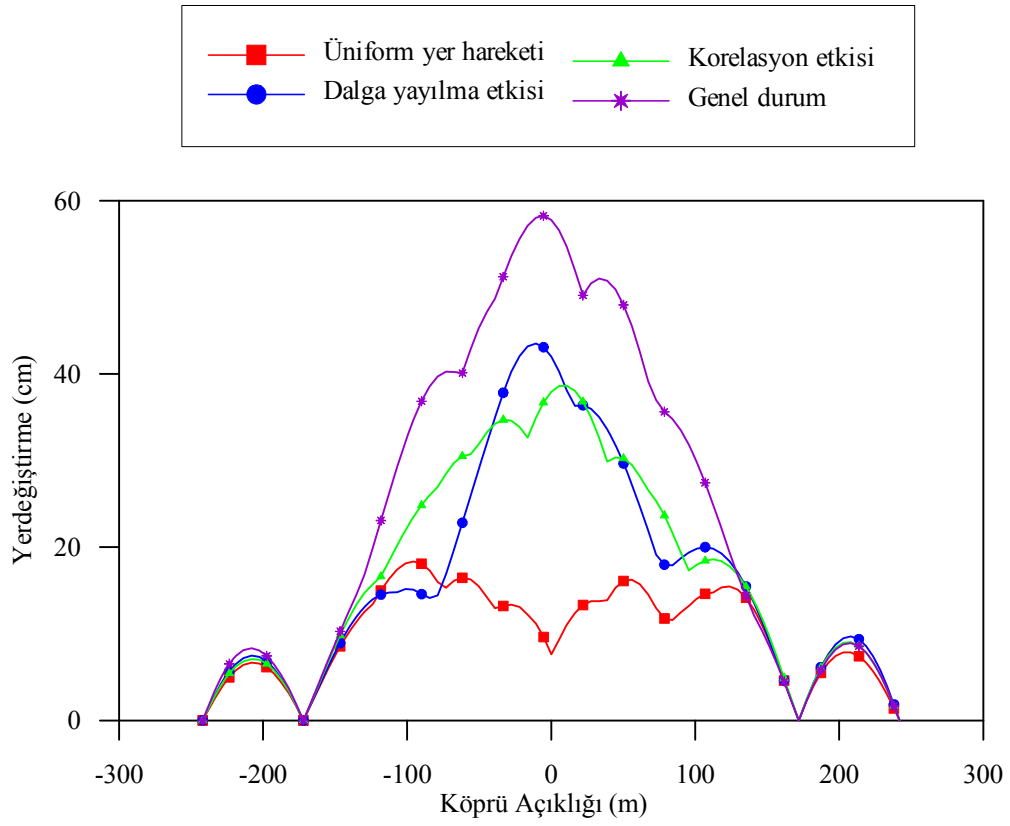
Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda homojen sert zemin ortamında (Zemin sınıfı B) mesnetlenmiş üst yapı için dinamik analiz sonuçları incelenmektedir. Köprü mesnetleri altındaki zeminin B zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkisinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait dinamik ve toplam tepki bileşenleri karşılaştırılmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerine ait grafikler, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda elde edilen grafiklerle aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir. Dalga yayılma etkisi için yer hareketi yayılma hızı  $V_{app}=1500$  m/s olarak dikkate alınmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler ile elde edilen tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.67-72'de karşılaştırılmaktadır. Ankastre model için elde edilen değişime benzer şekilde, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak belirlenen tepki değerleri için en büyük tepki değerleri genellikle dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durumda ortaya çıkarken, en küçük tepki değerleri daha çok üniform yer hareketi durumunda gözlenmektedir. Kule yüksekliğinin ilk bölümünde dalga yayılma etkisi için elde edilen yatay yerdeğiştirmeler daha büyük olurken, bu bölümü takip eden noktalarda genel durumda bulunan yatay yerdeğiştirmeler en büyük olmuştur. Kule yüksekliğinin ilk bölümünde üniform yer hareket için elde edilen yerdeğiştirmelerin genel durumda elde edilen yerdeğiştirmelerden büyük çıkması dikkat çekicidir.

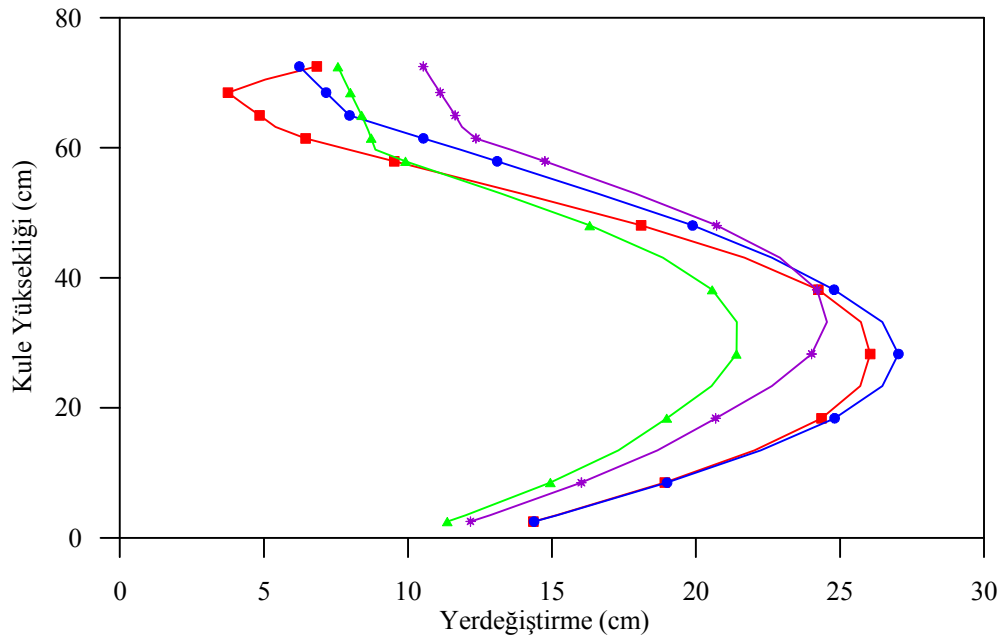
Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği düşey yerdeğiştirme değeri, sadece korelasyon ve sadece dalga yayılma etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %53 ve %38 daha büyük çıkmıştır. Kule tepe noktasında genel durum için elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma, korelasyon ve üniform yer hareketi için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %83 %38 ve %57 daha büyük çıkmıştır.

Şekil 4.69-70’de tabliye ve kulede elde edilen eğilme momenti değişimi grafikleri görülmektedir. Tabliye eğilme momenti değişim incelendiğinde köprü açıklığı boyunca en büyük eğilme momentinin genellikle genel durum için elde edildiği görülmektedir. Tabliye orta noktasında genel durum için elde edilen eğilme momenti değeri korelasyon etkisi için elde edilen moment değerinden %29, dalga yayılma etkisi için elde edilen moment değerinden %17 ve üniform yer hareketi etkisi için elde edilen moment değerinden %79 daha büyük olarak elde edilmiştir.

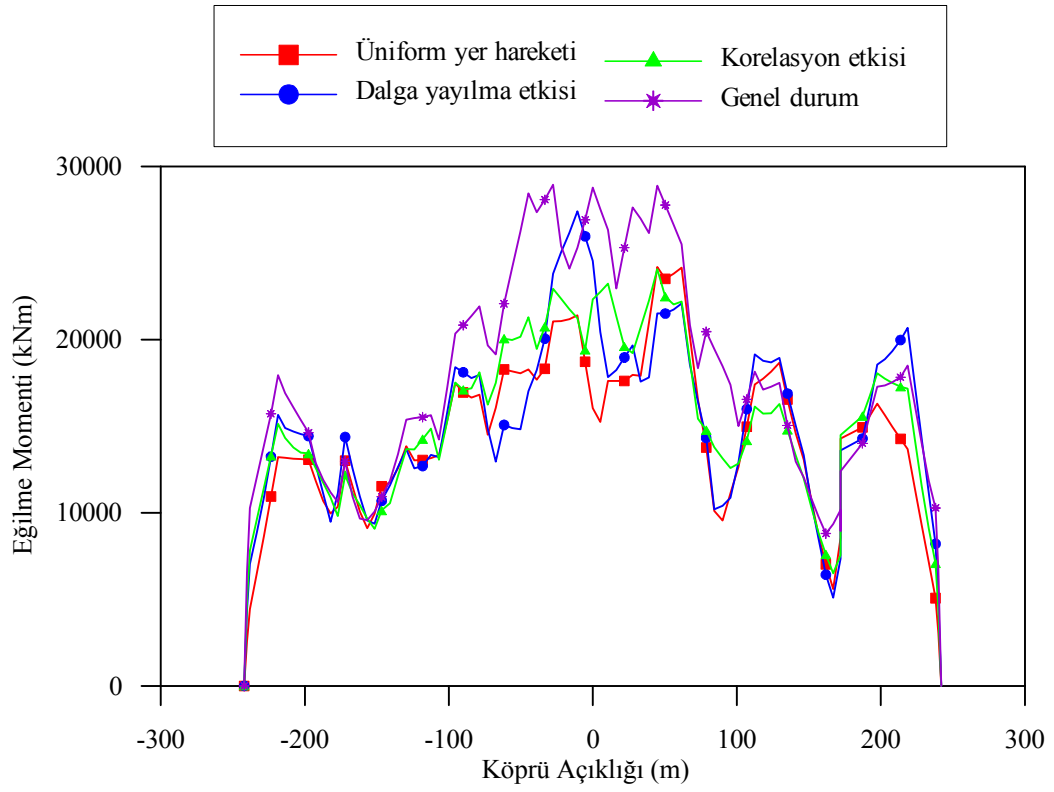
Kule eğilme momentleri için ise kule yatay yerdeğiştirme grafiğindeki benzer bir değişim görülmektedir. Üniform yer hareketi ve sadece dalga yayılma etkisinde elde edilen moment değerleri birbirine yakın ve kule yüksekliğinin ilk bölümünde en büyük iken kule tepe noktasına yaklaştıkça genel durum için elde edilen moment değerleri en büyük olmaktadır.



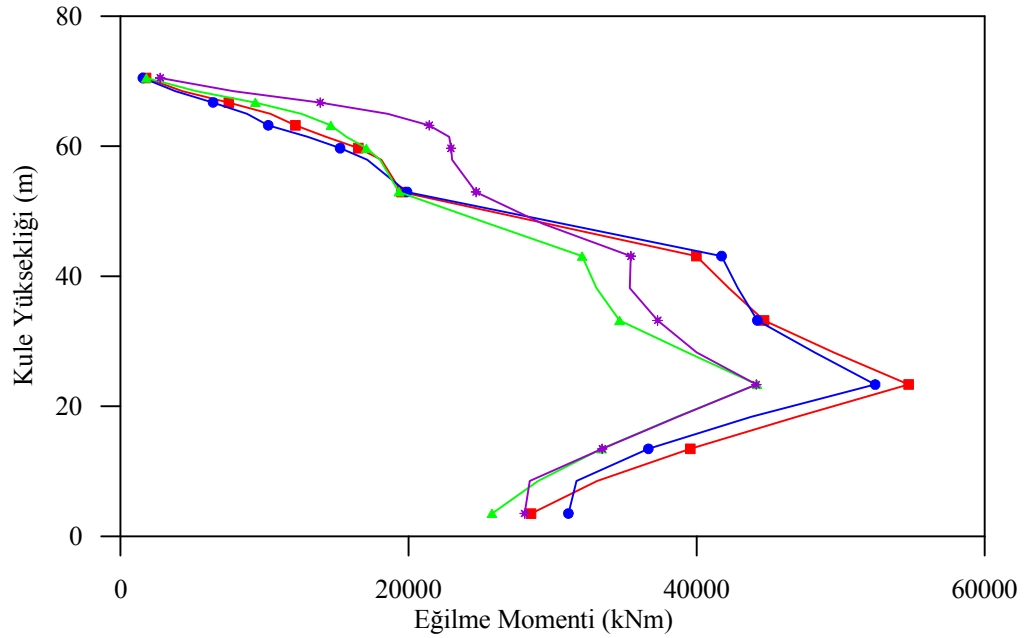
Şekil 4.67. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE)



Şekil 4.68. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE)



Şekil 4.69. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE)

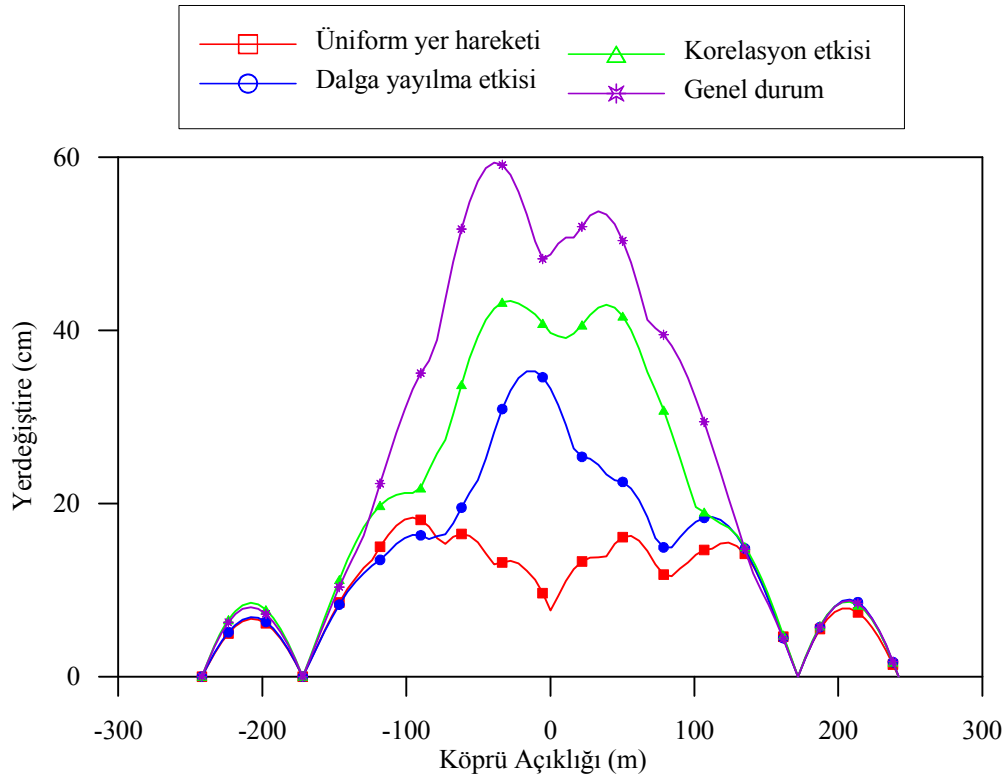


Şekil 4.70. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE)

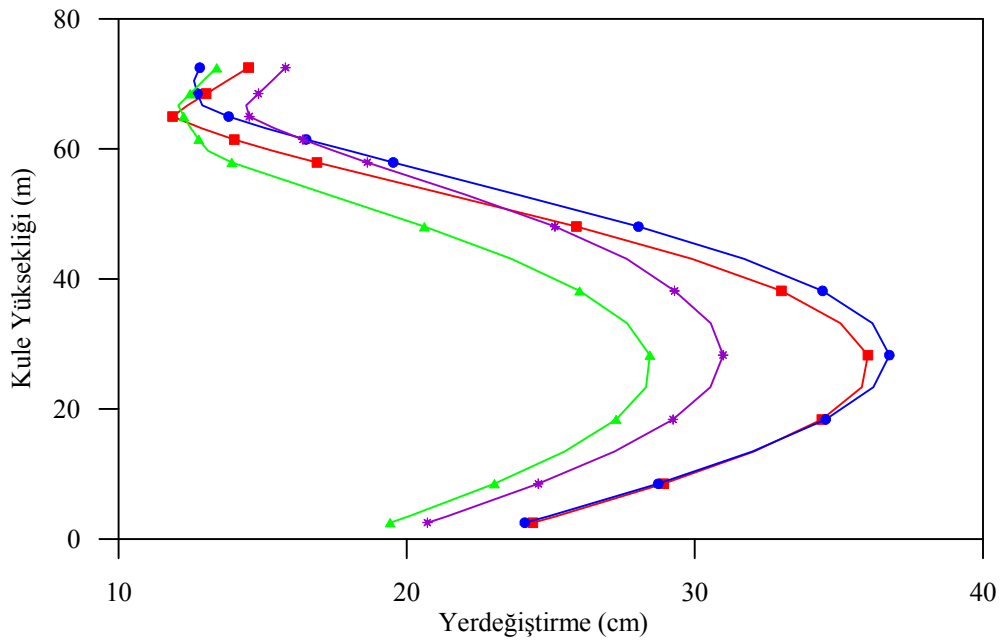
Zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplamından oluşan toplam yapısal tepkiler Şekil 4.71-74'te karşılaştırılmaktadır. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiş olup, üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen tepkiler genellikle en büyük olmaktadır. Ayrıca, korelasyon etkisi için elde edilen tepkiler bazı durumlarda dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerden büyük çıkarken, bazı durumlarda da küçük çıkmaktadır.

Tabliye boyunca korelasyon etkisi için belirlenen düşey yerdeğiştirme değerleri, zahiri-statik bileşenin katkısıyla dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirmelerden belirgin şekilde daha büyük çıkmıştır. Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği düşey yerdeğiştirme değeri, sadece korelasyon ve sadece dalga yayılma etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %23 ve %49 daha büyük çıkarken, üniform yer hareketi için elde edilen yerdeğiştirmeden %513 daha büyük çıkmıştır.

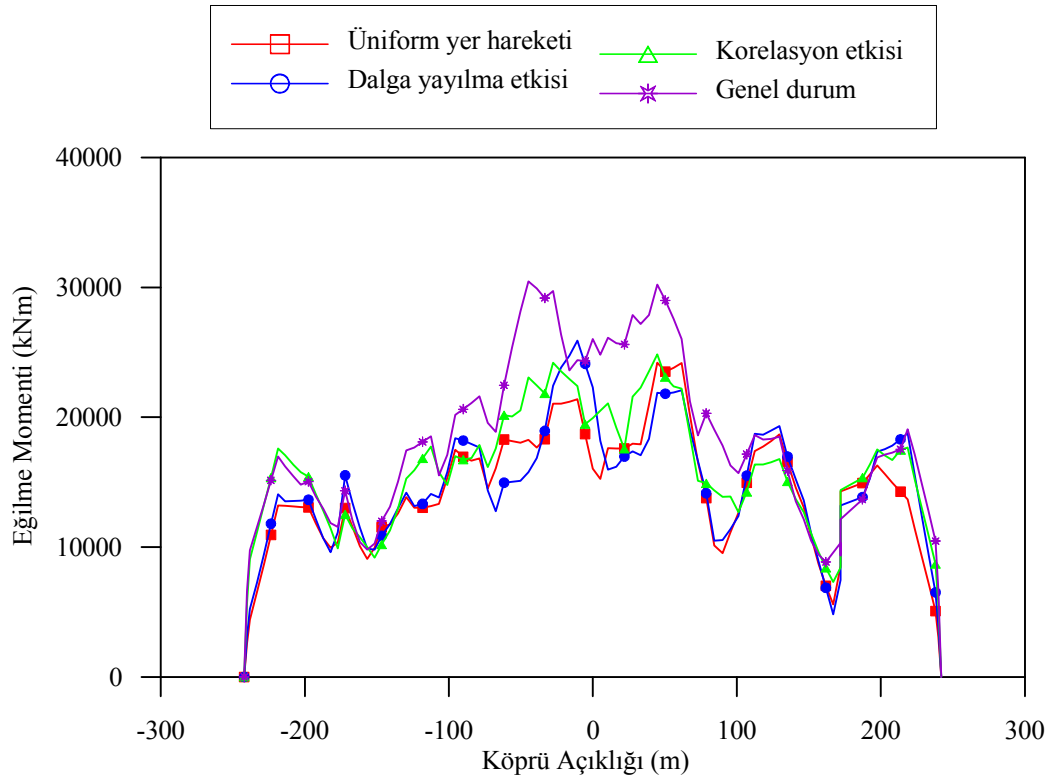
Kule yüksekliğinin büyük bölümünde dalga yayılma etkisi için elde edilen yatay yerdeğiştirmeler en büyük olurken, kule tepe noktasında genel durum için belirlenen yerdeğiştirmeler en büyük çıkmıştır. Kule tepe noktasında genel durum için elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri, korelasyon, dalga yayılma ve üniform yer hareketi için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %23, %23 ve %7 daha büyük çıkmıştır. Kule dinamik eğilme momenti grafiğinde olduğu gibi, kule yüksekliğinin ilk bölümünde üniform yer hareketi ve dalga yayılma etkileri için elde edilen eğilme momenti değerleri en büyük, kule yüksekliğinin sonuna doğru ise genel durum etkisinde elde edilen moment değerleri en büyük çıkmaktadır.



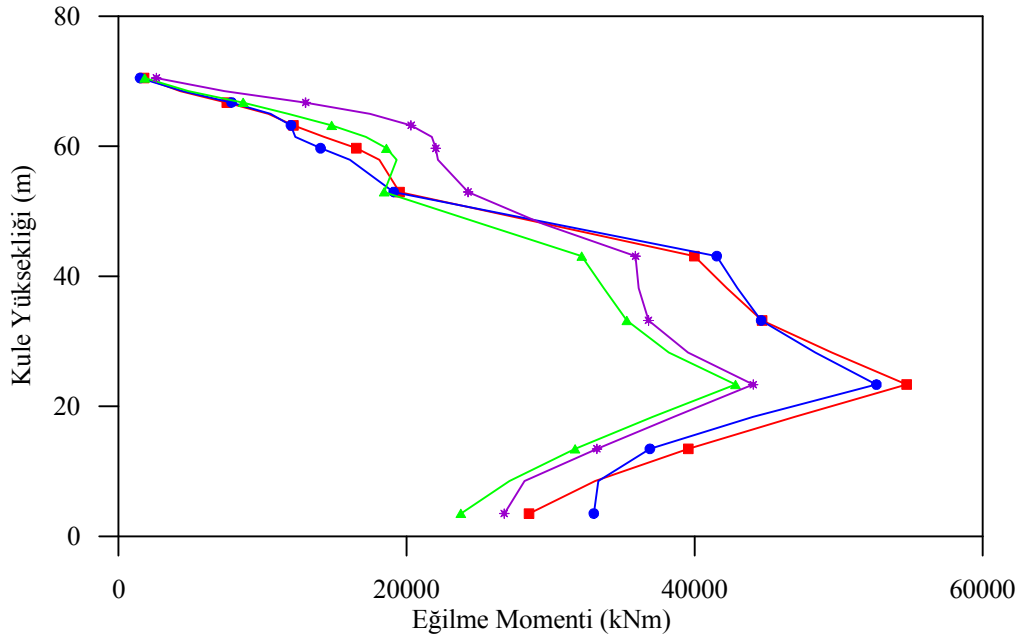
Şekil 4.71. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE)



Şekil 4.72. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı B, YZE)



Şekil 4.73. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE)



Şekil 4.74. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı B, YZE)

Yapı-zemin etkileşiminin üst yapı dinamik davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla, yapı-zemin etkileşiminin analize dahil edilmesi ve ihmal edilmesi durumunda toplam yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Köprü tabliyesinde elde edilen düşey yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modeller için Şekil 4.75-76'da karşılaştırılmaktadır. Şekillerde görüldüğü gibi yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model için elde edilen tepki değerleri, genellikle yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen tepki değerlerinden büyük çıkmıştır. Tabliyede elde edilen tepki değerleri irdelendiğinde, tabliye için yapı-zemin etkileşiminden daha çok yer hareketi değişim bileşenlerinin etkili olduğu gözlenmektedir.

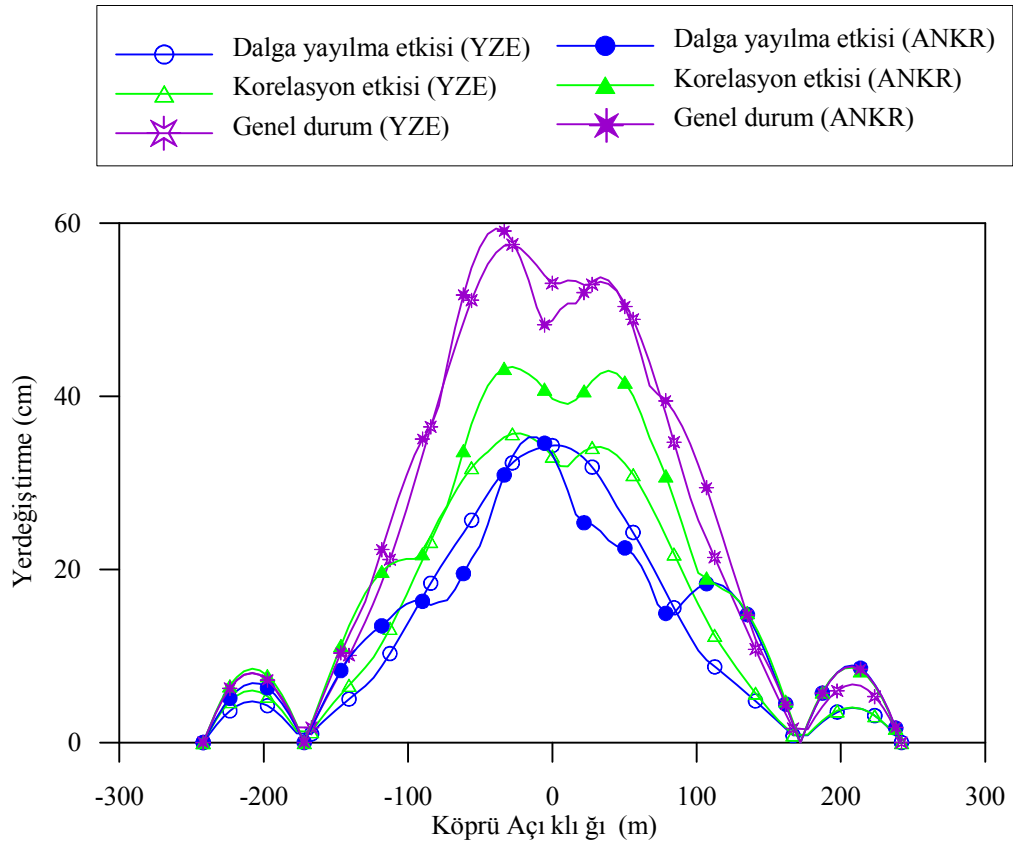
Belirtilen analiz durumları için kulede elde edilen yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimi Şekil 4.77-78'de karşılaştırılmaktadır. Kulede yapı-zemin etkileşimi modeli için elde edilen tepki değerleri, ankastre model için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük çıkmıştır. Bu durum kulede yapı-zemin etkileşiminin etkisinin, yer hareketi değişim bileşenlerinin etkisinden daha öne çıktığını göstermektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ve ihmal edilmesi durumunda tabliye açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti genel durum için elde edilmiştir. Tabliye düşey yerdeğiştirme grafiği ile karşılaştırıldığında, yapı-zemin etkileşiminin eğilme momenti değerlerini daha fazla arttırdığı görülmektedir. Şekil 4.76'da tabliye orta noktasında elde edilen moment değerleri karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması genel durumda elde edilen moment değerini %67, sadece korelasyon etkisinde elde edilen moment değerini %113 ve sadece dalga yayılma etkisinin dikkate alınması durumunda elde edilen moment değerini %87 arttırmıştır.

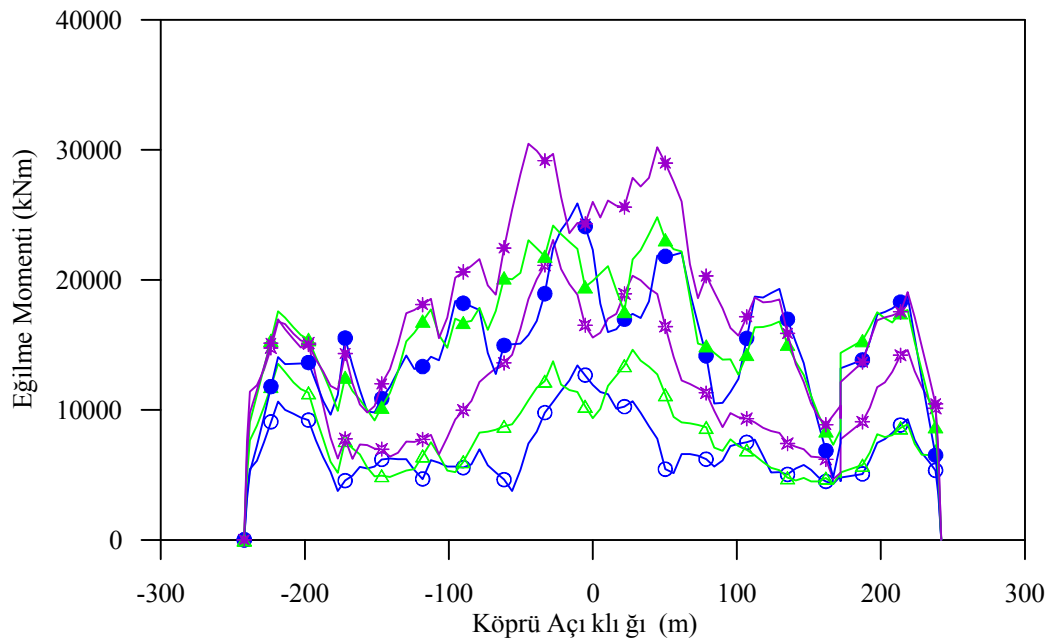
Şekil 4.78'de Jindo kulesi eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda en büyük eğilme momenti değerleri kule

taban noktasında meydana gelirken, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda kule yüksekliğinin 23. metresinde meydana gelmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının kule eğilme momenti değerlerini önemli oranda etkilediği görülmektedir.

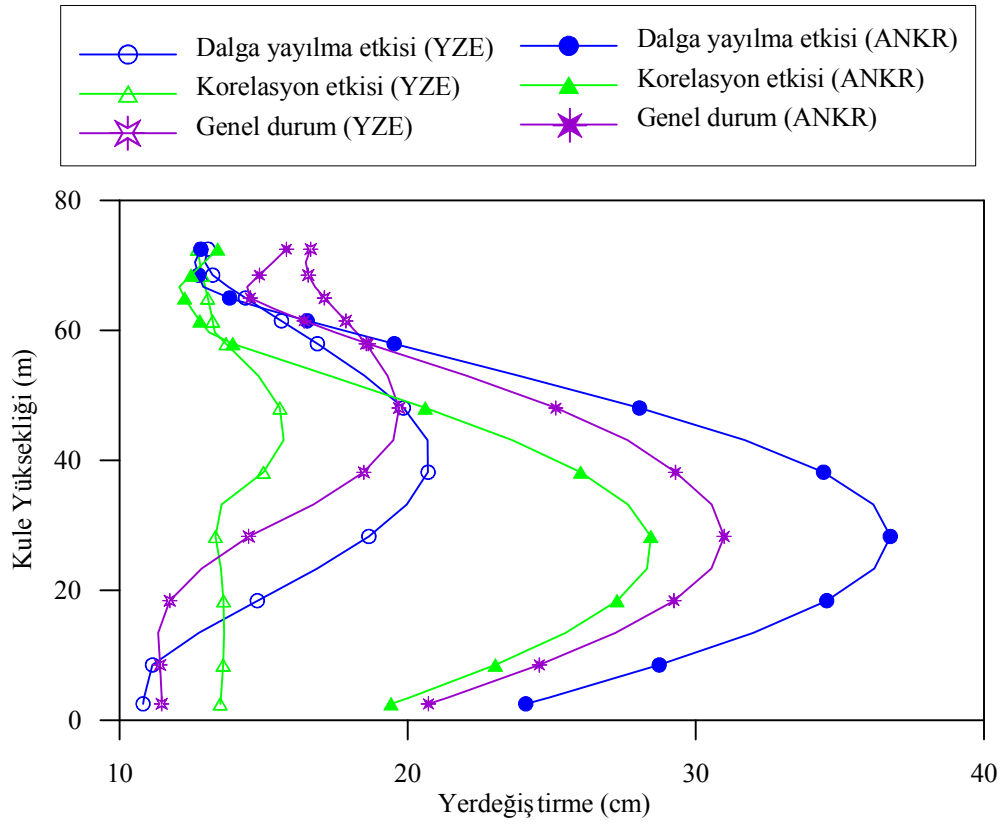
Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması genel olarak üst yapı yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerini büyük oranda arttırmıştır. Homojen sert zeminde seçilen dalga yayılma hızına bağlı olarak belirlenen dalga yayılma etkisine oranla korelasyonun etkisinin daha fazla olduğu ve bu etkinin yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile arttığı görülmektedir. Kule yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti grafiklerinde, yapı-zemin etkileşiminin deprem bileşenlerine oranla daha belirgin bir etkisinin olduğu görülmektedir.



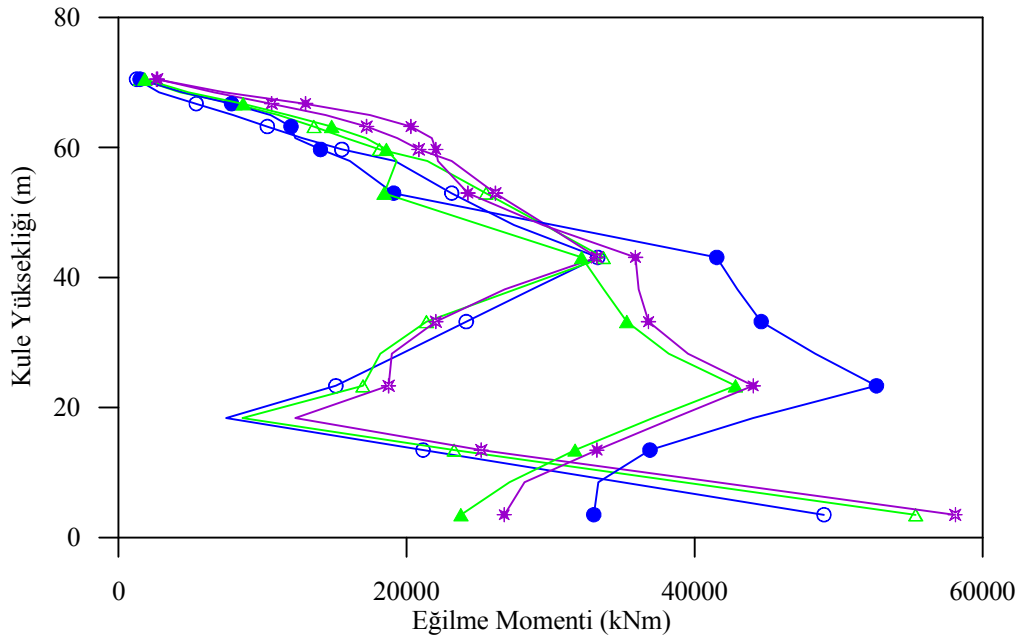
Şekil 4.75. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.76. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi



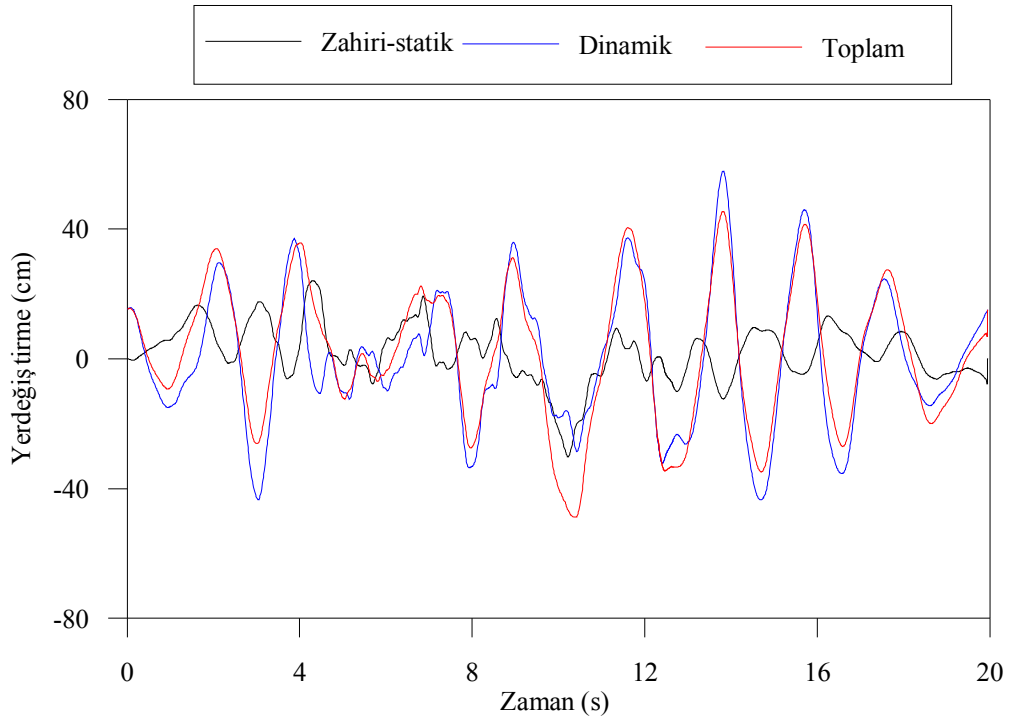
Şekil 4.77. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme değişimi



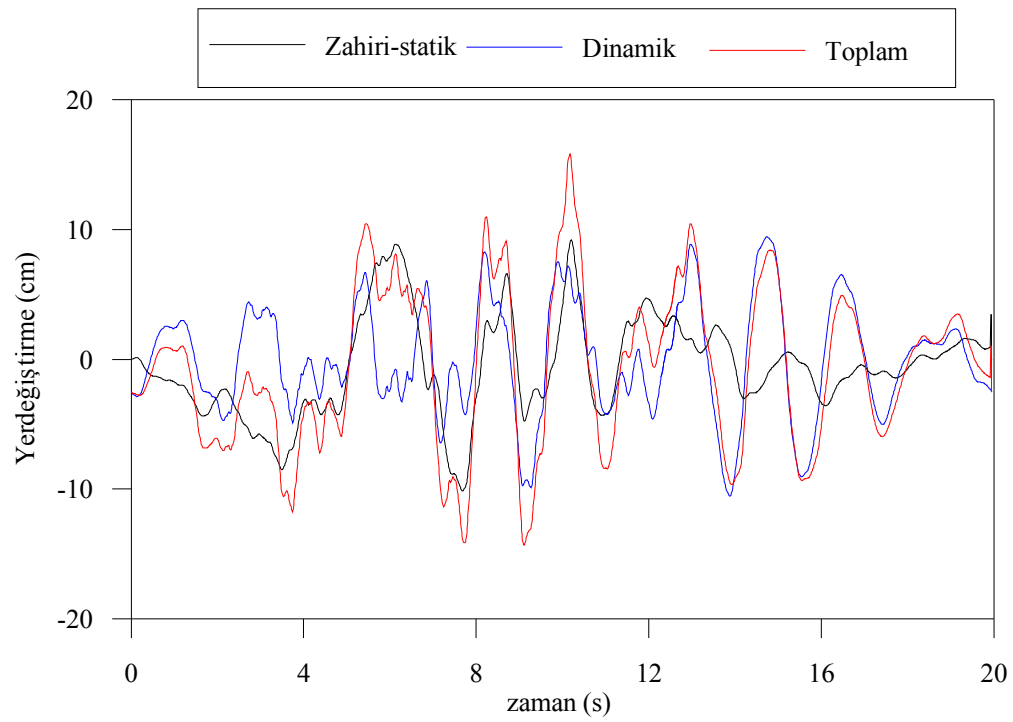
Şekil 4.78. Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda ankastre durumda olduğu gibi toplam yapısal tepkilere dinamik yapısal tepkilerin katkısının daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.79-80'de genel durumda tabliye orta noktası düşey yerdeğiştirme ve kule tepe noktası yatay yerdeğiştirme zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenlerinin değişimi görülmektedir. Tabliye orta noktası toplam yerdeğiştirmelerine dinamik yerdeğiştirme bileşeninin katkısının çok daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak yine ankastre durumda olduğu gibi, kule tepe noktası yatay yerdeğiştirme bileşenlerinin değişimine ait grafik incelendiğinde zahiri-statik bileşenin toplam yerdeğiştirmelere katkısının tabliye düşey yerdeğiştirmelerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, köprü sistemine ait daha rijit bir bölüm olan kule alt bölümüne ait bir düğüm noktasının yerdeğiştirme-zaman değişimi, zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler cinsinden Şekil 4.81'de karşılaştırılmaktadır. Görüleceği gibi, daha rijit olan bu köprü bölümünde toplam yerdeğiştirmelere zahiri-statik ve dinamik bileşenler hemen hemen eşit katkı sağlamaktadır.

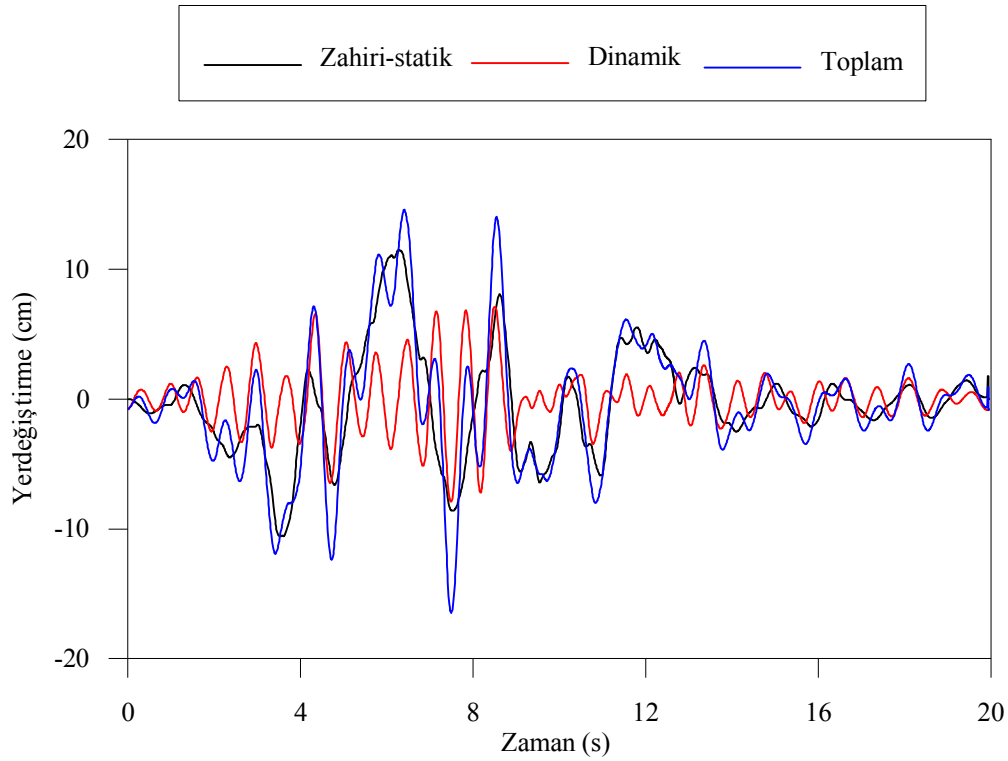
Buradan anlaşılacağı üzere, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda, zahiri-statik bileşenin toplam tepkiye katkısı azalırken, dinamik bileşenin katkısı artış göstermektedir.



Şekil 4.79. Tabliye orta noktası düşey yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (YZE)



Şekil 4.80. Kule tepe noktası düşey yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (YZE)



Şekil 4.81. Kule alt bölümündeki bir düğüm noktasının yatay yerdeğiştirme-zaman bileşenlerinin değişim grafiği (YZE)

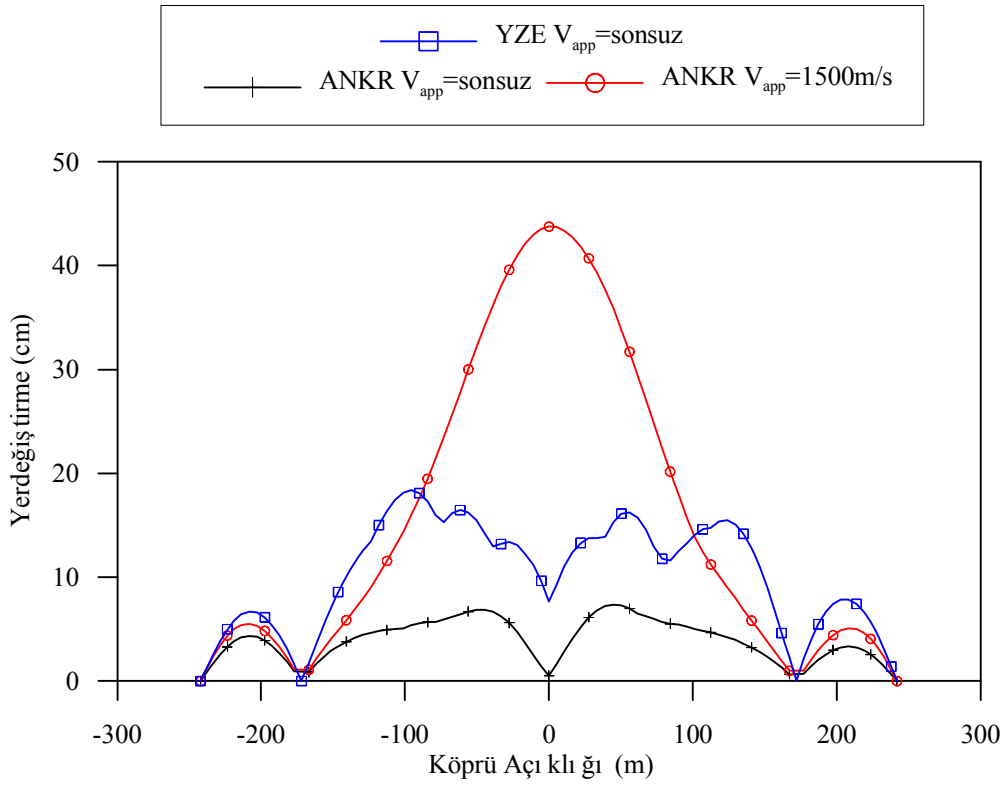
Homojen sert zeminde yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Bu bölümde köprü sisteminin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin ve deprem hareketi bileşenlerinin etkileri karşılatırmalı olarak incelenmektedir. Bu amaçla yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için yer hareketi yayılma hızının sonsuz ve 1500 m/s olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen sert zemin (Zemin sınıfı B) olduğu kabulü ile yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler karşılaştırılmaktadır. Bunun yanında yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için korelasyon etkisinin dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkilerde karşılatırmaktadır. Böylece, yapı-zemin etkileşiminin ve yer hareketi değişim

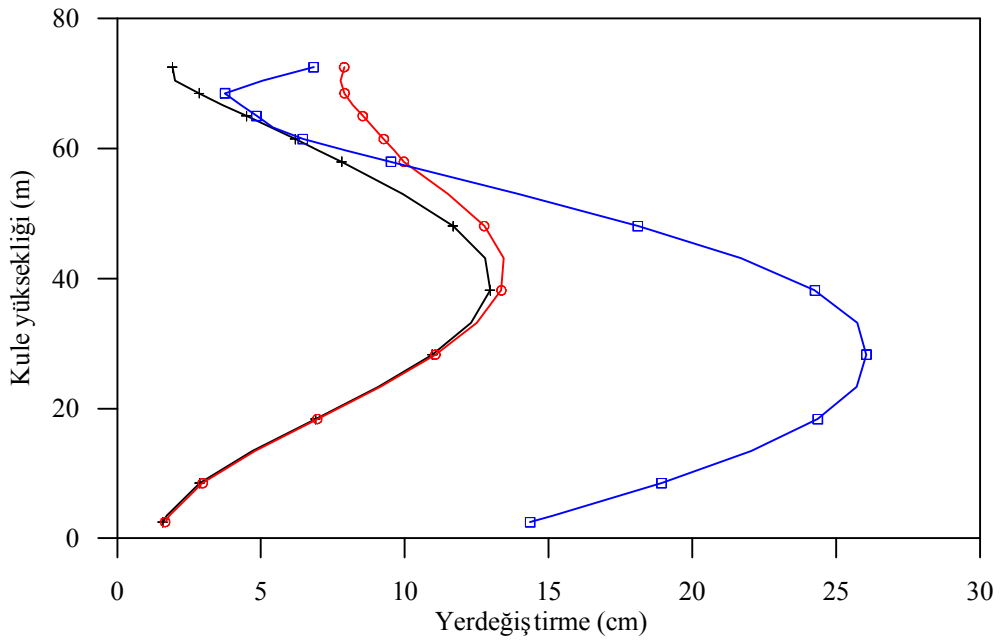
bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin köprü sistemi dinamik davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

Yapı-zemin etkileşiminin ve dalga yayılma hızının köprü dinamik davranışı üzerindeki etkileri incelemek amacı ile, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için yer hareketi yayılma hızının sonsuz ve 1500 m/s olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen sert zemin (Zemin sınıfı B) olduğu kabulü ile yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler Şekil 4.82-85'te karşılaştırılmaktadır.

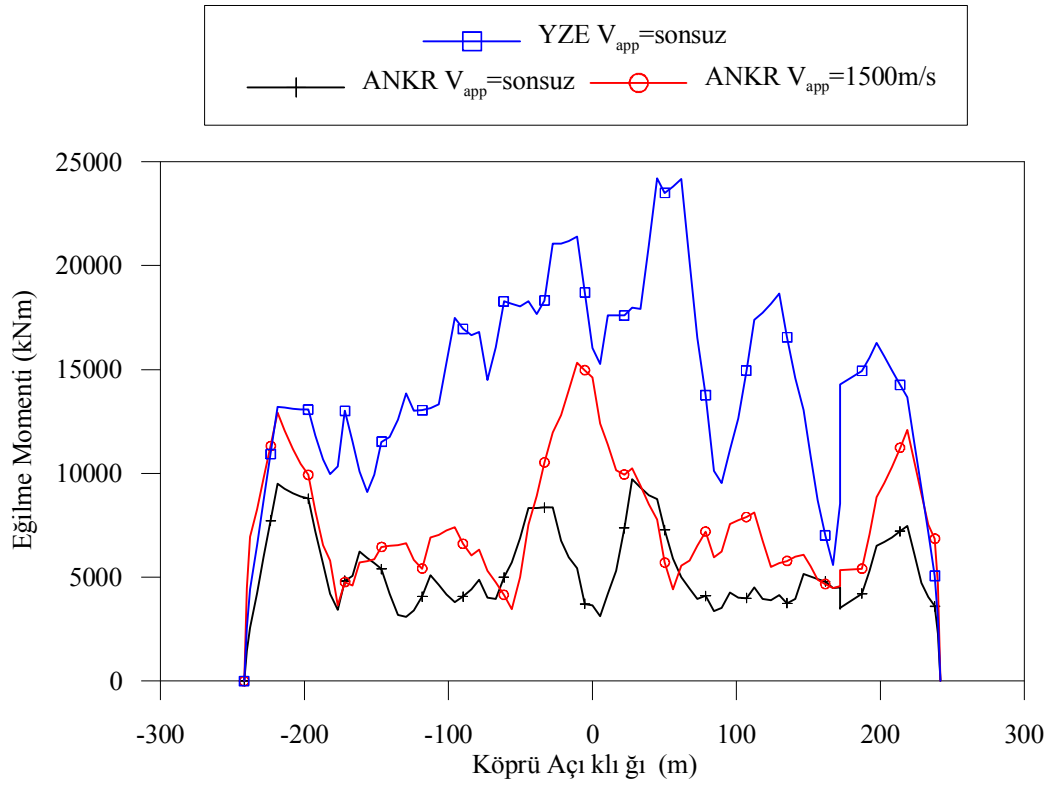
Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde en büyük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelede yer hareketi yayılma hızının 1500 m/s olması durumunda orta açıklık orta bölümünde elde edilmiştir. Kenar açıklıklarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model için elde edilen yerdeğiştirmelerin daha fazla olduğu görülmektedir. Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde, kule yüksekliğinin ilk bölümünde yapı-zemin etkileşiminin yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Kule yüksekliğinin son bölümünde ise yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre modelde yer hareketi yayılma hızının 1500 m/s olması durumunda en büyük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Kule yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde yapı-zemin etkileşiminin etkisinin yer hareketi yayılma hızının etkisinden daha fazla olduğu görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması kule tepe noktasında elde edilen yatay yerdeğiştirme değerini %250, yer hareketi yayılma hızının dikkate alınması durumunda ise %300 oranında arttırdığı görülmektedir. Tabliye ve kule eğilme moment değişimlerine ait grafikler incelendiğinde, yapı-zemin etkileşim etkisinin dalga yayılma etkisine oranla daha belirgin olduğu görülmektedir. Kablolü köprü sistemi yapı-zemin etkileşimi ve dalga yayılma etkilerinin göreceli etkileri açısından incelendiğinde, yapı-zemin etkileşiminin analizlerde dikkate alınması gerektiği açık bir şekilde görülürken, dalga yayılma etkisinde belirli yapısal tepkiler üzerinde önemli etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır.



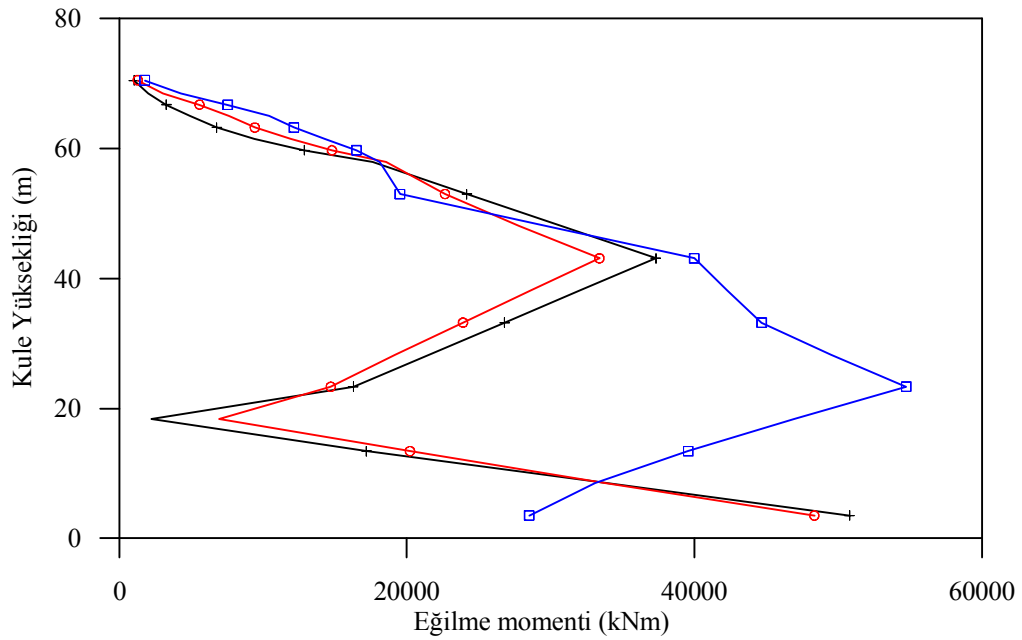
Şekil 4.82. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.83. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.84. Tabliye dinamik eğilme momentleri



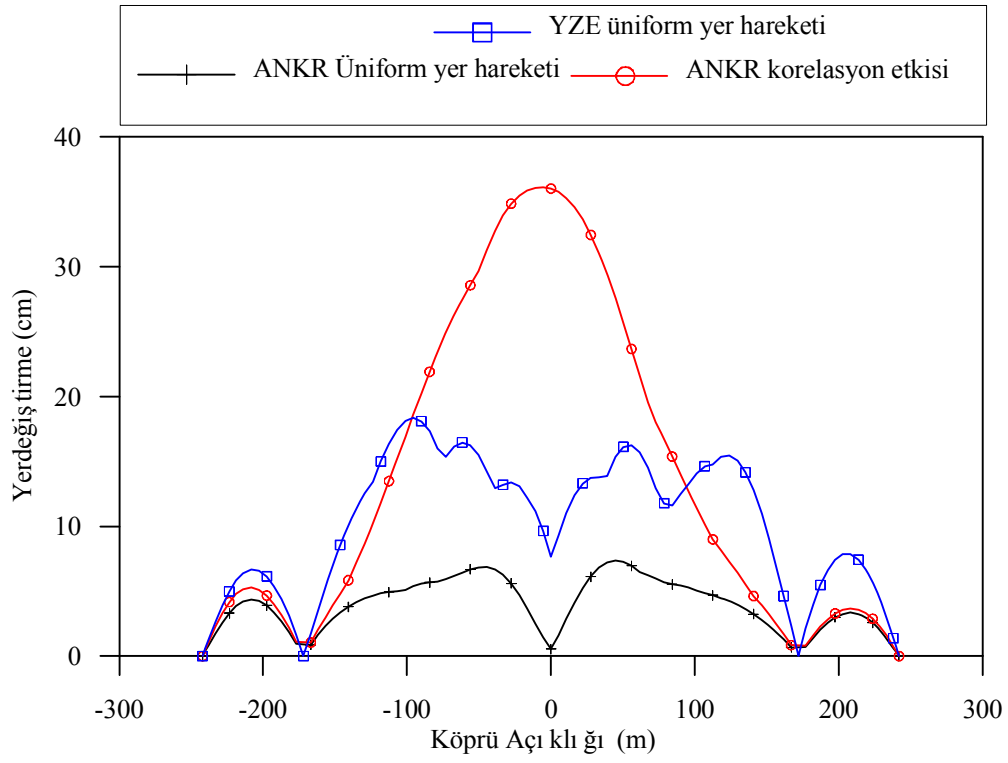
Şekil 4.85. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri

Yapı-zemin etkileşiminin ve korelasyon etkisinin köprü dinamik davranışı üzerindeki göreceli etkilerini incelemek amacı ile, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için üniform yer hareketi ve korelasyon etkisine bağlı olarak elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen sert zemin (Zemin sınıfı B) olduğu kabulü ile üniform yer hareketi etkisi için elde edilen yapısal tepkiler Şekil 4.86-89'da karşılaştırılmaktadır. Deprem hareketi değişim bileşenlerinden korelasyon etkisi için elde edilen değişim, büyük oranda diğer bir deprem hareketi değişim bileşenini tanımlayan dalga yayılma etkisi için elde edilen değişimle benzerdir.

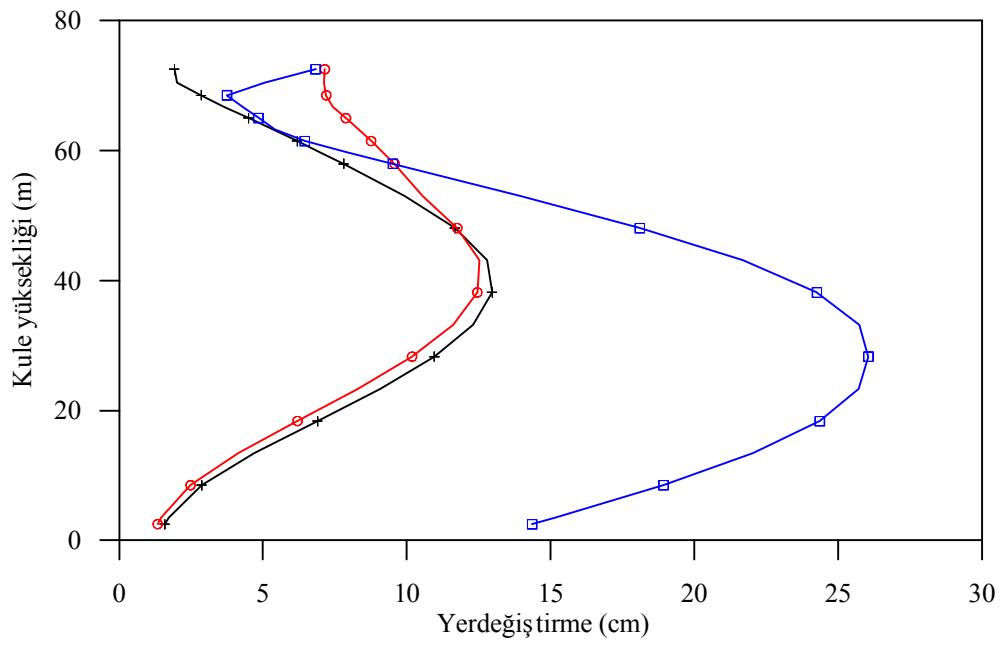
Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde, en büyük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelede korelasyon etkisinin dikkate alınması durumunda orta açıklık orta bölgesinde elde edilmiştir. Kenar açıklıklarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model için elde edilen yerdeğiştirmelerin daha fazla olduğu görülmektedir.

Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde, kule yüksekliğinin ilk bölümünde yapı-zemin etkileşiminin yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Kule yüksekliğinin son bölümünde ise yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre modelde korelasyon etkisinin dikkate alınması durumunda en büyük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir

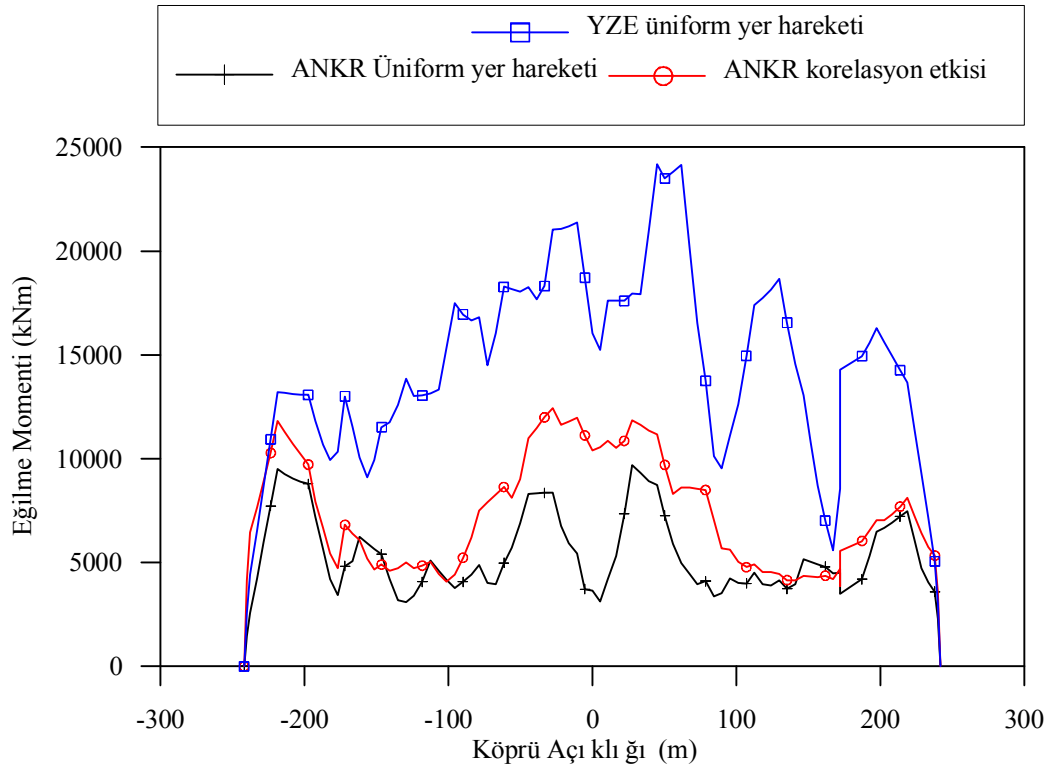
Tabliye ve kule eğilme moment değişimlerine ait grafikler incelendiğinde ise yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha belirgin olarak ortaya çıktığı görülmektedir.



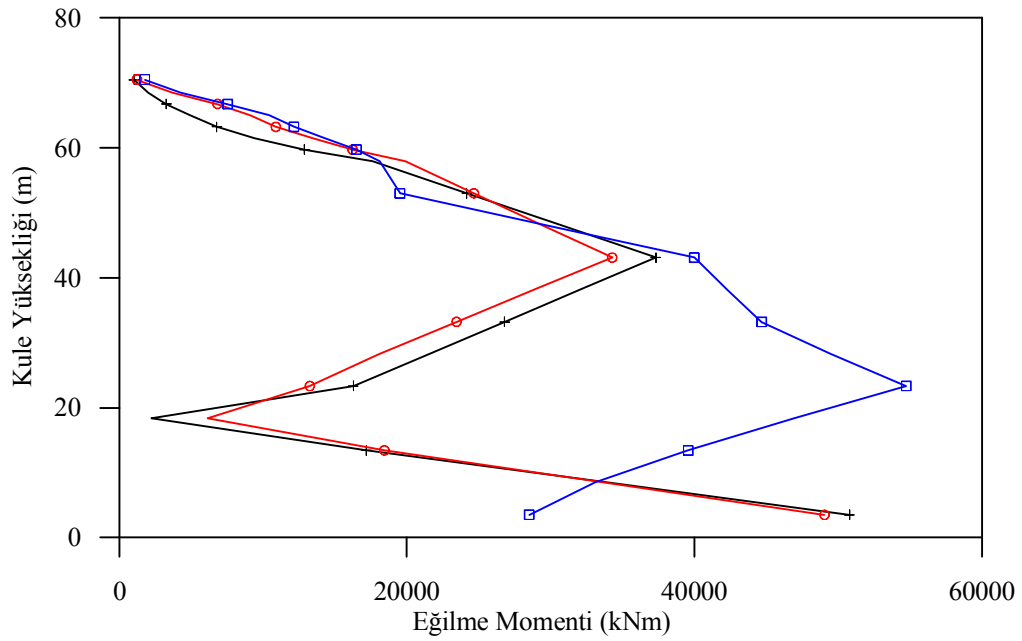
Şekil 4.86. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.87. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



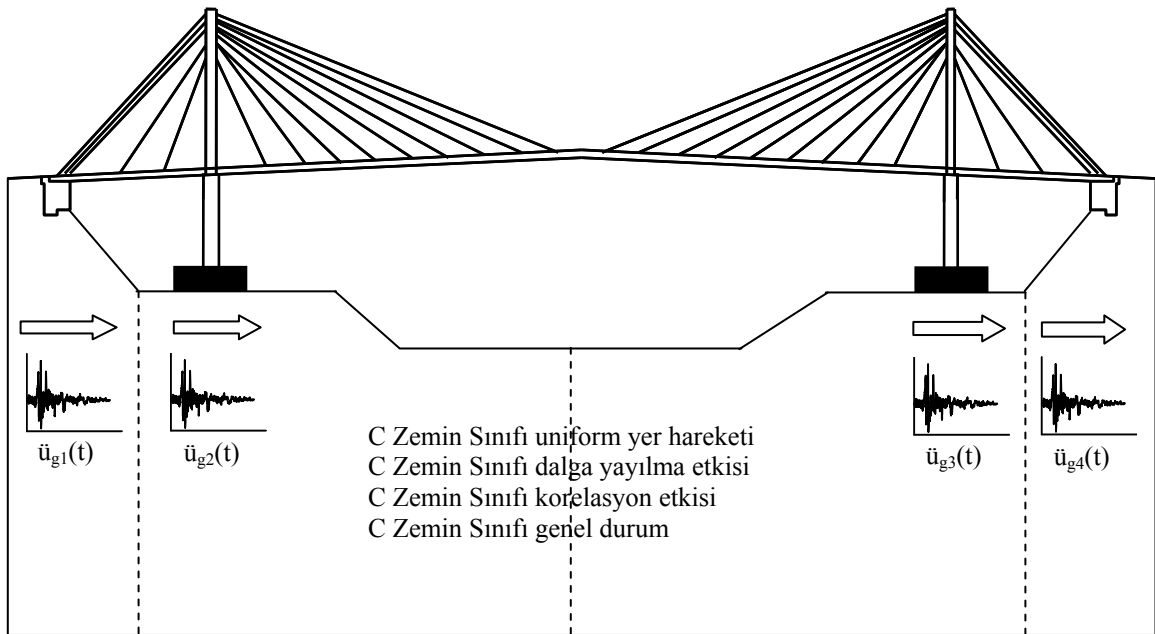
Şekil 4.88. Tabliye dinamik eğilme momentleri



Şekil 4.89. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri

#### 4.3.2. Homojen orta zemin ortamında deprem hareketi değişim bileşelerinin yapısal sistem davranışına etkisi

Bu bölümde köprünün mesnetlendiği zeminin homojen orta zemin (Zemin sınıfı C) olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkilerinin beraber dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak elde edilen yapısal tepkilere ait zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler ayrı ayrı incelenmektedir.



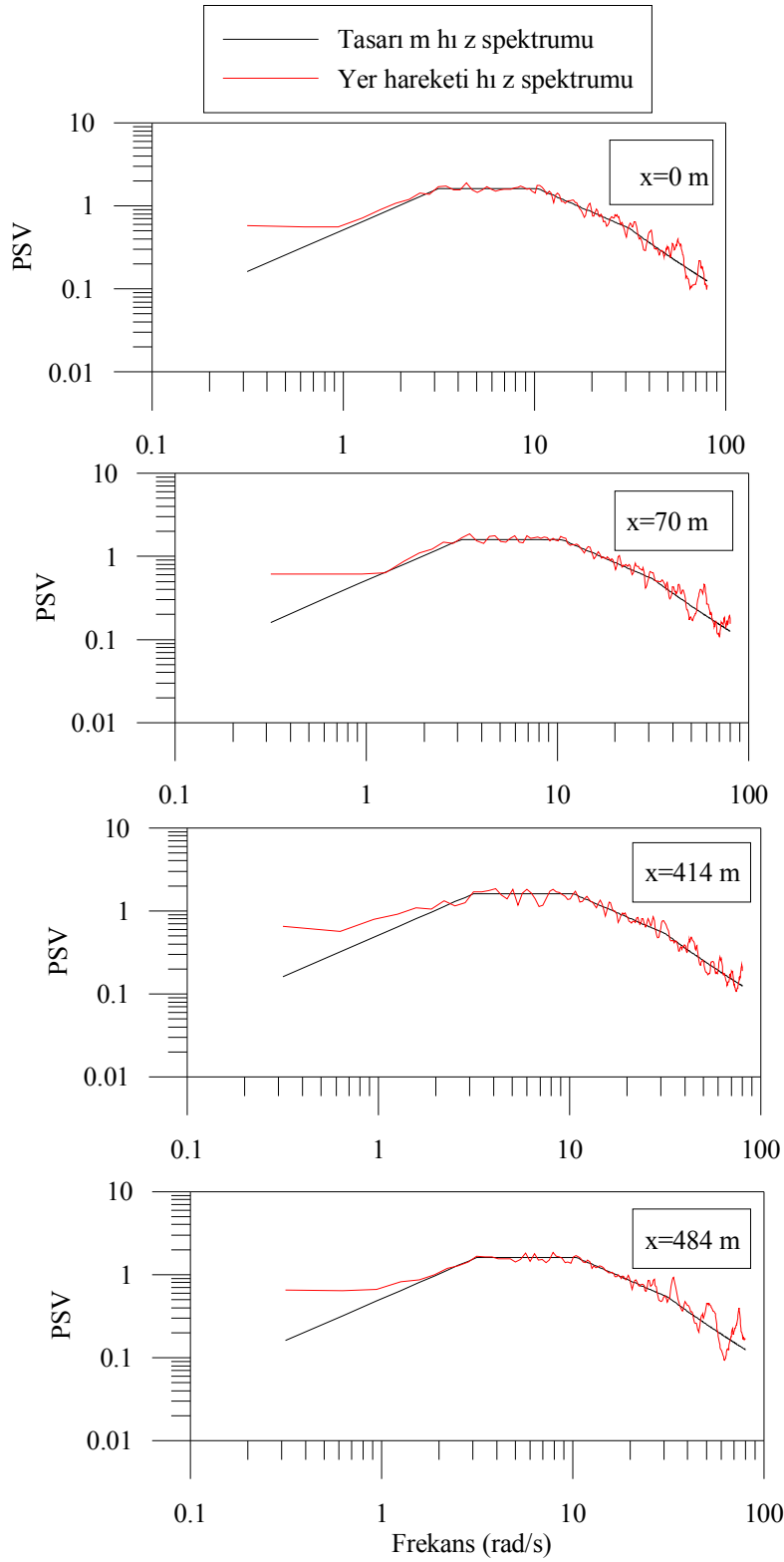
Şekil 4.90. Üniorm ve üniorm olmayan yer hareketi etkisindeki kablolu köprü sistemi

Köprü mesnetlerinin homojen orta zemin ortamında (Zemin sınıfı C) olması durumunda dalga yayılma ( $V_{app}=500$  m/sn) ve korelasyon etkilerinin beraber dikkate alınması durumunda  $N=512$  terim,  $\Delta t = 0,039$  s için toplam 20 s'lik ivme kayıtları oluşturulurken aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir.

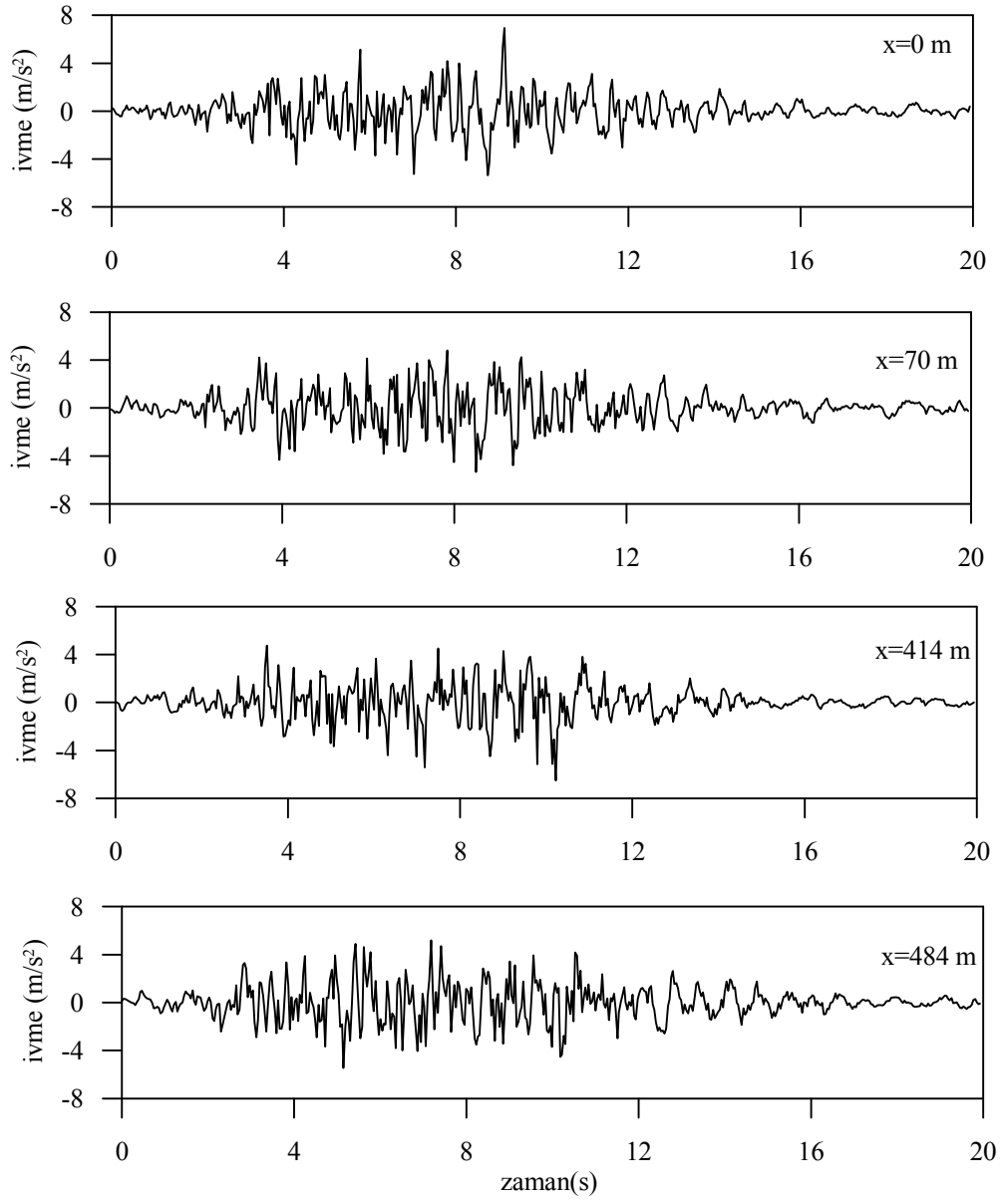
Kullanılacak yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli

kullanılarak (Eş. 3.1) elde edilmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu için Çizelge 3.1’de verilen filtre parametreleri kullanılmaktadır.

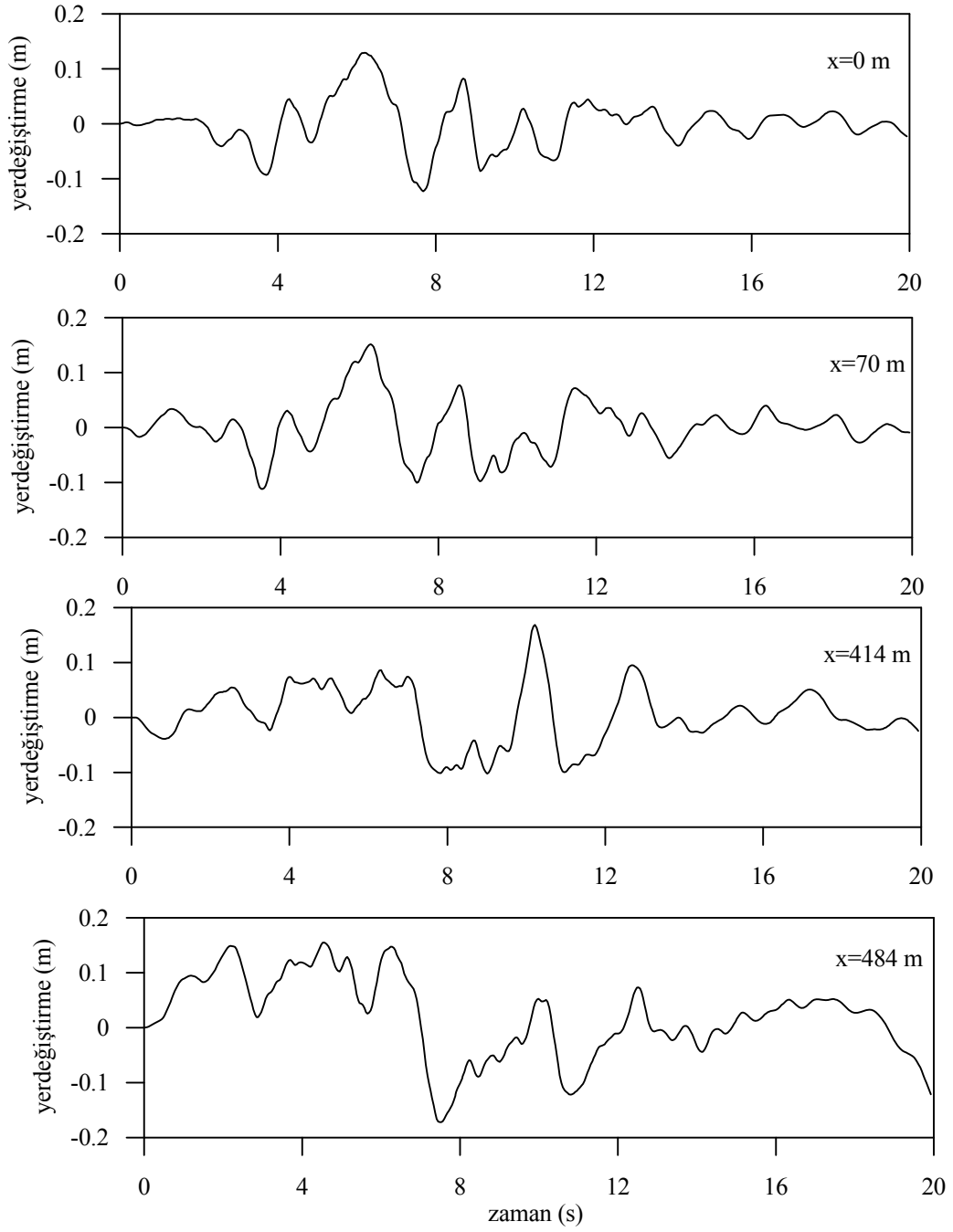
1. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Uygunluk fonksiyonundaki (Eş. 3.7) korelasyon modeli için Harichandran ve Vanmarcke tarafından önerilen korelasyon modeli kullanılmaktadır. Eş. 3.8’de gösterilen korelasyon modeli amprik sabitleri için  $A=0,636$ ,  $\alpha=0,0186$ ,  $k=31200$ ,  $f_0=1,51$  Hz ve  $b=2,95$  değerleri kullanılmaktadır. Dalga yayılma etkisi ise uygunluk fonksiyonunda Eş. 3.10 ile dikkate alınmaktadır
2. Deprem hareketi stasyoner olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyoner olmayan yer hareket ivmeleri, stasyoner olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılmasından elde edilmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydı Eş. 3. 22 ile gösterilen şekil fonksiyonu ile çarpılmaktadır.
3. Elde edilen ivme kayıtları %2 sönüm oranı için ve 0,5g PSA’ya göre normalize edilmek suretiyle EC8 ile uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Şekil 4.91’de C zemin sınıfı için genel durum etkisinde elde edilen yer hareketi hız spektrumu ile EC8 tasarım hız spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir.
4. Elde edilen ivme kayıtlarına Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 4.92-93’te genel durum etkisinde C zemin sınıfı için elde edilen yer hareketine ait eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.91. Orta zemin ortamında genel durum için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması



Şekil 4.92. Genel durum için homojen orta zemin ortamında elde edilen ivme-zaman grafikleri



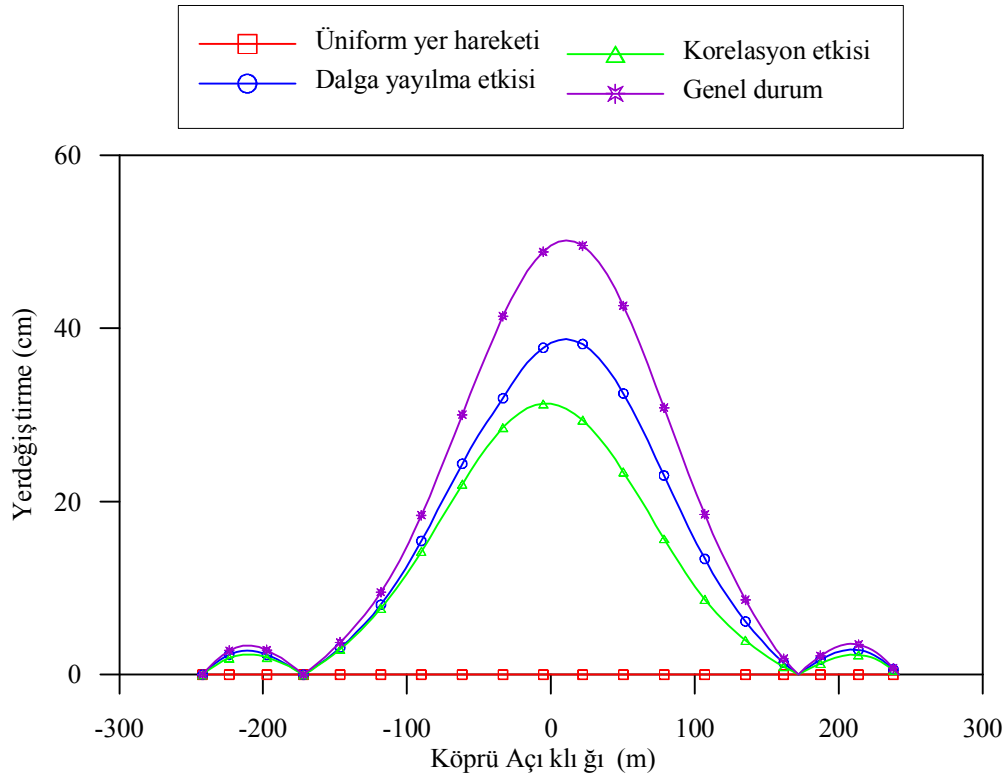
Şekil 4.93. Genel durum için homojen orta zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme-zaman grafikleri

### Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda orta zeminde deprem bileşenlerinin etkisi

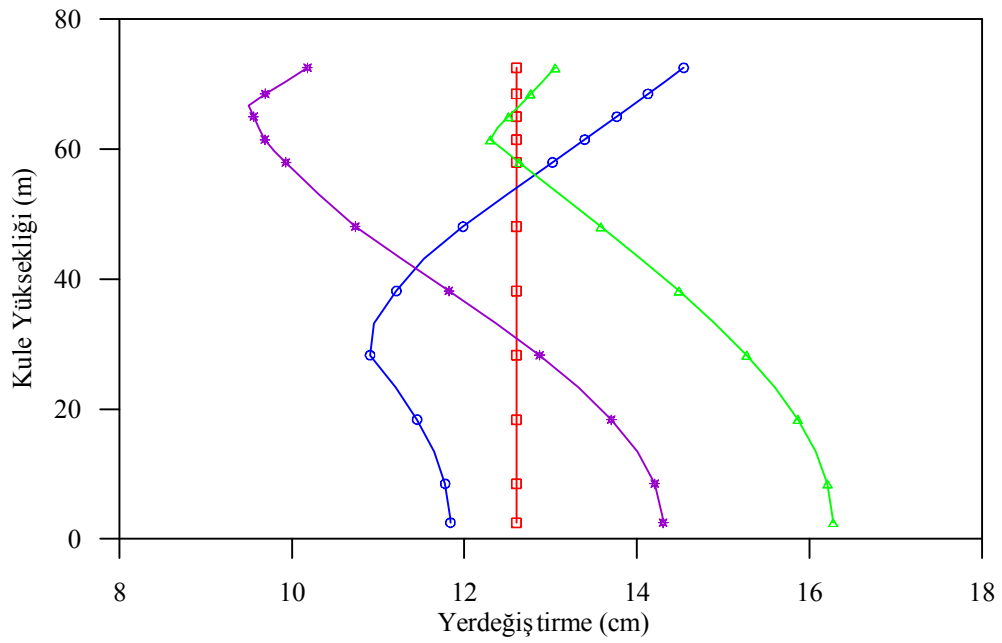
Bu bölümde köprünün mesnetlendiği zeminin C zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi, ve dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin beraber dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait yapısal tepkiler için zahiri statik, dinamik ve toplam bileşenler ayrı ayrı incelenecektir.

Gerek yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği, gerekse dikkate alındığı her iki model için de zahiri-statik yapısal tepkiler birbirine eşit olacaktır. Bu bağlamda tabliye ve Jindo kulesi için hesaplanan yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri dikkate alınan analiz durumları için Şekil 4.94-97’de karşılaştırılmaktadır. Üniform yer hareketi durumunda rijit cisim hareketi söz konusu olacağından, zahiri-statik eleman kuvvetleri sıfır olarak elde edilmiştir. Bunun yanında yatay doğrultuda uygulanan yer hareketi nedeniyle tabliye düşey yerdeğiştirmeleri sıfır olurken, kule yatay yerdeğiştirmeleri kule yüksekliği boyunca sabit olmaktadır.

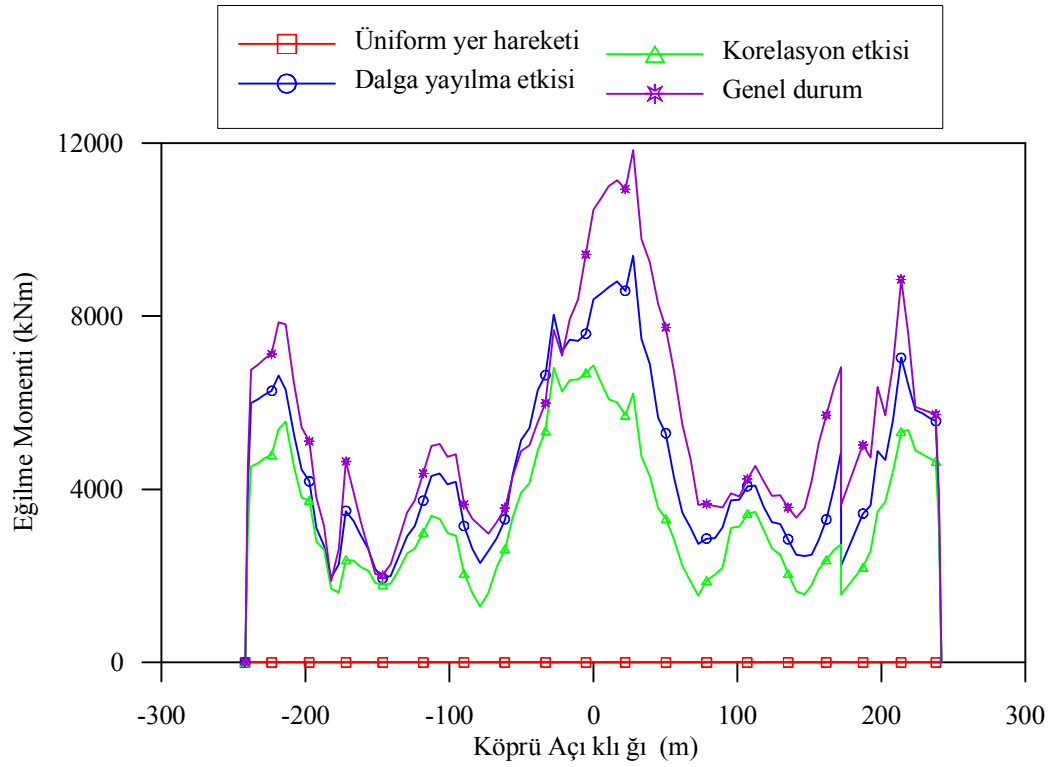
Korelasyon etkisi, dalga yayılma etkisi ve her iki etkinin birlikte dikkate alındığı analiz durumları için elde edilen zahiri-statik tepki değerlerinin incelenmesi sonucunda, genellikle korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerin en küçük olduğu görülürken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı durumdaki tepki değerleri en büyük olmaktadır. Kule yüksekliği boyunca, yatay yerdeğiştirme değerleri birbirine yakın olarak elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yerdeğiştirme değeri, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin ayrı ayrı dikkate alındığı analiz durumları için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %61 ve %32 daha büyük çıkmıştır. Tabliye zahiri-statik eğilme moment değişimi tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirme değişimine benzer olarak elde edilmiştir. Bunun yanında, kule taban noktasında genel durum etkisinde elde edilen eğilme momenti değeri, dalga yayılma etkisi ve korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %17 ve %29 daha büyük çıkmıştır.



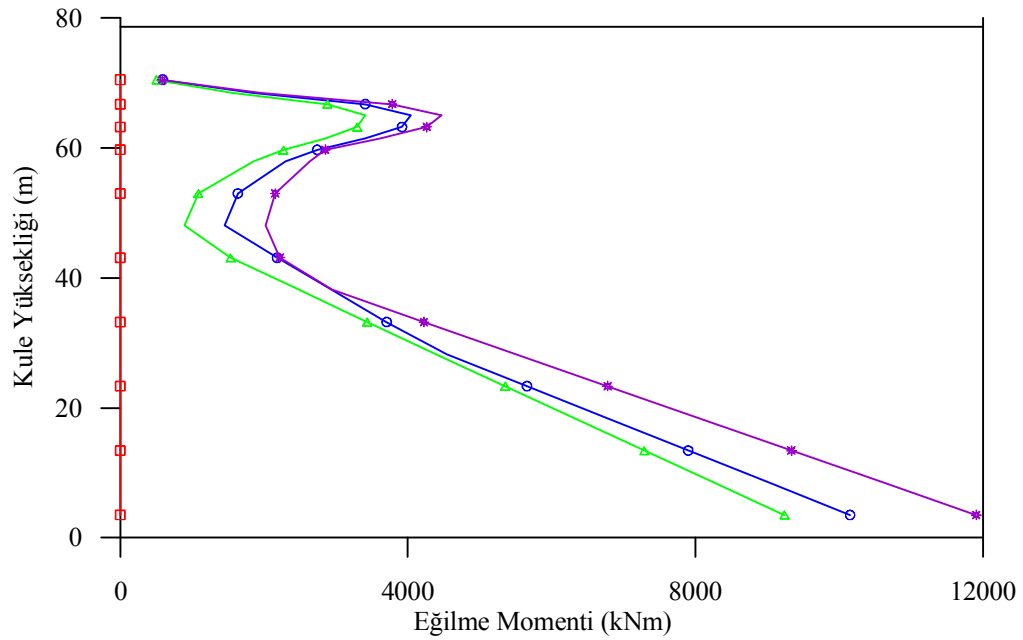
Şekil 4.94. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C)



Şekil 4.95. Jindo kulesi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C)



Şekil 4.96. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C)



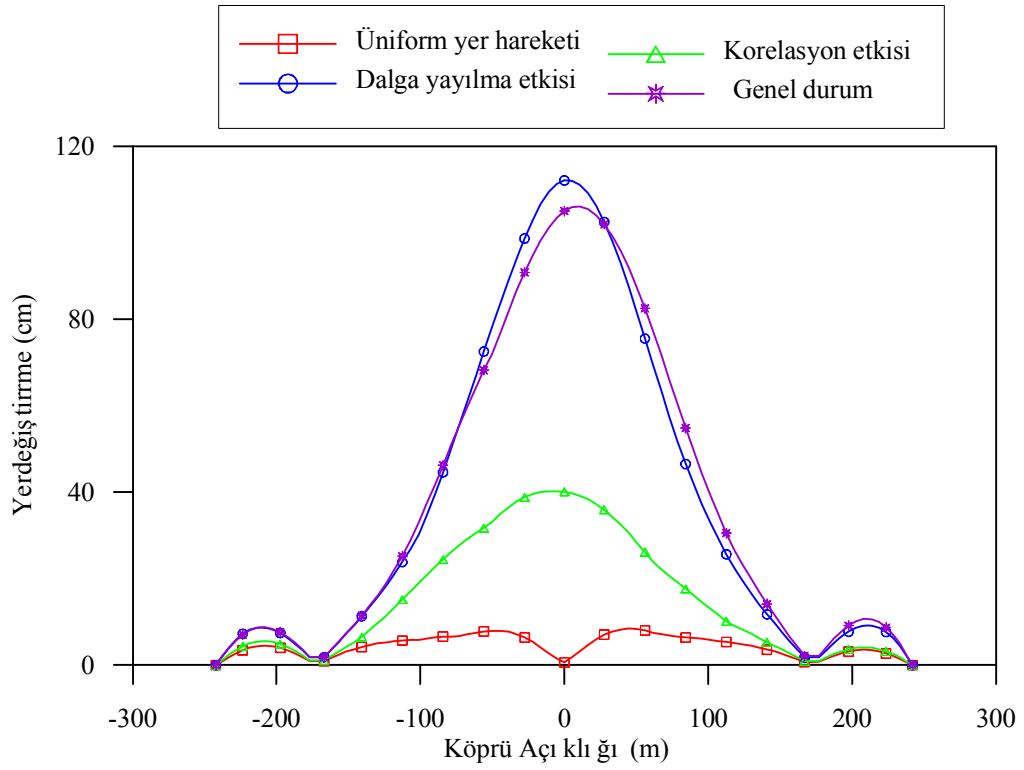
Şekil 4.97. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C)

Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilerek, köprü sisteminin zemine ankastre olarak mesnetlendiği model için gerçekleştirilen analizler ile elde edilen dinamik tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.98-103'te karşılaştırılmaktadır. Genel olarak üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum ve dalga yayılma etkisi için elde edilen tepki değerleri en büyük olmaktadır. Dalga yayılma etkisi burada korelasyon etkisine oranla ön plana çıkmıştır.

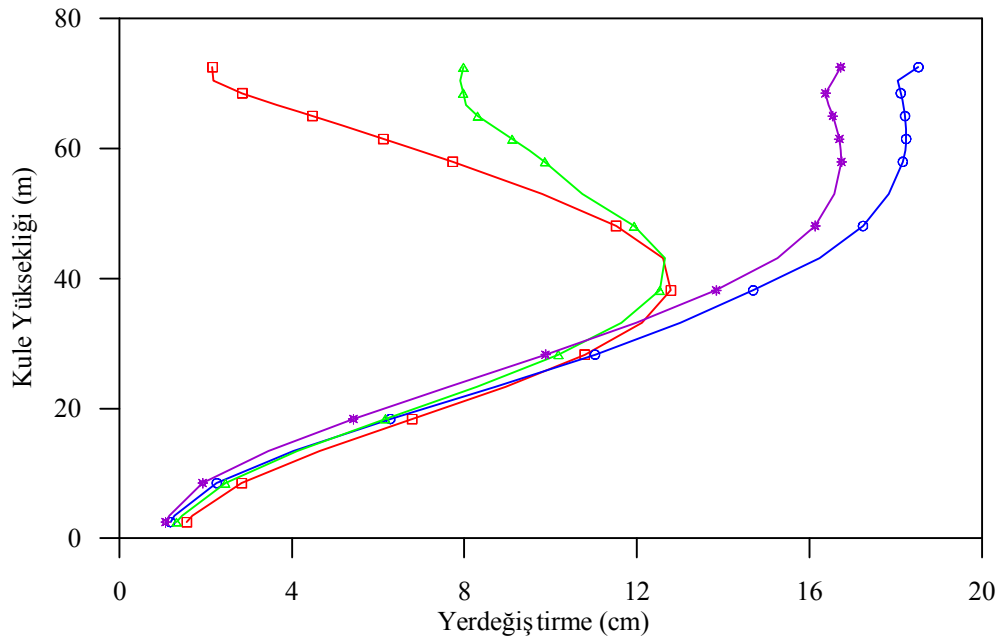
Tabliye orta noktasında sadece dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği genel durum etkisi için belirlenen yerdeğiştirme değerinden ve sadece korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerinden sırasıyla %7 ve %180 daha büyük çıkmıştır. Bununla birlikte, kule tepe noktasında sadece dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yatay yerdeğiştirme değerinden ve sadece korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %12 ve %138 daha büyük olduğu görülmüştür. Farklı analiz durumları için kule yüksekliği boyunca belirlenen eğilme momenti değerleri birbirine yakın çıkmıştır.

Şekil 4.102'de tabliye dinamik kesme kuvveti değişimi görülmektedir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük kesme kuvvetleri genel durum ve dalga yayılma etkisi için elde edilirken, korelasyon etkisi ve üniform yer hareketi etkisinde elde edilen kesme kuvvetleri eğilme momenti grafiğinde olduğu gibi birbirine yakın bulunmuştur.

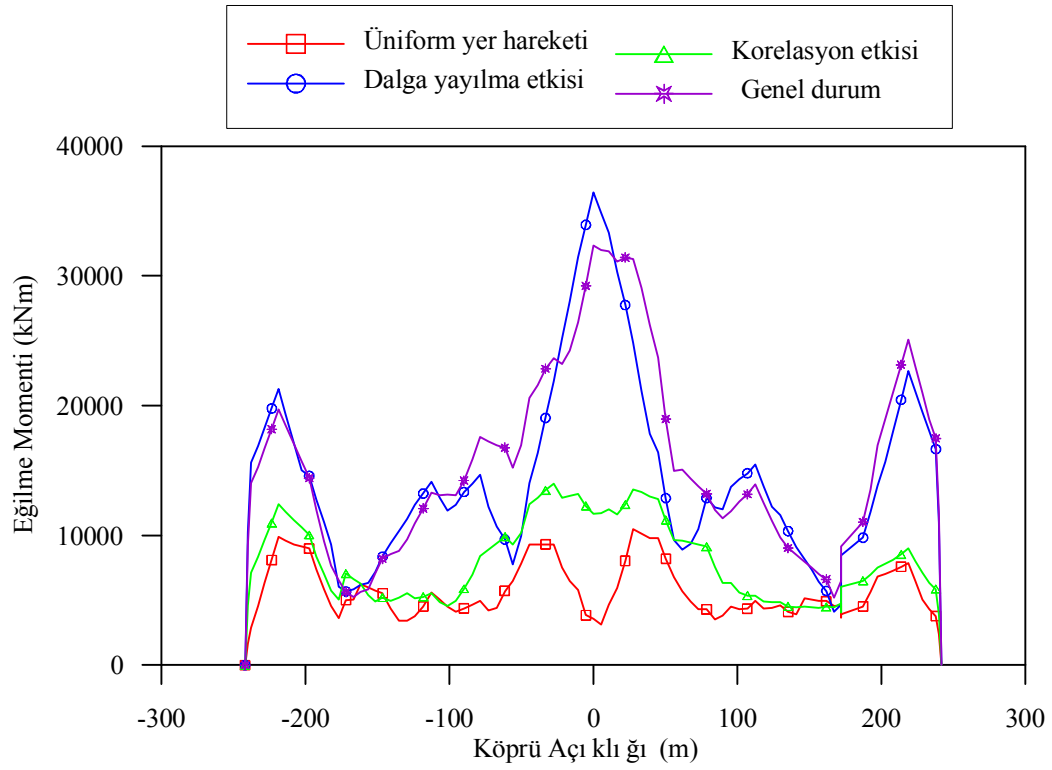
Şekil 4.103'de Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvet değişimi görülmektedir. Kule dinamik eğilme momenti grafiğinde dört durum için elde edilen moment değişimi birbirine yakın olurken eksenel kuvvet grafiğinde genel durum ve dalga yayılma etkisi için elde edilen eksenel kuvvetler diğer durumlara göre daha büyüktür. En küçük eksenel kuvvet değerleri üniform yer hareketi tepkisi için elde edilmiştir.



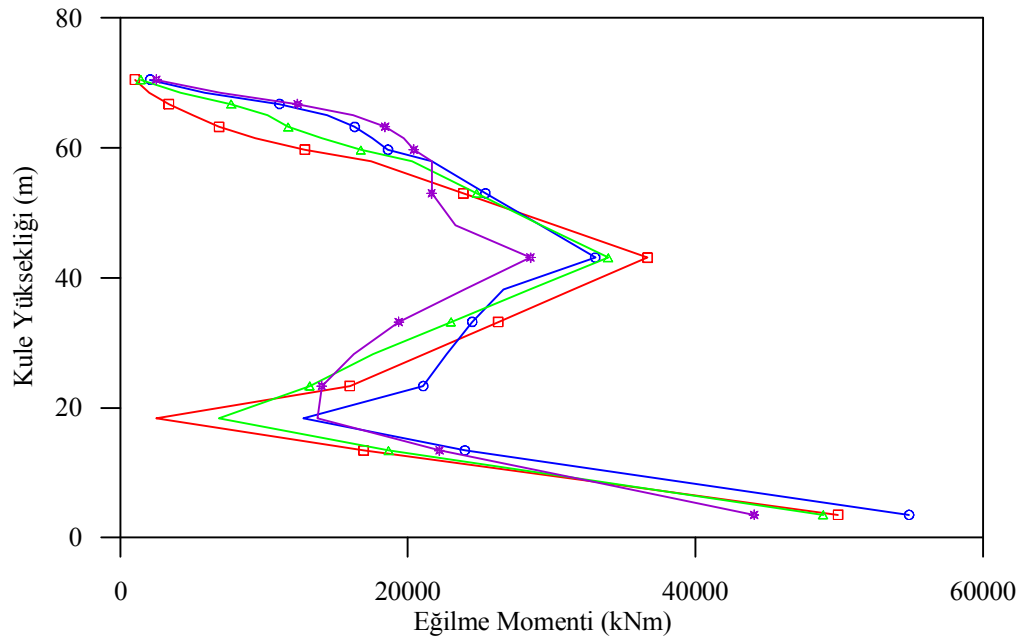
Şekil 4.98. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



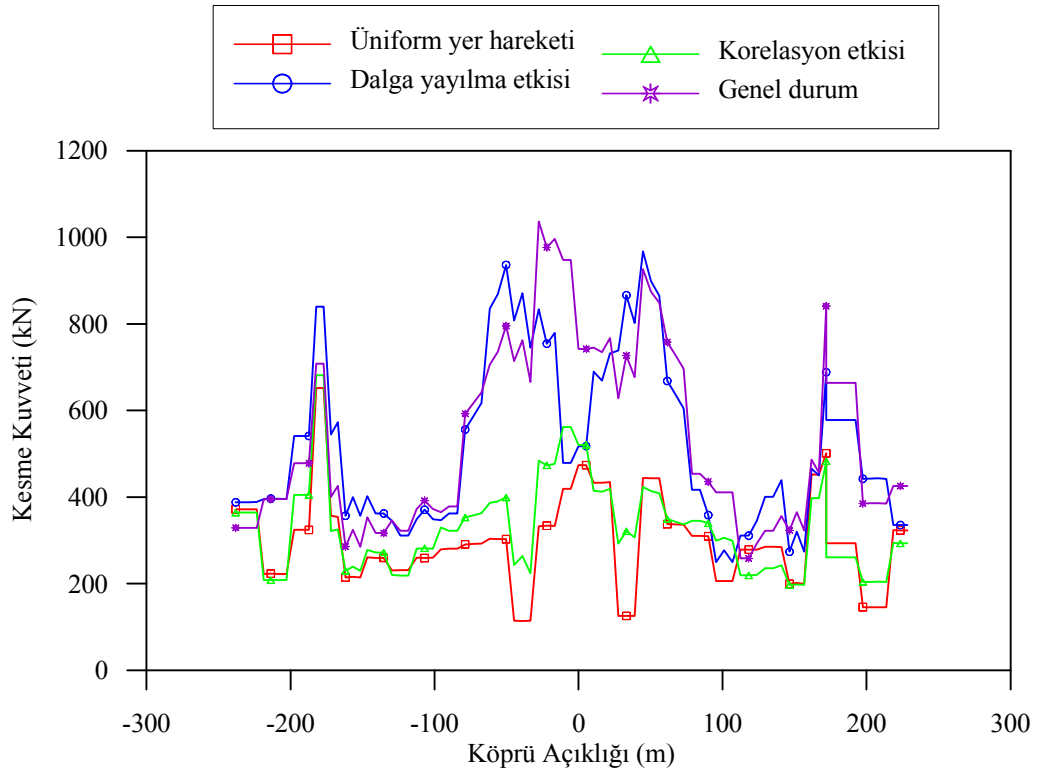
Şekil 4.99. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



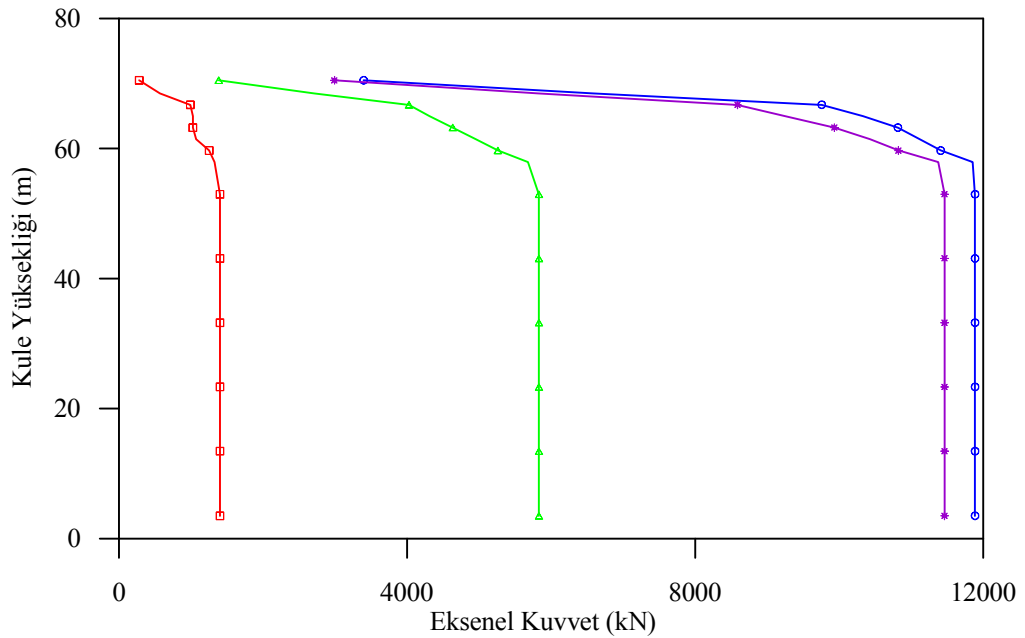
Şekil 4.100. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.101. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



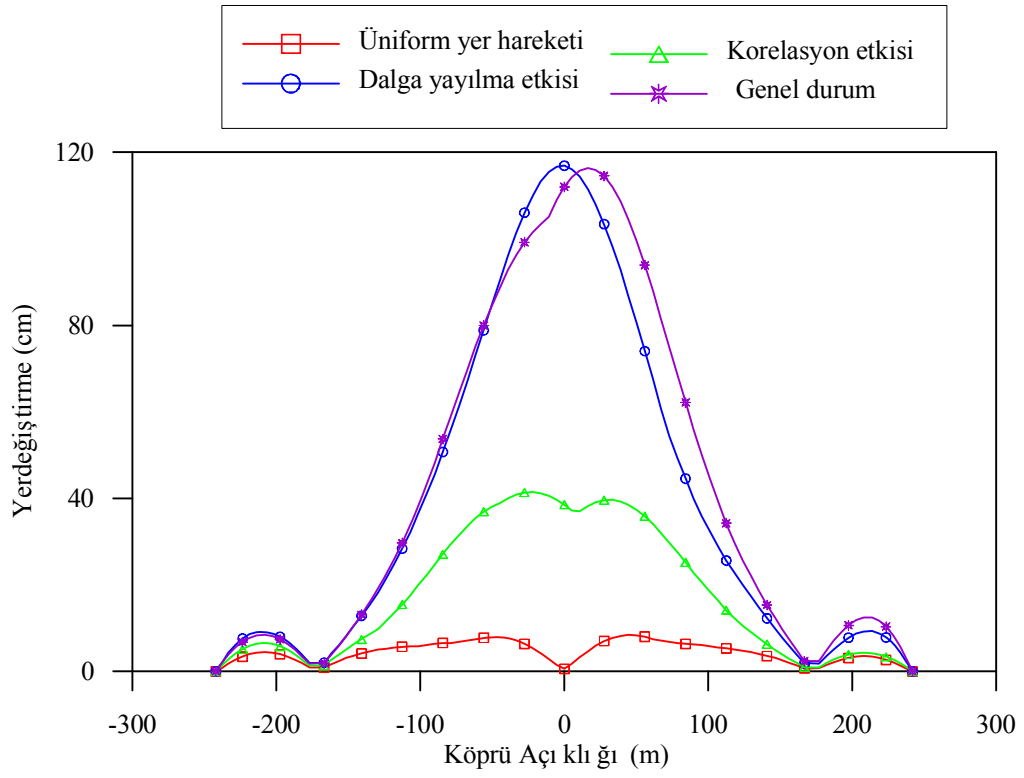
Şekil 4.102. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



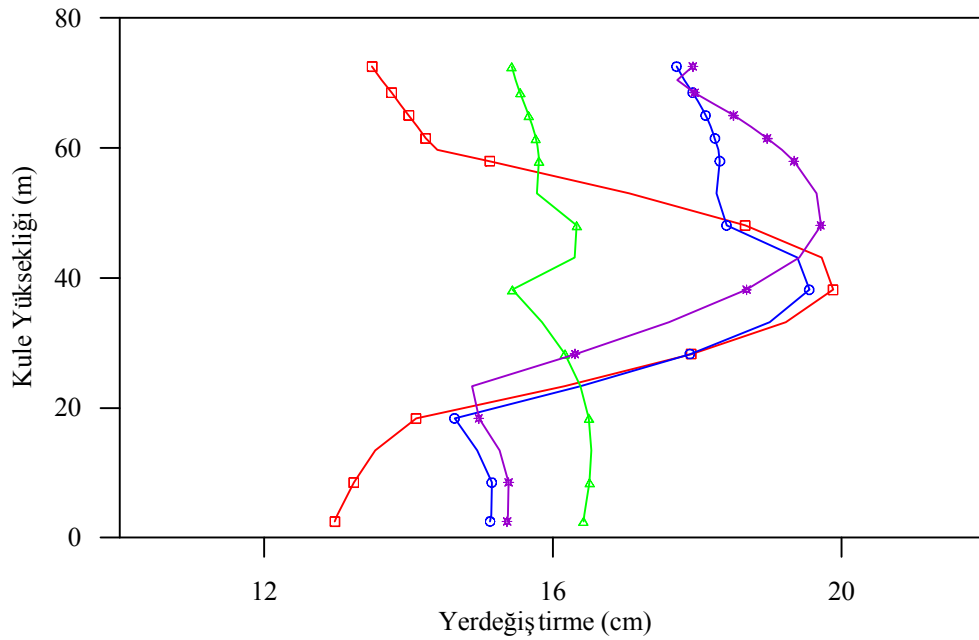
Şekil 4.103. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı C, ANKR)

Zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplamından oluşan toplam yapısal tepkiler Şekil 4.104-107’de karşılaştırılmaktadır. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiş olup, üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum ve dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Orta zemin ortamında elde edilen yapısal tepkilere zahiri-statik bileşenin katkısının önemsiz olduğu anlaşılmaktadır.

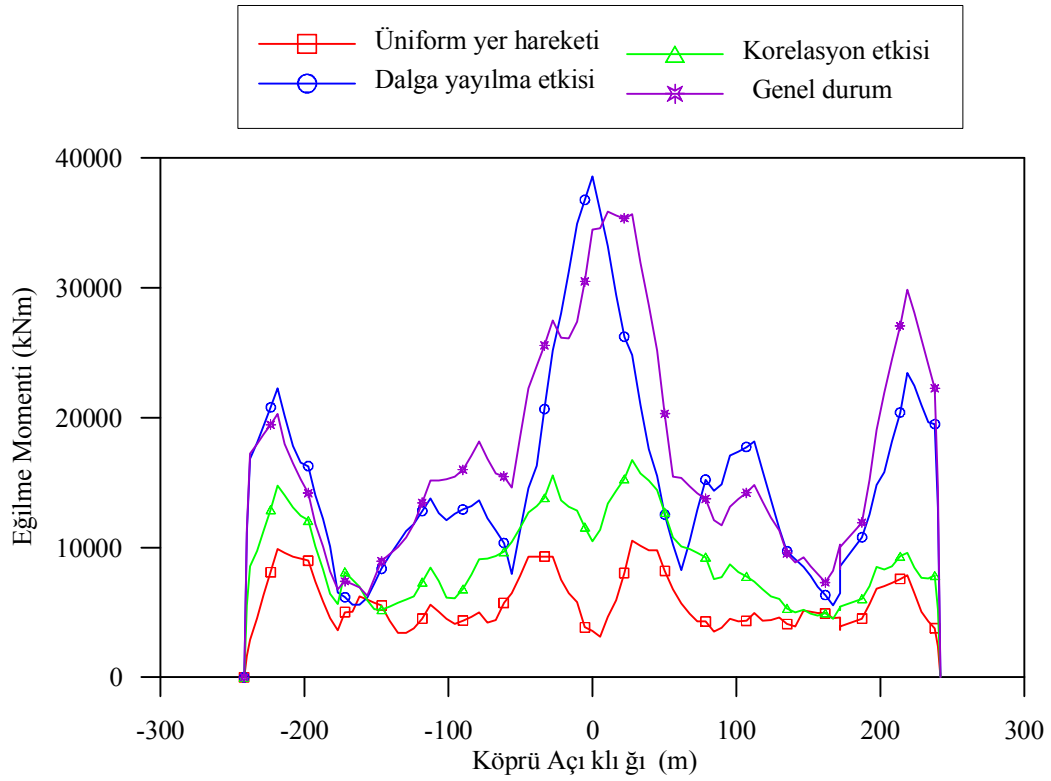
Tabliye orta noktasında sadece dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yerdeğiştirme değerinden ve sadece korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerinden sırasıyla %4 ve %200 daha büyük çıkmıştır. Kule tepe noktasında sadece dalga yayılma etkisinde ve dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yatay yerdeğiştirme değeri, sadece korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden %20 daha büyük çıkmıştır. Tabliye düşey yerdeğiştirme grafiğinde olduğu gibi en büyük eğilme momentleri tabliye açıklığı boyunca genel durum ve dalga yayılma etkisi için elde edilmiştir. Bunun yanında farklı analiz durumları için kule yüksekliği boyunca belirlenen eğilme momenti değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



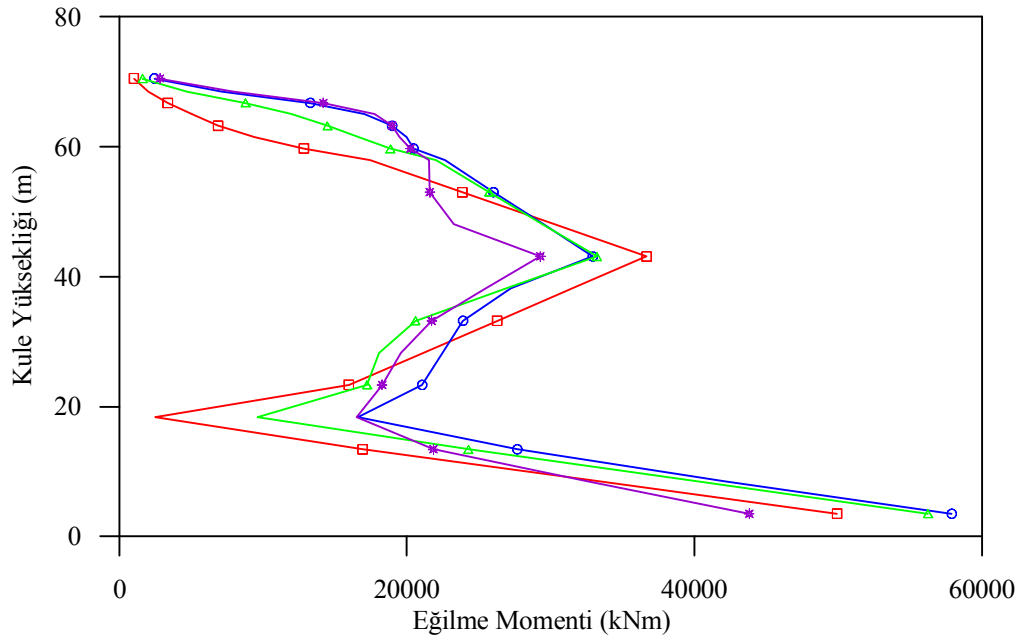
Şekil 4.104. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.105. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.106. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)



Şekil 4.107. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, ANKR)

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin orta zemin ortamında incelenmesi

Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda homojen orta zemin ortamında (Zemin sınıfı C) mesnetlenmiş üst yapı için dinamik analiz sonuçları incelenmektedir. Köprü mesnetleri altındaki zeminin C zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkisinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait dinamik ve toplam tepki bileşenleri karşılaştırılmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerine ait grafikler, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda elde edilen grafiklerle aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir. Dalga yayılma etkisi için yer hareketi yayılma hızı  $V_{app}=500$  m/s olarak dikkate alınmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler ile elde edilen tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.108-113'te karşılaştırılmaktadır. Ankastre model için elde edilen değişiminden farklı olarak, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda genel durum için belirlenen tepki değerleri dalga yayılma etkisinde belirlenen tepki değerlerinden daha büyük çıkmıştır. En büyük tepki değerleri genellikle dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durumda ortaya çıkarken, en küçük tepki değerleri üniform yer hareketi durumunda gözlenmektedir. Kule yüksekliğinin boyunca da en büyük tepki değerleri genel durum etkisinde elde edilmiştir. Bunun yanında, kule alt bölümünde dalga yayılma etkisi için elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin en küçük olması dikkat çekici bir noktadır.

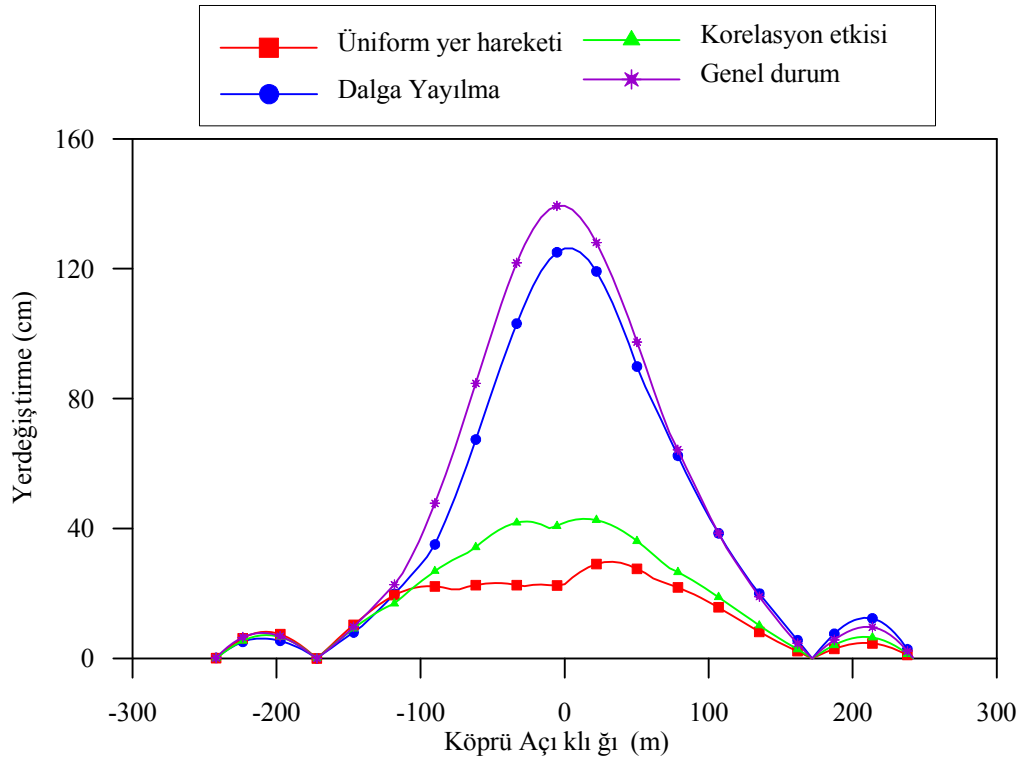
Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği düşey yerdeğiştirme değeri, sadece korelasyon ve sadece dalga yayılma etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %230 ve %10 daha büyük çıkmıştır. Kule tepe noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum, dalga yayılma, korelasyon ve üniform yer

hareketi etkileri için elde edilen yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 27 cm, 20 cm, 10 cm, ve 7 cm olarak belirlenmiştir.

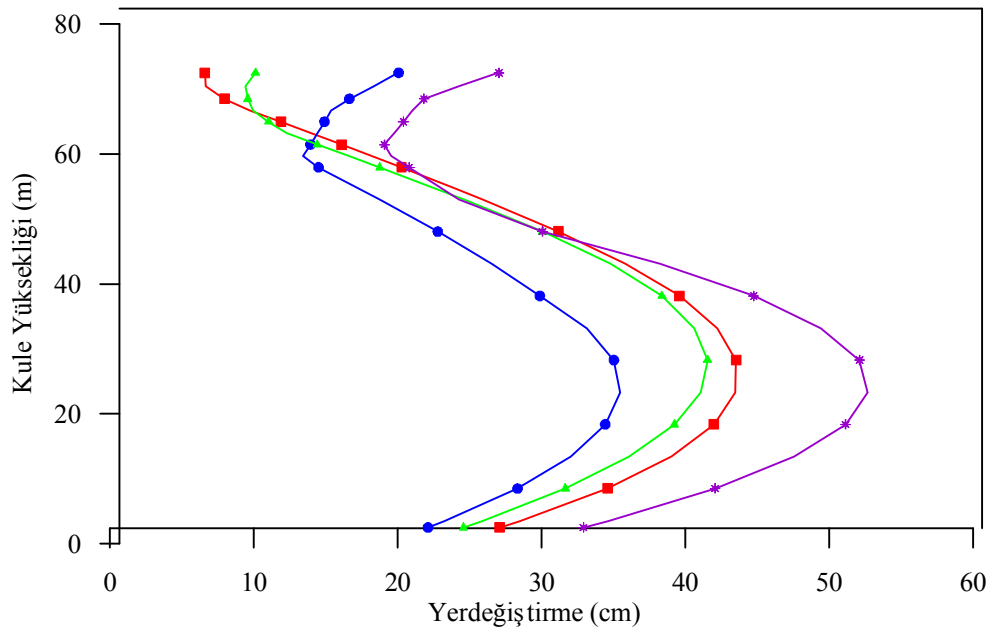
şekil 4.110-111’de tabliye ve kulede elde edilen eğilme momenti değişim grafikleri grlmektedir. Köprü açıklığı boyunca en büyük eğilme momentleri genel durum ve dalga yayılma etkileri için elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında genel durum için elde edilen eğilme momenti değeri korelasyon etkisi için elde edilen moment değerinden %184 ve üniform yer hareketi etkisi için elde edilen moment değerinden %284 daha büyük olarak elde edilmiştir.

Kule eğilme momentleri için ise kule yatay yerdeğiştirme grafiğindeki gibi benzer bir değişim grlmektedir. Kule ykseklieği boyunca en büyük eğilme momenti değerleri genel durum etkisinde elde edilmiştir. Kule ykseklieği boyunca korelasyon, dalga yayılma ve üniform durumlar için elde edilen eğilme momentleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Kule taban noktasına genel durum için elde edilen eğilme momenti değeri, dalga yayılma, korelasyon ve üniform durumlar için belirlenen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %36, %,61 ve %62 daha büyük çıkmıştır.

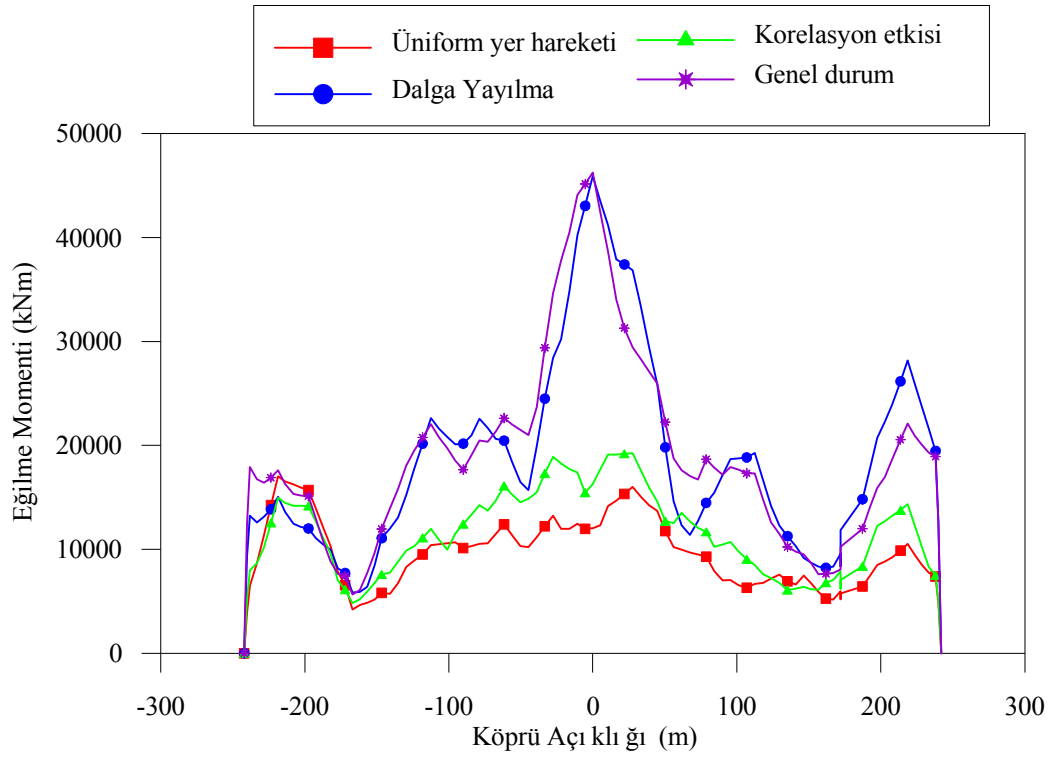
Tabliye kesme kuvvetleri ve kule aksenal kuvvetleri için elde edilen değişim yine genel durumda en büyük tepki değerlerini verirken, dalga yayılma etkisi için bulunan tepkiler korelasyon etkisi için belirlenen tepkilerden daha büyük çıkmıştır (şekil 4.112-113).



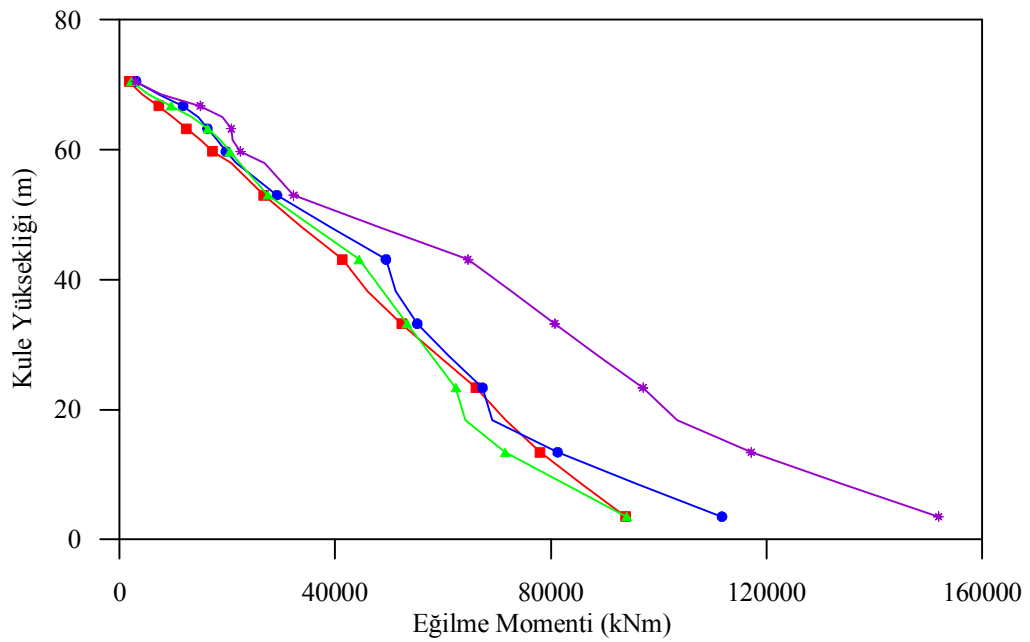
Şekil 4.108. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



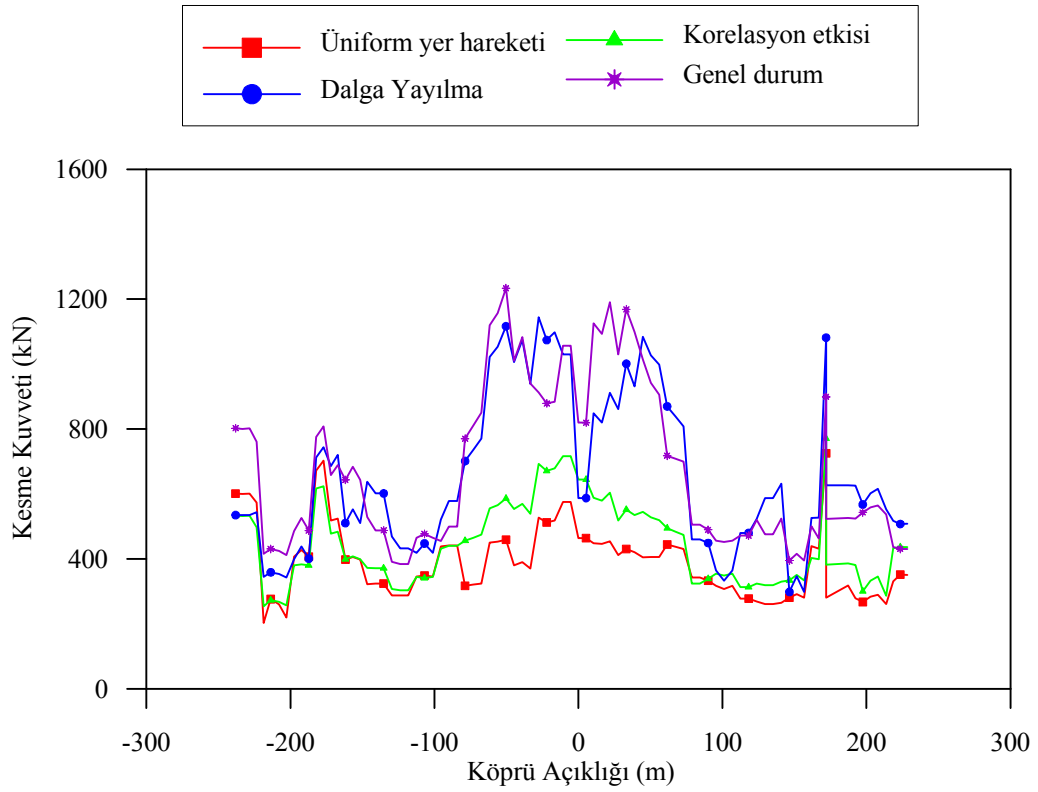
Şekil 4.109. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



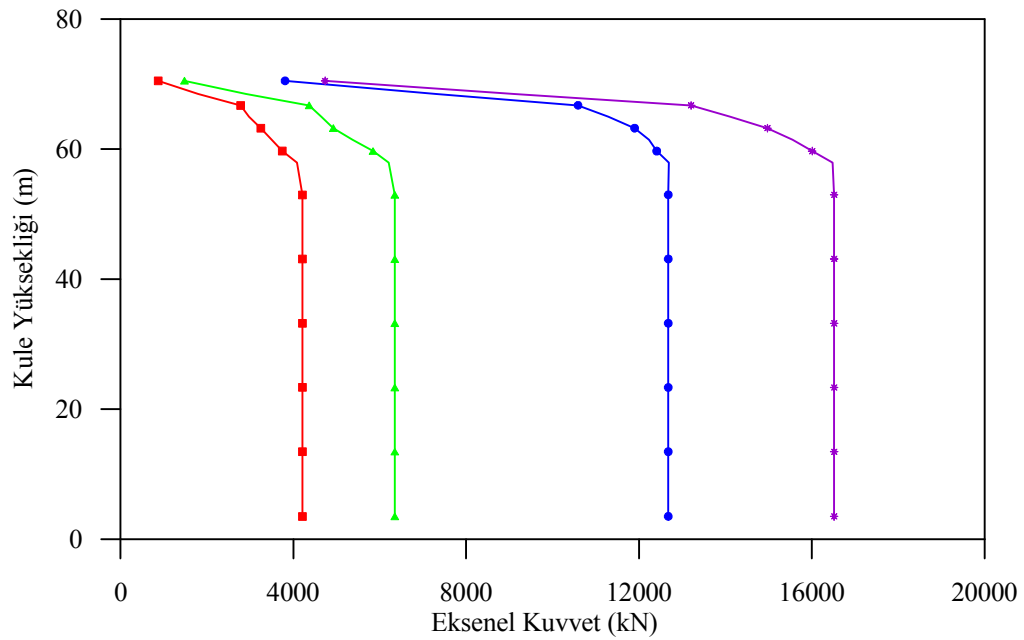
Şekil 4.110. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.111. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.112. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı C, YZE)



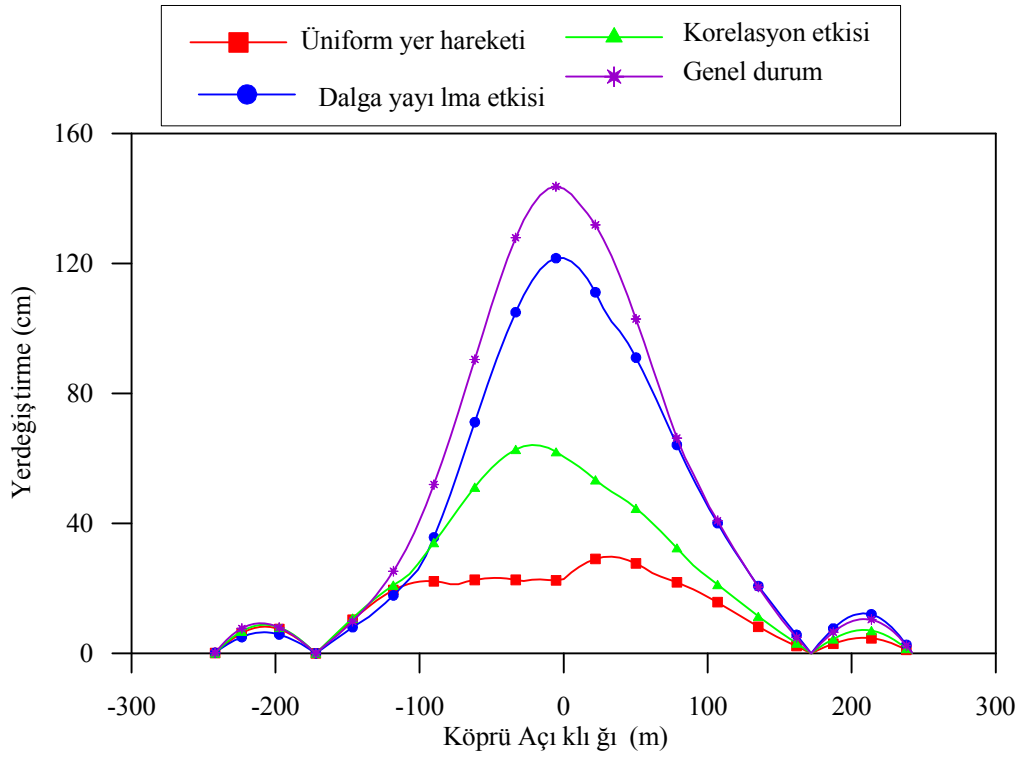
Şekil 4.113. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı C, YZE)

Zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplamından oluşan toplam yapısal tepkiler Şekil 4.114-117’de karşılaştırılmaktadır. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime oldukça benzer bir değişim elde edilmiş olup, üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Ayrıca, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler genellikle korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerden büyük çıkmaktadır.

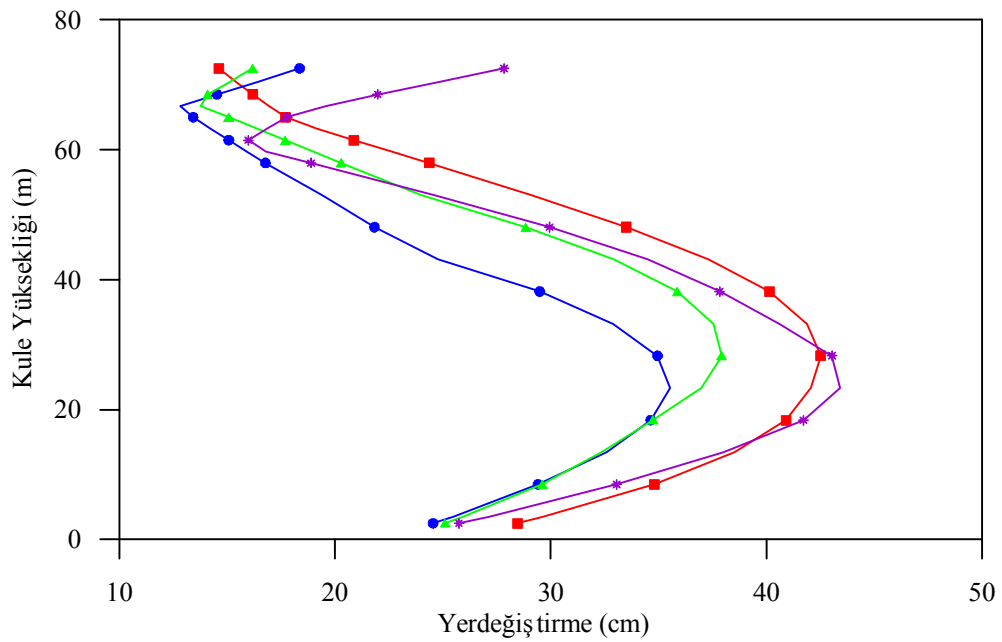
Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği genel durum, dalga yayılma, korelasyon ve üniform yer hareketi için elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 143 cm, 121 cm, 60 cm ve 23 cm olarak elde edilmiştir. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimine benzer olarak elde edilmiştir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri genellikle genel durum etkisinde elde edilirken, en küçük eğilme momenti değerleri genellikle üniform yer hareketi durumunda elde edilmiştir.

Bunu yanında kule tepe noktasında genel durum için elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri, korelasyon, dalga yayılma ve üniform yer hareketi için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %75, %56 ve %87 daha büyük çıkmıştır. Kule dinamik eğilme momenti grafiğinde olduğu gibi kule yüksekliği boyunca genel durumda en büyük eğilme momentleri elde edilmiştir.

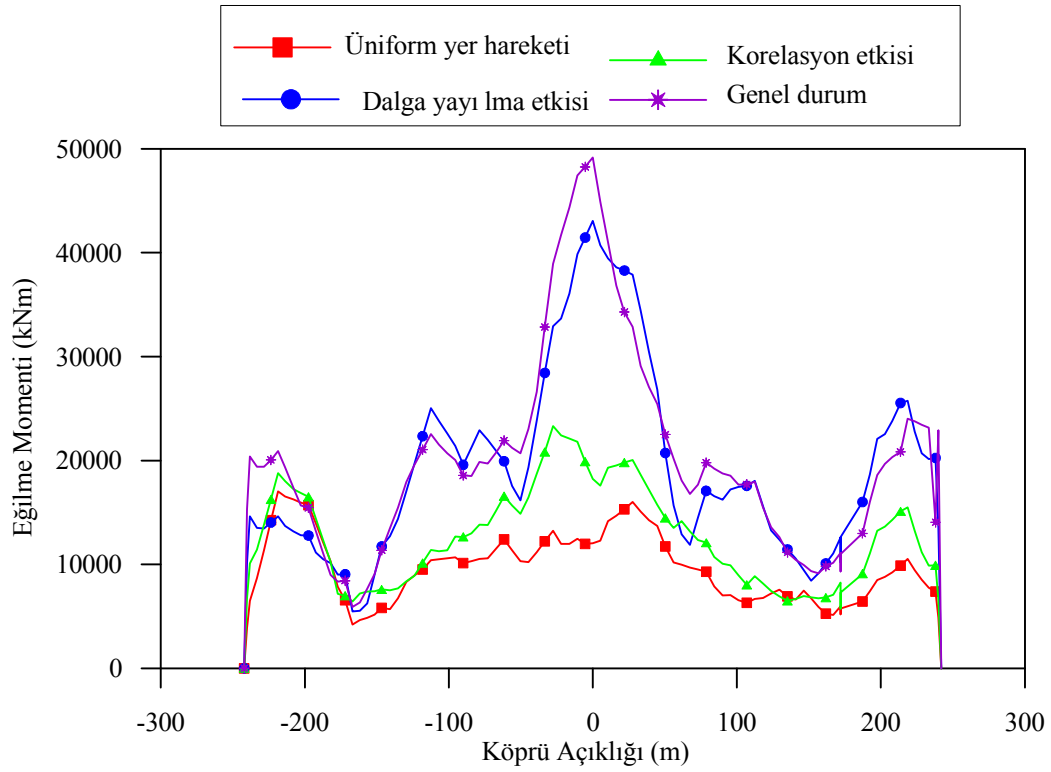
Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucu, zahiri-statik bileşenlerin toplam tepkiye katkısının dinamik bileşenler yanında önemsiz kaldığını ortaya koymuştur.



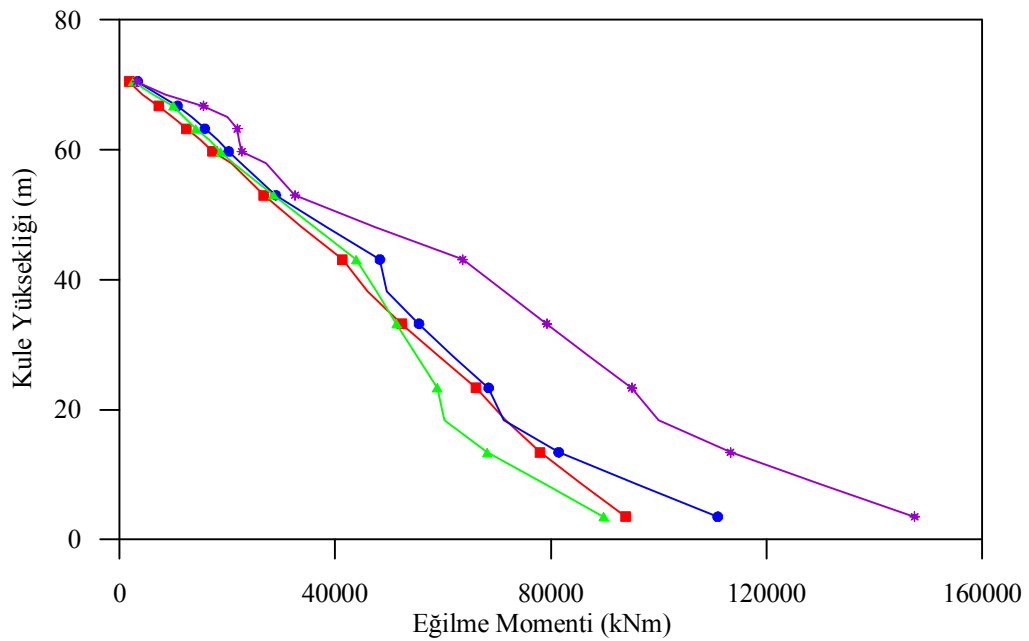
Şekil 4.114. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.115. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.116. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)



Şekil 4.117. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı C, YZE)

Yapı-zemin etkileşiminin üst yapı dinamik davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla, yapı-zemin etkileşiminin analize dahil edilmesi ve ihmal edilmesi durumunda toplam yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Köprü tabliyesinde elde edilen düşey yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modeller için Şekil 4.118-119'da karşılaştırılmaktadır. Şekillerde görüldüğü gibi yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model için elde edilen tepki değerleri, genellikle yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen tepki değerlerinden büyük çıkmıştır. Yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı modelde genel durum, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için tabliye orta noktasında elde edilen yerdeğiştirme değerleri aynı noktalarda yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen yerdeğiştirmelerden, sırasıyla %28, %5 ve %56 daha büyük çıkmıştır. Tabliyede elde edilen tepki değerleri irdelendiğinde, tabliye için yapı-zemin etkileşiminden daha çok yer hareketi değişim bileşenlerinin etkili olduğu gözlenmektedir.

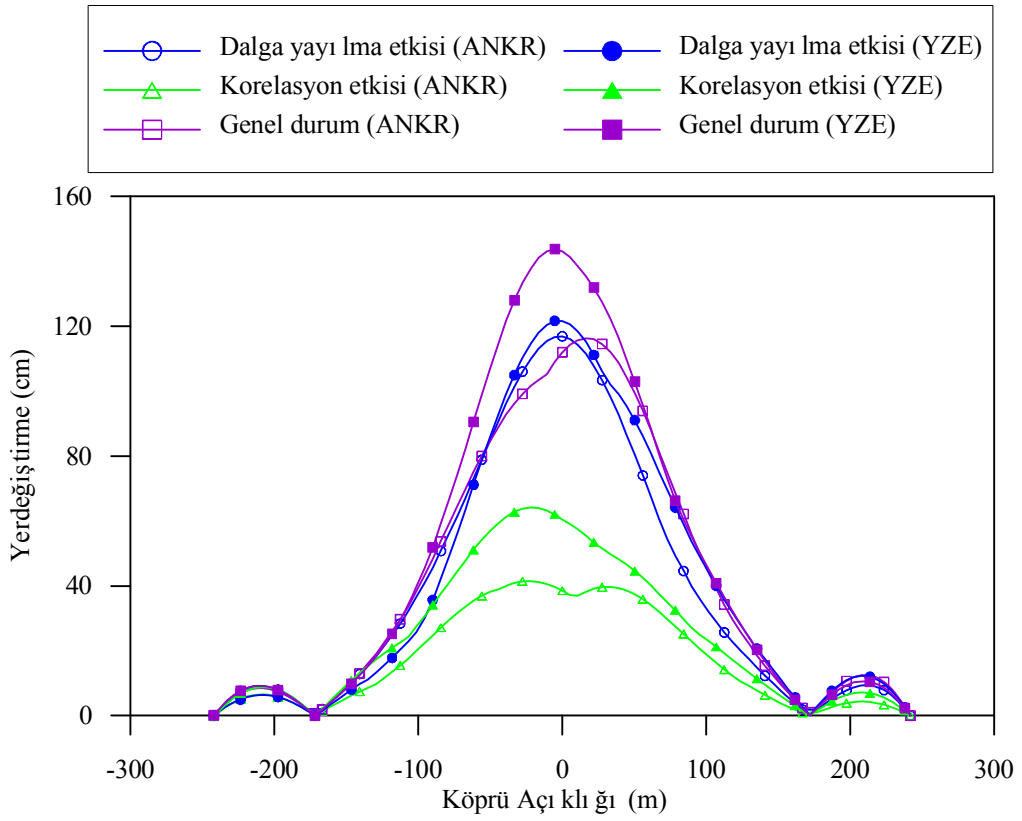
Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ve ihmal edilmesi durumunda tabliye açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri genellikle genel durumda elde edilmiştir. Tabliye düşey yerdeğiştirme grafiği ile karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin eğilme momenti değerlerini daha fazla arttırdığı görülmektedir. Şekil 4.119'da tabliye orta noktasında elde edilen moment değerleri karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması genel durumda elde edilen moment değerini %42, korelasyon etkisi için elde edilen moment değerini %74 ve dalga yayılma etkisi için elde edilen moment değerini %12 arttırmıştır.

Belirtilen analiz durumları için kulede elde edilen yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimi Şekil 4.120 ve Şekil 4.121'de karşılaştırılmaktadır. Kulede yapı-zemin etkileşimi modeli için elde edilen tepki değerleri, ankastre model için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük çıkmıştır. Bu durum kulede

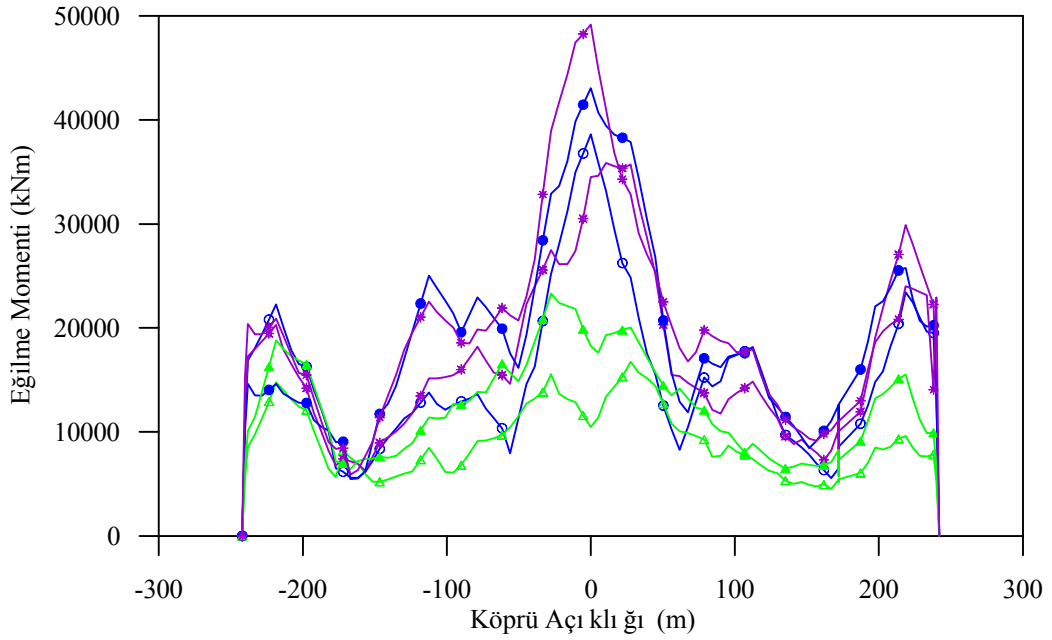
yapı-zemin etkileşiminin etkisinin, yer hareketi değişim bileşenlerinin etkisinden daha öne çıktığını göstermektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması üst yapı yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerini büyük oranda arttırmıştır. Homojen orta zeminde (C zemin sınıfı) dalga yayılma etkisinin korelasyonun etkisinden daha fazla olduğu ve bu etkinin yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması veya ihmal edilmesi ile fazla değişiklik göstermediği anlaşılmaktadır. Kule yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti grafikleri incelendiğinde yapı-zemin etkileşiminin deprem hareketi değişim bileşenlerine göre daha belirgin bir etkisinin olduğu görülmektedir.

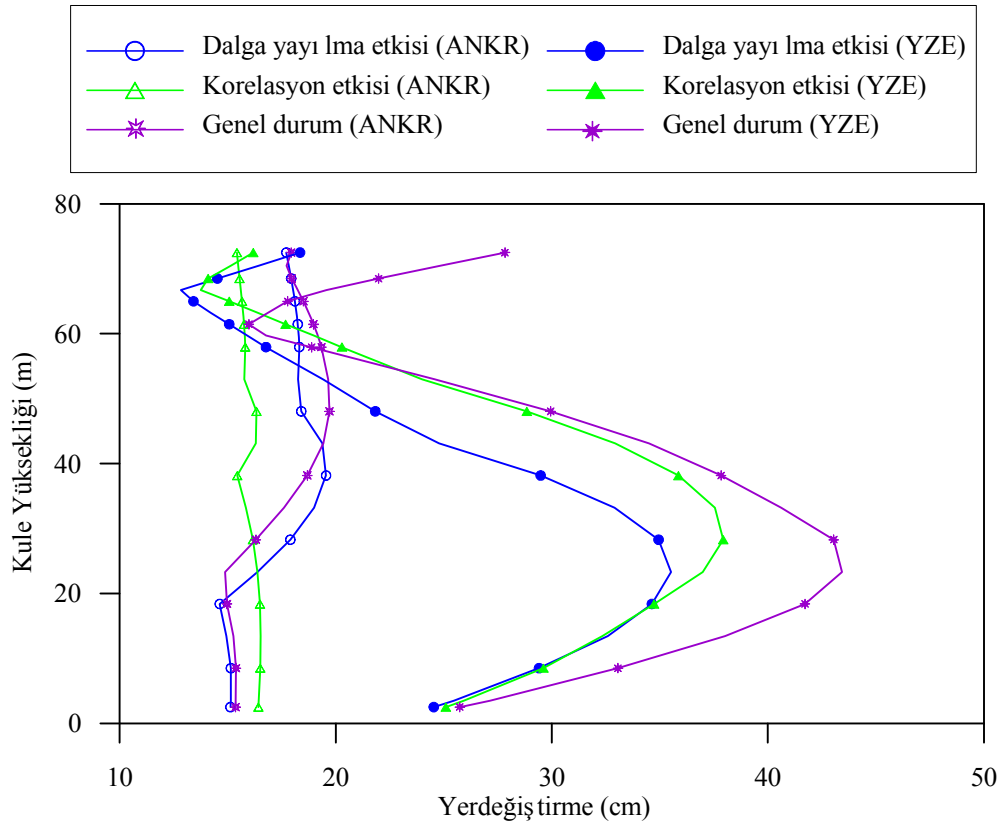
Görüleceği üzere yer hareketi değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin birlikte dikkate alınması söz konusu etkilerin ayrı ayrı toplamından ibaret değildir. Dikkate alınan tüm etkiler arasında karmaşık bir etkileşim söz konusudur. Problemin bu karmaşık yapısı nedeniyle, tek bir köprü örneğine bağlı olarak genel sonuçlar üretmek oldukça zor olmaktadır.



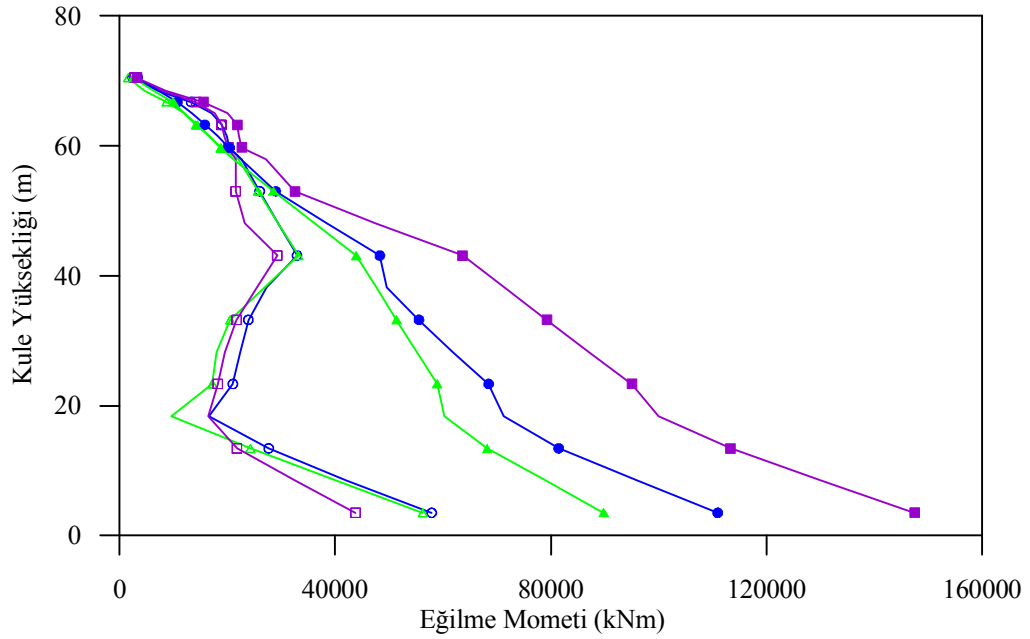
Şekil 4.118. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.119. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi



Şekil 4.120. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğiştirme değışimi



Şekil 4.121. Jindo kulesi toplam eğilme momenti değışimi

Homojen orta zeminde yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Bu bölümde köprü sisteminin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin ve deprem hareketi bileşenlerinin etkileri karşılatırmalı olarak incelenmektedir. Bu amaçla yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için yer hareketi yayılma hızının sonsuz ve 500 m/s olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen orta zemin (Zemin sınıfı C) olduğu kabulü ile yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler karşılaştırılmaktadır. Bunun yanında yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için korelasyon etkisinin dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkilerde karşılatırılmaktadır. Böylece yapı-zemin etkileşiminin ve yer hareketi yayılma bileşenlerinde dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin köprü sistemi dinamik davranışı üzerindeki etkileri karşılatırmalı olarak incelenecektir.

Yapı-zemin etkileşiminin ve dalga yayılma hızının köprü dinamik davranışı üzerindeki etkileri incelemek amacı ile, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için yer hareketi yayılma hızının sonsuz ve 500 m/s olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen sert zemin (Zemin sınıfı C) olduğu kabulü ile yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler Şekil 4.122-125’de karşılatırılmaktadır.

Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde tabliye açıklığı boyunca en büyük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelede yer hareketi yayılma hızının 500 m/s olması durumunda elde edilmiştir.

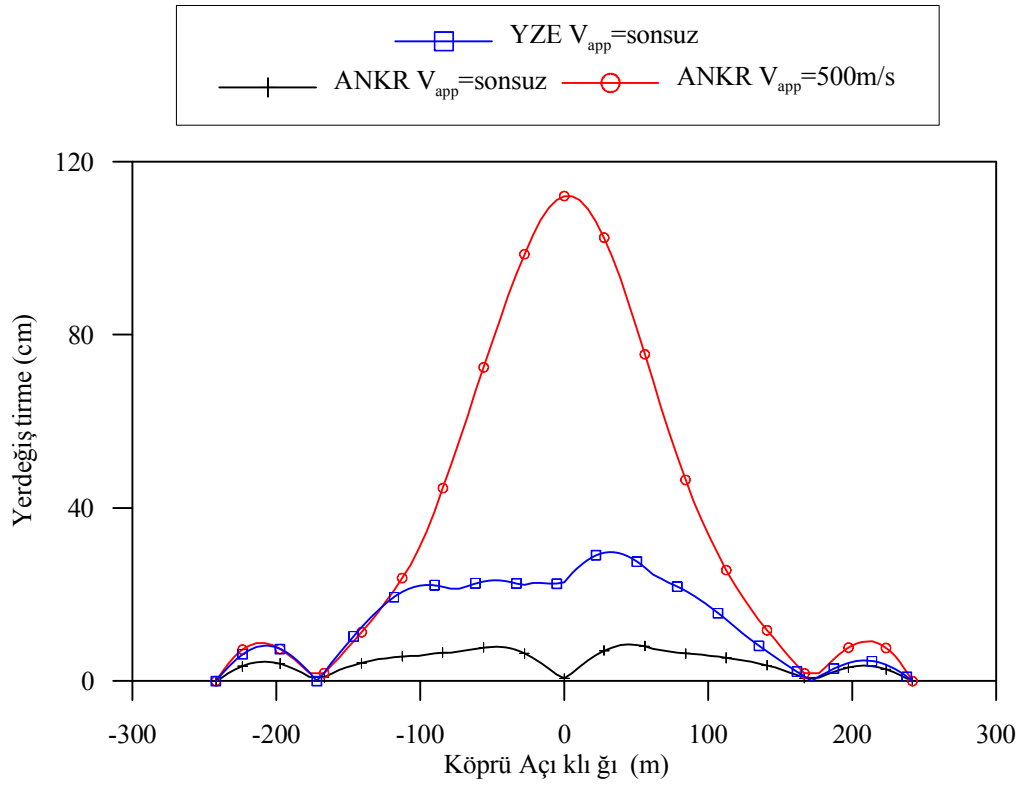
Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde kule yüksekliğinin ilk bölümünde yapı-zemin etkileşiminin yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Kule yüksekliğinin son bölümünde ise yapı-zemin etkileşiminin

dikkate alınmadığı ankastre modelde yer hareketi yayılma hızının 500 m/s olması durumunda en büyük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Kule yatay yerdeğiştirme değişim incelendiğinde yapı-zemin etkileşiminin etkisinin yer hareketi yayılma hızının etkisinden daha belirgin olduğu görölmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması kule tepe noktasında elde edilen yatay yerdeğiştirme değerini %250, yer hareketi yayılma hızının dikkate alınması durumunda ise %850 oranında arttığı görölmektedir.

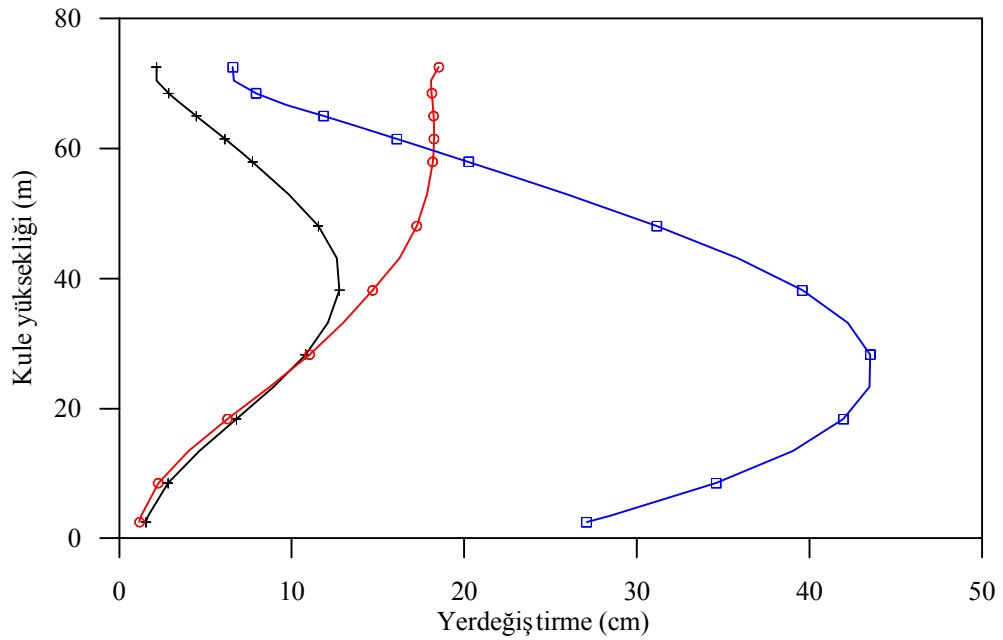
Tabliye dinamik eğilme momenti değişimine ait grafik incelendiğinde tabliye dinamik yerdeğiştirme grafiğinde olduğu gibi köprü açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri yer hareketi yayılma hızının dikkate alınması durumunda elde edilmiştir. Tabliye eğilme momentleri için yapı-zemin etkileşiminin dalga yayılma etkisi kadar etkin olmadığı görölmüştür.

Kule dinamik eğilme moment değişimine ait grafikte kule yüksekliği boyunca genellikle yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda elde edilen moment değerlerinin en büyük olduğu görölmektedir.

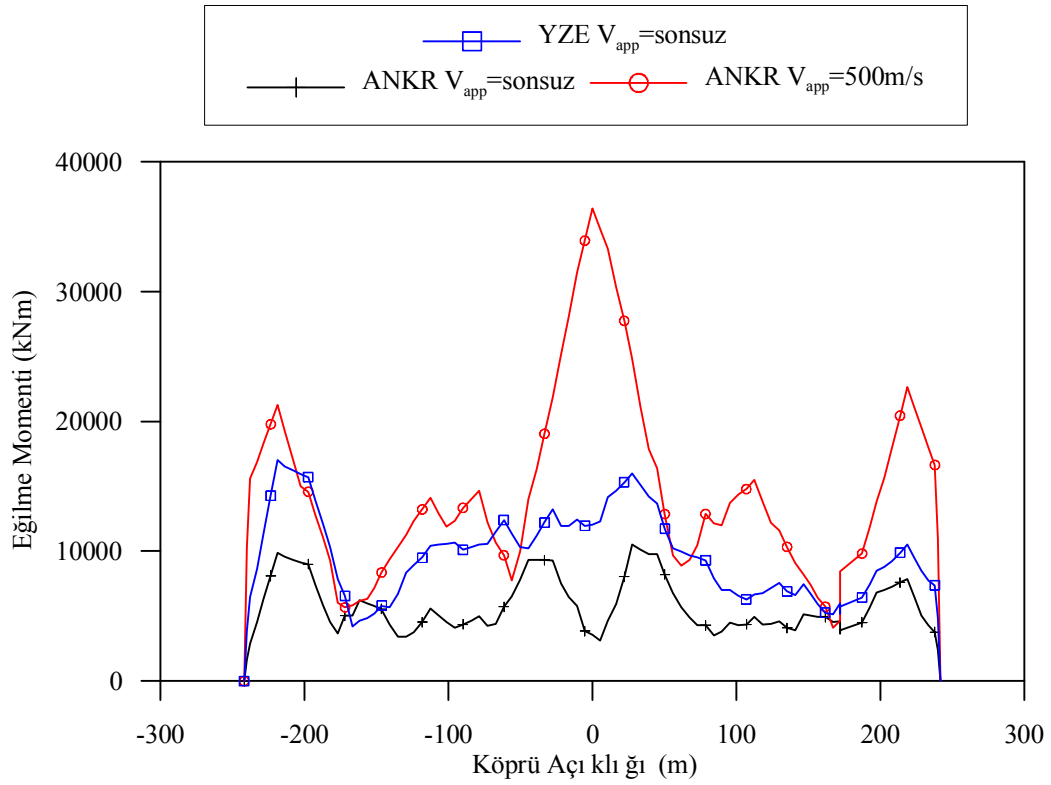
Orta zemin koşullarında mesnetlendiği düşünölen köprü sistemi, yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinin dalga yayılma etkisi açısından göreceli olarak incelendiğinde, kulelerde yapı-zemin etkileşiminin tabliyede ise dalga yayılma etkisinin öne çıktığı görölmektedir.



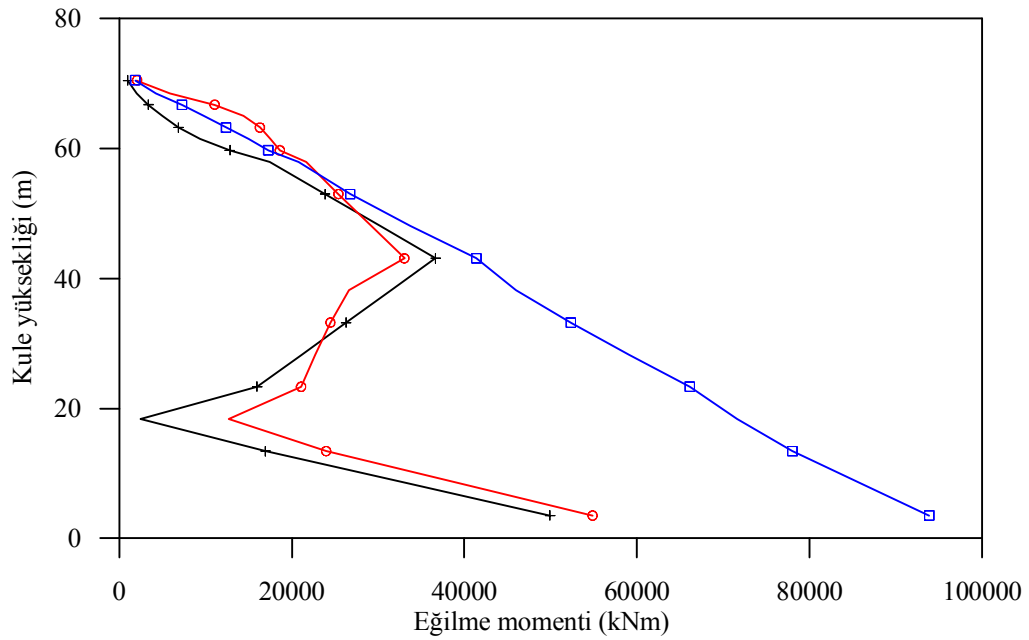
Şekil 4.122. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.123. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.124. Tabliye dinamik eğilme momentleri



Şekil 4.125. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri

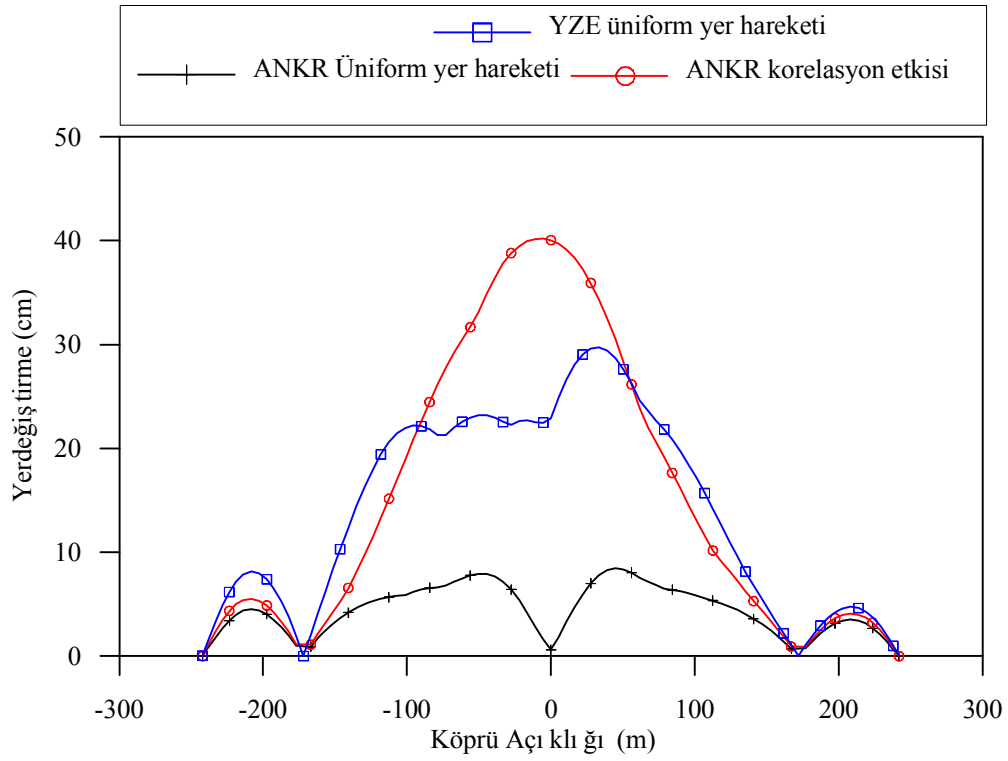
Yapı-zemin etkileşiminin ve korelasyon etkisinin köprü dinamik davranışı üzerindeki göreceli etkilerini incelemek amacı ile, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için üniform yer hareketi ve korelasyon etkisine bağlı olarak elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen orta zemin (Zemin sınıfı C) olduğu kabulü ile üniform yer hareketi etkisi için elde edilen yapısal tepkiler. Şekil 4.126-129'da karşılaştırılmaktadır.

Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde en büyük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelde korelasyon etkisinin dikkate alınması durumunda orta açıklık orta bölgesinde elde edilmiştir. Kenar açıklıklarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model için elde edilen yerdeğiştirmelerin daha fazla olduğu görülmektedir.

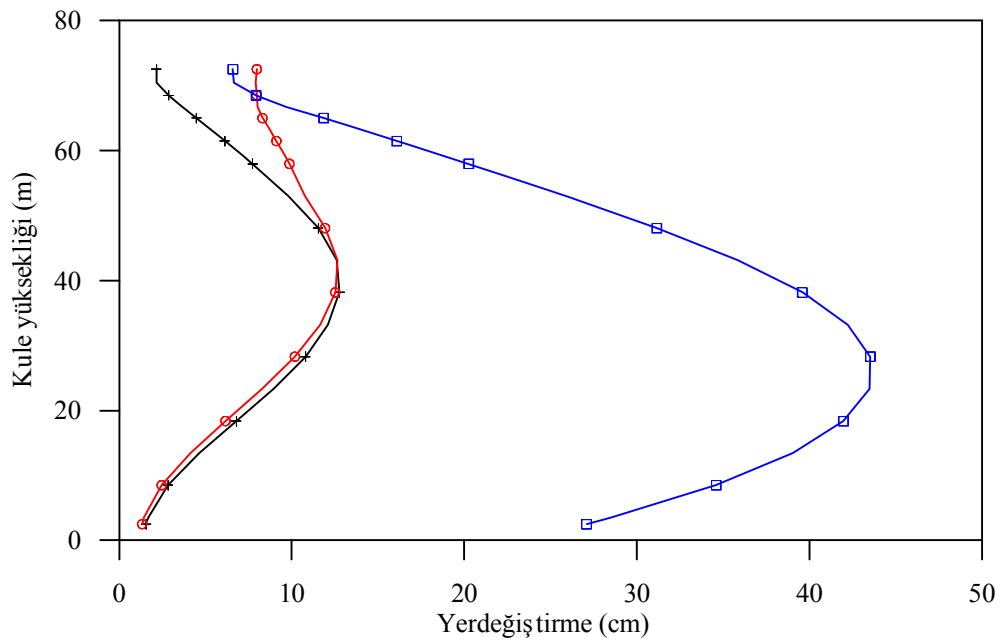
Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde kule yüksekliği boyunca en büyük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda elde edilmiştir.

Tabliye ve kule eğilme moment değişimlerine ait grafikler incelendiğinde ise yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

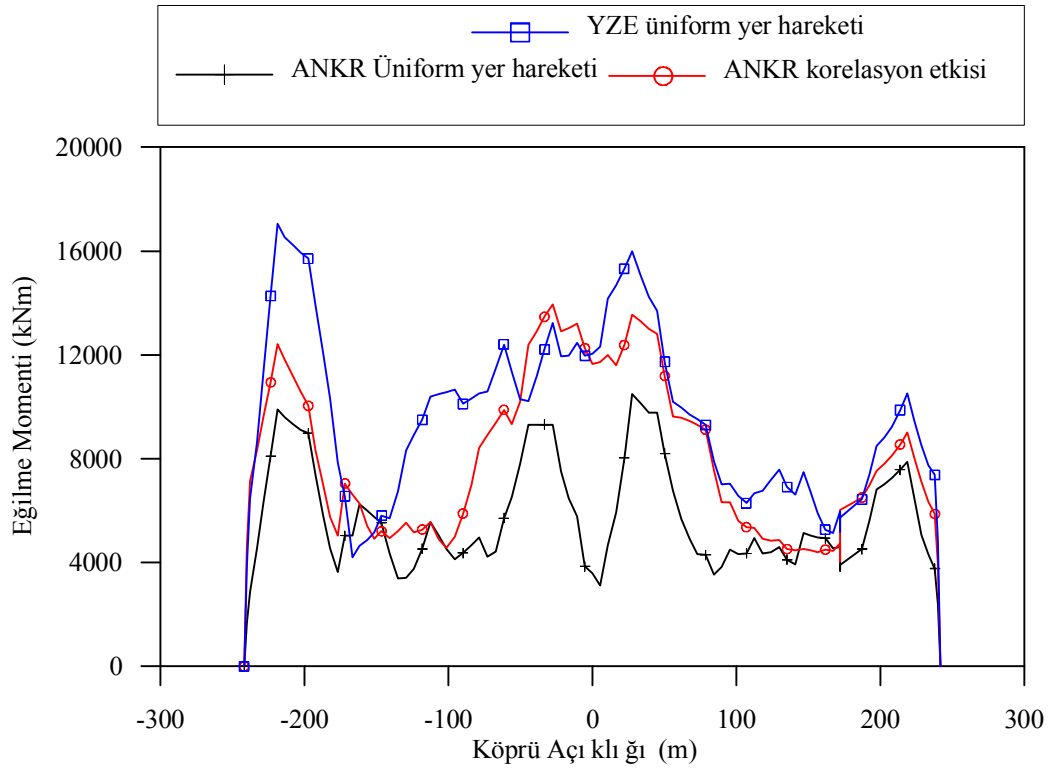
Yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinden korelasyon etkisinin tabliye tepkileri üzerinde önemli etkilerinin olduğu görülürken, kulelerde korelasyon etkisinin çok etkin olmadığı, ancak yapı-zemin etkileşiminin tepkileri önemli oranda arttırdığı anlaşılmaktadır.



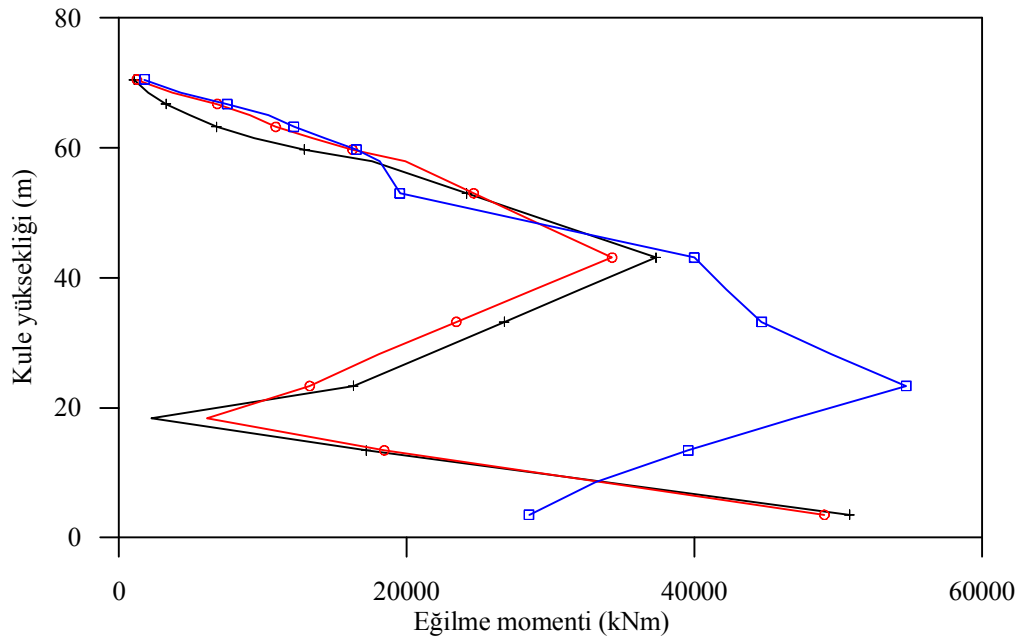
Şekil 4.126. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.127. Kule dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



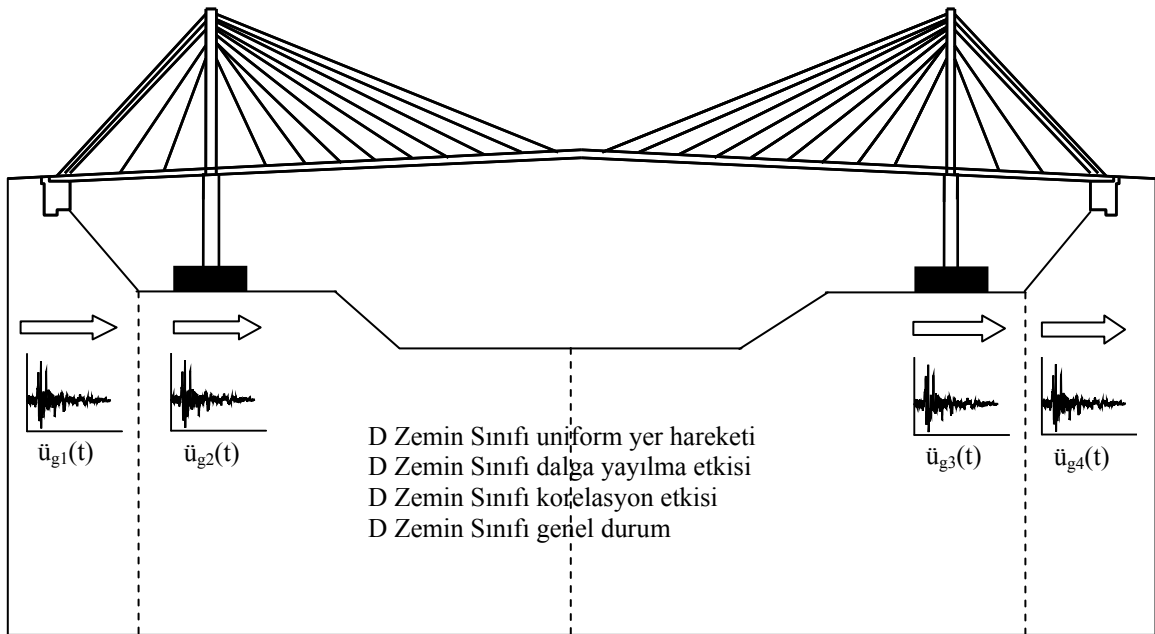
Şekil 4.128. Tabliye dinamik eğilme momentleri



Şekil 4.129. Kule dinamik eğilme momentleri

### 4.3.3. Homojen yumuşak zemin ortamında deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi

Bu bölümde köprünün mesnetlendiği zeminin homojen yumuşak zemin (Zemin sınıfı D) olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkilerinin beraber dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak elde edilen yapısal tepkilere ait zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler ayrı ayrı incelenmektedir.



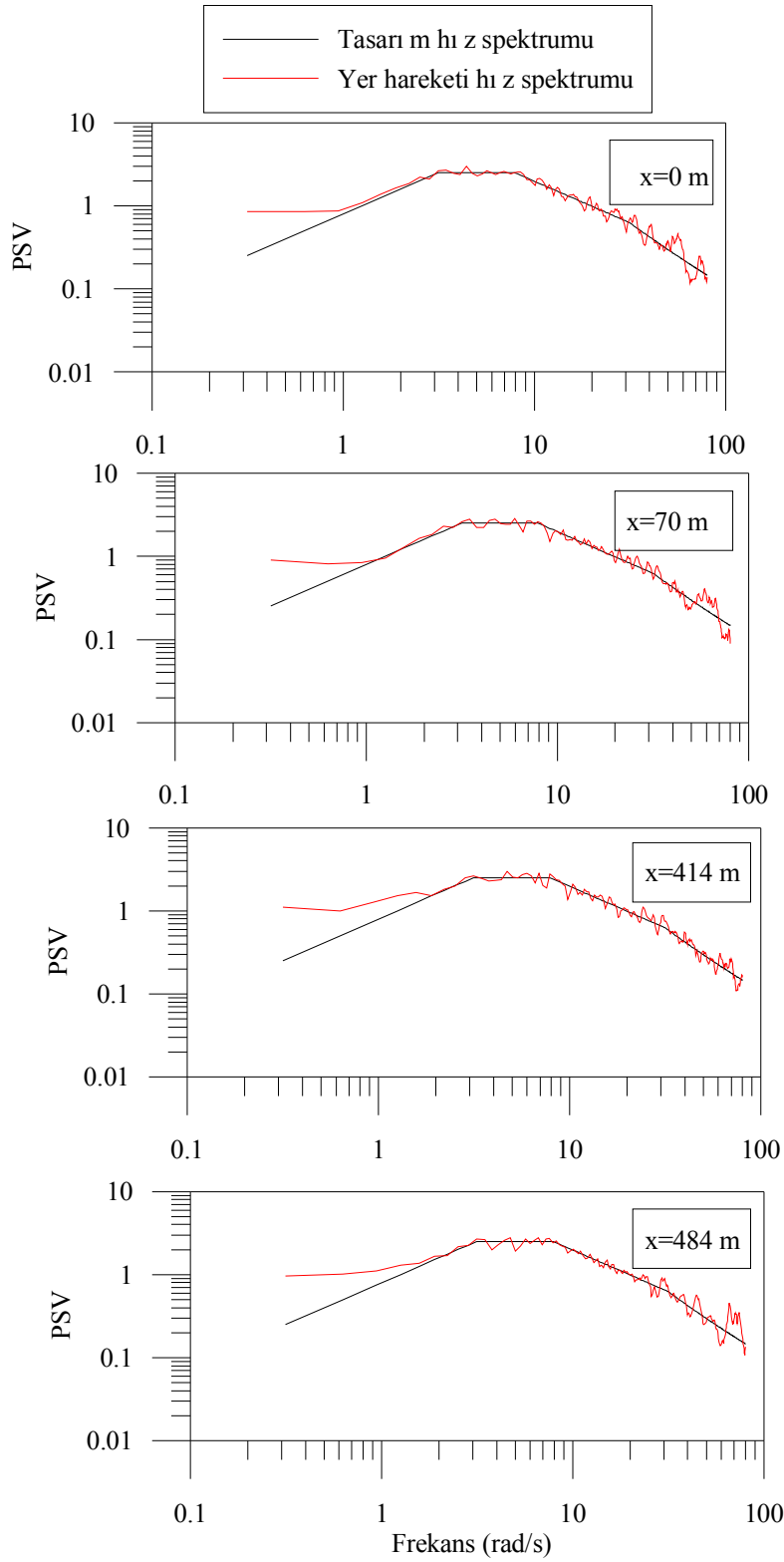
Şekil 4.130. Üniform ve üniform olmayan yer hareketi etkisindeki köprü sistemi

Köprü mesnetlerinin homojen yumuşak zemin ortamında (zemin sınıfı D) olması durumunda dalga yayılma ( $V_{app}=400$  m/sn) ve korelasyon etkilerinin beraber dikkate alınması durumunda  $N=512$  terim,  $\Delta t = 0,039$  s için toplam 20 s'lik ivme kayıtları oluşturulurken aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir.

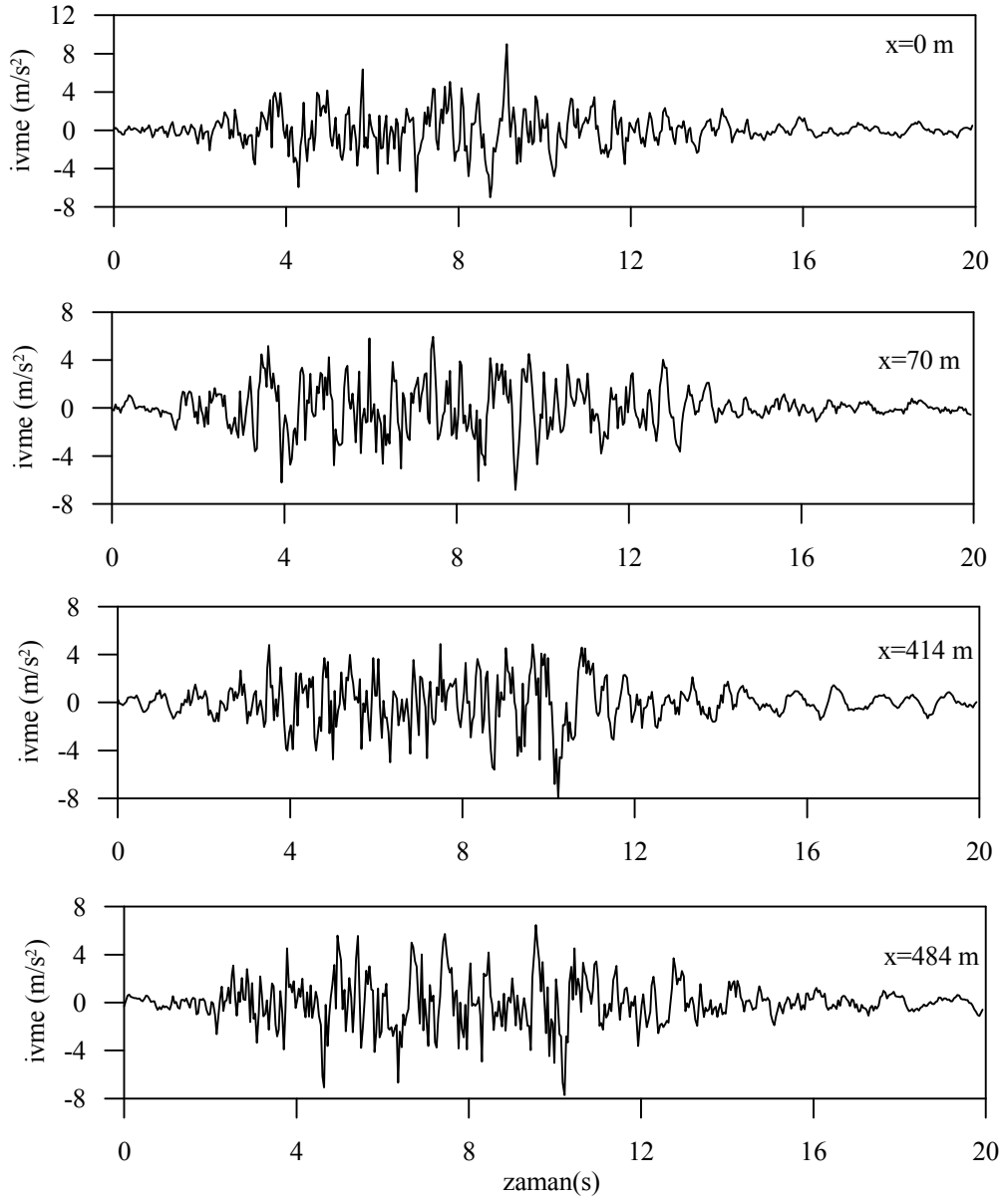
Kullanılacak yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli

kullanılarak (Eş. 3.1) elde edilmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu için Çizelge 3.1’de verilen filtre parametreleri kullanılmaktadır.

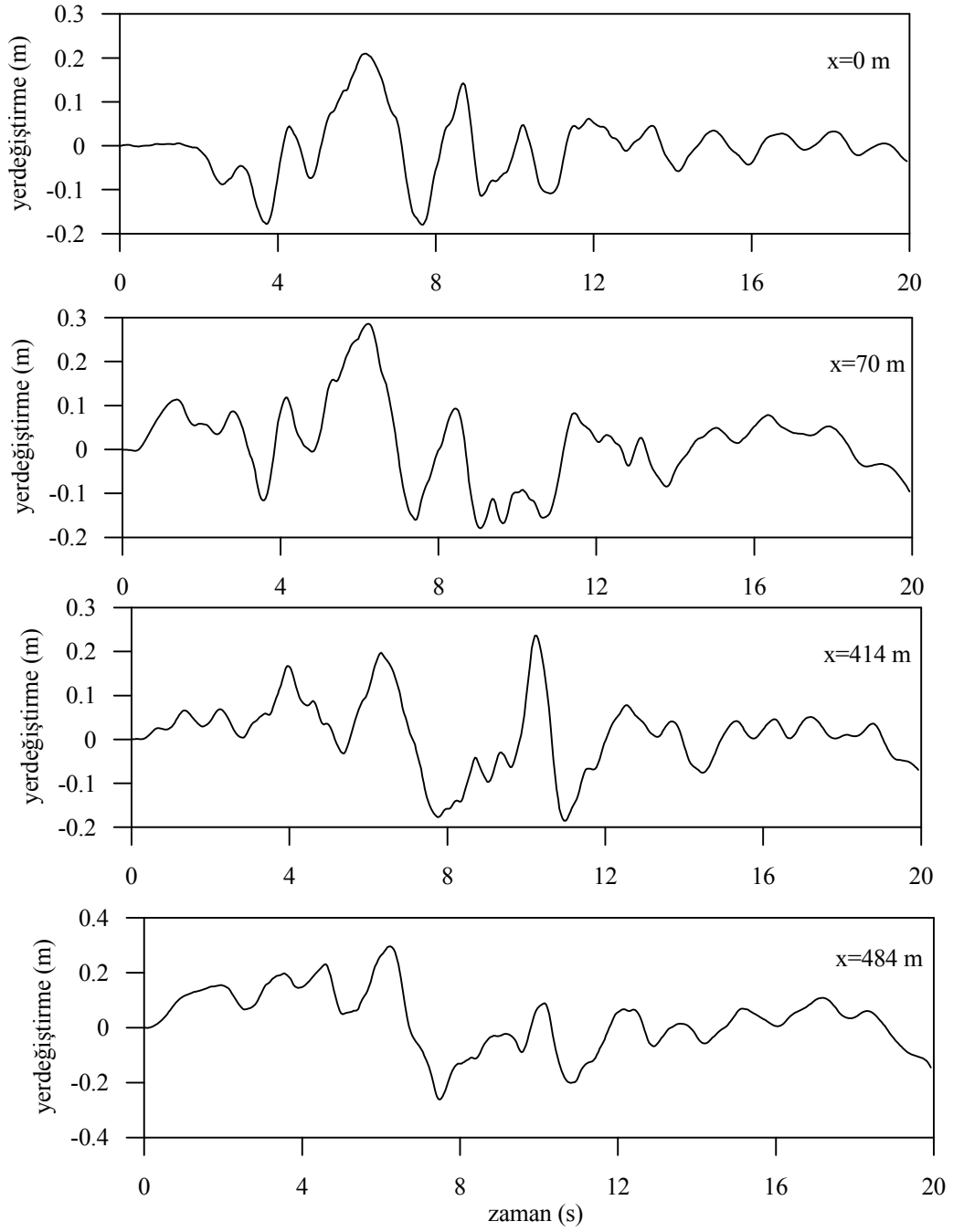
1. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Uygunluk fonksiyonundaki (Eş. 3.7) korelasyon modeli için Harichandran ve Vanmarcke tarafından önerilen korelasyon modeli kullanılmaktadır. Eş. 3.8’de gösterilen korelasyon modeli için  $A=0,636$ ,  $\alpha=0,0186$ ,  $k=31200$ ,  $f_0=1,51\text{Hz}$  ve  $b=2,95$  amprik sabitleri kullanılmaktadır. Dalga yayılma etkisi uygunluk fonksiyonunda Eş. 3.10 ile dikkate alınmaktadır
2. Deprem hareketi stasyoner olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyoner olmayan yer hareket ivmeleri, stasyoner olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılmasından elde edilmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydı Eş. 3. 22 ile gösterilen şekil fonksiyonu ile çarpılmaktadır.
3. Elde edilen ivme kayıtları %2 sönüm oranı için ve 0,5g PSA’ya göre normalize edilmek suretiyle EC8 ile uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Şekil 4.131’de D zemin sınıfı için genel durum etkisinde elde edilen yer hareketi hız spektrumu ile EC8 tasarım hız spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir.
4. Elde edilen ivme kayıtlarına Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 4.132-133’de genel durumda D zemin sınıfı için elde edilen yer hareketine ait eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.131. Yumuşak zemin ortamında genel durum için üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması



Şekil 4.132. Genel durum için homojen yumuşak zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri



Şekil 4.133. Genel durum için homojen yumuşak zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme zaman grafikleri

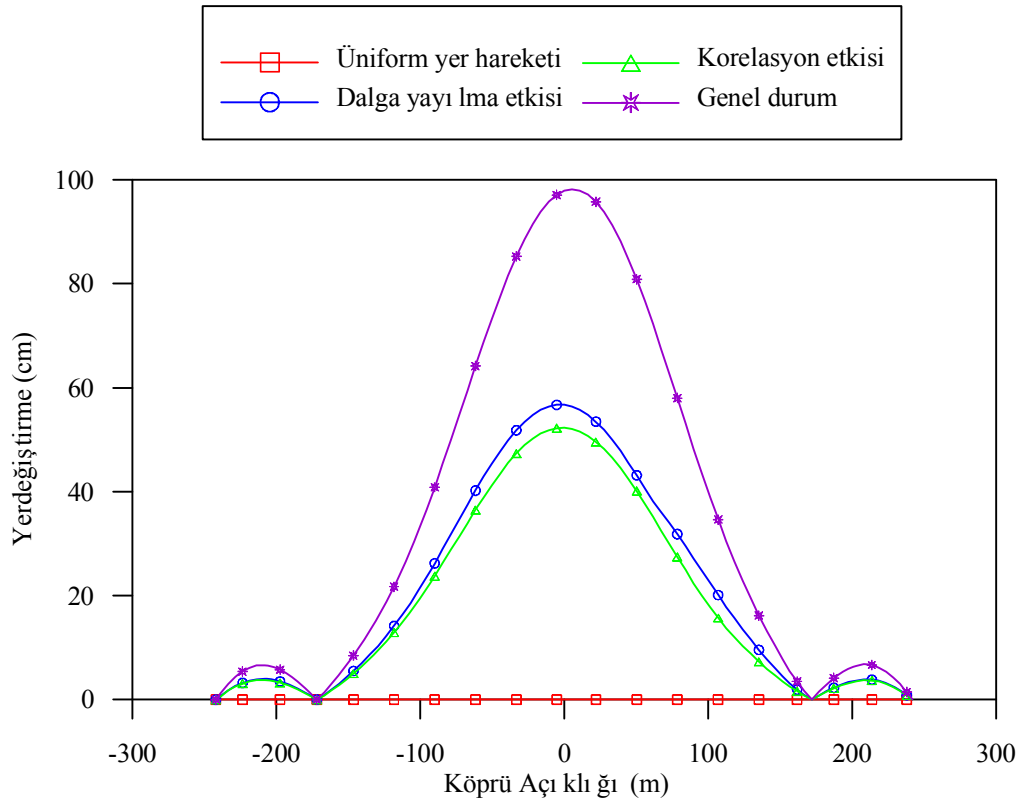
Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre durumda deprem hareketi değişim bileşenlerinin yumuşak zemin ortamında incelenmesi

Bu bölümde köprünün mesnetlendiği zeminin D zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait yapısal tepkiler için zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler ayrı ayrı incelenecektir.

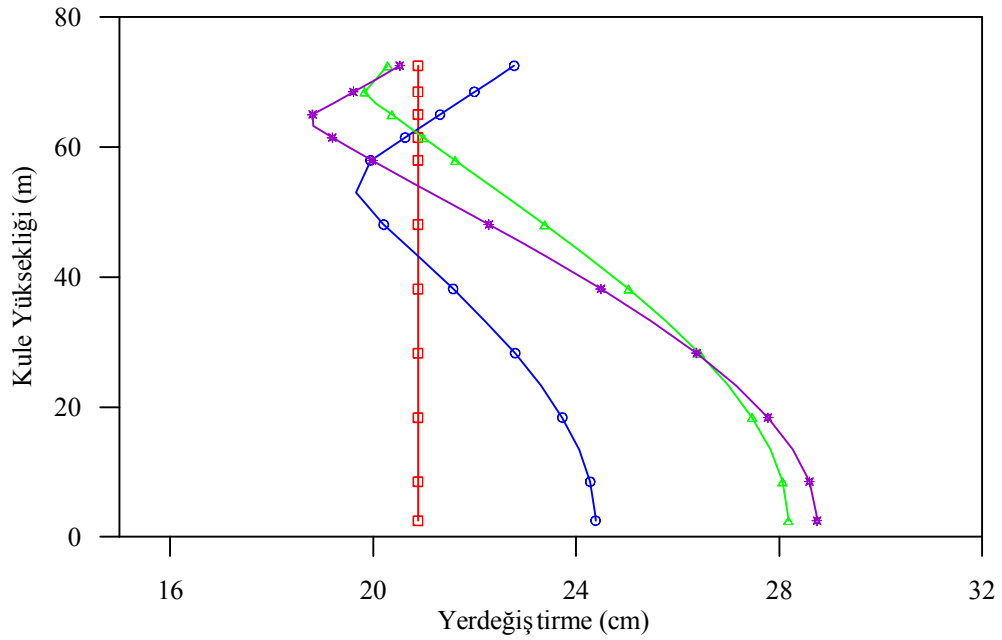
Gerek yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği, gerekse dikkate alındığı her iki model için de zahiri-statik yapısal tepkiler birbirine eşit olacaktır. Bu bağlamda tabliye ve Jindo kulesi için hesaplanan yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri dikkate alınan analiz durumları için Şekil 4.134-136'da karşılaştırılmaktadır. Üniform yer hareketi durumunda rijit cisim hareketi söz konusu olacağından, zahiri-statik eleman kuvvetleri sıfır olarak elde edilmiştir. Bunun yanında yatay doğrultuda uygulanan yer hareketi nedeniyle tabliye düşey yerdeğiştirmeleri sıfır olurken, kule yatay yerdeğiştirmeleri kule yüksekliği boyunca sabit olmaktadır.

Korelasyon etkisi, dalga yayılma etkisi ve her iki etkinin birlikte dikkate alındığı analiz durumları için elde edilen zahiri-statik tepki değerlerinin incelenmesi sonucunda, genellikle korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerin en küçük olduğu görülürken, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin birlikte dikkate alındığı durumdaki tepki değerleri en büyük olmaktadır.

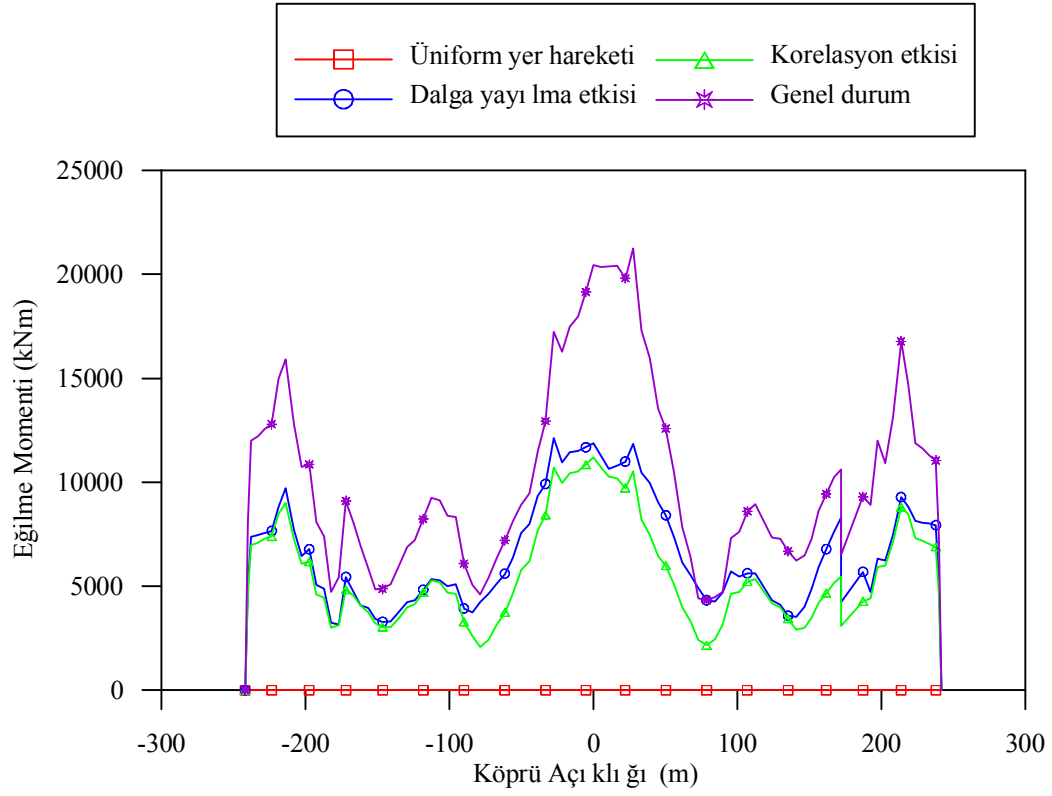
Tabliye orta noktasında korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin dikkate alınarak belirlendiği yerdeğiştirme değeri, korelasyon ve dalga yayılma etkilerinin ayrı ayrı dikkate alındığı analiz durumları için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %89 ve %75 daha büyük çıkmıştır. Bunun yanında kule taban noktasında genel durum etkisinin dikkate alınarak belirlendiği eğilme momenti değeri, dalga yayılma etkisi ve korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %56 ve %72 daha büyük çıkmıştır.



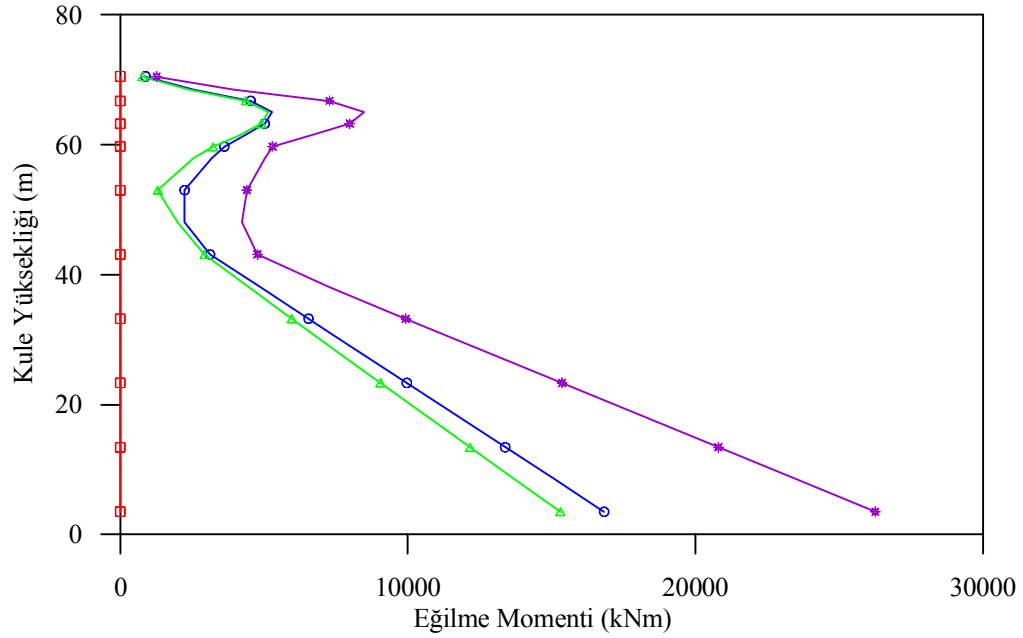
Şekil 4.134. Tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D)



Şekil 4.135. Jindo kulesi zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D)



Şekil 4.136. Tabliye zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D)

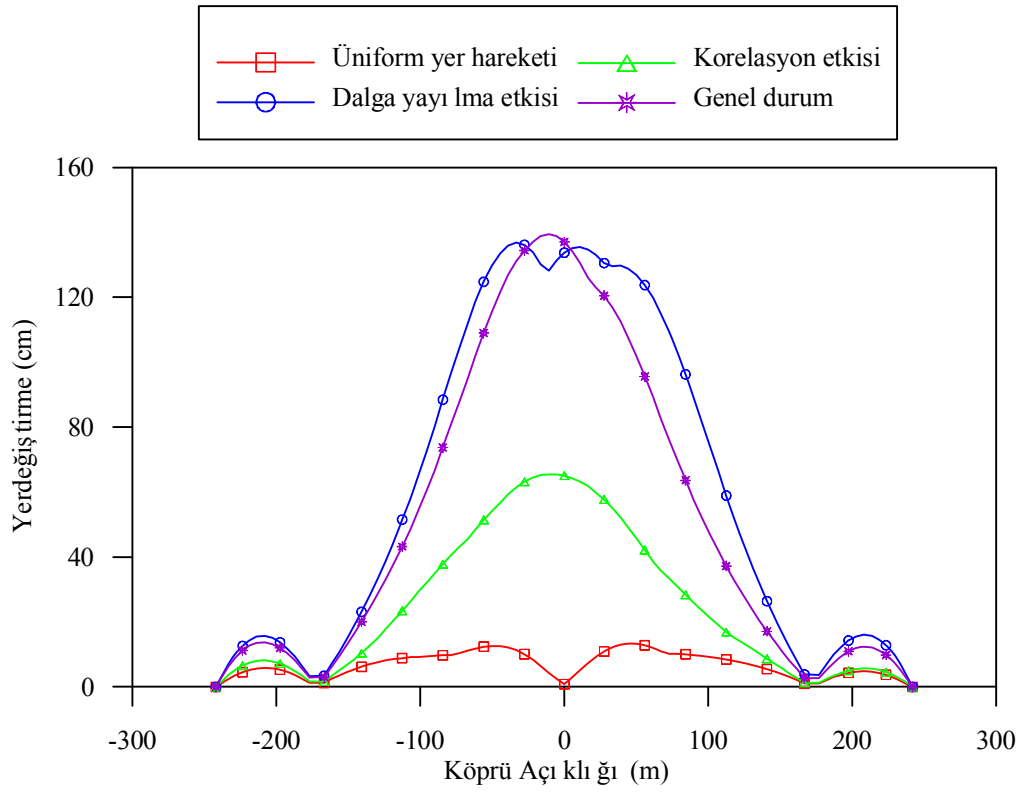


Şekil 4.137. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D)

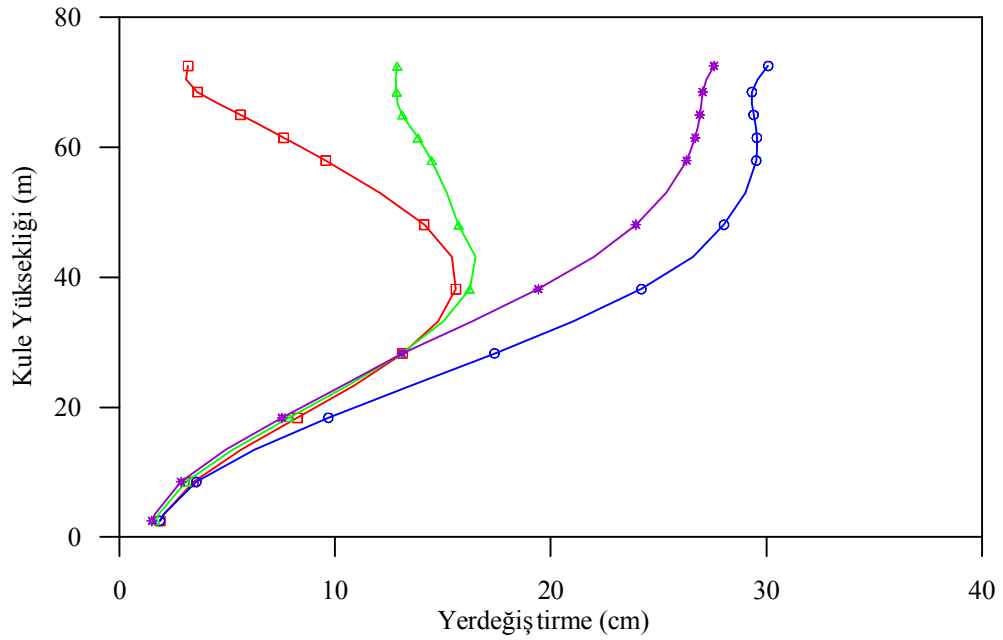
Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilerek, köprü sisteminin zemine ankastre olarak mesnetlendiği model için gerçekleştirilen analizler ile elde edilen dinamik tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.138-143'de karşılaştırılmaktadır. Genel olarak üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, dalga yayılma etkisi ve genel durum etkisi için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Dalga yayılma etkisinin üst yapı-dinamik davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Korelasyon etkisinde elde edilen yapısal tepkiler ise genel durum ve dalga yayılma etkisinde elde edile yapısal tepkilere göre çok küçük bulunmuştur.

Zahiri-statik tabliye yerdeğiştirme grafiğinde en büyük yerdeğiştirmeler genel durum etkisinde elde edilirken dinamik yerdeğiştirme grafiğinde dalga yayılma etkisinde elde edilen yerdeğiştirmelerin köprü orta bölümü hariç genel durum etkisinde elde edilen yerdeğiştirmelerden büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kule tepe noktasında dalga yayılma etkisinde elde edilen yerdeğiştirme değeri dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği genel durum etkisinde elde edilen yerdeğiştirmeden %7, korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden %130 daha büyük olduğu görülmüştür. Farklı analiz durumları için kule yüksekliği boyunca belirlenen eğilme momenti değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Kule taban noktasında dalga yayılma etkisinin dikkate alınarak belirlendiği eğilme momenti değeri, genel durum ve korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %22 ve %23 daha büyük çıkarken, üniform yer hareketi için elde edilen momentten %27 daha büyük çıkmıştır.

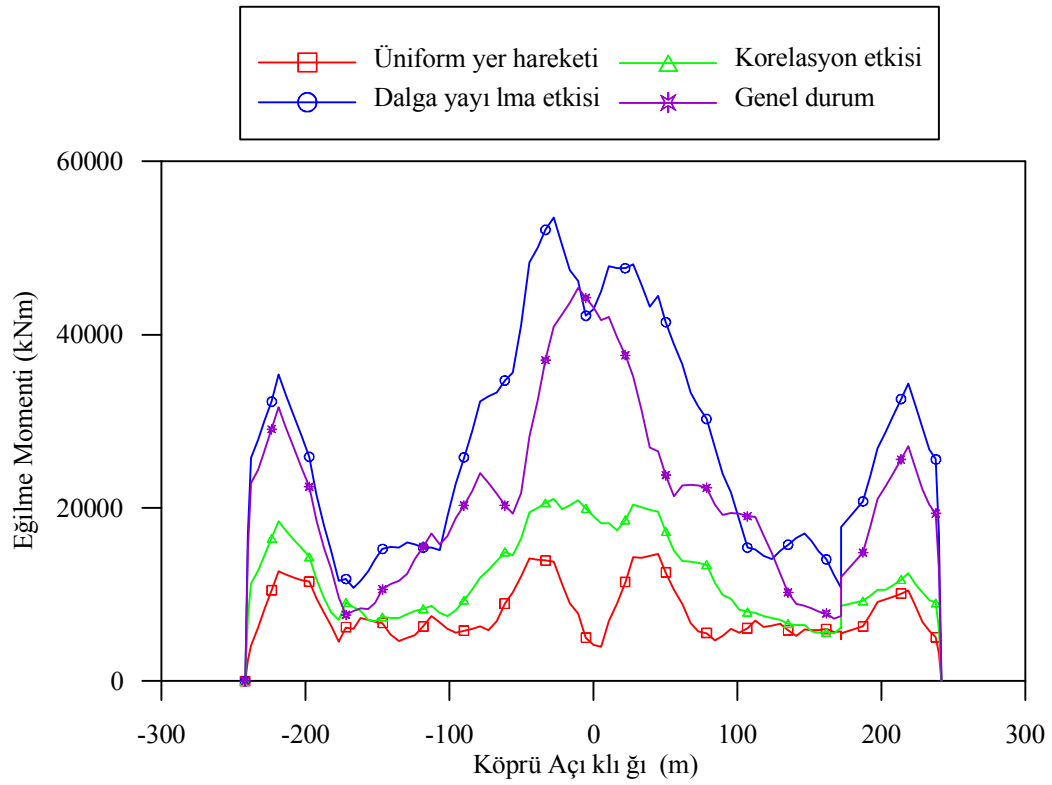
Şekil 4.142'de tabliye dinamik kesme kuvveti değişimi görülmektedir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük kesme kuvvetleri dalga yayılma etkisi için elde edilirken, tabliye dinamik eğilme momenti grafiğinde olduğu gibi korelasyon ve üniform yer hareketi etkisinde elde edilen kesme kuvvetleri birbirine yakın bulunmuştur. Şekil 4.143'de Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvet değişimi görülmektedir. En büyük eksenel kuvvet değerlerinin dalga yayılma etkisinde elde edildiği görülmektedir.



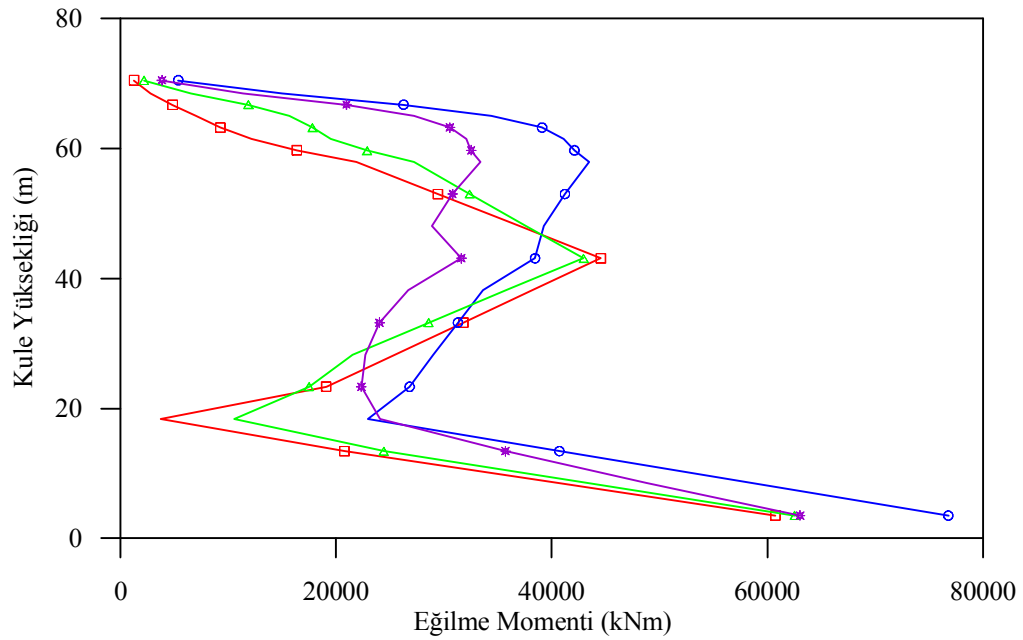
Şekil 4.138. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



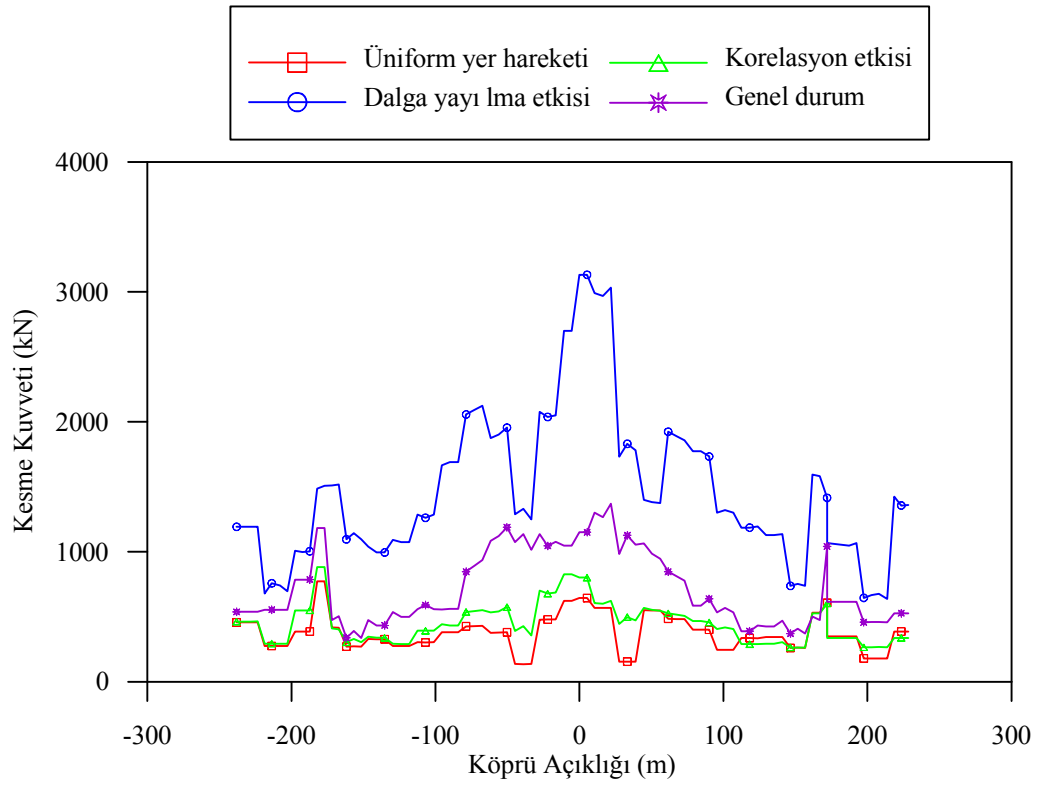
Şekil 4.139. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



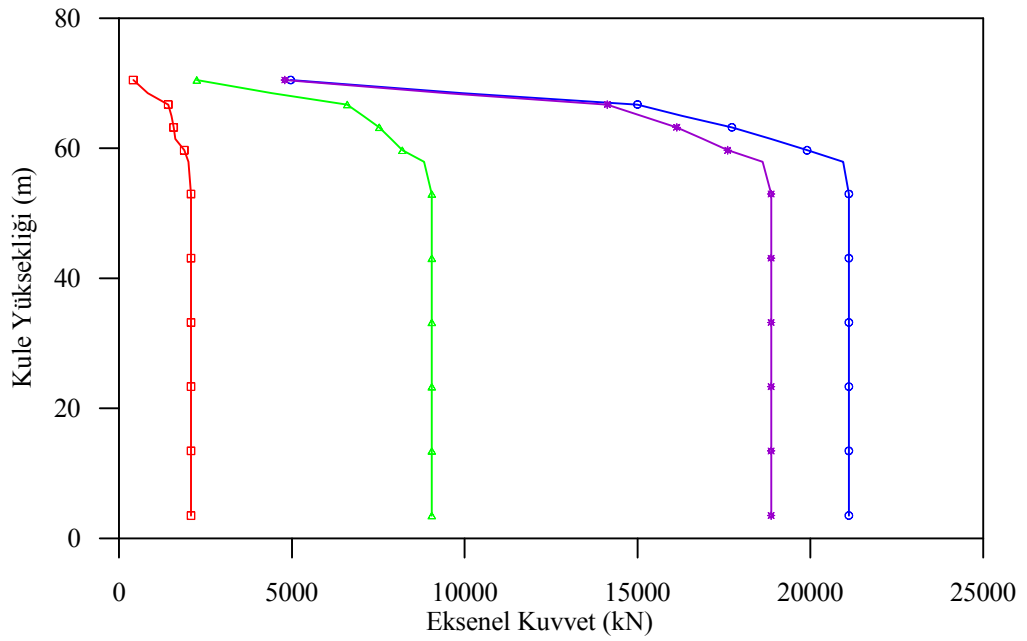
Şekil 4.140. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



Şekil 4.141. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



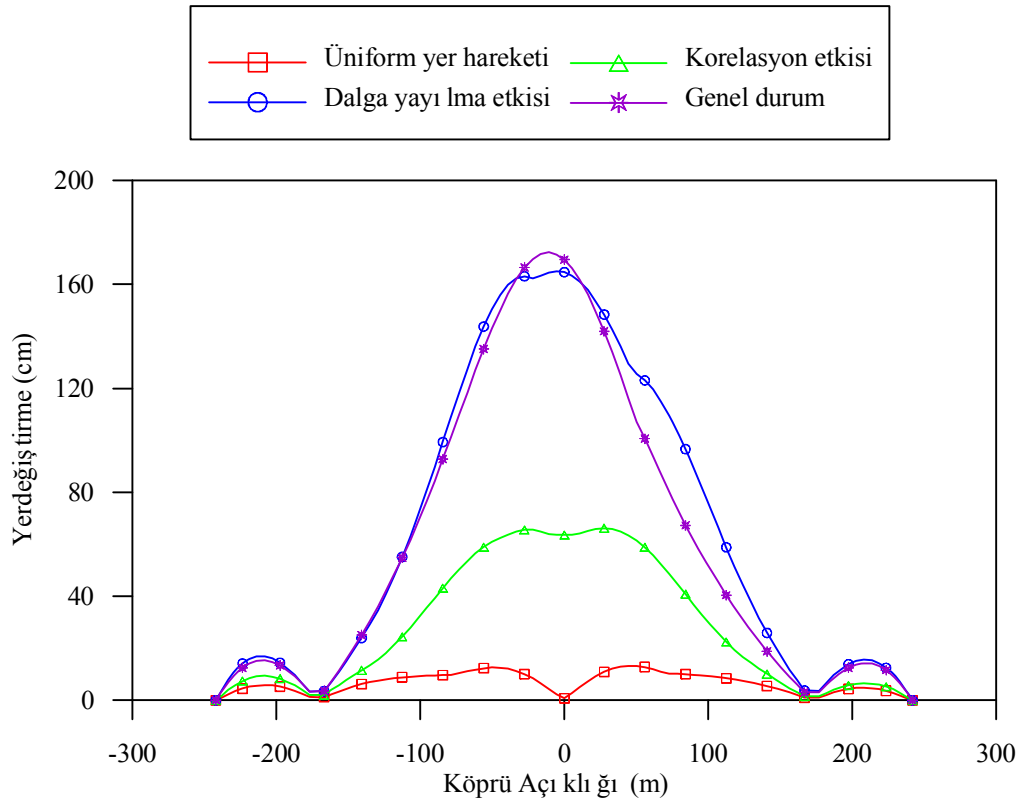
Şekil 4.142. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



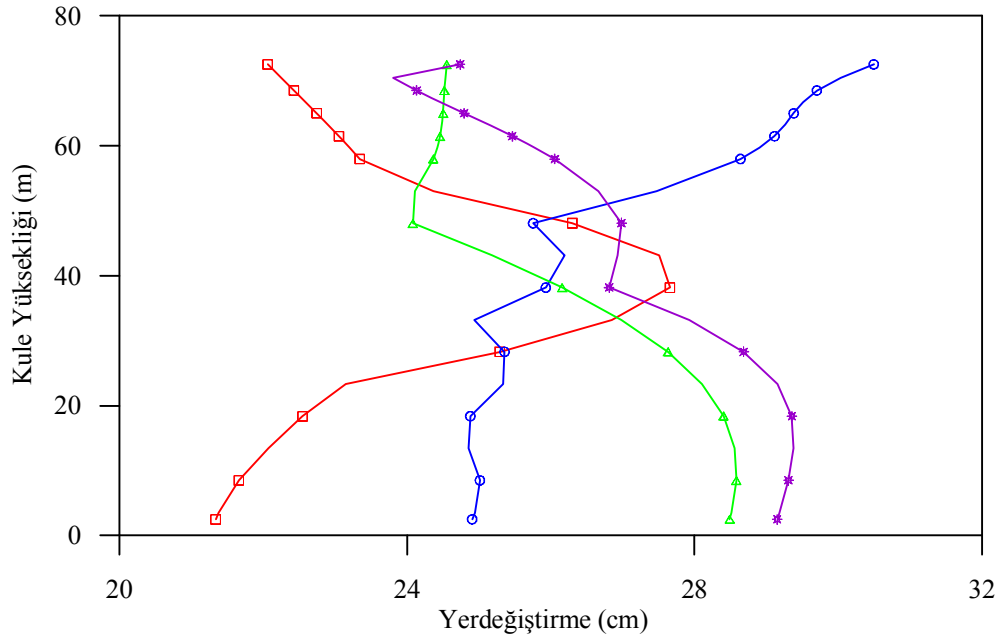
Şekil 4.143. Jindo dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı D, ANKR)

Zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplamından oluşan toplam yapısal tepkiler Şekil 4.144-147’de karşılaştırılmaktadır. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiş olup, üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Yumuşak zemin ortamında elde edilen yapısal tepkilere zahiri-statik bileşenin katkısının önemsiz olduğu anlaşılmaktadır.

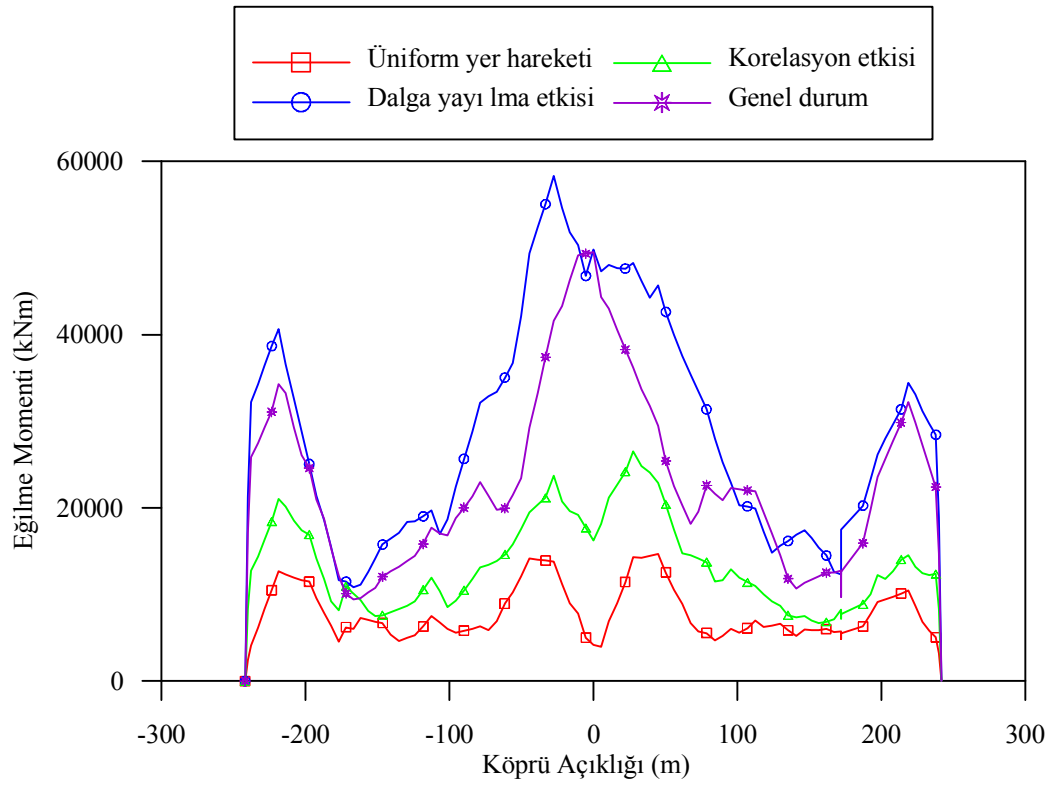
Tabliye orta noktasında dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin beraber dikkate alındığı genel durum etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirme değerinden sırasıyla %3 ve %166 daha büyük çıkmıştır. Kule tepe noktasında sadece dalga yayılma etkisinde elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri, genel durum etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerinden %20, üniform yer hareketi etkisinde elde edilen yerdeğiştirme değerinden %36 daha büyük çıkmıştır. Tabliye düşey yerdeğiştirme grafiğinde olduğu gibi en büyük eğilme momentleri tabliye açıklığı boyunca genellikle dalga yayılma etkisi için elde edilmiştir. Bunun yanında kule taban noktasında sadece dalga yayılma etkisi için elde edilen eğilme moment değeri, sadece korelasyon etkisi için elde edilen moment değerinden %13, genel durum etkisi için elde edilen moment değerinden %17 ve üniform yer hareketi etkisi için elde edilen eğilme moment değeri %40 daha büyük çıkmıştır.



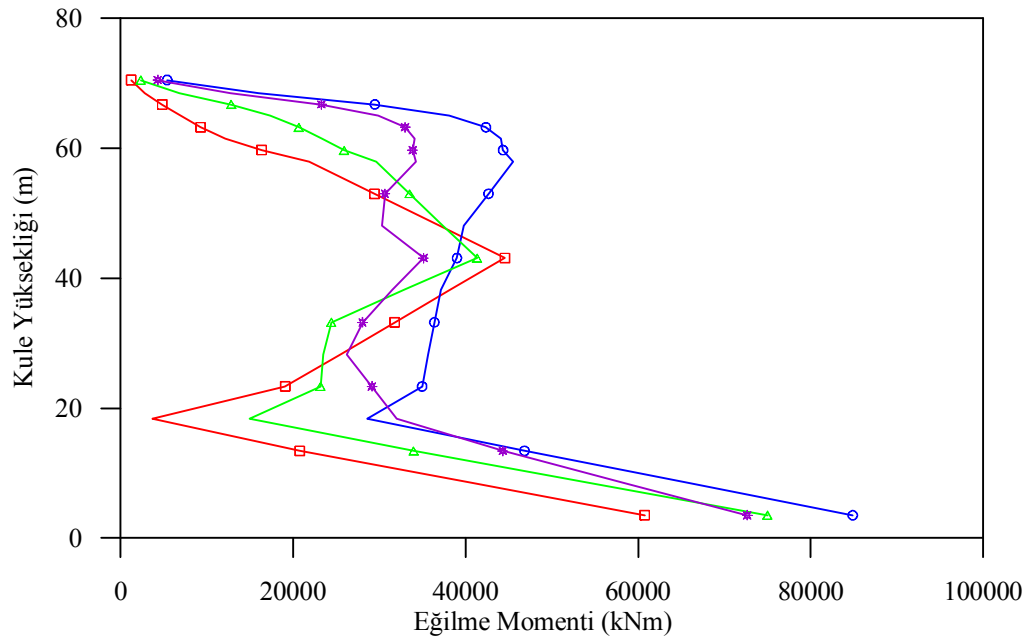
Şekil 4.144. Tabliye toplam düşey yerdeğitirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



Şekil 4.145. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğitirmeleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



Şekil 4.146. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR)



Şekil 4.147. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, ANKR)

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin yumuşak zemin ortamında incelenmesi

Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda homojen yumuşak zemin ortamında (Zemin sınıfı D) mesnetlenmiş üst yapı için dinamik analiz sonuçları incelenmektedir. Köprü mesnetleri altındaki zeminin D zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve dalga yayılma ile korelasyon etkisinin birlikte dikkate alındığı genel durum için elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait dinamik ve toplam tepki bileşenleri karşılaştırılmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerine ait grafikler, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda elde edilen grafiklerle aynı olduğu için burada tekrar verilmemiştir. Dalga yayılma etkisi için yer hareketi yayılma hızı  $V_{app}=400$  m/s olarak dikkate alınmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler ile elde edilen tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.148-153'de karşılaştırılmaktadır. Ankastre model için elde edilen değişiminden farklı olarak, orta açıklıkta yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda genel durum etkisi için elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. Tabliye orta noktasında elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında genel durum etkisi için elde edilen yerdeğiştirme, dalga yayılma etkisi ve korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla, %62, %215 daha büyük çıkmıştır.

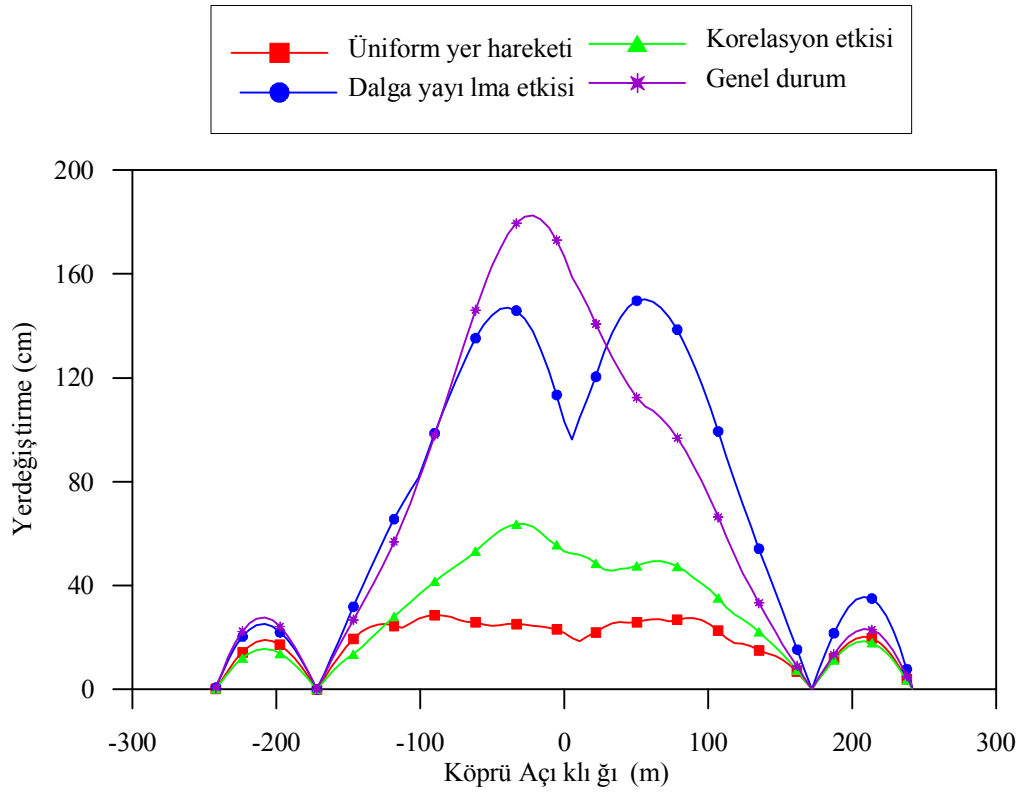
Kule yüksekliğinin ilk bölümünde dalga yayılma ve üniform yer hareketi için elde edilen yatay yerdeğiştirmeler daha büyük olurken, bu bölümü takip eden noktalarda genel durumda ve dalga yayılma etkisi için elde edilen yatay yerdeğiştirmeler en büyüktür.

Şekil 4.150-151'de tabliye ve kulede elde edilen eğilme momenti değişim grafikleri görülmektedir. Köprü açıklığı boyunca en büyük eğilme momentleri dalga yayılma ve genel durum etkileri için elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında genel durum etkisi için elde edilen eğilme momenti değeri dalga yayılma etkisi için elde edilen

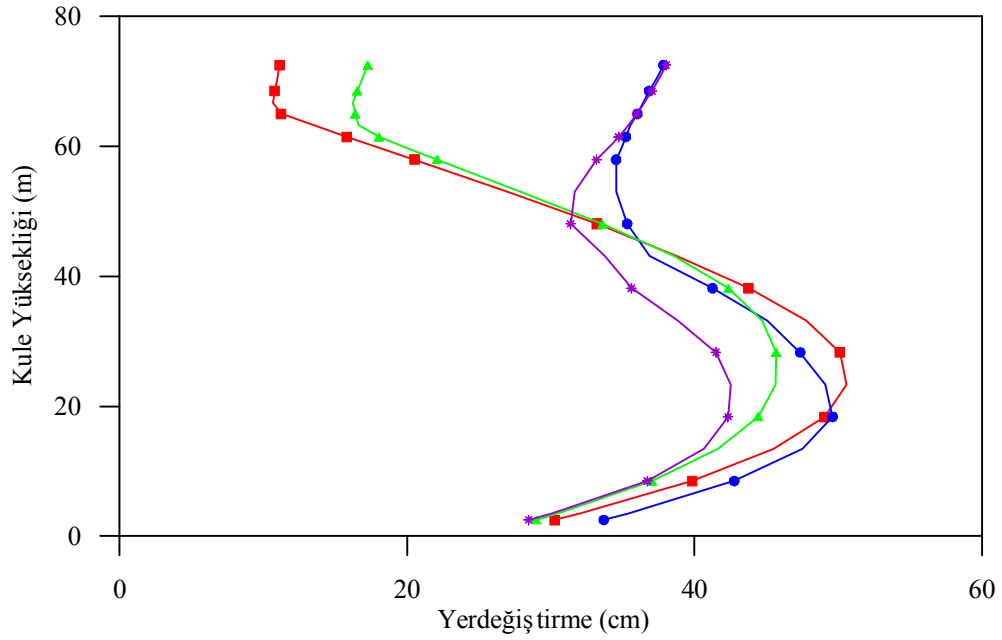
eğilme momenti değerinden %36, korelasyon etkisi için elde edilen moment değerinden %84 ve üniform yer hareketi etkisi için elde edilen moment değerinden %168 daha büyük çıkmıştır.

Kule eğilme momentleri için ise kule yatay yerdeğiştirme grafiğindeki benzer bir değişim görülmektedir. Kule yüksekliği boyunca en büyük eğilme momentleri dalga yayılma etkisi için elde edilmiştir. Kule taban noktasında dalga yayılma etkisi için elde edilen eğilme momenti değeri, genel durum, korelasyon ve üniform yer hareketi durumları için belirlenen eğilme momenti değerlerinden sırasıyla %11, %44 ve % 48 daha büyük çıkmıştır.

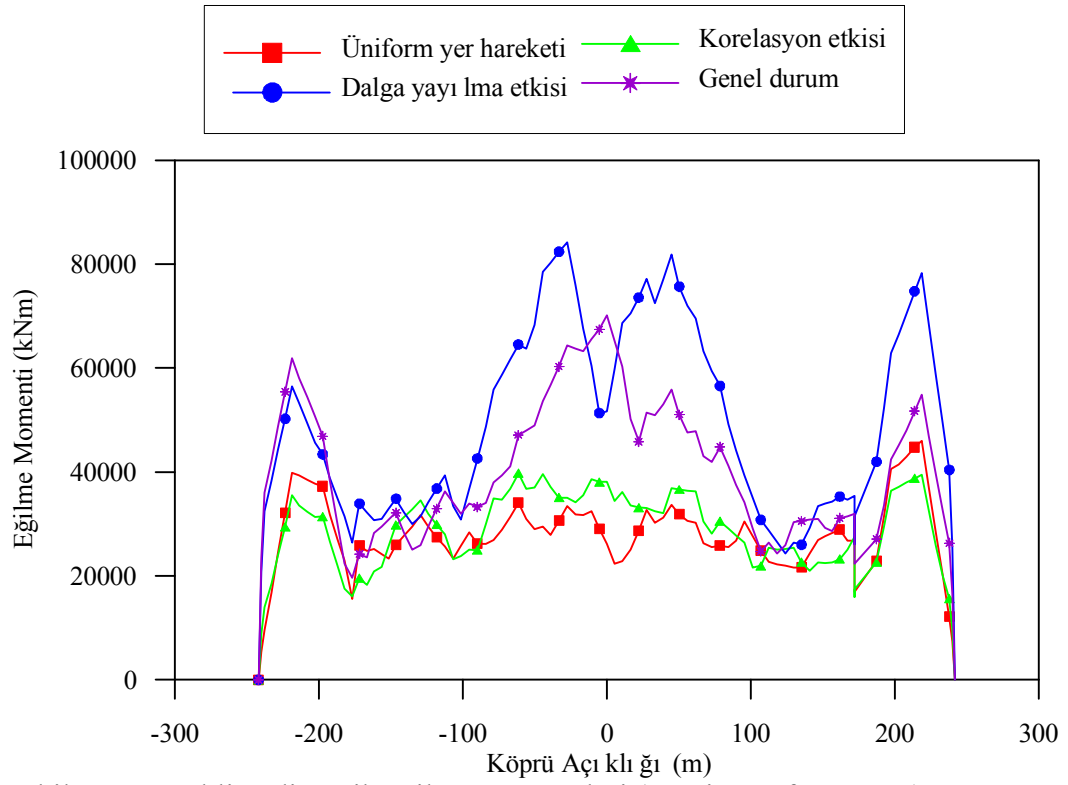
Tabliye kesme kuvvetleri ve kule eksenel kuvvetleri için elde edilen değişim yine dalga yayılma ve genel durum da en büyük tepki değerlerini verirken, korelasyon etkisi için bulunan tepkiler üniform yer hareketi için bulunan tepkilere çok yakın çıkmıştır.



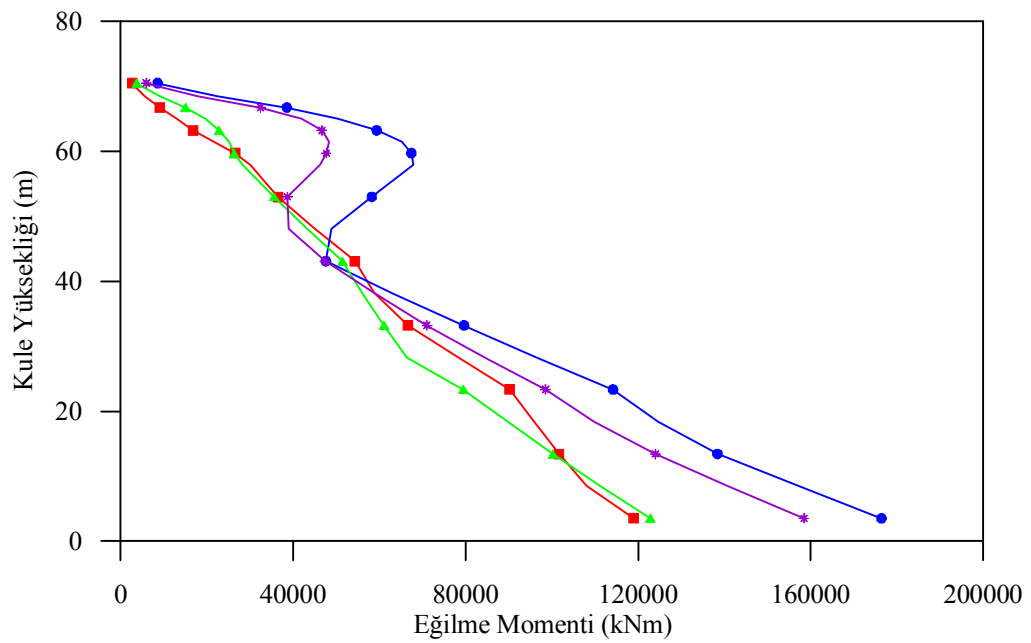
Şekil 4.148. Tabliye dinamik düşey yerdeğitirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE)



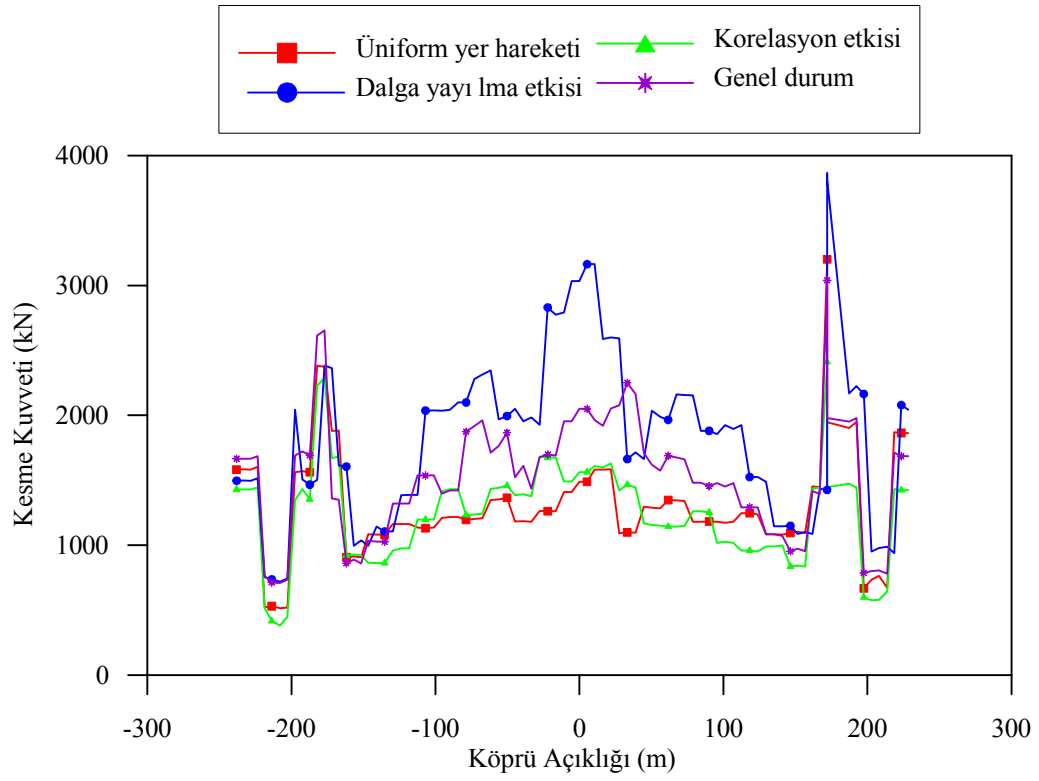
Şekil 4.149. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğitirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE)



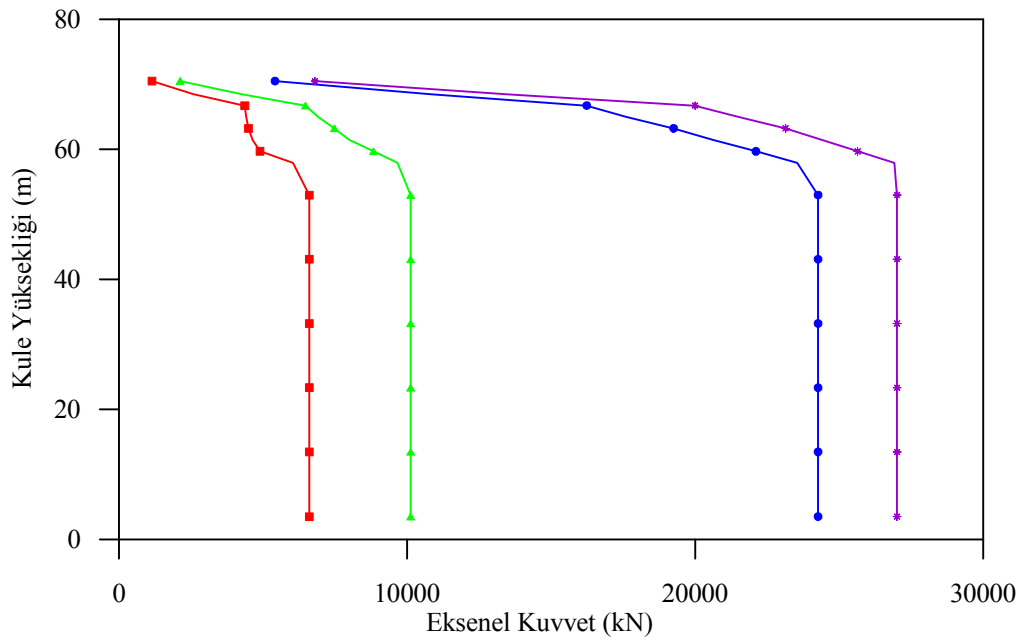
Şekil 4.150. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE)



Şekil 4.151. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE)



Şekil 4.152. Tabliye dinamik kesme kuvvetleri (Zemin sınıfı D, YZE)



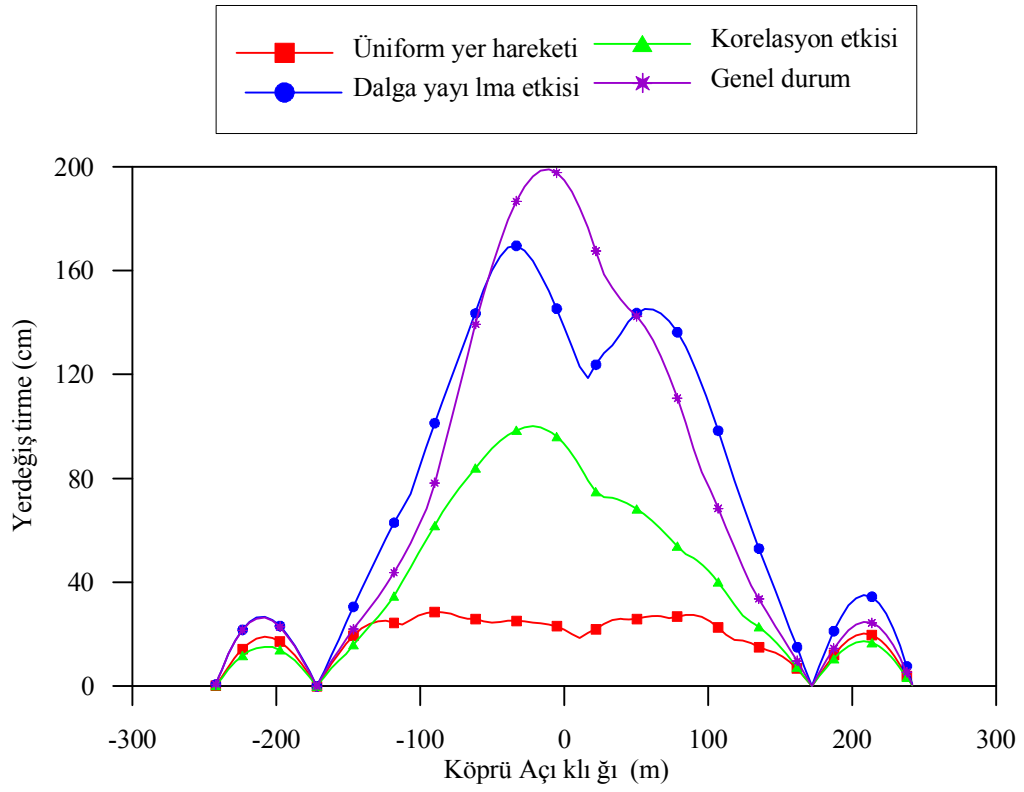
Şekil 4.153. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Zemin sınıfı D, YZE)

Zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin toplamından oluşan toplam yapısal tepkiler Şekil 4.154-157’de karşılaştırılmaktadır. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiş olup, üniform yer hareketi için elde edilen tepki değerleri en küçük olurken, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler en büyük olmaktadır. Ayrıca, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerden belirgin şekilde büyük çıkmaktadır.

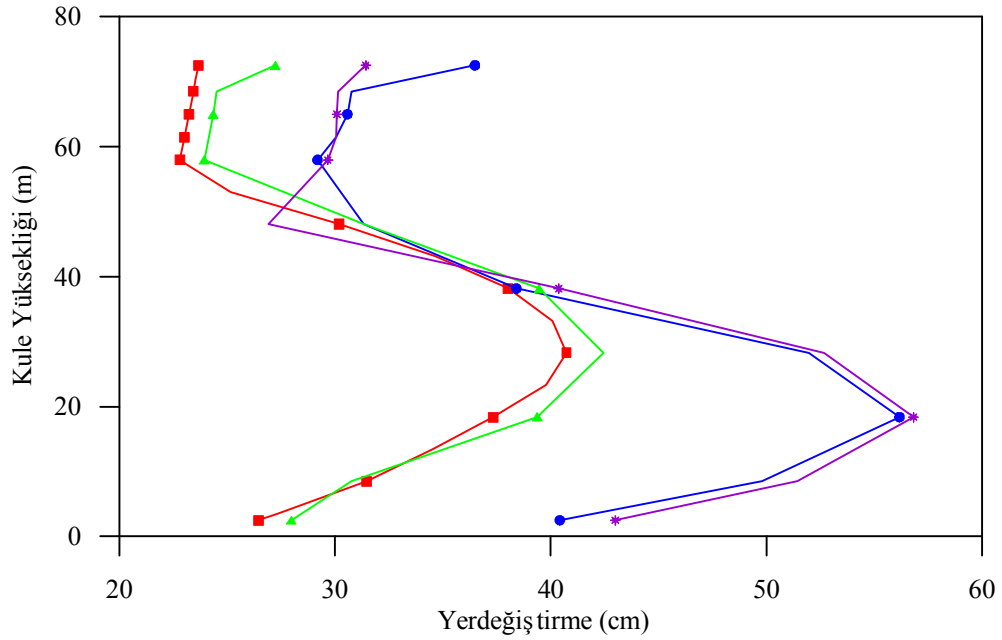
Tabliye orta noktasında dalga yayılma, genel durum, korelasyon ve üniform yer hareketi etkisi için elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri sırasıyla 195 cm, 138 cm, 93cm ve 22cm olarak elde edilmiştir. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimine benzer olarak elde edilmiştir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri dalga yayılma ve genel durum etkileri için elde edilirken, en küçük eğilme momenti değerleri korelasyon ve üniform yer hareketi etkileri için elde edilmiştir.

Bunun yanında, kule tepe noktasında dalga yayılma etkisi için elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri, genel durum, korelasyon ve üniform yer hareketi için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %19, %37 ve %54 daha büyük çıkmıştır. Kule dinamik eğilme momenti grafiğinde olduğu gibi kule yüksekliği boyunca dalga yayılma etkisi için en büyük eğilme momenti değerleri elde edilmiştir.

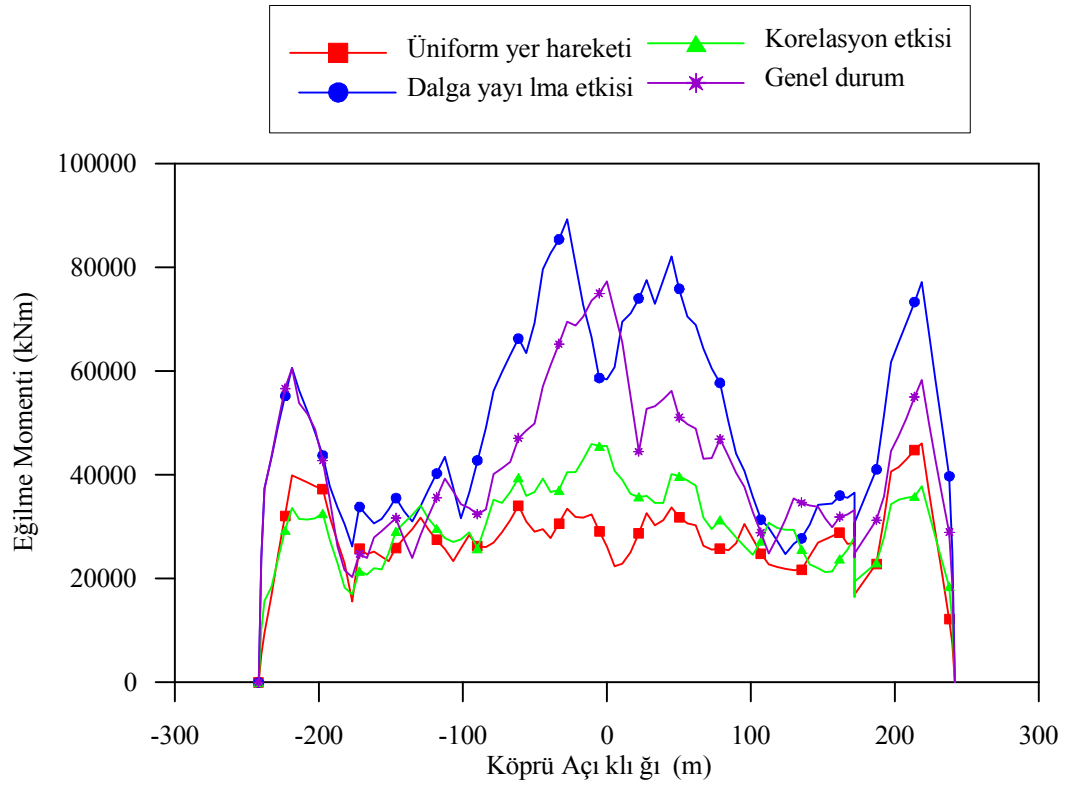
Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler zahiri-statik bileşenlerin toplam tepkiye katkısının dinamik bileşenler yanında önemsiz kaldığını ortaya koymuştur. Aynı zamanda deprem hareketi değişim bileşenlerinde dalga yayılma etkisinin yapısal sistem davranışı üzerindeki katkısının korelasyon etkisine göre çok daha fazla olduğu da dikkat çekmektedir.



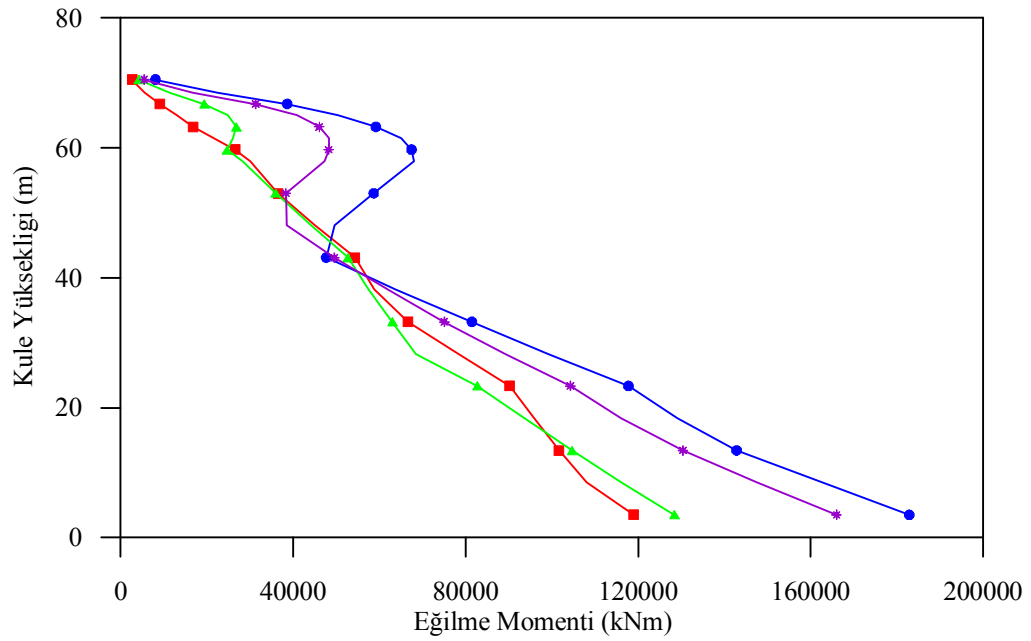
Şekil 4.154. Tabliye toplam düşey yerdeğitirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE)



Şekil 4.155. Jindo kulesi toplam yatay yerdeğitirmeleri (Zemin sınıfı D, YZE)



Şekil 4.156. Tabliye toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE)



Şekil 4.157. Jindo kulesi toplam eğilme momentleri (Zemin sınıfı D, YZE)

Yapı-zemin etkileşiminin üst yapı dinamik davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla, yapı-zemin etkileşiminin analize dahil edilmesi ve ihmal edilmesi durumunda toplam yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

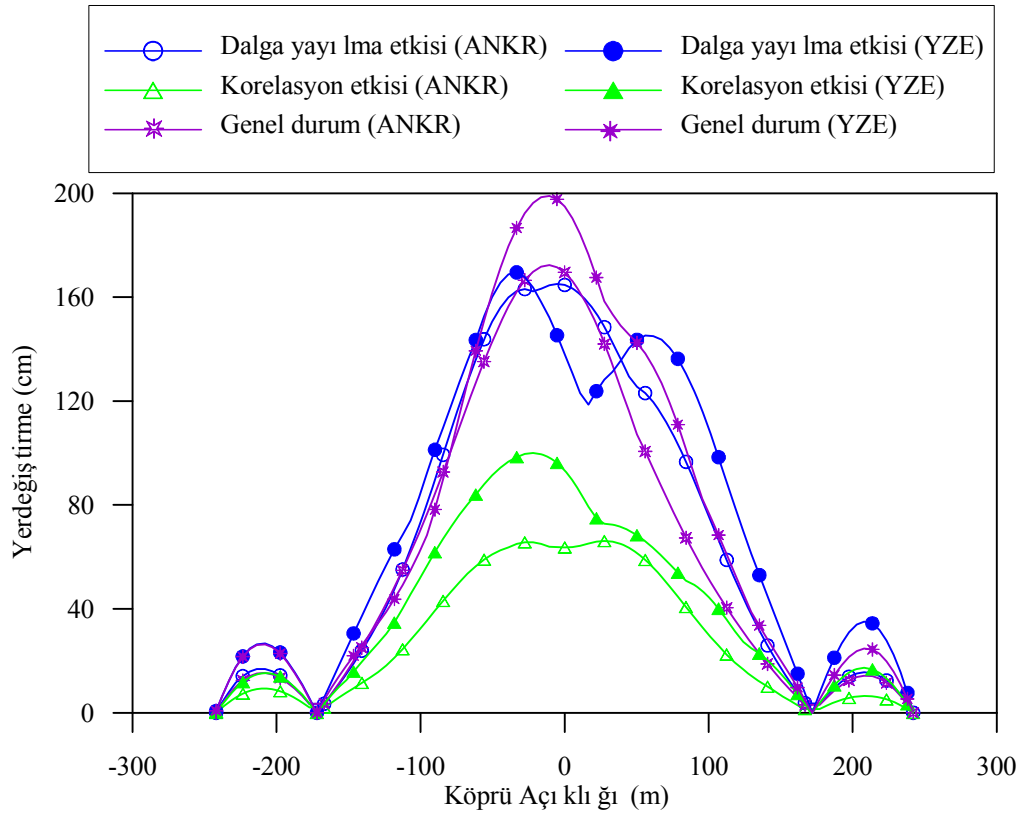
Köprü tabliyesinde elde edilen düşey yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modeller için Şekil 4.158-159'da karşılaştırılmaktadır. Şekillerde görüldüğü gibi yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı model için elde edilen tepki değerleri, genellikle yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen tepki değerlerinden büyük çıkmıştır. Yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı modelde genel durum ve korelasyon etkisi için tabliye orta noktasında elde edilen en büyük yerdeğiştirme değerleri yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum için elde edilen yerdeğiştirmelerle karşılaştırıldığında, sırasıyla %15 ve %45 daha büyük çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması tabliye orta noktasında dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerini %16 azaltmıştır. Tabliyede toplam yerdeğiştirme değişimi değerleri irdelendiğinde, tabliye için yapı-zemin etkileşiminden daha çok yer hareketi değişim bileşenlerinin etkili olduğu gözlenmektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ve ihmal edilmesi durumunda tabliye açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri genellikle dalga yayılma etkisinde elde edilmiştir. Tabliye düşey yerdeğiştirme grafiği ile karşılaştırıldığında yapı-zemin etkileşiminin eğilme momenti değerlerini daha fazla arttırdığı görülmektedir.

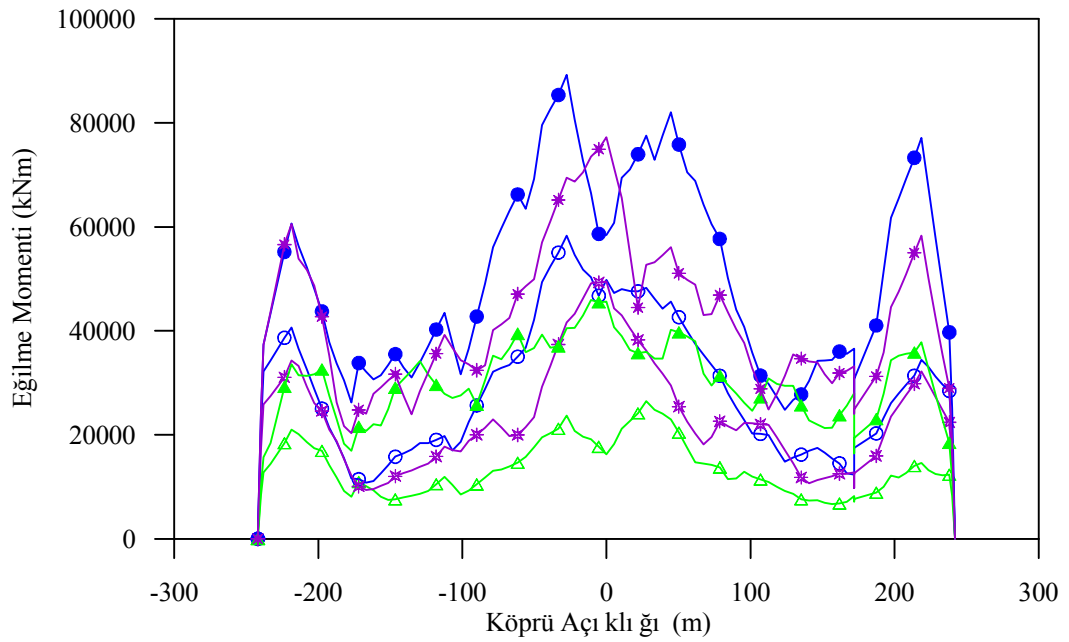
Belirtilen analiz durumları için kulede elde edilen yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimi Şekil 4.160 ve Şekil 4.161'de karşılaştırılmaktadır. Kulede yapı-zemin etkileşimi modeli için elde edilen tepki değerleri, ankastre model için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük çıkmıştır. Bu durum kulede yapı-zemin etkileşiminin etkisinin, yer hareketi değişim bileşenlerinin etkisinden daha öne çıktığını göstermektedir.

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması üst yapı yerdeğiştirme ve eleman kuvvetlerini büyük oranda arttırmıştır. Homojen yumuşak zeminde (D zemin sınıfı) dalga yayılma etkisinin, üst yapı yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri üzerinde korelasyondan daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Kule yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti grafikleri incelendiğinde yapı-zemin etkileşiminin deprem hareketi değişim bileşenlerine göre daha belirgin bir etkisinin olduğu görülmektedir.

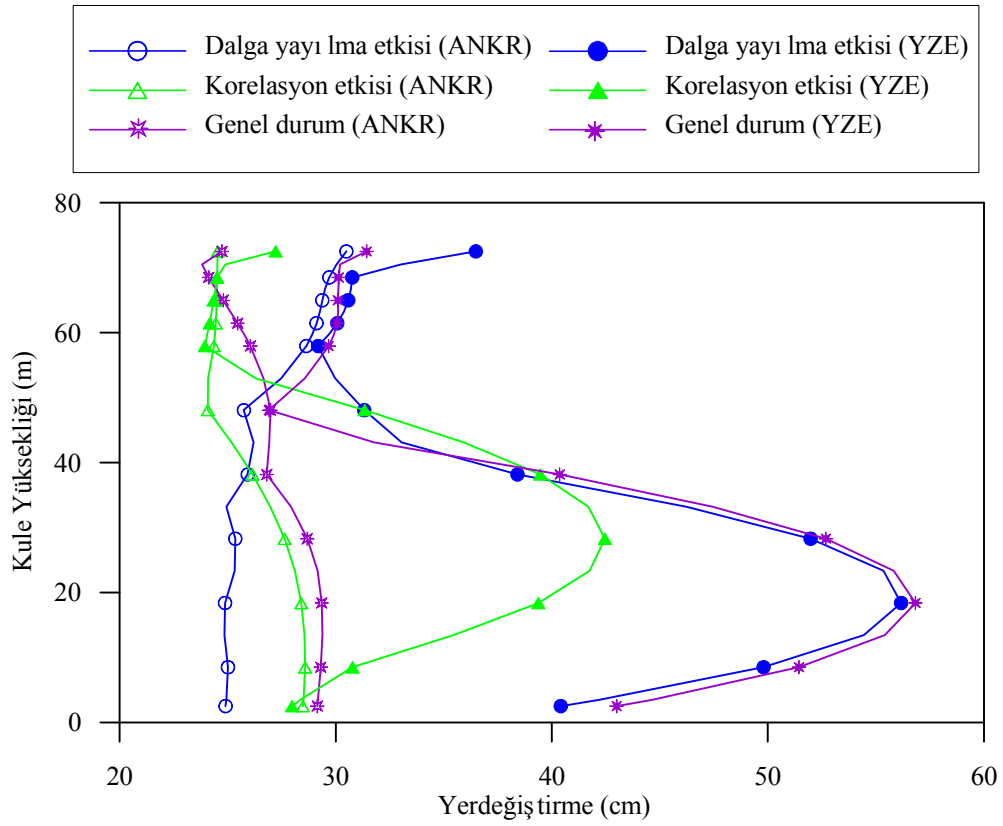
Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile yapı tepkilerinin artması, ataletsel köprü-zemin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile yapı sisteminin mesnetlendiği zemin ortamının esnekliği dikkate alınmaktadır ve bu çalışmada dikkate alınan köprü sistemi yumuşak zemin ortamında en büyük yapısal tepileri vermektedir.



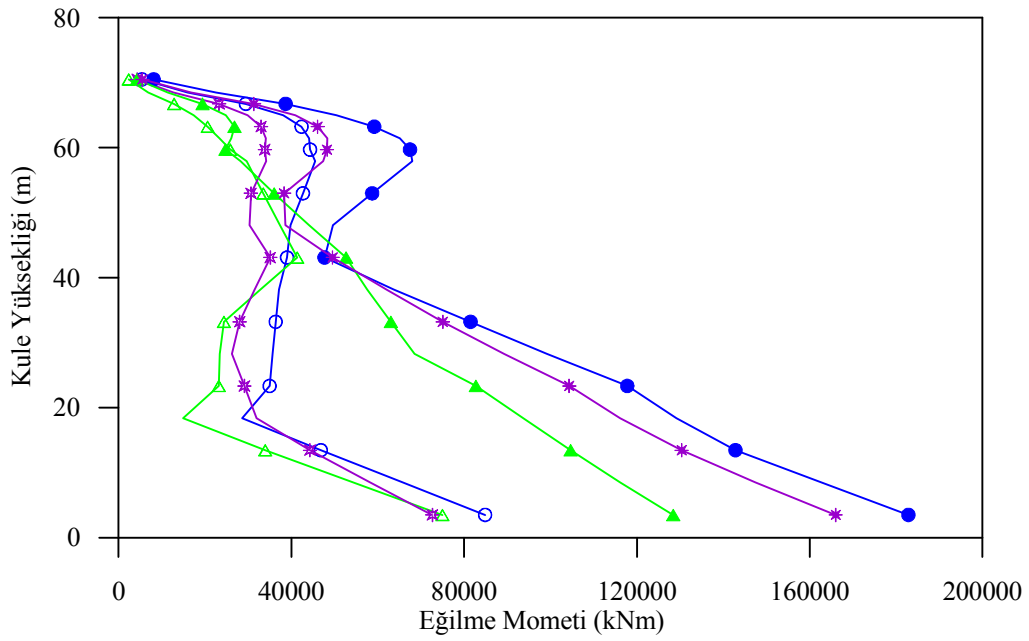
Şekil 4.158. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.159. Tabliye toplam eğilme momenti değişimi



Şekil 4.160. Kule toplam yatay yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.161. Kule toplam eğilme momenti değişimi

Homojen yumuşak zeminde yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Bu bölümde köprü sisteminin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin ve deprem hareketi bileşenlerinin etkileri karşılatırmalı olarak incelenmektedir. Bu amaçla yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için yer hareketi yayılma hızının sonsuz ve 400 m/s olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen yumuşak zemin (Zemin sınıfı D) olduğu kabulü ile yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler karşılaştırılmaktadır. Bunun yanında yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için korelasyon etkisinin dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkilerde karşılaştırılmaktadır. Böylece yapı-zemin etkileşiminin ve yer hareketi yayılma bileşenlerinde dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin köprü sistemi dinamik davranışı üzerindeki etkileri karşılatırmalı olarak incelenecektir.

Yapı-zemin etkileşiminin ve dalga yayılma hızının köprü dinamik davranışı üzerindeki etkileri incelemek amacı ile, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için yer hareketi yayılma hızının sonsuz ve 400 m/s olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen yumuşak zemin (Zemin sınıfı D) olduğu kabulü ile yer hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen yapısal tepkiler Şekil 4.162-165’de karşılatırılmaktadır.

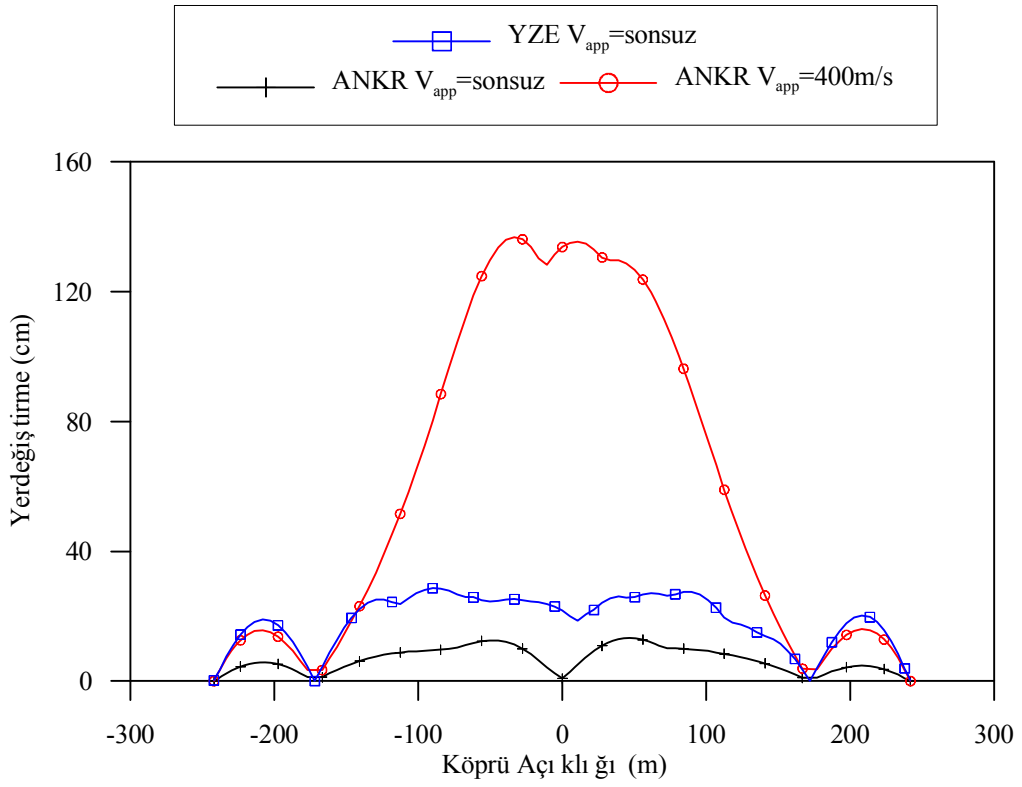
Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde en büyük yerdeğiştirmeler yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelede yer hareketi yayılma hızının 400 m/s olması durumunda orta açıklık orta bölgesinde elde edilmiştir.

Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde, kule yüksekliğinin büyük bölümünde yapı-zemin etkileşiminin yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde arttırdığı

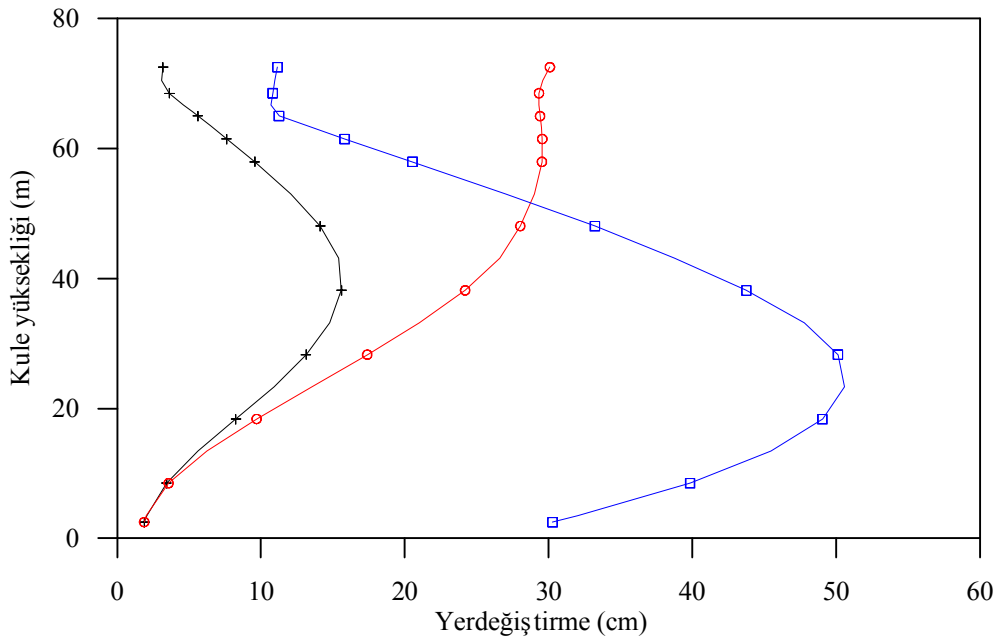
görülmektedir. Kule yüksekliğinin son bölümünde ise yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre modelde yer hareketi yayılma hızının 400 m/s olması durumunda en büyük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Kule yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde, yapı-zemin etkileşiminin etkisinin yer hareketi yayılma hızının etkisinden daha belirgin olduğu görülmektedir.

Tabliye eğilme momenti değişimine ait grafik incelendiğinde, kenar açıklıklarlarda en büyük eğilme momentleri yapı-zemin etkileşimi etkisinde, orta açıklıkta ise dalga yayılma etkisinde elde edildiği görülmektedir. Kule eğilme momenti değişimine ait grafikte ise yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

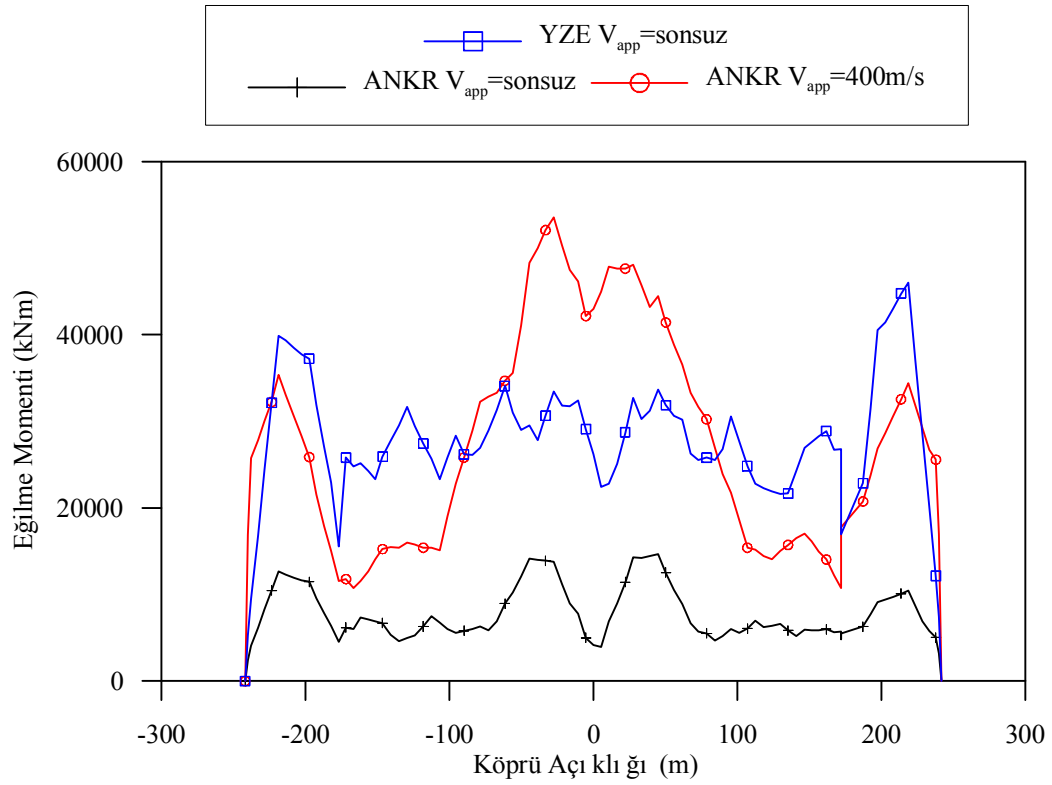
Yumuşak zemin koşullarında mesnetlendiği düşünülen köprü sistemi, yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma etkisi açısından göreceli olarak incelendiğinde kulelerde yapı-zemin etkileşiminin etkisi daha belirgin, tabliyede her iki etkinin önemli olduğu görülmektedir.



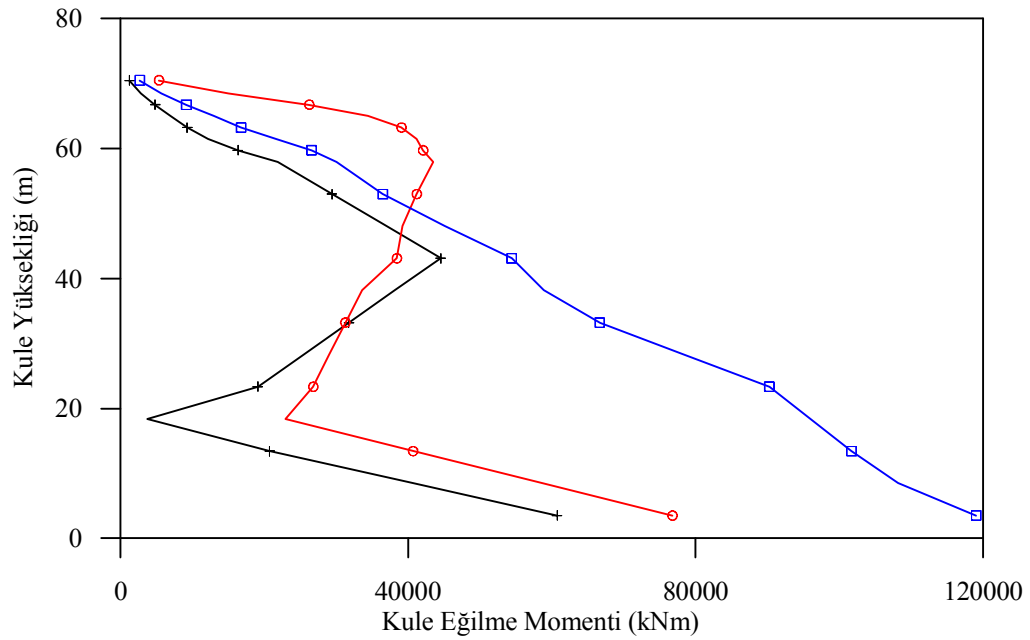
Şekil 4.162. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.163 Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.164. Tabliye dinamik eğilme momentleri



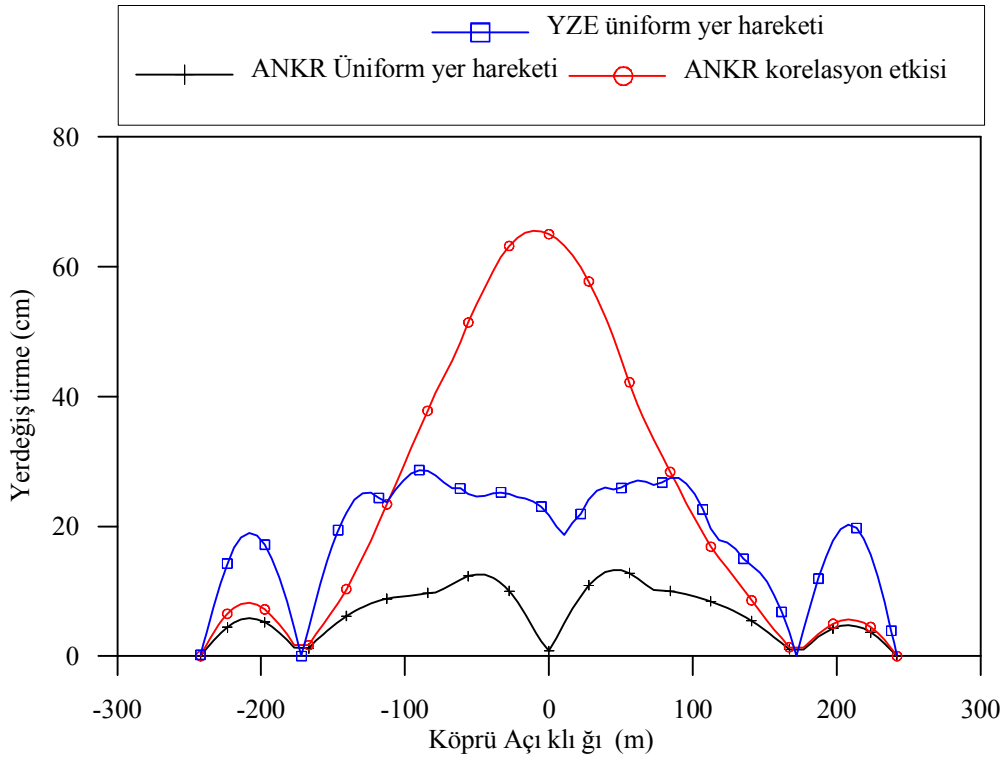
Şekil 4.165. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri

Yapı-zemin etkileşiminin ve korelasyon etkisinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkileri incelemek amacı ile, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model için korelasyon etkisi için elde edilen yer hareketi etkisinde elde edilen yapısal tepkiler ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin homojen yumuşak zemin (Zemin sınıfı D) olduğu kabulü ile üniform yer hareketi etkisinde elde edilen yapısal tepkiler Şekil 4.166-169'da karşılaştırılmaktadır.

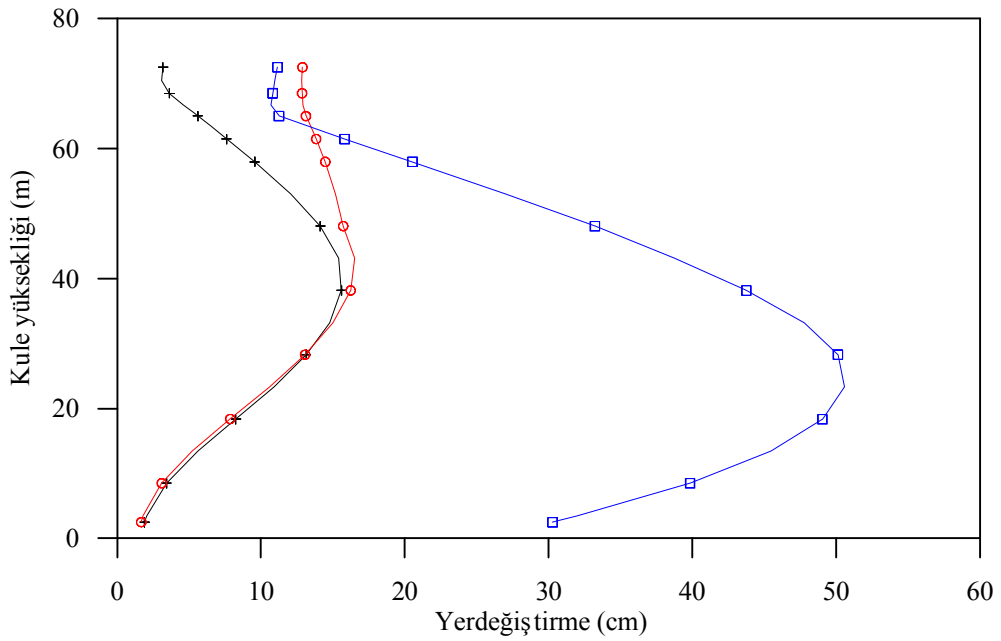
Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde kenar açıklıklarda en büyük yerdeğiştirme değerleri yapı-zemin etkileşimi etkisinde, orta açıklık orta bölgesinde ise korelasyon etkisinde elde edilmiştir.

Jindo kulesi yatay yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde en büyük yerdeğiştirmeler kule yüksekliğinin büyük bölümünde yapı-zemin etkileşimi etkisinde elde edilmiştir. Benzer şekilde kule ve tabliye dinamik eğilme momenti, değişimlerine ait grafikler incelendiğinde de yapı-zemin etkileşiminin etkisinin korelasyon etkisine oranla çok fazla olduğu görülmektedir.

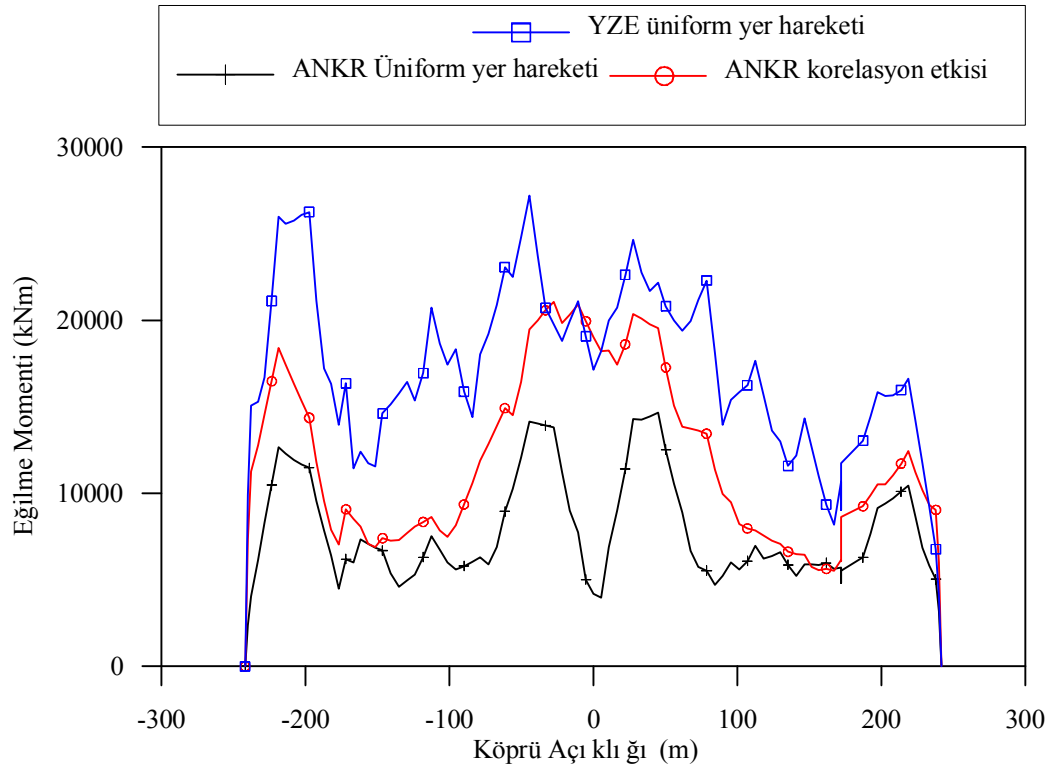
Yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinden korelasyon etkisinin tabliye tepkileri üzerinde önemli etkilerinin olduğu görülürken, kulelerde korelasyonun etkisinin çok etkin olmadığı, ancak yapı-zemin etkileşiminin tepkileri önemli oranda arttırdığı anlaşılmaktadır.



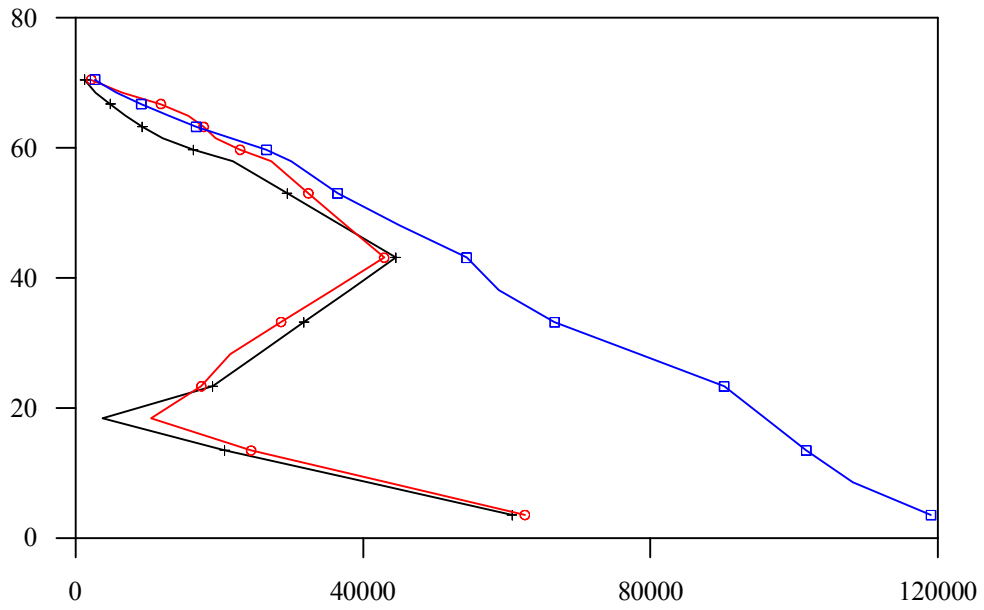
Şekil 4.166. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.167. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.168. Tabliye dinamik eğilme momentleri



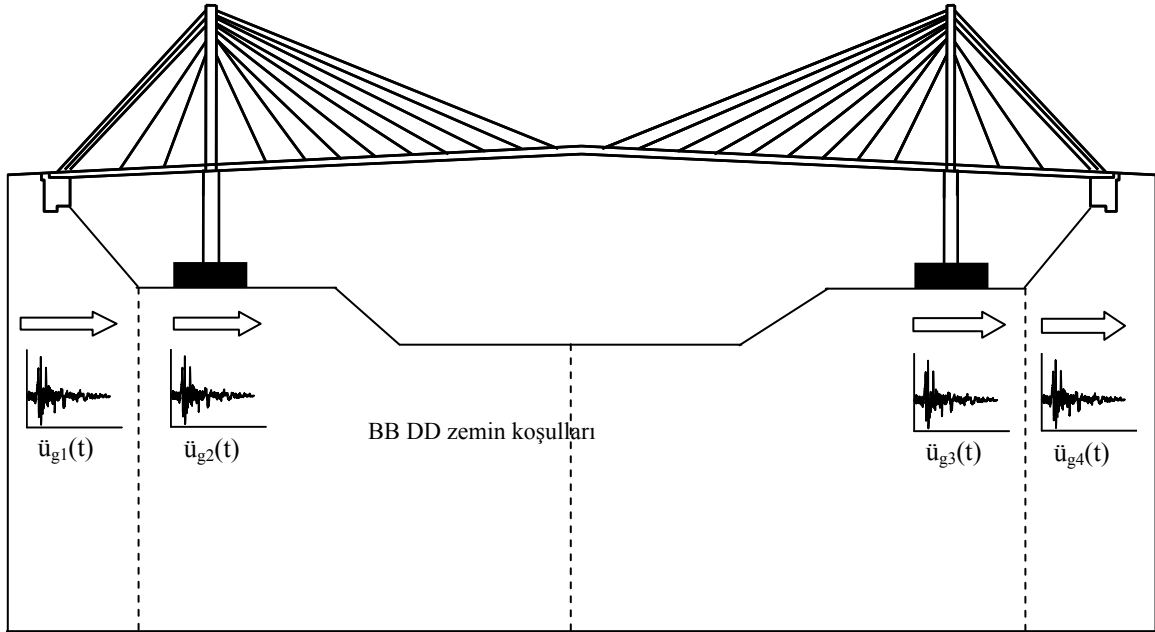
Şekil 4.169. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri

#### 4.4. Zemin Koşullarının Değişmesi Durumunda Deprem Hareketi Değişim Bileşenlerinin Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin ve deprem hareketi değişim bileşenlerinin kablolu köprülerin dinamik davranışları üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, yer hareketinin değişim bileşenlerine (korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi) bağlı olarak yer hareketleri üretilmekte ve köprü sisteminin mesnetlerine uzunlamasına doğrultuda etki ettirilmektedir. Analizlerde kullanılacak yer hareketleri için aşağıda belirtilen durumlar dikkate alınmaktadır.

- Tüm mesnet noktaları için homojen sert zemin türü (Zemin sınıfı B) dikkate alınmaktadır (Üniform yer hareketi).
- Tüm mesnet noktaları için homojen sert zemin türü (Zemin sınıfı B) tanımlanması durumunda dalga yayılma etkisi ( $V_{app}=1500$  m/s) dikkate alınmaktadır (Dalga yayılma etkisi).
- Tüm mesnet noktalarında homojen sert zemin türü (Zemin sınıfı B) tanımlanması durumunda korelasyon etkisi dikkate alınmaktadır (Korelasyon etkisi).
- Jindo adası tarafındaki mesnet ve Jindo kulesi mesnet noktalarındaki zemin türü sert zemin (Zemin sınıfı B), ana kıtadaki mesnet ve ana kıta kule mesnet noktaları için yumuşak zemin (Zemin sınıfı D) dikkate alınmaktadır (Zemin etkisi).

Yer hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkileri yanında, yerel zemin koşullarının farklılığından kaynaklanan zemin etkisinin dikkate alınması durumunda, hem yer hareketi hem de köprünün dinamik tepkileri önemli oranda etkilenecektir.



Şekil 4.170. Üniform olmayan yer hareketi etkisindeki köprü sistemi

Köprü mesnetlerinin heterojen (BBDD) olması durumunda  $N=512$  terim,  $\Delta t = 0,039$  s için toplam 20s'lik ivme kayıtları oluşturulurken aşağıdaki işlem adımları takip edilmektedir.

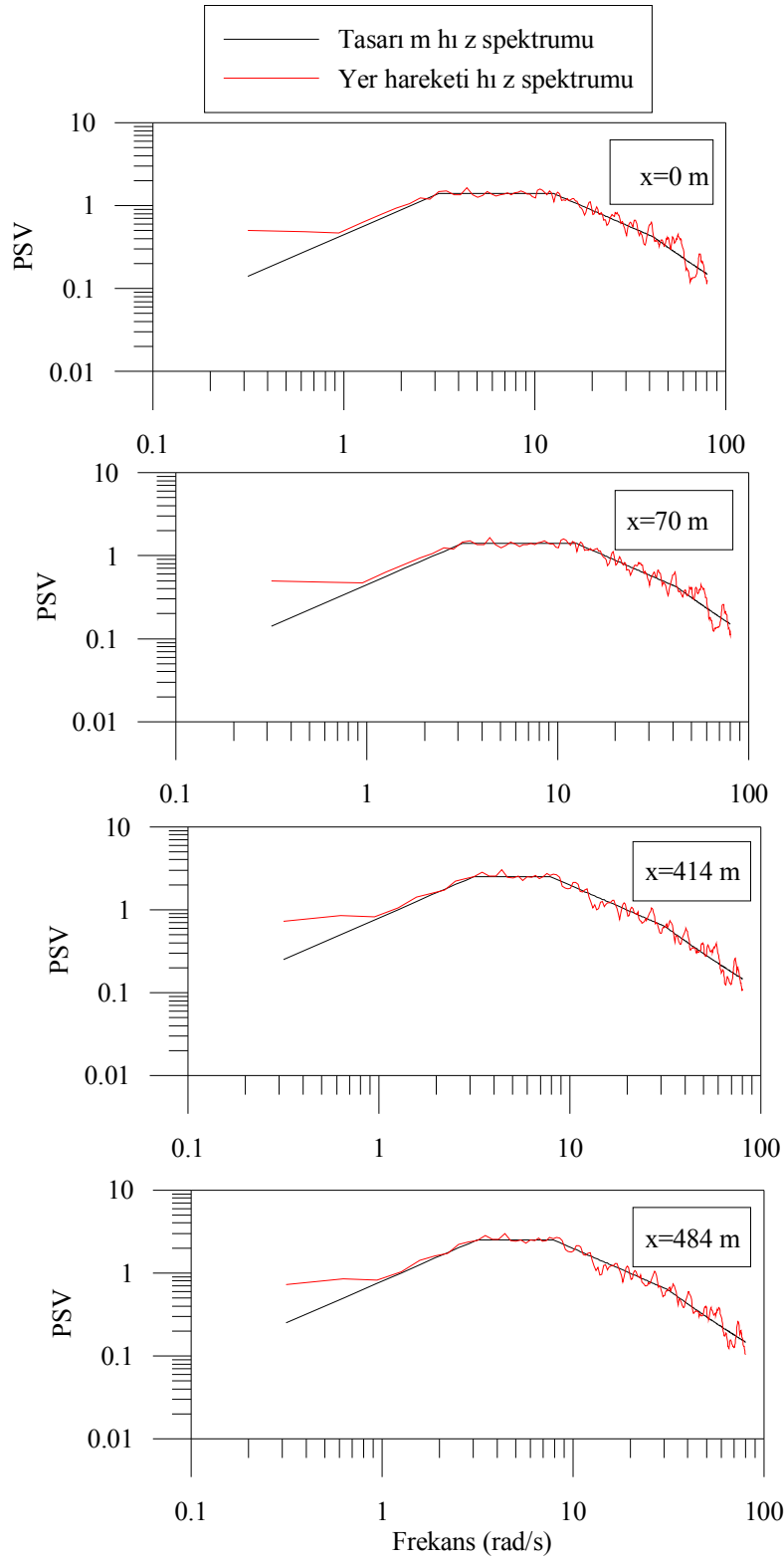
Kullanılacak yer hareketlerine ait güç spektral yoğunluk fonksiyonları Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak Eş. 3.1 elde edilmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu için Çizelge 3.1'de verilen filtre parametleri kullanılmaktadır.

Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Bu bölümde kullanılacak yer hareketleri heterojen zemin ortamı için korelasyon etkisi için elde edilmektedir.

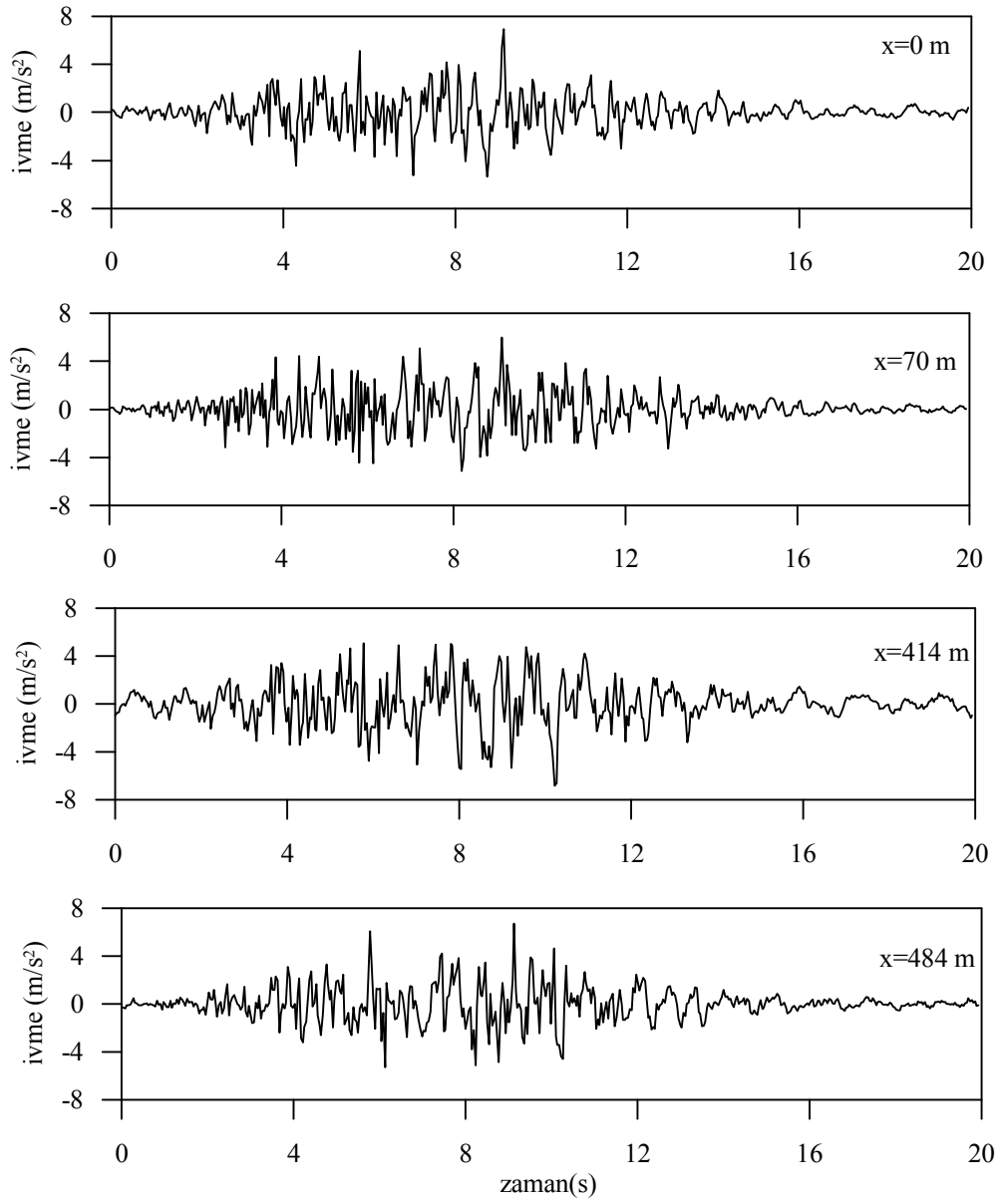
1. Deprem hareketi stasyoner olmayan bir işlem olduğu için farklı mesnet noktalarındaki stasyoner olmayan yer hareket ivmeleri, stasyoner olarak elde edilen yer hareketlerinin stasyoner olmayan bir şekil fonksiyonu ile

çarpılmasından elde edilmektedir. Elde edilen yer hareketi ivme kaydı Eş. 3. 22 ile gösterilen şekil fonksiyonu ile çarpılmaktadır.

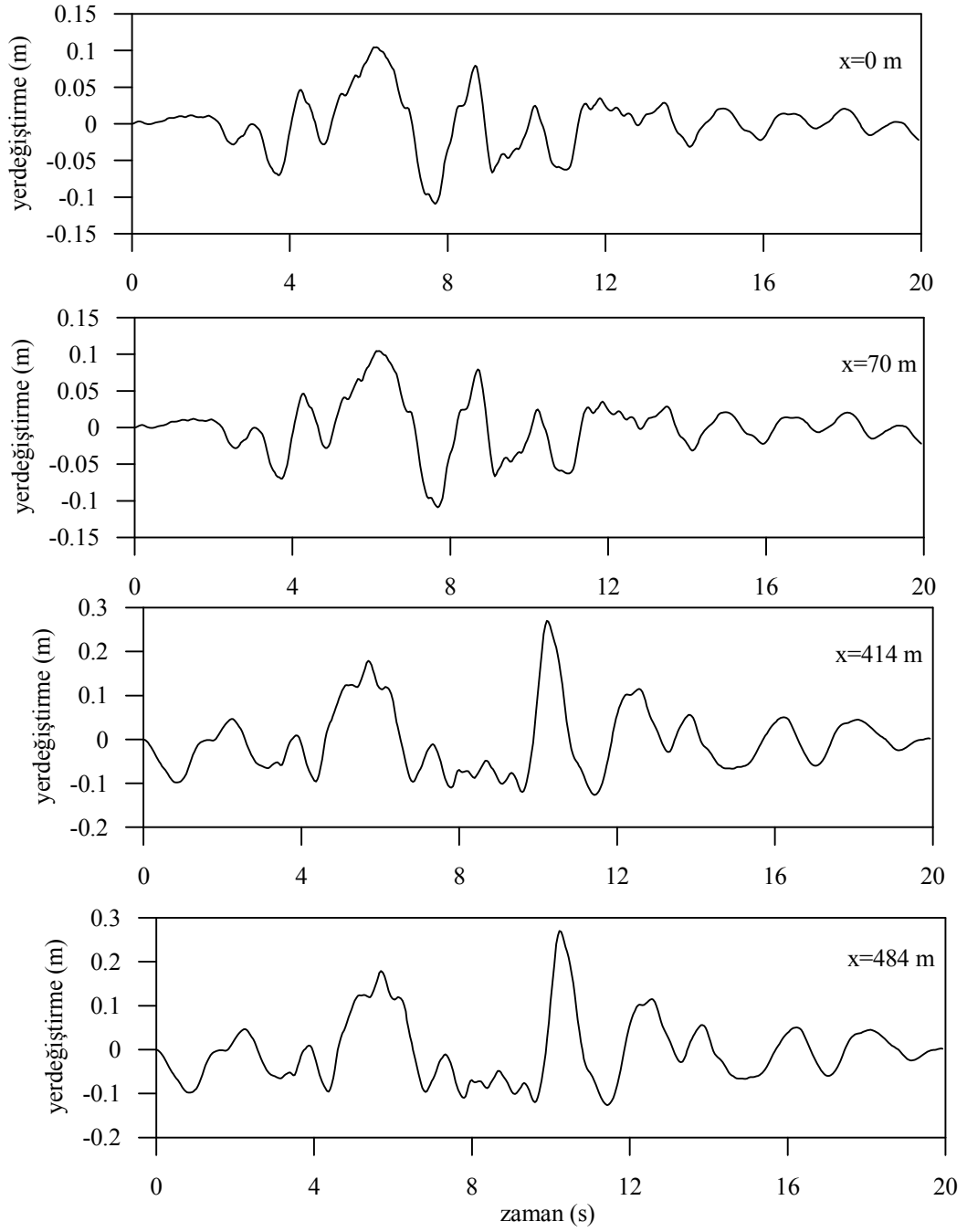
2. Elde edilen ivme kayıtları %2 sönüm oranı için ve 0,5g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle EC8 ile uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Şekil 4.171'de heterojen zemin ortamı için elde edilen yer hareketi hız spektrumu ile EC8 tasarım hız spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir.
3. Elde edilen ivme kayıtlarına Eş. 3.36 ile eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 4.172-173'te heterojen zemin ortamı için elde edilen yer hareketine ait eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.171. Heterojen zemin ortamında üretilen yer hareketi ivmesi hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması



Şekil 4.172. BBDD zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri



Şekil 4.173. BBDD zemin ortamında elde edilen ivme zaman grafikleri

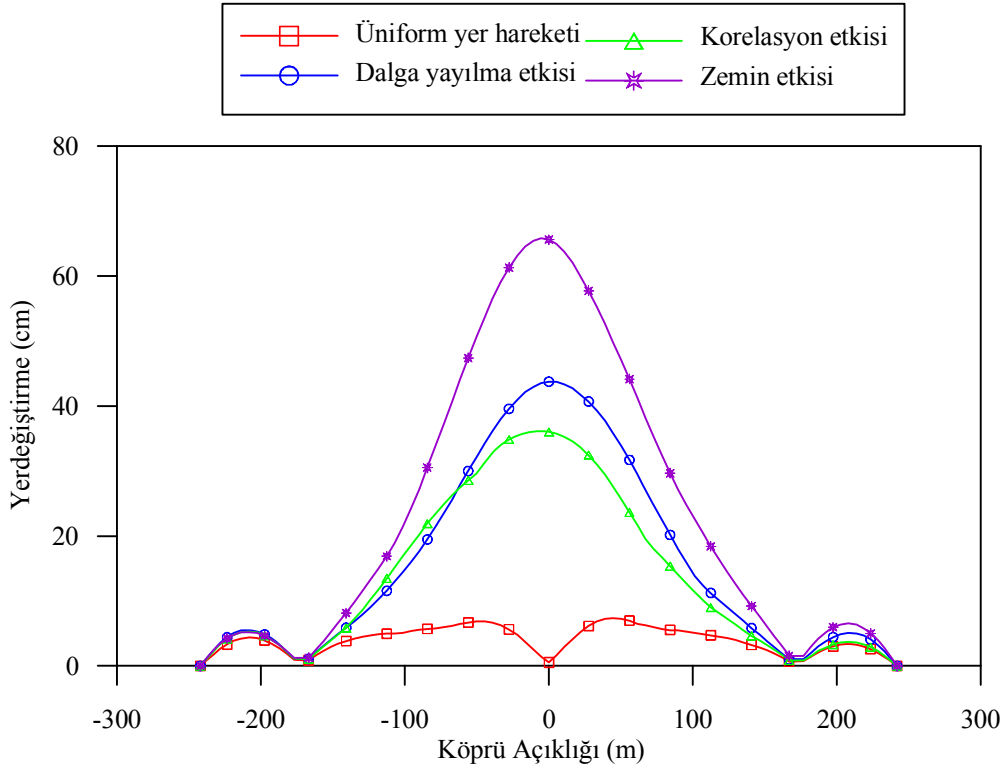
#### 4.4.1. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi

Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre durumda köprünün mesnetlendiği zeminin B zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve köprünün mesnetlendiği zeminin heterojen zemin ortamı olması durumu ile zemin etkisi dikkate alınarak elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait dinamik yapısal tepkiler incelenecektir.

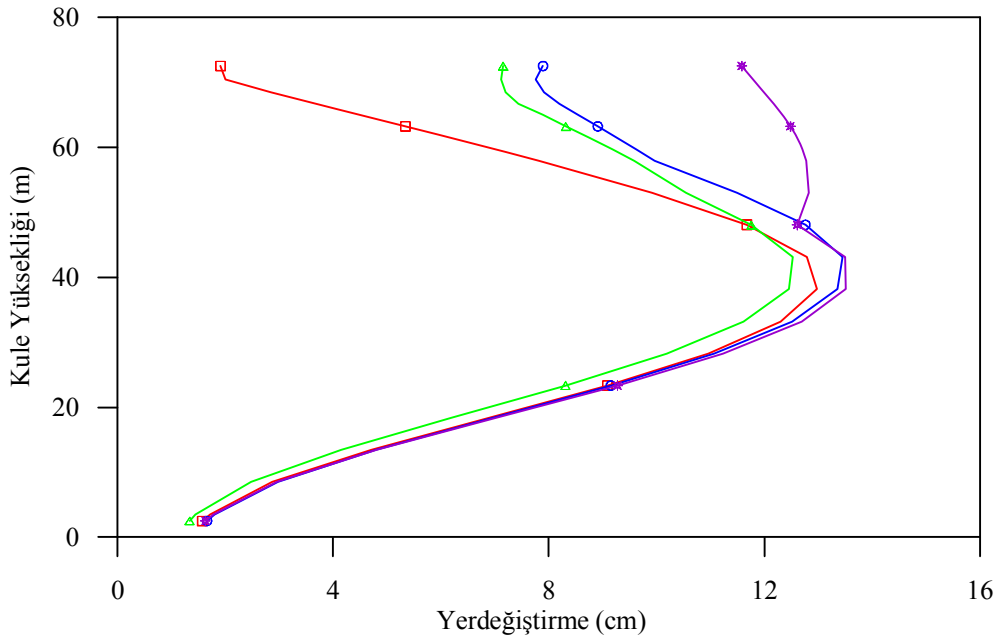
Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilerek, köprü sisteminin zemine ankastre olarak mesnetlendiği model için gerçekleştirilen analizler için elde edilen dinamik tepki değerlerinin değişimi Şekil 174-178’de karşılatırılmaktadır. Genel olarak üniform yer hareketi için elde edilen tepkiler en küçük olurken, zemin etkisi (heterojen zemin ortamı) için elde edilen tepki değerleri en büyük olmaktadır. Ayrıca, dalga yayılma ve korelasyon etkisi için elde edilen tepkiler genellikle birbirine yakın çıkmıştır.

Tabliye orta noktasında zemin etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla, %52 ve %86 daha büyük çıkmıştır. Bununla birlikte, kule tepe noktasında zemin etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen yerdeğiştirmeleden sırasıyla %50 ve %71 daha büyük olduğu görülmüştür. Tabliye dinamik eğilme momenti değişimi tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimine benzer şekilde elde edilmiştir. Farklı analiz durumları için kule yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Ancak, kule eksenel kuvvet değişimine ait grafikte zemin etkisi için elde edilen eksenel kuvvetlerinin diğer analiz durumlarına oranla belirgin şekilde daha büyük olduğu görülmektedir.

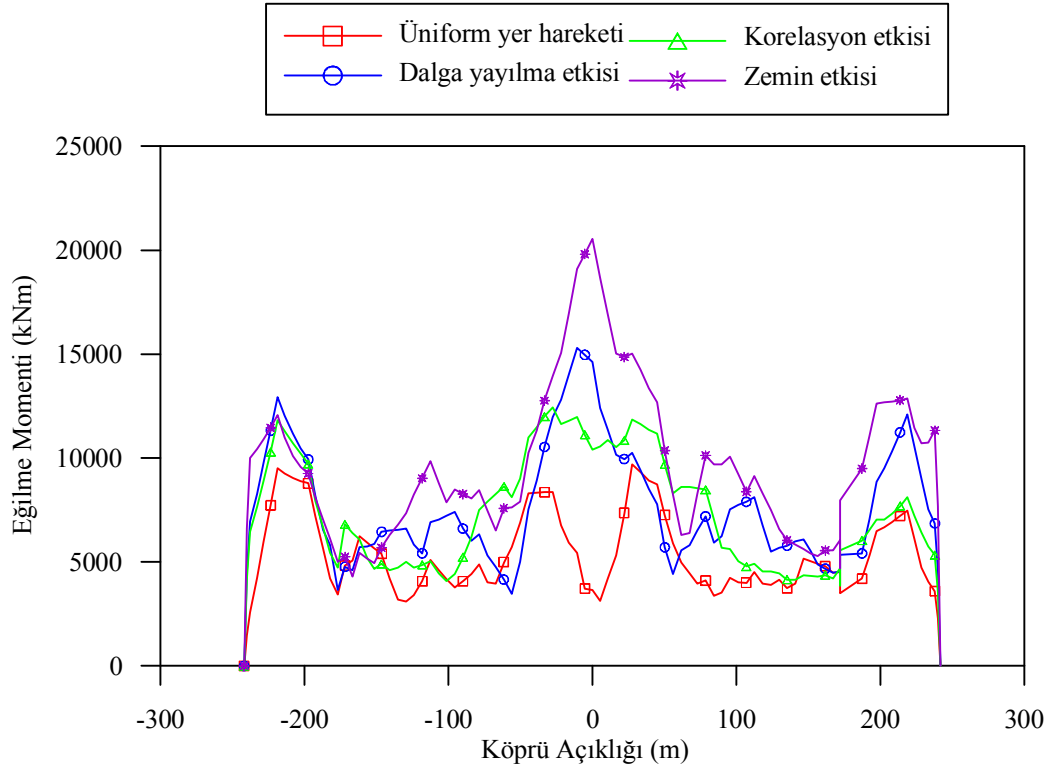
İki farklı mesnet noktasındaki zemin koşullarının farklılığı, elde edilecek yer hareketlerinin değişimi üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Yer hareketinde ortaya çıkan bu değişim de, köprü sistemine ait yapısal tepkilerin artmasına neden olmaktadır.



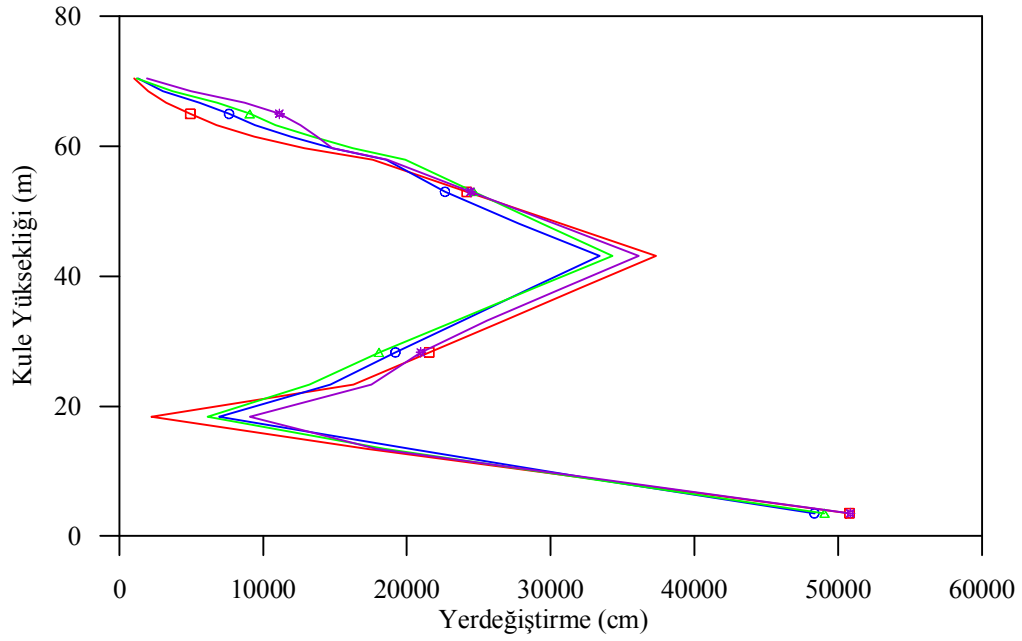
Şekil 4.174. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmleri (ANKR)



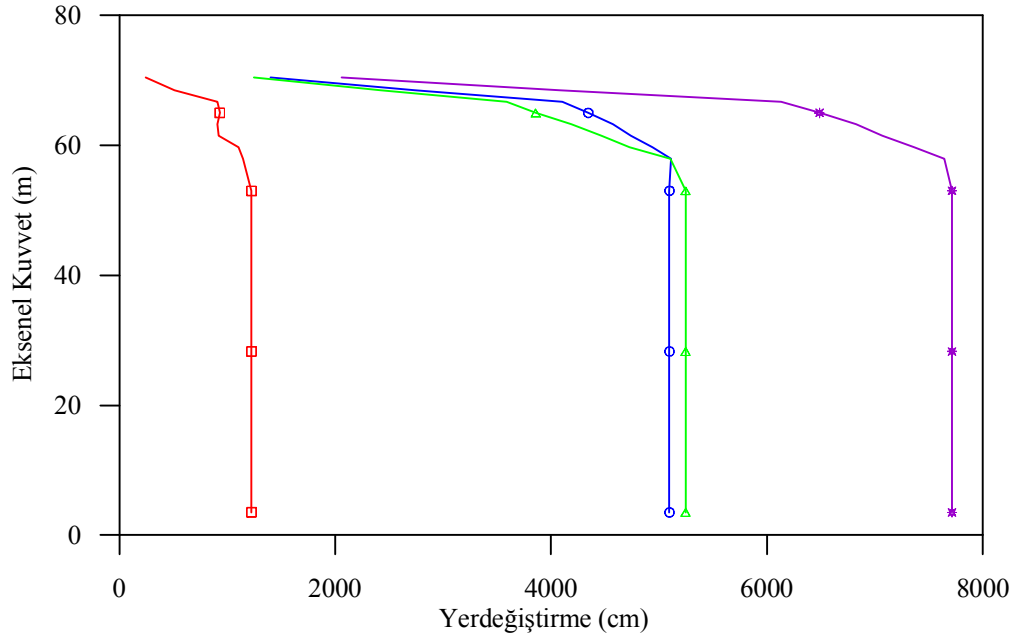
Şekil 4.175. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (ANKR)



Şekil 4.176. Tabliye dinamik eğilme momentleri (ANKR)



Şekil 4.177. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (ANKR)



Şekil 4.178. Jindo kulesi dinamik aksenal kuvvetleri (ANKR)

#### 4.4.2. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda deprem hareketi değişim bileşenlerinin yapısal sistem davranışına etkisi

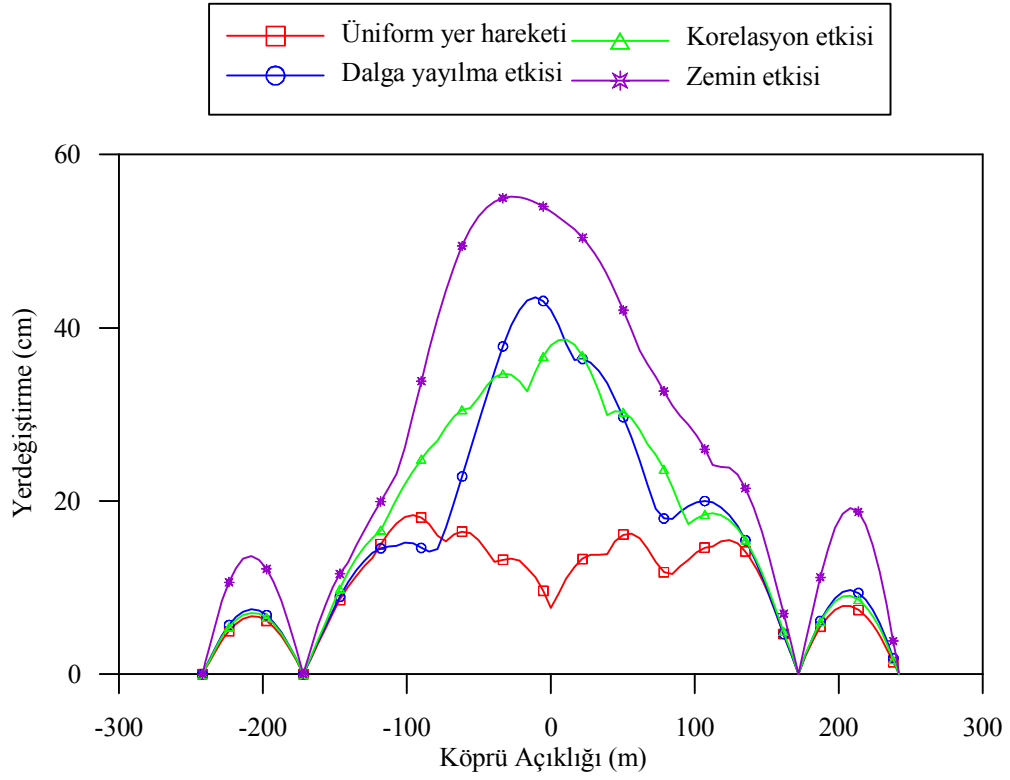
Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün mesnetlendiği zeminin B zemin sınıfı olduğu kabulü ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve köprünün mesnetlendiği zeminin heterojen zemin ortamı olması durumu ile zemin etkisi dikkate alınarak elde edilen yer hareketleri üst yapıya uygulanarak, üst yapıya ait dinamik yapısal tepkiler incelenecektir.

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler için elde edilen tepki değerlerinin değişimi Şekil 4.179-183'de karşılaştırılmaktadır. Ankastre model için elde edilen değişime benzer şekilde, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak belirlenen tepki değerleri için en büyük tepki değerleri genellikle zemin etkisi durumunda elde edilmiştir.

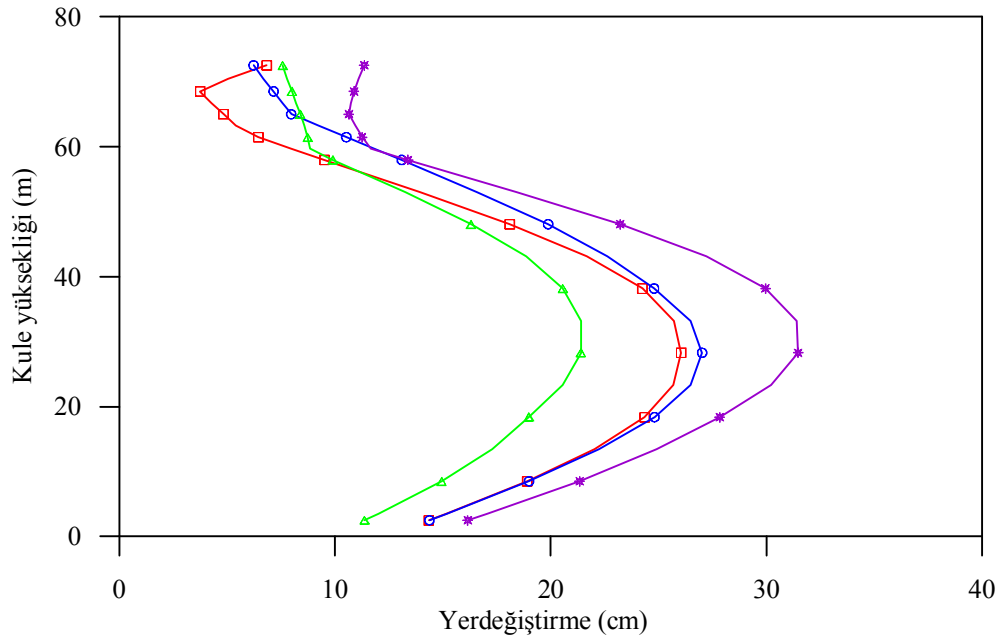
Tabliye orta noktasında zemin etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma ve korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden sırasıyla, %40 ve %26 daha büyük çıkmıştır. Tabliye eğilme momenti değişimi incelendiğinde,

zemin etkisinde elde edilen eğilme momenti değerlerinin diğer üç duruma oranla belirgin şekilde büyük olduğu görülmektedir.

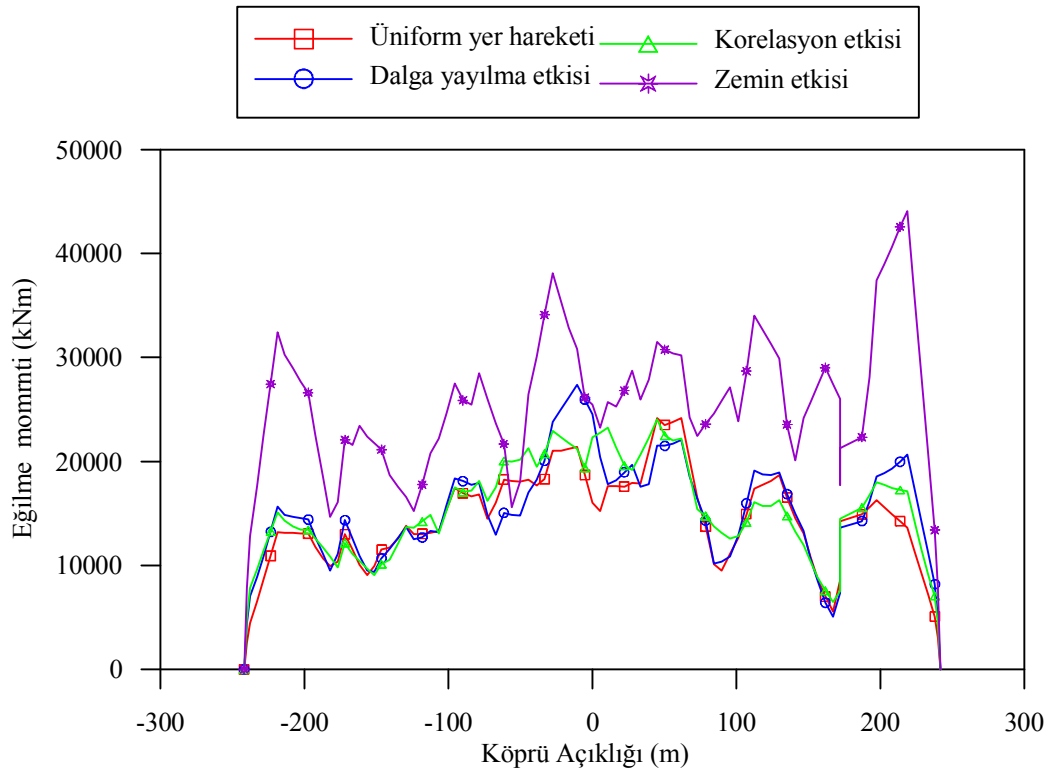
Kule yüksekliği boyunca yine en büyük yatay yerdeğiştirmeler zemin etkisi durumunda elde edilmiştir. Kule yüksekliğinin büyük bölümünde korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirmeler en küçük olurken, bu bölümü takip eden noktalarda üniform yer hareketi etkisinde elde edilen yerdeğiştirmeler en küçük olmuştur. Kule eğilme momenti değişimi için de kule yatay yerdeğiştirme değişimine benzer bir değişim elde edilmiştir. Bununla birlikte bazı durumlarda korelasyon ve dalga yayılma etkileri için elde edilen değişim yakın olmakla birlikte, dalga yayılma etkisinin genellikle daha büyük olduğu görülmektedir.



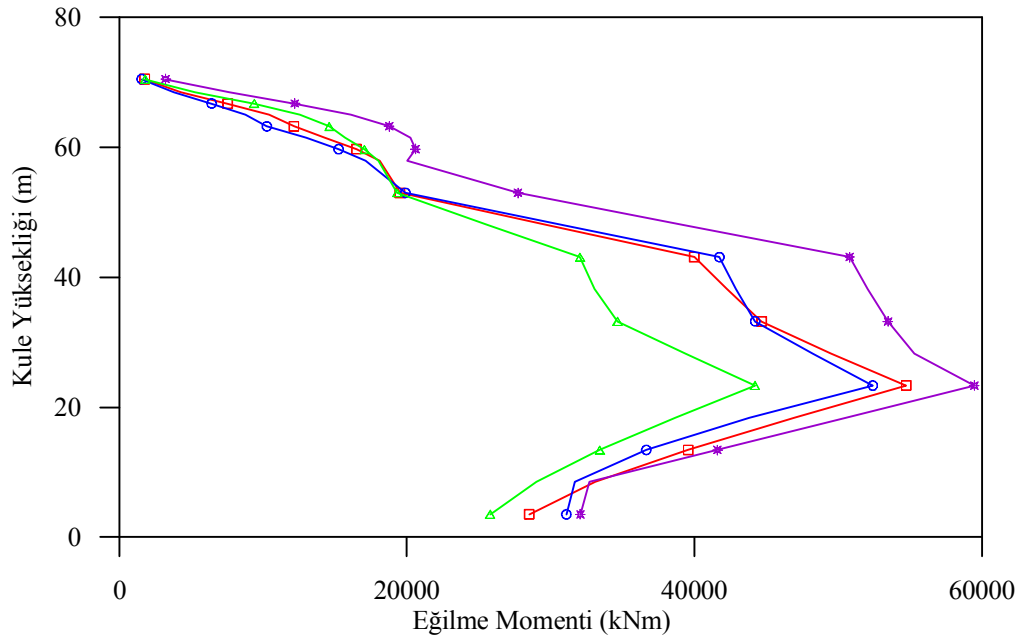
Şekil 4.179. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (YZE)



Şekil 4.180. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (YZE)



Şekil 4.181. Tabliye dinamik eğilme momentleri (YZE)

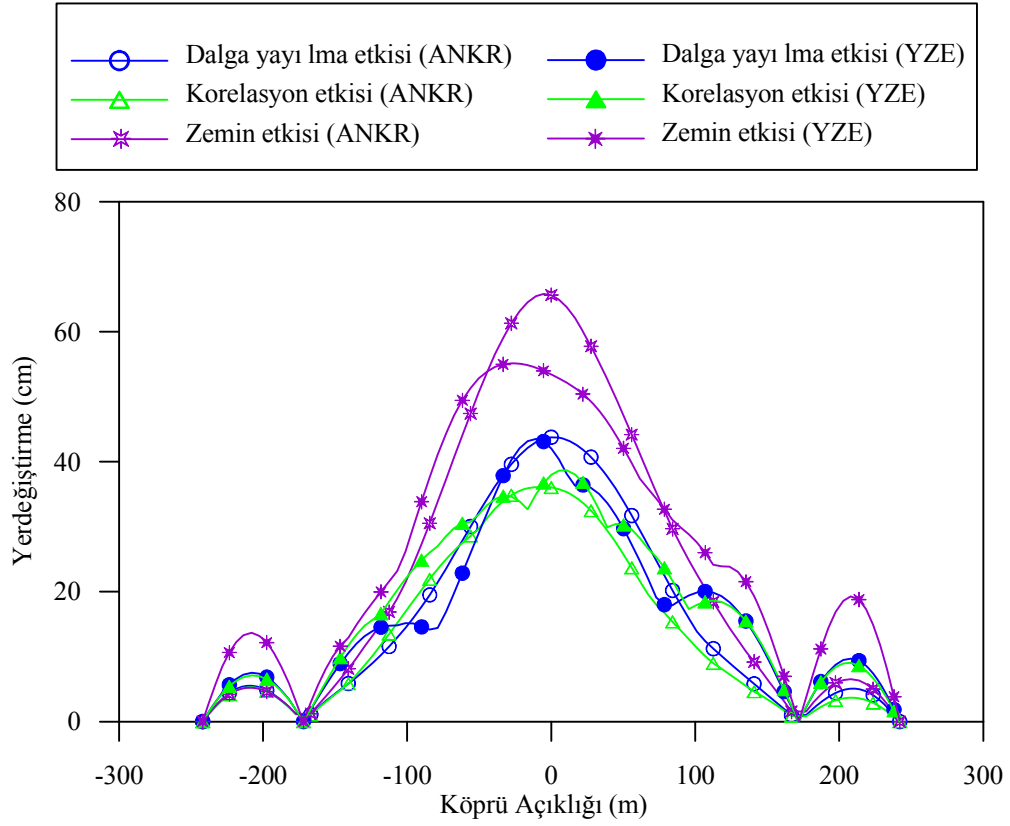


Şekil 4.182. Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri (YZE)

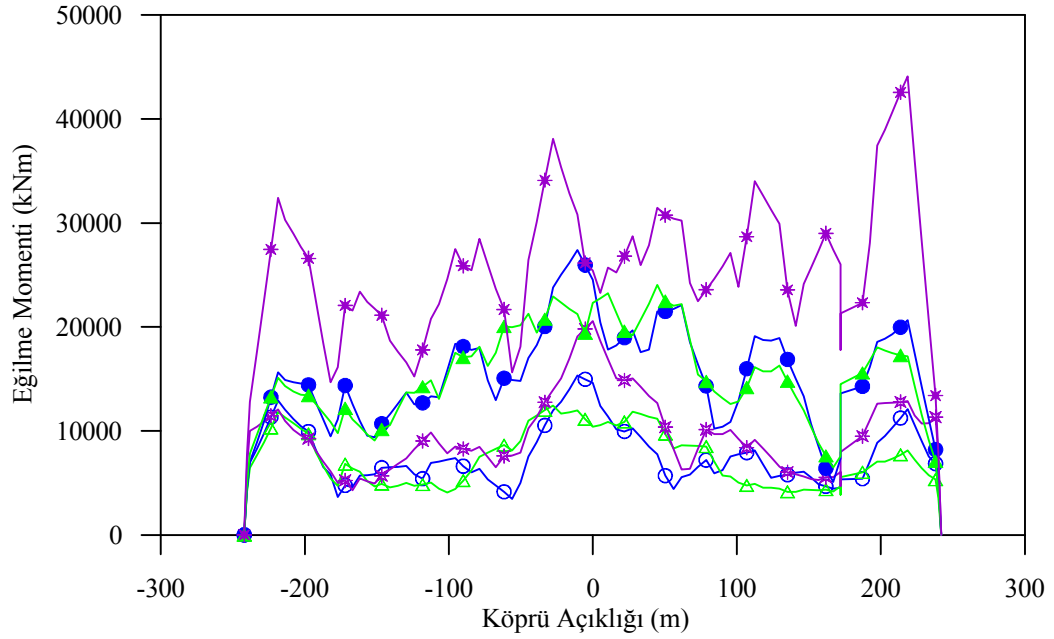
Yapı-zemin etkileşiminin üst yapı dinamik davranışı üzerindeki etkisini görmek amacıyla, yapı-zemin etkileşiminin analize dahil edilmesi ve ihmal edilmesi durumunda dinamik yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Köprü tabliyesinde elde edilen düşey yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modeller için Şekil 4.183-184'de karşılaştırılmaktadır. Tabliye düşey yerdeğiştirme değişimine deprem hareketi değişim bileşenlerinin etkisi daha fazla iken, eğilme momenti değerlerine yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre model ile, yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı modelde en büyük yerdeğiştirmeler zemin etkisinde elde edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması tabliye orta noktasında zemin, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen eğilme momenti değerlerini sırasıyla %24, %136 ve %53 oranında arttırmıştır.

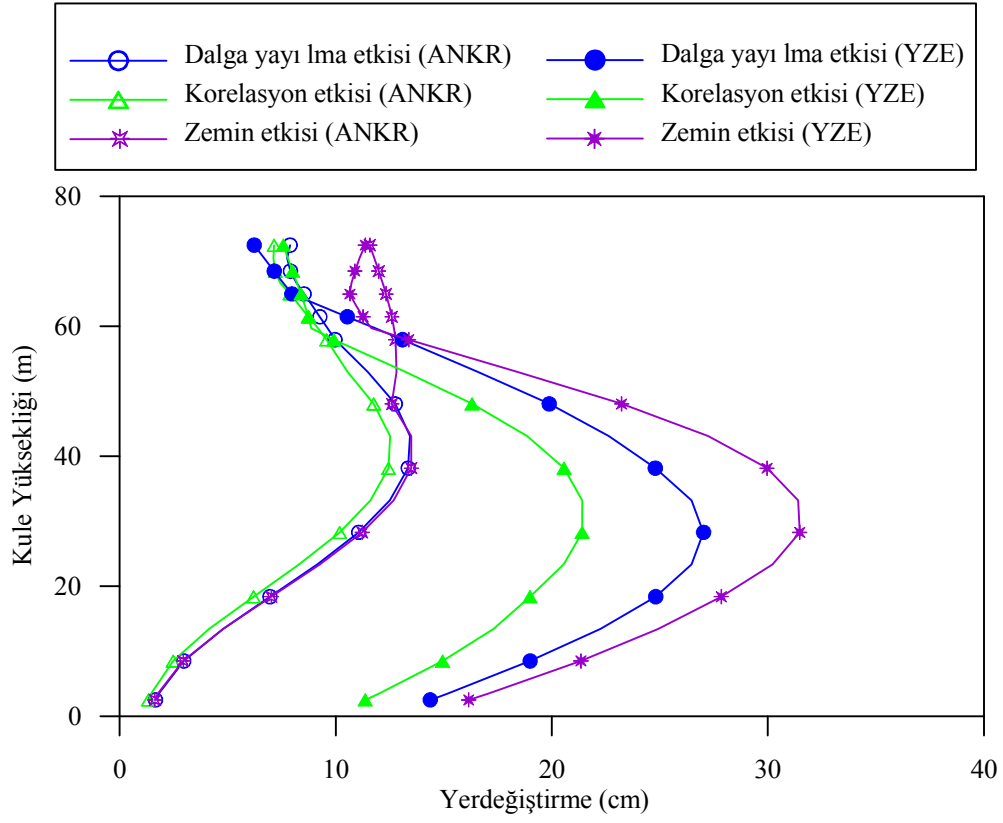
Belirtilen analiz durumları için kulede elde edilen yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimi Şekil 4.185 ve Şekil 4.186'da karşılaştırılmaktadır. Kulede yapı-zemin etkileşimi modeli için elde edilen tepki değerleri, ankastre model için elde edilen tepki değerlerinden önemli oranda daha büyük çıkmıştır. Bu durum kulede yapı-zemin etkileşiminin etkisinin, yer hareketi değişim bileşenlerinin etkisinden daha öne çıktığını göstermektedir.



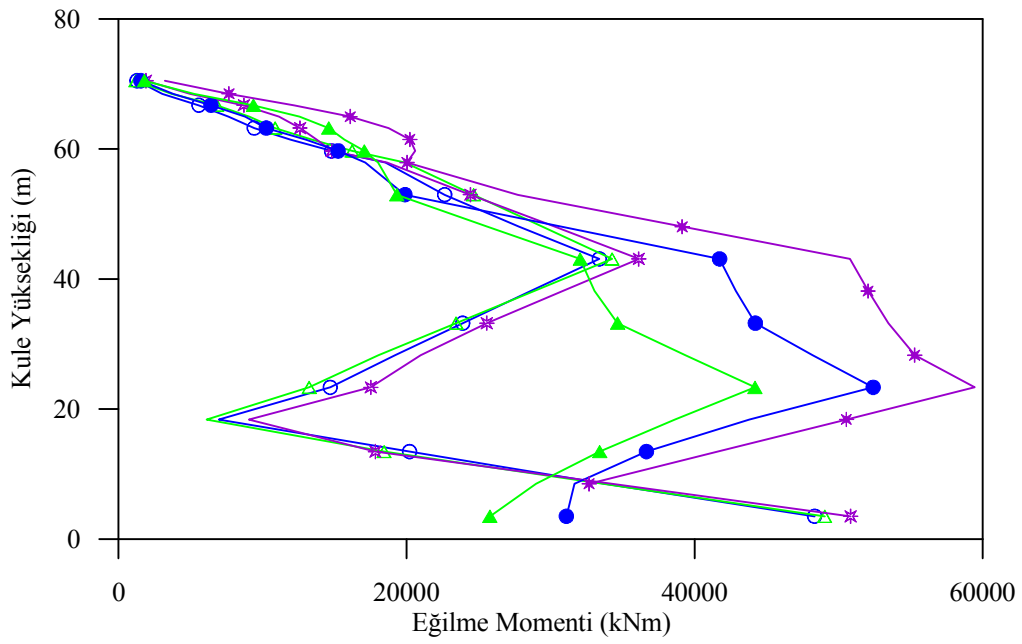
Şekil 4.183. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değışimi



Şekil 4.184. Tabliye dinamik eğilme momenti değışimi



Şekil 4.185 Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme değişimi



Şekil 4.186. Jindo kulesi dinamik eğilme momenti değişimi

#### **4.5. Zemin Koşullarının Değişimine Bağlı Olarak Köprünün Dinamik Davranışının İncelenmesi**

Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin ve deprem hareketi değişim bileşenlerinin kablolu köprülerin dinamik davranışları üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, yer hareketinin değişim bileşenlerine (korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi) bağlı olarak yer hareketleri üretilmekte ve köprü sisteminin mesnetlerine uzunlamasına doğrultuda etki ettirilmektedir. Köprü mesnetleri için aşağıda belirtilen homojen ve heterojen zemin cinsleri dikkate alınmaktadır.

- Jindo Adası adası tarafındaki mesnet ve Jindo kulesi mesnet noktalarındaki zemin türü ‘Sert’ zemin türü (Zemin sınıfı B) olarak tanımlanıp ‘B’ harfi ile gösterilirken, ana kıtadaki mesnet ve ana kıta kule mesnet noktaları için zemin türü ‘Orta’zemin türü (Zemin sınıfı C) olarak tanımlanıp ‘C’ harfi ile gösterilmektedir (BBCC).
- Jindo Adası adası tarafındaki mesnet ve Jindo kulesi mesnet noktalarındaki zemin türü ‘Sert’ zemin türü (Zemin sınıfı B) olarak tanımlanıp ‘B’ harfi ile gösterilirken, ana kıtadaki mesnet ve ana kıta kule mesnet noktaları için zemin türü ‘Yumuşak’zemin türü (Zemin sınıfı D) olarak tanımlanıp ‘D’ harfi ile gösterilmektedir (BBDD).
- Tüm mesnet noktalarında zemin türü homojen sert zemin türü (Zemin sınıfı B) olarak tanımlanmaktadır (BBBB).

##### **4.5.1. Ankastre mesnetli durumda köprünün dinamik davranışının incelenmesi**

Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmesi durumunda zemin şartlarındaki değişim, korelasyon etkisi ve dalga yayılma etkisi dikkate alınmak suretiyle elde edilen yerdeğiştirmeler ve eleman kuvvetleri dinamik bileşenler cinsinden karşılaştırılmaktadır.

Genel durumda tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme bileşenlerinin değişimi Şekil 4.187’de görülmektedir. Köprü açıklığı boyunca en büyük yerdeğiştirmeler BBDD heterojen zemin ortamında elde edilmiştir. Ayrıca, BBCC heterojen zemin ortamında

elde edilen yerdeğiştirme değerleri BBBB homojen zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirmelerden belirgin şekilde daha büyük bulunmuştur. Tabliye orta noktasında elde edilen yerdeğiştirmeler incelendiğinde BBDD zemin ortamı için elde edilen yerdeğiştirme değeri, BBCC ve BBBB zemin koşulları için elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %49 ve %105 daha büyük çıkmıştır. En büyük yerdeğiştirmelerin daha esnek olan köprü orta noktalarında olduğu dikkat çekmektedir.

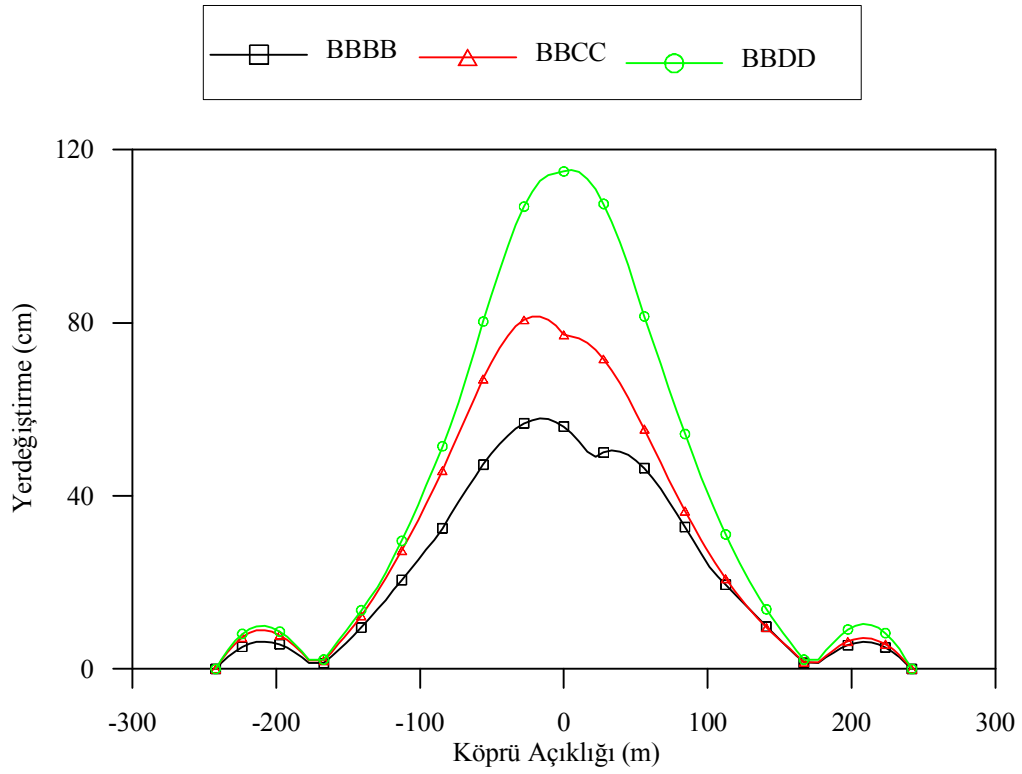
şekil 4.188’de genel durumda Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri görölmektedir. şekilden göröleceği üzere, homojen BBBB zemin ortamında en küçük yerdeğiştirmeler elde edilirken, kule alt bölümünde BBDD heterojen zemin ortamında ve kule üst bölümünde BBCC heterojen zemin ortamında en büyük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir.

Zemin cinsine bağlı olarak elde edilen kule eğilme momentleri incelendiğinde, zemin cinsine göre belirgin bir değişim olmadığı ve elde edilen eğilme momentleri arasında büyük bir fark olmadığı görölmektedir (şekil 4.189).

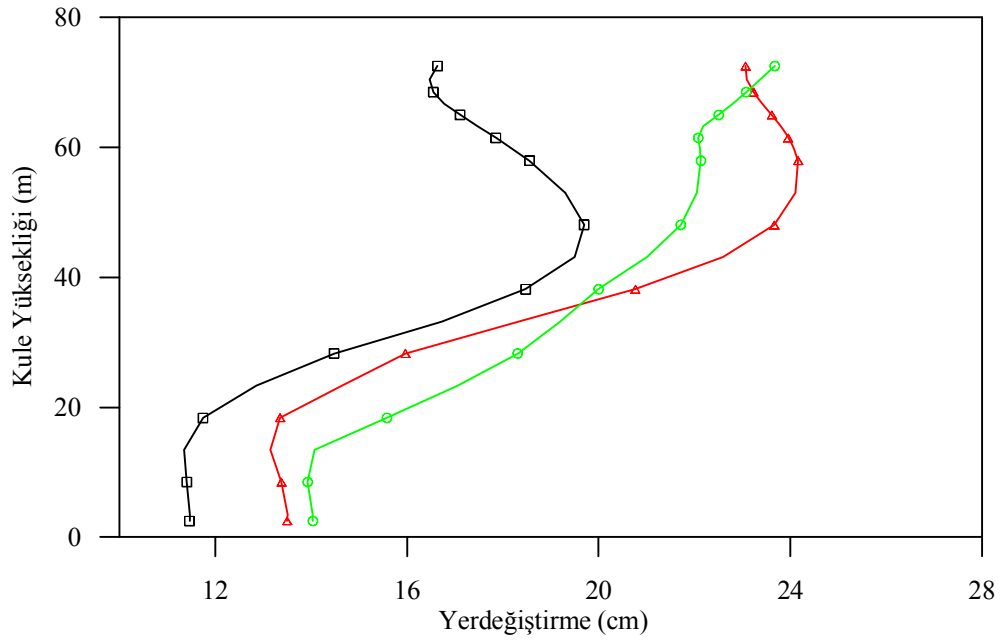
şekil 4.191’de kule dinamik eksenel kuvvet değişimi görölmektedir. Kule yüksekliğinin büyük bir bölümünde zemin cinsine bağlı olarak elde edilen eksenel kuvvetler arasında belirgin bir fark görölmektedir. Kule taban noktası eksenel kuvvetleri karşılaştırıldığında, BBDD zemin ortamında elde edilen eksenel kuvvet değeri BBCC zemin ortamında elde edilen değerden %61 ve BBBB zemin ortamında elde edilen eksenel kuvvet değerinden %82 daha büyük çıkmaktadır.

Kablolu köprü sisteminin zemine ankastre olarak mesnetlendiği modelde, heterojen zemin ortamında elde edilen yapısal tepkiler homojen zemin ortamı için elde edilen tepkilerden daha büyük çıkmaktadır. Ayrıca, mesnetlerdeki zemin cinsleri arasındaki farklılık arttıka, elde edilen tepki değerlerinin arttığı görölmektedir.

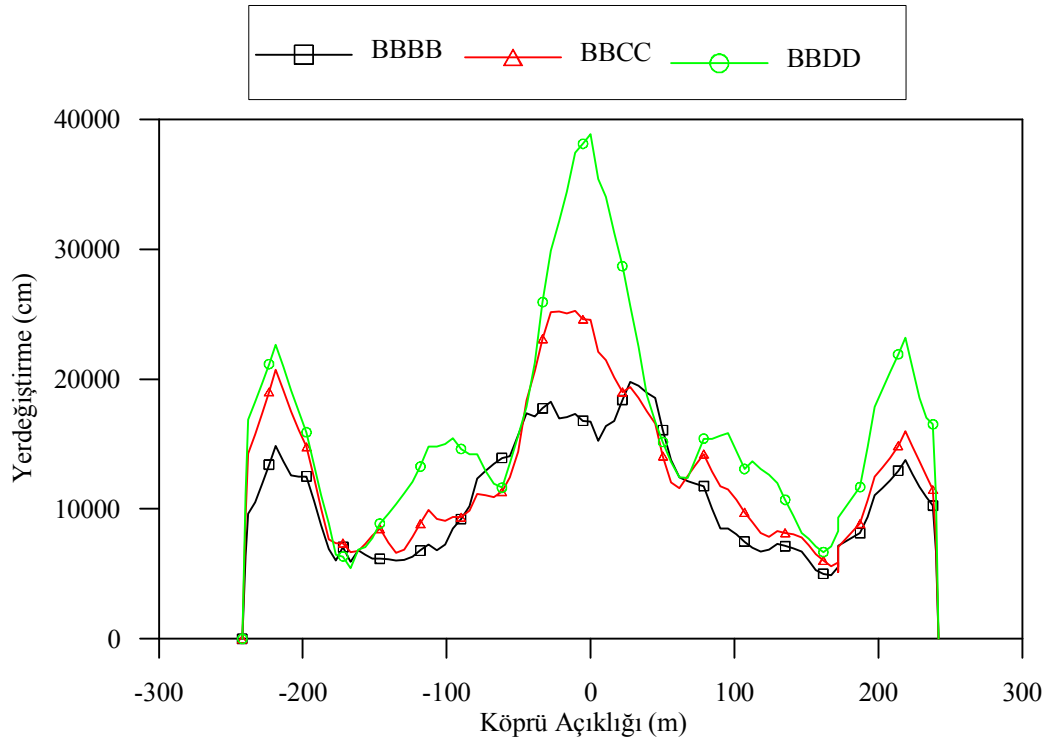
Üniform yer hareketi durumunda etkili olmayan antisimetrik modların, dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği üniform olmayan yer hareketleri için daha da etkili olduğu burada görülmektedir.



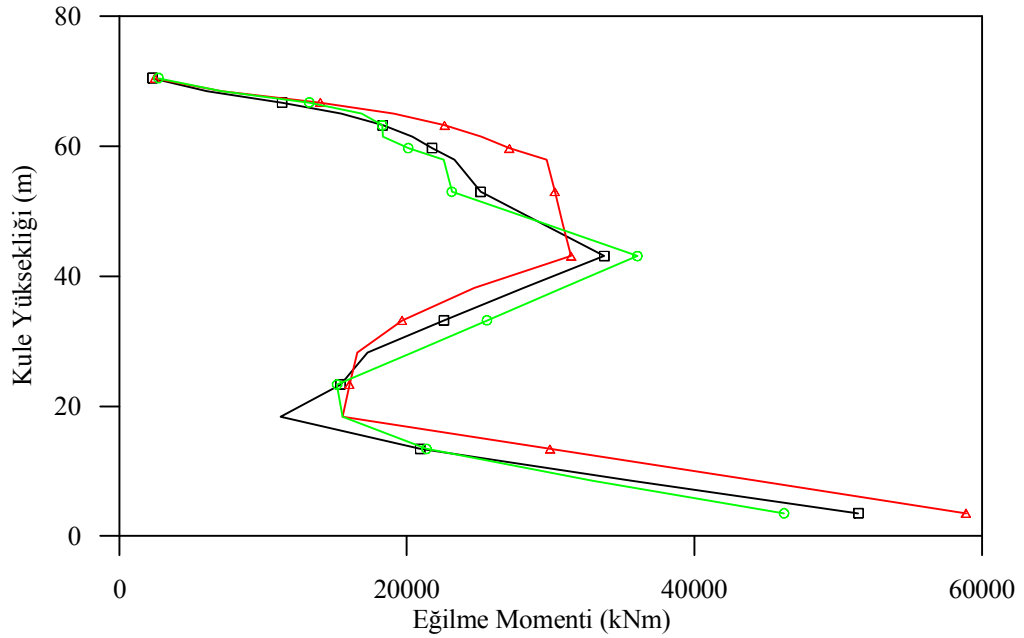
Şekil 4.187. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Genel durum, ANKR)



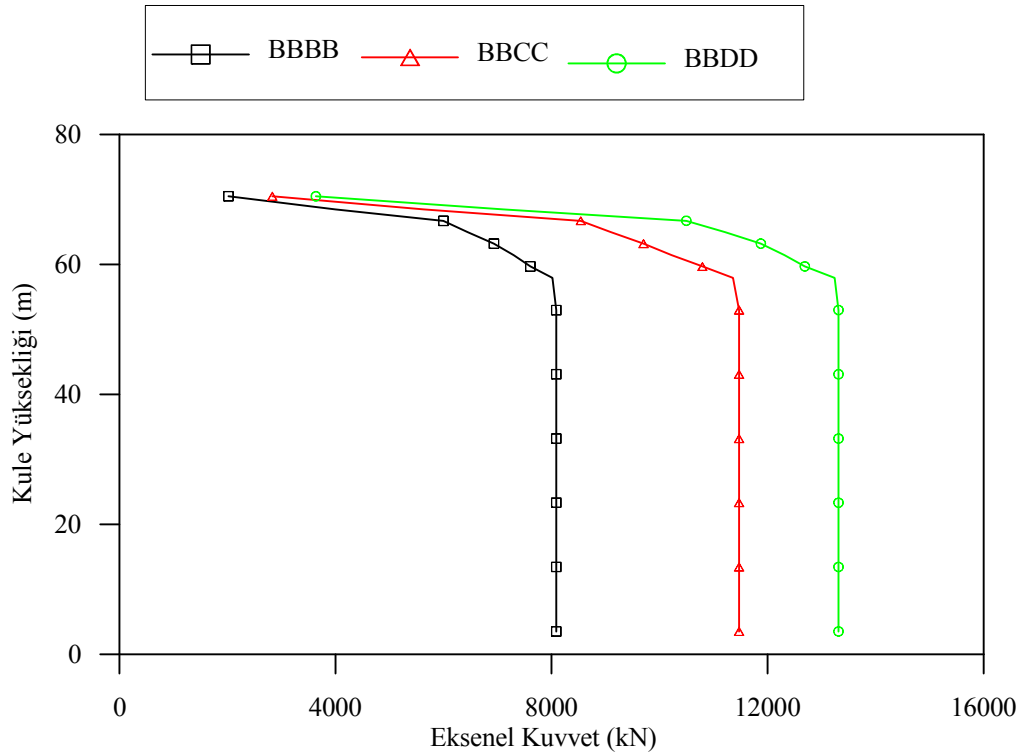
Şekil 4.188. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Genel durum, ANKR)



Şekil 4.189. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Genel durum, ANKR)



Şekil 4.190. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri (Genel durum ANKR)



Şekil 4.191. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Genel durum, ANKR)

#### 4.5.2. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda köprünün dinamik davranışının incelenmesi

Bu bölümde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda zemin şartlarındaki değişim, korelasyon etkisi ve dalga yayılma etkisi dikkate alınmak suretiyle elde edilen yerdeğiştirmeler ve eleman kuvvetleri dinamik bileşenler cinsinden karşılaştırılmaktadır.

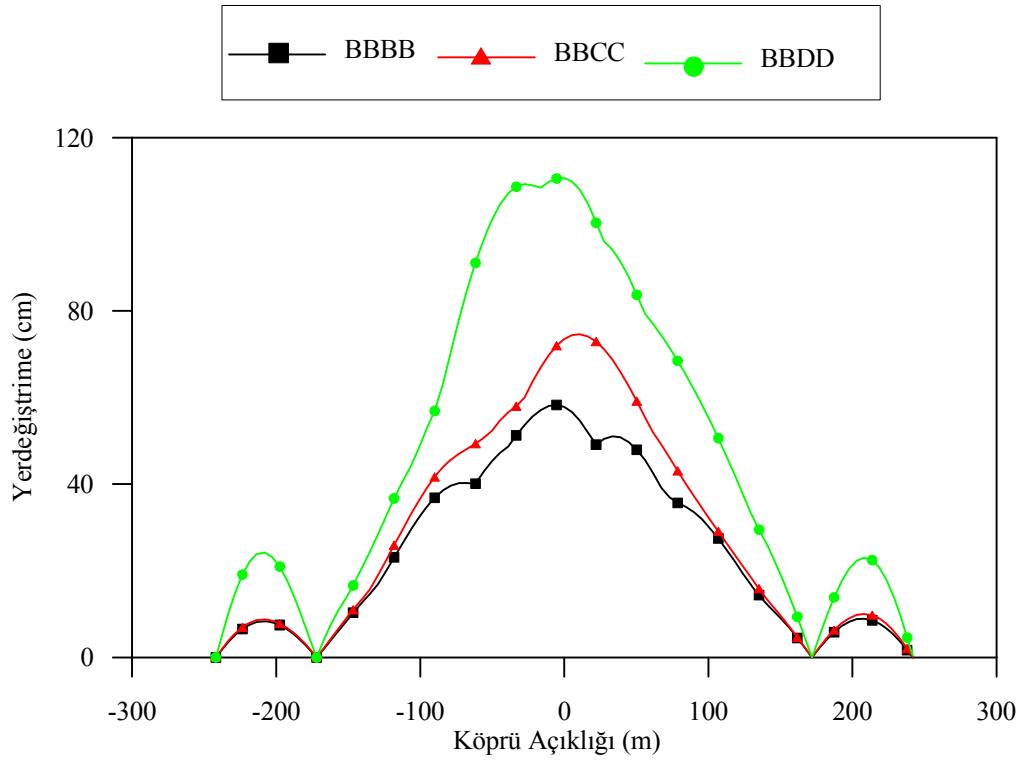
Genel durumda tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi Şekil 4.192’de görülmektedir. Köprü açıklığı boyunca en büyük yerdeğiştirmeler BBDD heterojen zemin ortamında elde edilmiştir. BBCC heterojen zemin cinsi için belirlenen yerdeğiştirmeler, BBBB homojen zemin cinsi için elde edilen yerdeğiştirmelerden büyük olmakla birlikte, aradaki fark küçüktür. Tabliye orta noktasında BBDD zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirme değeri, BBCC ve BBBB zemin ortamlarında elde edilen yerdeğiştirmelerden sırasıyla %50 ve 105 daha büyük çıkmıştır.

Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme değişimi Şekil 4.192’de grlmektedir. Kule yüksekliği boyunca BBBB ve BBCC zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirmeler birbirine yakın bulunmuştur. BBDD zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirmeler ise BBBB ve BBCC zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirmelerden daha büyüktür. Kule tepe noktasında BBDD zemin ortamında elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri aynı noktada BBCC ve BBBB zemin ortamlarında elde edilen yerdeğiştirmelerden %43 ve %82 daha büyük çıkmıştır.

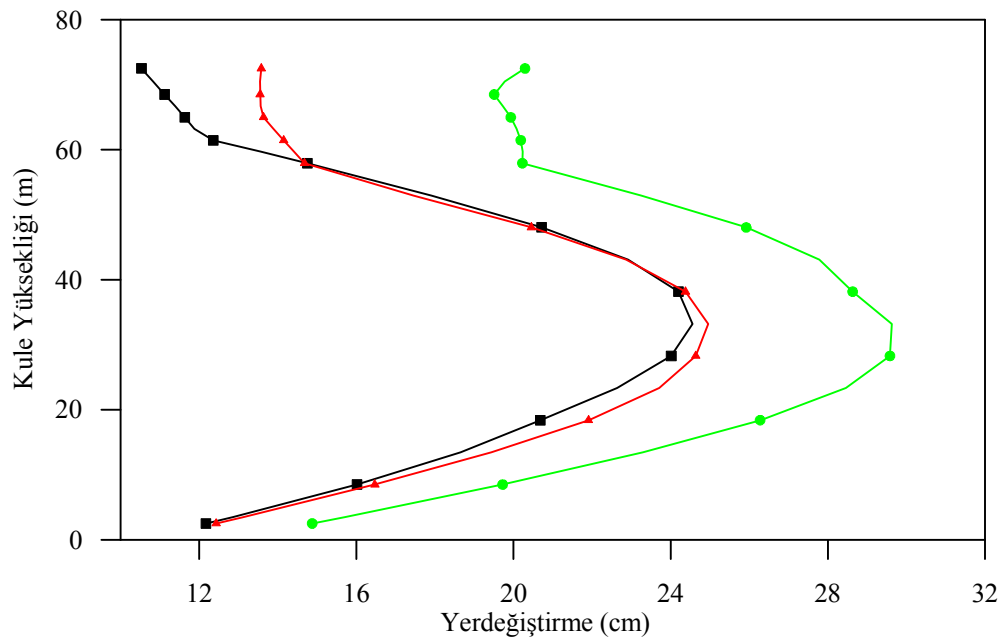
Şekil 4.194’te tabliye dinamik eğilme momenti değişimi grlmektedir. Köprü açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri BBDD heterojen zemin ortamında elde edilmiştir.

Şekil 4.195 ve Şekil 4.196’da kule dinamik eğilme momenti ve eksenel kuvvet değişimleri grlmektedir. Kule yüksekliğinin elli metrelik ilk kısmında BBBB zemin ortamında elde edilen moment değerleri, BBCC heterojen zemin ortamında elde edilen moment değerlerinden daha büyüktür. Bunun yanında, eksenel kuvvet değişimi incelendiğinde, BBCC zemin ortamında elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin kule yüksekliği boyunca BBBB zemin ortamında elde edilen eksenel kuvvet değerlerinden büyük ve BBDD zemin ortamında elde edilen değerlerden küçük olduğu gözlenmiştir.

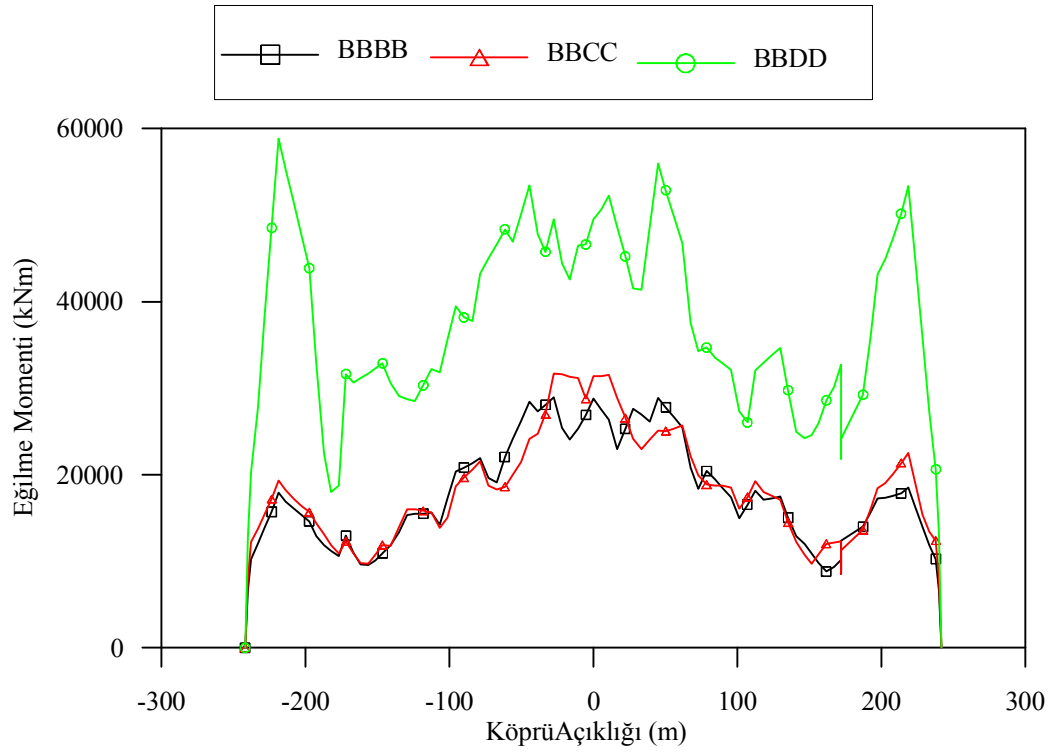
Gerek ankastre durumda ve gerekse yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda, köprünün mesnetlendiği zemin Şartlarındaki değişimin yapısal tepkileri önemli derecede etkilediği gözlenmiştir. Ayrıca, zemin Şartlarındaki farklılığın artması ile tepki değerleri daha da büyümektedir.



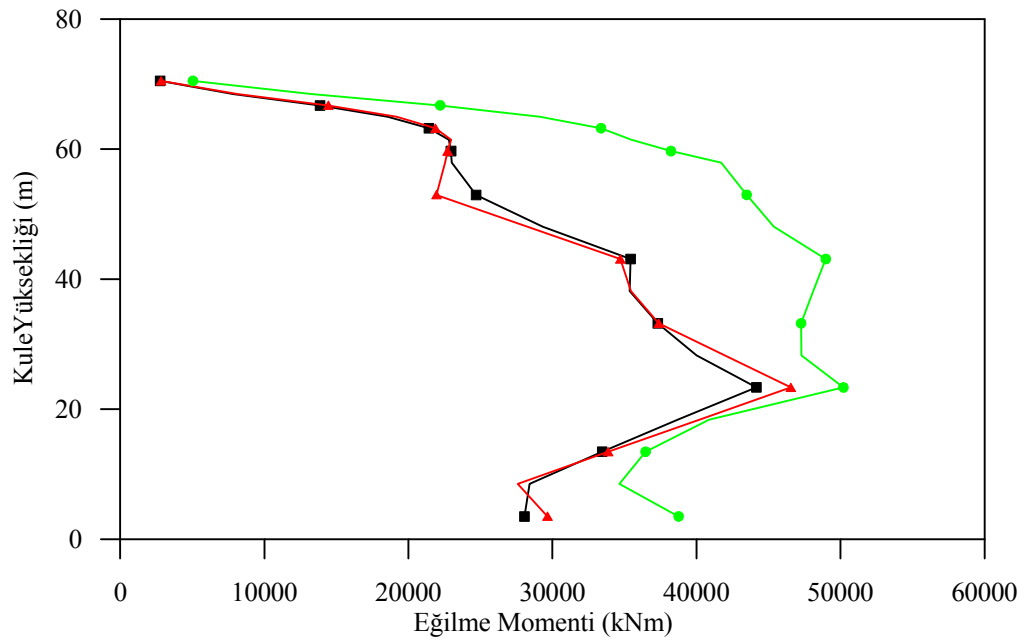
Şekil 4.192. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri (Genel durum, YZE)



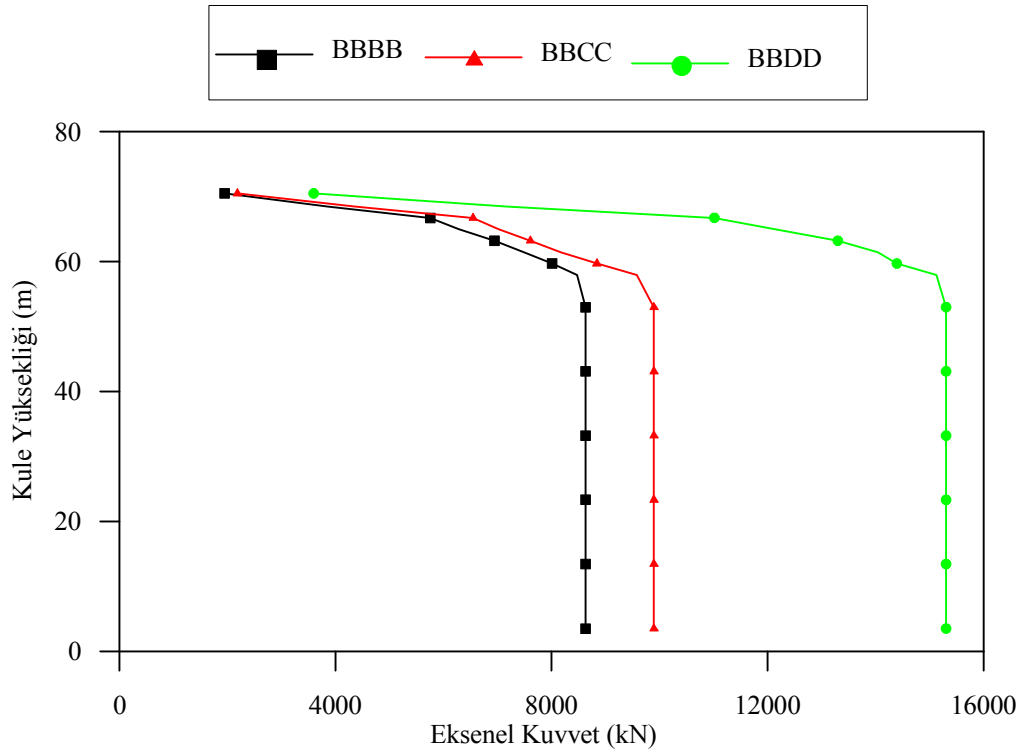
Şekil 4.193. Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri (Genel durum, YZE)



Şekil 4.194. Tabliye dinamik eğilme momentleri (Genel durum, YZE)



Şekil 4.195. Jindo Kulesi dinamik eğilme momentleri (Genel durum, YZE)



Şekil 4.196. Jindo kulesi dinamik eksenel kuvvetleri (Genel durum, YZE)

#### 4.5.3. Yapı-zemin etkileşiminin ve zemin şartlarındaki değişimin yapısal sistem davranışına etkisi

Bu bölümde köprü sisteminin dinamik davranışına, yapı-zemin etkileşiminin ve zemin koşullarındaki değişimin etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modeller için zemin şartları BBBB, BBCC ve BBDD olarak dikkate alınmıştır. Üç zemin durumu için elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı BBBB zemin ortamı için elde edilen dinamik yapısal tepkilerle karşılaştırılmıştır.

Genel durumda tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme bileşenlerinin değişimi Şekil 4.197'de görülmektedir. Köprü orta açıklığında en büyük yerdeğiştirmeler BBDD zemin durumunda elde edilirken, kenar açıklıklarda ise yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı BBBB zemin ortamı için elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği BBDD ve BBCC ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı BBBB zemin ortamında elde edilen yerdeğiştirmeler

sırasıyla 67cm, 14cm ve 7cm'dir. En büyük yerdeğiştirmelerin daha esnek olan köprü orta noktalarında olduğu dikkat çekmektedir.

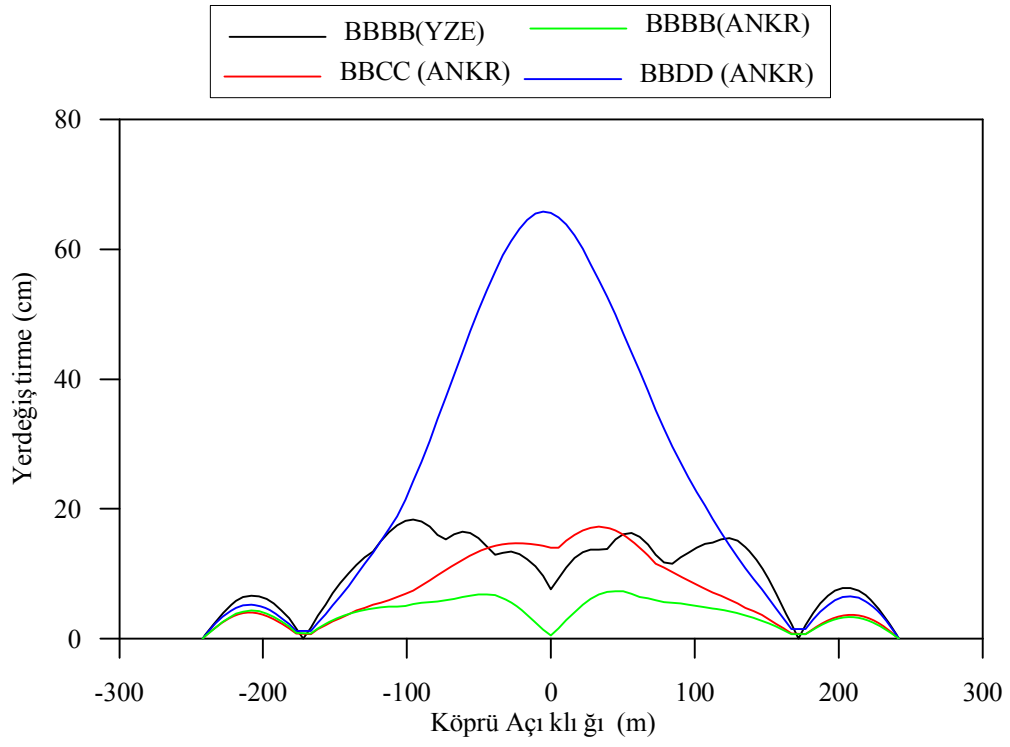
Şekil 4.198'de genel durumda Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri görölmektedir. Şekilden göröleceği üzere, kule yüksekliğinin alt bölümünde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı BBBB zemin ortamında en büyük yatay yerdeğiştirmeler elde edilirken, kule yüksekliğinin üst bölümünde yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği BBDD zemin durumunda en büyük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir.

Tabliye dinamik eğilme momentlerinin değişimi Şekil 4.199'da görölmektedir. Tabliye açıklığı boyunca en büyük eğilme momenti değerleri genellikle yapı-zemin etkileşim etkisi için elde edilmiştir.

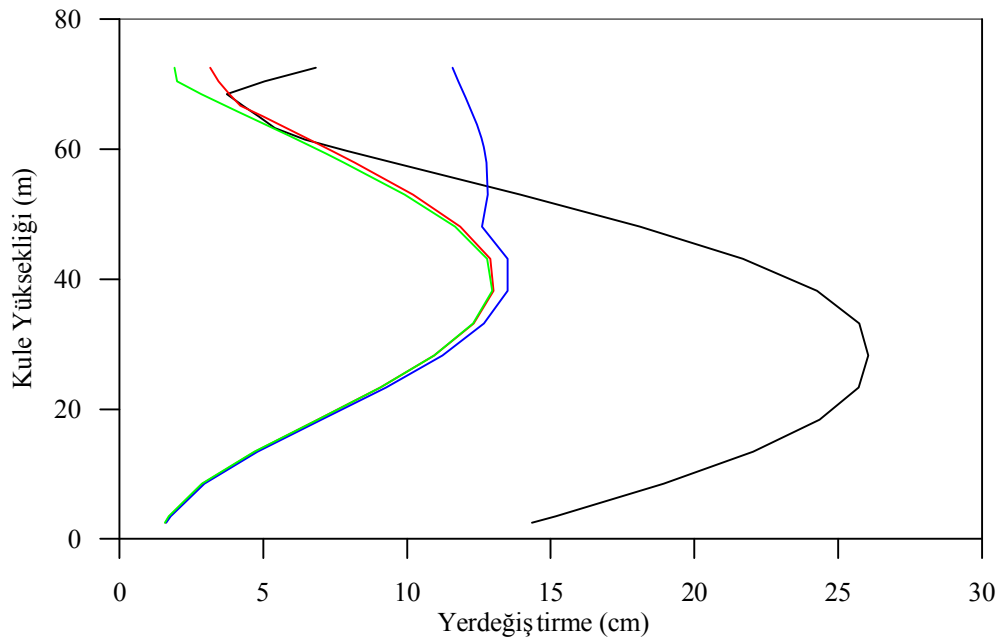
Şekil 4.200'de kule dinamik eğilme momenti değişimi görölmektedir. Kule yüksekliği boyunca yapı zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı BBDD, BBCC ve BBBB zemin ortamlarında elde edilen moment değerleri birbirine çok yakın olarak elde edilmiştir. Ancak yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının, kule yüksekliğinin orta bölümünde elde edilen moment değerlerini büyük oranda arttırdığı görölmektedir.

Tabliye ve kule eğilme momenti değişimlerine ait grafikler incelendiğinde, yapı-zemin etkileşimi etkisinin daha belirgin olduğu görölmektedir. Ancak tabliye ve kule yerdeğiştirme değişimleri incelendiğinde ise, kablolu köprü sisteminin zemine ankastre olarak mesnetlendiği modelde, heterojen zemin ortamı için (BBDD) elde edilen yapısal tepkiler yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı homojen zemin ortamı (BBBB) için elde edilen tepkilerden bazı durumlarda daha büyük çıkmaktadır.

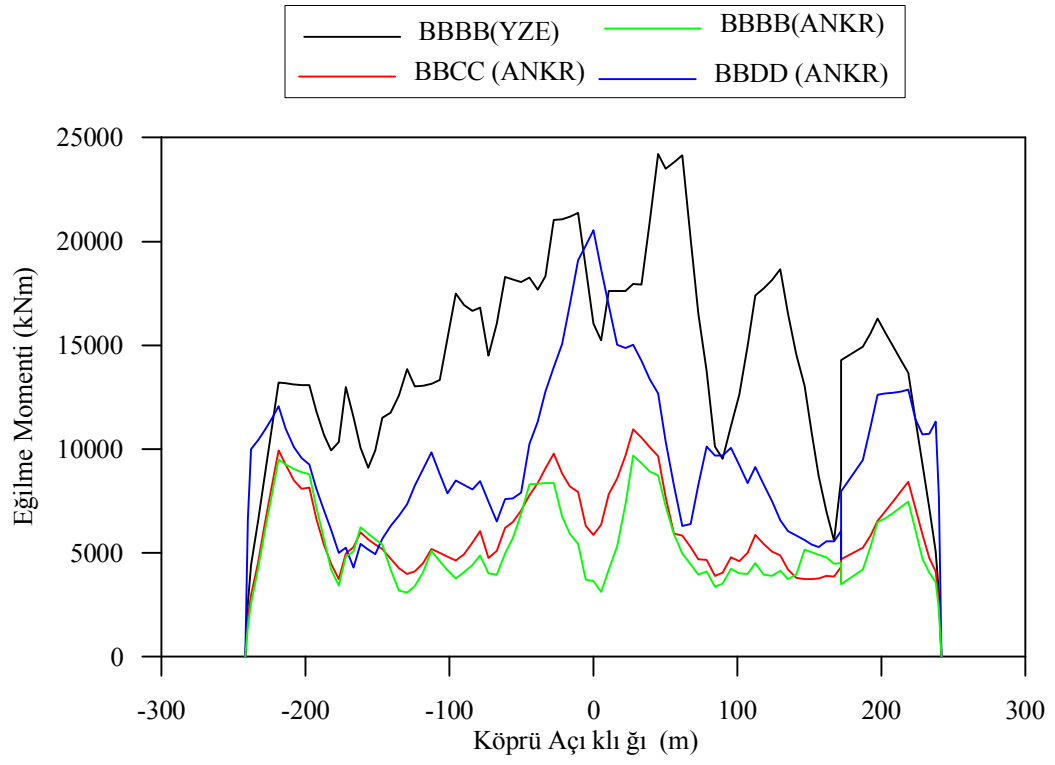
Yapı-zemin etkileşimi ve zemin şartlarındaki değişimin tabliye tepkileri üzerinde önemli etkilerinin olduğu görölürken, kulelerde yapı-zemin etkileşim etkisinin daha belirgin olduğu görölmektedir.



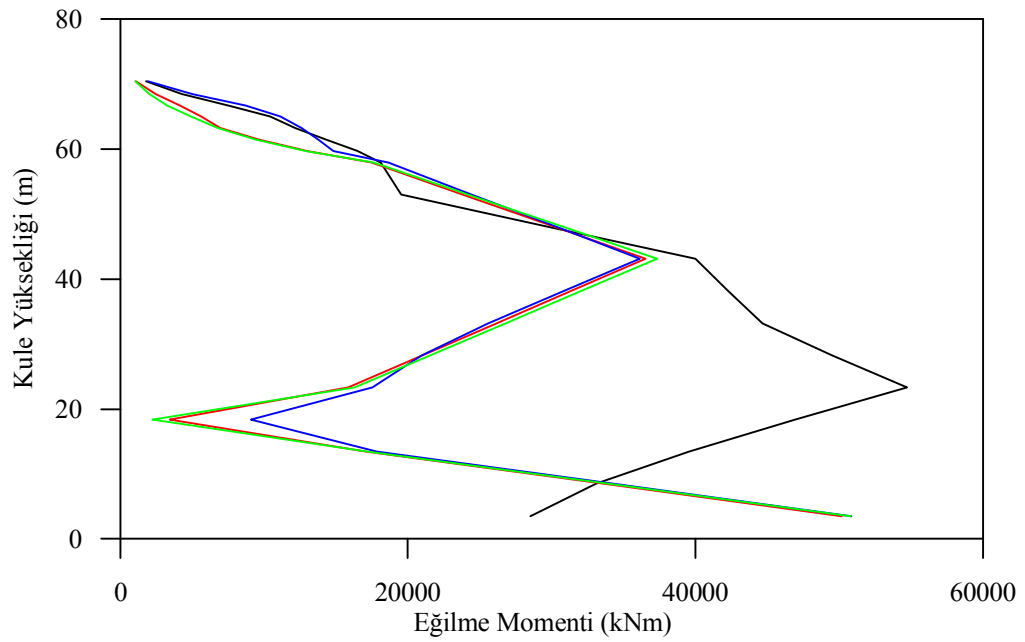
Şekil 4.197. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.198. Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 4.199. Tabliye dinamik eğilme momentleri



Şekil 4.200 Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yer hareketinin yayılma ve değişim etkileri ile yapı-zemin etkileşiminin kablolu köprü türü uzun açıklıklı sistemlerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, yer hareketi elde edilirken Hao ve arkadaşları [1] tarafından önerilen simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Yer hareketinin spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edildiği yöntemde yer hareketinin değişimi korelasyon etkisi, dalga yayılma etkisi ve zemin şartlarındaki değişim etkisi ile dikkate alınmıştır. Yapı-zemin etkileşimi, sistemi yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Alt sistem yaklaşımında üst yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak ele alınmış ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denge denklemleri, daha sonra üst yapı-zemin ara kesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilmiştir. Alt sistem yaklaşımında yapı-zemin etkileşimi, temel zemin arakesiti serbestlik dereceleri için tanımlı empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır.

Uygulama amacıyla Güney Kore'de inşa edilen 484 metre uzunluğundaki Jindo Kablolu Köprüsü seçilmiştir. Söz konusu köprünün deprem hareketi etkisindeki dinamik davranışını belirlemek amacıyla dinamik analizi yapılırken, iki boyutlu olarak modellenen köprü sistemine yer hareketi uzunlamasına doğrultuda etki ettirilmiştir.

Yer hareketi değişim bileşenleri ve yapı-zemin etkileşiminin üst yapı dinamik davranışı üzerindeki etkileri, birlikte ve ayrı ayrı dikkate alınmak suretiyle incelenmiştir. Bu amaçla, üniform yer hareketi etkisindeki yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapan STOCAL programında gerekli değişiklikler yapılmak suretiyle, SSI bilgisayar programı geliştirilmiş ve gerekli analizler yapılabilmektedir.

Yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketi değişim bileşenlerinin dikkate alınmasının, seçilen kablolu köprü örneği dinamik davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Köprü eksenine doğrultusunda uygulanan üniform yer hareketi nedeni ile, rijit cisim hareketine bağlı olarak kule zahiri-statik yatay yerdeğiştirme bileşenleri sabit olurken, tabliye düşey yerdeğiştirmeleri ile tabliye ve kulelerdeki eleman kuvvetleri sıfır olmuştur. Dolayısıyla, üniform yer hareketi durumunda tabliye düşey yerdeğiştirmeleri, tabliye ve kule eleman kuvvetleri yalnızca dinamik bileşenden meydana gelmiştir.
- Yer hareketi değişiminin dikkate alınması durumunda köprü mesnetlerine etkiyen yer hareketleri farklılık göstereceğinden, toplam yapısal tepkiler zahiri-statik ve dinamik bileşenlerin toplamından oluşacaktır. Yapılan analizler sonucunda, esnek olan köprü bölümlerinde dinamik bileşenin etkisi öne çıkarken, rijit olan köprü bölümlerinde zahiri-statik bileşenin etkisi öne çıkmıştır. Ayrıca, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda, zahiri-statik bileşenin toplam tepkiye katkısı azalırken, dinamik bileşenin katkısı artış göstermiştir.
- Köprünün mesnetlendiği zeminin ana kaya (Zemin sınıfı A) özelliklerinde olması durumunda, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının yapısal köprü tepkileri üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak köprünün mesnetlendiği zemin sınıfı zayıfladıkça (Zemin sınıfı C, Zemin sınıfı D), yapı-zemin etkileşiminin yapısal tepkiler üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bu artışlar ataletsel köprü-zemin etkileşiminden kaynaklanmıştır. Yapı-zemin etkileşiminden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin etkisi anakaya ve sert zemin durumlarında çok fazla olmadığından, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda elde edilen tepkiler yakın çıkmıştır.

- Köprünün mesnetlendiği zemin sınıfının yumuşaması ile köprü sisteminin tepki değerleri yapı-zemin etkileşimine bağlı olarak genellikle artış göstermekle birlikte, tersi durumların olduğu da gözlenmiştir. Üniform yer hareketi için homojen sert (Zemin sınıfı B) ve homojen orta (Zemin sınıfı C) zemin sınıflarında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda, yerdeğiştirmeler açısından orta zemin (Zemin sınıfı C) sınıfı için en büyük değerler elde edilirken, eleman kuvvetleri açısından sert (Zemin sınıfı B) zemin sınıfı için daha büyük değerler bulunmuştur. Bu durumun nedenini, B ve C zemin türleri için EC8'de tanımlanan tasarım ivme spektrumunun periyoda bağlı değişimini inceleyerek açıklamak mümkündür. Dinamik yerdeğiştirmelerin daha çok ilk birkaç moda bağlı olmasından hareketle, ilk üç yapısal moda ait periyot değerlerinin C zemin sınıfının spektral ivme değerinin B zemin sınıfına göre daha büyük olduğu periyot bölgesine rastlaması, yerdeğiştirmeler açısından C zemin sınıfı için daha büyük yerdeğiştirmeler elde edilmesini açıklamaktadır. Bunun yanında, eleman kuvvetleri üzerinde etkin olacak yüksek modlara ait periyot değerlerinin, B zemin sınıfının spektral ivme değerinin daha büyük olduğu periyot bölgesine rastlaması, B zemin sınıfı için daha büyük eleman kuvvetleri bulunmasını açıklamaktadır.
- Gerek yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum ve gerekse yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda, farklı yer hareketi yayılma hızları için üretilen yer hareketlerine bağlı olarak elde edilen yapısal tepkiler genellikle dalga yayılma hızı azaldıkça artış göstermiştir. Ayrıca, dinamik tepki bileşeninin toplam tepkiye katkısının, zahiri-statik bileşene oranla çok daha fazla olduğu dikkati çeken başka bir noktadır. Bunun yanında, deprem hareketi değişim bileşenlerinden yer hareketinin sonlu hızla yayılmasının köprünün daha esnek olan tabliye tepkileri üzerinde daha etkin olduğu görülürken, yapı-zemin etkileşiminin kule tepkileri üzerinde etkin olduğu gözlenmiştir.

- Üniiform yer hareketi için antisimetrik modların yapı davranışına herhangi bir katkısı olmamaktadır. Yer hareketindeki değişimin dikkate alınması durumunda antisimetrik modların dinamik tepki bileşenlerine katkı sağlaması, değişen yer hareketi durumundaki sonuçların üniiform yer hareketine oranla daha büyük olmasını açıklamaktadır.
- Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda homojen sert zemin (Zemin sınıfı B) ortamında, deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak yer hareketinin oluşturulduğu genel durumda en büyük tepki değerleri elde edilirken, üniiform yer hareketi için en küçük tepkiler bulunmuştur. Bunun yanında korelasyon etkisine bağlı olarak oluşturulan yer hareketi için elde edilen zahiri-statik tepkiler, dalga yayılma etkisine bağlı olarak oluşturulan yer hareketi için elde edilen zahiri-statik tepkilerden büyük olurken, dinamik bileşen için tersi durum söz konusudur. Dalga yayılma etkisine bağlı olarak belirlenen dinamik tepkiler, genellikle korelasyon etkisine bağlı olarak belirlenen dinamik tepkilerden az da olsa büyük çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda deprem hareketi değişim bileşenlerine bağlı olarak elde edilen değişim, genel olarak ankastre durum için elde edilen değişimle paralellik göstermekle birlikte, daha karmaşık bir değişim ortaya çıkmıştır. Bu durumda, korelasyon etkisine bağlı olarak elde edilen dinamik ve toplam tepkiler zaman zaman dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerden büyük çıkarken, bazen de küçük çıkmaktadır. Ankastre durumda etkinliği nispeten az olan korelasyon etkisinin, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile birlikte etkinliğini arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, özellikle kule alt bölümlerinde üniiform yer hareketi için elde edilen dinamik tepkilerin, dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yer hareketi için elde edilen tepkilerden büyük çıktığı gözlenmiştir. Bu durum, zaten karmaşık olan dinamik probleme yapı-zemin etkileşiminin eklenmesinin problemi daha da karmaşık bir hale dönüştürdüğüne işaret etmektedir.

- Yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri her analiz durumu için zahiri-statik, dinamik ve toplam bileşenler cinsinden ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yapısal tepkiler için elde edilen değişimler incelendiğinde, toplam tepkilere en büyük katkıyı dinamik bileşenin sağladığı anlaşılmaktadır. Toplam tepkiler, bazı durumlarda dinamik tepkilerden büyük olurken, bazı durumlarda küçük çıkmıştır. Dinamik bileşenin toplam tepkiden daha büyük olması, dikkate alınan t anındaki zahiri-statik bileşenin işaretinin dinamik bileşenin işaretinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır.
- Kablolu köprü sistemi, yapı-zemin etkileşimi ve deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkilerinin göreceli etkileri açısından ayrı ayrı incelendiğinde, yapı-zemin etkileşiminin genellikle analizlerde dikkate alınması gereği açık bir şekilde görülürken, dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkilerinin de belirli yapısal tepkiler üzerinde önemli etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır. Deprem hareketi değişim bileşenlerine bağlı olarak belirlenen yer hareketlerinin genellikle köprünün daha esnek olan tabliye tepkileri üzerinde etkin olduğu görülürken, yapı-zemin etkileşiminin daha rijit olan kule tepkileri üzerinde etkin olduğu gözlenmiştir. Görüleceği gibi, yer hareketi değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin birlikte dikkate alınması, söz konusu etkilerin ayrı ayrı toplamından ibaret değildir. Dikkate alınan tüm etkiler arasında karmaşık bir etkileşim söz konusudur. Yapısal köprü tepkilerinin yer hareketindeki değişim ile yapı-zemin etkileşimine bağlı olması yanında; zemin cinsi, yapının dinamik özellikleri, hesaplanacak olan tepki büyüklüğü, tepki büyüklüğünün hesaplanacağı nokta ve yer hareketinin hakim frekansı ile yapı sisteminin hakim frekansı arasındaki ilişki de, elde edilecek tepkilerin değişimi üzerinde etkili olacaktır. Problemin bu karmaşık yapısı nedeniyle, tek bir köprü örneğine bağlı olarak genel sonuçlar üretmek oldukça zor olmaktadır.

- Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda homojen orta zemin (Zemin sınıfı C) ortamında, deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak yer hareketinin üretildiği genel durum ile dalga yayılma etkisi durumuna bağlı olarak üretilen yer hareketi için en büyük tepki değerleri elde edilirken, üniform yer hareketi için en küçük tepkiler bulunmuştur. Burada dalga-yayılma etkisi, korelasyon etkisine oranla belirgin şekilde ön plana çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda deprem hareketi değişim bileşenlerine bağlı olarak elde edilen değişim, genel olarak ankastre durum için elde edilen değişimle paralellik içindedir. Ancak, burada deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alındığı genel durum için üretilen yer hareketine bağlı olarak belirlenen tepki değerleri, sadece dalga yayılma etkisi dikkate alınarak üretilen yer hareketine bağlı olarak elde edilen yapısal tepkilerden daha büyük çıkmıştır. Ayrıca, özellikle kule alt bölümlerinde üniform yer hareketi için elde edilen dinamik tepkilerin, dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak belirlendiği yer hareketi için elde edilen tepkilerden büyük çıkması problemin karmaşık yapısını bir kez daha ortaya koymaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının, ankastre sisteme oranla yapısal tepkileri arttırdığı dikkat çeken diğer bir noktadır.
- Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum ile yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda homojen yumuşak zemin (Zemin sınıfı D) ortamında, deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin birlikte dikkate alınarak yer hareketinin üretildiği genel durum için en büyük zahiri-statik tepki değerleri elde edilirken, korelasyon etkisi için genellikle en küçük tepkiler bulunmuştur. Bunun yanında, dalga yayılma etkisine bağlı olarak üretilen yer hareketi için elde edilen tepkiler, korelasyon etkisi dikkate alınarak üretilen yer hareketi için belirlenen tepkilerden daha büyük çıkmıştır. Ancak dinamik ve toplam tepkiler için, dalga-yayılma etkisine bağlı olarak üretilen yer hareketi için

elde edilen tepkiler genellikle en büyük olmuştur. Başka bir ifade ile dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisine oranla burada daha da ön plana çıkmıştır.

- Homojen sert, orta ve yumuşak zemin ortamlarında deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, zeminin rijit olması durumunda korelasyon etkisinin, dalga yayılma etkisi kadar etkin iken, zeminin yumuşaması ile dalga yayılma etkisinin çok daha öne çıktığı gözlenmiştir. Ayrıca, sert zemin ortamında zahiri-statik bileşenler dinamik bileşen kadar olmasa dahi, toplam tepkiler üzerinde önemli etkileri olabilmektedir. Ancak, zemin ortamının yumuşaması ile zahiri-statik tepkilerin toplam tepkiye katkısı daha da azalmıştır.
- Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile yapı tepkilerinin artması, ataletsel köprü-zemin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması ile yapı sisteminin mesnetlendiği zemin ortamının esnekliği dikkate alınmakta ve bu çalışmada dikkate alınan köprü sistemi yumuşak zemin ortamında en büyük yapısal tepkileri vermektedir.
- Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda, deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkisi bileşenlerinin her biri için ayrı ayrı üretilen yer hareketlerine bağlı olarak köprü sisteminin dinamik davranışı incelendiğinde, genellikle zemin koşullarının farklılığından kaynaklanan durumda elde edilen dinamik tepkiler en büyük olmuştur. Bunun yanında, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen tepkiler genellikle birbirine yakın çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda deprem hareketi değişim bileşenlerine bağlı olarak elde edilen değişim, genellikle ankastre durum için elde edilen değişimle benzerdir. Bununla birlikte, korelasyon ve dalga yayılma etkileri için elde edilen değişim yakın olmakla birlikte, dalga yayılma etkisinin genellikle daha büyük olduğu gözlenmiştir.

- Gerek ankastre ve gerekse yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı analiz durumlarında, köprü sisteminin mesnetlendiği zemin koşullarındaki değişimin yapısal tepkileri önemli derecede arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, köprü sisteminin mesnetlerindeki zemin cinsleri arasındaki farklılık arttıkça, elde edilen tepki değerleri daha da artmaktadır.
- Dinamik problemin oldukça karmaşık olması nedeniyle, tek bir nümerik köprü örneğine bağlı olarak genel sonuçların çıkarılması oldukça zor olmaktadır. Bununla birlikte, yer hareket değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik davranışı üzerinde önemli etkilerinin olacağı açıktır ve bu etkilerin dinamik analizlerde dikkate alınması gerekmektedir.
- Bu çalışmada gerek dikkate alınan kablolu köprü sistemi, gerekse zemin ortamı lineer olarak modellenmiştir. Ancak, bu tür uzun açıklıklı köprü sistemleri ile zemin ortamı deprem etkisi altında lineer olmayan bir davranış ortaya koyacaktır. Bu nedenle, bundan sonraki çalışmalarda daha gerçekçi bir dinamik analiz için söz konusu lineer olmayan etkilerin analizlere dahil edilmesi gereklidir.

## KAYNAKLAR

1. Hao, H., “Effects of Spatial Variation of Ground Motions on Large Multiply-Supported Structures”, *Report no: UCB/EERC-89/06, University of California Berkley*, 100-108, (1989).
2. Abdel-Ghaffar, A.M., Rubin, L.I., “Suspension Bridge Response to Multiple-Support Excitation”, *Journal of Engineering Mechanics*, 108: 419-435, (1982).
3. Garevski, M., Dumanoğlu, A. A., Severn R. T., “Dynamic Characteristics and Seismic Behaviour of Jindo Bridge”, South Korea, *Structural Engineering Review*, 1: 141-149, (1988).
4. Zerva, A., “Response of Multi-Span Beams to Spatially Incoherent Seismic Ground Motions”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19 (6): 819–832, (1990).
5. Der Kiureghian, A., Neuenhofer, A., “Response Spectrum Method for Multiple-support Seismic Excitations”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21: 713-740, (1992).
6. Nazmy, A. S., Abdel-Ghaffar, A. M., “Effects of Ground Motion Spatial Variability on the Response of Cable-Stayed Bridges”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21: 1-20, (1992).
7. Zerva, A., “On The Spatial Variation of Seismic Ground Motions and It’s Effects on Lifelines”, *Engineering Structures*, 16 (7): 534-546, (1994).
8. Harichandran, R. S., Hawwari, A., Swedien, B. N., “Response of Long-span Bridges to Spatially Varying Ground Motion”, *Journal of Structural Engineering*, 122 (5): 476-484, (1996).
9. Der Kiureghian, A., “A Coherency Model for Spatially Varying Ground Motions”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25: 99-111, (1996).
10. Rasseem, M., Ghobarah, A., Heidebrecht, AC., “Site Effects on the Seismic Response of a Suspension Bridge”, *Engineering Structures*, 18 (5): 363-370, (1996).
11. Ghobarah, A., Aziz TS., El Attar, M., “Response of Transmission Lines to Multiple Support Excitation” *Engineering Structures*, 18 (12): 936-946, (1996).

12. Soyluk, K., Dumanoglu, A. A., Bayraktar, A., "Comparision of Stochastic and Asynchronous Response of Cable Stayed Bridges", *Eighth International Conference On Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, İstanbul, 250-251, (1997).
13. Soyluk, K., Dumanoglu, A. A., "Kablolu Köprülerin Karşılaştırmalı Dinamik Analizleri: Asinkronize, Antisinkronize ve Stokastik", *III. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı*, İstanbul, 449-456, (1998).
14. Dumanoglu, A. A., Soyluk, K., "Kablolu Köprülerin Stokastik ve Asinkronize Dinamik Analizi", *Türkiye Deprem Vakfı*, TDV/TR 98-103, İstanbul, (1998).
15. Soyluk, K., Dumanoglu A. A., "Comparision Of Asynchronous And Stochastic Dynamic Response Of A Cable-Stayed Bridge", *Enginnering Structures*, 22: 435-445, (2000).
16. Dumanoglu, A. A., Soyluk, K., "Kablolu Köprülerin Asinkronize, Antisinkronize ve Stokastik Karşılaştırmalı Dinamik Analizleri", *İMO Teknik Dergi*, 2121-2137, (2000).
17. Dumanoglu, A. A., Soyluk, K., "A Stochastic Analysis of Long Span Structures Subjected to Spatially Varying Ground Motion Including the Site-Response Effect", *Engineering Structures*, 25: 1301-1310, (2003).
18. Soyluk, K., "Comparision of Random Vibration Methods for Multi-Supported Seismic Excitation Analysis of Long-Span Bridges", *Engineering Structures*, 26 (11): 1573-1583, (2004).
19. Sextos, AG., Kappos, AJ., Mergos, P., "Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridges: The Case of the Krystallopigi Bridge", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 2298, (2004).
20. Ferreira, M. P., Negrao, J. H., "Effects of Spatial Variability of Earthquake Ground Motion in Cable-Stayed Bridges", *Structural Engineering and Mechanics*, 23 (3): 233-247, (2006).
21. Bai, F. L., Hao, H., Li, H. N., "Seismic Response of a Steel Trussed Arch Structure to Spatially Varying Earthquake Ground Motions Including Site Effect", *Advances In Structural Engineering*, 13(6): 1089-1103, (2010).
22. Takemiya, H., Kadotani, T., Saeki, M., Mori, A. "Seismic Design of Cable-Stayed Three-span Continuous Bridge with Emphasis on Soil-Structure Interaction", *International Conference on Cable-Stayed Bridges*, Bangkok, Thailand, (1987).

23. Gupta, S.P., Kumar, A., “Dynamic Response of Cable-Stayed Bridge Including Foundation Interaction Effect”, *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 501-506, (1988).
24. K. Kawano, K. Furukawa, “Random Seismic Response Analysis of Soil Cable-Stayed Bridge Interaction”, *Proceedings Of Ninth World Conference On Earthquake Engineering*, Tokyo, Kyoto Japan, 495-500, August 2-9, (1988).
25. Betti, R., Abdel-Ghaffar, A.M., Niazy, A.S., “Kinematic Soil-Structure Interaction for Long-Span Cable-Supported Bridges”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22: 415-430, (1993).
26. Zheng, J., Takeda, T., “Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Response of PC Cable-stayed Bridge”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14 (6): 427-437, (1995).
27. Saadeghvaziri, M. A., Yazdani-Motlagh, A. R., Rashidi S, “Effects Of Soil-Structure Interaction On Longitudinal Seismic Response Of Msss Bridges”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(1-4): 231-242, (2000).
28. Keshishian, P. G., “Analysis of Interconnected Systems Accounting for Spatial Variability of Ground Motions and Soil-Structure Interaction”, *Doktora Tezi, University of California, Berkeley*, 1 (2001).
29. Kappos, A.J., Manolis, G.D., Moschonas, I.F., Seismic Analysis and Design of R/C Bridge Including SSI Effects, *Earthquake Resistant Engineering Structures Advances In Earthquake Engineering*, 9: 691-700 (2001).
30. Chaudhary MTA., Abe, M., Fujino Y., “Identification of Soil-Structure Interaction Effect in Base-Isolated Bridges From Earthquake Records”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21 (8): 713-725 (2001).
31. Spyrakos, C. C., Vlassis A. G., “Effect of Soil-Structure Interaction on Seismically Isolated Bridges”, *Journal of Earthquake Engineering*, 6 (3): 391-429 (2002).
32. Sextos, A.G., Pitilakis, K.D., Kappos, A.J., “Inelastic Dynamic Analysis of RC Bridges Accounting for Spatial Variability of Ground Motion, Site Effects and Soil-structure Interaction Phenomena, Part 2: Parametric Study”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32: 629-652 (2003).
33. Tongaonkar, N. P., Jangid, R. S., “Seismic Response of Isolated Bridges with Soil-structure Interaction”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23: 287-302 (2003).

34. Chouw, N., Hao, H., "Study of SSI and Non-Uniform Ground Motion effect on Pounding Between Bridge Girders", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25: 717-728 (2005).
35. Chouw, N., Hao, H., "Significance of SSI and Nonuniform Near-Fault Ground Motions in Bridge Response I: Effect on Response with Conventional Expansion Joint", *Engineering Structures*, 30 (1): 141-153 (2008).
36. Soneji, B.B., Jangid, R.S., "Influence of Soil-Structure Interaction on the Response of Seismically Isolated Cable-Stayed Bridge", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 245-257 (2008).
37. Allam, M. A., "Multiple-Support Excitations of Open-Plane Frames by a Filtered White-Noise and Soil-Structure Interaction", *Journal of Sound and Vibration*, 329: 4212-4226, (2010).
38. Dicleli, M., Erhan, S., "Effect of Soil-Bridge Interaction on the Magnitude of Inertial Abutment Bridge Components Due to Live Load Effects", *Engineering Structures*, 32 (1): 129-145 (2010).
39. Wong, H. L., Luco, J. E., "Tables of Impedance Functions and Input Motions For Rectangular Foundations", *Report No:Ce 78-15, Los Angeles, California*, 40 (1978).
40. Luco, J. E., Mita, A., "Response Of Circular Foundation to Spatially Random Ground Motion", *Journal Of Geotechnical Engineering*, 113(1): 1-14 (1987).
41. Gazetas, G., Tassoulas, J. L., "Horizontal Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundation", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 113: 440-457 (1987).
42. Gazetas, G., Tassoulas, J. L., "Horizontal Damping of Arbitrarily Shaped Embedded Foundation", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 113: 458-475 (1987).
43. Apsel, R. J., Luco J. E., "Impedance Functions for Foundations Embedded in a Layered Medium; An Integral Equation Approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15: 213-231 (1988).
44. Mita, A., Luco, J. E., "Impedance Functions and Input Motions for Embedded Square Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, 115 (4): 491-503 (1989).
45. Gazetas, G., "Formulas And Charts For Impedance Of Surface and Embedded Foundations", *Journal Of Geotechnical Engineering*, 117(9): 1363-1381 (1991).

46. Bu, S., "Impedance Functions of Square Foundations Embedded in an Incompressible Half-space", *Engineering Analysis with Boundary Element*, 22: 1-11 (1998).
47. Bu, S., Lin, C. H., "Coupled Horizontal-rocking Impedance Functions for Embedded Square Foundations at High Frequency Factors", *Journal of Earthquake Engineering*, 3 (4): 561-587 (1999).
48. Çelebi, E., Fırat, S., Çankaya İ., "Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları", *İMO Teknik Dergi*, 3827-3849 (2006).
49. Liou, G.S., Chung, I.L., "Impedance Matrices for Circular Foundations Embedded In a Layered Medium", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (4): 677-692 (2009).
50. Padron, L. A., Aznarez, J.J., Maeso, O., "Dynamic Stiffness of Deep Foundations with Inclined Piles", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39 (12): 1343-1367 (2010).
51. Özdemir, Z., Fahjan Y. M., "Gerçek Deprem Kayıtlarının Tasarım Spektrumlarına Uygun Olarak Zaman ve Frekans Tanım Alanlarında Ölçekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 435-446 (2007).
52. Oliveira, C. S., Hao, H., Penzien, J., "Ground Motion Modelling For Multiple Input Structural Analysis", *Structural Safety*, 10: 79-83 (1991).
53. Abrahamson, N. A., Schneider, J. F., Step, J. C., "Empirical Spatial Coherency Functions for Applications to Soil-Structure Interaction Analyses", *Earthquake Spectra*, 7 (1): 1-27 (1991).
54. Schneider, J. F., Step, J. C., Abrahamson, N. A., "The Spatial Variation of Earthquake Ground Motion and Effects of Local Site Conditions", *Advanced In Civil Engineering, Proc. 10th WCEE*, Madrid, 967-972 (1992).
55. Abrahamson, N. A., "Spatial Variation of Multiple Support Inputs", *Proc. of the first u. s. Seminar, Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges*, San Francisco, 1-34 (1993).
56. Heredia-Zavoni, E., Vanmarcke, E. H., "Seismic Random Vibration Analysis Of Multisupport Structural Systems", *Journal of Engineering Mechanics*, 120 (5): 1107-1127 (1994).
57. Clough, R. W., Penzien, J., "Dynamics of Structures", Second Edition, *McGraw Hill, INC., Singapore*, 495 (1993).

58. Datta, T. K., Mashalay, E. A., "Pipeline Response to Random Ground Motion by Discrete Model", *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, 14: 559-572 (1986).
59. Hindy, A., "Pipeline Response to Random Ground Motion", *Journal Of Engineering Mechanics Division*, 106: 339-360 (1980).
60. Der Kiureghian, A., Neuenhofer, A., "A Response Spectrum Method for Multiple-Support Seismic Excitations", **Report No:UCB/EERC-91/08, Earthquake Engineering Research Center, College Of Engineering, University Of California, Berkeley, Ca**, (1991).
61. Eurocode 8, "Design of Structures for Earthquake Resistance: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings", *British Standard*, 34 (2004).
62. Harichandran, R. S., Vanmarcke, E., H., "Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time", *Journal of Engineering Mechanics*, 112 (2): 154-174 (1986).
63. Der Kiureghian, A., Keshishian, P., "Effect of Site Response on Spatial Variability of Ground Motion", *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Oxford, Disc 2, 705 (1996).
64. Jennings, P. C., Housner, G. W., Tsai, N. C., "Simulated Earthquake Motions", *Earthquake Engineering Res. Lab. ,California Inst. Tech.*, Pasadena, (1968).
65. Kameda, H., Ang, A. H-S., "Simulation of Strong Earthquake Motions for Inelastic Structural Response", *Proceedings of the Sixth World Conference On Earthquake Engineering*, New Delhi, India, (1977).
66. Zanardo, G., Hao, H., Modena, C., "Seismic Response of Multi-Span Simply Supported Bridges to a Spatially Varying Earthquake Ground Motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31: 1325-1345 (2002).
67. Scanlan, R. H., Sachs, K., "Earthquake Time Histories and Response Spectra", *Journal Of The Engineering Mechanics Division*, 635-655 (1974).
68. Bayraktar, A., "Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 31 (1991).
69. Yang, J., Li, J. B., Lin, G., "A Simple Approach to Integration of Acceleration Data for Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis", *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 26: 725-734 (2006).

70. Chiu, H-C., “Stable Baseline Correction of Digital Strong-Motion Data”, *Bulletin Of The Seismological Of America*, 87 (4): 932-944 (1997).
71. Bardet, J. P., Ichii, K., Lin, C. H., “EERA, A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits”, *University of Southern California Department Of Civil Engineering*, (2000).
72. Kutanis, M., “Yapı-zemin Dinamik Etkileşimi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, 17 (2001).
73. Maltaş, U., “Dinamik Yükler Etkisi Altındaki Üstyapı-zemin Ortak Sisteminin Empedans Fonksiyonlarına Dayalı Çözümü”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, 30 (2008).
74. Soyuluk, K., “Yayılan ve Değişen Yerhareketi Etkisindeki Kablolü Köprülerin Stokastik Analizi”, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 33 (2001).
75. Nazmy, A. S., “Nonlinear Earthquake-Response Analysis of Cable-Stayed Brdiges Subjected to Multiple-Support Excitations”, *Princeton Universty*, Doktora Tezi, 50 (1987).
76. Button, M. R., Der Kiureghian, A., Wilson, E., L., “STOCAL-User Information Manual”, Report No UCB/SEMM-81/2, *Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley*, (1981).
77. Bathe, K. J., Wilson, E. L., Peterson F. E., “A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems SAPIV”, Report No EERC 73-11, *Univerty of California, Berkeley*, (1973).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AVANOĞLU SICACIK, Eda

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 20.10.1979 Kırıkkale

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (312) 582 32 54

Faks : 0 (312) 231 92 23

e-mail : edaavanoglu@yahoo.com

### Eğitim

#### Derece

#### Eğitim Birimi

#### Mezuniyet tarihi

Yüksek lisans

Kırıkkale Üniversitesi /İnşaat Müh. Bölümü

2002

Lisans

Kırıkkale Üniversitesi /İnşaat Müh. Bölümü

2002

Lise

Kırıkkale Anadolu Lisesi

1997

### İş Deneyimi

#### Yıl

#### Yer

#### Görev

2002-2005

Kırıkkale Üniversitesi

Araştırma Görevlisi

2005-2011

Gazi Üniversitesi

Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

## Yayınlar

1. Şener, S., Belgin, Ç., Sıcacık, E.A., “Aşırı Donatılı Betonarme Kirişlerde Tek Boyutlu Boyut Etkisi ,” GAP V. Mühendislik Kongresi, Şanlıurfa 2006, 820-827.
2. Şener, S., Avanoğlu, S., E., Belgin, Ç., Özbek, T.: “Beton Barajların Tasarımında Kırılma Mekanikliği”, 1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, Mayıs 28-30, Ankara,2007
3. Soyluk, K., Sıcacık, E. A., “Zemin Sınırlarının Geçirgen Sınırlarla Modellenildiği Kablolu Köprülerin Dinamik Analizi”, Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumu, Sakarya, S0703, 440-450, 1-2 Ekim 2009.
4. Soyluk, K., Diri, T. G., Sıcacık, E. A., “Time Dependent Nonlinear Analysis of Segmentally Erected Cable-Stayed Bridges”, Ninth International Congress on Advances in Civil Engineering, SEE-053, 27-30, September 2010, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
5. Soyluk, K., Sıcacık, E. A., “Soil-structure Interaction Analysis of Cable-stayed Bridges for Delayed Excitations”, Ninth International Congress on Advances in Civil Engineering, SEE-054, 27-30, September 2010, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
6. Cengiz, A., Soyluk, K., Sıcacık E. A., “Kablolu Köprülerde Trafik Yüklerinin Neden Olduğu Dinamik Etkiler”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26 (1), 243-252, 2011
7. Soyluk, K. Sıcacık, E. A., “Soil-Structure Interaction Analysis of Cable-Stayed Bridges for Multiple-Support Excitations”, Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2011, MS03-499, 547-554 July 2011, Leuven, Belgium.