



ASMA KÖPRÜLERİN ANALİZ YÖNTEMLERİ

A. Aydın Dumanoglu¹ ve Süleyman Adanur²

¹Canik Başarı Üniversitesi, Samsun

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ABSTRACT

In this study, deterministic and stochastic dynamic responses of suspension bridges are investigated by considering geometrically nonlinear behavior. Bosphorus Suspension Bridge is chosen as an example. S16E component of Pacoima Dam record of 1971 San Fernando earthquake and east-west component of 1992 Erzincan earthquake are used as ground motions. Filtered white noise model modified by Clough and Penzien is considered as a ground motion in the stochastic analyses. The ground motion model includes the effects of incoherence, wave passage, and site response. The bridge towers and deck displacement and internal forces are obtained in the end of the analyses. Because of the complex nature of earth crust, it is emphasized that the multiple support seismic excitations should be taken into account in the deterministic and stochastic analyses of long span structures like suspension bridges.

ÖZET

Bu çalışmada, asma köprülerin deterministik ve stokastik dinamik analizleri; geometrik olarak lineer olmayan davranış dikkate alınarak incelenmektedir. Uygulama olarak Boğaziçi Asma Köprüsü seçilmiştir. Yer hareketi olarak 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni ile 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kayıtları kullanılmaktadır. Stokastik analizlerde yer hareketini temsil etmek üzere Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli dikkate alınmaktadır. Yer hareketi modeli, mesnetlere etkileyen yer hareketlerinin yansıma ve kırılmalarla değişebilir olmasından kaynaklanan korelasyon etkisini, dalga yayılma etkisini ve zemin özelliklerinin yer hareketine etkisini içermektedir. Analizler sonucunda köprü kuleleri ve tabliyesine ait yerdeğiştirme ve kesit tesirleri elde edilmiştir. Yer tabakasının karmaşık yapısından dolayı, yer hareketlerinin farklı noktalardaki değişiminden doğan etkilerin asma köprüler gibi uzun açıklıklı sistemlerin deterministik ve stokastik analizlerinde dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

GİRİŞ

Asma köprüler kule, kablo, askı ve tabliye gibi değişik davranış gösteren elemanlardan oluşmaktadır. Dış kuvvetler altında özellikle kablo ve askılar büyük çekme kuvvetine maruz kaldıklarından bu kuvvetlerin eleman rijitlik matrislerine etkisi büyük olmaktadır. Yapı elemanlarının geometrik olarak lineer olmayan davranışı olarak adlandırılan bu özellik asma köprülerin analizinde dikkate alınması gerekmektedir. Literatürde geometrik olarak lineer olmama durumun dikkate alınarak yapılmış çalışmalar mevcuttur [1-9].

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 edilmekte ve yer hareketi üniform olarak nitelendirilmektedir. Söz konusu dinamik analiz klasik olarak nitelendirilmekte ve deprem dalga boylarının yapının boyutları yanında büyük olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşımda deprem dalgalarının sonsuz hızla yayıldığı kabul edilirken, yayılma esnasında yer hareketindeki değişim dikkate alınmamaktadır. Ancak asma köprüler gibi uzun açıklıklı yapılarda, dinamik yer hareketi yapının bir mesnetinden diğer mesnetlerine ulaşmaya kadar bir zaman geçmektedir. Bu zaman içinde yer hareketinin niteliği zemin özelliklerine ve mesnetler arasındaki uzaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Asma köprülerin deprem süresince üniform olmayan yer hareketinin etkisi altında olduğu gerçeği açıktır. Dolayısıyla asma köprüler gibi uzun açıklıklı yapıların analizinde mesnetlerde farklı dinamik etkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Asma köprülerin mesnetlerde farklı dinamik etkilerin olması durumu dikkate alınarak yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır [10-18].

Deprem hareketi gibi dinamik yükler rasgele olduğundan, dinamik yüklerin tamamen belirli olduğu deterministik yaklaşım ile dinamik analiz yapılması pek gerçekçi olmayabilir. Deprem hareketinin belirsizliğinin dikkate alındığı, istatistik ve olasılık terimleriyle ifade edilen stokastik yaklaşım bu aşamada daha doğru bir yaklaşım sayılabilir. Stokastik yaklaşım yapı tepkileri için istatistiksel bir değerlendirme imkanı sağlamaktadır ve bu durum yer hareketinin rasgele seçimine bağlı değildir. Söz konusu durum özellikle gelecekte olması muhtemel yer hareketlerinin de düşünülmesi gereken projelendirme aşamasında oldukça önemli olmaktadır. Stokastik analizlerde yer hareketi güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile temsil edilebilir. Yer tabakasının karmaşık yapısı nedeni ile yapı sistemlerinin dinamik analizinde farklı noktalardaki yer hareketleri için dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi ve zemin etkisi dikkate alınmalıdır. 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 açıklanabilir. Dalga yayılma etkisi deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşmaya kadar geçen zaman farkından doğmaktadır. Zemin etkisi ise farklı mesnet noktalarındaki yerel zemin şartlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Literatürde üniform veya değişen yer hareketine maruz asma köprülerin stokastik analizleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [19-40].

Bu çalışmada, geometrik olarak lineer olmayan davranış dikkate alınarak asma köprülerin deterministik ve stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Deterministik analizlerde yer hareketi olarak gerçek deprem kayıtları direkt olarak kullanılırken, stokastik analizlerde yer hareketini temsil etmek üzere filtre edilmiş beyaz gürültü modeli dikkate alınmaktadır.

ALAN DENKLEMLERİ ve FORMÜLASYON

Yapı sistemlerinin çözümünde eğer yapıya etkiyen yükler biliniyorsa; yani daha önce meydana gelmiş bir depreme ait veri dikkate alınıyorsa bu analize deterministik analiz denir. Deterministik analizlerde, bir sistemin hareket denklemi (1) denklemindeki gibidir [41].

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -M\ddot{v}_g(t) \quad (1)$$

Burada M, C, K sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\ddot{v}$, $\dot{v}$, v ve δ sırasıyla toplam ivme, hız, yerdeğiştirme ve deprem doğrultu vektörlerini, $\ddot{v}_g(t)$ ise yer ivmesini göstermektedir.

Geometrik olarak lineer olmayan analizlerde, rijitlik matrisi (2) denklemindeki gibi hesaplanır.

$$K = K_E + K_G \quad (2)$$

Burada K sistem rijitlik matrisini, K_E sistem rijitlik matrisinin elastik bileşenini, K_G sistem rijitlik matrisinin geometrik bileşenini göstermektedir [42].

Pugsley [43], çeşitli yüklere maruz bir asma köprünün davranışını, kabloyu elastik bir zemine benzeterek belirlemeye çalışmıştır. Bir asma köprünün davranışı, önemli ölçüde kiriş elastik rijitliğinin, kablo elastik rijitliğine oranına bağlıdır. Dolayısıyla, eğer elastik zemin, kablo ile eşdeğer yapılabilirse, asma köprü elastik zemine oturan elastik bir kiriş gibi düşünülebilir [44]. Bu yöntemde, tabliye elastik zemin modülü k olan bir zemine oturan elastik bir kiriş gibi dikkate alınır. Elastik zeminden bu kirişe gelen yükün düzgün yayılı olduğu kabul edilir ve (3) denklemindeki gibi hesaplanabilir.

$$k = \alpha \frac{w}{d} \quad (3)$$

Burada, w; köprü birim uzunluğunun toplam ağırlığını, d; köprü kablosunun orta noktasındaki sehimini, α ; amprik bir katsayıyı göstermektedir. α katsayısı ya daha önce elde edilen tecrübelerden yararlanılarak direkt olarak alınmakta, ya da köprü açıklığı boyunca, belirli uzunlukta yayılı yüklemeler dikkate alınarak hesaplanmaktadır [45]. Pugsley [45], α katsayısının genellikle 10 ile 15 arasında değiştiğini, ancak büyük açıklıklı modern asma köprüler için 10 ile 12 arasında bir değer alınabileceğini belirtmiştir. Elastik zemin analojisi ile köprünün analizi yapılırken, eşit parçalardan oluşan tabliyenin, her bir parçasının rijitliği $\bar{k}$ olan bir yay ile kabloya bağlı olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla, k düzgün yayılı yükü ile yüklü kirişin rijitliği yerine eşdeğer yay rijitliği kullanılmaktadır. Elastik zemine oturan elastik kiriş gibi idealleştirilen tabliyeye sahip asma köprüye ait frekans değerleri (4) denklemi ile amprik olarak hesaplanmaktadır [43].

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a^2 \pi^4}{L^4} (i^4 + \beta)} \quad (4)$$

Burada;

$$a^2 = \frac{EIg}{w}; \quad \beta = \frac{kL^4}{\pi^4 EI}$$

olarak alınmaktadır. Ayrıca E ve I, tabliyenin elastisite modülü ve atalet momentini, g yer çekim ivmesini (9.81 m/s^2) göstermektedir. f_i ise, i'inci frekanstır.

Yapıların asinkronize yer hareketine maruz dinamik hareket denklemi (5) denklemindeki gibidir [41].

$$M\ddot{v}_{dr} + C\dot{v}_{dr} + Kv_{dr} = -MR_{rg} \ddot{v}_{sg} \quad (5)$$

Burada R_{rg} zahiri-statik etki katsayısı vektörü veya zemin yerdeğiştirmelerinin şekil vektörü adı verilen r vektörlerinden oluşan bir matristir, $\ddot{v}_{sg}$ ise yer hareket ivmesini göstermektedir.

Asinkronize yer hareketine maruz sistemlerin analizinde toplam yerdeğiştirmeler (6) denklemindeki gibi zahiri-statik ve dinamik yerdeğiştirmeler olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

$$V_r = V_{sr} + V_{dr} = \sum_i r_i V_{ig}(\tau_j, t) + \sum_i \phi_i Y_i(\tau_j, t) \quad (6)$$

Burada, i zahiri-statik bileşen için mesnet sayısını; dinamik bileşen için dikkate alınan mod sayısını, r_i her bir mesnet için zemin yerdeğiştirmelerinin şekil vektörünü, $Y_i(\tau_j, t)$ zamana

bağlı i. modal genliği, ϕ_i mod vektörlerini temsil etmektedir. τ_j ise deprem dalgasının bir mesnetten diğerine ulaşma zamanını göstermekte olup (7) denklemi ile elde edilmektedir.

$$\tau_j = \frac{L_j}{V_{app}} \quad (7)$$

Burada, L_j mesnetin referans noktasına uzaklığını, V_{app} deprem dalgası yayılma hızını göstermektedir.

Yapı sistemlerinin çözümünde eğer yapıya etkiyen yükler bilinmiyorsa; yani çözümde kullanılan yüklerin yapıya etkime ihtimali göz önünde bulunduruluyorsa bu analize stokastik analiz denir. Stokastik analizde i. tepki bileşeninin toplam varyans değeri, zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin varyansları ile zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenleri arasındaki kovaryans tepki bileşeninin toplanmasıyla elde edilir. Elde edilen toplam tepkiye ait varyans değeri (8) denklemi ile hesaplanabilir [21, 25].

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma_{z_i}^{2qs} + \sigma_{z_i}^{2d} + 2\text{Cov}(z_i^{qs}, z_i^d) \quad (8)$$

Burada $\sigma_{z_i}^{2qs}$ ve $\sigma_{z_i}^{2d}$ sırasıyla zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenlerinin varyansını göstermektedir. $\text{Cov}(z_i^{qs}, z_i^d)$ ise zahiri-statik ve dinamik tepki bileşenleri arasındaki kovaryansı ifade etmektedir. Bu ifadeler (9), (10) ve (11) denklemleri ile elde edilmektedirler.

$$\sigma_{z_i}^{2qs} = \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r A_{il} A_{im} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega^4} S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) d\omega \quad (9)$$

$$\sigma_{z_i}^{2d} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \psi_{ij} \psi_{ik} \Gamma_{lj} \Gamma_{mk} \int_{-\infty}^{\infty} H_j(-\omega) H_k(\omega) S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) d\omega \quad (10)$$

$$\text{Cov}(z_i^{qs}, z_i^d) = \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^r \psi_{ij} A_{il} \Gamma_{mj} \left(- \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega^2} H_j(\omega) S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega) d\omega \right) \quad (11)$$

Burada, n dikkate alınan mod sayısını, r yer hareketi ivmesinin etkidiği mesnet sayısını, A_{il} l mesnet serbestlik derecesinin birim hareketinden dolayı meydana gelen z_i tepki kuvvetini, Γ_{lj} modal katkı faktörünün l. elemanını, ψ_{ij} j. modun neden olduğu z_i tepki kuvvetini, $[S_{\ddot{v}_{g_l} \ddot{v}_{g_m}}(\omega)]$ l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmelerinin karşıt güç spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. $H_j(\omega)$ ise frekans davranış fonksiyonu olup (12) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j \omega_j \omega} \quad (12)$$

Stokastik analizde ortalama maksimum değer (μ), maksimum büyüklük faktörü p'ye ve $z(t)$ tepki işleminin standart sapması σ_z 'ye bağlı olarak (13) denklemindeki gibi ifade edilmektedir [19].

$$\mu = p\sigma_z \quad (13)$$

Stokastik analizde yapı sisteminin mesnetlerine etkiyen yer hareketi, mesnet noktaları arasındaki yer hareket ivmesinin karşıt güç spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlı olarak (14) denklemindeki gibi tanımlanmaktadır [46].

$$S_{\ddot{v}_{g1} \ddot{v}_{gm}}(\omega) = \gamma_{lm}(\omega) \sqrt{S_{\ddot{v}_{g1} \ddot{v}_{g1}}(\omega) S_{\ddot{v}_{gm} \ddot{v}_{gm}}(\omega)} \quad (14)$$

Burada, $\gamma_{lm}(\omega)$ korelasyon fonksiyonudur. Zeminin homojen olması durumunda $S_{\ddot{v}_{g1} \ddot{v}_{g1}}(\omega) = S_{\ddot{v}_{gm} \ddot{v}_{gm}}(\omega) = S_{\ddot{v}_g}(\omega)$, (14) ifadesi (15) denklemine dönüşür.

$$S_{\ddot{v}_{g1} \ddot{v}_{gm}}(\omega) = \gamma_{lm}(\omega) S_{\ddot{v}_g}(\omega) \quad (15)$$

Burada, $S_{\ddot{v}_{g1} \ddot{v}_{gm}}(\omega)$ 1 ve m mesnet noktaları arasındaki yer hareket ivmelerine ait karşıt güç spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Bu çalışmada Clough ve Penzien [41] tarafından düzeltilerek elde edilen ve (16) denklemi ile tanımlanan Filtre Edilmiş Beyaz Gürültü güç spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$S_{\ddot{v}_g}(\omega) = S_0 |H_g(\omega)|^2 |H_f(\omega)|^2 \quad (16)$$

Burada, S_0 beyaz gürültü işleminin spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değerini, $H_g(\omega)$ ve $H_f(\omega)$ zemine ait filtre fonksiyonlarını göstermekte olup (17) ve (18) denklemleri ile hesaplanmaktadır [47].

$$|H_g(\omega)|^2 = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \quad (17)$$

$$|H_f(\omega)|^2 = \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \quad (18)$$

Burada, ω_g , ξ_g ve ω_f , ξ_f sırasıyla zemine ve ikinci filtreye ait doğal frekansı ve sönüm oranını göstermektedir.

Beyaz gürültü işleminin güç spektral yoğunluk fonksiyonu genlik değeri, S_0 , (19) denklemi ile elde edilmektedir [47].

$$S_0 = \frac{\sigma_{\ddot{v}_g}^2}{\int_0^\infty |H_g(\omega)|^2 |H_f(\omega)|^2 d\omega} = \frac{\sigma_{\ddot{v}_g}^2}{\Phi} \quad (19)$$

Burada $\sigma_{\ddot{v}_g}^2$ yer hareket ivmesinin varyansını göstermektedir.

(14) ve (15) denklemlerinde kullanılan korelasyon fonksiyonu, $\gamma_{lm}(\omega)$, yer hareketinin değişimini frekans alanında tanımlamakta ve (20) denklemi ile ifade edilmektedir (Der Kiureghian, 1996).

$$\gamma_{lm}(\omega) = |\gamma_{lm}(\omega)|^k \gamma_{lm}(\omega)^d \gamma_{lm}(\omega)^z = |\gamma_{lm}(\omega)|^k \exp \left[i \left(\theta_{lm}(\omega)^d + \theta_{lm}(\omega)^z \right) \right] \quad (20)$$

Korelasyon fonksiyonu boyutsuz ve kompleks bir ifade olup $0 \leq |\gamma_{lm}(\omega)| \leq 1$ aralığında değerler almakta ve $\ddot{v}_1(t)$ ve $\ddot{v}_m(t)$ işlemleri arasındaki istatistiksel bağımlılığı ifade etmektedir. $\gamma_{lm}(\omega) = 1$ iki işlem arasındaki lineer bağımlılığı, $\gamma_{lm}(\omega) = 0$ ise iki işlem

arasındaki istatistiksel bağımsızlığı göstermektedir. (20) denkleminde $\gamma_{lm}(\omega)$ terimlerinin üsleri olarak yazılan k, d, z harfleri sırası ile korelasyon etkisini, dalga yayılma etkisini ve zemin etkisini ifade etmektedir. $|\gamma_{lm}(\omega)|^k$, $\gamma_{lm}(\omega)^d$ ve $\gamma_{lm}(\omega)^z$ sırası ile mesnetlere etkileyen yer hareketleri arasındaki korelasyon etkisini, dalga yayılma etkisini ve mesnetlerdeki farklı zemin etkisini göstermektedir.

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 mesnetlere etkileyen yer hareketleri arasındaki korelasyon etkisi olarak (21) denklemi ile verilen Harichandran ve Vanmarcke [48] tarafından belirlenen korelasyon modeli kullanılmıştır.

$$|\gamma_{lm}(\omega)|^k = A \exp\left[-\frac{2d_{lm}}{\alpha\theta(\omega)}(1-A+\alpha A)\right] + (1-A) \exp\left[-\frac{2d_{lm}}{\theta(\omega)}(1-A+\alpha A)\right] \quad (21)$$

(21) denklemindeki $\theta(\omega)$ (22) denklemindeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\theta(\omega) = k \left[1 + \left(\frac{\omega}{2\pi f_0} \right)^b \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Burada, d_{lm} mesnetler arasındaki mutlak yatay uzaklığı göstermektedir. A, α , k, f_0 ve b ampirik sabitler olup bu çalışmada Harichandran vd. [25] tarafından asma ve kablolu köprüler için önerilen $A=0.636$, $\alpha=0.0186$, $k=31200$, $f_0=1.51\text{Hz}$ ve $b=2.95$ değerleri kullanılmaktadır.

(20) denklemindeki ikinci terim, $\theta_{lm}(\omega)^d$, yer hareketinin yayılma etkisini göstermekte olup, (23) denklemi ile ifade edilmektedir. Dalga yayılma etkisi deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşınca kadar geçen zaman farkından doğmaktadır [49].

$$\theta_{lm}(\omega)^d = -\frac{\omega d_{lm}}{V_{app}} \quad (23)$$

Burada V_{app} deprem dalgası yayılma hızını, d_{lm} dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki mutlak yatay uzaklığı göstermektedir. Bu çalışmada yer hareketi dalga yayılma hızı için $V_{app}=400, 700, 1000, 2000, 3000\text{m/s}$ ve sonsuz hız değerleri kullanılmaktadır.

(20) denklemindeki son terim, $\theta_{lm}(\omega)^z$, ise yerel zemin etkisini ifade etmekte olup, (24) denklemi ile hesaplanmaktadır. Zemin etkisi farklı mesnet noktalarındaki yerel zemin şartlarının farklılığından kaynaklanmaktadır [50, 51].

$$\theta_{lm}(\omega)^z = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[H_1(\omega)H_m(-\omega)]}{\text{Re}[H_1(\omega)H_m(-\omega)]} \quad (24)$$

Burada, $H_1(\omega)$ ve $H_m(-\omega)$ l ve m mesnet noktalarındaki frekans davranış fonksiyonlarını, Im ve Re sırasıyla fonksiyonun sanal ve reel kısımlarını göstermektedir.

SAYISAL UYGULAMA

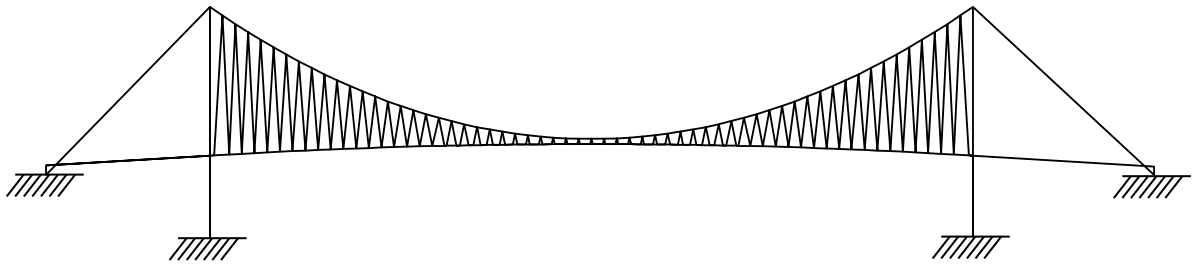
Bu çalışmada sayısal uygulama olarak İstanbul Boğaziçi Köprüsü [52] seçilmiştir. Boğaziçi Köprüsünün ana açıklığı 1074m, kenar açıklıkları Avrupa yakasında 231m, Asya yakasında 255m'dir. Kenar açıklık tabliyeleri kablolarla asılı olmayıp, orta ayak temellerinin üzerine yerleştirilen çelik kolonlar tarafından taşınmaktadır. 165m yüksekliğindeki çelik kulelerin her biri, birbirine üçer adet yatay portal kirişle bağlanmış ikişer ayağa sahiptir. Ana kablolar arasındaki mesafe 28m'dir. Aerodinamik forma sahip tabliye içi boş kutu kesitli 60 adet tabliye ünitesinin birbirine kaynaklanmasıyla meydana gelmiştir. Her biri 3 şerit olan, biri gidiş diğeri dönüş toplam iki yolu bulunmaktadır [53].

Boğaziçi Köprüsünün iki boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 1'de verilmektedir. Tabliye, kule ve kablolar kiriş elemanlarla temsil edilirken, askılar kafes elemanlarla temsil edilmiştir. Sonlu eleman modeli 202 düğüm noktası, 195 kiriş eleman ve 118 kafes elemandan oluşmaktadır. Seçilen matematik model, 575 serbestlik derecesi ile temsil edilmiştir.

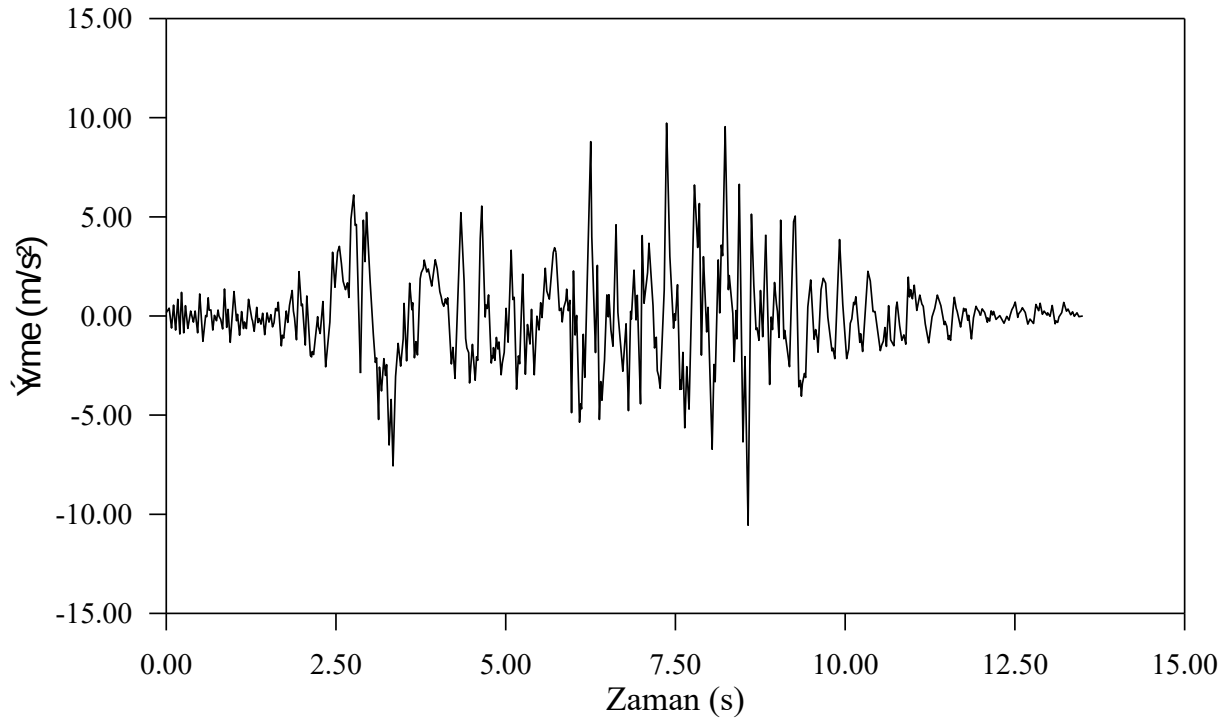
Bu çalışmada yapılan deterministik analizlerde deprem ivme kayıtları doğrudan kullanılmıştır. Bunun için yer hareketi olarak 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni ve 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeninin ilk 13.5 s'lik kısmı dikkate alınarak, ivme değerleri 2/3 ile çarpılmak suretiyle asma köprüye düşey doğrultuda uygulanmıştır. Deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 2 ve Şekil 3'te görülmektedir.

Stokastik analizlerde yer hareketini temsil etmek üzere Clough ve Penzien [41] tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli dikkate alınmıştır. Zemin cinsi olarak sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri seçilmiş olup Der Kiureghian ve Neuenhofer [54] tarafından önerilen yer ivmesi güç spektral yoğunluk fonksiyonu parametreleri kullanılmıştır. Der Kiureghian ve Neuenhofer [54] tarafından sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları için önerilen filtre parametre değerleri Çizelge 1'de verilmektedir. Tablo 1'de verilen filtre parametreleri kullanılarak Φ değerleri Çizelge 2'deki gibi hesaplanmıştır. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni ivme kaydına ait varyans ifadesi $\sigma_{\ddot{v}_g}^2 = \lambda_0 = 0.45766 \text{m}^2/\text{s}^4$, 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydının ilk 13.5s'lik bölümüne ait varyans ifadesi ise $\sigma_{\ddot{v}_g}^2 = \lambda_0 = 0.19433 \text{m}^2/\text{s}^4$ olarak elde edilmiştir.

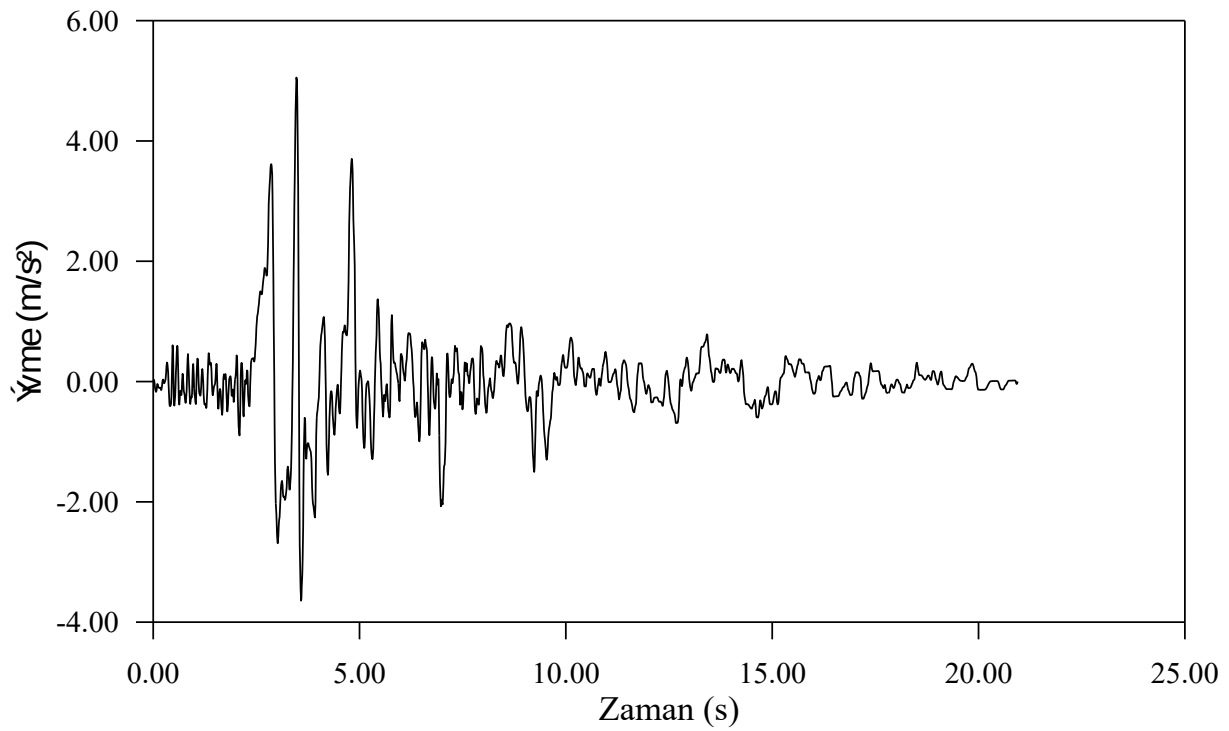
1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni ivme kaydı ve 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydının ilk 13.5s'lik bölümü için bulunan varyans değerleri, farklı zemin türleri için elde edilen Φ değerlerine bölünmek suretiyle, S_0 değerleri Çizelge 3'deki gibi elde edilmiştir. San Fernando ve Erzincan depremleri için hesaplanmış çeşitli zemin türlerine ait ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 1. Boğaziçi Köprüsü iki boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 2. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni ivme kaydı



Şekil 3. 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı

Bu çalışmada deterministik analizler için Mulsap programı [16], stokastik analizler için ise SVEM programı [55] esas alınmıştır.

Çizelge 1. Çeşitli zemin türleri için güç spektral yoğunluk fonksiyonu filtre parametreleri.

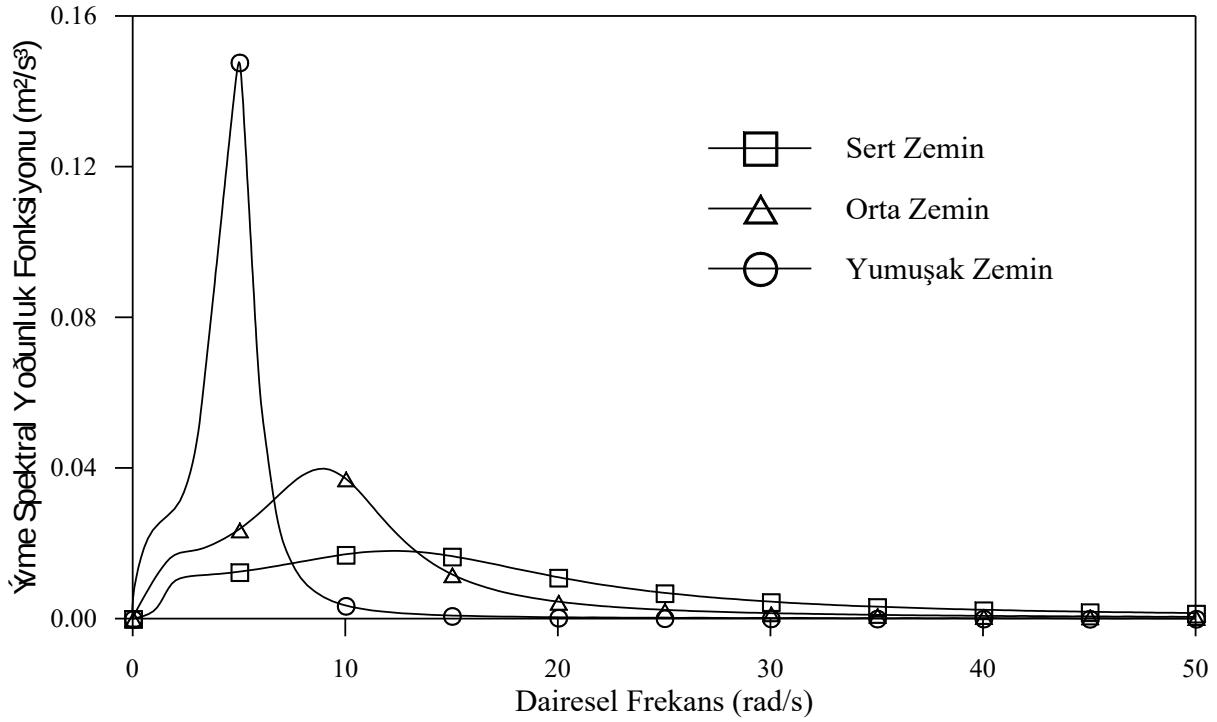
Zemin Cinsi	ω_g (rad/s)	ξ_g	ω_f (rad/s)	ξ_f
Sert	15.0	0.6	1.5	0.6
Orta	10.0	0.4	1.0	0.6
Yumuşak	5.0	0.2	0.5	0.6

Çizelge 2. Çeşitli zemin türleri için hesaplanan Φ değerleri

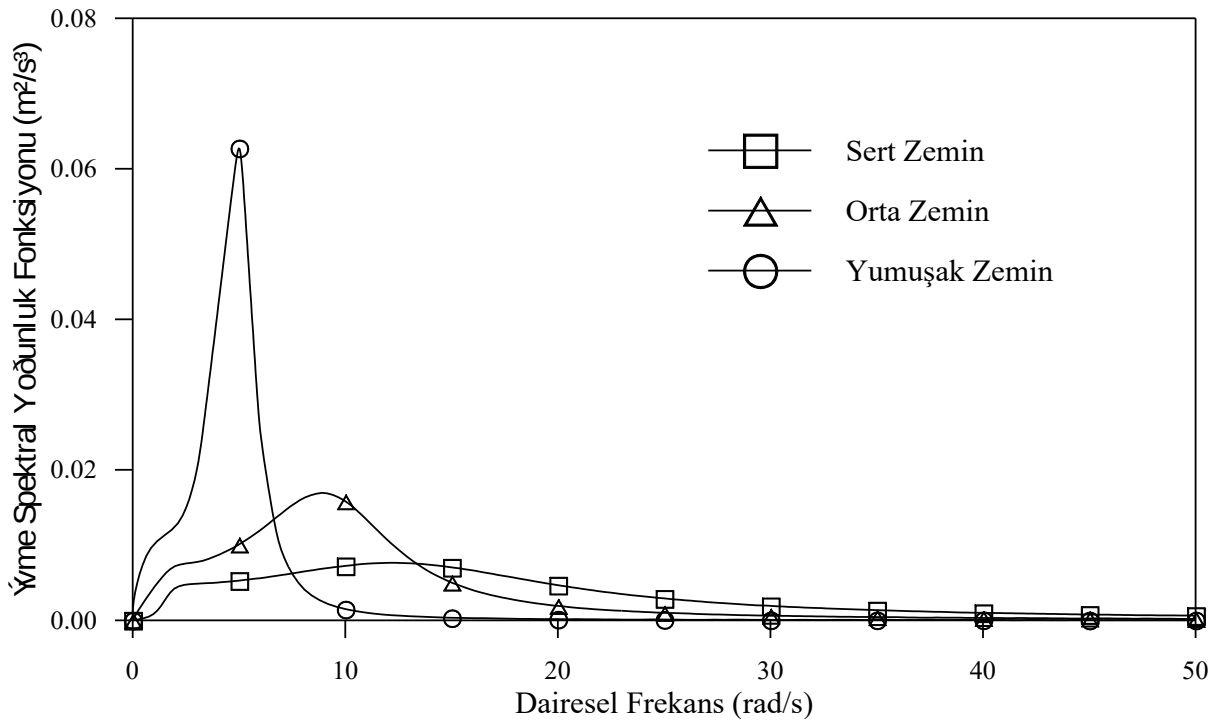
Zemin Cinsi	Φ (1/s)
Sert	47.109
Orta	31.703
Yumuşak	22.581

Çizelge 3. Çeşitli zemin türleri için hesaplanan S_0 değerleri

Zemin Cinsi	S_0 (m ² /s ³)	
	San Fernando Depremi	Erzincan Depremi
Sert	0.009715	0.004125
Orta	0.014436	0.006129
Yumuşak	0.020267	0.008606



Şekil 4. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni ivme kaydı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeline ait ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 5. 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydının ilk 13.5 s'lik kısmı için filtre edilmiş beyaz gürültü yer hareketi modeline ait ivme güç spektral yoğunluk fonksiyonu

SAYISAL SONUÇLAR

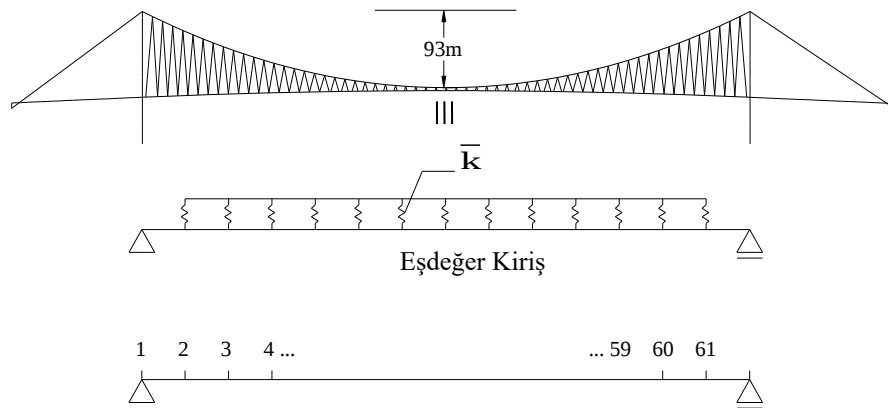
Deterministik Analiz Sonuçları

Geometrik olarak lineer olmayan analizler sonucu elde edilen ilk beş moda ait frekans değerlerinin literatürde mevcut frekans değerleriyle karşılaştırılması Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere değerler birbirleri ile uyumludurlar.

Çizelge 4. Geometrik olarak lineer olmayan ve literatürdeki çalışmalarda hesaplanmış frekans değerleri.

Mod no	Geometrik olarak lineer olmayan analiz ile elde edilen frekans değerleri (Hz)	Dumanoğlu ve Severn [56] tarafından hesaplanan frekans değerleri (Hz)	Brownjohn vd. [57] tarafından ölçülen frekans değerleri (Hz)
1	0.121	0.127	0.129
2	0.161	0.165	0.160
3	0.220	0.226	0.217
4	0.275	0.288	0.277
5	0.363	0.378	0.362

Boğaziçi Köprüsünün elastik zemine oturan elastik kiriş idealleştirilmesi Şekil 6'da görülmektedir. Elastik zemin analojisi kullanılarak hesaplanan ilk beş moda ait frekans değerleri Çizelge 5'de verilmektedir.

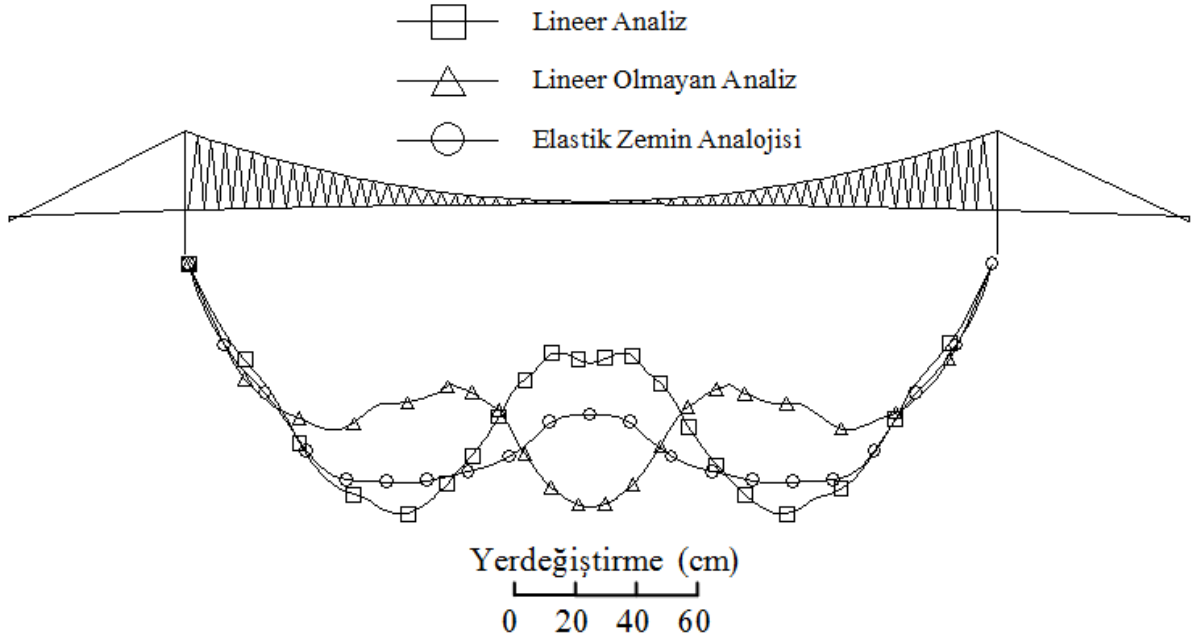


Şekil 6. Boğaziçi Köprüsü'nün elastik zemine oturan elastik kiriş modeli

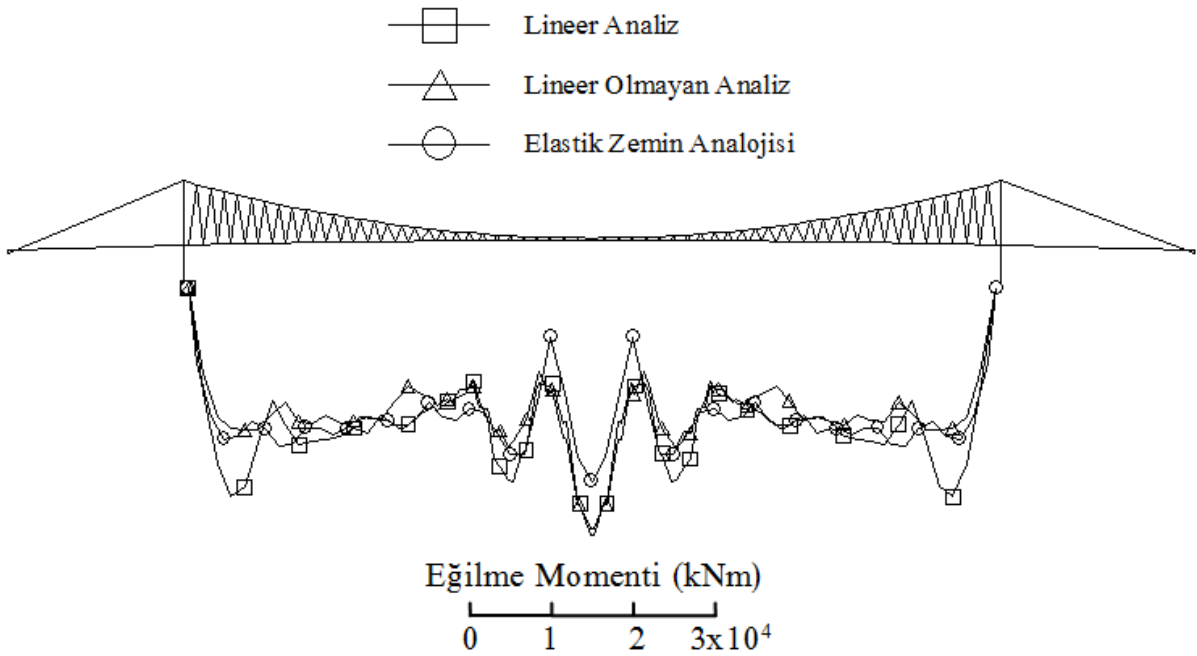
Çizelge 5. Boğaziçi Köprüsü'nün elastik zemin analojisi ile hesaplanan frekansları.

Mod no	Amprık denklemlerle hesaplanan frekanslar (Hz)	$\bar{k}$ eşdeğer yay rijitliği kullanılarak hesaplanan frekanslar (Hz)
1	0.179	0.181
2	0.181	0.183
3	0.187	0.190
4	0.208	0.209
5	0.243	0.245

Lineer, geometrik olarak lineer olmayan ve elastik zemin analojisi ile gerçekleştirilen analizler sonucunda köprü tabliyesinde elde edilen yerdeğiştirme ve eğilme momentleri Şekil 7 ve Şekil 8’de görülmektedir.

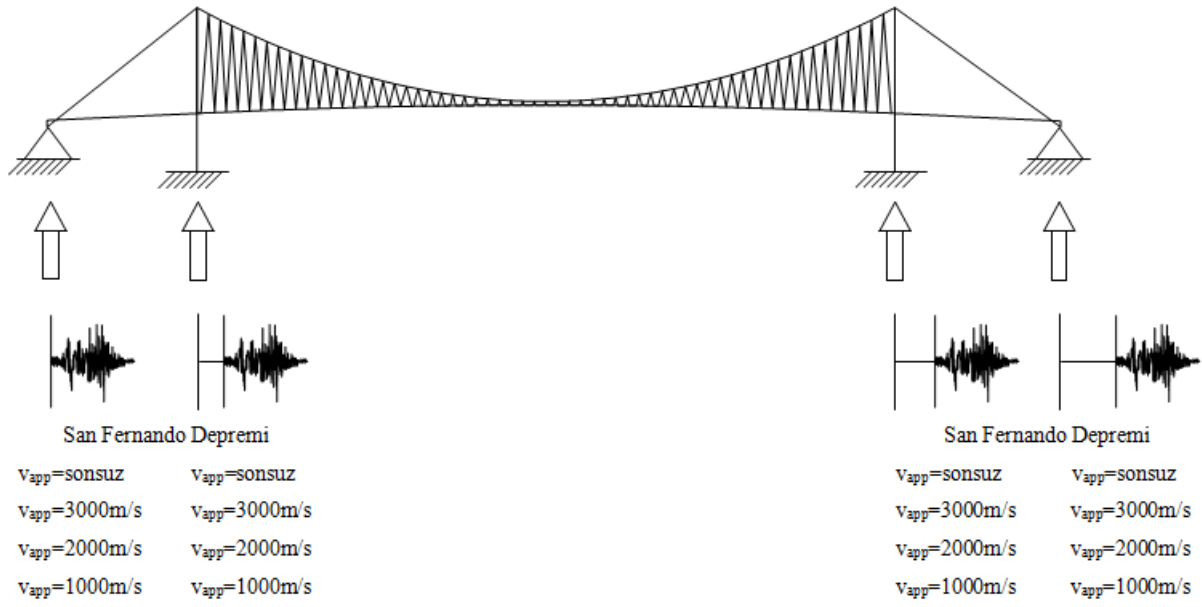


Şekil 7. Boğaziçi Köprüsü tabliye düşey yerdeğiştirmeleri

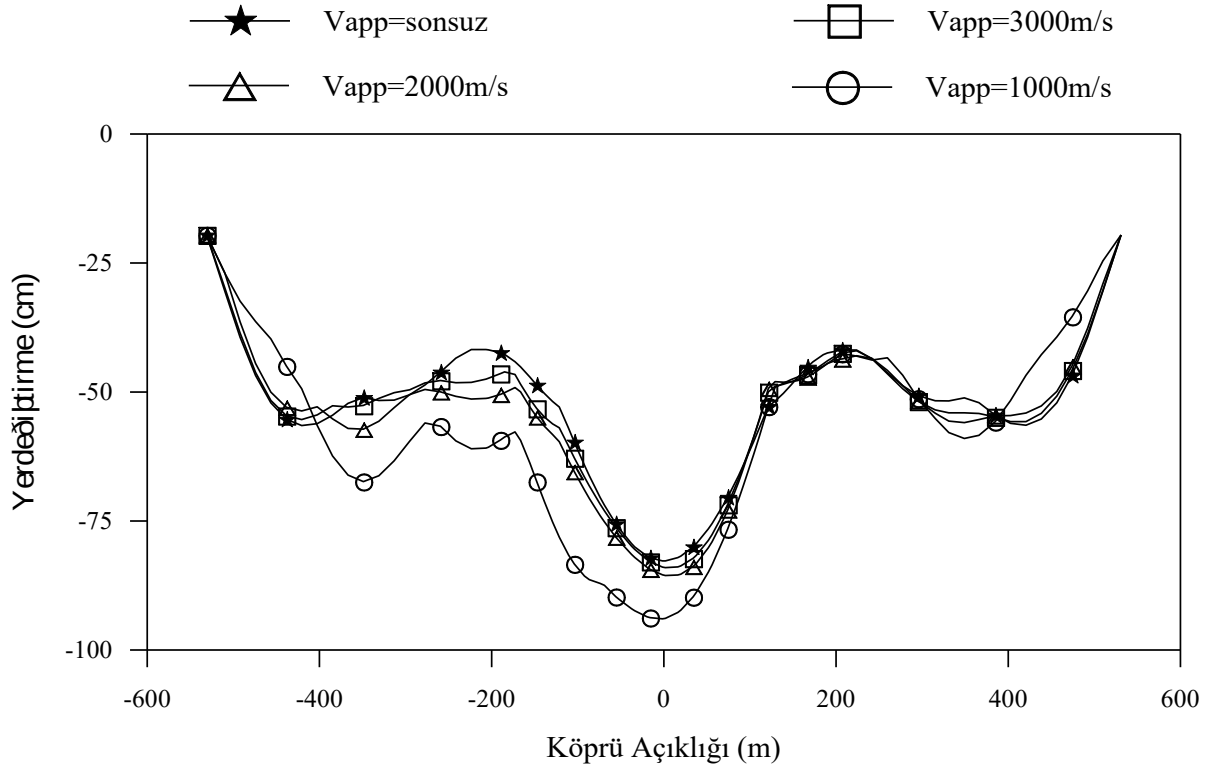


Şekil 8. Boğaziçi Köprüsü tabliye eğilme momentleri

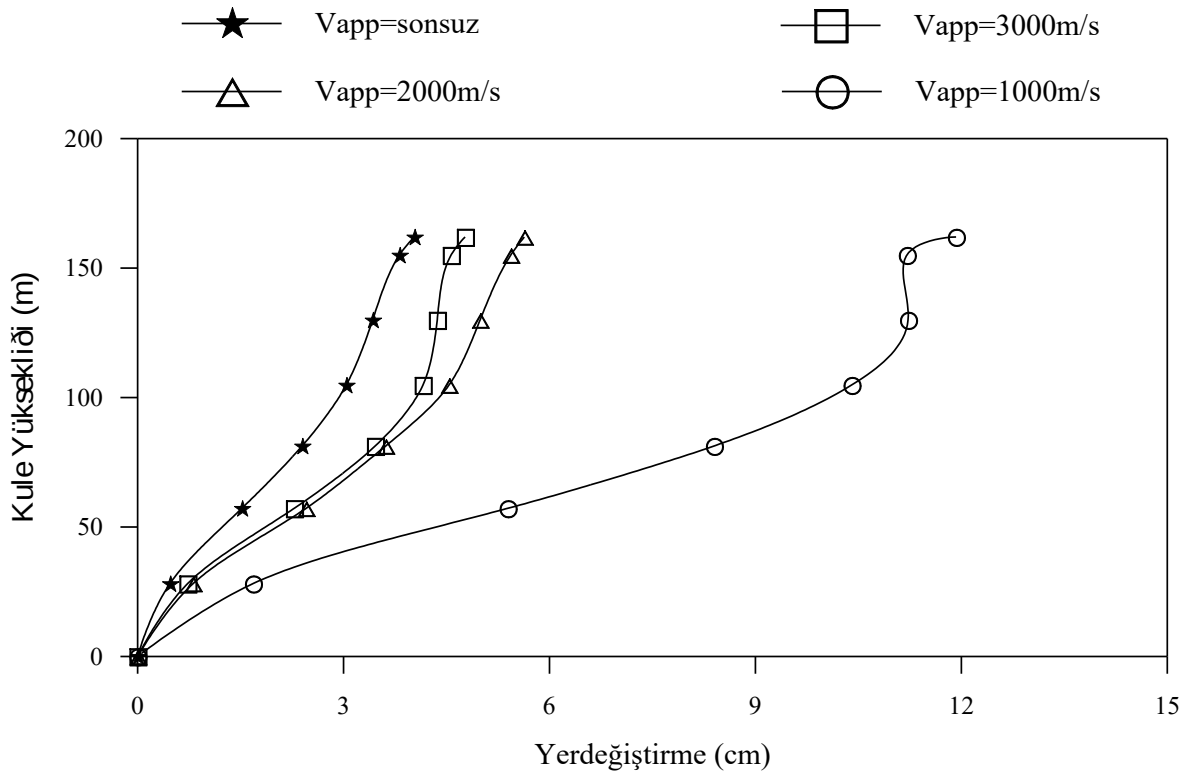
Asinkronize yer hareketine maruz asma köprünün deterministik analizi (Şekil 9) sonucu köprü tabliye ve kulelerinde elde edilen yerdeğiştirme ve eğilme momentleri Şekil 10- Şekil 13’de görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, deprem dalgası yayılma hızı azaldıkça elde edilen değerler artmaktadır.



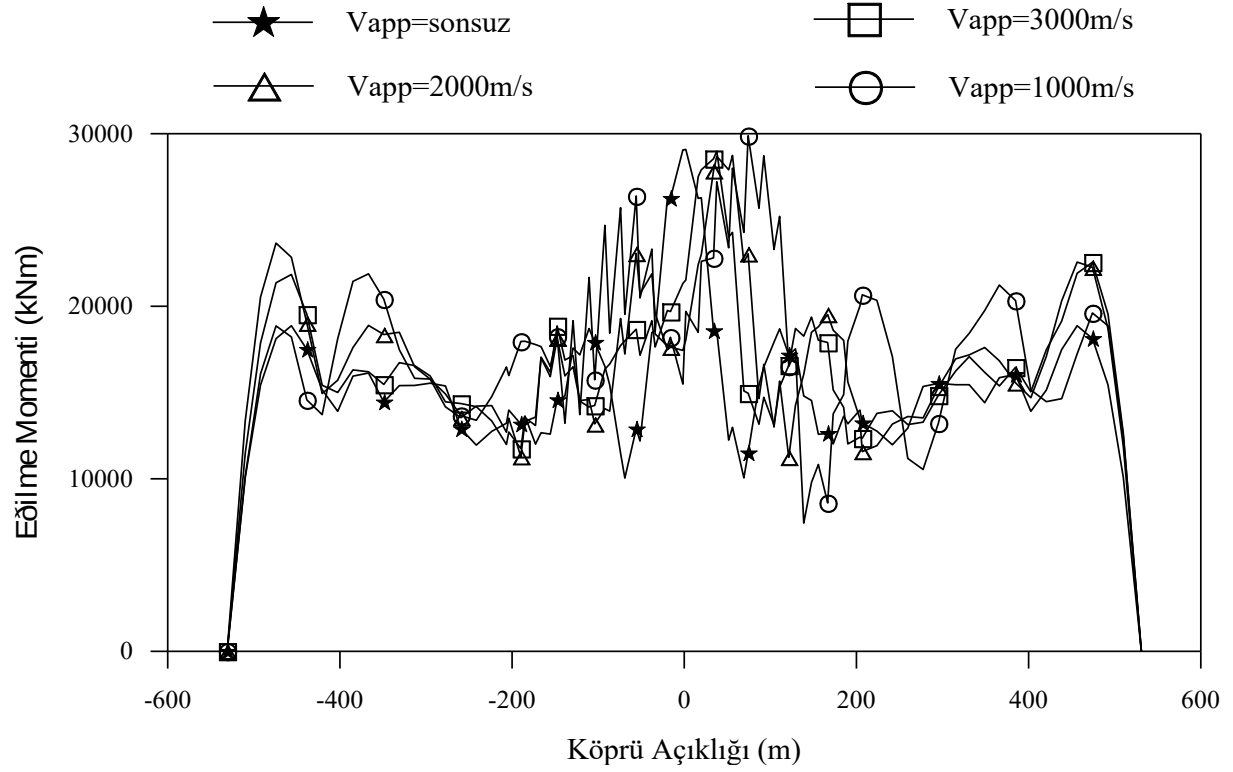
Şekil 9. Asinkronize yer hareketine maruz asma köprü



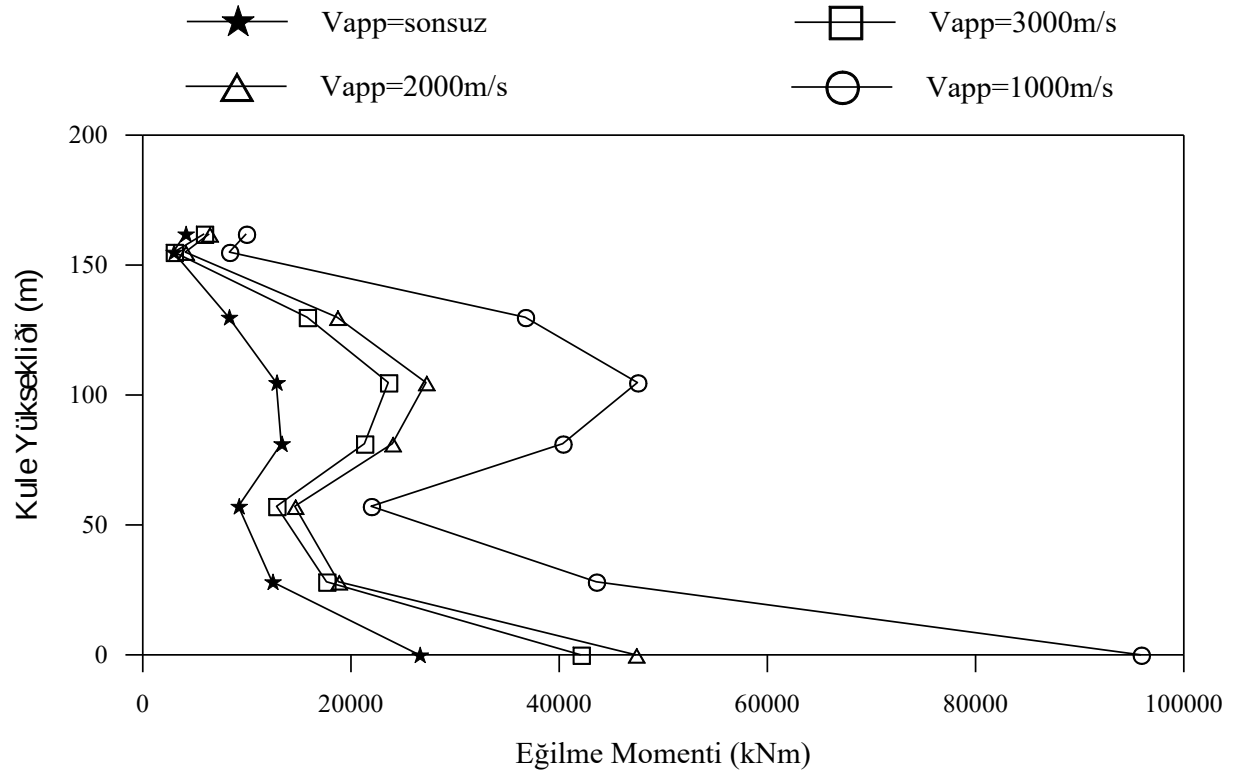
Şekil 10. Asinkronize analiz ile hesaplanan tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 11. Asinkronize analiz ile hesaplanan kule toplam yatay yerdeğiştirmeleri

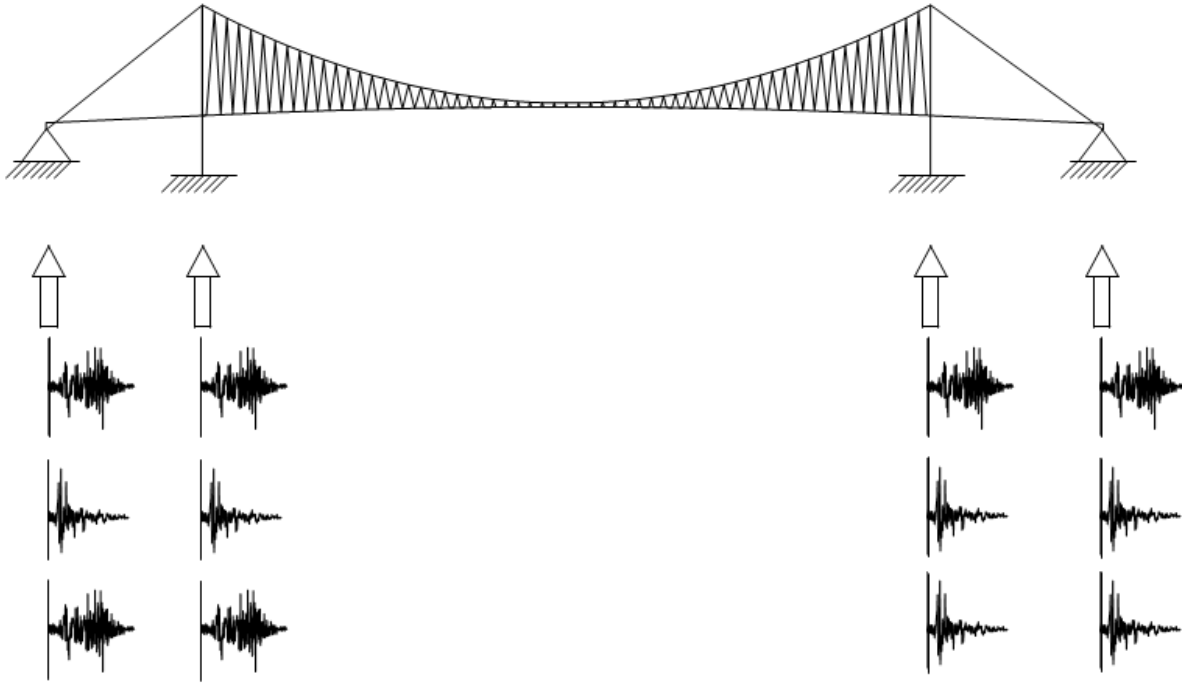


Şekil 12. Asinkronize analiz ile hesaplanan tabliye toplam eğilme momentleri

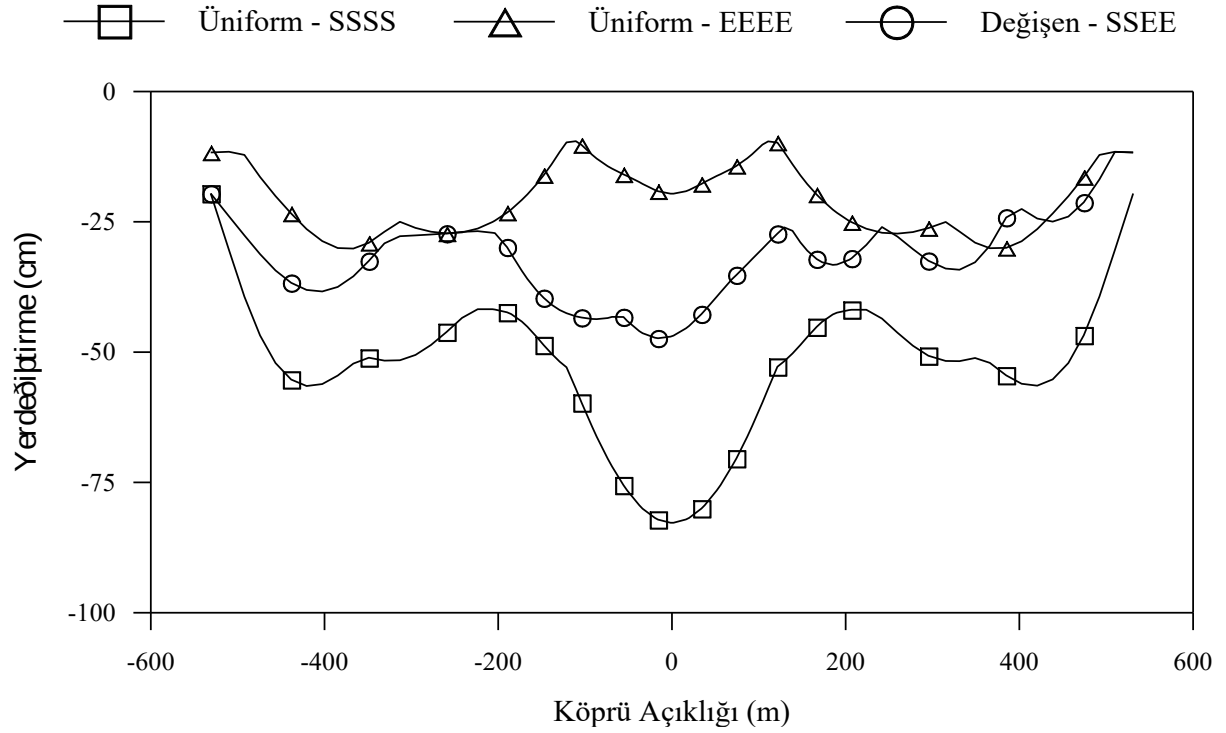


Şekil 13. Asinkronize analiz ile hesaplanan kule toplam eğilme momentleri

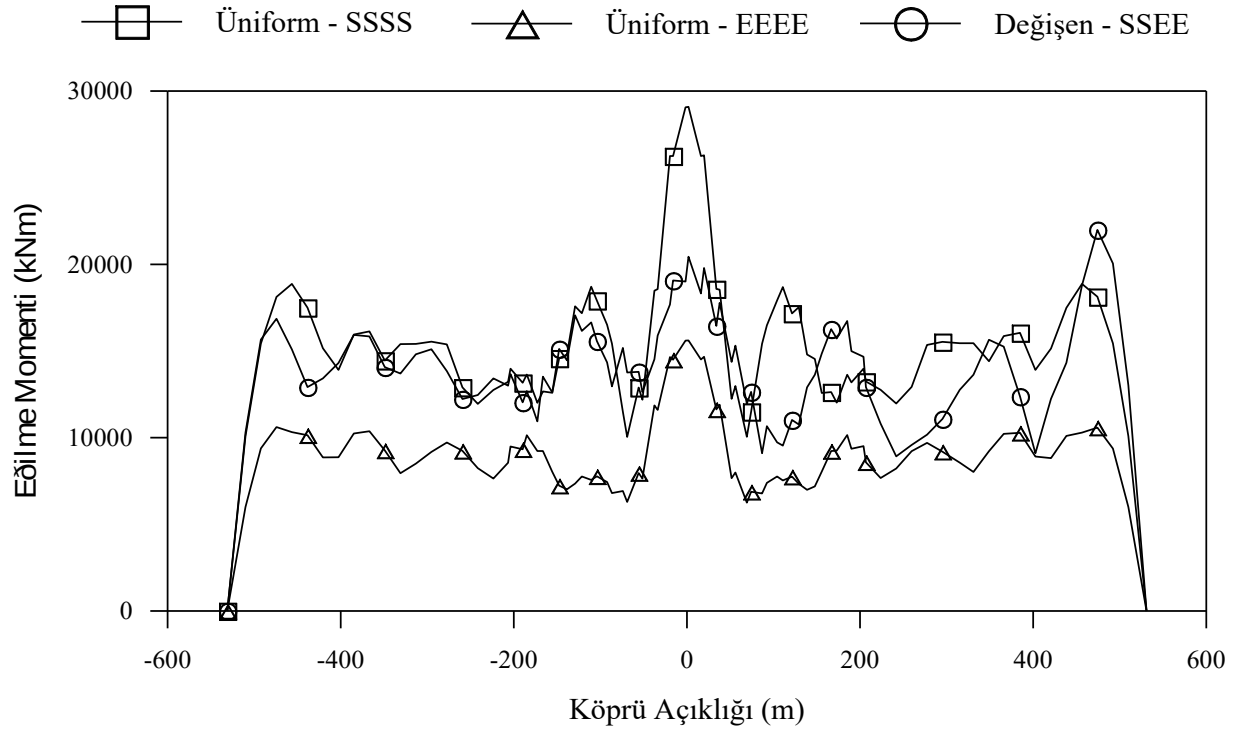
Üniform ve değişen yer hareketine maruz asma köprünün deterministik analizi (Şekil 14) sonucu köprü tabliye ve kulelerinde elde edilen yerdeğiştirme ve eğilme momentleri Şekil 15-Şekil 20’de görülmektedir. Buradaki analizler San Fernando ve Erzincan depremleri için iki ayrı üniform yer hareketi durumu ile köprünün Avrupa yakası mesnetlerine San Fernando depremi, Asya yakası mesnetlerine ise Erzincan depreminin etkimesi sonucu bir değişen yer hareketi durumu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekillerden anlaşıldığı üzere San Fernando depremi kullanılarak gerçekleştirilen üniform analiz sonuçları Erzincan depremi kullanılarak hesaplanan değerlerden daha büyüktür. San Fernando depremi ivme değerlerinin Erzincan depremi ivme kaydından daha büyük olduğundan bu durum beklenen ve olması gereken bir sonuçtur. Değişen yer hareketi durumunda tabliye ve Asya yakası kulesinde hesaplanan değerler genellikle San Fernando ve Erzincan depremleri kullanılarak gerçekleştirilen üniform yer hareketleri ile bulunan değerler arasında kalmaktadır. Avrupa yakası kulesinde ise San Fernando depremi kullanılarak yapılan üniform yer hareketi ile hesaplanan değerlere yakın olmakla birlikte, üniform yer hareketleri dikkate alınarak elde edilen analizler sonucunda bulunan değerlerden daha büyük olmaktadır.



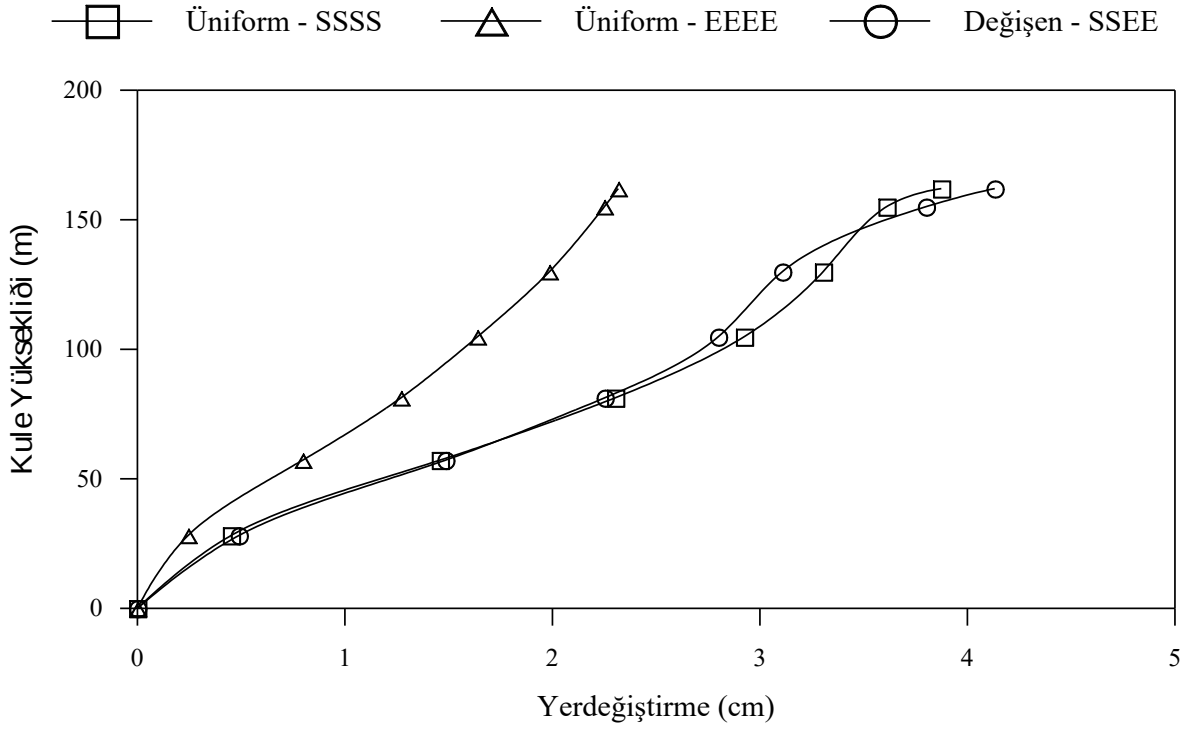
Şekil 14. Üniform ve değişen yer hareketine maruz asma köprü



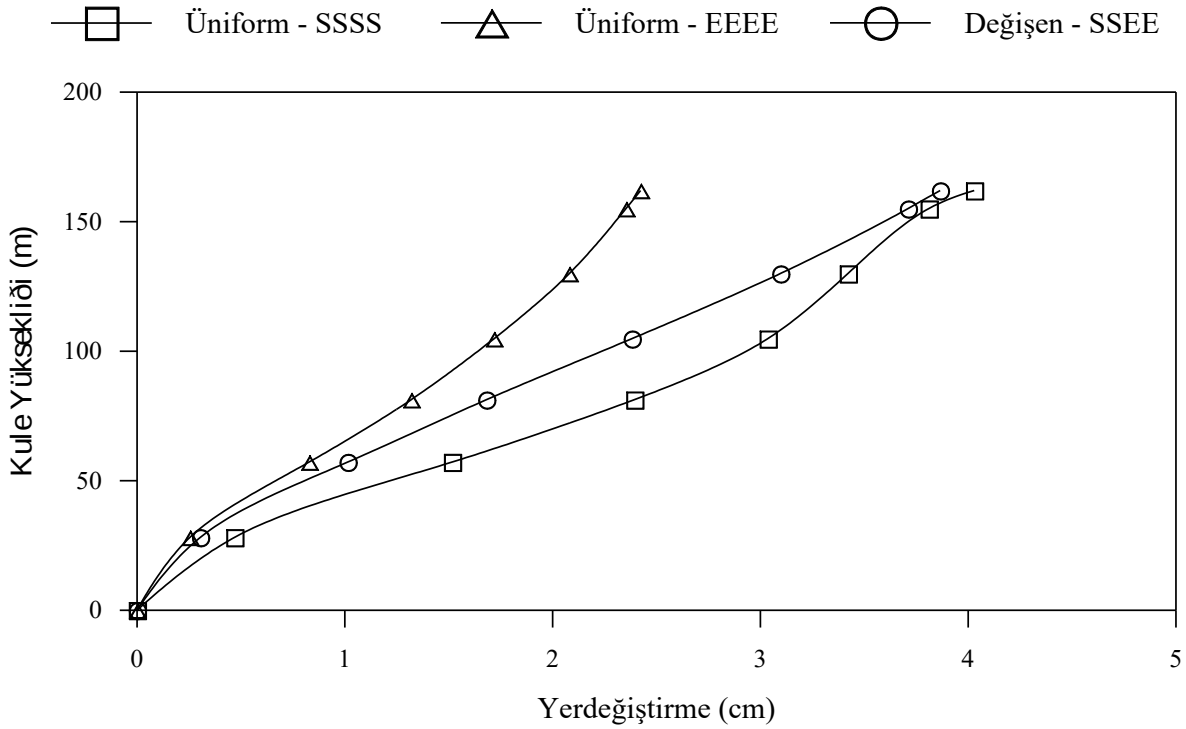
Şekil 15. Üniorm ve deęişen yer hareketi ile hesaplanan tabliye dűşey yerdeęiřtirmeleri



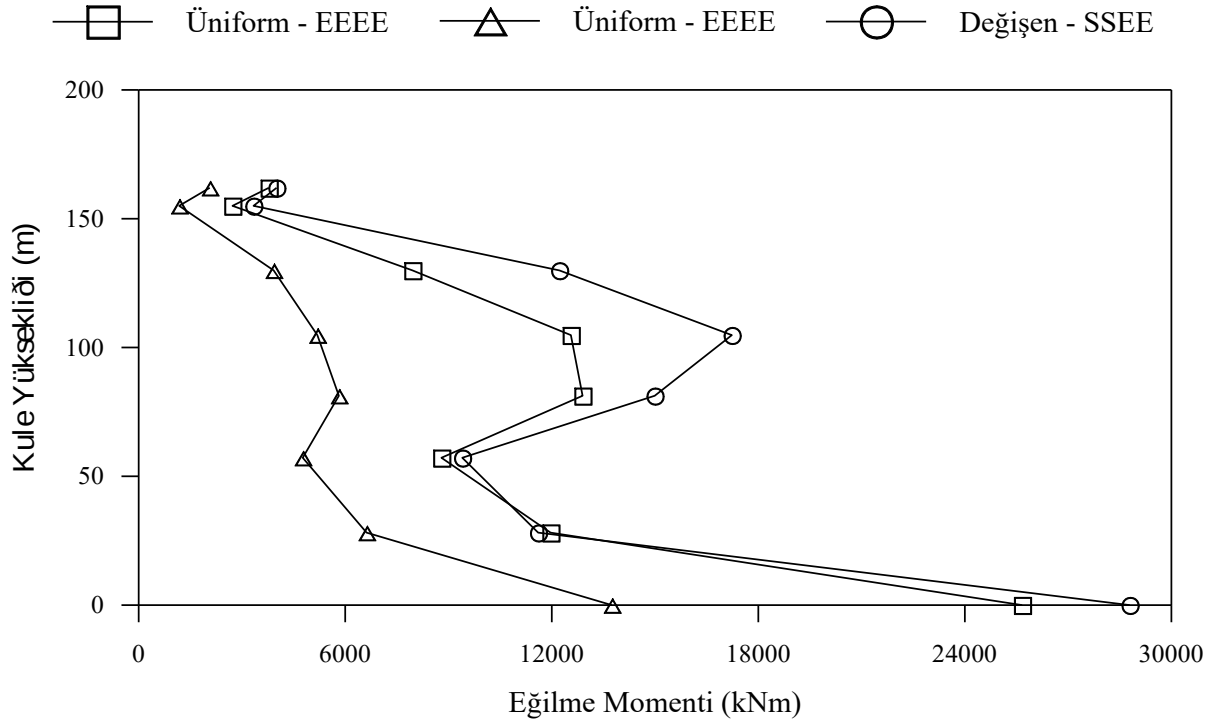
Şekil 16. Üniorm ve değişen yer hareketi ile hesaplanan tabliye eğilme momentleri



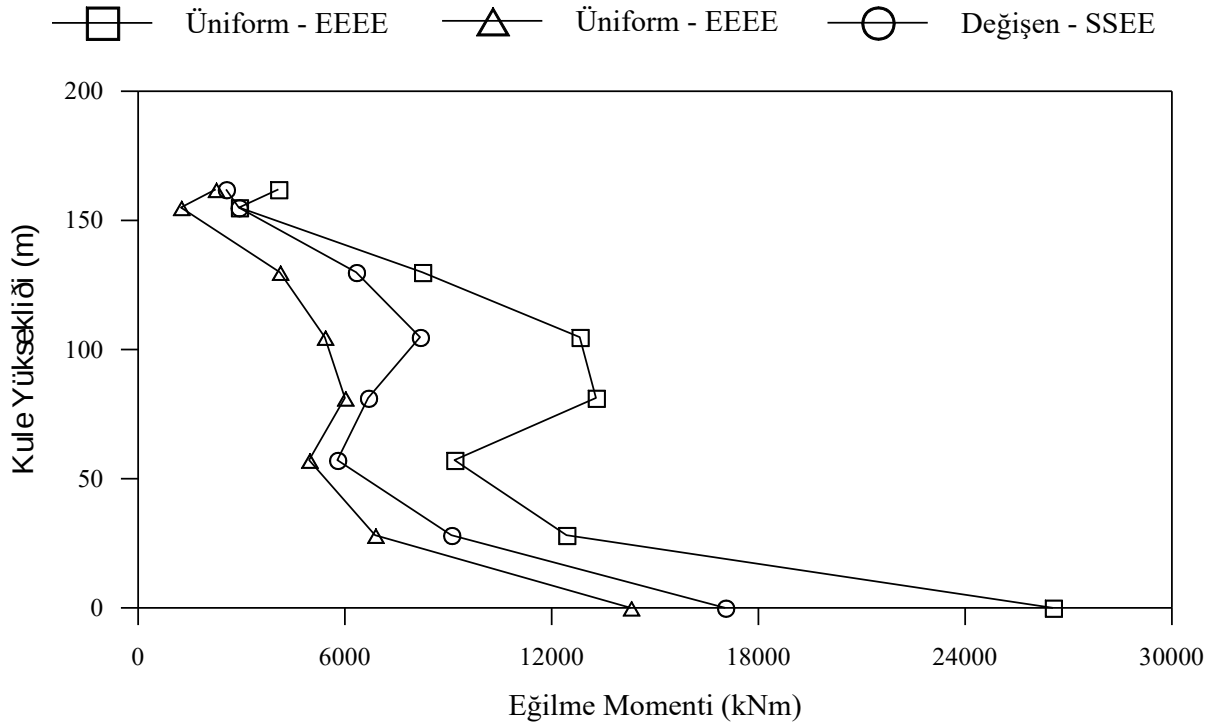
Şekil 17. Üniorm ve değişen yer hareketi ile hesaplanan Avrupa yakası kulesi yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 18. Üniorm ve değişen yer hareketi ile hesaplanan Asya yakası kulesi yatay yerdeğiştirmeleri

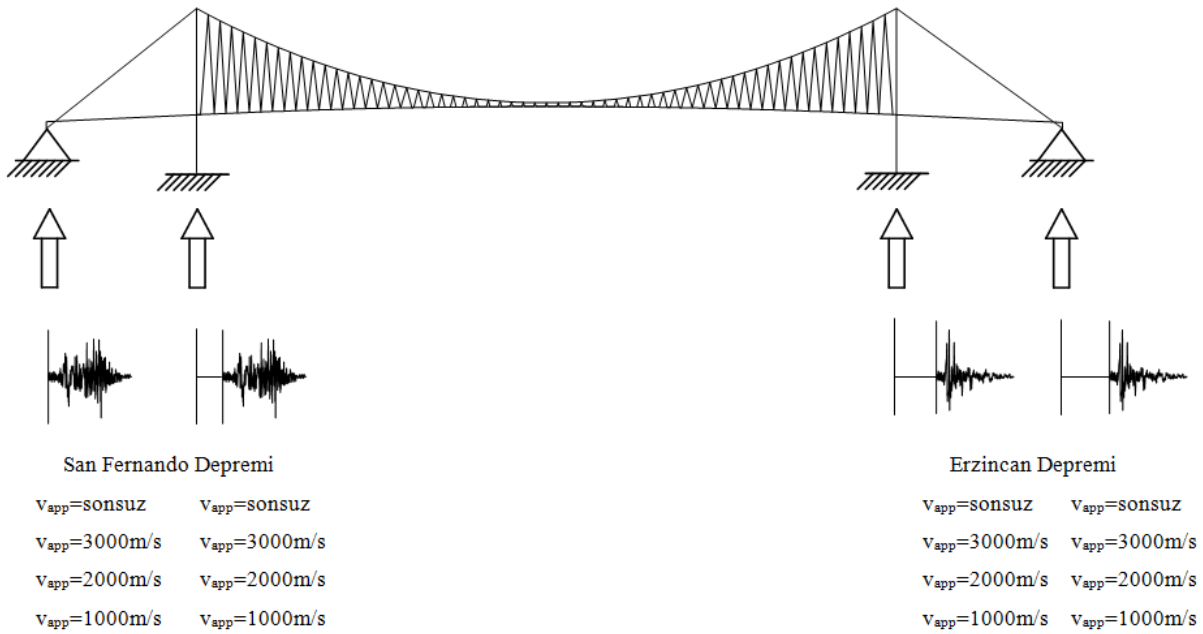


Şekil 19. Üniorm ve değişen yer hareketi ile hesaplanan Avrupa yakası kulesi eğilme momentleri

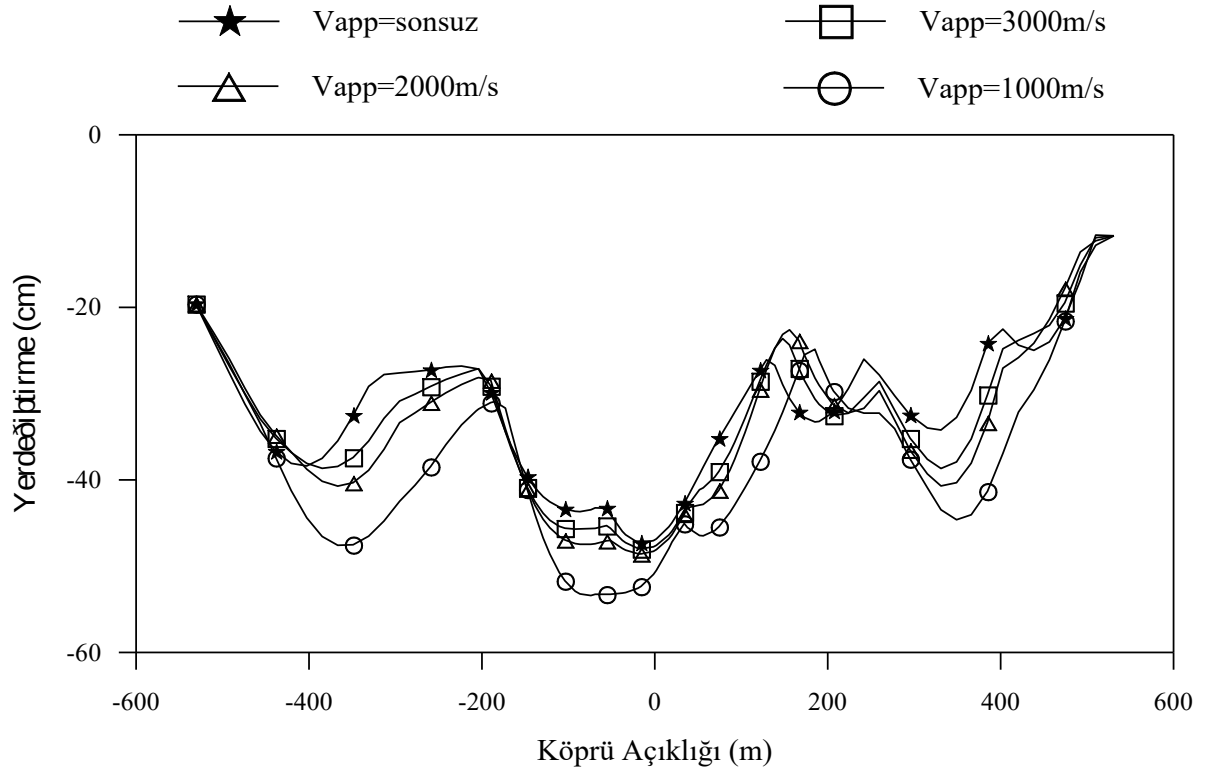


Şekil 20. Üniorm ve değişen yer hareketi ile hesaplanan Asya yakası kulesi eğilme momentleri

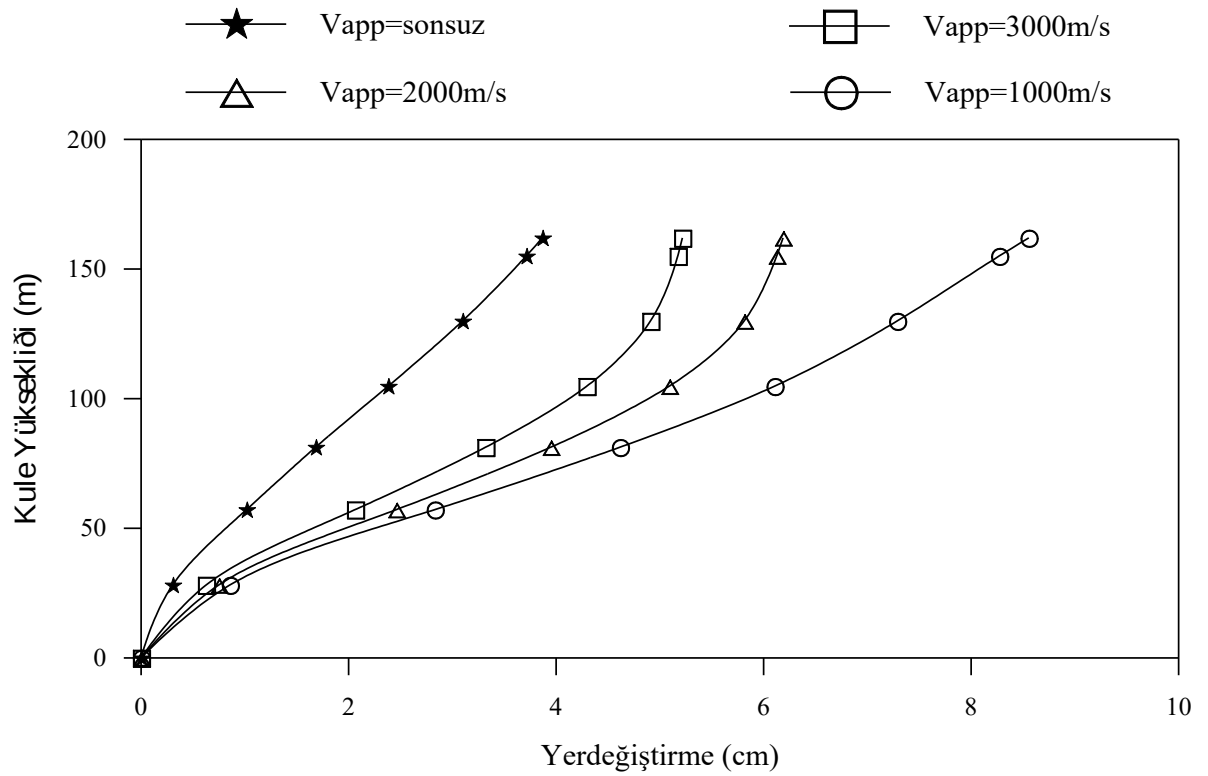
Şekil 21’de değişerek yayılan yer hareketine maruz asma köprü sistemi görülmektedir. Burada köprünün değişen yer hareketine maruz olması durumunda dalga yayılma hızı 1000, 2000 ve 3000m/s alınarak elde edilen analiz sonuçları birbirleriyle ve üniform yer hareketini ifade eden dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda bulunan analiz sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Yer hareketi olarak köprünün Avrupa yakasındaki mesnetlerine 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni, Asya yakasındaki mesnetlerine ise 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni etkittirilmiştir. Analizler sonucunda asma köprünün tabliye ve kulelerinde elde edilen yerdeğiştirme ve eğilme momentleri Şekil 22 – Şekil 25’de verilmektedir. Şekillerden görüleceği üzere sonlu dalga yayılma hızı dikkate alınarak elde edilen değerler, dalga yayılma hızının sonsuz olması durumunda hesaplanan değerlerden genellikle daha büyüktür. Ayrıca yer hareketi dalga yayılma hızının azalmasıyla hesaplanan değerlerin genellikle arttığı görülmektedir.



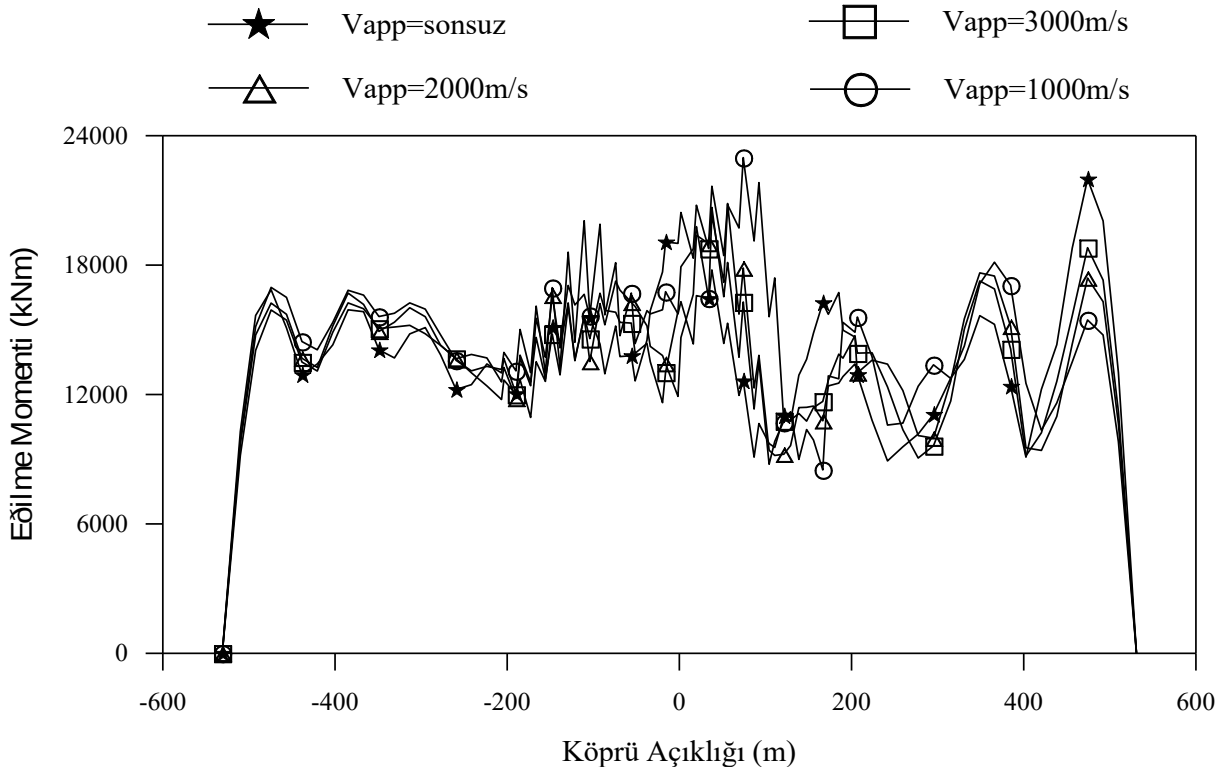
Şekil 21. Değişerek yayılan yer hareketine maruz asma köprü



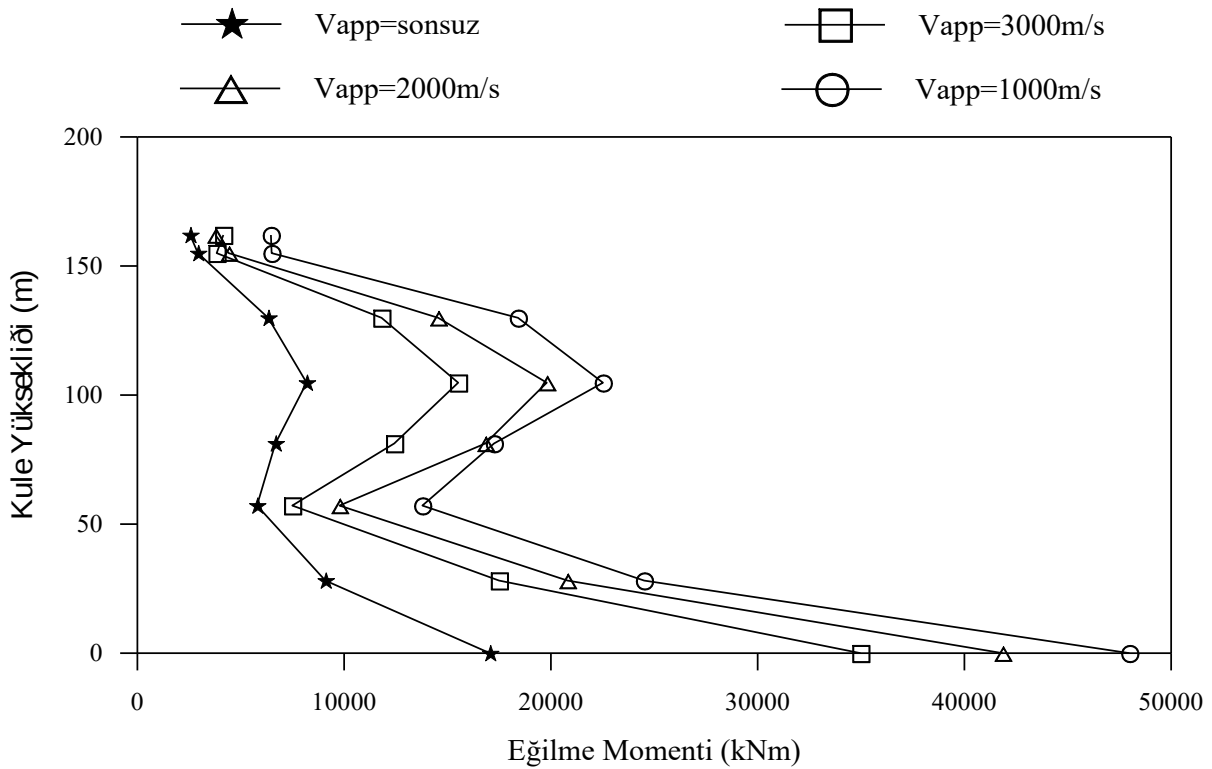
Şekil 22. Değişerek yayılan yer hareketi ile hesaplanan tabliye düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 23. Değişerek yayılan yer hareketi ile hesaplanan kule yatay yerdeğiştirmeleri



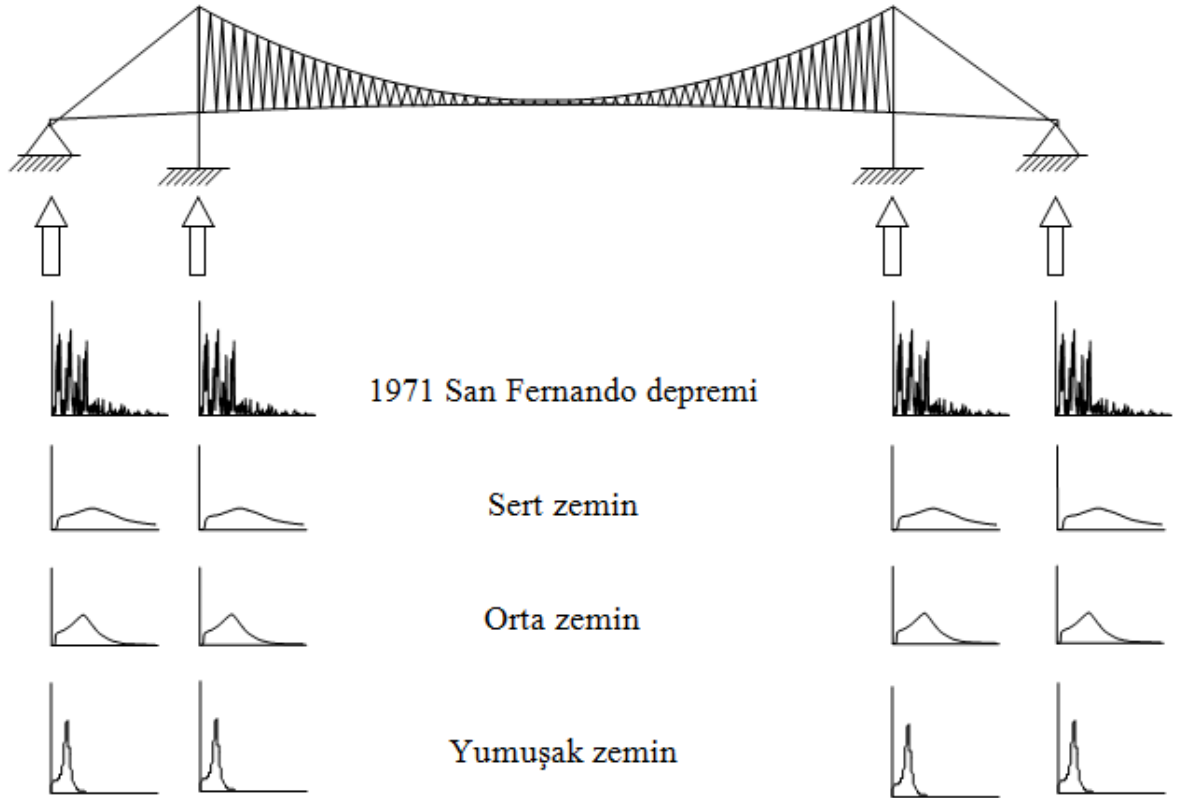
Şekil 24. Değişerek yayılan yer hareketi ile hesaplanan tabliye eğilme momentleri



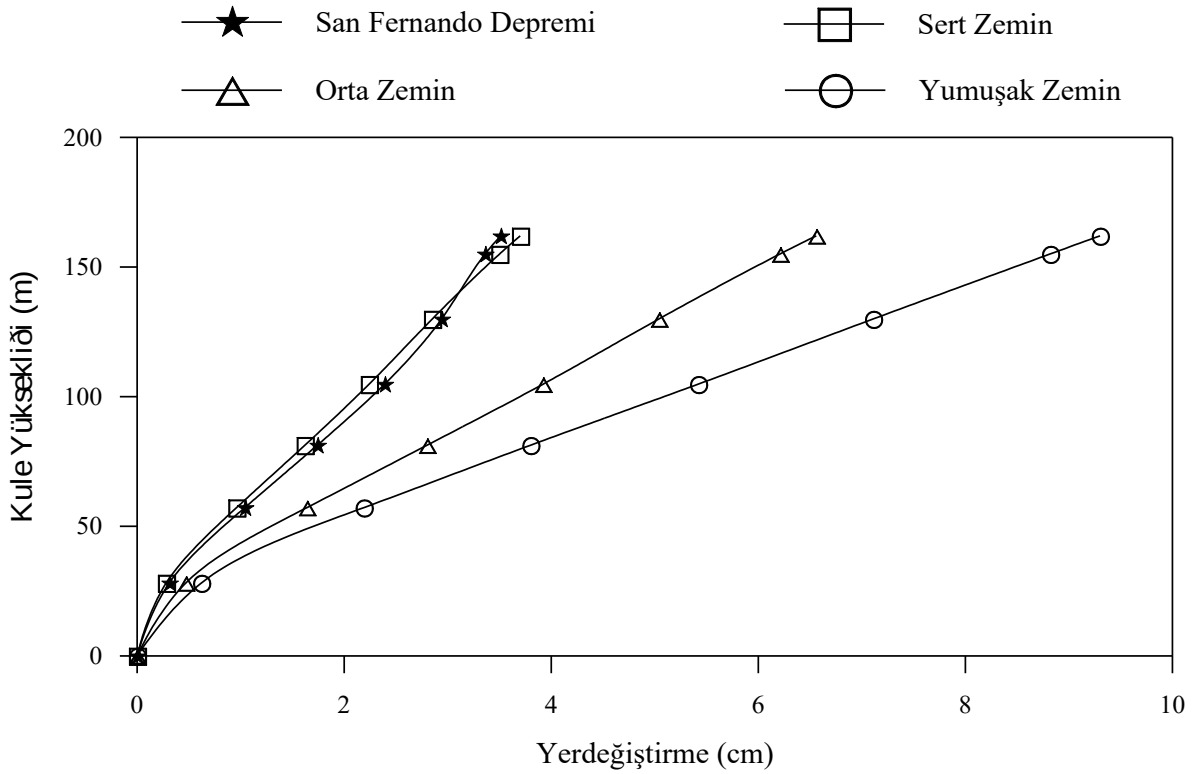
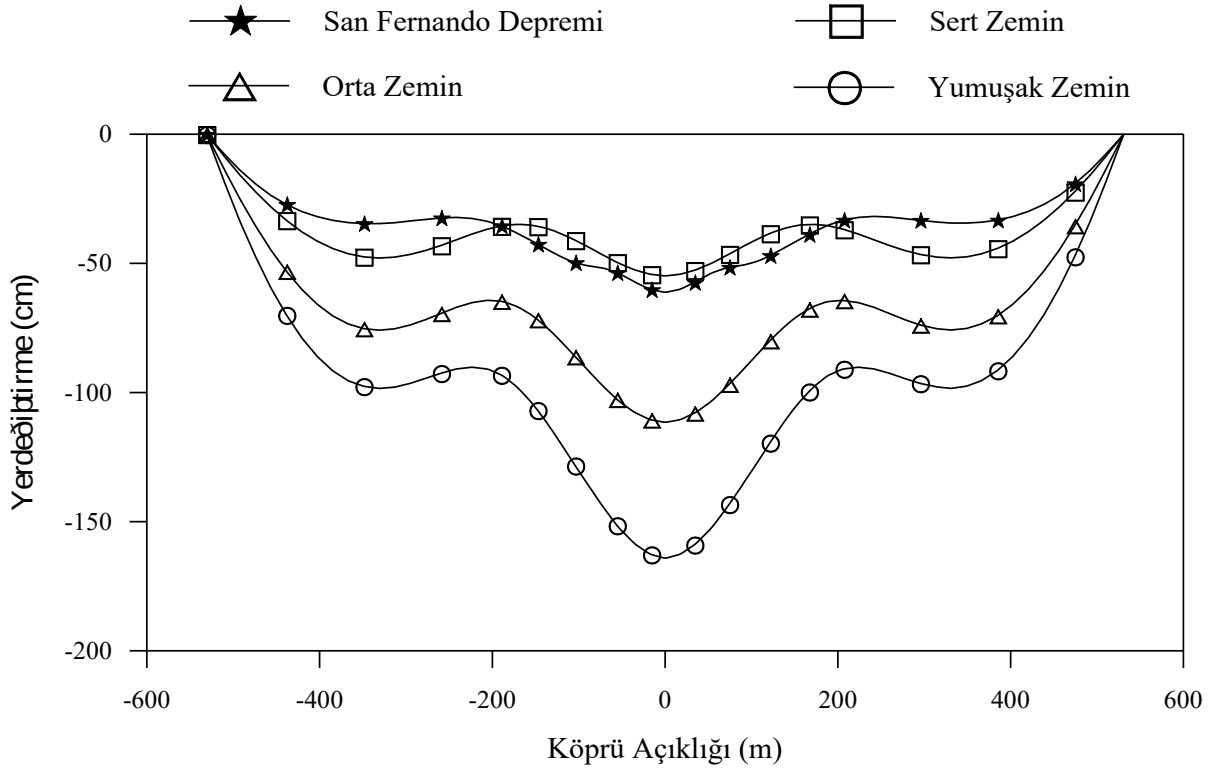
Şekil 25. Değişerek yayılan yer hareketi ile hesaplanan kule eğilme momentleri

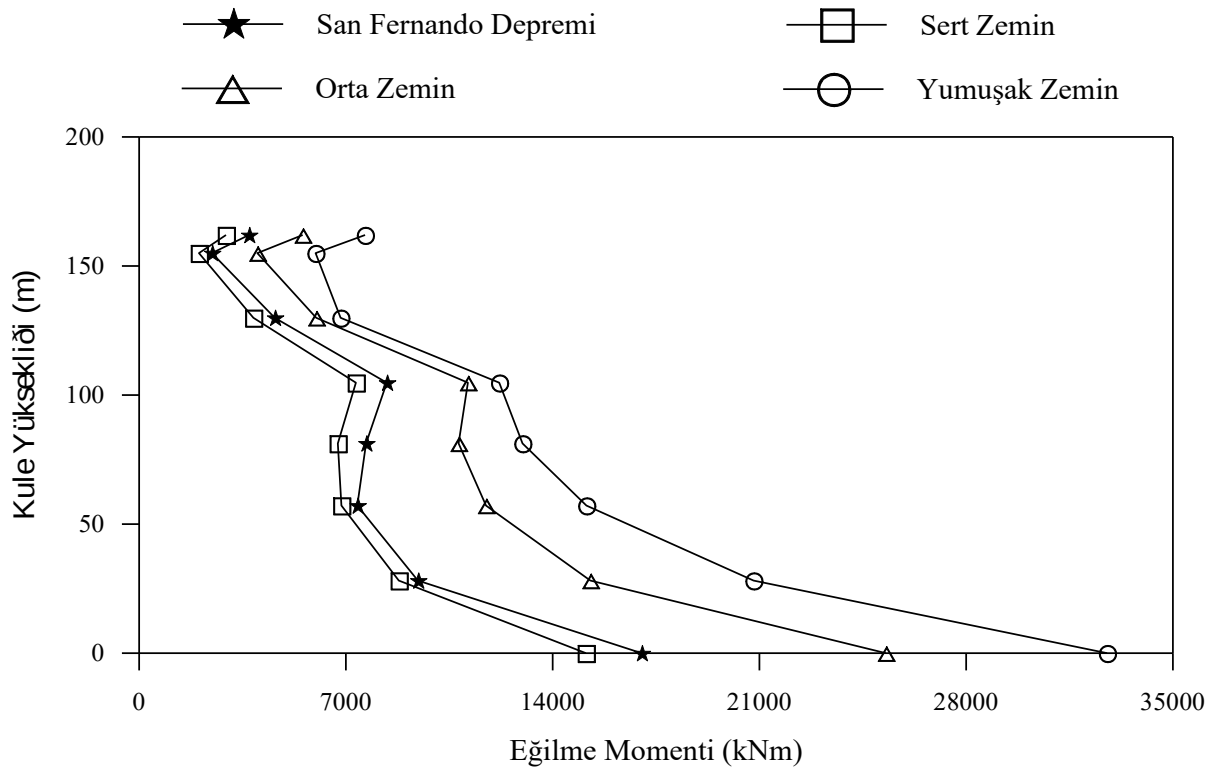
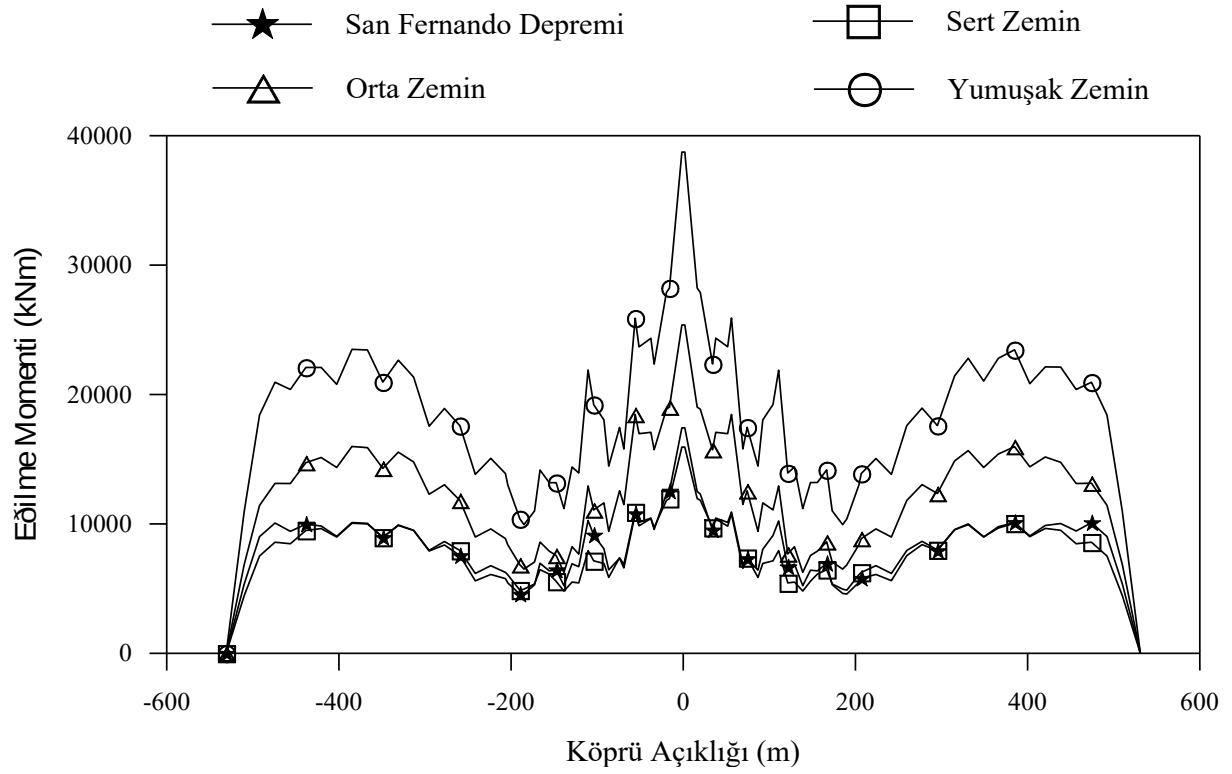
Stokastik Analiz Sonuçları

Stokastik analizlerinde yer hareketi için kullanılan filtre edilmiş beyaz gürültü (FBG) modeli, gerçek bir yer hareketi ile karşılaştırılmaktadır. Bunun için (16) denklemindeki filtre edilmiş beyaz gürültü güç spektral yoğunluk fonksiyonu, filtre parametreleri Tablo 1’de verilen farklı zemin türleri için elde edilmektedir. S_0 değerleri ise her bir zemin cinsi için 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeninin enerjisine bağlı olarak hesaplanmıştır. Clough ve Penzien [41] tarafından düzenlenen filtre edilmiş beyaz gürültü (FBG) modeli kullanılarak sert, orta ve yumuşak zemin türleri için elde edilen yer hareketi modelleri ve 1971 San Fernando depremi etkisindeki asma köprü sistemi Şekil 26’da görülmektedir. Farklı zemin türleri için filtre edilmiş beyaz gürültü modelleri için elde edilen ortalama maksimum yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri, 1971 San Fernando depremi güç spektral yoğunluk fonksiyonu için bulunan sonuçlarla Şekil 27 – Şekil 30’da karşılaştırılmaktadır. Şekillerden görüldüğü üzere sert zemin türü için filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile elde edilen tabliye ve kulelerdeki yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri, genelde gerçek 1971 San Fernando depremi için bulunan sonuçlarla birbirine yakın çıkmaktadır. 1971 San Fernando depremi için bulunan sonuçlar, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile orta ve yumuşak zemin türü için elde edilen sonuçlardan daha küçük olmaktadır. Filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile yumuşak zemin türü için elde edilen sonuçlar maksimum çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, kullanılan deprem kaydının kaydedildiği zemin sınıfına bağlı olarak, Clough ve Penzien [41] tarafından düzeltilen filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin, gerçek yer hareketini oldukça iyi karakterize edebildiği gözlenmektedir.

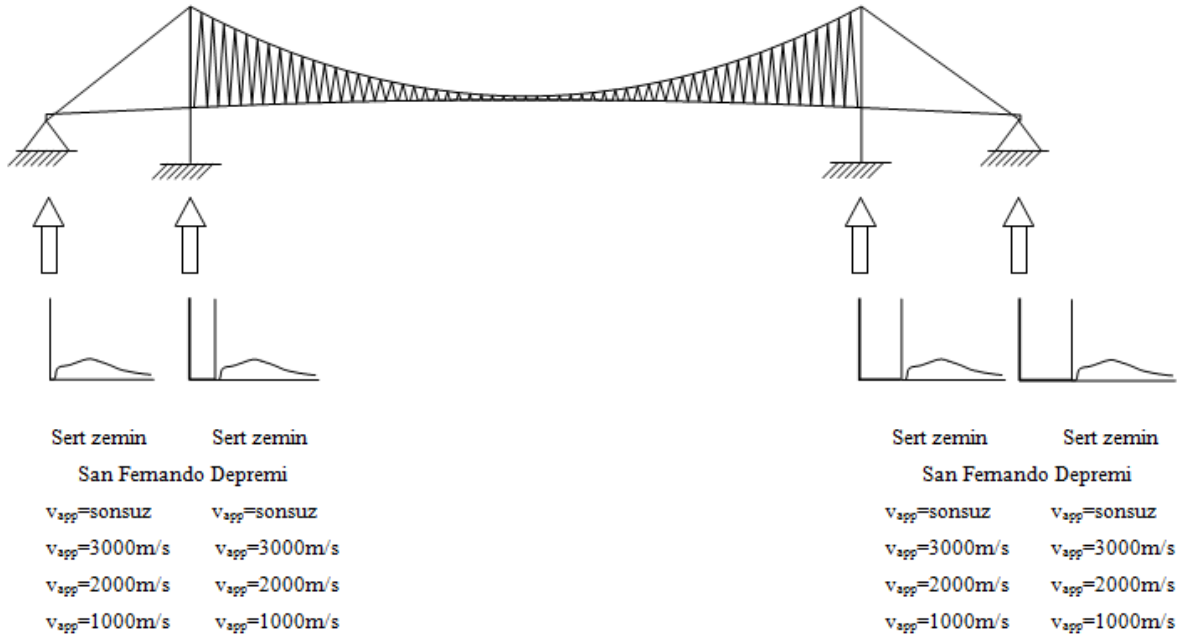


Şekil 26. Üniform yer hareketine maruz asma köprü

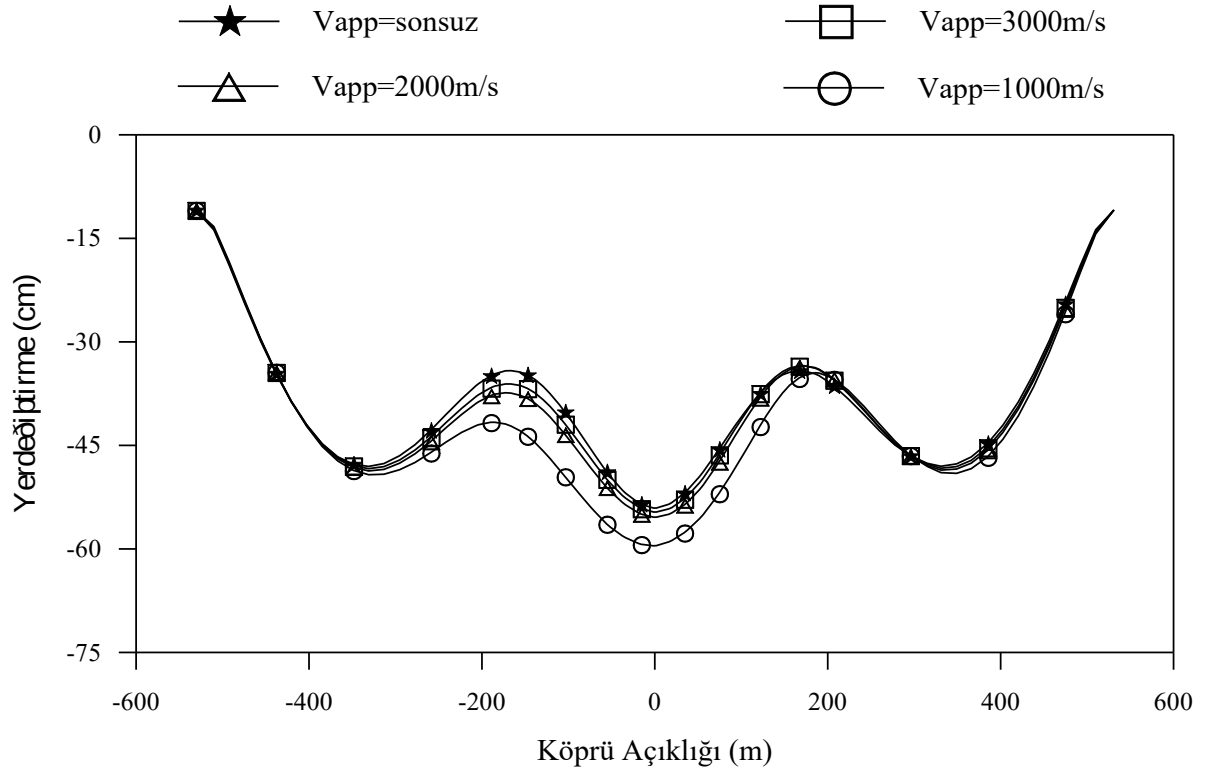




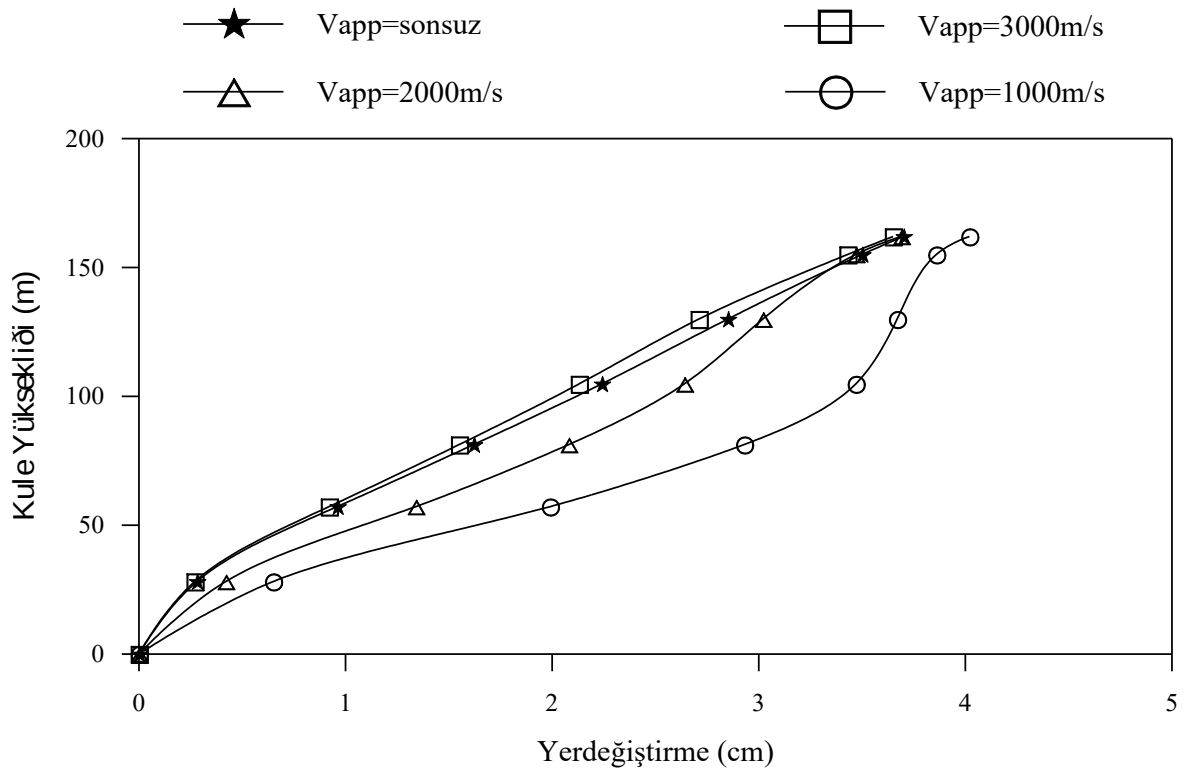
Bu bölümde yer hareketi dalga yayılma hızı, korelasyon etkileri, zemin şartları, üniform ve değişen yer hareketleri dikkate alınarak asma köprülerin stokastik analizleri gerçekleştirilmektedir. Köprünün mesnetlendiği zeminin homojen ve sert zemin olması durumunda, sadece deprem dalgasının yayılma etkisi yani asinkronize yer hareketi dikkate alınarak stokastik analizler yapılmaktadır. Boğaziçi Köprüsü mesnetleri sert zemine oturduğundan dolayı yer hareketi dalga yayılma hızı olarak 1000, 2000, 3000m/s ve sonsuz hız değerleri seçilmiştir. Yer hareketi olarak 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni dikkate alınmıştır. Şekil 31’da asinkronize yer hareketine maruz mesnetleri homojen ve sert zemine oturan asma köprü görülmektedir. Şekil 32 – Şekil 35’da tabliye ve kulelerde elde edilen ortalama maksimum yerdeğiştirme ve eğilme momentleri görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere yer hareketi dalga yayılma hızının sonsuz olduğu üniform yer hareketi ile elde edilen değerler genellikle en küçük olmaktadır. Deprem dalgası yayılma hızı 1000m/s alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda bulunan değerler genellikle en büyüktür. Yani yer hareketi dalga yayılma hızının azalması ile yerdeğiştirme ve eğilme momentleri genellikle arttığı gözlenmektedir.



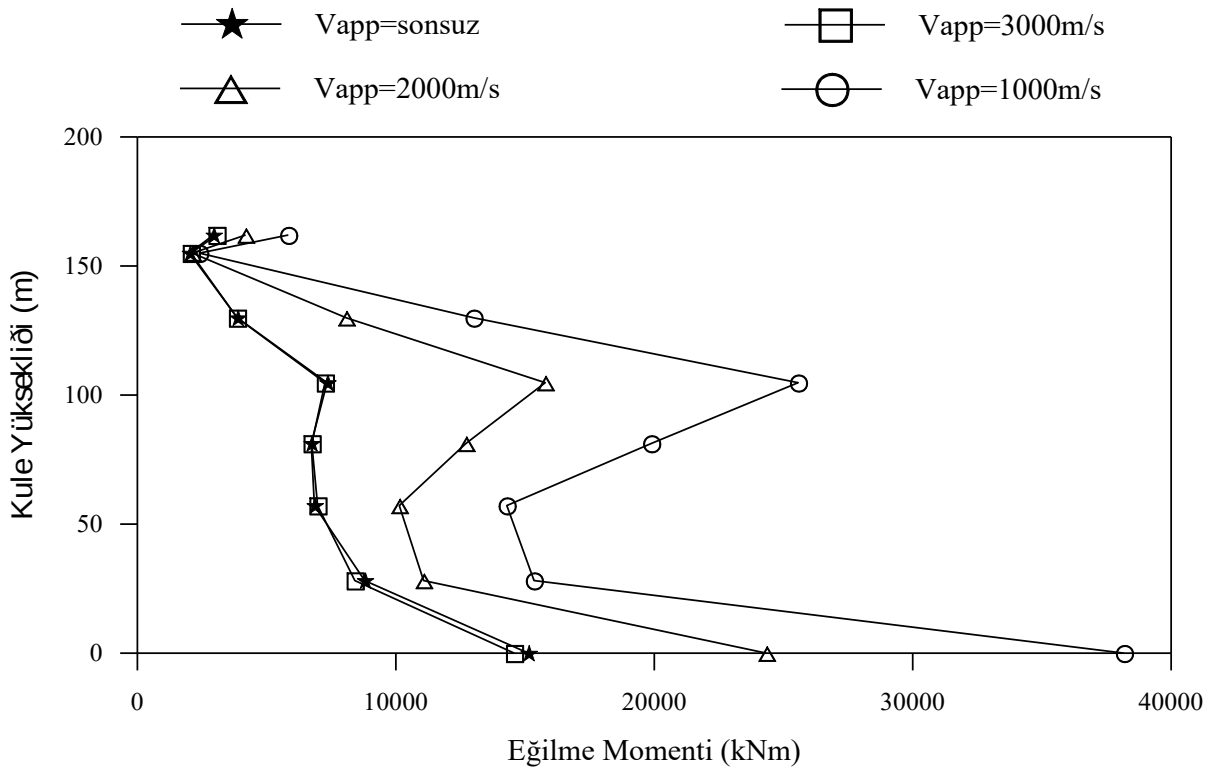
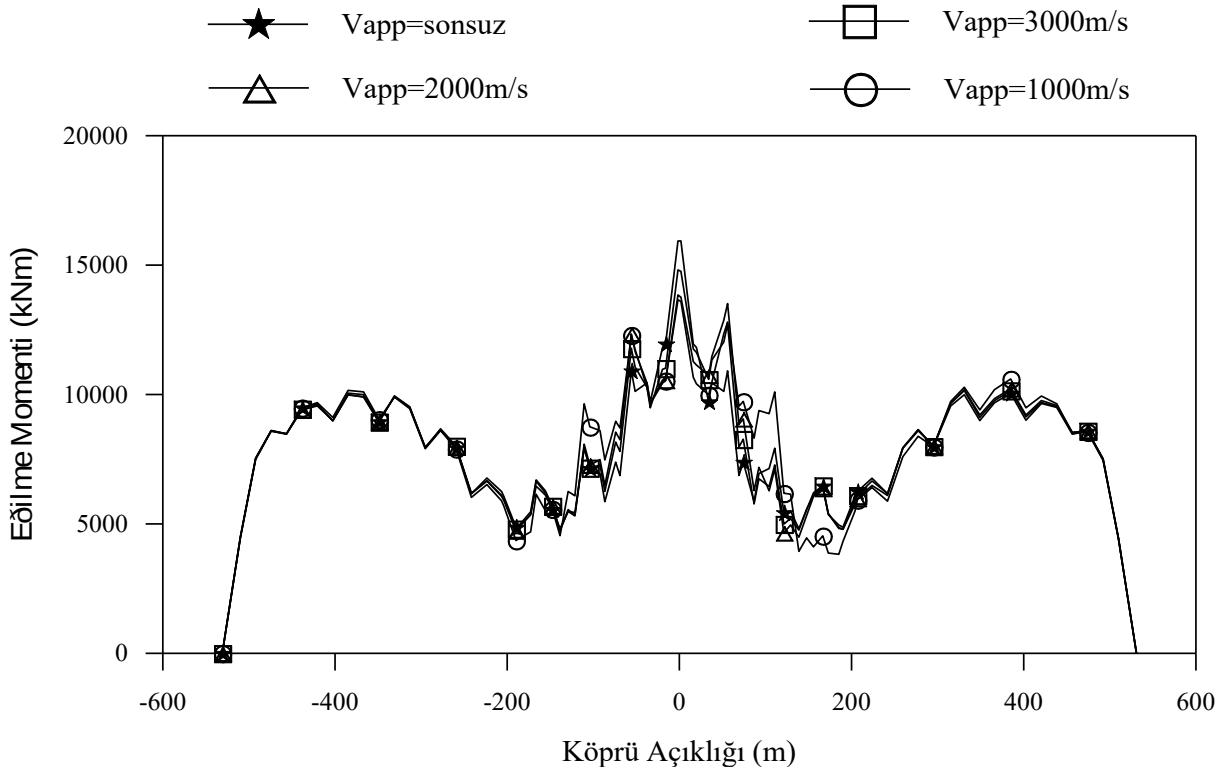
Şekil 31. Asinkronize yer hareketine maruz mesnetleri sert zemine oturan asma köprü



Şekil 32. Asinkronize analiz ile hesaplanan tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 33. Asinkronize analiz ile hesaplanan kule toplam yatay yerdeğiştirmeleri



Bu bölümde asma köprünün mesnetlendiği zeminin homojen olmaması durumunda dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmektedir. Köprünün mesnetlendiği zeminin dört bölgeye ayrıldığı ve analizlerde bu bölgelerde üç farklı zemin dağılışının olduğu kabul edilmiştir. Bunlar;

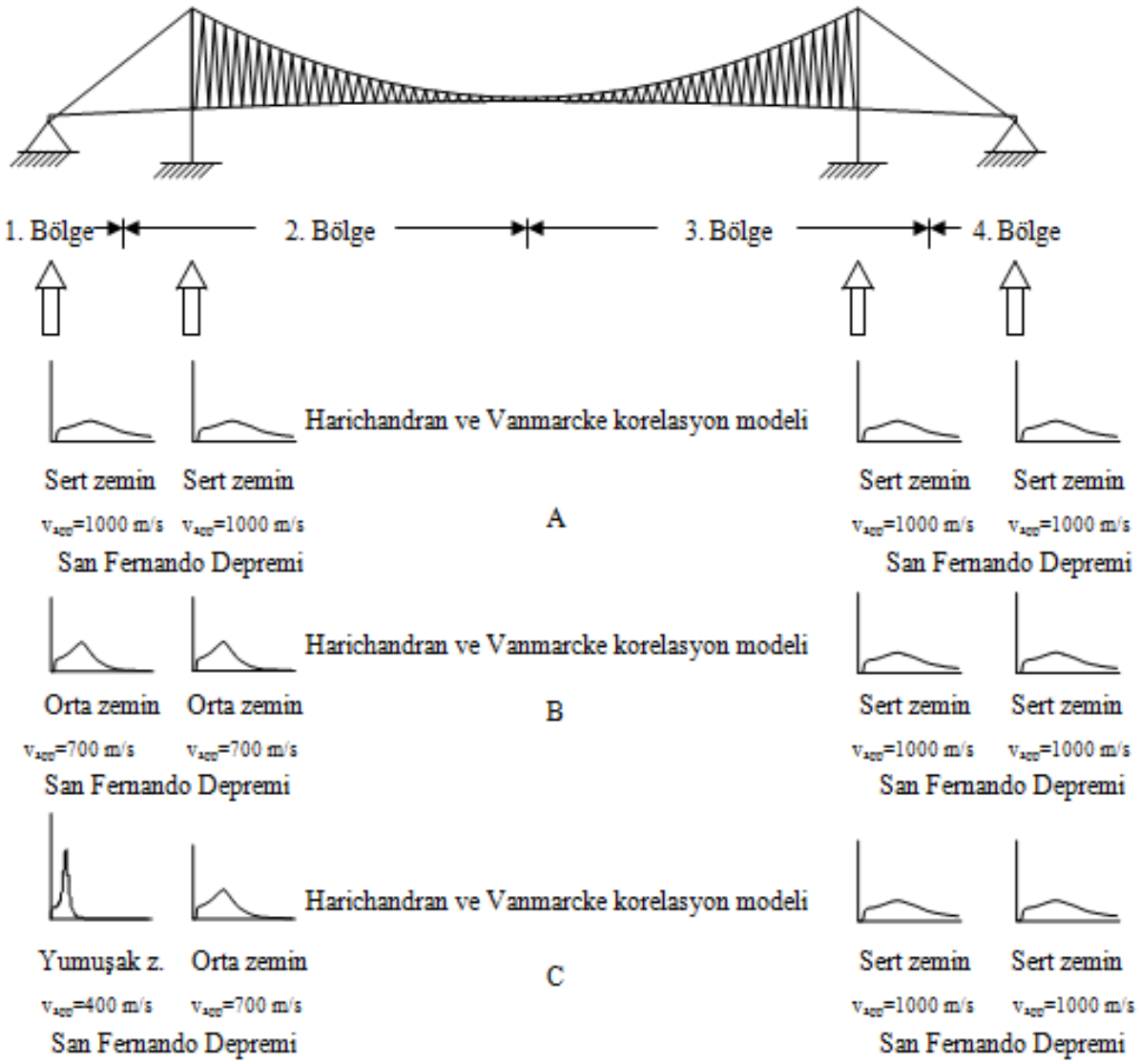
A Durumu: Köprünün bütün mesnetleri homojen ve sert zemine oturmakta olup, yer hareketi dalga yayılma hızı 1000m/s, korelasyon etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke korelasyon modeli kullanılmaktadır. Bu durumda (20) denklemindeki korelasyon etkisi $|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z = 1$ olmaktadır.

B Durumu: Köprünün Avrupa yakasındaki mesnetleri orta zemine, Asya yakasındaki mesnetleri sert zemine oturmakta olup, yer hareketi dalga yayılma hızı olarak orta zemin için 700m/s, sert zemin için 1000m/s, korelasyon etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke korelasyon modeli kullanılmaktadır. Burada (20) denklemindeki korelasyon etkisi $|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z \neq 1$ olmaktadır.

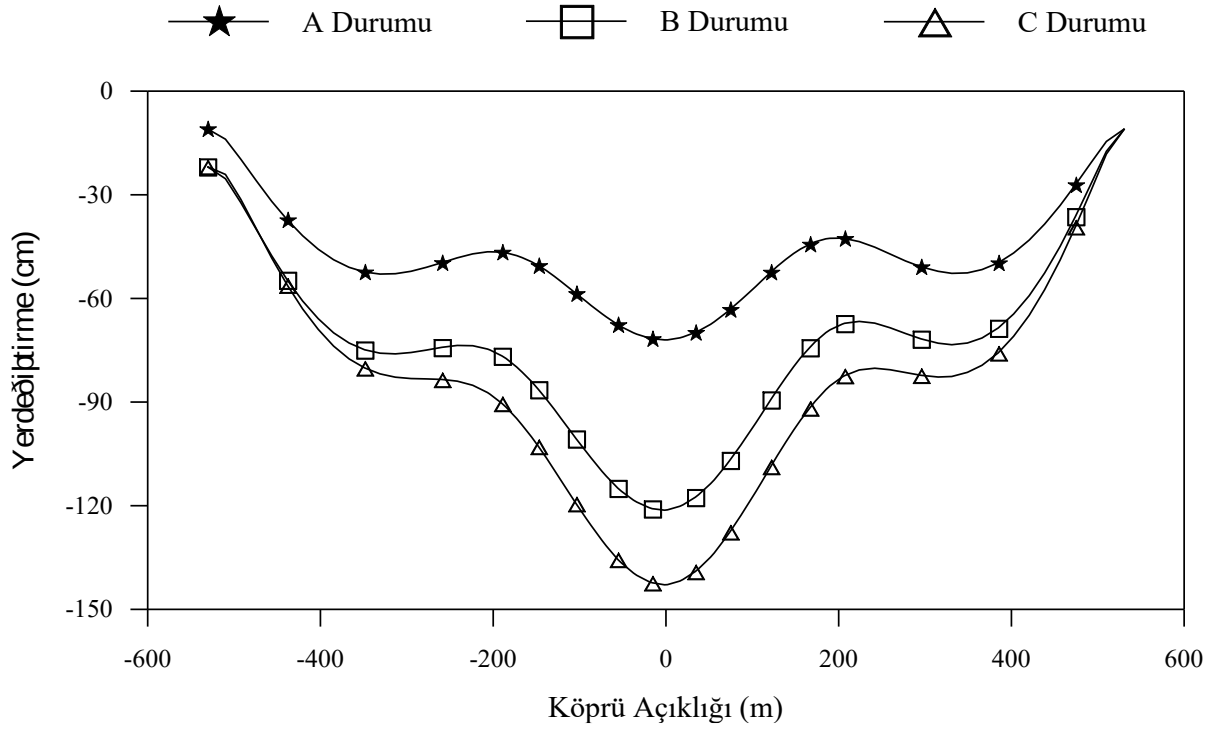
C Durumu: Köprünün Avrupa yakasındaki ankraj bloğu yumuşak zemine, kule ise orta zemine, Asya yakasındaki mesnetleri ise sert zemine oturmakta olup, yer hareketi dalga yayılma hızı olarak yumuşak zemin için 400m/s, orta zemin için 700m/s, sert zemin için 1000m/s, korelasyon etkisi olarak Harichandran ve Vanmarcke korelasyon modeli kullanılmaktadır. Burada da, B durumunda olduğu gibi (20) denklemindeki korelasyon etkisi $|\gamma_{lm}(\omega)|^k \neq 1$, dalga yayılma etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^d \neq 1$ ve zemin etkisi $\gamma_{lm}(\omega)^z \neq 1$ olmaktadır.

Şekil 36'da homojen ve homojen olmayan zemin ortamındaki yer hareketine maruz asma köprü ve köprünün mesnetlendiği zeminin dört bölgeye ayrılmış hali görülmektedir.

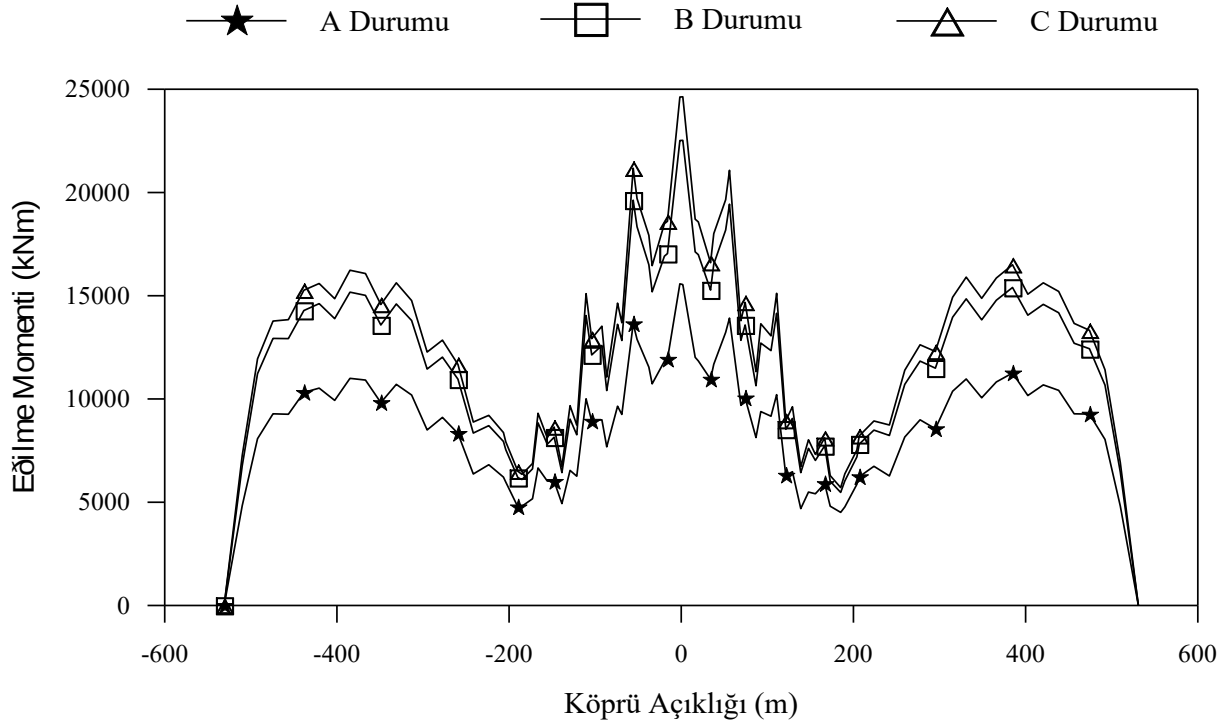
Yukarıda belirtilen üç durumda köprü tabliye ve kulelerinde hesaplanan ortalama maksimum toplam yerdeğiştirmeler ile toplam eğilme momentleri Şekil 37 – Şekil 42'de görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere A durumundaki homojen zemin için hesaplanan değerler en küçük olurken, C durumundaki homojen olmayan zemin için elde edilen değerler genellikle en büyüktür. Yine şekillerden görüleceği üzere Avrupa yakası kulesinde elde edilen yerdeğiştirme ve eğilme momentleri Asya yakası kulesinde elde edilenlerden daha büyük olmaktadır. Bunun sebebi Avrupa yakasında köprünün mesnetlendiği zemin sert zeminden yumuşak zemine doğru değişirken, Asya yakasında köprünün mesnetlendiği zemin değişmeyip hep sert zemin olarak kalmasıdır.



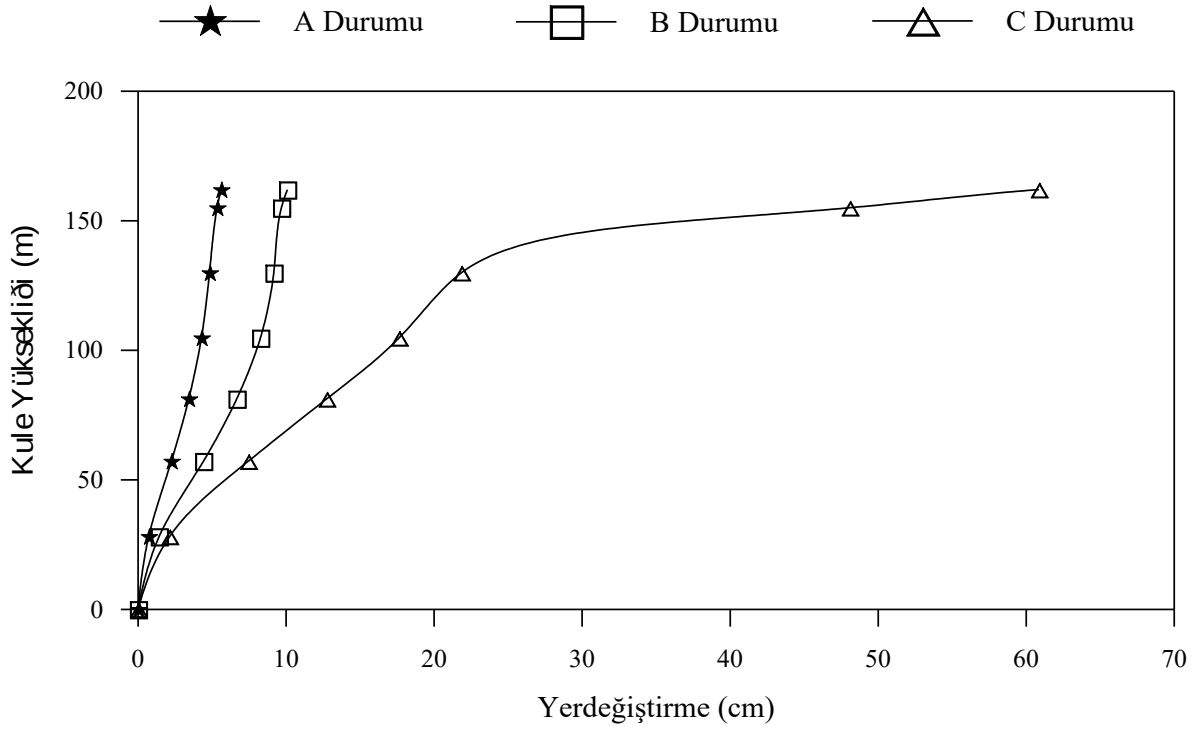
Şekil 36. Homojen ve homojen olmayan zemin ortamındaki yer hareketine maruz asma köprü



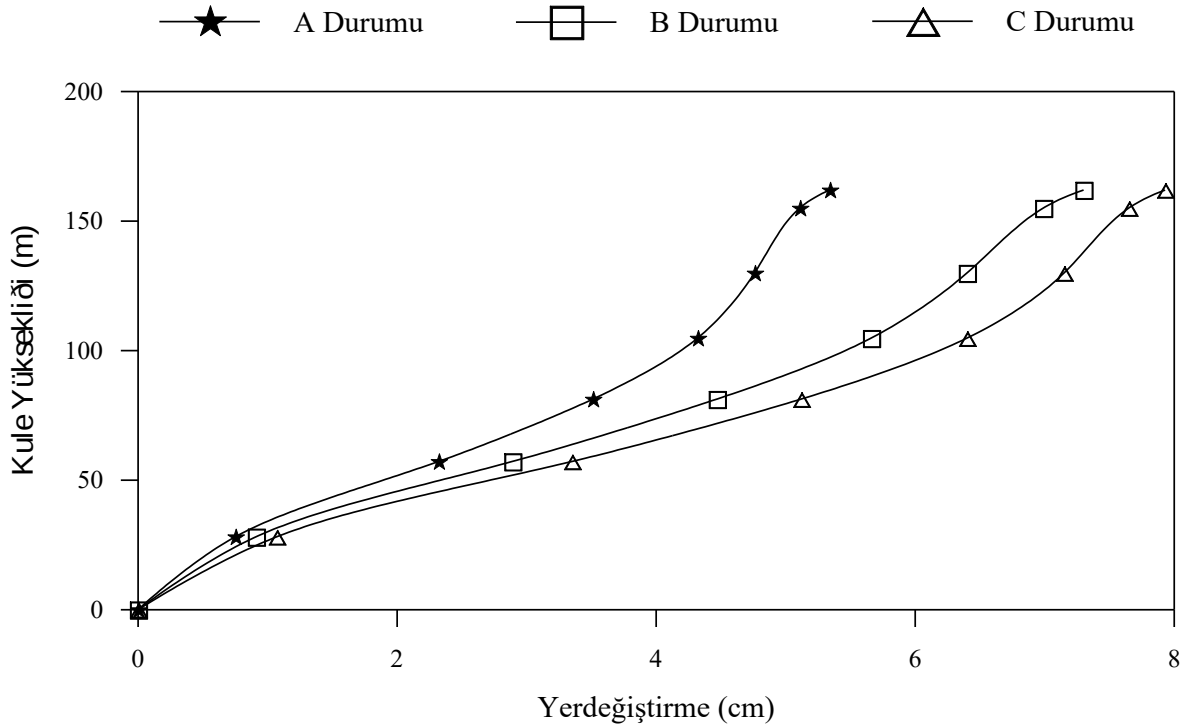
Şekil 37. Homojen olmayan zemin için tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri



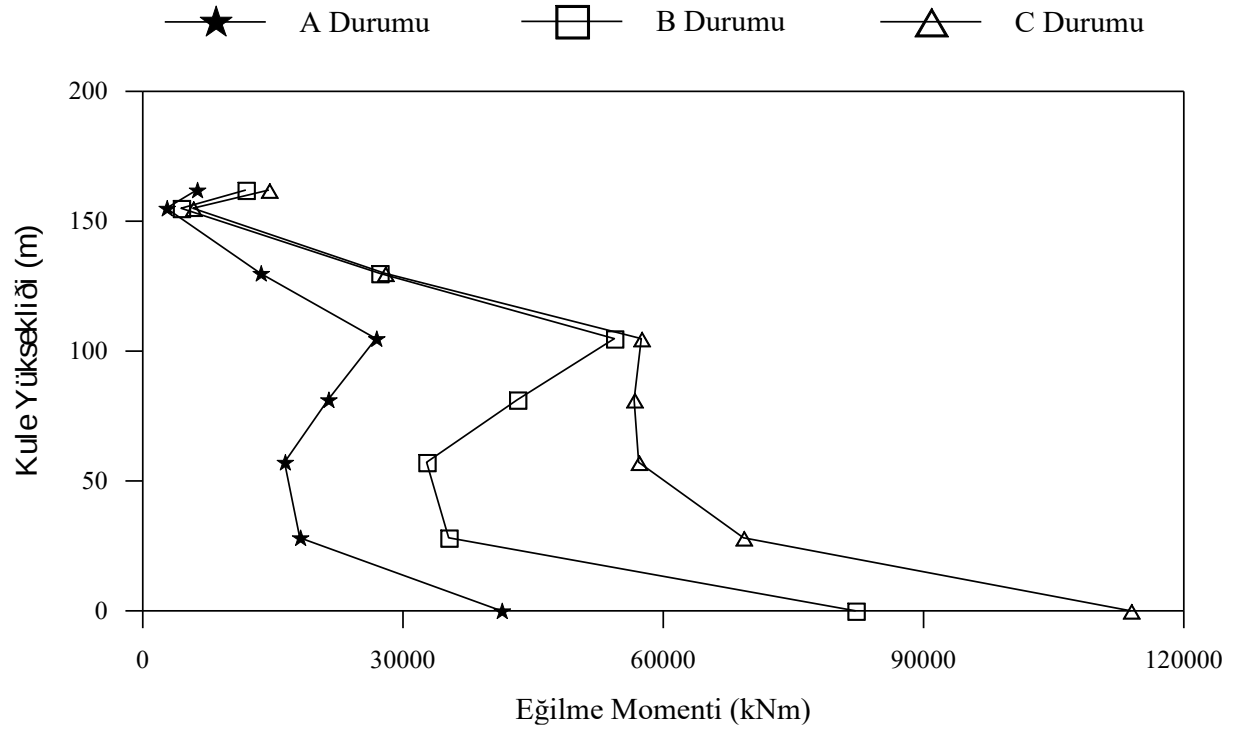
Şekil 38. Homojen olmayan zemin için tabliye toplam eğilme momentleri



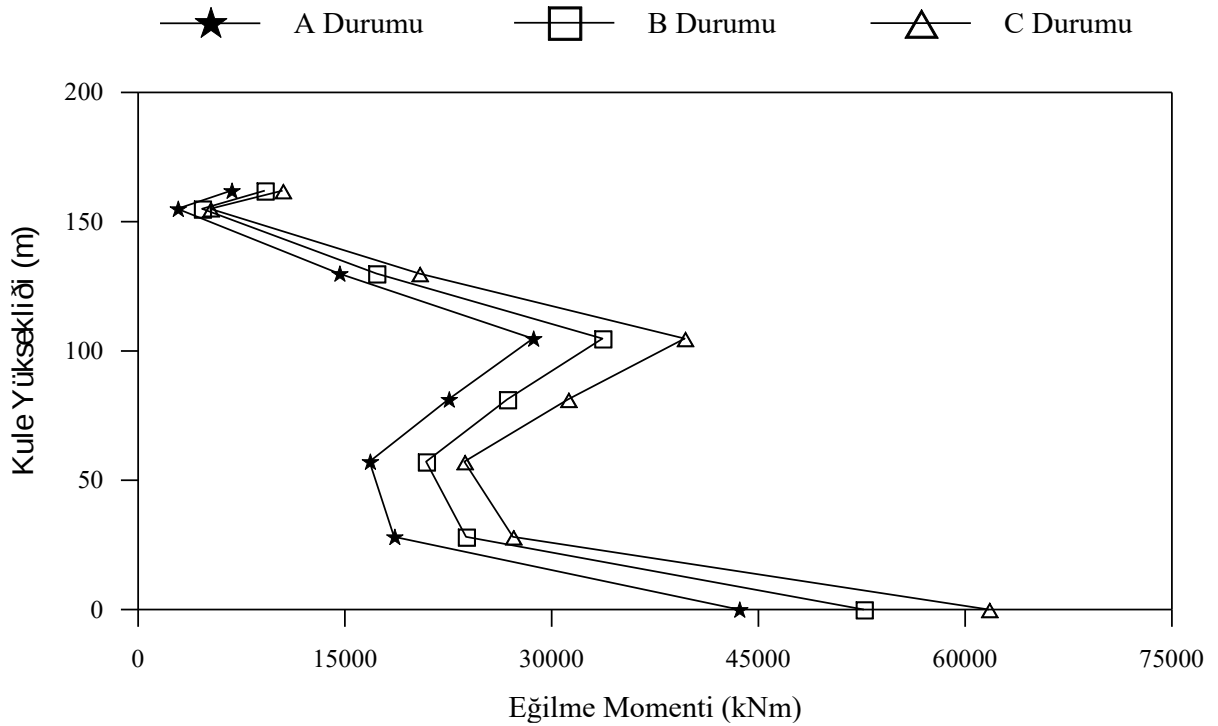
Şekil 39. Homojen olmayan zemin için Avrupa yakası kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 40. Homojen olmayan zemin için Asya yakası kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri

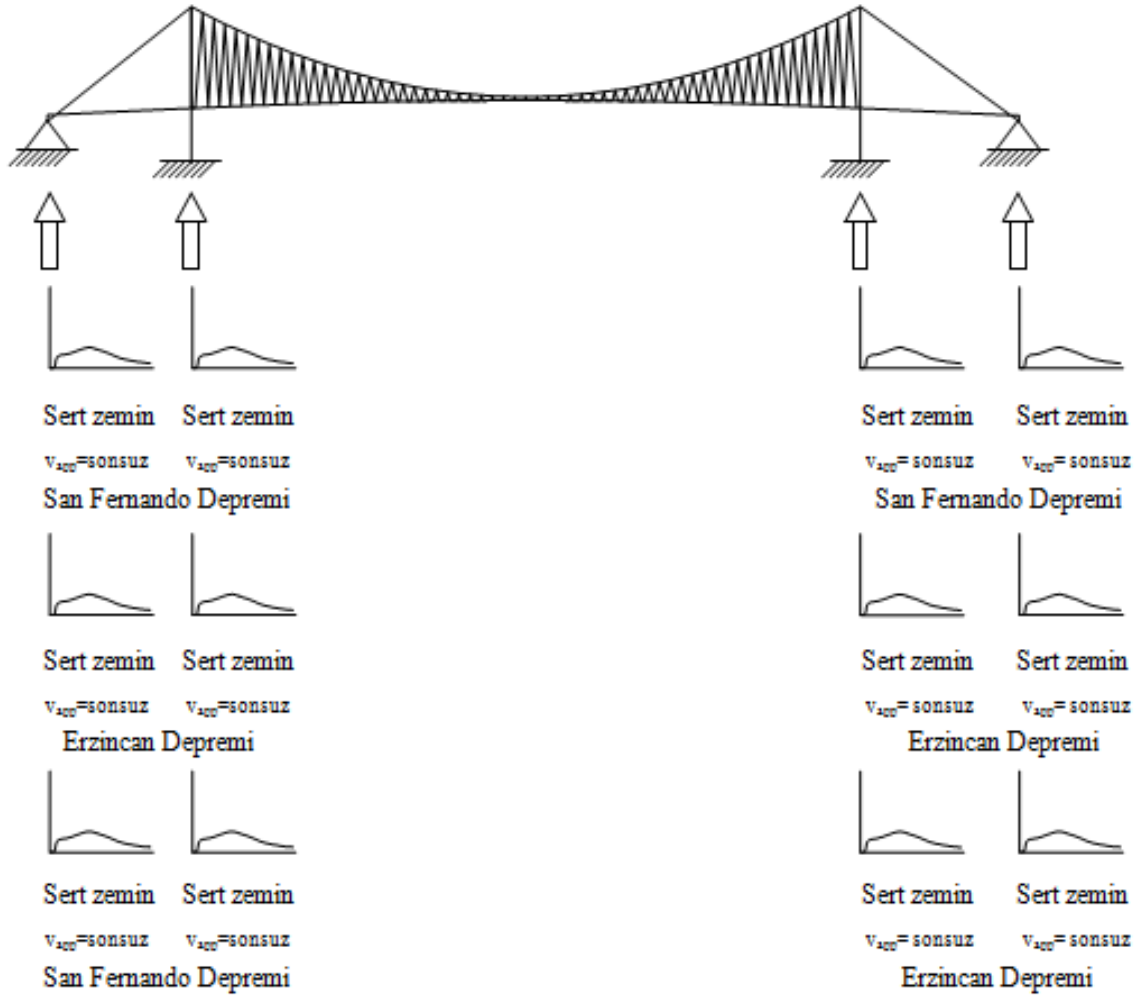


Şekil 41. Homojen olmayan zemin için Avrupa yakası kulesi toplam eğilme momentleri

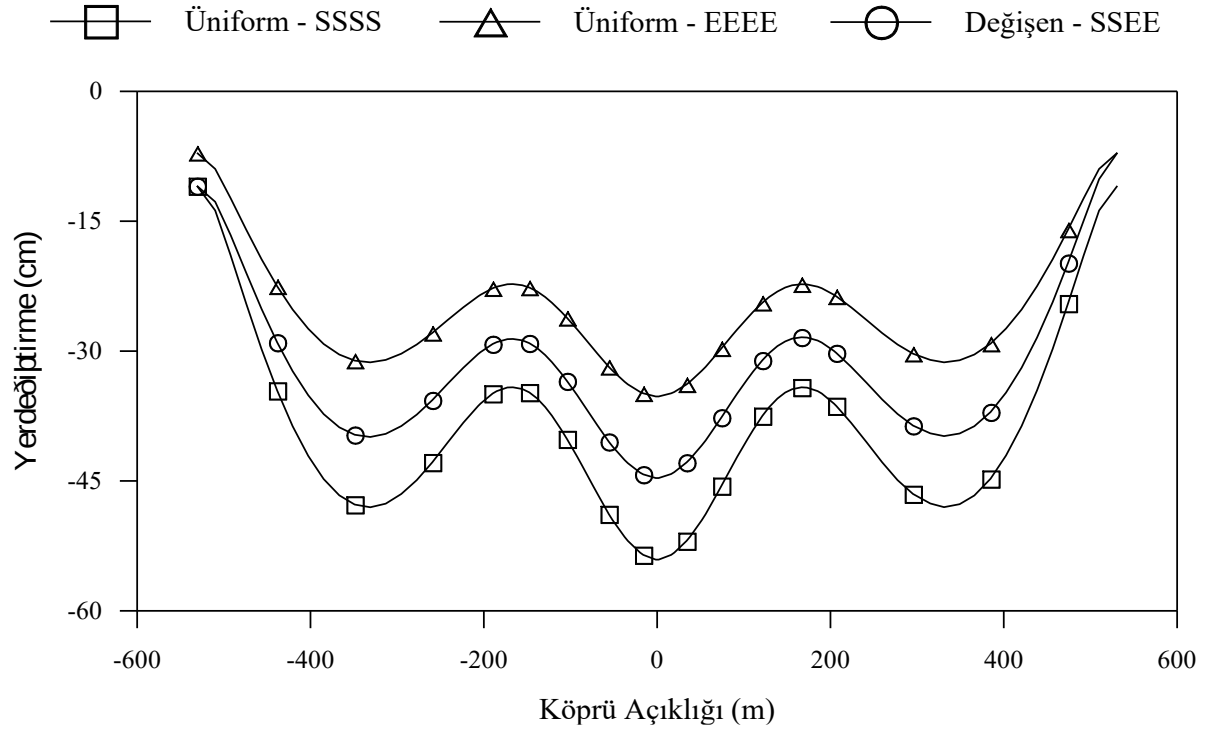


Şekil 42. Homojen olmayan zemin için Asya yakası kulesi toplam eğilme momentleri

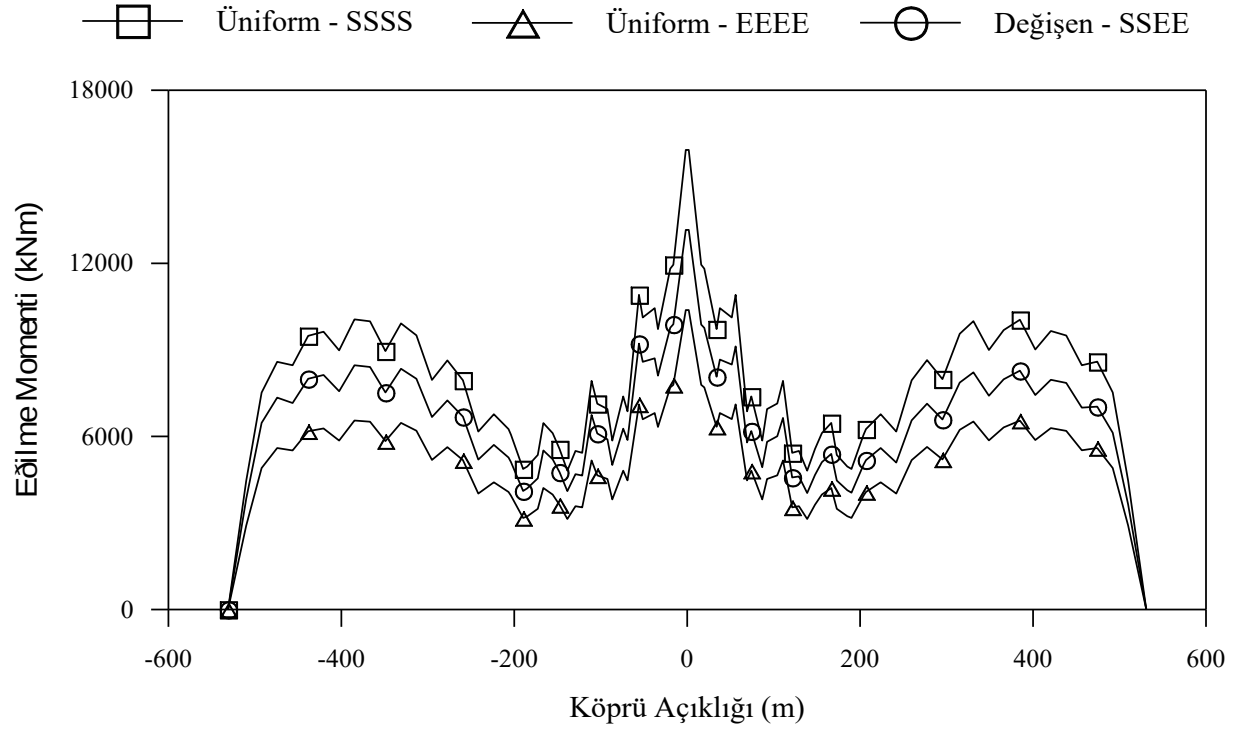
Burada asma köprü mesnetlerinin homojen ve sert zemine oturması durumunda, korelasyon ve dalga yayılma etkileri dikkate alınmadan, üniform ve değişen yer hareketi için stokastik analizler yapılmaktadır. Üniform yer hareketi için San Fernando ve Erzincan depremleri kullanılarak iki ayrı analiz yapılmaktadır. Değişen yer hareketi için Avrupa yakasındaki mesnetlere San Fernando depremi, Asya yakasındaki mesnetlere ise Erzincan depreminin etkidiği kabul edilerek analizler gerçekleştirilmektedir. Şekil 43’de üniform ve değişen yer hareketlerine maruz asma köprü görülmektedir. Analizler sonucunda köprü tabliye ve kulelerinde elde edilen ortalama maksimum toplam yerdeğiştirme ve eğilme momentleri Şekil 44 – Şekil 49’da görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere San Fernando depremi kullanılarak gerçekleştirilen üniform analiz ile bulunan değerler maksimum olurken, Erzincan depremi ile bulunanlar minimum olmaktadır. Değişen yer hareketi durumunda bulunan değerler ise iki üniform yer hareketi durumunda elde edilen değerler arasında kalmaktadır. San Fernando depremi ivme kayıtları Erzincan depremininkinden daha büyük olduğundan yukarıdaki sonuçlar beklenen durumlardır.



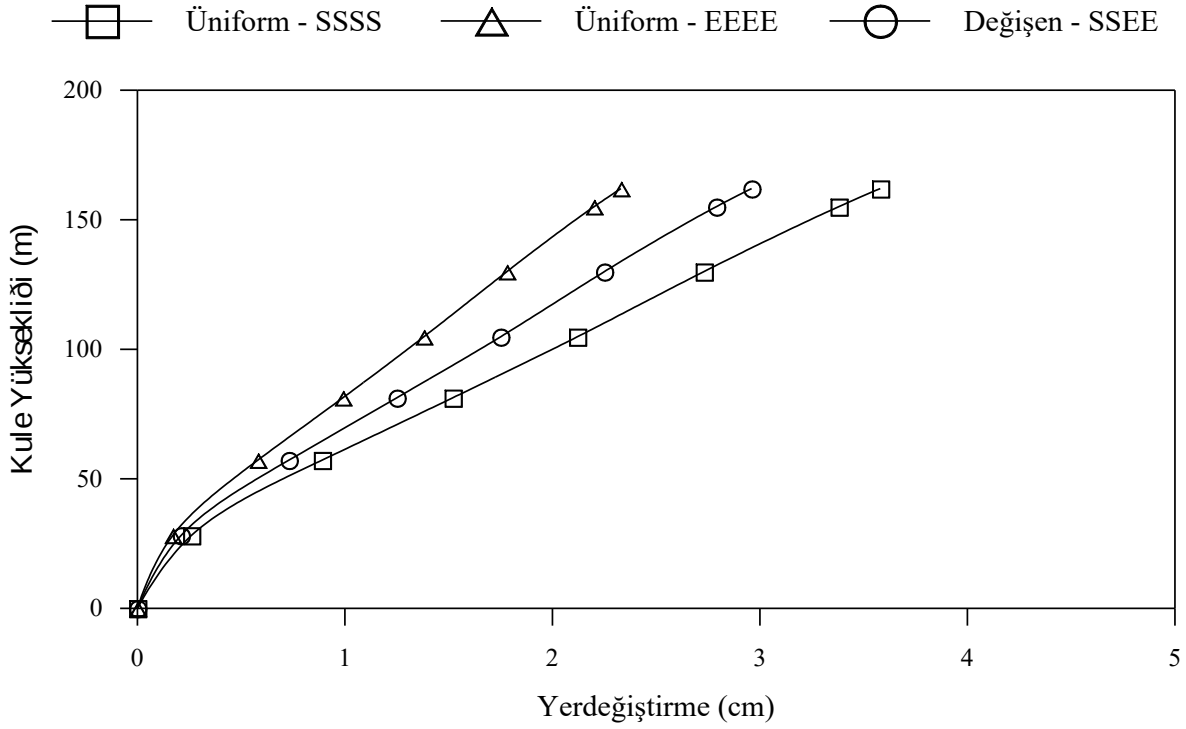
Şekil 43. Üniform ve değişen yer hareketine maruz asma köprü



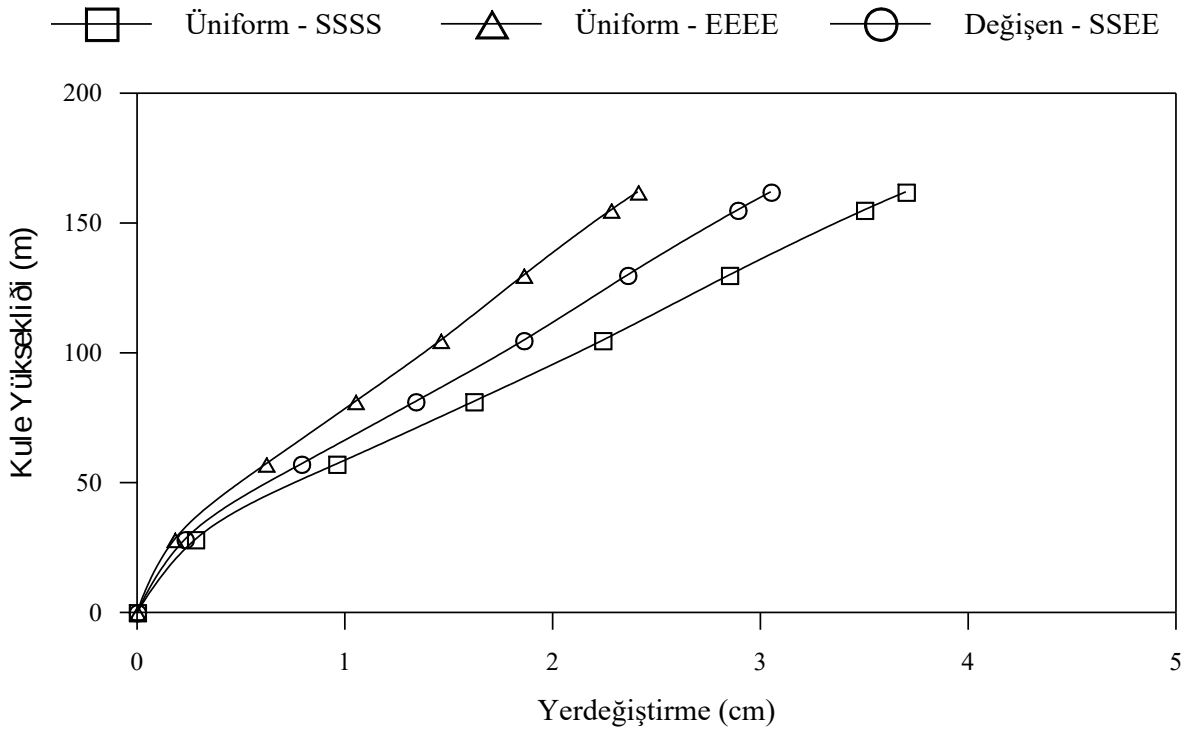
Şekil 44. Üniorm ve deęişen yer hareketi iintabliye toplam dūşey yerdeęiřtirmeleri



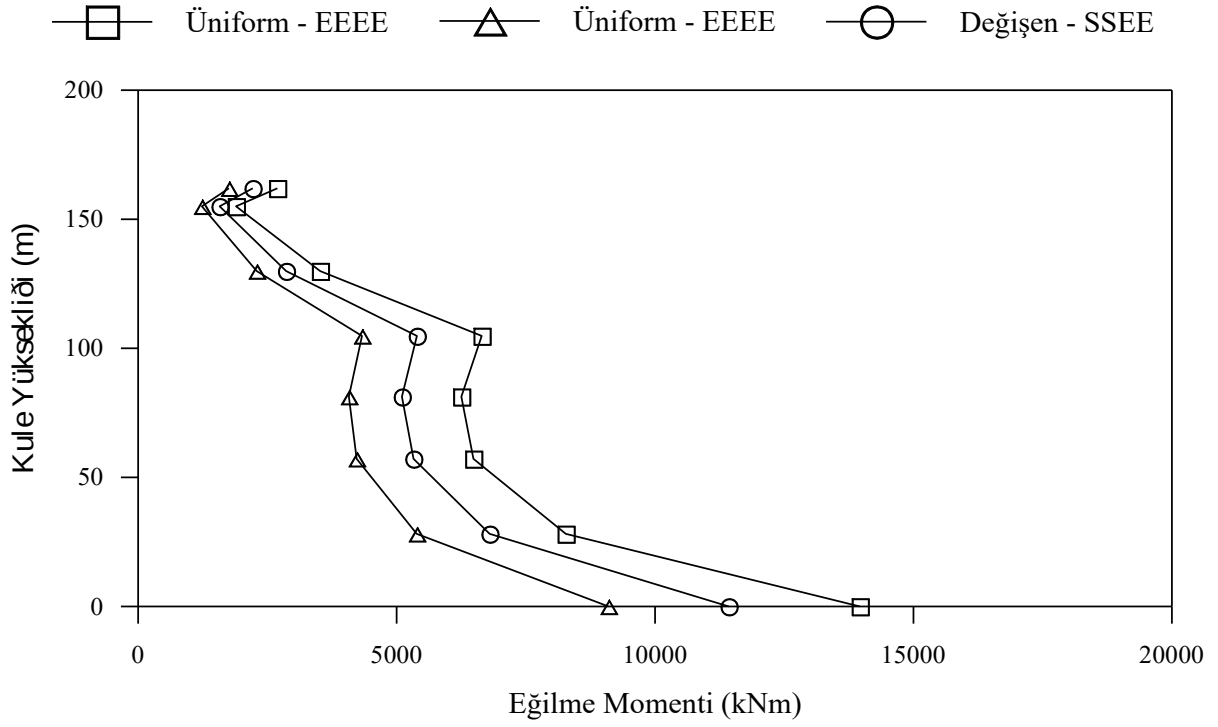
Şekil 45. Üniorm ve değişen yer hareketi için tabliye toplam eğilme momentleri



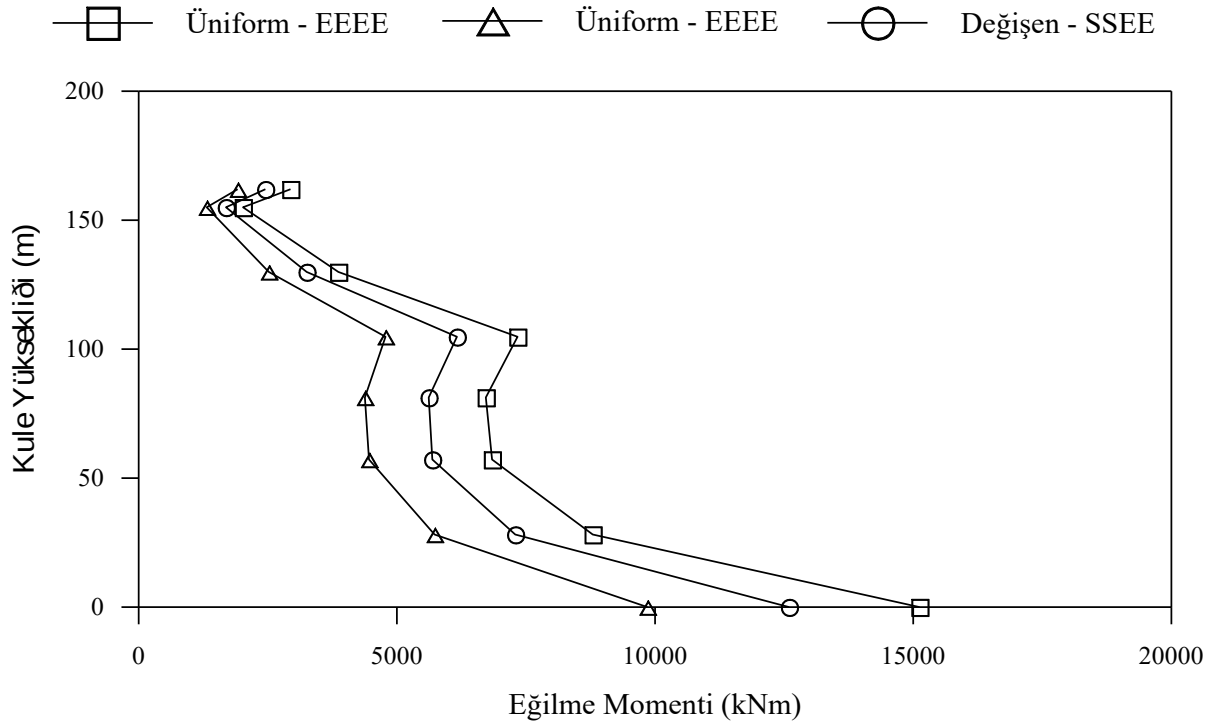
Şekil 46. Üniorm ve değışen yer hareketi için Avrupa yakası kulesi toplam yatay yerdeğıştirmeleri



Şekil 47. Üniorm ve değışen yer hareketi için Asya yakası kulesi toplam yatay yerdeğıştirmeleri

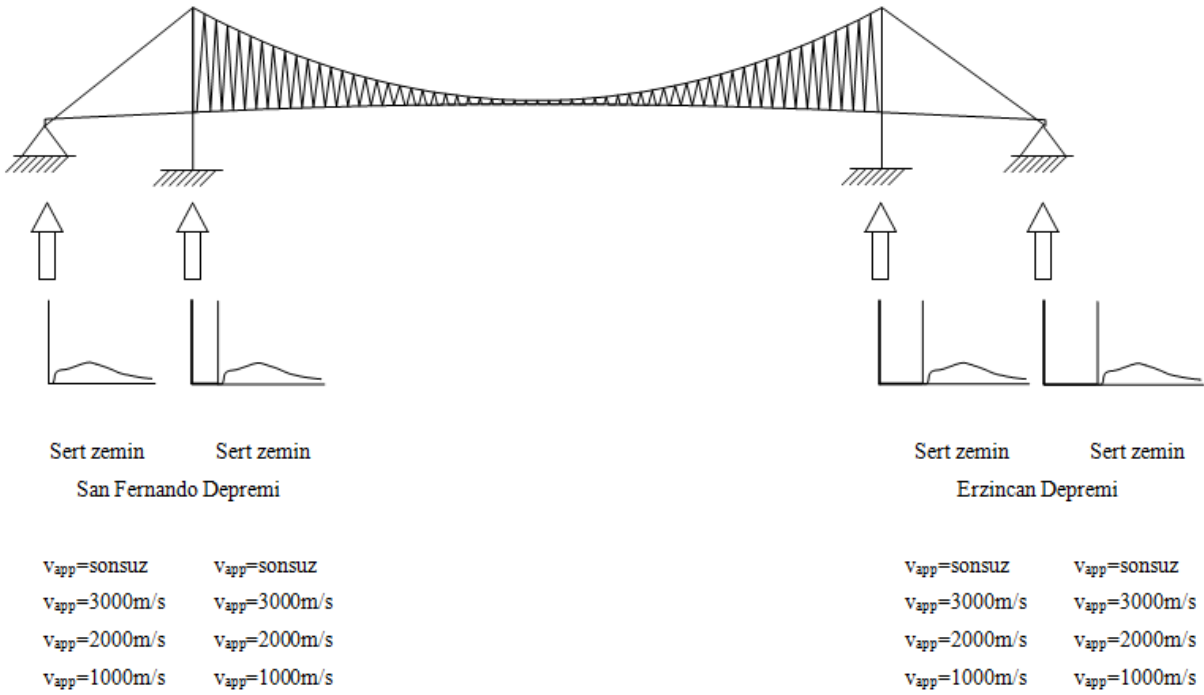


Şekil 48. Üniorm ve değişen yer hareketi ile hesaplanan Avrupa yakası kulesi toplam eğilme momentleri

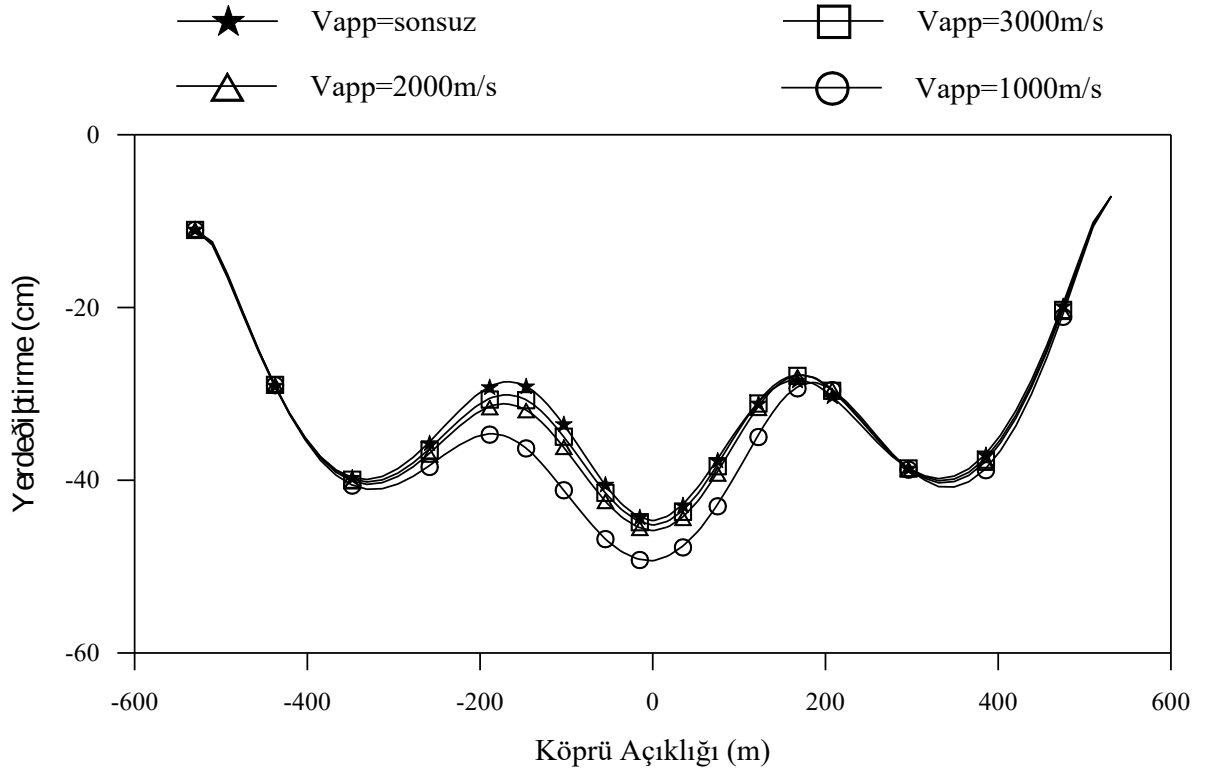


Şekil 49. Üniorm ve değişen yer hareketi için Asya yakası kulesi toplam eğilme momentleri

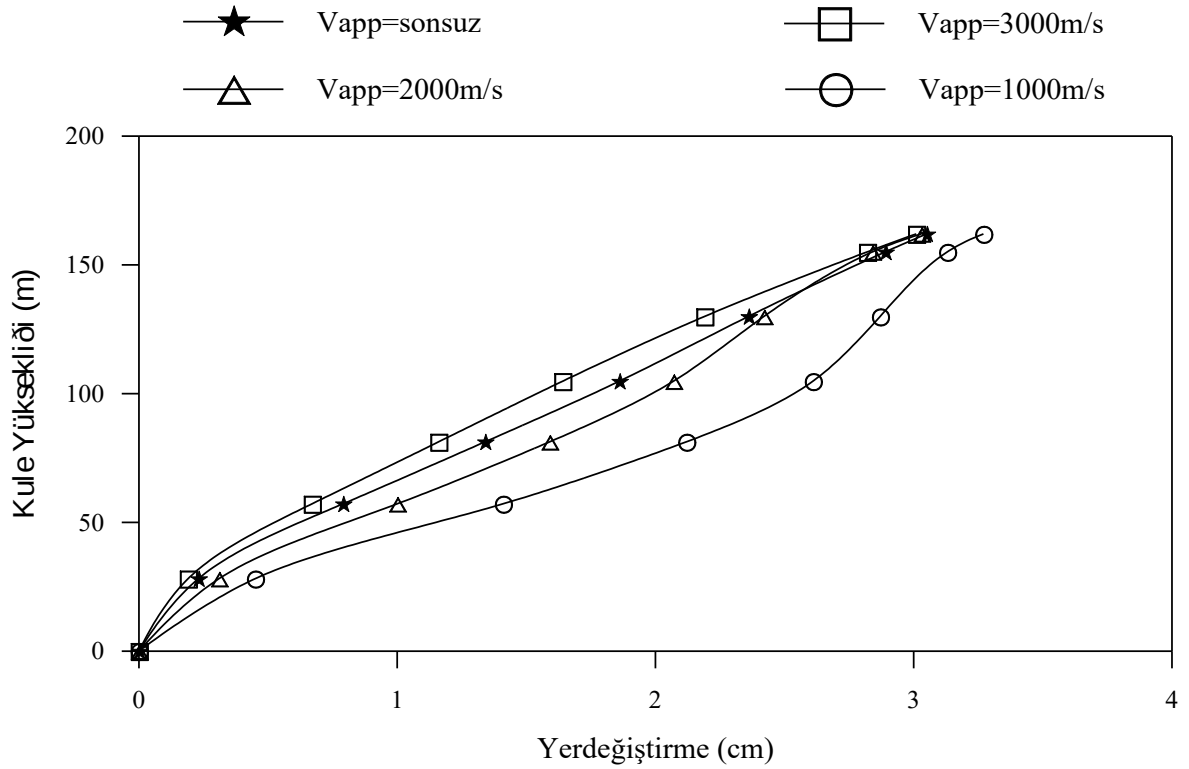
Bu bölümde asma köprü mesnetlerinin homojen ve sert zemine oturması durumunda korelasyon etkisi dikkate alınmadan, yer hareketi dalga yayılma hızı 1000, 2000, 3000m/s ve sonsuz seçilerek değişen yer hareketi için analizler gerçekleştirilmektedir. Şekil 50’de değişerek yayılan yer hareketine maruz asma köprü görülmektedir. Yer hareketi olarak Avrupa yakasındaki mesnetlere San Fernando depremi, Asya yakasındaki mesnetlere ise Erzincan depremi etki ettirilmektedir. Analizler sonucunda tabliye ve kulelerde hesaplanan toplam yerdeğiştirmeler ve toplam eğilme momentleri Şekil 51 – Şekil 54’de görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere yer hareketinin sonsuz hız ile yayıldığı kabul edilerek yapılan analizler ile bulunan değerler genellikle en küçük olmaktadır. Sonlu hızlar için yapılan analizlerde ise dalga yayılma hızı azaldıkça hesaplanan değerler artmaktadır.



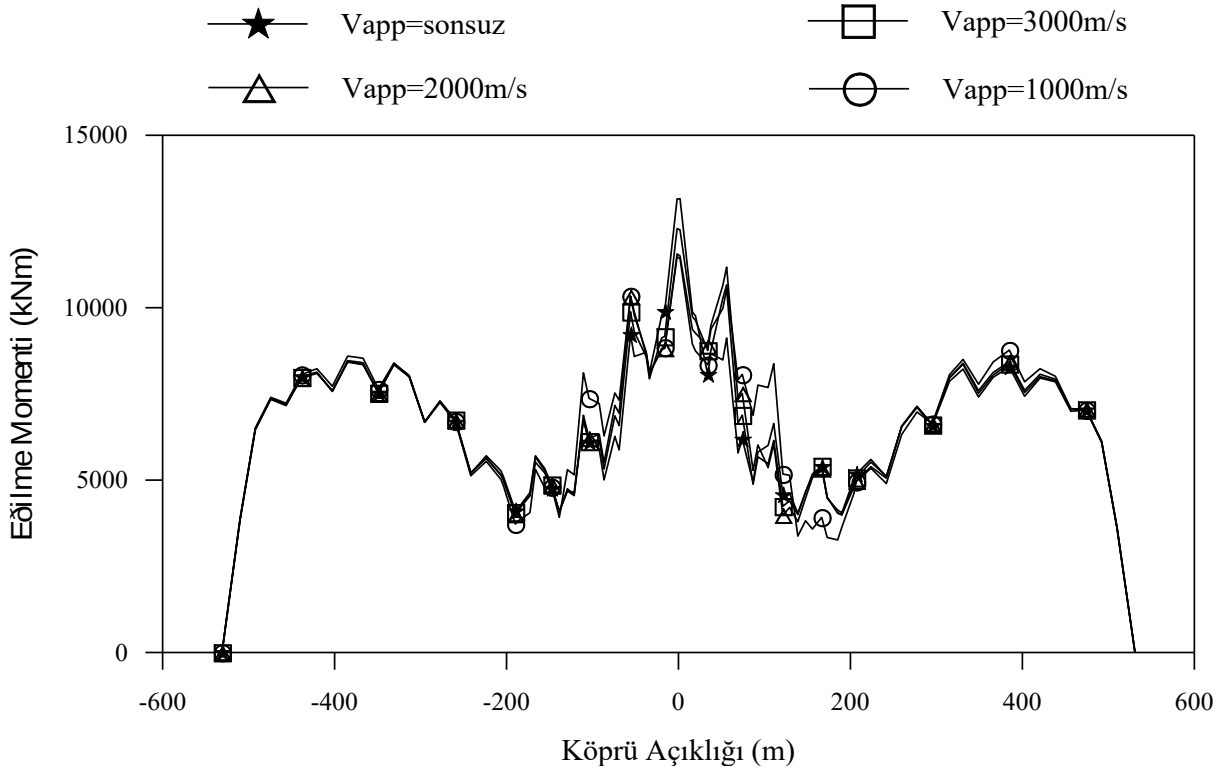
Şekil 50. Değişerek yayılan yer hareketine maruz asma köprü



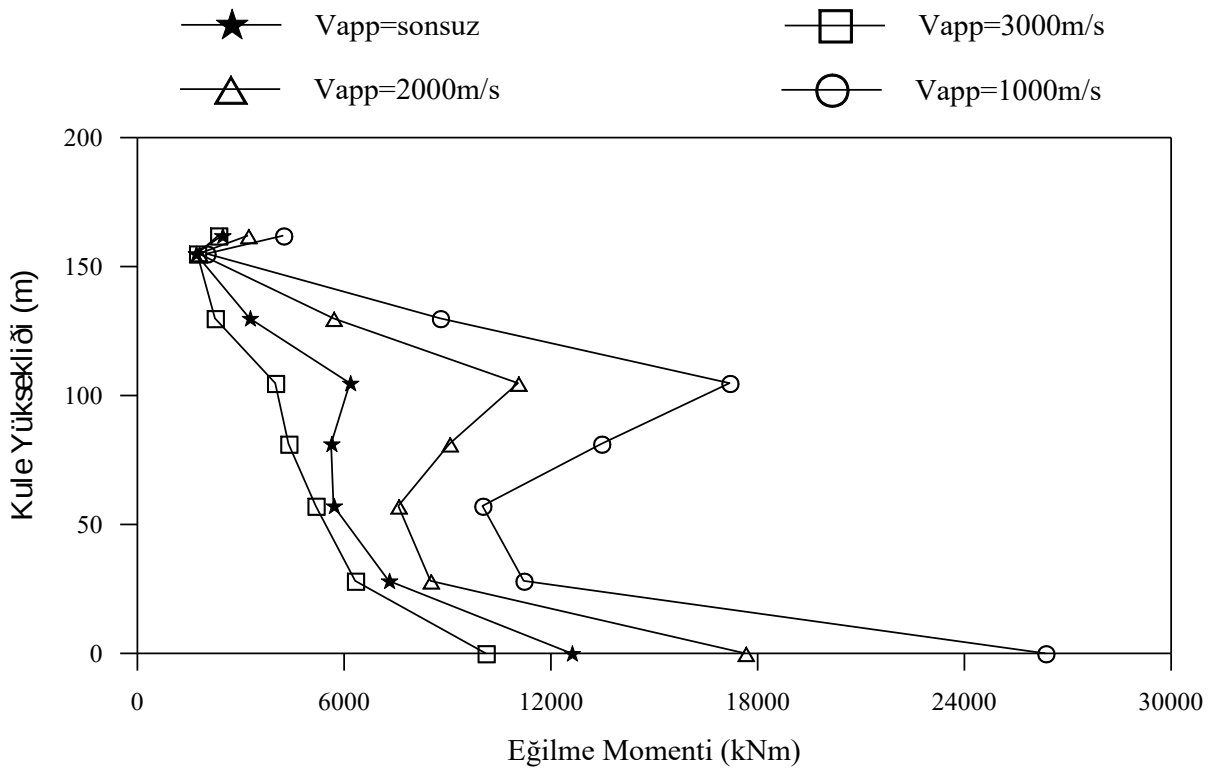
Şekil 51. Değişerek yayılan yer hareketi için tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri



Şekil 52. Değişerek yayılan yer hareketi için kule toplam yatay yerdeğiştirmeleri

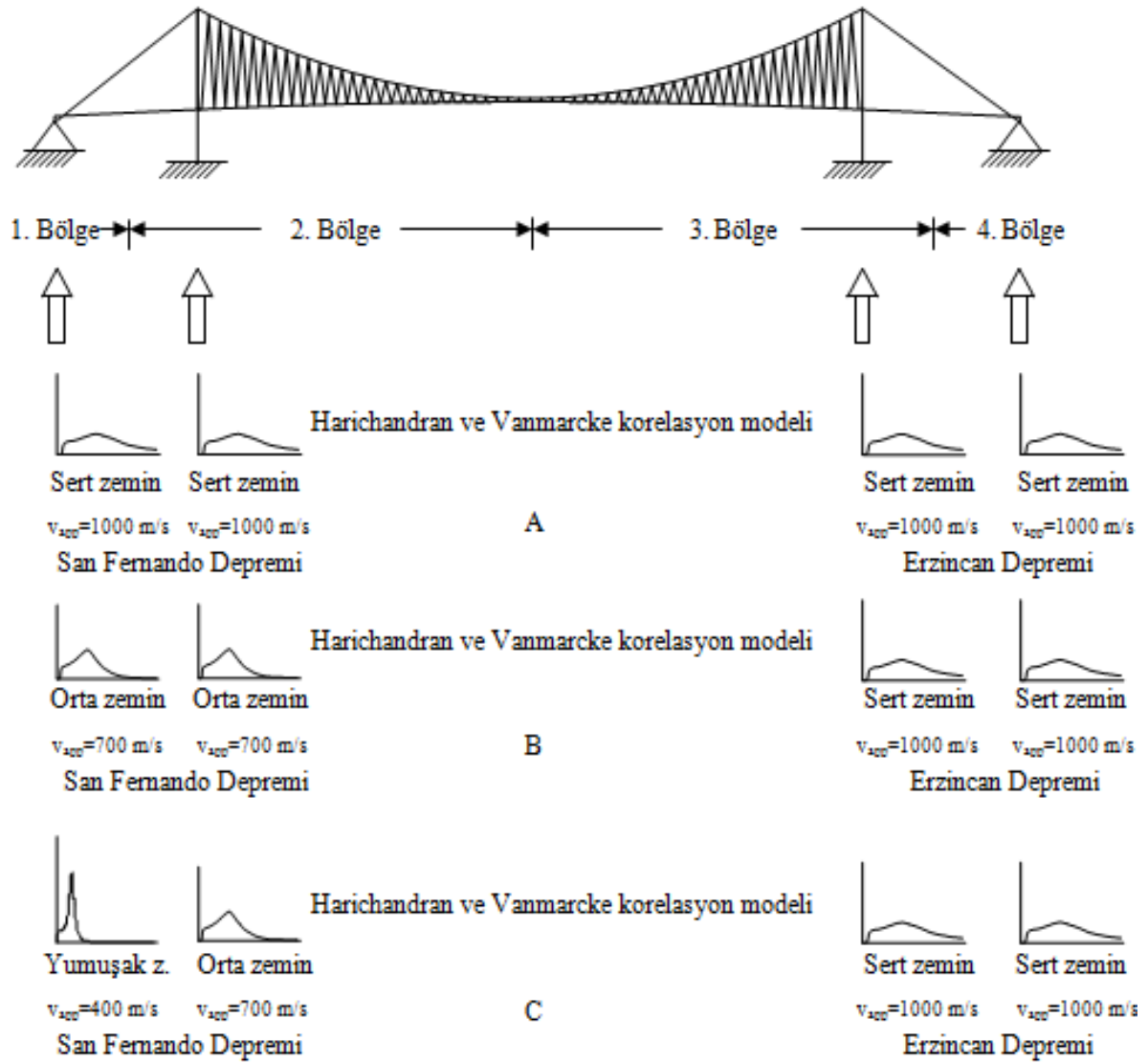


Şekil 53. Değişerek yayılan yer hareketi için tabliye toplam eğilme momentleri

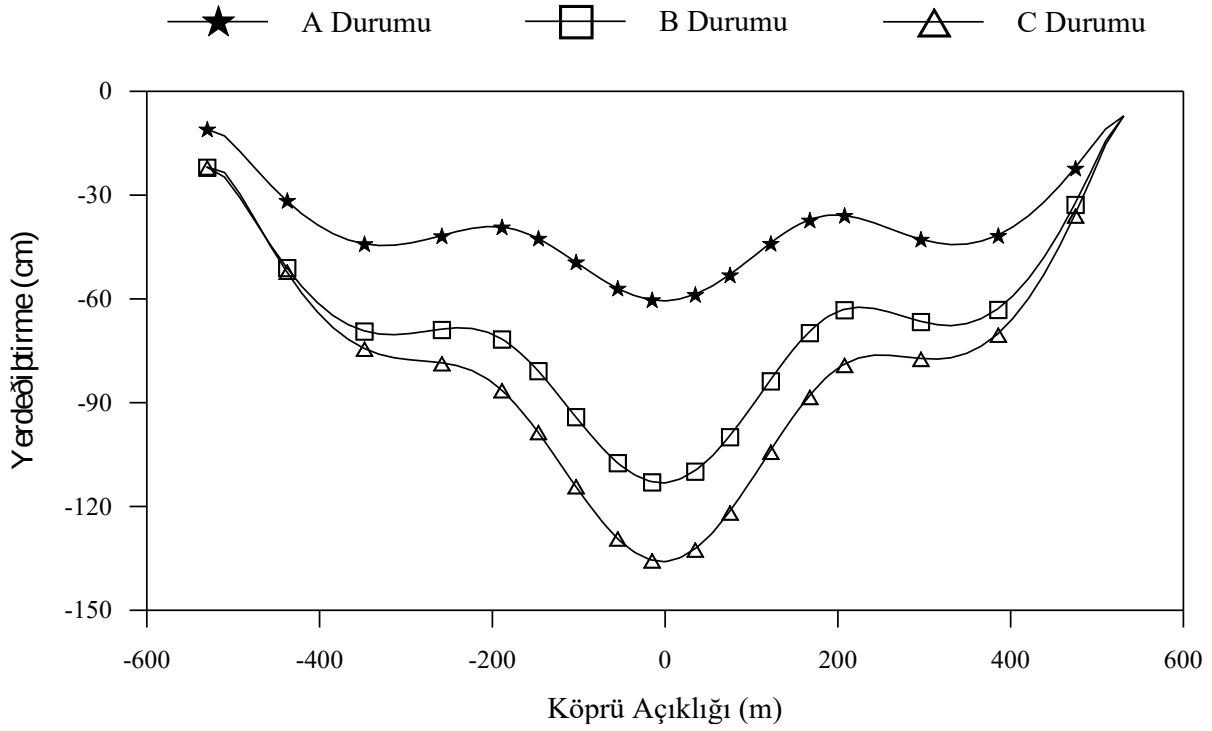


Şekil 54. Değişerek yayılan yer hareketi için kule toplam eğilme momentleri

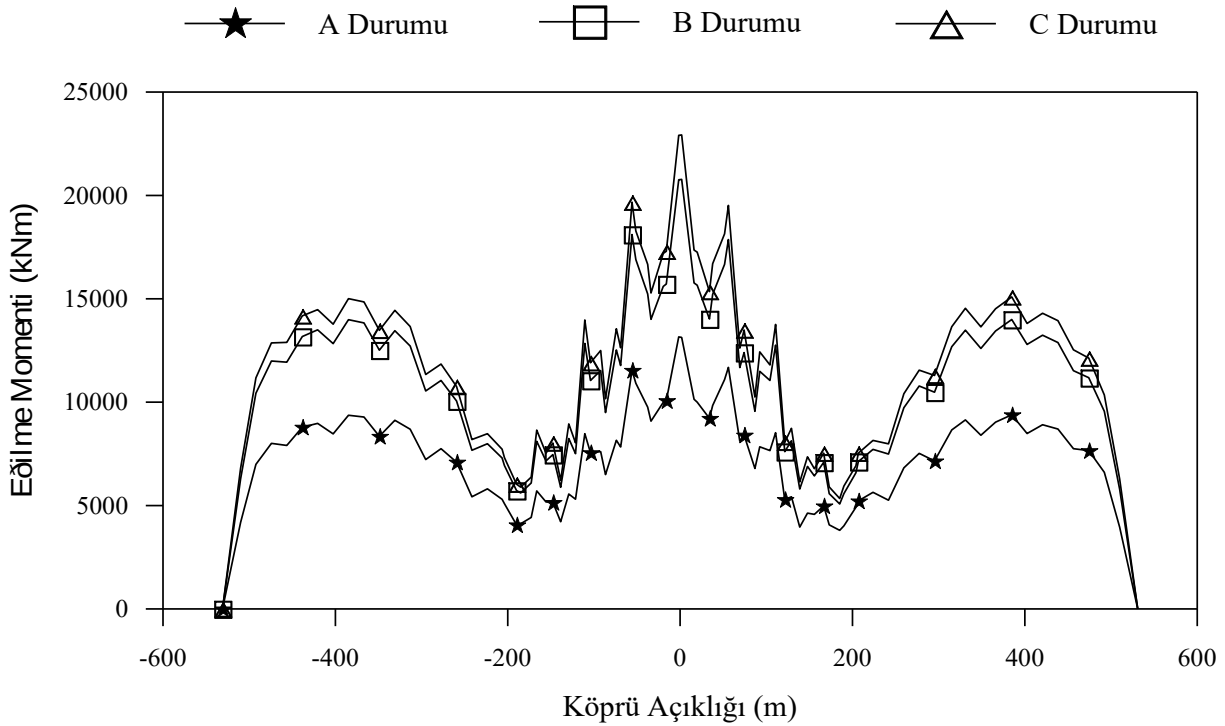
Bu bölümde, dört bölgeden oluşan köprünün mesnetlendiği zemindeki farklı üç zemin dağılışı olan A, B ve C durumları olarak dikkate alınarak stokastik analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 55’de homojen ve homojen olmayan zemin ortamında değişen yer hareketine maruz asma köprü görülmektedir. Analizler sonucunda köprü tabliye ve kulelerinde elde edilen toplam yerdeğiştirmeler ve toplam eğilme momentleri Şekil 56 – Şekil 61’de görülmektedir. Şekillerden görüleceği gibi A durumunda bulunan değerler en küçük olurken, C durumundaki değerler en büyük olmaktadır. Yani sert zeminden yumuşak zemine doğru geçildikçe hesaplanan değerler de büyümektedir.



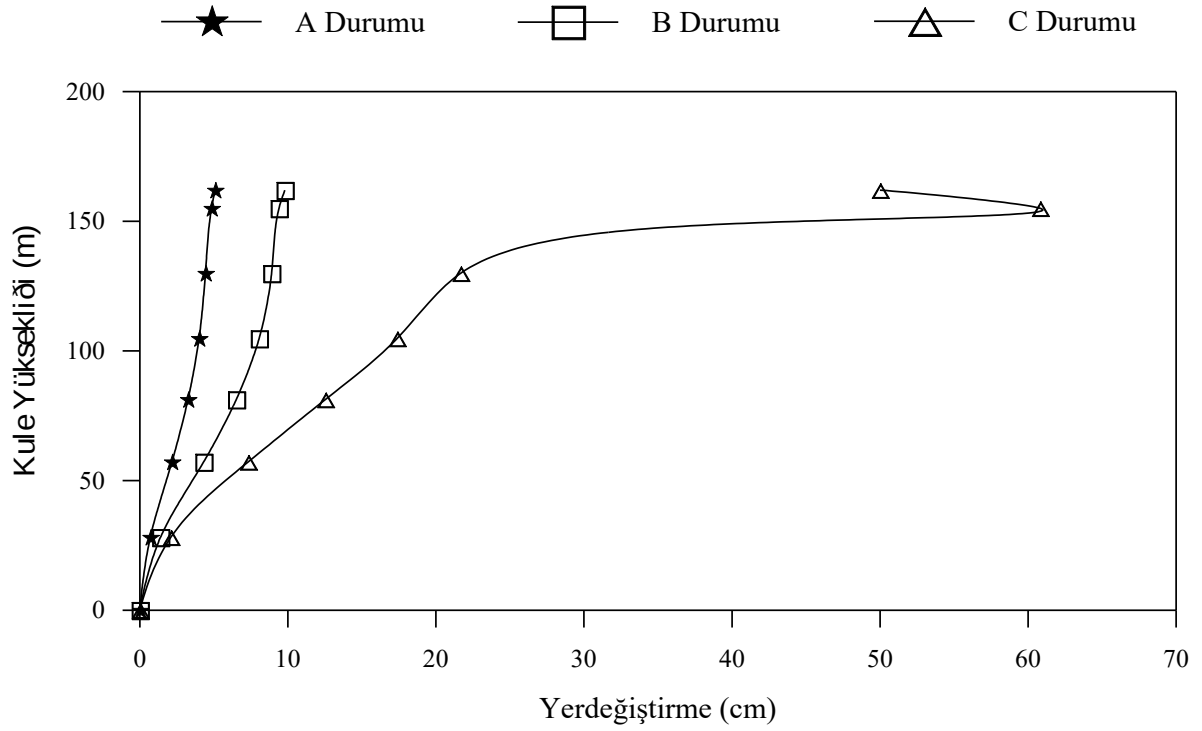
Şekil 55. Homojen ve homojen olmayan zemin ortamında değişen yer hareketine maruz asma köprü



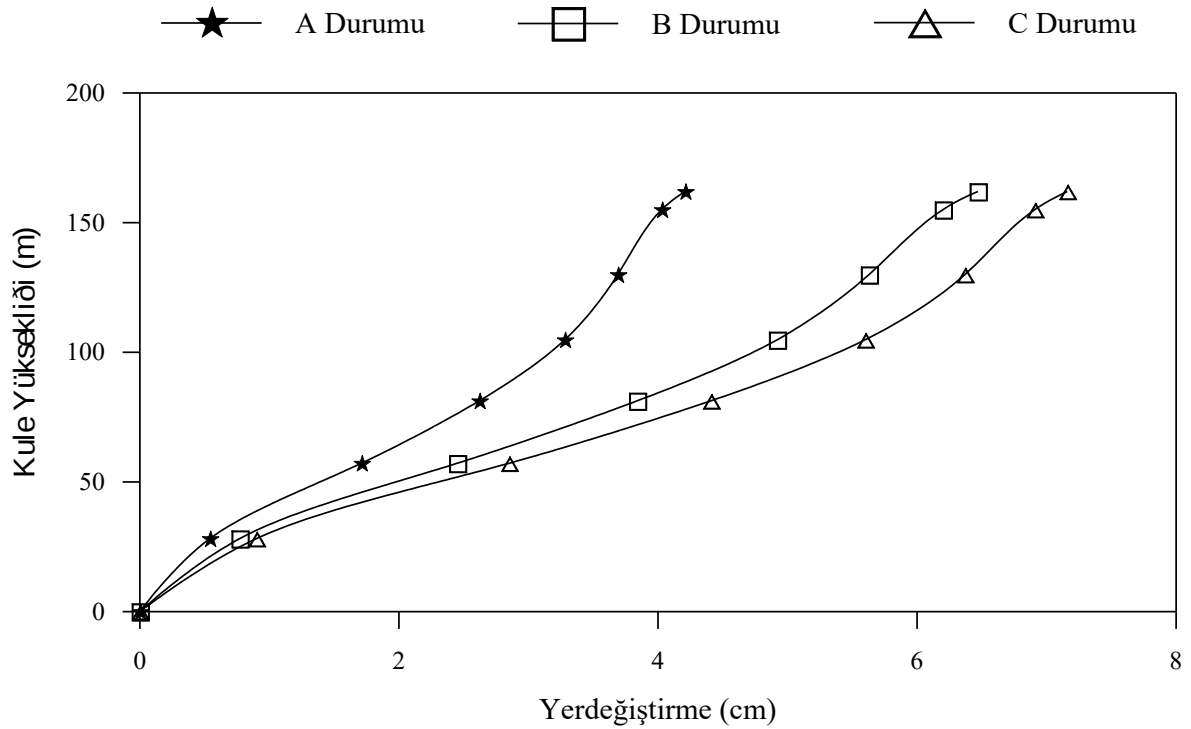
Şekil 56. Homojen olmayan zemin ve değişen yer hareketi için tabliye toplam düşey yerdeğiştirmeleri



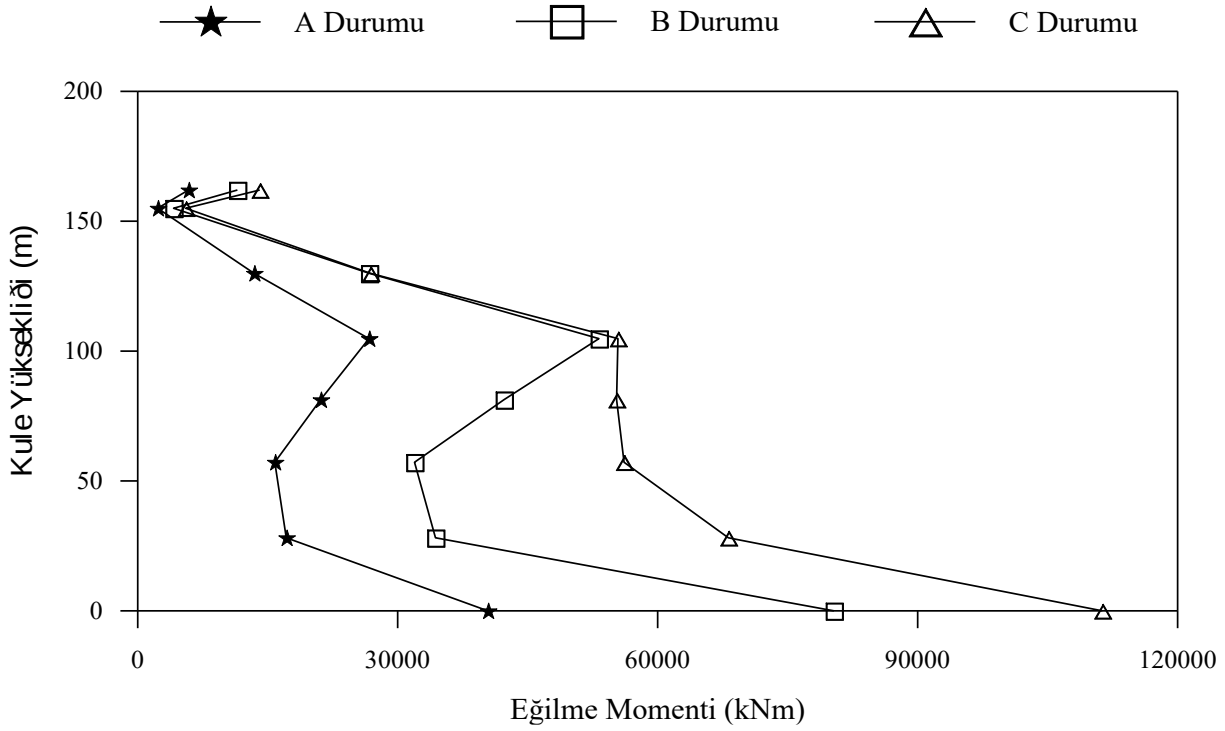
Şekil 57. Homojen olmayan zemin ve değişen yer hareketi için tabliye toplam eğilme momentleri



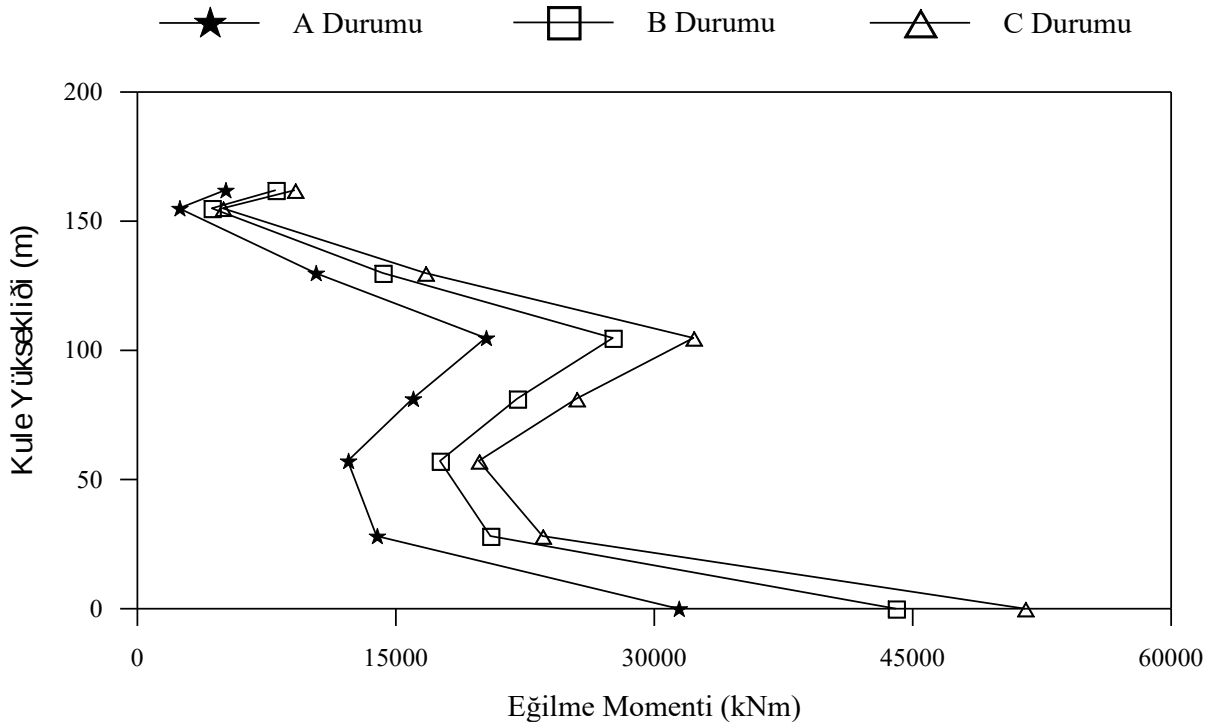
Şekil 58. Homojen olmayan zemin ve değişen yer hareketi için Avrupa yakası kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 59. Homojen olmayan zemin ve değişen yer hareketi için Asya yakası kulesi toplam yatay yerdeğiştirmeleri



Şekil 60. Homojen olmayan zemin ve değişen yer hareketi için Avrupa yakası kulesi toplam eğilme momentleri



Şekil 61. Homojen olmayan zemin ve değişen yer hareketi için Asya yakası kulesi toplam eğilme momentleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada mesnetlerinden farklı dinamik etkilere maruz asma köprülerin geometrik olarak lineer olmayan deterministik ve stokastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Deterministik analizde deprem kayıtları olduğu gibi kullanılırken, stokastik analizde ise yer hareketi olarak filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılmıştır. Deterministik analizlerde yer hareketinin değişimi, dalga yayılma etkisi ve köprü mesnetlerine farklı yer hareketlerinin etkidiği kabul edilerek dikkate alınırken; stokastik analizlerde ise korelasyon etkisi, dalga yayılma etkisi, zemin şartlarındaki değişim ve köprü mesnetlerine farklı yer hareketlerinin etkidiği kabulü ile dikkate alınmıştır.

Stokastik analizlerde kullanılan ve Clough ve Penzien tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek bir yer hareketi ile karşılaştırılmasından, geliştirilen yer hareket modelinin gerçek yer hareketini oldukça iyi karakterize ettiği görülmüştür.

Deprem dalgası yayılma etkisi dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda köprü tabliye ve kulelerinde elde edilen yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri üniform yer hareketi için bulunan değerlerden daha büyük olmuştur. Ayrıca deprem dalgası yayılma hızı azaldıkça elde edilen değerler artmıştır.

Üniform ve değişen yer hareketi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda; ivme kayıtları büyük olan deprem kaydından oluşan üniform yer hareketi ile gerçekleştirilen analiz ile köprü tabliye ve kulelerinde bulunan yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri en büyük olurken, ivme kayıtları küçük olan deprem kaydı için elde edilen değerler en küçük olmaktadır. Değişen yer hareketi durumunda hesaplanan değerler ise genellikle iki üniform yer hareketi durumunda elde edilen değerler arasında kalmaktadır.

Değişerek yayılan yer hareketi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda, köprü tabliye ve kulelerinde elde edilen yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri sadece yer hareketi dalga yayılma etkisi dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda bulunan değerlere benzer olmakla beraber onlardan daha küçüktür.

Asma köprünün mesnetlendiği zeminin homojen olmaması durumunda gerçekleştirilen stokastik analizlerde zemin şartlarındaki farklılığın artması ile, yani sert zemin ortamından yumuşak zemin ortamına doğru gidildikçe elde edilen tepki değerleri artmaktadır. Bütün mesnetlerin homojen ve sert zemine oturması durumunda hesaplanan değerler en küçük olmaktadır.

Deterministik ve stokastik analizler sonucunda elde edilen dağılımlar benzer olmakla beraber, stokastik analiz ile bulunan değerler deterministik analiz ile bulunan değerlerden daha küçüktür. Çünkü, stokastik analizde ortalama maksimum değerler davranışın bütün maksimum değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmektedir.

Sonuç olarak, yer tabakasının karmaşık yapısından dolayı, yer hareketlerinin farklı noktadaki değişiminden doğan etkilerin asma köprüler gibi uzun açıklıklı sistemlerin deterministik ve stokastik analizlerinde dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A.M. Abdel-Ghaffar, L.I. Rubin, Nonlinear free vibrations of suspension bridges: Theory, *Journal of Engineering Mechanics*, 109 (1983) 313-329.
- [2] A.M. Abdel-Ghaffar, L.I. Rubin, Nonlinear free vibrations of suspension bridges: Application, *Journal of Engineering Mechanics*, 109 (1983) 330-345.
- [3] J.M.W. Brownjohn, Observations on non-linear dynamic characteristics of suspension bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(1994) 1351-1367.
- [4] S. Adanur, *Asma köprülerin geometrik olarak lineer olmayan ve elastik zemin analogisi ile dinamik analizi*, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
- [5] K. Imai, *Reliability analysis of geometrically nonlinear structures with application to suspension bridges*, Doktora Tezi, University of Colorado, 1999.
- [6] S. Adanur, A.C. Altunışık, A. Bayraktar, M. Akköse, Comparison of near fault and far fault ground motion effects on geometrically nonlinear earthquake behavior of suspension bridges, *Natural Hazards*, 64 (2012) 593-614.
- [7] M. Günaydın, S. Adanur, A.C. Altunışık, B. Sevim, Construction stage analysis of Fatih Sultan Mehmet suspension bridge, *Structural Engineering and Mechanics*, 42 (2012) 489-505.
- [8] S. Adanur, M. Günaydın, A.C. Altunışık, B. Sevim, Construction Stage Analysis of Humber Suspension Bridge, *Applied Mathematical Modelling*, 36 (2012) 5492-5505.
- [9] M. Günaydın, S. Adanur, A.C. Altunışık, B. Sevim, E. Türker, Determination of structural behavior of Bosphorus Suspension Bridge considering construction stages and different soil conditions, *Steel and Composite Structures*, 17 (2014) 405-429.
- [10] A.M. Abdel-Ghaffar, L.I. Rubin, Suspension bridge response to multiple-support excitations, *Journal of Engineering Mechanics*, 108 (1982) 419-435.
- [11] A.M. Abdel-Ghaffar, L.I. Rubin, Vertical seismic behaviour of suspension bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11 (1983) 1-19.
- [12] A.M. Abdel-Ghaffar, L.I. Rubin, Lateral earthquake response of suspension bridges, *Journal of Structural Engineering*, 109 (1983), 664-675.
- [13] A.M. Abdel-Ghaffar, R.G. Stringfellow, Response of suspension bridges to travelling earthquake excitations, Part 1: Vertical response, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3 (1984), 62-71.
- [14] A.M. Abdel-Ghaffar, R.G. Stringfellow, Response of suspension bridges to travelling earthquake excitations, Part 2: Lateral response, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3 (1984), 72-81.
- [15] A.A. Dumanoğlu, R.T. Severn, Dynamic response of dams and other structures to differential ground motions, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2, 77 (1984) 333-352.
- [16] A.A. Dumanoğlu, R.T. Severn, Seismic response of modern suspension bridges to asynchronous vertical ground motion, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2, 83 (1987) 701-730.
- [17] A.A. Dumanoğlu, R.T. Severn, Seismic response of modern suspension bridges to asynchronous longitudinal and lateral ground motion, *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2, 87 (1989) 73-86.
- [18] S. Adanur, *Mesnetlerinden farklı dinamik etkilere maruz asma köprülerin geometrik olarak lineer olmayan deterministik ve stokastik analizi*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.

- [19] A.A. Dumanoğlu, R.T. Severn, Stochastic response of suspension bridges to earthquake forces, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19 (1990) 133-152.
- [20] C.H. Hyun, C.B. Yun, D.G. Lee, Nonstationary response analysis of suspension bridges for multiple support excitations, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 7 (1992) 27-35.
- [21] A.R. Hawwari, *Suspension bridge response to spatially varying ground motion*, Doktora Tezi, Michigan State University, Michigan, 1992.
- [22] Rassem, M., *Seismic site response of alluvial valleys and effects on a suspension bridge*, Doktora Tezi, McMaster University, 1992.
- [23] Y. Nakamura, A. Der Kiureghian, D. Liu, *Multiple-Support Response Spectrum Analysis of the Golden Gate Bridge*, Report No. UCB/EERC-93/05, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1993.
- [24] M. Rassem, A. Ghobarah, A.C. Heidebrecht, Site effects on the seismic response of a suspension bridge, *Engineering Structures*, 18 (1996) 363-370.
- [25] R.S. Harichandran, A. Hawwari, B.N. Sweiden, *Response of long-span bridges to spatially varying ground motion*, Journal of Structural Engineering, 122 (1996) 476-484.
- [26] S. Adanur, A.A. Dumanoglu, K. Soyluk, Stochastic analyses of suspension bridges: Stationary and Transient, *Fifth International Conference on Structural Dynamics, EURODYN2002*, Munich, Germany, 2-5 September 2002: s. 1035-1040.
- [27] S. Adanur, A.A. Dumanoglu, Stochastic dynamic analyses of suspension bridges subjected to asynchronous ground motions, *Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE2002*, İstanbul, Turkey, 25-27 September 2002: s. 597-606.
- [28] S. Adanur, A.A. Dumanoglu, M. Akkose, Stochastic response of suspension bridges for different soils, *International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Lefkoşa, Northern Cyprus, 29-31 May 2003, s: 279-284.
- [29] S. Adanur, A.A. Dumanoglu, K. Soyluk, Stochastic analysis of suspension bridges for different correlation functions, *Ninth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing*, Egmond-aan-Zee, The Netherlands, 2-4 September 2003, Paper 86, Extended Abstracts s: 207-208.
- [30] S. Adanur, A.A. Dumanoglu, K. Soyluk, The effect of wave velocities on the stochastic response of suspension bridges considering the local soil conditions, *Sixth International Conference on Advances in Civil Engineering, ACE2004*, İstanbul, Turkey, 6-8 October 2004, s: 79-88.
- [31] S. Adanur, K. Soyluk, A.A. Dumanoglu, A. Bayraktar, Comparison of the spectral and response spectrum analyses of suspension bridges, *The International Conference on Bridge Management Systems - Monitoring, Assessment and Rehabilitation*, Cairo, Egypt, 21-23 March 2006, Paper BMS00905, Abstracts (30).
- [32] S. Adanur, K. Soyluk, A. Bayraktar, A.A. Dumanoglu, Stochastic seismic response of the Bosphorus Suspension Bridge to spatially varying ground motions, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 1st ECEES*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper Number: 300.
- [33] S. Adanur, K. Soyluk, A. Bayraktar, A.A. Dumanoglu, Stochastic seismic response of suspension bridges under various earthquake ground motions, *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE2006*, Istanbul, Turkey, 11-13 October 2006, Paper Number: ACE06-092, Abstracts (160).
- [34] S. Adanur, A.S. Mosallam, K. Soyluk, A. Bayraktar, Seismic response of composite suspension bridges to spatially varying ground motions, *International Symposium on*

- Advances in Earthquake & Structural Engineering, AESE2007*, Antalya, Turkey, Paper no: AESE 045, 24-26 October 2007, s: 305-314.
- [35] S. Adanur, A.S. Mosallam, M. Akköse, A. Bayraktar, Stochastic analysis of a CFRP composite suspension bridge, *5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5)*, ASCE, Irvine, CA, USA, 27-29 August 2008, s: 841-848.
- [36] L. Sgambi, E. Garavaglia, N. Basso, F. Bontempi, Monte Carlo simulation for seismic analysis of a long span suspension bridge, *Engineering Structures*, 78 (2014) 100-111.
- [37] D. Karmakar, S. Ray-Chaudhuri, M. Shinozuka, Finite element model development, validation and probabilistic seismic performance evaluation of Vincent Thomas suspension bridge, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11 (2015) 223-237.
- [38] H. Wang, J. Li, TY. Tao, CF. Wang, AQ. Li, Influence of apparent wave velocity on seismic performance of a super-long-span triple-tower suspension bridge, *Advances In Mechanical Engineering*, 7 (2015) 1687814015589464.
- [39] Q. Ma, L. Xu, Random attractors for the extensible suspension bridge equation with white noise, *Computers & Mathematics with Applications*, 70 (2015) 2895-2903.
- [40] J. Malik, Spectral analysis connected with suspension bridge systems, *IMA Journal of Applied Mathematics*, 81 (2016) 42-75.
- [41] R.W. Clough, J. Penzien, *Dynamics of Structures*, Second Edition, McGraw Hill, Inc., 1993.
- [42] J.S. Przemieniecki, *Theory of Matrix Structural Analysis*, McGraw-Hill Inc., 1968.
- [43] A. Pugsley, A simple theory of suspension bridges, *Journal of the Institution of Structural Engineers*, 31 (1953) 75-82.
- [44] A. Pugsley, *The Theory of Suspension Bridges*, Second Edition, Edward Arnold Ltd., 1968.
- [45] A. Pugsley, Note on the foundation analogy for the approximate analysis of suspension bridges, *Journal of the Institution of Structural Engineers*, 40 (1962) 268-271.
- [46] E. Heredia-Zavoni, E.H. Vanmarcke, Seismic random-vibration analysis of multisupport-structural systems, *Journal of Engineering Mechanics*, 120 (1994) 1107-1127.
- [47] S.M. Allam, T.K. Datta, Analysis of cable-stayed bridges under multi-component random ground motion by response spectrum method, *Engineering Structures*, 22 (2000) 1367-1377.
- [48] R.S. Harichandran, E.H. Vanmarcke, Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time, *Journal of Engineering Mechanics*, 112 (1986) 154-174.
- [49] A. Zerva, Effect of spatial variability and propagation of seismic ground motions on the response of multiply supported structures, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 6 (1991) 212-221.
- [50] A. Der Kiureghian, P. Keshishian, Effect of site response on spatial variability of ground motion, *11th World Conference on Earth. Eng.*, Oxford, 1996, Disc 2, Paper No: 705.
- [51] A. Der Kiureghian, P. Keshishian, A. Hakobian, *Multiple Support Response Spectrum Analysis of Bridges Including the Site-Response Effect and MSRS Code*, Report No. UCB/EERC-97/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1997.
- [52] W.C. Brown, M.F. Parsons, Bosphorus Bridge, Part I, History of Design, *Proc. Instn Civ. Engrs*, 58 (1975) 505-532.

- [53] T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, İşletmeye Açılışının 10. Yıl Dönümünde Boğaziçi Köprüsü, İstanbul, 1983.
- [54] A. Der Kiureghian, A. Neuenhofer, Response spectrum method for multiple-support seismic excitations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21(1992) 713-740.
- [55] A.A. Dumanoğlu, K. Soyluk, *SVEM, A Stochastic Structural Analysis Program for Spatially Varying Earthquake Motions*, Turkish Earthquake Foundation, TDV/KT 023-76, İstanbul, 2002.
- [56] A.A. Dumanoğlu, R.T. Severn, *Asynchronous Seismic Analysis of Modern Suspension Bridges, Part 1: Free Vibration*, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol, UK, 1985.
- [57] J.M.W. Brownjohn, A.A. Dumanoğlu, R.T. Severn, A. Blakebrough, *Ambient Vibration Survey at the Bosphorus Suspension Bridge*, Department of Civil Engineering, University of Bristol, UK, 1988.