DEPREM HAREKETİNİN DEĞİŞİM BİLEŞENLERİNE BAĞLI OLARAK BELİRLENEN YER HAREKETLERİ İÇİN KABLOLU KÖPRÜLERİN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM ANALİZİ

Eda Avanoğlu Sıcacık[1] ve Kurtuluş Soyluk[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara*
[2] *Doçent Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara*
Email: eavanoglu@gazi.edu.tr

ÖZET:

Bu çalışmada dikkate alınan bir simülasyon yöntemiyle, yer hareketinin değişim bileşenlerine ve tanımlanan spektrum eğrilerine bağlı olarak yer hareketleri üretilmiş ve üretilen bu yer hareketleri için, kablolu bir köprü sisteminin yapı-zemin etkileşiminin de dikkate alındığı dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Yer hareketinin değişimi bu çalışmada dalga yayılma ve korelasyon etkisi ile dikkate alınmıştır. Korelasyon etkisi, deprem hareketinin düzgün olmayan faylar boyunca çok değişik kaymalar sonucunda meydana gelmesi ve ortaya çıkan yerdeğiştirme dalgalarının rasgele sayılabilecek sayısız yansıma ve kırılmaya uğraması ile açıklanmaktadır. Dalga yayılma etkisi ise deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşıncaya kadar geçen zaman farkından doğmaktadır. Dikkate alınan kablolu köprü örneği, tüm sistemin, yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki ayrı sistem olarak incelendiği alt sistem yaklaşımı ile çözümlenmiştir. Yer hareketi oluşturulması aşamasında, Hao (1989) tarafından önerilen simülasyon yöntemi esas alınmıştır. Bu yöntemde, yer hareketi değişiminin dikkate alınarak belirlendiği yer hareketine ait ivme-zaman eğrileri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak oluşturulmaktadır. Deprem hareketinin sıfır ortalamaya sahip stasyoner bir işlem olduğu ve bilinen bir spektral yoğunluk fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonuna sahip olduğu kabul edilerek, yer hareketinin yayılması esnasında uğrayacağı değişim dikkate alınarak yer hareketi oluşturulmaktadır. Böylece deprem hareketinin değişim etkileri dikkate alınmak suretiyle, köprü sisteminin her bir mesnedine etki edecek deprem hareketi elde edilmiş ve köprü sistemine uzunlamasına doğrultuda etki ettirilmiştir. Deprem hareketinin değişimine bağlı olarak tanımlanan analizler için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği iki farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, hem yapı zemin etkileşiminin hem de mesnetlerden farklı yer hareketi etki ettirilmesinin yapısal tepkileri önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Yer hareketi değişim bileşenleri, filtre edilmiş beyaz gürültü, spektral yoğunluk fonksiyonu, dalga yayılma etkisi, korelasyon etkisi, alt-sistem yaklaşımı, kablolu köprü.

1. GİRİŞ

Herhangi bir mühendislik yapısının dinamik analizi için yer hareketinin belirlenmesi, mühendisler için en zor işlemlerden bir tanesidir. Bir yapı sisteminin deprem hareketinden kaynaklanan dinamik davranışını belirlemek amacı ile dinamik analiz yapılırken, genellikle yapının tüm mesnet noktalarının aynı anda ve aynı yer hareketine maruz kaldığı kabul edilmektedir. Bu yaklaşımda deprem dalgalarının sonsuz hızla yayıldığı kabul edilirken, yayılma esnasında yer hareketindeki değişim dikkate alınmamaktadır. Ancak köprüler, barajlar, boru hatları ve nükleer santraller gibi uzun açıklıklı ve büyük sitemlerin mesnetlerine etkiyen yer hareketi farklılık gösterecektir. Uzun açıklıklı köprü sistemlerinin mesnetlerine etkiyen yer hareketleri genlik, frekans içeriği ve varış zamanı açısından farklılık göstereceği ve buna bağlı olarak da üniform yer hareketi kabulü ile belirlenen yapı tepkilerini değiştireceği açıktır. Uzun açıklıklı köprü sistemlerin yumuşak zemin koşullarında ve deprem

bölgelerinde inşa edilmesi söz konusu yapı sistemlerinin detaylı dinamik analizlerinin yapılmasını önemli kılmaktadır. Bu bakımdan, kablolu köprülerin dinamik analizleri gerçekleştirilirken yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketinin değişim etkilerinin dikkate alınması önemli olmaktadır. Literatürde yer hareketi değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin köprü sistemleri üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelediği birçok çalışma mevcuttur. Ancak, problemin yer hareketi değişiminin ve yapı-zemin etkileşiminin göreceli etkileri kapsamında ele alındığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Betti vd. (1993), deprem hareketinin sonlu yayılma hızının dikkate alındığı uzun açıklıklı asma köprü sistemlerinin yapı-zemin etkileşimi açısından analizini mümkün kılan dinamik bir yöntem önermiştir. Çalışma sonucunda yer hareketi değişiminin ve kinematik yapı-zemin etkileşiminin dinamik yapı davranışı açısından oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Keshishian (2001) çalışmasında köprü türü uzun açıklıklı yapıların rasgele titreşim analizi ile çözümünde yer hareketindeki değişim ve yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemiştir. Yer hareketindeki değişim korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi ile dikkate alınmıştır. Rasgele titreşim teorisine bağlı olarak geliştirilen yöntem ile gerçekleştirilen analizler sonucunda, yer hareketindeki değişimin köprü davranışı üzerinde daha etkili olduğu ve yapı-zemin etkileşiminin sonuçları küçültebileceği gibi, arttırabileceği de gözlenmiştir. Sextos ve arkadaşları (2003) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, toplam uzunluğu 200 m. olan dört açıklıklı bir karayolu köprüsünün dinamik davranışını yer hareketi değişim bileşenleri, zemin etkisi ve yapı-zemin etkileşimi açısından parametrik olarak incelemişlerdir. Chouw ve Hao (2005) yumuşak ve orta zemin koşullarında farklı yer hareketi yayılma hızları dikkate alınarak belirlenen yer hareketi değişimi ile yapı-zemin etkileşiminin, komşu iki köprü çerçevesinin çarpışması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Allam (2010) dalga yayılma etkisi ile yapı-zemin etkileşiminin düzlem çerçeve sistemlerinin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yer hareketi, uygun bir filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılarak elde edilmiştir. Zemin-yapı etkileşimi empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada homojen yumuşak zemin koşullarında inşa edilmiş kablolu köprü sistemi, yer hareketinin dalga yayılma ve korelasyon etkilerine bağlı olarak belirlendiği ve köprü sisteminin mesnetlerine etki ettirildiği değişen yer hareketi etkisi için, köprü sisteminin üzerine oturduğu zemin ile olan dinamik etkileşimi de dikkate alınarak incelenmektedir.

2. YER HAREKETİNİN ELDE EDİLMESİ

Deprem kayıtlarının elde edilebileceği üç kaynaktan bahsetmek mümkündür: Yapay yollar kullanılarak oluşturulan tasarım ivme spektrumu uyumlu kayıtlar, kaynak ve dalga yayılımı özellikleri fiziksel olarak benzeştirilmiş (simüle edilmiş) kayıtlar ve gerçek depremlerden elde edilen kayıtlar (Özdemir ve Fahjan, 2007). Kablolu köprü türü uzun açıklıklı yapıların dinamik analizinde üniform yer hareketi kullanmak doğru sonuçlar vermeyecektir. Yer hareketindeki değişimin kablolu köprülerin dinamik analizindeki etkilerinin incelendiği bu çalışmada, kullanılan yer hareketleri simülasyon yöntemi ile elde edilecektir. Böylece yer hareketi değişim parametreleri olan dalga yayılma etkisi ve korelasyon etkisi dikkate alınarak farklı yer hareketi senaryoları üretilmiş olunacaktır. Daha sonra, üretilen yer hareketlerine bağlı olarak üst yapının yer hareketindeki değişime ne oranda duyarlı olduğu belirlenecektir.

Yer hareketi oluşturulması aşamasında, Hao (1989) tarafından önerilen simülasyon yöntemi esas alınmıştır. Bu yöntemde, yer hareketi değişiminin dikkate alınarak belirlendiği yer hareketine ait ivme-zaman eğrileri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak oluşturulmaktadır. Deprem hareketinin sıfır ortalamaya sahip stasyoner bir işlem olduğu ve bilinen bir spektral yoğunluk fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonuna sahip olduğu kabul edilerek, yer hareketinin yayılması esnasında uğrayacağı değişim dikkate alınarak yer hareketi oluşturulacaktır. Mesnetlere

etkiyen yer hareketi, yer hareket ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlı olarak Eş. 1'deki gibi tanımlanmaktadır .

$$S_{\ddot{u}_{gl}\ddot{u}_{gm}}(w) = \gamma_{lm}(w) S_{\ddot{u}_g}(w) \tag{1}$$

Burada $\gamma_{lm}(w)$ uygunluk fonksiyonu, $S_{\ddot{u}_g}(w)$ yer hareket ivmesini spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Yer hareketi ivmesi için bu çalışmada Clough ve Penzien (1993) tarafında düzeltilerek elde edilen Filtre Edilmiş Beyaz Gürültü (FBG) spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Eş.1'de kullanılan uygunluk fonksiyonu $\gamma_{lm}(w)$ yer hareketinin değişimini frekans alanında tanımlar ve l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmeleri için uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir .

$$\gamma_{lm}(w) = |\gamma_{lm}(w)|^k \gamma_{lm}(w)^d = |\gamma_{lm}(w)|^k exp[i(\theta_{lm}(w)^d] \tag{2}$$

Uygunluk fonksiyonu boyutsuz olup kompleks bir ifadedir. $0 \leq |\gamma_{lm}(w)| \leq 1$ aralığında kalmaktadır ve $\ddot{u}_l(t)$ ve $\ddot{u}_m(t)$ işlemleri arasındaki istatistiksel bağımlılığı ifade etmektedir. $\gamma_{lm}(w)$ terimlerinin üsleri şeklinde gösterilen k ve d harfleri sırası ile korelasyon etkisini ve dalga yayılma etkisini ifade etmektedir. Korelasyon etkisi, deprem hareketinin düzgün olmayan faylar boyunca çok değişik kaymalar sonucunda meydana gelmesi ve ortaya çıkan yerdeğiştirme dalgalarının rasgele sayılabilecek sayısız yansıma ve kırılmadan geçmesi ile açıklanmaktadır. Bu çalışmada Harichandran ve Vanmarcke (1986) tarafından önerilen korelasyon modeli kullanılmıştır. Deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşıncaya kadar geçen zaman farkından doğan dalga yayılma etkisi

$$\theta_{lm}(w)^d = -\frac{w d_{lm}^L}{v_{app}} \tag{3}$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Burada v_{app} görünen dalga yayılma hızını, d_{lm}^L dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığını göstermektedir. Bu çalışmada dalga yayılma hızları yumuşak zemin için v_{app}=400 m/s ve sonsuz hız değerleri kullanılacaktır.

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

$$\ddot{u}_i(t) = \sum_{k=1}^{i} \sum_{l=1}^{N} A_{ik} cos[\overline{w}_l t + \beta_{ik}(\overline{w}_l) + \emptyset_{kl}] \quad \text{i=1,2,....,n} \tag{4}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada w_l=lΔw, Δw=w_N/N, w_N üst kesim frekansını, $\varphi_{kl}(w_l)$ 0-2π aralığında üniform dağılım gösteren rasgele faz açısını, $A_{ik}(\overline{w}_l)$ ve $\beta_{ik}(\overline{w}_l)$ ise oluşturulan yer hareketlerinin genlik ve faz açılarını göstermektedir.

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

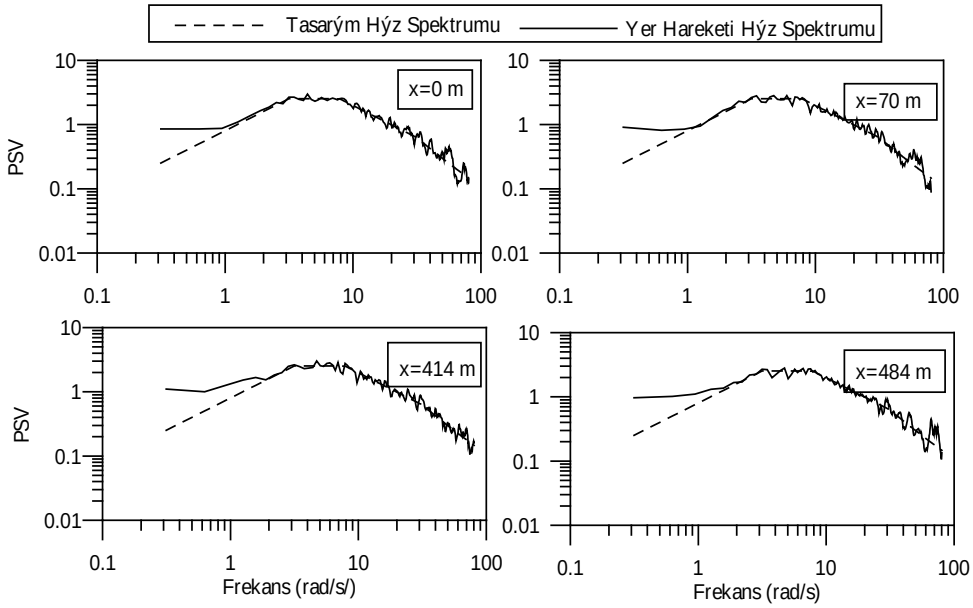
$$a_k(t) = \xi(t) \ddot{u}_k(t) \tag{5}$$

Şekil fonksiyonu, yer hareketinin zaman tanım alanında etkili olduğu düşünülen süre içersinde titreşime başlaması, dominant titreşim bölgesi ve titreşimin azalmaya başlaması olarak üç bölümde tanımlanabilir.

Çalışmada Eş. 6'da ifade edilen şekil fonksiyonu, t_0=4s ve t_n=10s değerleri için kullanılmıştır (Zanardo vd. 2002).

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \le t \le t_0 \\ 1 & t_0 \le t \le t_n \\ \exp\left(-0{,}394(t-t_n)\right) & t_n < t \end{cases} \quad (6)$$

Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareketi ivme kayıtları dikkate alınan zemin sınıfı için EC8'de tanımlanan, %2 sönüm oranı için ve 0.5 g'ye göre normalize edilmiş hız spektrumu ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 1'de nümerik uygulama olarak seçilen Jindo Köprüsü mesnetlerine etki ettirilecek, homojen yumuşak zemin ortamı için dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınarak elde edilen yer hareketlerine ait hız spektrumları ile tasarım hız spektrumlarının karşılaştırılması görülmektedir.



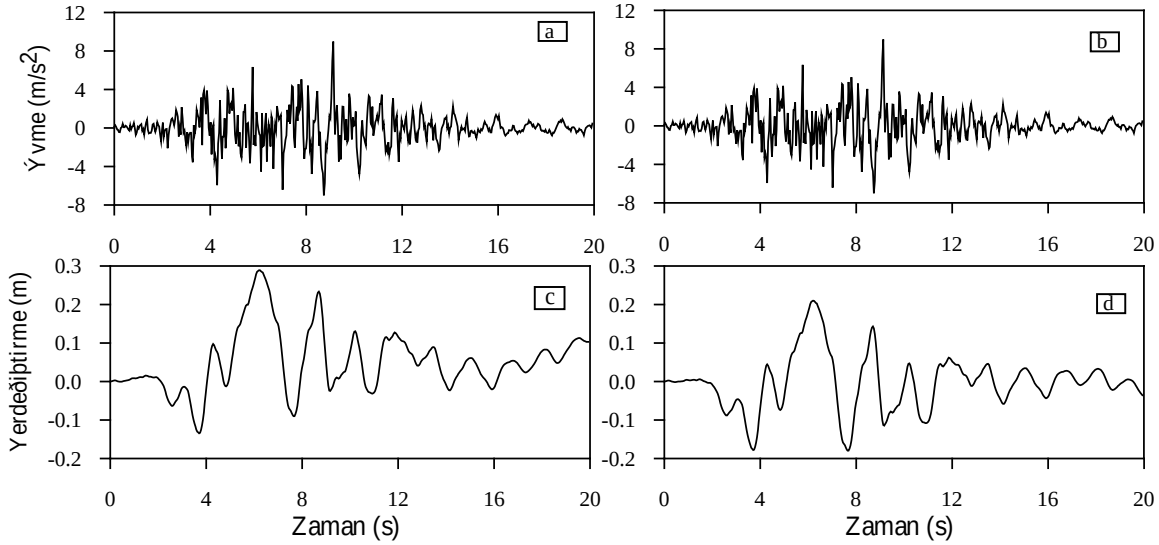
Şekil 1. Yumuşak zemin ortamında korelasyon ve dalga yayılma etkileri dikkate alınarak üretilen yer hareketine ait hız spektrumu ile tasarım hız spektrumunun karşılaştırılması

Değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki sistemlerin dinamik analizinde yapısal tepkiler zahiri-statik ve dinamik tepkilerin toplamından oluşmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirmelerin hesabında yer ivmesinin integrasyonu ile elde edilen yerdeğiştirmeler kullanılmaktadır. Elde edilen yer hareketi ivme kaydının doğrudan integrasyonu sonucunda kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler oluşabilmektedir. Kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler hesaplanan tepkilerde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Bunun için elde edilen ivme-zaman eğrilerine eksen düzeltilmesi yapılması gerekmektedir. Eksen düzeltilmesi bir eğri yaklaştırma yöntemi ile yapılabilmektedir. Eğri yaklaştırma yönteminde düşük dereceli polinomlar kullanılmaktadır.

$$\ddot{u}_{cg}(t) = \ddot{u}_g(t) - P(t) \quad (7)$$

Burada $\ddot{u}_g(t)$, eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme değerlerini, $P(t)$ ise eksen düzeltilmesi için seçilen polinom fonksiyonunu göstermektedir. Çalışmada simülasyon yöntemi ile elde edilen ivme-zaman kayıtlarına, Chiu (1997) tarafından önerilen yöntem takip edilerek eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Eksen düzeltilmesi yapılan

ivme kaydının çift integrasyonundan elde edilen yerdeğiştirme kaydına tekrar eksen düzeltilmesi yapılmaktadır. Şekil 2'de homojen yumuşak zemin için elde edilen üniform yer hareketine ait eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme ve yerdeğiştirme kaydı ile eksen düzeltilmesi yapıldıktan sonra elde edilen ivme ve yerdeğiştirme kaydı görülmektedir.



Şekil 2. Yumuşak zemin için üretilmiş a) eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme kaydı b) eksen düzeltilmesi yapılmış ivme kaydı c) eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme kaydından elde edilmiş yerdeğiştirme kaydı d) eksen düzeltilmesi yapılmış ivme kaydından elde edilmiş eksen düzeltilmesi yapılmış yerdeğiştirme kaydı

3. HAREKET DENKLEMİ

Bu çalışmada tüm yapı-zemin etkileşim sistemini, yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem (substructure method) yaklaşımı kullanılarak, yapı-zemin etkileşim problemi incelenmektedir. İki alt sistem için ayrı ayrı oluşturulan denge denklemleri, sadece üst yapı için etkileşimin temelde empedans matrisleri ile ifade edildiği etkileşim kuvvetlerinin dikkate alınması ile çözülmektedir. Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki üst yapı için hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{r}_s^t \\ \ddot{r}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r}_s^t \\ \dot{r}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_s^t \\ r_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ p_b \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Burada [M], [C] ve [K] sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. Altsimgeler; ss üstyapıya ait serbestlik derecelerini, bb mesnet serbestlik derecelerini ve sb-bs yapı-zemin etkileşim yüzeyine ait serbestlik derecelerini göstermektedir. $\{\ddot{r}\},\{\dot{r}\}$ ve $\{r\}$ ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini, $\{P_b\}$ ise etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Altsimge s yapı sistemini ve b temel sistemini tanımlamaktadır (Hao, 1989). Toplam yerdeğiştirme vektörü, zahiri-statik ve dinamik bileşenlere bağlı olarak,

$$\begin{Bmatrix} r_s^t \\ r_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_s^d \\ r_b^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r_s^{qs} \\ u_g \end{Bmatrix} \tag{9}$$

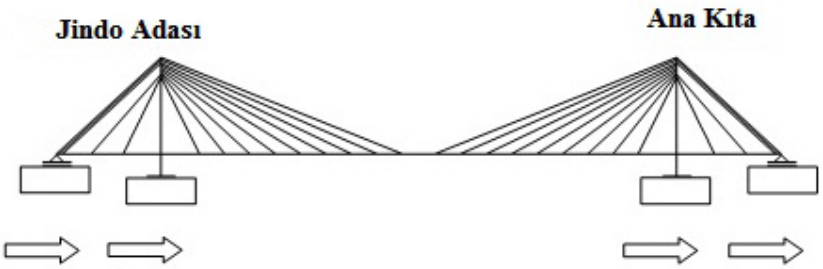
şeklinde yazılabilir. Burada $\{r_b^d\}$ yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki yerdeğiştirme vektörünü ve u_g serbest zemin yüzeyindeki değişen yer hareketi vektörünü ifade etmektedir. Hareket denklemi frekans alanına

dönüştürdükten sonra, hareket denklemi dinamik yerdeğiştirmeler cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir. Burada S_I temel empedans matrisini göstermektedir (Hao, 1989).

$$\left\{-w^2\begin{bmatrix}M_{ss} & 0\\ 0 & M_{bb}\end{bmatrix}+iw\begin{bmatrix}C_{ss} & C_{sb}\\ C_{bs} & C_{bb}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}K_{ss} & K_{sb}\\ K_{bs} & K_{bb}+S_I\end{bmatrix}\right\}\begin{Bmatrix}r_s^d(iw)\\ r_b^d(iw)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}[M_{ss}][K_{ss}^{-1}][K_{sb}]\{\ddot{v}_g(iw)\}\\ -[M_{bb}]\{\ddot{v}_g(iw)\}\end{Bmatrix} \quad (10)$$

4. NÜMERİK HESAPLAMALAR

Bu çalışmada Güney Kore'de inşa edilen Jindo Köprüsü nümerik örnek olarak seçilmiştir. Jindo köprüsü, 344 m olan merkez açıklık ve 70'er m olan iki kenar açıklık olmak üzere, toplam üç açıklıktan oluşmaktadır (Şekil 3). Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki Jindo Köprüsünün yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak dinamik analizinin gerçekleştirilebilmesi için, iki boyutlu matematik model esas alınmıştır. Köprü sistemine uzunlamasına doğrultuda etkiyen yer hareketinin, Jindo Adası yönünden ana kıta yönüne doğru ilerlediği kabul edilmiştir.



Şekil 3. Yatay yer hareketi etkisindeki köprü sistemi

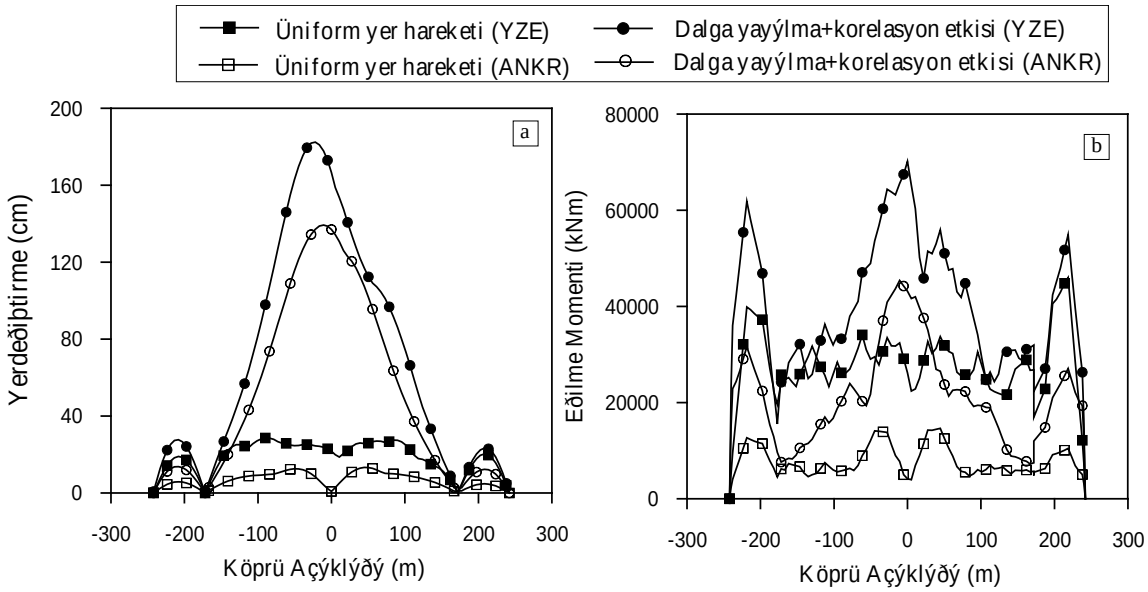
Yer hareketinin yayılması esnasında uğradığı değişim bu çalışmada dalga yayılma ve korelasyon etkileri ile dikkate alınmaktadır. Bu etkenlere bağlı olarak elde edilen yer hareket ivmeleri kablolu köprü sisteminin her bir mesnedine farklı şekilde uygulanarak dinamik analiz yapılmaktadır. Dinamik analiz aşamasında köprü sisteminin üzerine oturduğu zemin ortamı ile olan etkileşimi de yapı-zemin etkileşimi ile dikkate alınmaktadır. Köprünün mesnetlendiği zemin ortamının homojen yumuşak zemin olarak kabul edildiği bu çalışmada, aşağıda belirtilen analiz durumları için çözümler yapılmıştır.

1. Üniform yer hareketi modeli (dalga yayılma ve korelasyon etkileri ihmal edilmiştir).
2. Dalga yayılma ve korelasyon etkileri birlikte dikkate alınmıştır.

Yer hareketinin değişimine bağlı olarak tanımlanan analizler için iki farklı köprü modeli dikkate alınmıştır. İlk modelde yapı-zemin etkileşimi (YZE) dikkate alınırken, ikinci modelde bu etkileşim ihmal edilmiştir (ANKR).

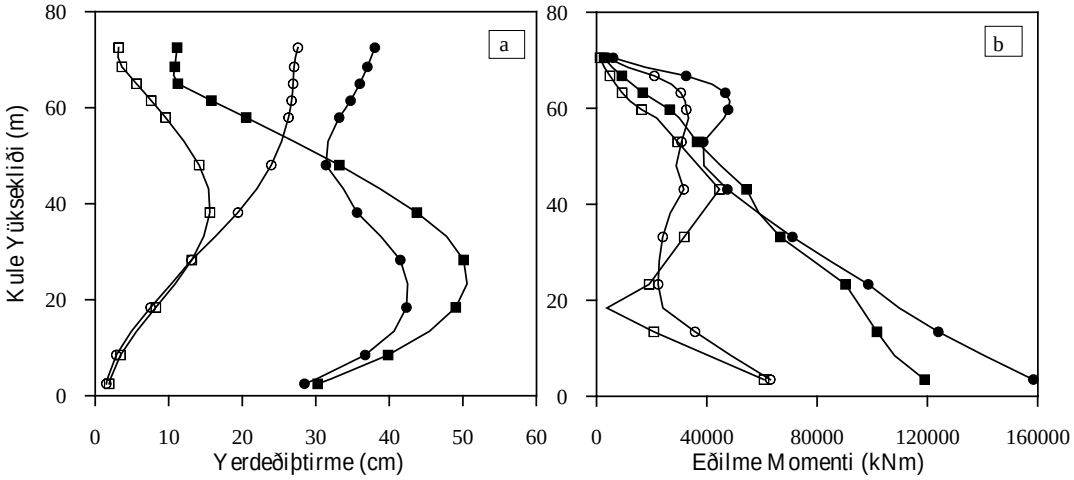
Dikkate alınan analiz durumları için köprü tabliyesi ve Jindo kulesi için elde edilen dinamik yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimleri Şekil 4-5'te verilmiştir. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmeleri incelendiğinde, yapı- zemin etkileşiminin ihmal edildiği ve dikkate alındığı her iki modelde de yer hareketinin korelasyon ve dalga yayılma etkilerine bağlı değişiminin dikkate alınması durumunda yerdeğiştirmelerin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Tabliye dinamik eğilme momenti değişiminde de benzer bir durum gözlenmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği modelde tabliye orta noktasında üniform yer hareketi etkisinde, sıfıra yakın bir yerdeğiştirme elde edilmiştir, ancak yer hareketindeki değişimin dikkate alınması durumunda tabliye orta noktasında elde edilen yerdeğiştirme değeri 137 cm'dir. Benzer şekilde yapı-zemin etkileşiminin dikkate

alınması durumunda üniform yer hareketi etkisinde tabliye orta noktasında 22 cm'lik bir yerdeğiştirme elde edilirken, yer hareketindeki değişimin dikkate alınması durumunda 162 cm'lik bir yerdeğiştirme elde edilmiştir. Tabliye yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimleri incelendiğinde yer hareketindeki değişimin yapı-zemin etkileşimine göre daha belirgin olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Homojen yumuşak zemin a) Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme b) Tabliye dinamik eğilme momenti

Şekil 5'te Jindo Kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimi görülmektedir. Kule yerdeğiştirme ve eğilme momenti değişimlerinde yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması üniform yer hareketi etkisinde kule taban noktasında elde edilen moment değerinin %96 arttırmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı ankastre modelde yer hareketindeki değişimin dikkate alınması kule taban eğilme momenti değerini %4, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı modelde ise %33 arttırmıştır.



Şekil 5. Homojen yumuşak zemin a) Jindo kulesi dinamik yatay yerdeğiştirme b) Jindo Kulesi dinamik eğilme momenti

5. SONUÇLAR

Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki kablolu köprülerin yapı-zemin etkileşim analizinin konu edildiği bu çalışmadan elde edilen sonuçların değerlendirilmesine bağlı olarak, kablolu köprülerin sismik analizi açısından aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

Köprü dinamik tepkileri, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modeller için incelendiğinde, yer hareketinindeki değişimin dikkate alındığı durumda elde edilen dinamik tepki değerlerinin üniform yer hareketi etkisinde elde edilen tepki değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumundaki tepkilerin yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre sisteme oranla arttığı gözlenmiştir. Köprü tepkileri tabliye ve kule olarak ayrı ayrı incelendiğinde ise tabliye dinamik yapısal tepkileri üzerinde yer hareketindeki değişimin, kule yapısal tepkilerinde ise yapı-zemin etkileşiminin etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Dinamik problemin oldukça karmaşık olması nedeniyle, tek bir nümerik köprü örneğine bağlı olarak genel sonuçların çıkarılması oldukça zor olmaktadır. Bununla birlikte, yer hareket değişim bileşenlerinin ve yapı-zemin etkileşiminin uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik davranışı üzerinde önemli etkilerinin olacağı açıktır ve dinamik analizlerinde dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

Hao, H. (1989). Effects of Spatial Variation of Ground Motions on Large Multiply-Supported Structures. *Report no: UCB/EERC-89/06, University of California Berkley*, 100-108.

Betti, R., Abdel-Ghaffar, A.M., Niazy, A.S., (1993). Kinematic Soil-Structure Interaction for Long-Span Cable-Supported Bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22: 415-430.

Keshishian, P. G. (2001). Analysis of Interconnected Systems Accounting for Spatial Variability of Ground Motions and Soil-Structure Interaction, Doktora Tezi, Universty of California, Berkeley.

Sextos, A.G., Pitilakis, K.D., Kappos, A.J. (2003). Inelastic Dynamic Analysis of RC Bridges Accounting for Spatial Variability of Ground Motion, Site Effects and Soil-structure Interaction Phenomena, Part 2: Parametric Study. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32: 629-652.

Chouw, N., Hao, H. (2005). Study of SSI and Non-Uniform Ground Motion effect on Pounding Between Bridge Girders. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25: 717-728.

Allam, M. A. (2010). Multiple-Support Excitations of Open-Plane Frames by a Filtered White-Noise and Soil-Structure Interaction. *Journal of Sound and Vibration*, 329: 4212-4226.

Clough, R. W., Penzien, J. (1993). Dynamics of Structures, Second Eddition, McGraw Hill, INC., Singapore.

Harichandran, R. S., Vanmarcke, E., H. (1986). Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time. *Journal of Enginnering Mechanics*, 112 (2): 154-174

Eurocode 8 (2004). Design of Structures for Earthquake Resistance: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, British Standard, 34.

Chiu, H-C. (1997). Stable Baseline Correction of Digital Strong-Motion Data. *Bulletin Of The Seismological Of America*, 87 (4): 932-944.

Zanardo, G., Hao, H., Modena, C.(2002). Seismic Response of Multi-Span Simply Supported Bridges to a Spatially Varying Earthquake Ground Motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31: 1325-1345.

Özdemir, Z., Fahjan, Y. M. (2007). Gerçek Deprem Kayıtlarının Tasarım Spektrumlarına Uygun Olarak Zaman ve Frekans Tanım Alanlarında Ölçekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferans*, İstanbul, 435-446.