Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.
Cilt 22, No 4, 933-939, 2007

J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
Vol 22, No 4, 933-939, 2007

ÇELİK KEMER KÖPRÜLERİN RASGELE TİTREŞİM ANALİZİNDE FİLTRE EDİLMİŞ BEYAZ GÜRÜLTÜ MODELİNİN TAHKİKİ

Kurtuluş SOYLUK ve Kürşat YÜCEL
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570 Ankara
ksoyluk@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 26.12.2006; Kabul/Excepted:05.11.2007)

ÖZET

Bu çalışmada, deprem hareketinin yayılması esnasındaki değişiminin incelendiği iki farklı çelik kemer köprü sisteminin rasgele titreşim analizi yapılmaktadır. Deprem hareketinin yayılması esnasındaki değişimi, deprem hareketinin sonlu yayılma hızı ile dikkate alınmaktadır. Rasgele titreşim analizinde deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu modeli için yaygın olarak filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılmaktadır. Bu çalışmada esas olarak, filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek deprem hareketini yansıtıp yansıtmadığı belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla incelenen köprü örnekleri hem gerçek deprem hareketi, hem de filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile çözülmekte ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Deprem hareketi olarak 1999 Taywan Chi-Chi depremine ait sert bir zemin kaydı kullanılmaktadır. Karşılaştırma sonucunda filtre edilmiş beyaz gürültü modeli için elde edilen çözümlerin, gerçek deprem hareketi kayıtları kullanılarak elde edilen çözümlerle paralellik içerisinde olduğu gözlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Rasgele titreşim analizi, çelik kemer köprü, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli

VERIFICATION OF THE FILTERED WHITE NOISE MODEL IN THE RANDOM VIBRATION ANALYSIS OF STEEL ARCH BRIDGES

ABSTRACT

In this study, random vibration analyses of two different steel arch bridge models are performed for the spatial variation of the ground motion. The spatial variability of the ground motion is taken into account with the wave-passage effect. In the random vibration analysis theory, the filtered white noise ground motion model is widely used as a power spectral density function of the ground motion. It is aimed to determine the accuracy of the filtered white noise ground motion model to represent the actual ground motion. With this purpose, the considered arch bridges are analysed for the actual ground motion and filtered white noise ground motion model. The recording of 1999, Taiwan Chi-Chi earthquake at the firm soil condition is considered as actual ground motion. It is observed that the results obtained for the filtered white noise ground motion model are comparable with the results obtained for the actual ground motion.

Keywords: Random vibration analysis, steel arch bridge, filtered white noise model

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deprem hareketinin yayılması esnasında gösterdiği değişkenliklerin uzun açıklıklı köprü sistemleri üzerindeki etkilerinin son yıllarda ortaya konması ile birlikte, bu tür büyük yapı sistemlerinin dinamik analizlerinde deprem etkisinin değişimini dikkate alma gereği ortaya çıkmıştır. Bu gelişmeden sonra uzun açıklıklı yapı sistemlerinin dinamik analizlerinde üniform deprem hareketi kabulü artık pek geçerli olmamaktadır. Ayrıca, son yıllarda uzun açıklıklı köprü sistemlerinin deprem bölgelerinde de yaygın olarak inşa edilmesi, bu tür yapı sistemlerinin detaylı dinamik analizini kaçınılmaz kılmaktadır. Farklı deprem hareketi etkisindeki kemer köprülerin dinamik analizleri konusunda yapılan ilk çalışmalar deterministik yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Dusseau [1], Dusseau ve Wen [2] çelik kemer

köprülerin dinamik analizi konusunda LINSTRUC isimli bir program geliştirmişlerdir. Bu çalışmada incelenen kemer köprüler hem üniform deprem hareketi hem de farklı deprem hareketi etkisi için zaman tanım alanında çözüm yöntemiyle analiz edilmiştir. Daha sonra yapılan çalışmalarda deprem hareketindeki değişimin sorgulandığı dinamik analizler, deterministik yöntemlere göre daha doğru bir yaklaşım olan rasgele titreşim analizi ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Rasgele titreşim analizi ile deprem hareketine ait belirsizlikler dikkate alınabilmekte ve yapı tepkileri için istatistiksel bir değerlendirme imkanı sağlanmaktadır. Bu gelişmelere rağmen kemer köprülerin rasgele titreşim analizi konusunda yapılan çalışmalar sınırlıdır. Sweidan [3] ve Harichandran ve diğerleri [4] deprem hareketindeki değişimin araştırıldığı kemer köprülerin rasgele titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarda deprem hareketi filtre edilmiş beyaz gürültü ile modellenirken, çalışmaların sonucunda deprem hareketindeki değişim etkisinin uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik analizi üzerinde önemli etkilerinin olduğu vurgulanmıştır. Soyluk [5] tarafından gerçekleştirilen çalışmada deprem hareketindeki değişimin araştırıldığı kablolu ve kemer köprülerin dinamik analizleri farklı rasgele titreşim analiz yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Deprem hareketine ait değişimin incelendiği analizlerde deprem hareketi, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile gözönüne alınmıştır. Bunun yanında üniform deprem hareketi için filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ve deprem hareketi için kablolu köprü modeli çözümlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda üniform deprem hareketi için filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin oldukça gerçekçi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Bu çalışmada, deprem hareketinin yayılması esnasındaki değişiminin dikkate alındığı iki farklı çelik kemer köprü sisteminin rasgele titreşim analizi yapılmaktadır. Deprem hareketinin yayılması esnasındaki değişimi, deprem hareketinin sonlu yayılma hızı ile gösterilmektedir. Rasgele titreşim analizinde deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu modeli için yaygın olarak filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılmaktadır. Bu çalışmada esas olarak, filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek deprem hareketini yansıtıp yansıtmadığı belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla, seçilen köprü örnekleri hem gerçek deprem hareketi hem de filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile çözülmekte ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Deprem hareketi olarak 1999 Taywan Chi-Chi depremine ait sert bir zemin kaydı kullanılmaktadır.

2. SPEKRAL ANALİZ YÖNTEMİ
(SPECTRAL ANALYSIS APPROACH)

Spektral analiz yöntemi stasyoner rasgele titreşim teorisine dayanmaktadır ve yapı tepkisine ait ortalama maksimum değerleri, deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak hesaplamaktadır. Yapı sistemlerinin farklı mesnet noktalarına etkiyen deprem hareketlerinde farklılık olması durumunda herhangi bir yapı tepkisi zahiri-statik, dinamik ve kovaryans bileşenlerin toplamından oluşmaktadır.

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_d}^2 + \sigma_{z_s}^2 + 2\mathrm{Cov}(z_s, z_d) \tag{1}$$

Burada $\sigma_{z_s}^2$ ve $\sigma_{z_d}^2$ sırasıyla zahiri-statik ve dinamik varyans değerlerini, $\mathrm{Cov}(z_s, z_d)$ zahiri-statik ve dinamik bileşenler arasındaki kovaryans bileşenini göstermek üzere aşağıdaki denklemler mevcuttur [6].

$$\sigma_{z_d}^2 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\psi_i\psi_j\Gamma_{ki}\Gamma_{lj}\int_{-\infty}^{\infty}H_i(-w)H_j(w)S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_l}(w)dw \tag{2}$$

$$\sigma_{z_s}^2 = \sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}A_k A_l\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{w^4}S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_l}(w)dw \tag{3}$$

$$\mathrm{Cov}(z_s, z_d) = \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\sum_{l=1}^{r}\psi_j A_k\Gamma_{lj}\left(-\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{w^2}H_j(w)S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_l}(w)dw\right) \tag{4}$$

Burada, n dikkate alınan mod sayısını, r deprem hareket ivmesinin etkidiği mesnet serbestlik derecesi sayısını, A_k, k mesnet serbestlik derecesinin birim hareketinin neden olduğu z tepkisini, Γ_{ki}, k. mesnet serbestlik derecesine ve i. moda karşılık gelen katkı faktörünü, ψ_j, j. modun neden olduğu z tepkisini, $H_j(w) = (w_j^2 - w^2 + 2iw_j\zeta_j w)^{-1}$ modal frekans davranış fonksiyonunu ve $S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_l}$, k ve l mesnet serbestlik dereceleri arasındaki karşıt spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir.

Rasgele titreşim teorisinde ortalama maksimum değer, maksimum büyüklük faktörüne (p) ve z(t) işleminin standart sapmasına (σ_z) bağlı olarak

$$\mu = p\sigma_z \tag{5}$$

şeklinde ifade edilmektedir [7].

3. DEPREM HAREKETİ MODELİ
(GROUND MOTION MODEL)

Rasgele titreşim analizinde yapı sisteminin mesnetlerine etkiyen deprem hareketi, mesnet noktaları arasındaki deprem hareket ivmesinin karşıt spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [8].

$$S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_l}(w) = \gamma_{kl}(w)\left[S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_k}(w)S_{\ddot{u}_l\ddot{u}_l}(w)\right]^{1/2} \quad (6)$$

Deprem hareketindeki değişimi frekans alanında tanımlayan uygunluk fonksiyonu $\gamma_{kl}(w)$ için bu çalışmada deprem hareketinin sonlu yayılma hızını içeren dalga yayılma etkisi dikkate alınmaktadır.

$$\gamma_{kl}(w) = e^{(-iwd_{kl}^{L}/V)} \quad (7)$$

Burada V, görünen dalga yayılma hızını, d_{kl}^{L}, dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığını göstermektedir.

Spektral analiz yönteminde deprem hareketini frekans alanında tanımlayan spectral yoğunluk fonksiyonu için Clough-Penzien [9] tarafından geliştirilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılmaktadır.

$$S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_k}(w) = So\frac{w_g^4 + 4\zeta_g^2 w_g^2 w^2}{(w_g^2 - w^2)^2 + 4\zeta_g^2 w_g^2 w^2} * \frac{w^4}{(w_f^2 - w^2)^2 + 4\zeta_f^2 w_f^2 w^2} \quad (8)$$

Burada S_0, spektral yoğunluk fonksiyonunun ordinat değerini gösterirken, w_g ve ζ_g, sırasıyla birinci filtreye ait doğal frekansı ve sönüm oranını, w_f ve ζ_f ise ikinci filtreye ait parametre değerlerini ifade etmektedir.

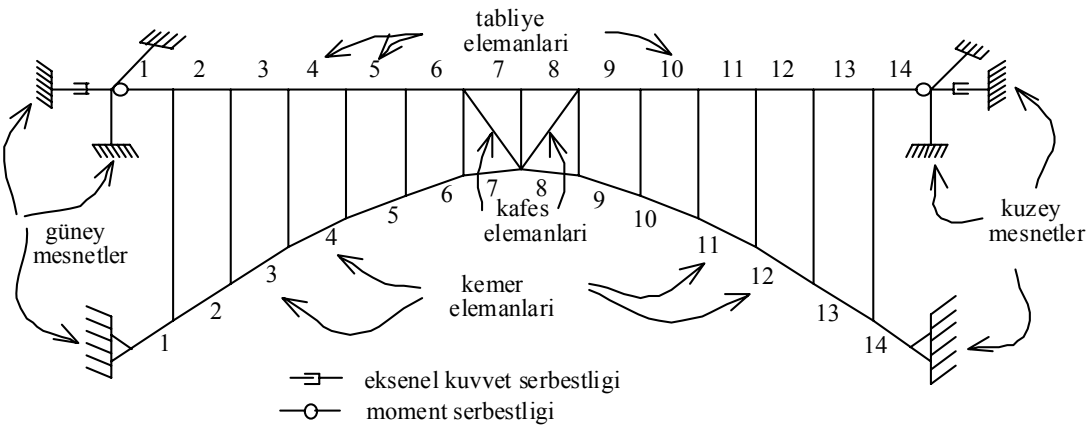
4. ÇELİK KEMER KÖPRÜ MODELLERİ (STEEL ARCH BRIDGE MODELS)

Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletlerinde inşa edilmiş iki çelik kemer köprü modeli incelenmektedir. Kaliforniyada inşa edilen Cold Spring Canyon Köprüsü (CSCB) ve Batı Virginyada inşa edilen New River Gorge Köprüsü (NRGB).

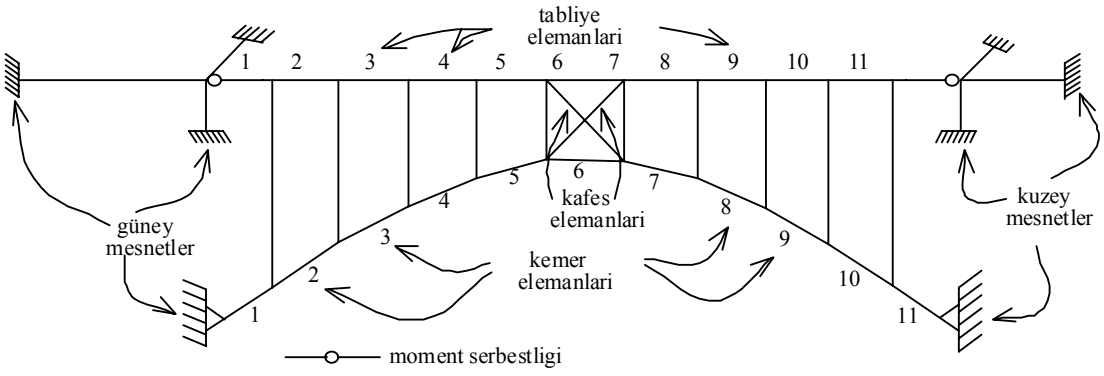
NRGB köprüsü dört şeritli, kutu kafes sistemine sahip çelik bir kemer köprüdür. Tabliye ve kemer esas olarak kutu kesitli kafes sistem olup, yatay ve düşey kafes elemanlarla birleştirilmiş dört adet kutu kesite sahip kiriş çubuktan meydana gelmektedir. NRGB köprüsü kuzey kenar açıklığı 175m, güney kenar açıklığı 193m ve merkez açıklığı 554m'dir. Toplam köprü açıklığı 924m olurken, toplam kemer açıklığı 518m'dir. Kenar açıklık tabliye bölümleri merkez açıklık tabliye bölümlerinden, merkez açıklık sonundaki genleşme derzleri ile izole edilmiştir. NRGB kemer köprüsüne ait iki boyutlu model Şekil 1'de verilmektedir. Verilen modelde tabliye ve kemere ait eşdeğer kiriş elemanlar 1'den 14'e kadar numaralanmıştır. Uzunlamasına doğrultuda tabliyeden kemere yük aktaran kabloları temsil eden diyagonal kafes elemanlar da şekilde gösterilmektedir. Merkez açıklık sonundaki genleşme derzlerinden kaynaklanan tabliye eksenel kuvveti ve moment serbestlikleri de şekilde ayrıca verilmektedir.

CSCB köprüsü iki şeritli çelik bir kemer köprüdür. Toplam köprü açıklığı 371 m'ye ulaşırken, toplam kemer açıklığı 213 m olmaktadır. Tabliye, merkez açıklığın sonlarındaki mafsallı kule birleşimlerinden oluşan üç sürekli kısımdan ibarettir. CSCB kemer köprüsüne ait iki boyutlu model Şekil 2'de verilmektedir. Verilen modelde tabliye ve kemere ait eşdeğer kiriş elemanlar 1'den 11'e kadar numaralanmıştır. Uzunlamasına doğrultuda tabliyeden kemere yük aktaran kabloları temsil eden diyagonal kafes elemanlar da şekilde sunulmaktadır. Ayrıca, kule noktalarındaki mafsallı birleşimden kaynaklanan tabliye moment serbestlikleri de gösterilmektedir.

Her iki köprü modelinde de kenar açıklıklar ötelenme ve dönme yayları ile modellenmektedir. Analizlerde toplam serbestlik derecesi sayısını indirgemek amacıyla, üç boyutlu sistem için iki boyutlu köprü modeli kullanılmaktadır. Ayrıca, her bir panel noktasında kemer ve tabliyeye ait düşey ötelenmeler eşit kabul edilerek, serbestlik derecesi sayısı daha da azaltılmaktadır. NRGB kemer köprü sistemi 81 serbestlik derecesi ile modellenirken, CSCB kemer köprü sistemi 66 serbestlik derecesi ile modellenmektedir. Bunun yanında, bu çalışmada



Şekil 1. New River Gorge Köprüsüne ait iki boyutlu model (2D Model of New River Gorge Bridge)



Şekil 2. Cold Spring Canyon Köprüsüne ait iki boyutlu model (2D Model of Cold Spring Canyon Bridge)

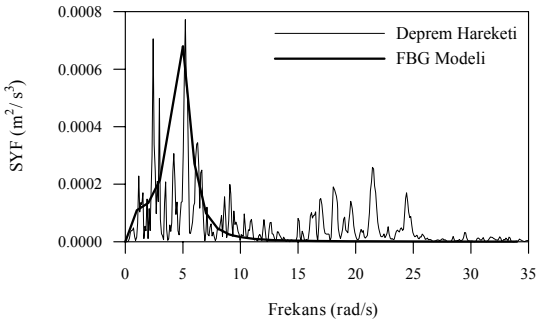
kullanılan iki boyutlu modellemenin oldukça gerçekçi olduğu daha önce belirlenmiştir. Dusseau [1] yaptığı çalışmada, iki boyutlu modelleme ile elde edilen modal analiz sonuçlarının, üç boyutlu modelleme sonuçlarından sadece %10 düzeyinde farklı olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada her iki köprü sistemi için de %5 sönüm oranı kullanılmaktadır.

5. NÜMERİK ÇÖZÜMLER (NUMERICAL SOLUTIONS)

Bu çalışmada (8) denklemi ile tanımlanan filtre edilmiş deprem hareketi modelinin tahkiki amacıyla köprü sistemlerinin mesnetlendiği zemin ortamı için homojen sert zemin cinsi dikkate alınmaktadır. Söz konusu zemin türüne ait filtre parametre değerleri [10]; $w_g = 15.0\ \mathrm{rad/s}$, $\xi_g = 0.6$, $w_f = 1.5\ \mathrm{rad/s}$ ve $\xi_f = 0.6$ şeklinde tanımlanmaktadır. Bu amaçla çalışmada 1999, Tayvan Chi-Chi depremine ait sert zeminde kaydedilmiş ILA027E deprem kaydı kullanılmaktadır. Bu deprem kaydına ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 3'de verilmektedir. Şekilde ayrıca filtre edilmiş beyaz gürültü modeline (FBG) ait ivme spektral yoğunluk fonksiyonu da verilmektedir. Doğru bir karşılaştırmaya imkan vermek amacıyla spektral yoğunluk fonksiyonu ordinat değeri S_0, (8) denklemi ile tanımlanan deprem hareket ivme varyans değeri sert zemin cinsi için ChiChi depremi ivme kaydına ait varyans değerine eşitlenmek suretiyle elde edilmiştir. Bu şekilde belirlenen spektral yoğunluk fonksiyonu ordinat değeri S_0=0,0000485'dir. Şekil 3'den görüleceği gibi ChiChi depremi ve FBG modeli için elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu uyuşmaktadır.

Homojen zemin üzerine inşa edildiği kabul edilen kemer köprü sistemleri, yatay doğrultuda etkiyen deprem hareketinin hızının sonsuz ve 1000 m/s olması durumları için incelenmektedir.

Bu çalışmada köprü sistemlerinin rasgele titreşim analizi için Dumanoğlu ve Soyluk [11] tarafından geliştirilen SVEM programı kullanılmıştır. Fortran programlama dilinde yazılan SVEM [11] bilgisayar



Şekil 3. Chi-Chi depremi sert zemin ILA027E kaydı spektral yoğunluk fonksiyonu (Spectral density function of Chi-Chi earthquake component ILA027E recorded at firm soil site)

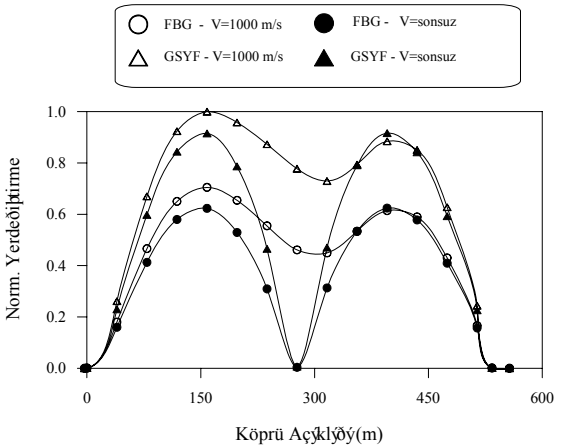
programı ile, değişen yer hareketi etkisindeki yapı sistemlerinin rasgele titreşim analizi yapılmaktadır. Söz konusu program, deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu için filtre edilmiş beyaz gürültü modelini kullanmaktadır. Çalışmanın amacı doğrultusunda, deprem hareketine ait gerçek spektral yoğunluk fonksiyonunu dikkate alacak şekilde SVEM programında gerekli değişiklikler yapılmıştır. Bunun için önce programdan bağımsız olarak deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu hesaplanmakta, daha sonra çok küçük frekans artım değerleri için spektral yoğunluk fonksiyonu değerleri program tarafından okutulmaktadır. Böylece tanımlanan gerçek spektral yoğunluk fonksiyonu için (2)-(4) denklemlerindeki integral ifadeleri, IMSL alt programı QAGI [12] kullanılmak suretiyle hesaplanmaktadır.

5.1. NRGB Kemer Köprü Modelinin Analizi (Analysis of NRGB Arch Bridge Model)

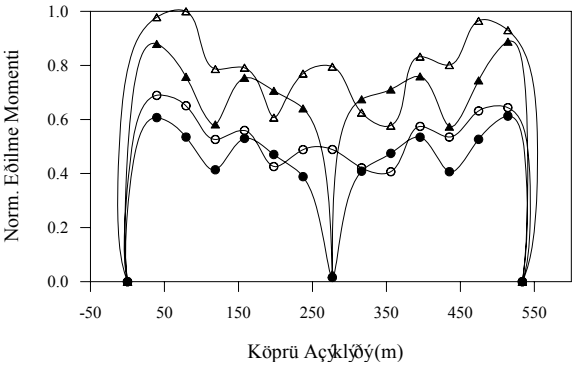
NRGB kemer köprü örneği öncelikle yatay doğrultuda 1000 m/s'lik sonlu hızla yayılan deprem hareketi için çözümlenmiştir. Deprem hareketi olarak, ChiChi deprem kaydına ait gerçek spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) ve filtre edilmiş beyaz gürültü (FBG) modeline ait spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Belirtilen deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonu modelleri ile elde edilen normalleştirilmiş tabliye düşey yerdeğiştirmeleri Şekil 4'de verilmektedir. Şekilde ortalama maksimum

yerdeğiştirme değerleri homojen sert zemin türü için karşılaştırılmaktadır. FBG modeli için elde edilen yerdeğiştirmeler, ChiChi depremine ait gerçek spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) kullanılarak elde edilen yerdeğiştirmelerden daha küçük olmaktadır. Gerçek deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonu için tabliyede elde edilen en büyük yerdeğiştirme değeri, FBG modeli için elde edilen yerdeğiştirmeden %30 daha fazladır. Her iki spektral yoğunluk fonksiyonu için tabliye boyunca elde edilen ortalama fark %33 civarındadır. Deprem hareketinin sonsuz hızla yayılması durumunda GSYF ve FBG modelleri ile elde edilen tabliye düşey yerdeğiştirmeleri de aynı şekil üzerinde karşılaştırılmaktadır. Yine FBG modeli için elde edilen yerdeğiştirmeler daha küçük olmaktadır. Her iki spektral yoğunluk fonksiyonu arasındaki farklılık tabliye boyunca yine ortalama %33 civarındadır. Bunun yanında, hem FBG hem de GSYF modelleri ile sonsuz hızla yayılan deprem hareketi için elde edilen yerdeğiştirmeler, sonlu yayılma hızı için elde edilen yerdeğiştirmelerden genellikle daha küçük çıkmaktadır.

Deprem hareketi yayılma hızının 1000 m/s ve sonsuz olması durumları için FBG ve gerçek deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonları (GSYF) ile elde edilen normalleştirilmiş tabliye eğilme momentleri Şekil 5'de verilmektedir. Burada ortalama maksimum eğilme momentleri için elde edilen değişim, tabliye yerdeğiştirmeleri için elde edilen değişimle paralellik içerisindedir. Deprem hareketi yayılma hızının 1000 m/s ve sonsuz olması durumlarında gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilen eğilme momentleri, FBG modeli ile elde edilen eğilme momentlerinden daha büyüktür. 1000 m/s dalga yayılma hızı için tabliye boyunca belirlenen her iki analiz arasındaki fark ortalama %33 olurken, deprem hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumunda bu fark yine %33 olmaktadır. Ayrıca tabliye yerdeğiştirmeleri için elde edilen değişimde de gözlendiği gibi, sonsuz yayılma hızı için elde edilen ortalama maksimum eğilme momentleri sonlu yayılma hızı için elde edilen ortalama maksimum eğilme momentlerinden genellikle daha küçük çıkmaktadır.



Şekil 4. NRGB köprü sistemine ait normalleştirilmiş tabliye düşey yerdeğiştirmeleri (Normalized vertical deck displacements of NRGB bridge system)

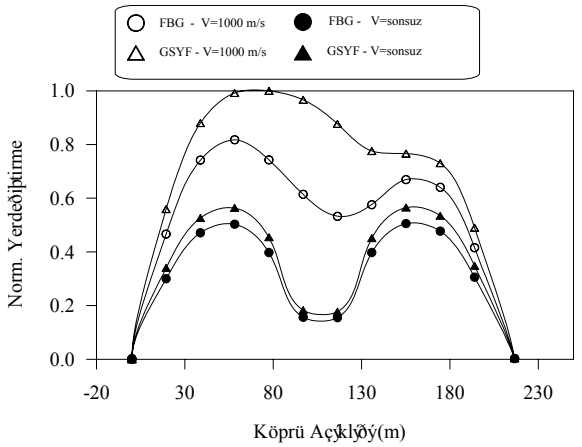


Şekil 5. NRGB köprü sistemine ait normalleştirilmiş tabliye eğilme momentleri (Normalized deck bending moments of NRGB bridge system)

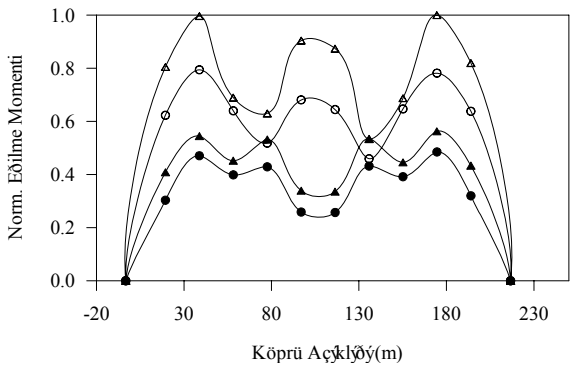
5.2. CSCB Kemer Köprü Modelinin Analizi (Analysis of CSCB Arch Bridge Model)

Öncelikle CSCB kemer köprü örneği yatay doğrultuda 1000 m/s'lik sonlu hızla yayılan deprem hareketi için çözümlenmiştir. Bu durumda deprem hareketi olarak ChiChi sert zemin deprem kaydına ait spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) ve FBG deprem hareketi modeline ait spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Daha sonra köprü sistemi, yayılma hızının sonsuz olması durumunda yine her iki deprem hareketi modeli ile de analiz edilmiştir. Belirtilen analiz yöntemleri ile elde edilen normalleştirilmiş tabliye düşey yerdeğiştirmeleri Şekil 6'da verilmektedir. Şekilde homojen sert zemin için elde edilen ortalama maksimum yerdeğiştirmeler karşılaştırılmaktadır. Yayılma hızının 1000 m/s ve sonsuz olması durumlarında FBG modeli için elde edilen yerdeğiştirmeler, ChiChi depremine ait gerçek spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) kullanılarak elde edilen yerdeğiştirmelerden daha küçük olmaktadır. Sonlu yayılma hızı için gerçek spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) ile tabliyede elde edilen en büyük yerdeğiştirme, FBG modeli için elde edilen yerdeğiştirmeden %26 daha fazladır. Her iki spektral yoğunluk fonksiyonu modeli için tabliye boyunca elde edilen fark ortalama %21'dir. Benzer durum deprem hareketi yayılma hızının sonsuz olması durumu için de gözlenmiştir. FBG modeli için elde edilen yerdeğiştirmeler, gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilen yerdeğiştirmelerden daha küçük çıkmaktadır. İki model arasındaki farklılık tabliye boyunca ortalama %15 civarındadır. Ayrıca her iki deprem hareketi modeli için de hızın sonsuz olması durumunda elde edilen yerdeğiştirmeler, sonlu yayılma hız için elde edilen yerdeğiştirmelerden daha küçük çıkmaktadır.

Yayılma hızının 1000 m/s ve sonsuz olması durumları için FBG ve gerçek deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonu (GSYF) ile elde edilen normalleştirilmiş tabliye eğilme momentleri Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 6. CSCB köprü sistemine ait normalleştirilmiş tabliye yerdeğiştirmeleri (Normalized vertical deck displacements of CSCB bridge system)



Şekil 7. CSCB köprü sistemine ait normalleştirilmiş tabliye eğilme momentleri (Normalized deck bending moments of CSCB bridge system)

Burada da ortalama maksimum eğilme momentleri için elde edilen değişim tabliye yerdeğiştirmeleri için elde edilen değişimle paralellik içerisindedir. Deprem hareketi yayılma hızının 1000 m/s ve sonsuz olması durumlarında gerçek deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonu için elde edilen eğilme momentleri, FBG modeli ile elde edilen eğilme momentlerinden daha büyüktür. 1000 m/s dalga yayılma hızı için, FBG ve gerçek deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak tabliye boyunca belirlenen eğilme momentleri arasındaki fark ortalama %16 iken, yayılma hızının sonsuz olması durumunda bu fark %19 olmaktadır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada deprem hareketindeki değişim etkisi için çelik kemer köprülerin rasgele titreşim analizi yapılmaktadır. Rasgele titreşim analizinde deprem hareketi rasgele işlem olarak spektral yoğunluk fonksiyonu ile ifade edilirken, deprem hareketinin değişimi dalga yayılma etkisi ile dikkate alınmaktadır. Uygulama amacıyla Kaliforniya'daki Cold Spring Canyon Köprüsü (CSCB) ve Batı Virginya'daki New River Gorge Köprüsü (NRGB) seçilmiştir. Söz konusu köprülerin yatay doğrultuda uygulanan deprem hareketi etkisindeki rasgele titreşim analizi için iki boyutlu modelleri incelenmiştir. Çalışmada gerçek deprem hareketine (ChiChi depremi) ait spektral yoğunluk fonksiyonu için çözülen köprü örnekleri, FBG deprem hareketi modeli ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin gerçek deprem hareketini ne ölçüde yansıttığı belirlenmeye çalışılmıştır. Böylelikle elde edilen analiz sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile gerek sonlu yayılma hızı ve gerekse sonsuz yayılma hızı için elde edilen tepkiler, gerçek deprem hareketi spektral yoğunluk fonksiyonu ile elde edilen tepkilerle paralellik içerisindedir. Homojen sert zemin cinsi için, filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile elde edilen tepkiler daha küçük olmaktadır. Filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ve gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilen tepkiler arasındaki farklar, göreceli olarak daha kısa olan CSCB köprü modeli için %15-20 arasında iken, daha uzun olan NRGB köprü modeli için %30-35 civarındadır. Elde edilen bu oranlar deprem hareketi yayılma hızına bağlı olarak çok değişmemektedir.

Ayrıca beklenildiği gibi deprem hareketinin sonlu yayılma hızı için elde edilen tepkiler, yayılma hızının sonsuz olması durumunda elde edilen tepkilerden genellikle daha büyük olmaktadır.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, deprem hareketini modellemek için kullanılan filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin, gerçek deprem hareketi etkisini modellemek için kullanılmasının uygun olacağı düşüncesini güçlendirmektedir. Gerçek deprem hareketine ait spektral yoğunluk fonksiyonunun kullanılması durumunda hesapların güçleşeceği ve zaman alacağı düşünülürse, filtre edilmiş beyaz gürültü modelinin bir yaklaşım olarak kullanılması kabul edilebilirdir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

A_k	k mesnedinin birim hareketinin neden olduğu z tepkisi
Cov (z_s, z_d)	Kovaryans bileşeni
d^{L}_{ki}	Dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığı
H_i	Modal frekans davranış fonksiyonu
n	Mod sayısı
p	Maksimum büyüklük faktörü
r	Deprem hareket ivmesinin etkidiği mesnet serbestlik derecesi sayısı

$S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_k}(w)$	k mesnedine etkiyen ivme spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_{\ddot{u}_k\ddot{u}_l}(w)$	k ve l mesnetleri arasındaki karşıt ivme spektral yoğunluk fonksiyonu
S_0	Spektral yoğunluk fonksiyonu ordinat değeri
V	Görünen dalga yayılma hızı
w	Doğal frekans (rad/s)
w_i	Modal doğal frekans (rad/s)
w_f	İkinci filtreye ait doğal frekans (rad/s)
w_g	Birinci fitleye ait doğal frekans (rad/s)
Γ_{ki}	k. mesnet serbestlik derecesine ve i. moda karşılık gelen katkı faktörü
$\gamma_{kl}(w)$	Uygunluk fonksiyonu
μ	Ortalama maksimum değer
σ_z	z(t) işlemine ait standart sapma
σ_z^2	z(t) işlemine ait varyans
$\sigma_{z_d}^2$	Dinamik varyans değeri
$\sigma_{z_s}^2$	Zahiri-statik varyans değeri
ψ_i	i. modun neden olduğu z tepkisi
ζ_i	j. modal sönüm oranı
ζ_f	İkinci filtreye ait sönüm oranı
ζ_g	Birinci filtreye ait sönüm oranı

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

GSYF	Gerçek spektral yoğunluk fonksiyonu
FBG	Filtre edilmiş beyaz gürültü
SYF	Spektral yoğunluk fonksiyonu

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dusseau, R.A., **Unequal Seismic Support Motions of Steel Deck Arch Bridges**, Doktora Tezi, Michigan State University, Michigan, 1985.
2. Dusseau, R.A. ve Wen R.K., "Seismic Response of Deck Type Arch Bridges", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics,** Cilt 18, 701-715, 1989.
3. Sweidan, B.N., **Stochastic Response of Deck Arch Bridges to Correlated Support Excitations**, Doktora Tezi, Michigan State University, Michigan, 1990.
4. Harichandran, R.S., Hawwari, A., ve Sweiden, B.N., "Response of Long-Span Bridges to Spatially Varying Ground Morion", **Journal of Structural Engineering**, Cilt 122, No 5, 476-484, 1996.
5. Soyluk, K., "Comparison of Random Vibration Methods for Multi-Support Seismic Excitation Analysis of Long-Span Bridges", **Engineering Structures**, Cilt 26, 1573-1583, 2004.
6. Harichandran, R.S., ve Wang, W., **Response of One- and Two-Span Beams to Spatially Varying Seismic Excitation**, Report to the National Science Foundation MSU-ENGR-88-002, College of Engineering, Michigan State University, Michigan, 1988.
7. Button, M.R., Der Kiureghian, A. ve Wilson, E.L., **STOCAL-User Information Manual**, Report No. UCB/EERC-81/2, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA., 1991.
8. Der Kiureghian, A. ve 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., 1981.
9. Clough, R.W. ve Penzien, J., **Dynamics of Structures**, McGraw Hill, Inc., Singapore, 1993.
10. Der Kiureghian, A. ve Neuenhofer, A., "Response Spectrum Method for Multiple-support Seismic Excitations", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Cilt 21, 713-740, 1992.
11. Dumanoğlu, A.A. ve Soyluk, K., **SVEM: A Stochastic Structural Analysis Program for Spatially Varying Earthquake Motions**, Türkiye Deprem Vakfı, Kitap, TDV/KT 023-76, 2002.
12. Piessons, R. et al., **QUADPACK – A Subroutine Package for Automatic Integration**, Springer-Verlag, Berlin, 1983.