

YER HAREKETİ DEĞİŞİM BİLEŞENLERİNİN KABLOLU KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ZEMİN KOŞULLARINA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Eda AVANOĞLU SICACIK*, Kurtuluş SOYLUK**

*İnşaat Müh. Bölümü, Müh. Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Yahşihan, 71450 Kırıkkale,

**İnşaat Müh. Bölümü, Müh. Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, 06570 Ankara,

edaavanoglu@yahoo.com, ksoyluk@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 02.02.2012; Kabul/Accepted: 12.07.2012)

ÖZET

Bu çalışmada kablolu köprü türü uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik davranışının, dalga yayılma ve korelasyon etkilerinden oluşan yer hareketi değişim bileşenleri açısından incelenmesi hedeflenmiştir. Yer hareketi değişim bileşenlerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkileri, köprünün mesnetlendiği zemin ortamının homojen sert, orta ve yumuşak zemin cinsi olması durumları için ayrı ayrı incelenmiş ve zemin durumuna bağlı olarak yer hareketi değişim etkilerinin göreceli etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Hao tarafından önerilen simülasyon yöntemi esas alınarak, dalga yayılma ve korelasyon etkilerine bağlı olarak yer hareketi ivme kayıtları üretilmiştir. Deprem hareketinin değişimine bağlı olarak tanımlanan analizler için yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği iki farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapı-zemin etkileşimi açısından kablolu köprü örneği çözümlenirken, tüm sistemin yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki ayrı sistem olarak incelendiği alt sistem yaklaşımı dikkate alınmıştır. Çalışmadan edilen sonuçlar, köprünün mesnetlendiği zeminin sert olması durumunda, korelasyon etkisinin dalga yayılma etkisine oranla genellikle daha ön plana çıktığını gösterirken, zemin ortamının zayıflaması ile, orta ve yumuşak zemin koşullarında dalga yayılma etkisinin çok daha ön plana çıktığına işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kablolu köprü, Yapı-zemin etkileşimi, Deprem hareketi değişim bileşenleri, Dalga yayılma etkisi, Korelasyon etkisi

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SPATIALLY VARYING GROUND MOTION COMPONENTS ON THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF CABLE-STAYED BRIDGES DEPENDING ON SOIL CONDITIONS

ABSTRACT

In this study, it is aimed to investigate the dynamic characteristics of cable-stayed bridges with respect to the spatially varying ground motion components of wave-passage and incoherence effects. While examining the relative effects of the spatially varying ground motion components on the dynamic behavior of cable-stayed bridges, homogeneous firm, medium and soft soil conditions are included. For this purpose, the simulation method proposed by Hao is used to generate ground motion time histories depending on the spatially varying components of incoherence and wave-passage effects. To emphasize the relative importance of the spatial variability effects of the earthquake ground motion, bridge responses are determined for the fixed base bridge model and for the bridge model which includes the soil-structure interaction effect. The substructure method which partitions the total soil-structure system into two substructures: the structural system and the soil system, is used to treat the soil-structure interaction problem. The parametric study of the relative importance of the spatially varying ground motion components shows that while the incoherence effect usually dominates the structural responses for firm soil condition case, the wave-passage effect is much more effective than the incoherence effect for the weakening soil conditions.

Key Words: Cable-stayed bridge, Soil-structure interaction, Spatially varying ground motion, Wave-passage effect, Incoherence effect

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kablolu köprülerin yumuşak zemin koşullarında ve deprem bölgelerinde inşasının giderek artması, söz konusu yapı sistemlerinin detaylı dinamik analizlerinin yapılması gereksinimini doğurmuştur. Kablolu köprü gibi 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 sistemlerinin yumuşak zemin ortamında da inşa edilmesi nedeniyle, köprü sisteminin üzerine oturduğu zemin ile olan etkileşiminin köprünün dinamik davranışını etkileyebileceği de düşünülmelidir. Zemin özelliklerine bağlı olarak yer hareketinde değişim söz konusu olabileceği gibi, yapı-zemin etkileşiminin üst yapı davranışında önemli değişikliklere neden olacağı açıktır. 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, yer hareketindeki değişim etkilerinin ve yapı-zemin etkileşiminin birlikte dikkate alındığı ve köprü sistemlerinin dinamik davranışlarının incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Hao ve diğ. [1] yer hareketinin değişimini dikkate alarak, yer hareketi elde etmek için tasarım spektrumu uyumlu bir yöntem önermişlerdir. Çalışmalarında mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki uzun açıklıklı bir kemer sistem ile üç açıklıklı sürekli bir kirişin yapı-zemin etkileşimi açısından yapısal davranışını incelemişlerdir. Betti [2] mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki üç açıklıklı asma köprü sisteminin dinamik yapı-zemin etkileşim analizi için analitik-sayısal bir yöntem geliştirmiştir. Yer hareketindeki değişim dalga yayılma etkisi ile dikkate alınmıştır. Shrikhande ve Gupta [3] asma köprülerin deprem etkisi altındaki doğrusal analizi için stokastik bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada, Golden Gate köprüsünün depreme karşı davranışı, USNRC tasarım spektrumuna göre belirlenmiş iki yer hareketi etkisi için incelenmiştir. Sextos ve diğ. [4] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada asinkronize yer hareketine maruz, hem planda hem de düşeyde düzensizlik gösteren verev bir köprü sistemini incelemişlerdir. Yer hareketinin değişimi ile ilgili olarak, gerçek yer hareketi ve EC8 spektrumu ile uyumlu üç farklı senaryo oluşturularak, parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Chouw ve Hao [5] farklı yer hareketi yayılma hızları dikkate alınarak belirlenen yer hareketi değişimi ile yapı-zemin etkileşiminin, komşu iki köprü çerçevesinin çarpışması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yer hareketinin değişimini

içeren yer hareketleri, Japonya tasarım spektrumuna ve ampirik bir uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak oluşturulmuştur. Konduru ve Allam [6] izolasyonlu kolon temeller üzerindeki açık plan çerçeve bir sistemi, yapı-zemin etkileşim analizi dikkate alınmak suretiyle, dalga yayılma etkisinin önemi açısından araştırmışlardır. Bi ve diğ. [7] kiriş türü köprü sistemlerinin davranışına, yer hareketindeki değişimin, yerel zemin şartlarındaki değişimin ve yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemişlerdir. Sayısal sonuçlar, yapı-zemin etkileşiminin yapısal tepkiler üzerinde önemli etkisinin olduğunu ve ihmal edilemeyeceğini göstermektedir. Sıcacık [8] gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, kablolu köprülerin dinamik davranışını, yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketindeki değişim etkileri açısından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketi değişim bileşenlerinin köprü tepkilerini önemli ölçüde değiştirebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, homojen zemin ortamına mesnetlendiği kabul edilen kablolu bir köprü sistemi, yer hareketinin dalga yayılma ve korelasyon etkilerine bağlı olarak belirlendiği ve köprü sisteminin mesnetlerine boyuna doğrultuda etki ettirildiği, değişen yer hareketi etkisi için incelenmektedir.

2. TEORİK FORMÜLASYON (THEORETICAL FORMULATION)

Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşim sistemini, yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem (substructure method) yaklaşımı kullanılmaktadır. 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 denklemleri aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r}_s^t \\ \dot{r}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_s^t \\ r_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_s^t \\ r_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

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

$$\begin{Bmatrix} r_s^t \\ r_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_s^d \\ r_b^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r_s^{qs} \\ v_g \end{Bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $\{r_b^d\}$ yapı-zemin temas noktalarındaki etkileşim yerdeğiştirme vektörünü ve v_g serbest zemin yüzeyindeki değişen yer hareketi vektörünü ifade etmektedir. Zahiri-statik yerdeğiştirme bileşenleri, hareket denklemlerindeki tüm dinamik terimlerin sıfır alınmasına bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$r_s^{qs} = -K_{ss}^{-1}K_{sb}v_g \quad (3)$$

Frekans alanına dönüştürüldükten sonra, hareket denklemleri dinamik yerdeğiştirmeler cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} -w^2 [M_{ss} & 0 \\ 0 & M_{bb}] + iw [C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb}] \\ [K_{ss} & K_{sb}] \\ [K_{bs} & K_{bb}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} r_s^d(iw) \\ r_b^d(iw) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_{ss}K_{ss}^{-1}K_{sb}\ddot{v}_g(iw) \\ -M_{bb}\ddot{v}_g(iw) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b(iw) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Burada etkileşim kuvvetleri ($P_b(iw)$) empedans matrisine ($S_I(iw)$) bağlı olarak

$$-P_b(iw) = S_I(iw)r_b^d(iw) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir [1]. Empedans fonksiyonları zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğini gösteren frekans alanında tanımlı kompleks ifadelerdir. Aralarında etkileşim olmadığı kabul edilen n adet temel için empedans matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S_I(iw) = \begin{bmatrix} S_{I1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_{I2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & S_{In} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Bu çalışmada Wong ve Luco [9] tarafından yüzeysel kare temeller için elde edilen empedans fonksiyonu değerleri kullanılmıştır. Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin alt sistemi homojen, izotropik ve lineer elastik olarak tanımlanmaktadır.

Denklem (5), denklem (4)'de yerine konulup, sol taraftaki matris ifadeleri toplanırsa, hareket denkleminin frekans alanındaki ifadesi şekli alır.

$$\begin{bmatrix} I_{ss}(iw) & I_{sb}(iw) \\ I_{bs}(iw) & I_{bb}(iw) + S_I(iw) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_s^d(iw) \\ r_b^d(iw) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_{ss}K_{ss}^{-1}K_{sb}\ddot{v}_g(iw) \\ -M_{bb}\ddot{v}_g(iw) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

2.1 Yer Hareketi Üretilmesi (Ground Motion Simulation)

Yer hareketi oluşturulması aşamasında, Hao ve diğ. [1] tarafından önerilen simülasyon yöntemi esas alınmıştır. Bu yöntemde, yer hareketi değişiminin dikkate alınarak belirlendiği yer hareketine ait ivme-zaman eğrileri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak oluşturulmaktadır. Belirtilen yöntemde göre, yer hareketleri önceden tanımlı spektral yoğunluk fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonuna uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmeleri için uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\gamma_{lm}(iw) = \frac{S_{lm}(iw)}{\sqrt{S_{ll}(w)*S_{mm}(w)}} \quad (8)$$

Burada $S_{ll}(w)$ ve $S_{mm}(w)$, sırasıyla, l ve m mesnetlerindeki yer hareket ivmelerine ait spektral yoğunluk fonksiyonlarını gösterirken, $S_{lm}(iw)$, l ve m mesnetlerindeki yer hareket ivmeleri arasındaki karşıt-spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Uygunluk fonksiyonu,

$$\gamma_{lm}(w) = |\gamma_{lm}(w)|^k \exp[i(\theta_{lm}(w)^d)] \quad (9)$$

şeklinde tanımlanırken, bu ifadede $\gamma_{lm}(w)^k$ ve $\theta_{lm}(w)^d$ sırasıyla, korelasyon ve dalga yayılma etkilerini göstermektedir [10]. 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 tanımlanan korelasyon modeli için bu çalışmada Harichandran ve Vanmarcke [11] tarafından önerilen model dikkate alınmıştır. Çalışmada dikkate alınan korelasyon modeli amprik olup, üstel olarak azalan bir fonksiyonun kayıtlı bir takım verilere uydurulmasını temel almaktadır. Bunun yanında, aynı bölgedeki farklı deprem kayıtları için yazılamaması modelin eksik noktasını oluşturmaktadır. Harichandran ve Vanmarcke korelasyon modeli dışında, Abrahamson, Hindy ve Novak, Luco ve Wong v.b. korelasyon modelleri de deprem hareketinin değişimini gerçekçi bir şekilde yansıtabilirken, her bir modelin kendine özgü eksiklikleri nedeni ile deprem hareketinin değişimini etkileyebilecek bir takım önemli parametreler dikkate alınamamaktadır. Harichandran ve Vanmarcke korelasyon modeli, yer hareketi değişimini gerçekçi bir şekilde yansıtabilmesi nedeni ile bu çalışmada tercih edilmiştir. Söz konusu modelde gerekli olan amprik sabitler için Harichandran ve diğ. [12] tarafından önerilen değerler kullanılmıştır ($A=0,636$, $\alpha=0,0186$, $k=31200$, $f_0=1,51$ Hz, $b=2,95$). Deprem hareketinin bir mesnetten diğerine ulaşmaya kadar geçen zaman farkından doğan dalga yayılma etkisi,

$$\theta_{lm}(w)^d = \frac{wd_{lm}^L}{v_{app}} \quad (10)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Burada v_{app} görünen dalga yayılma hızını gösterirken, d_{lm}^L dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığını göstermektedir. Bu çalışmada sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri için dalga yayılma hızları olarak sırasıyla 1500 m/s, 500 m/s ve 400 m/s değerleri dikkate alınmıştır.

Yer hareket ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonu için Clough ve Penzien [13] tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli dikkate alınmıştır.

Üniform yer hareketi oluşturmak için öncelikle, tanımlanan spektral yoğunluk fonksiyonları ile uyumlu stasyonere rasgele işlem örnekleri $u_1(t)$, $u_2(t)$, ..., $u_n(t)$ oluşturulmaktadır [1]. Bu durumda,

$$u_k(t) = \sum_{m=1}^k \sum_{l=1}^N A_{km}(w_l) \cos[w_l t + \theta_{km}(w_l) + \varphi_{ml}(w_l)] \quad (11)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada $w_l = l\Delta w$, $\Delta w = w_N/N$, w_N üst kesim frekansını, $\varphi_{ml}(w_l)$ 0-2 π aralığında üniform dağılım gösteren rasgele faz açısını (φ_{ml} ve φ_{rs} $m=r$ ve $l=s$ olması dışında istatistiksel olarak bağımsız olmalıdır) ve k mesnet noktalarını, $A_{km}(w_l)$ ve $\theta_{km}(w_l)$ ise oluşturulan yer hareketlerinin genlik ve faz açılarını göstermektedir.

Deprem hareketinin stasyonere olmayan bir işlem olması nedeniyle, farklı mesnet noktalarındaki stasyonere olmayan yer hareket ivmeleri, stasyonere olmayan olarak elde edilen yer hareketinin stasyonere olmayan bir şekil fonksiyonu ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$a_k(t) = \xi(t)u_k(t) \quad (12)$$

Şekil fonksiyonu $\xi(t)$ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ 1 & t_0 \leq t \leq t_n \\ \exp(-0,394(t - t_n)) & t_n < t \end{cases} \quad (13)$$

Burada t_0 ve t_n hakim deprem titreşim bölgesindeki stasyonere bölümün başlangıç ve bitiş sürelerini göstermektedir.

Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareketi ivme kayıtları, dikkate alınan zemin sınıfı için EC 8'de [14] tanımlanan, %2 sönüm oranı için ve 0,5 g'ye göre normalize edilmiş hız spektrumu ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Davranış spektrumu ile uyumlu yer hareket ivme kayıtları oluşturulurken, sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri için EC 8'de [14] tanımlanan B, C ve D türü zemin sınıfları dikkate alınmıştır.

Analizlerde dikkate alınan zemin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

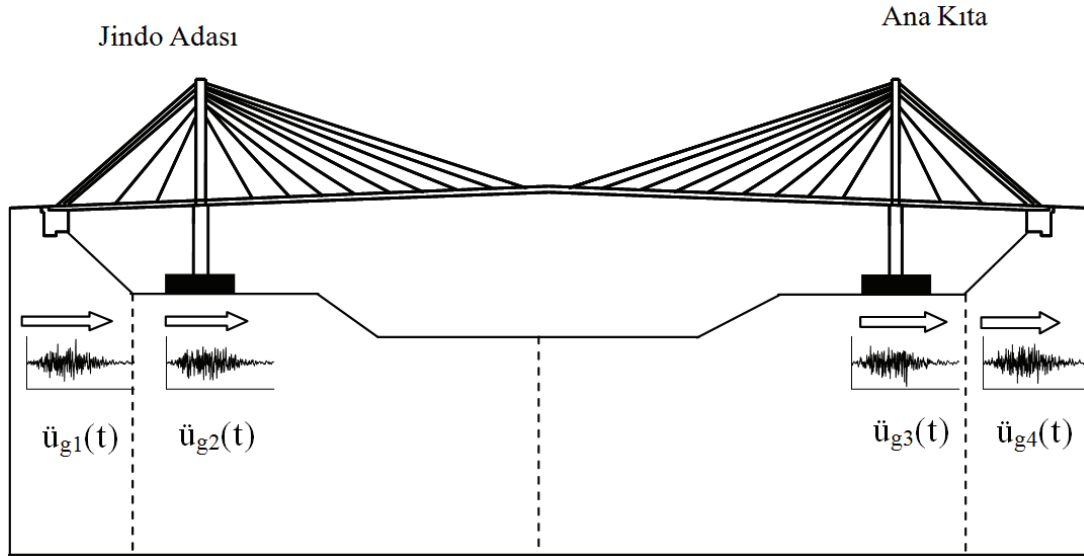
Tablo 1 Zemin Özellikleri (Soil properties)

Zemin Cinsi	Zemin grubu tanımı	Birim hacim ağırlık γ (kN/m ³)	Kayma Dalgası Hızı V_s (m/s)	Sönüm Oranı (ξ)
Sert Zemin (B)	Sıkı kum, çakıl veya sert kil	24	1000	0,05
Orta Zemin (C)	Sıkı veya orta sıkı kum, çakıl veya sert kil	18	300	0,05
Yumuşak Zemin (D)	Gevşek-orta kohezyonsuz zemin	14	200	0,05

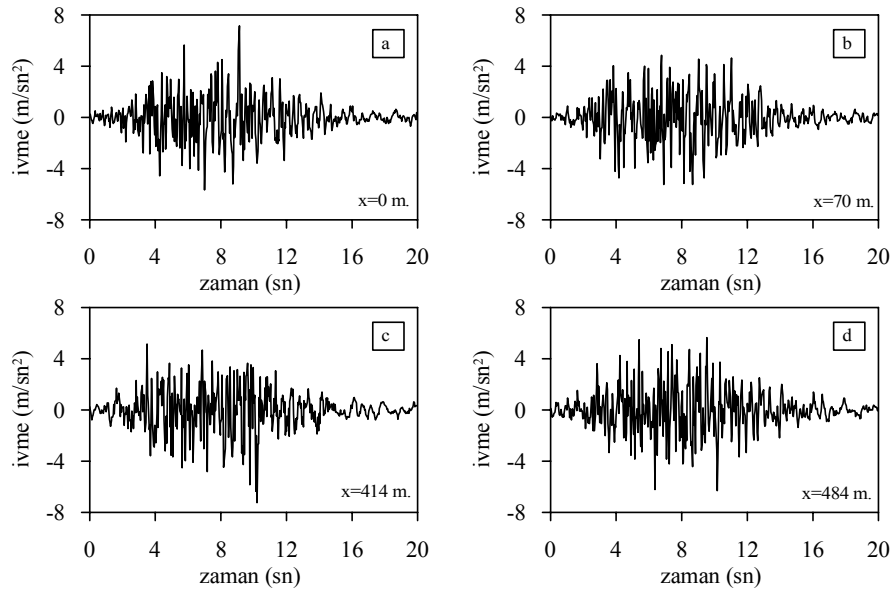
3. NÜMERİK ÇÖZÜMLER (NUMERICAL SOLUTIONS)

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. Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki Jindo Köprüsünün, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak dinamik analizinin gerçekleştirilebilmesi için, iki boyutlu matematik model esas alınmıştır. Köprü sistemine boyuna doğrultuda etkiyen yer hareketinin, Jindo Adası yönünden ana kıta yönüne doğru ilerlediği kabul edilmiştir (Şekil 1). İteratif bir yöntemle sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında dalga yayılma ve korelasyon etkileri dikkate alınarak, EC 8 [14] tasarım spektrumu uyumlu yer hareketi ivme kayıtları oluşturulmuştur. Şekil 2'de sert zemin koşullarında her bir köprü mesnedi için elde edilen yer hareketlerinin ivme-zaman grafikleri görülmektedir. Böylece her bir köprü mesnedi için elde edilen ve birbirinden farklı olan yer hareketleri, köprü sistemine boyuna doğrultuda etki ettirilmek suretiyle dinamik analiz yapılmıştır.

Bunun yanında, köprü sisteminin üzerine oturduğu zemin ortamı ile olan etkileşimi de yapı-zemin etkileşimi ile analizlerde dikkate alınmaktadır. Deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin köprü dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, köprünün mesnetlendiği zemin ortamı homojen olarak kabul edilmiş ve sert, orta ve yumuşak zemin koşulları için ayrı ayrı çözümler yapılmıştır. Deprem hareketi değişim etkilerini incelemek amacıyla köprü sistemi hem zemine ankastre mesnetli, hem de yapı-



Şekil 1. Boyuna doğrultuda yer hareketi etkisindeki köprü-zemin sistemi (Soil bridge system subjected to longitudinal ground motions)



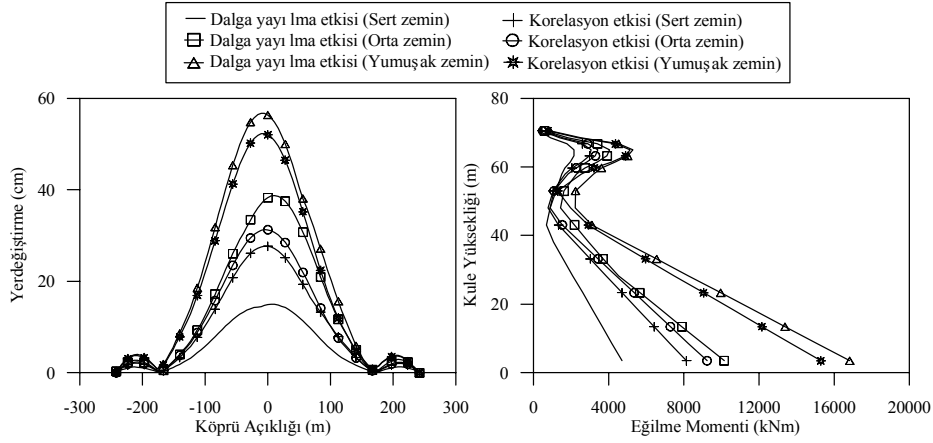
Şekil 2. a) Jindo Adası mesnedi b) Jindo kulesi mesnedi c) Ana kıta kule mesnedi d) Ana kıta mesnedi için oluşturulan yer hareketi ivme kayıtları (Ground motion acceleration records for a) Jindo Island abutment b) Jindo tower support c) Mainland tower support d) Mainland abutment)

zemin etkileşimi dikkate alınmak suretiyle tanımlanmış ve dinamik analizler her iki durum için de gerçekleştirilmiştir.

Yer hareketi ivme kayıtları Jindo Adası kenar mesnedi, Jindo Adası kule mesnedi, Ana Kıta kenar mesnedi ve Ana Kıta kule mesnedi için oluşturulmuştur. Yer hareketi ivme-zaman kayıtları toplam 20 s için üretilirken, 512 terim ve 0,039 s zaman artımı kullanılmıştır.

3.1. Zahiri-Statik Yapısal Tepkiler (Quasi-Static Structural Responses)

Gerek yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği, gerekse dikkate alındığı her iki model için de zahiri-statik yapısal tepkiler (1) ve (2) denklemlerinde görüldüğü gibi birbirine eşit olacaktır. Bu bağlamda tabliye ve Jindo kulesi için hesaplanan mutlak maksimum yerdeğiştirme ve eğilme momenti değerleri dikkate alınan analiz durumları için Şekil 3-4'de karşılaştırılmaktadır. Homojen sert zemin ortamında en büyük tabliye zahiri-statik düşey yerdeğiştirme değerleri korelasyon etkisi için gözlenirken, orta ve yumuşak zemin koşullarında en

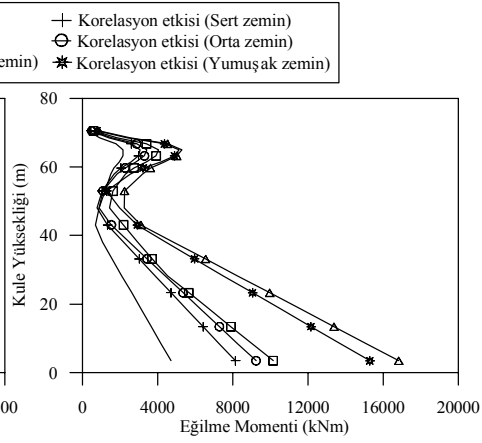


Şekil 3. Tabliye mutlak maksimum zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeleri (Absolute maximum vertical quasi-static deck displacements)

büyük yerdeğiştirmeler dalga yayılma etkisi için elde edilmiştir. Tabliye orta noktasında homojen sert zemin ortamında korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerinden %87 daha büyük olurken, orta ve yumuşak zemin koşullarında aynı noktada dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerleri, korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden sırasıyla %23 ve %8 daha büyük olarak elde edilmiştir. Jindo kulesi zahiri-statik eğilme momentleri incelendiğinde de benzer bir değişim olduğu görülmektedir. Kule taban noktasında elde edilen eğilme momenti değerleri karşılaştırıldığında, homojen sert zemin ortamında korelasyon etkisi için elde edilen moment değeri, dalga yayılma etkisi için elde edilen moment değerinden %73 daha büyük olurken, orta ve yumuşak zemin koşullarında aynı noktada dalga yayılma etkisi için elde edilen moment değerleri, korelasyon etkisi için elde edilen moment değerinden %10 daha büyük olarak elde edilmiştir.

3.2. Dinamik Yapısal Tepkiler (Dynamic Structural Responses)

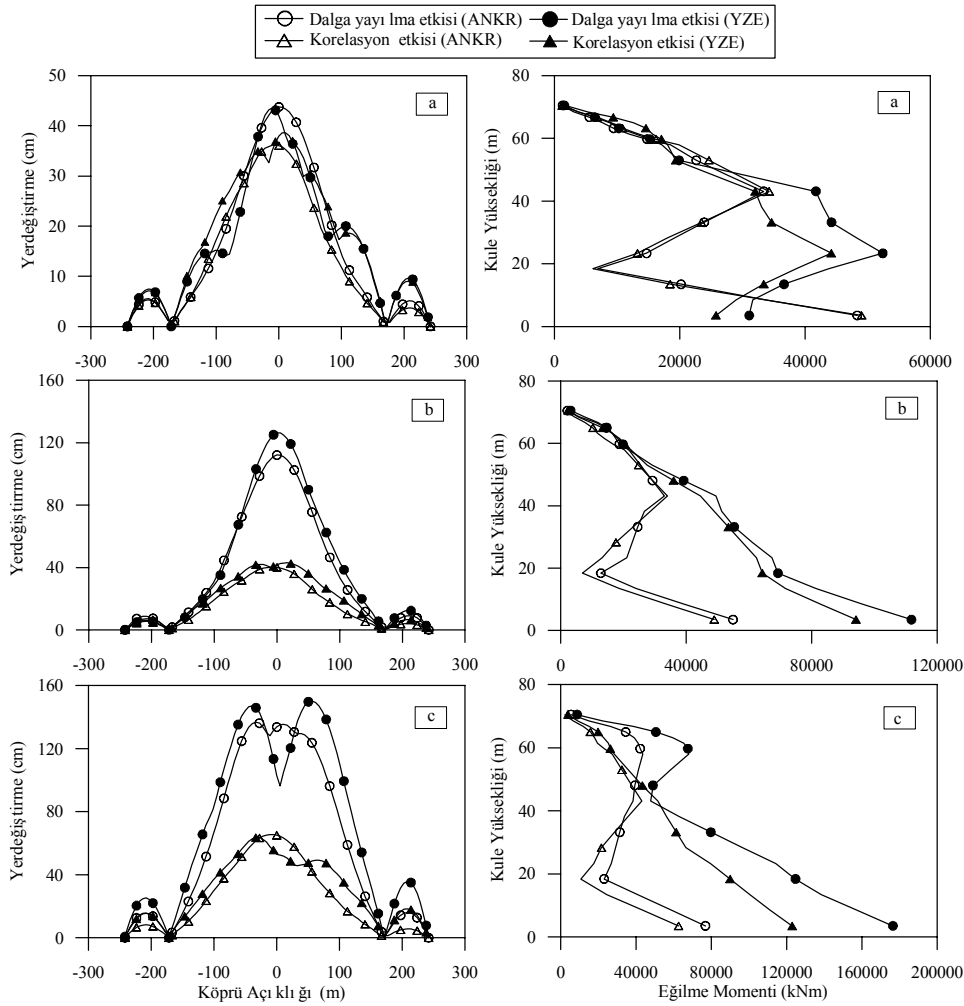
Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı (YZE) ve ihmal edildiği (ANKR) köprü modelleri için gerekli analizler yapılarak, elde edilen dinamik tepkiler mutlak maksimum değerler cinsinden karşılaştırılmaktadır. Şekil 5-a ve Şekil 6-a'da homojen sert zemin ortamında elde edilen tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmelerinin ve Jindo kulesi dinamik eğilme momentlerinin değişimi görülmektedir. Tabliye dinamik düşey yerdeğiştirme değişimi incelendiğinde, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği modelde genellikle dalga yayılma etkisi için elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirme değerlerinin korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden bir miktar daha büyük olduğu gözlenirken, yapı-zemin etkileşiminin dikkate



Şekil 4. Jindo kulesi mutlak maksimum zahiri-statik eğilme momentleri (Absolute maximum quasi-static bending moments of the Jindo Island tower)

alındığı modelde bazı noktalarda dalga yayılma etkisi için, bazı noktalarda da korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirmeler daha büyük çıkmıştır. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modellerde, tabliye orta noktasında dalga yayılma etkisi için elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirme değerleri, korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden sırasıyla %11 ve %22 daha büyük olarak elde edilmiştir. Ancak, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı analiz durumunda, tabliye açıklığında korelasyon etkisinin dalga yayılma etkisinden %93 daha büyük olduğu noktalar da söz konusudur. Şekil 6-a'da Jindo kulesi dinamik eğilme momentleri karşılaştırılmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelde, dalga yayılma ve korelasyon etkileri için elde edilen moment değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı modelde ise, kule yüksekliğinin büyük bölümünde dalga yayılma etkisi için elde edilen moment değerlerinin, korelasyon etkisi için elde edilen moment değerlerinden büyük olduğu gözlenmektedir.

Şekil 5-b ve Şekil 6-b'de homojen orta zemin için elde edilen tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmelerinin ve Jindo kulesi dinamik eğilme momentlerinin değişimi görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modellerde, dalga yayılma etkisi için elde edilen tabliye düşey yerdeğiştirmelerinin, korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirmelerden özellikle merkez açıklıkta çok daha büyük olduğu görülmektedir. Jindo kulesi dinamik eğilme momenti değişimi incelendiğinde ise, dalga yayılma etkisi için elde edilen eğilme momentlerinin, korelasyon etkisi için elde edilen momentlerden belirli bir oranda daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5-c ve Şekil 6-c'de homojen yumuşak zemin için elde edilen tabliye dinamik düşey yerdeğiştirmelerinin ve Jindo kulesi dinamik eğilme momentlerinin değişimi görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği her iki



Şekil 5. Tabliye mutlak maksimum dinamik düşey yerdeğiştirmeleri- a. Sert zemin b. Orta zemin c. Yumuşak zemin (Absolute maximum vertical dynamic deck displacements –a. firm soil, b. medium soil c. soft soil)

modelde de, homojen orta zemin için elde edilen yapısal tepkilere benzer olarak, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerin korelasyon etkisi için elde edilen tepki değerlerinden belirgin olarak daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması, kule yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerlerini, ankastre sisteme oranla önemli derecede arttırmıştır.

3.3. Toplam Yapısal Tepkiler (Total Structural Responses)

Bu bölümde, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı (YZE) ve ihmal edildiği (ANKR) köprü modelleri için elde edilen toplam yapısal tepkiler, mutlak maksimum değerler cinsinden karşılaştırılmaktadır. Şekil 7-a ve Şekil 8-a'da homojen sert zemin ortamında elde edilen, tabliye toplam düşey yerdeğiştirme ve Jindo kulesi toplam eğilme momenti değerleri karşılaştırılmaktadır. Tabliye toplam düşey yerdeğiştirme değişimi

Şekil 6. Jindo kulesi mutlak maksimum dinamik eğilme momentleri- a. Sert zemin b. Orta zemin c. Yumuşak zemin (Absolute maximum dynamic bending moments of the Jindo Island tower – a. firm soil, b. medium soil c. soft soil)

incelendiğinde, zahiri-statik yerdeğiştirme bileşeninin katkısıyla, korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin genellikle dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre modelde, tabliye orta noktasında korelasyon etkisi için elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri ile yaklaşık olarak aynı çıkarken, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı modelde korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değeri, dalga yayılma etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerinden %21 daha büyük olarak elde edilmiştir. Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi incelendiğinde ise, yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği modelde, kule yüksekliği boyunca korelasyon etkisi için elde edilen eğilme momentleri ile, dalga yayılma etkisi için elde edilen moment değerlerinin oldukça yakın çıktığı görülmüştür. Ancak, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması durumunda, dalga

yayıma etkisi için elde edilen moment değerlerinin, korelasyon etkisi için elde edilen moment değerlerinden genellikle daha büyük olduğu görülmektedir.

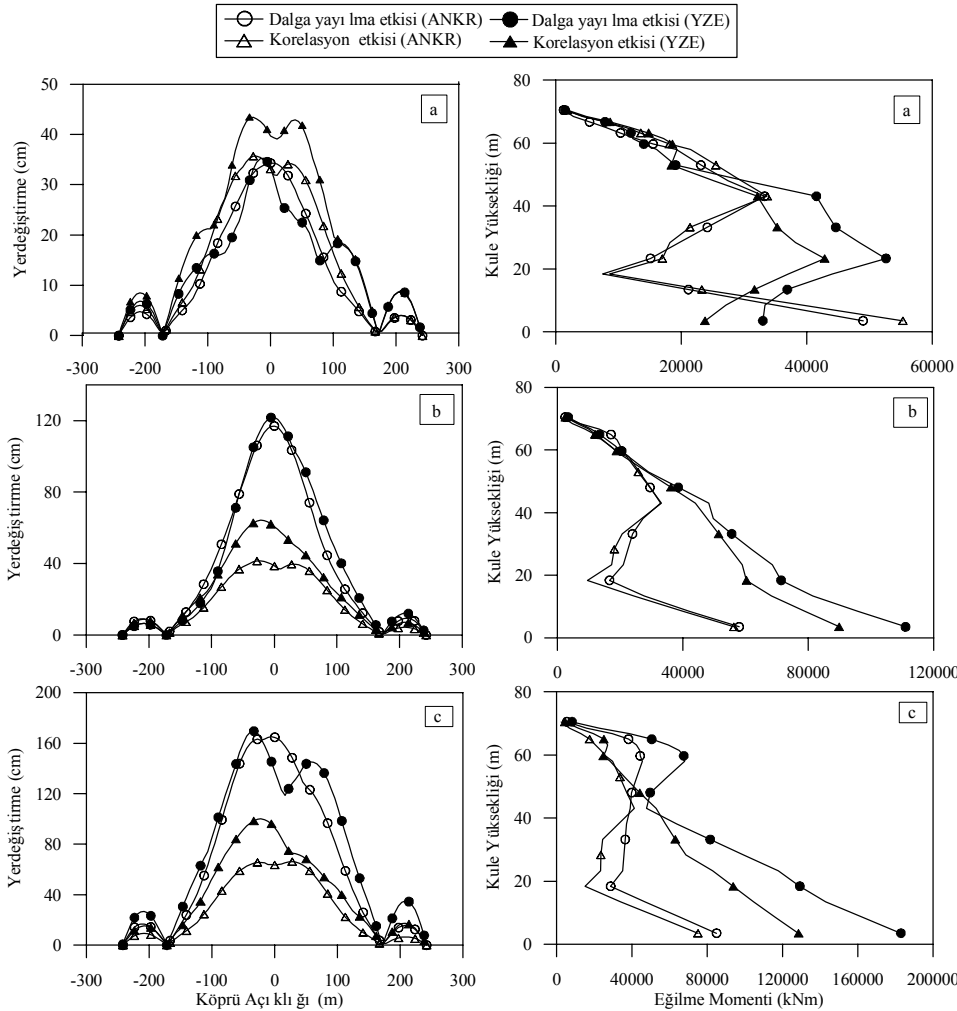
Şekil 7-b ve Şekil 8-b'de homojen orta zemin için elde edilen tabliye toplam düşey yerdeğiştirme ve Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi görülmektedir. Genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği her iki modelde de, dalga yayılma etkisi için elde edilen yapısal tepkilerin, korelasyon etkisi için elde edilen yapısal tepkilerden daha büyük olduğu görülmektedir.

Şekil 7-c ve Şekil 8-c'de homojen yumuşak zemin için elde edilen tabliye toplam düşey yerdeğiştirme ve Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi karşılaştırılmaktadır. Homojen orta zeminde olduğu

gibi, genel olarak dinamik tepkiler için elde edilen değişime benzer bir değişim elde edilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı ve ihmal edildiği modellerde, tabliye orta noktasında dalga yayılma etkisi için elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, korelasyon etkisi için elde edilen yerdeğiştirme değerlerinden sırasıyla % 48 ve %158 daha büyük olarak elde edilmiştir. Jindo kulesi toplam eğilme momenti değişimi incelendiğinde ise, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının yer hareketi değişim bileşenlerine oranla eğilme momenti değerlerini daha fazla arttırdığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kablolu köprü türü uzun açıklıklı köprü sistemlerinin dinamik davranışının, yer hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkileri açısından incelendiği bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 7. Tabliye mutlak maksimum toplam düşey yerdeğiştirmeleri- a. Sert zemin b. Orta zemin c. Yumuşak zemin (Absolute maximum vertical total deck displacements -a. firm soil, b. medium soil c. soft soil)

Şekil 8. Jindo kulesi mutlak maksimum toplam eğilme momentleri- a. Sert zemin b. Orta zemin c. Yumuşak zemin (Absolute maximum total bending momentsof the Jindo Island tower - a. firm soil, b. medium soil, c. soft soil)

Homojen sert, orta ve yumuşak zemin koşullarında deprem hareketi değişim bileşenlerinden dalga yayılma ve korelasyon etkilerinin zahiri-statik köprü tepkileri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, köprünün mesnetlendiği zemin ortamının sert olması durumunda, korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerin dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerden daha büyük olduğu, ancak zemin ortamının zayıflaması ile, orta ve yumuşak zemin koşullarında dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerin daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır.

Dinamik köprü tepkileri incelendiğinde ise, gerek yapı-zemin etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durumda ve gerekse de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda, dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler özellikle orta ve yumuşak zemin koşullarında, korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerden belirgin bir şekilde daha büyük çıkmıştır. Zeminin sert olması durumunda ise, yine dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkiler genellikle ön plana çıkmakla birlikte, korelasyon etkisinin de etkin olduğu durumlar söz konusu olmuştur.

Bunun yanında, yer hareketi değişim bileşenlerinin toplam köprü tepkileri üzerindeki etkileri irdelendiğinde, zemin koşulunun sert olması durumunda zahiri-statik bileşenin de katkısıyla, korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerin dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerden özellikle tabliyede daha büyük olduğu gözlenmiştir. Yumuşak ve orta zemin koşullarında ise, toplam tepkilerin değişimi üzerinde dinamik bileşenin katkısının oldukça belirgin olduğu ve dalga yayılma etkisi için elde edilen tepkilerin korelasyon etkisi için elde edilen tepkilerden daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hao, H., Bolt, B.A. ve Penzien, J., “**Effects of Spatial Variation of Ground Motions on Large Multiply-Supported Structures**”, Report No: UCB/EERC-89/06, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, 1989.
- Betti, R., **Dynamic Soil-Structure Interaction for Long-Span Cable-Supported Bridges**, Doktora Tezi, University of Southern California, California, USA, 1991.
- Shrikhande, M. ve Gupta, V.K., “Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Suspension Bridges”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Cilt 28, No 11, 1383-1403, 1999.
- Sextos, A.G., Kappos, A.J. ve Mergos, P., “Effect of Soil-Structure Interaction and Spatial Variability of Ground Motion on Irregular Bridges: The case of the Krystallopigi Bridge”, **13th World Conference on Earthquake Engineering**, Vancouver, Canada, Paper No. 2298, 2004.
- Chouw, N. ve Hao, H., “Study of SSI and Non-Uniform Ground Motion Effect on Pounding Between Bridge Girders”, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, Cilt 25, 717-728, 2005.
- Konduru, V.R. ve Allam, M.A., “Response of an Open-Plane Frame to Multiple-Support Horizontal Seismic Excitations with Soil-Structure Interaction”, **Journal of Sound and Vibration**, Cilt 299, 388-396, 2007.
- Bi, K., Hao, H. ve Chouw, N., “Influence of Ground Motion Spatial Variation, Site Condition and SSI on the Required Separation Distances of Bridge Structures to Avoid Seismic Pounding”, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, Cilt 40, 1027–1043, 2011.
- Sıcacık, E.A., **Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketi Etkisindeki Kablolu Köprülerin Yapı-Zemin Etkileşim Analizi**, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- Wong, H. L., Luco, J. E., “**Tables of Impedance Functions and Input Motions for Rectangular Foundations**” Report No: CE 78-15, Los Angeles, California, 1978.
- 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), 1991.
- Harichandran, R.S. ve Vanmarcke, E.H., “Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time”, **Journal of Engineering Mechanics**, Cilt 112, No 2, 154-174, 1986.
- Harichandran, R.S., Hawwari, A. ve Sweiden, B.N., “Response of Long-Span Bridges to Spatially Varying Ground Motion”, **Journal of Structural Engineering**, Cilt 122, No 5, 476-484, 1996.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., **Dynamics of Structures**, McGraw Hill, Inc., Singapore, 1993.
- Eurocode 8, **Design of Structures for Earthquake Resistance. General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings**, Brussels, 2004.

