KABLO DESTEKLİ KÖPRÜLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

H. Kartal[1] ve K. Soyluk[2]

[1] *İnşaat Yüksek Mühendisi, Es Proje, Ankara*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara*
Email: kartalhuseyin@hotmail.com

ÖZET:

Bu çalışmada, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamalarının, asma ve kablolu köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, birbirine yakın merkez açıklıklara sahip bir kablolu köprü sistemi ile bir asma köprü sistemi ele alınmıştır. Sayısal model olarak kablolu köprü örneği için Japonya'da inşa edilen Tatara Köprüsü, asma köprü için ise Türkiye'de inşa edilen Fatih Sultan Mehmet Köprüsü tercih edilmiştir. Tatara Köprüsü'nün toplam açıklığı 1480m olup, merkez açıklığı 890m'dir. İstanbul'da bulunup Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün merkez açıklığı 1090m'dir. Her iki köprünün de üç boyutlu sonlu eleman modeli MULSAP bilgisayar programı ile hazırlanmıştır. Çalışmada köprü sistemine uygulanan yer hareketleri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak üretilmiştir. Çalışma sonucunda, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının asma köprü modeli üzerindeki etkisinin, kablolu köprü modeli üzerindeki etkisine oranla daha büyük olduğu, üniform yer hareketi etkisi için ise kablolu köprü modelinin asma köprü modeline göre daha duyarlı olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Kablolu köprü, asma köprü, mesnetlerinden farklı yer hareketi, üniform yer hareketi.

1. GİRİŞ

Son yıllara kadar kablolu (cable-stayed) köprüler orta açıklıkları (400-700m) geçmek için tercih edilirken, asma (suspension) köprüler uzun açıklıkları (>1000m) geçmek için tercih edilmekteydi. Fakat son zamanlarda köprü sektöründeki teknolojik gelişmeler ile birlikte, kablolu köprüler de daha uzun açıklıklar için tercih edilmeye başlanmıştır. Örneğin, Rusya'da inşa edilen 1104m merkez açıklıklı Russky Köprüsü bu eğilimi göstermektedir. Bu durumda merkez açıklığın 1000m'ye ulaştığı köprü sistemlerinde, köprü tipinin seçimine karar vermek açısından kablolu ve asma tür köprülerin dinamik davranışlarının detaylı araştırılması gerekli olmaktadır. Deprem esnasında kablolu köprüler ile asma köprülerin dinamik davranışları arasındaki farklar göz önünde bulundurulduğunda, eşit açıklıklara sahip bu köprülerin dinamik davranışlarını tanımlayabilmek büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketlerinin, asma ve kablolu köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için, birbirine yakın merkez açıklıklara sahip bir kablolu köprü sistemi ile bir asma köprü sistemi ele alınmaktadır.

Mesnetlerinden farklı yer hareketi için asma ve kablolu köprüleri analiz eden birçok çalışma bulunmasına rağmen, literatürde yakın açıklıklı asma ve kablolu köprülerin sismik davranışını, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi için karşılaştırmalı olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki kablo destekli köprülerin rasgele titreşim analizi Soyluk ve diğ. (2007) tarafından yapılmasına rağmen, ele alınan asma köprünün merkez açıklık boyu, kablolu köprünün merkez açıklık boyunun üç katından daha büyüktür. Şu ana kadar yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular, orta açıklıklar için kablolu

köprülerin daha ekonomik olduğu yönündedir. Fakat, tasarım ve yapımdaki tecrübelerin gelişmesi ile uzun açıklılar için kablolu köprülerin uygulaması artmıştır (Podolny 1976). Örneğin, Leonhardt (1970) kablolu köprülerin özellikle 600m açıklıkları geçmek için uygun olduğunun ve hatta 1500m den daha uzun açıklıkları geçmek için de kullanılabileceğinin altını çizmiştir. Kablolu köprüler ile asma köprülerin ekonomik yönden karşılaştırmasını yapan bir başka çalışmada ise, 1600m ye kadar kablolu köprülerin ekonomik bir alternatif olabileceği belirtilmiştir (Nagai et al. 1998).

Bu çalışmada, deprem hareketinin köprülerin davranışları üzerindeki göreceli önemini vurgulamak maksadıyla, dikkate alınan köprü modelleri için farklı zemin gruplarına ait üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi etkileri altında elde edilen köprü davranışları karşılaştırılmaktadır. Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için belirlenen deprem hareketi kayıtları rasgele titreşim teorisi kullanılarak üretilirken, üretilen her bir kayıt Eurocode 8 davranış spektrumu ile uyumlu olacak şekilde elde edilmiştir.

2. YER HAREKETİ SİMULASYONU

Bu çalışmada kullanılan yer hareketi simulasyonu, Hao ve diğ. (1989). tarafından geliştirilen simulasyon metodunu esas almaktadır. Bu yöntemle değişerek yayılan yer hareketi etkisi için belirlenen deprem hareketi kayıtları, rasgele titreşim teorisi kullanılarak simule edilmiştir. Bu yöntem, uygunluk fonksiyonu ile spektral yoğunluk fonksiyonlarına bağlı olarak değişerek yayılan yer hareketlerinin üretilmesini için kullanılmaktadır. i ve j mesnet noktalarındaki ivmeler için uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\gamma_{ij}(iw) = \frac{S_{ij}(iw)}{\sqrt{S_{ii}(w) * S_{jj}(w)}} \tag{1}$$

Burada, $S_{ii}(w)$ ve $S_{jj}(w)$ sırasıyla, i ve j mesnetlerindeki yer hareket ivmelerine ait spektral yoğunluk fonksiyonlarını gösterirken, $S_{ij}(iw)$ i ve j mesnetlerindeki yer hareket ivmeleri arasındaki karşıt-spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Uygunluk fonksiyonu ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\gamma_{ij}(iw) = \left|\gamma_{ij}(w)\right|^{i} \gamma_{ij}(iw)^{w} \gamma_{ij}(iw)^{s} = \left|\gamma_{ij}(w)\right|^{i} \exp\left[i\left(\theta_{ij}(w)^{w} + \theta_{ij}(w)^{s}\right)\right] \tag{2}$$

Burada $\gamma_{ij}(w)^{i}$ ve $\gamma_{ij}(iw)^{w}$, $\gamma_{ij}(iw)^{s}$ sırası ile korelasyon, dalga-yayılma ve zemin etkilerini ifade etmektedir. Zemindeki dalgaların yayılması esnasında yansıması ve kırılması sonucu oluşan korelasyon etkisi için, Harichandran ve Vanmarcke (1986) tarafından önerilen ve yaygın olarak kullanılan model düşünülmüştür. Dalgaların mesnet noktalarına varış süreleri arasındaki farktan kaynaklanan dalga-yayılma etkisi

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

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada v_{app} görünen dalga yayılma hızını ifade etmekte olup, d_{ij}^{L} dalga yayılma doğrultusunda mesnetler arasındaki yatay izdüşüm uzaklığını göstermektedir. Lokal zemin koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanan zemin etkisi ise

$$\theta_{ij}(w)^s = \tan^{-1}\frac{\mathrm{Im}\left[H_i(iw)H_j(-iw)\right]}{\mathrm{Re}\left[H_i(iw)H_j(-iw)\right]} \tag{4}$$

ifadesi ile tanımlanırken, burada $H_i(iw)$ zemin katmanlarındaki filtrasyonu temsil eden zemin frekans davranış fonksiyonudur.

Yer ivmesinin spektral yoğunluk fonksiyonu için, Clough ve Penzien (1993) tarafından geliştirilen filtre edilmiş beyaz gürültü modeli kullanılmaktadır.

$$S_{ii}(w) = So\,\frac{w_g^4 + 4\zeta_g^2 w_g^2 w^2}{(w_g^2 - w^2)^2 + 4\zeta_g^2 w_g^2 w^2}\,\frac{w^4}{(w_f^2 - w^2)^2 + 4\zeta_f^2 w_f^2 w^2} \tag{5}$$

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. Yer hareketi elde etmek için, ilk olarak belirtilen spektral yoğunluk fonksiyonları ile uyumlu stasyoner rasgele işlem örnekleri $\ddot{u}_1(t)$, $\ddot{u}_2(t)$, …, $\ddot{u}_n(t)$, oluşturulmaktadır (Hao et al. 1989). Bu amaçla,

$$\ddot{u}_k(t) = \sum_{m=1}^{k}\sum_{l=1}^{N} A_{km}(w_l)\cos[w_l t + \theta_{km}(w_l) + \varphi_{ml}(w_l)] \tag{6}$$

ifadesi kullanılmaktadır. Burada $w_l = l\Delta w$, $\Delta w = w_N/N$, w_N üst kesim frekansını, $\varphi_{ml}(w_l)$ 0-2π aralığında üniform dağılım gösteren rasgele faz açısını (φ_{ml} ve φ_{rs} m=r ve n=s olması dışında istatistiksel olarak bağımsız olmalıdır), k mesnet noktalarını ifade etmekte olup, $A_{km}(w_l)$ ve $\theta_{km}(w_l)$ ise oluşturulmuş kayıtların genlik ve faz açısını ifade etmektedir.

$$A_{km}(w_l) = \sqrt{4\Delta w}\left|L_{km}(iw_l)\right| \tag{7}$$

$$\theta_{km}(w_l) = \tan^{-1}\left\{\frac{\mathrm{Im}[L_{km}(iw_l)]}{\mathrm{Re}[L_{km}(iw_l)]}\right\} \tag{8}$$

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

$$a_k(t) = \xi(t)\ddot{u}_k(t) \tag{9}$$

Şekil fonksiyonu ξ(t) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\xi(t) = \begin{cases} (t/t_0)^2 & 0 \le t \le t_0 \\ 1 & t_0 < t \le t_n \\ \exp(-0.394(t - t_n)) & t_n < t \end{cases} \tag{10}$$

Burada t_0 ve t_n dominant deprem titreşim bölgesindeki stasyoner bölümüm başlangıç ve bitiş sürelerini göstermektedir. Bu çalışmada t_0=4s ve t_n=10s değerleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareket ivme kayıtları, %2 sönüm oranı için ve 0.5g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle, Eurocode 8

(2004)'e uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Spektrum uyumlu yer hareketi kayıtları oluşturulurken, sert, orta ve yumuşak zemin cinsleri için sırasıyla, EC8 de belirtilen B,C ve D zemin sınıfları kullanılmıştır.

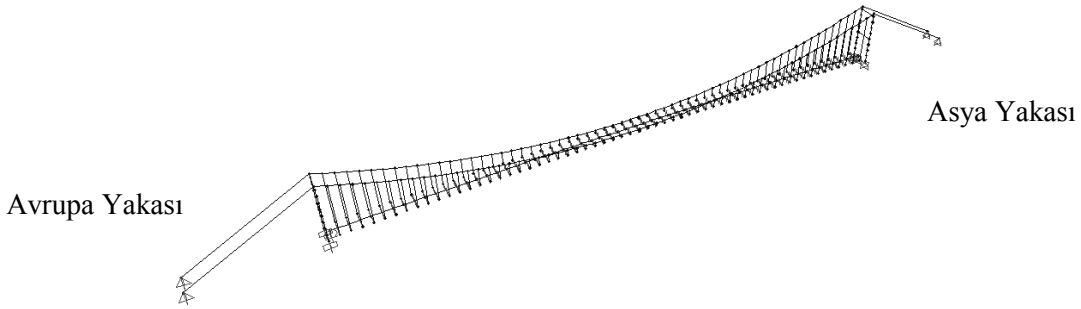
3. KÖPRÜLERİN SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bu çalışmada, kablolu köprülerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışını belirlemek için sayısal model olarak Japonya'da bulunan Tatara Kablolu köprüsü seçilirken, asma köprü olarak da Türkiye'de bulunan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü seçilmiştir. Tatara Köprüsü'nün toplam uzunluğu 1480m olup, merkez açıklığı 890m dir. İstanbul'da bulunup Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün merkez açıklığı ise 1090m dir.

3.1. Asma Köprü Modeli

Fatih Sultan Mehmet (FSM) Asma Köprüsü kenar açıklıkları olmayan, çelik kulesi ve çift düşey askı kabloları olan ve ağırlık ankraj sistemine sahip bir asma köprüdür. Kutu kesitli tabliye genişliği 39,4m olup, 4 şeritli otoyol taşımaktadır. Ana kuleler 110m yüksekliğindedir. Ortotropik kutu kesitli çelik asma tabliyesi aerodinamik bir enkesite sahiptir. Tabliye otoyolu kule temellerinin yaklaşık 8m üstündedir. Tabliye ile kule bağlantı noktasındaki genleşme rulmanları, tabliyenin boyuna yönde hareket etmesine ve yanal eksende dönmesine müsaade ederken, diğer yönlerde hareket etmesine ve dönmesine engel olacak şekilde tasarlanmıştır. (Apaydin 2010).

Gerçekçi deprem analizi için asma köprünün üç boyutlu analitik modeli oluşturulmuştur (Şekil 1). İki boyutlu model ile hesaba katılamayan burulma modları ve kabloların anti-faz yanal titreşim modları, üç boyutlu modelleme yapılarak dikkate alınmıştır (Dumanoglu ve diğ. 1992). Tabliye, kuleler ve kablolar çubuk kiriş elemanlar ile modellenirken, askılar kafes elemanı ile modellenmiştir. Köprünün sonlu eleman modeli, 346 adet düğüm noktasına, 227 adet kiriş elemanına, 120 adet rijit bağlantı elemanına ve 120 adet kafes elemanına sahiptir. Tabliye geometrisi, tabliye kesitinin orta noktasından geçen bir çizgi üzerinde tariflendiğinden, rijit bağlantı elemanları ile modellenmiştir. Rijit bağlantı elemanları tabliye ile askılar arasında bağlayıcı görevi görmektedir. Bu kütlesiz bağlantı elemanları rijit cisim davranışını yansıtabilmek amacıyla kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli 2048 adet serbestlik derecesi ile tanımlanırken, hesaplamalarda sönüm oranı %2 olarak ele alınmıştır. Analizler ilk 15 mod için gerçekleştirilirken, P-Δ etkileri kablolar ve askılar için göz önünde bulundurulmuştur.



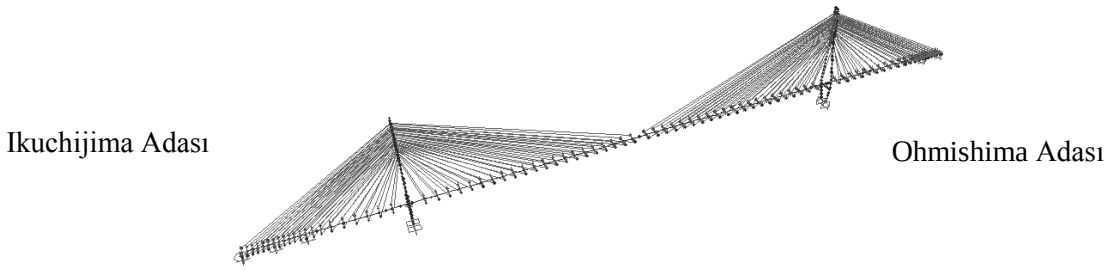
Şekil 1. Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

3.2. Kablolu Köprü Modeli

Tatara Köprüsü'nün toplam uzunluğu 1480 m olup, merkez açıklığı 890m, kenar açıklık mesafeleri ise 270m ve 320m'dir. Tabliye kesiti orta kısımda 1312m boyunca çelik olup, 105.5m ve 62.5m'lik kenar kısımlarda negatif reaksiyonu engellemek için öngerilmeli beton kullanılmıştır. Ana kule 220 m yüksekliğinde ve ters Y şeklinde

tasarlanmış olup, kablo yerleşim şekli yelpaze sistemdir. 21 seviyede monte edilen kablolar iki düzlemlidir (Yabuna ve diğ. 2001).

Dinamik hesaplamalar için üç boyutlu analitik model oluşturulmuştur (Şekil 2). Köprünün sonlu eleman modelinde 450 adet düğüm noktası, 283 adet kiriş elemanı, 168 adet rijit bağlantı elemanı ve 168 adet kafes elemanı kullanılmıştır. Tabliye ve kuleler çubuk kiriş elemanı olarak modellenirken, kablolar kafes elemanı olarak modellenmiştir. Kutu kesitli tabliye, tabliyenin ortasından geçen eşdeğer kiriş elemanı olarak tariflenmiştir. Tabliyenin her bir kablo bağlantı noktasında, kabloların tabliye merkezinden olan mesafelerini uygun şekilde dikkate alabilmek amacıyla, tabliye eksenine dik olacak şekilde yatay yönde rijit bağlantı elemanları yerleştirilmiştir. Kablolar rijit bağlantı elemanlarının dış noktalarına bağlanmıştır. Eşdeğer kiriş elemanları ve rijit bağlantı elemanların asıl görevi rijitlik sağlamak olduğundan kütlesiz olarak tariflenmiştir (Wilson ve Gravelle 1991). Tabliyenin kütlesi her bir rijit bağlantı elemanının dış uç noktasında toplanmıştır. Rijit bağlantı elemanları aynı zamanda tabliye çubuk elemanları ile kule çubuk elemanlarının birleşim noktalarında da kullanılmıştır. Bu bağlantı elemanları yatayda ve düşeyde sabit olup köprünün boyuna yönünde 20000 kN/m'lik rijitliğe sahiptir. Eşdeğer elastisite modülü kullanılarak kabloların doğrusal olmayan davranışları göz önünde bulundurulmuştur.

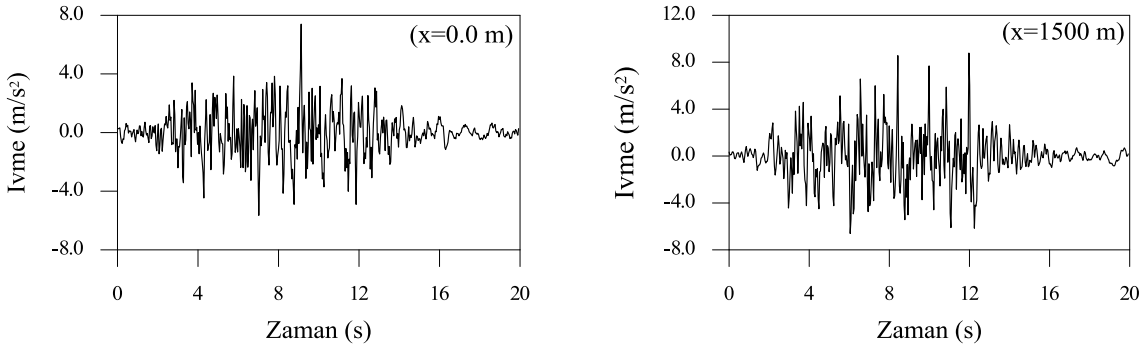


Şekil 2**.** Tatara Kablolu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamalarının kablo destekli köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için karşılaştırmalı bir analiz yapılması amaçlanmıştır. Köprü modellerinin mesnet noktalarında homojen sert, orta ve yumuşak zemin koşulları düşünülmüş ve üniform yer hareketi için korelasyon, dalga-yayılma ve zemin etkileri ihmal edilmiştir. Değişerek yayılan yer hareketi bileşenleri olan korelasyon, dalga-yayılma ve zemin etkilerine bağlı olarak, mesnetlerinden farklı yer hareketi için yer hareketi kayıtları oluşturulmuştur. Sayısal hesaplamaları gerçekleştirmek için, SAP4 yapısal analiz programının bir uyarlaması olan MULSUP bilgisayar programının değiştirilmiş versiyonu kullanılmıştır.

Bu çalışmada, farklı yer hareketi etkisi için belirlenen deprem hareketi kayıtları, rasgele titreşim teorisi esas alınarak üretilmiştir. Üretilen her bir kayıt öngörülen spektral yoğunluk fonksiyonu ile uyumludur. Üniform yer hareketi için köprü modelinin mesnetlerinde EC8'e göre sınıflandırılmış homojen sert (B), orta (C) ve yumuşak (D) zemin koşulları dikkate alınırken, değişerek yayılan yer hareketleri için heterojen zemin koşulları dikkate alınmıştır. Örneğin, BC kısaltması ile tanımlanan farklı yer hareketi için, köprü modelinin bir yakasında sert (B) zemin sınıfı olduğu kabul edilirken, diğer yakasında orta (C) zemin sınıfının olduğu kabul edilmiştir. Yayılma yönünün, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamaları için kablolu köprü modelinde Ikuchijima Adası'ndan Ohmishima Adasına doğru, asma köprü modelinde ise Avrupa Kıtası'ndan Asya Kıtası'na doğru olduğu kabul edilmiştir. Üniform yer hareketi "uniform", mesnetlerinden farklı yer hareketi "mul-sup" olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. CD heterojen zemin durumu farklı yer hareketi uygulaması için ivme kayıtları.

Köprü mesnetlerine uygulanacak yer hareketleri oluşturulurken, köprü ayakları arası mesafe 1500m olarak kabul edilmiş ve dalga yayılma hızı 1000m/s alınmıştır. Yer hareketi kayıtları oluşturulurken 20 sn'lik ivme kayıtları, 512 terim ve Δt=0.039 zaman artımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareketi ivme kayıtları, %2 sönüm oranı için ve 0.5g PSA'ya göre normalize edilmek suretiyle, Eurocode 8 (2004)'e uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 3).

4.1. Yer Hareketlerinin Köprü Davranışları Üzerindeki Göreceli Etkileri

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamaları için elde edilen maksimum zahiri-statik, dinamik ve toplam tabliye ve kule deplasman değerleri Tablo 1-3'de karşılaştırılmaktadır. Tabliyede ve kulede elde edilen maksimum zahiri-statik deplasman değerleri, merkez açıklık uzunluğuna ve kule yüksekliğine bölünerek Tablo 1'de gösterilmiştir. Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketinin asma ve kablolu köprü üzerindeki göreceli etkilerini belirlemek için, asma köprü için elde edilen deplasman oranları kablolu köprü için elde edilen deplasman oranları ile normalleştirilerek tablonun c sütununda verilmiştir. Üniform yer hareketi etkisi için asma köprünün tabliyesinde oluşan zahiri-statik düşey deplasman değeri oranı, kablolu köprünün tabliyesinde oluşan düşey deplasman oranının yaklaşık 0.82 katıdır. BC, BD ve CD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için asma köprü tabliyesinde elde edilen zahiri-statik deplasman değerlerinin oranları, kablolu köprü tabliyesinde elde edilen deplasman değerleri oranlarının sırasıyla 1.27, 1.07 ve 1.11 katıdır. Her iki köprü modelinde maksimum yatay zahiri-statik deplasman değerleri her bir zemin cinsi durumunda üniform ve farklı yer hareketi etkisi için zemin yerdeğiştirmelerine eşit olduğundan ve kablolu köprünün kule yüksekliğinin asma köprünün kule yüksekliğinin iki katı olmasına bağlı olarak, asma köprü maksimum yatay zahiri-statik deplasman değeri oranı, kablolu köprü için elde edilen oranın iki katı olmuştur.

Tablo 1. Maksimum zahiri-statik deplasman değeri oranları

Yer Hareketi	Tabliye Düşey [$(u_3/L)*10^{-3}$]			Kule Yatay [$(u_2/h)*10^{-3}$]		
	Asma köprü (a) L=1090 m	Kablolu Köprü (b) L=890 m	c=(a)/(b)	Asma köprü (a) h=110.1 m	Kablolu Köprü (b) h=220 m	c=(a)/(b)
uniform (BB)	0.113	0.139	0.81	1.123	0.562	2.00
uniform (CC)	0.126	0.154	0.82	1.248	0.625	2.00
uniform (DD)	0.198	0.242	0.82	1.959	0.980	2.00
mul-sup (BC)	0.358	0.280	1.27	1.126	0.563	2.00
mul-sup (BD)	0.582	0.542	1.07	1.126	0.563	2.00
mul-sup (CD)	0.632	0.568	1.11	1.244	0.622	2.00

Tablo 2. Maksimum dinamik deplasman değeri oranları

Yer Hareketi	Tabliye Düşey [$(u_3/L)*10^{-3}$]			Kule Yatay [$(u_2/h)*10^{-3}$]		
	Asma köprü (a) L=1090 m	Kablolu Köprü (b) L=890 m	c=(a)/(b)	Asma Köprü (a) h=110.1 m	Kablolu Köprü (b) h=220 m	c=(a)/(b)
uniform (BB)	0.317	0.481	0.66	0.251	2.756	0.09
uniform (CC)	0.404	0.576	0.70	0.301	3.209	0.09
uniform (DD)	0.676	0.952	0.71	0.500	5.207	0.10
mul-sup (BC)	0.841	0.510	1.65	0.527	2.914	0.18
mul-sup (BD)	1.037	0.884	1.17	0.580	2.968	0.20
mul-sup (CD)	1.220	0.857	1.42	0.683	3.405	0.20

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi için kule ve tabliyede elde edilen maksimum dinamik deplasman değerleri Tablo 2'de karşılaştırılmaktadır. Üniform yer hareketi etkisi için asma köprünün tabliyesinde elde edilen dinamik deplasman değerleri oranı, kablolu köprünün tabliyesinde elde edilen deplasman değeri oranlarının yaklaşık 0.70 katıdır. BC, BD ve CD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için asma köprü tabliyesinde elde edilen dinamik deplasman değeri oranları, kablolu köprü tabliyesinde elde edilen deplasman değerleri oranlarının sırasıyla 1.65, 1.17 ve 1.42 katıdır. Diğer taraftan, her bir zemin grubu için üniform yer hareketi etkisi için, asma köprü modelinde elde edilen kule maksimum yatay dinamik deplasman değeri oranları, kablolu köprü modelinin kulesinde elde edilen maksimum yatay dinamik deplasman değeri oranlarının 0.10 katı iken, mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için bu oran yaklaşık 0.20 katı olmaktadır. Böylece, kablolu köprü kule yüksekliğinin asma köprü kule yüksekliğinin iki katı olmasının dinamik davranış üzerindeki etkisinin burada ortaya çıktığı görülmektedir.

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi için kule ve tabliyede elde edilen maksimum toplam deplasman değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Üniform yer hareketi etkisi için asma köprünün tabliyesinde elde edilen toplam deplasman değeri oranı, kablolu köprünün tabliyesinde elde edilen deplasman değeri oranının yaklaşık 0.75 katıdır. BC, BD ve CD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için asma köprü tabliyesinde elde edilen toplam deplasman değeri oranları, kablolu köprü tabliyesinde elde edilen deplasman değerli oranlarının sırasıyla 1.69, 1.11 ve 1.39 katıdır. Diğer taraftan, her bir zemin grubu için üniform yer hareketi etkisine bağlı olarak asma köprü kulesinde elde edilen toplam yatay deplasman değeri oranları, kablolu köprü kulesinde elde edilen maksimum yatay toplam deplasman değeri oranlarının 0.38 katı iken, mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için bu oran yaklaşık olarak 0.36 katı olmaktadır.

Tablo 3. Maksimum toplam deplasman değeri oranları

Yer Hareketi	Tabliye Düşey [$(u_3/L)*10^{-3}$]			Kule Yatay [$(u_2/h)*10^{-3}$]		
	Asma Köprü (a) L=1090 m	Kablolu Köprü L=890 m	c=(a)/(b)	Asma Köprü (a) h=110.1 m	Kablolu Köprü (b) h=220 m	c=(a)/(b)
uniform (BB)	0.346	0.494	0.70	1.123	2.885	0.39
uniform (CC)	0.457	0.613	0.75	1.248	3.286	0.38
uniform (DD)	0.754	0.997	0.76	1.959	5.209	0.38
mul-sup (BC)	0.836	0.496	1.69	1.126	3.073	0.37
mul-sup (BD)	1.000	0.897	1.11	1.126	3.136	0.36
mul-sup (CD)	1.210	0.871	1.39	1.244	3.573	0.35

Bu sonuçlar göstermektedir ki, yer hareketi köprü mesnetlerine üniform bir şekilde uygulandığı takdirde, kablolu köprü modeli deprem yer hareketine asma köprü modelinden daha duyarlı olmaktadır. Diğer taraftan,

mesnetlerinden farklı yer hareketi göz önünde bulundurulduğunda ise, asma köprü modeli deprem yer hareketine daha duyarlı olmaktadır. Fakat, kablolu köprü modeli kule yüksekliğinin iki kat daha büyük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, hem üniform hem de mesnetlerinden farklı yer hareketi için, kablolu köprü modeli kule yatay deplasman değeri oranları asma köprü kule yatay deplasman değeri oranlarından daha büyük olmaktadır.

4.2. Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketi Uygulamasının Asma Köprü Davranışı Üzerindeki Etkisi

Heterojen zemin koşulları için, mesnetlerinden farklı yer hareketi için Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nde oluşan maksimum zahiri-statik, dinamik ve toplam tabliye ve kule deplasman değerleri belirlenmiş ve homojen zemin koşulları için üniform yer hareketi için elde edilen değerler ile orantılanarak Tablo'4 sunulmuştur. Tabliyede oluşan zahiri statik, dinamik ve toplam deplasman değerlerinin üniform yer hareketine oranla, mesnetlerinden farklı yer hareketi durumu için oldukça arttığı gözlenmiştir. Örneğin, BC, BD ve CD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için asma köprü tabliyesinde elde edilen toplam deplasman değerleri, BB, BB ve CC homojen zemin koşullarında üniform yer hareketi için elde edilen deplasman değerlerinin sırasıyla 2.42, 2.90 ve 2.65 katı olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, BC, BD ve CD ile gösterilen mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamaları için elde edilen maksimum zahiri-statik yatay kule deplasman değerleri, BB, BB ve CC üniform yer hareketi uygulamaları için elde edilen değerlerle aynı çıkmıştır. Bu durum, heterojen ve homojen zemin koşullarında elde edilen maksimum zemin yerdeğiştirmelerinin eşit olmasından kaynaklanmıştır. Ancak, BC, BD ve CD ile gösterilen mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamaları için elde edilen maksimum zahiri-statik yatay kule deplasman değerleri, CC, DD ve DD üniform yer hareketi uygulamaları için elde edilen değerlerin sırasıyla 0.90, 0.58 ve 0.64 katı çıkmıştır. Bu durum, homojen zemin koşullarında (CC, DD ve DD) elde edilen maksimum zemin yerdeğiştirmelerinin, (BC, BD ve CD) heterojen zemin koşullarında elde edilen yerdeğiştirmelerden daha büyük olmasından kaynaklanmıştır. Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için belirlenen maksimum dinamik kule deplasman değerleri, üniform yer hareketi için belirlenen değerlerin iki katından daha fazla olabilmektedir. Toplam deplasman değerleri için elde edilen değişim de, dinamik deplasman değerlerinin zahiri-statik deplasman değerlerine oranla daha küçük olmasına bağlı olarak, zahiri-statik deplasman bileşenleri için elde edilen değişim gibi çıkmıştır.

Tablo 4. Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü maksimum deplasman değeri oranları

Yer Hareketi	Zahiri Statik Deplasmanlar		Dinamik Deplasmanlar		Toplam Deplasmanlar	
	Tabliye Düşey	Kule Yatay	Tabliye Düşey	Kule Yatay	Tabliye Düşey	Kule Yatay
mul-sup (BC) / üniform (BB)	3,19	1,00	2,65	2,10	2,42	1,00
mul-sup (BC) / üniform (CC)	2,84	0,90	2,08	1,75	1,83	0,90
mul-sup (BD) / üniform (BB)	5,15	1,00	3,27	2,31	2,90	1,00
mul-sup (BD) / üniform (DD)	2,94	0,58	1,53	1,16	1,33	0,58
mul-sup (CD) / üniform (CC)	5,02	1,00	3,02	2,27	2,65	1,00
mul-sup (CD) / üniform (DD)	3,19	0,64	1,81	1,37	1,61	0,64

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamaları için Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü'nde elde edilen maksimum tabliye, kule ve kablo kesit tesirleri belirlenmiş ve Tablo'5 sunulmuştur. Genellikle mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması için elde edilen eleman kuvvetlerinin üniform yer hareketi uygulaması için elde edilen değerlerden önemli ölçüde daha büyük çıktığı gözlenmiştir. Örneğin, BC, BD ve CD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için elde edilen toplam kablo normal kuvvetleri, BB, BB ve CC homojen zemin koşullarında üniform yer hareketi için elde edilen eleman kuvvetlerinin sırasıyla 2.12, 2.35 ve 2.27 katı olarak belirlenmiştir. Mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması genellikle eleman kuvvetlerini arttırmasına rağmen, üniform yer hareketi için elde edilen eleman kuvvetleri de bazı durumlarda daha büyük olabilmektedir.

Tablo 5. Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü maksimum toplam eleman kuvveti oranları

Yer Hareketi	Toplam Eğilme Momenti		Toplam Normal Kuvvet	
	Tabliye (M_{22}) kNm	Kule (M_{33}) kNm	Kule kN	Kablo kN
mul-sup (BC) / uniform (BB)	1.30E5/9.29E4=1.40	1.58E4/1.37E4=1.15	1.31E4/6.34E3=2.07	1.43E4/6.85E3=2.12
mul-sup (BC) / uniform (CC)	1.30E5/1.16E5=1.12	1.58E4/1.52E4=1.04	1.31E4/7.57E3=1.73	1.43E4/8.21E3=1.74
mul-sup (BD) / uniform (BB)	1.45E5/9.29E4=1.56	1.78E4/1.37E4=1.30	1.47E4/6.34E3=2.31	1.61E4/6.85E3=2.35
mul-sup (BD) / uniform (DD)	1.45E5/1.93E5=0.75	1.78E4/2.42E4=0.73	1.47E4/1.25E4=1.18	1.61E4/1.36E4=1.18
mul-sup (CD) / uniform (CC)	1.70E5/1.16E5=1.46	1.98E4/1.52E4=1.30	1.72E4/7.57E3=2.27	1.89E4/8.21E3=2.27
mul-sup (CD) / uniform (DD)	1.70E5/1.93E5=0.88	1.98E4/2.42E4=0.81	1.72E4/1.25E4=1.38	1.89E4/1.36E4=1.40

Elde edilen bu sonuçlar, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının üniform yer hareketine oranla asma köprü yapısal tepkilerini genellikle arttırdığını göstermektedir. Söz konusu tepkilerdeki artışlar, asma köprülerin dinamik davranışının farklı yer hareketi uygulamasını da içerecek şekilde yapılmasını gerekli kılmaktadır.

4.3. Mesnetlerinden Farklı Yer Hareketi Uygulamasının Kablolu Köprü Davranışı Üzerindeki Etkisi

Üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi için kablolu köprüde oluşan maksimum zahiri-statik, dinamik ve toplam tabliye ve kule deplasman değerleri belirlenmiş ve Tablo 6'da sunulmuştur. Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için köprü tabliyesinde oluşan zahiri-statik düşey deplasman değerleri önemli oranda artarken, dinamik ve toplam deplasman değerlerinin karşılaştırmada kullanılan homojen zemin cinsine bağlı olarak üniform yer hareketi için elde edilen değerlerden büyük veya küçük olabildiği gözlenmiştir. Mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması için elde edilen deplasman değerleri, karşılaştırmada kullanılan homojen zemin cinsine bağlı olarak üniform yer hareketi için elde edilen değerlerden büyük veya küçük olabilmektedir. Örneğin, CD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için elde edilen toplam tabliye düşey deplasman değeri, üniform yer hareketi için CC homojen zemin koşullarında elde edilen deplasman değerinin 1.42 katı iken, DD homojen zemin koşullarında elde edilen deplasman değerinin 0.87 katı olmuştur. Diğer taraftan, mesnetlerinden farklı yer hareketi için kulede elde dilen zahiri-statik, dinamik ve toplam deplasman değerlerinin, üniform durum için elde edilen değerlerden genellikle daha küçük çıktığı gözlenmektedir.

Tablo 6. Tatara Kablolu Köprüsü maksimum deplasman değeri oranları

Yer Hareketi	Zahiri Statik Deplasmanlar		Dinamik Deplasmanlar		Toplam Deplasmanlar	
	Tabliye Düşey	Kule Yatay	Tabliye Düşey	Kule Yatay	Tabliye Düşey	Kule Yatay
mul-sup (BC) / üniform (BB)	2.01	1.00	1.06	1.06	1.04	1.07
mul-sup (BC) / üniform (CC)	1.82	0.90	0.89	0.91	0.81	0.94
mul-sup (BD) / üniform (BB)	3.90	1.00	1.84	1.08	1.82	1.09
mul-sup (BD) / üniform (DD)	2.24	0.57	0.93	0.57	0.90	0.60
mul-sup (CD) / üniform (CC)	3.69	1.06	1.49	1.06	1.42	1.09
mul-sup (CD) / üniform (DD)	2.35	0.68	0.90	0.65	0.87	0.69

Tablo 7. Tatara Kablolu Köprüsü maksimum toplam eleman kuvveti oranları

Yer Hareketi	Toplam Eğilme Momenti		Toplam Normal Kuvvet	
	Tabliye (M_{22}) kNm	Kule (M_{33}) kNm	Kule kN	Kablo kN
mul-sup (BC) /uniform (BB)	5.31E5/6.51E5=0.82	4.98E5/4.56E5=1.09	7.04E4/6.51E4=1.08	9.08E2/8.15E2=1.11
mul-sup (BC) /uniform (CC)	5.31E5/7.66E5=0.69	4.98E5/5.32E5=0.94	7.04E4/7.54E4=0.94	9.08E2/9.36E3=0.97
mul-sup (BD) /uniform (BB)	9.65E5/6.51E5=1.48	5.22E5/4.56E5=1.15	7.07E4/6.51E4=1.08	1.32E3/8.15E2=1.61
mul-sup (BD) /uniform (DD)	9.65E5/1.20E6=0.80	5.22E5/8.68E5=0.60	7.07E4/1.22E5=0.58	1.32E3/1.42E3=0.93
mul-sup (CD) /uniform (CC)	9.62E5/7.66E5=1.26	5.97E5/5.32E5=1.12	8.16E4/7.54E4=1.08	1.37E3/9.36E3=1.15
mul-sup (CD) /uniform (DD)	9.62E5/1.20E6=0.80	5.97E5/8.68E5=0.68	8.16E4/1.22E5=0.67	1.37E3/1.42E3=0.96

Kablolu köprü için belirlenen maksimum tabliye, kule ve kablo elemanları kesit tesirleri Tablo 7'de sunulmuştur. Mesnetlerinden farklı yer hareketi için elde edilen eleman kuvvetleri, karşılaştırmada kullanılan homojen zemin cinsine bağlı olarak üniform yer hareketi için elde edilen değerlerden büyük veya küçük olabilmektedir. Örneğin, BD heterojen zemin durumunda mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisi için elde edilen toplam tabliye eğilme momenti değeri, üniform yer hareketi için BB homojen zemin koşullarında elde edilen moment değerinin 1,48 katı iken, DD homojen zemin koşullarında elde edilen moment değerinin 0.80 katı olmuştur. Burada elde edilen sonuçlar, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının, kablolu köprü dinamik davranışı üzerindeki etkisinin asma köprü davranışına olan etkisi kadar olmadığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte gerçekçi bir analiz için, bazı yapısal tepkilerin üniform yer hareketine göre daha da azalmasına rağmen, kablolu köprülerin dinamik analizlerinde mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının dikkate alınması gereklidir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üniform ve mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamalarının, asma ve kablolu köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için, birbirine yakın merkez açıklıklara sahip kablolu ve asma köprü sistemleri ele alınmıştır. Üç boyutlu köprü modellemelerinden elde edilen sonuçlar, yer hareketinin köprü mesnetlerine üniform bir şekilde uygulanması durumunda kablolu köprü modelinin yer hareketine asma köprü modelinden daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması dikkate alındığında, asma köprü modelinin yer hareketine daha duyarlı olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, kablolu köprü kule yüksekliğinin, asma köprü kule yüksekliğinin iki katı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, hem üniform hem de mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamaları için kablolu köprü kulelerinin daha fazla etkilendiği gözlenmiştir.

Mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulamasının asma köprülerin dinamik davranışı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulduğunda, merkez açıklığı 1000 m'ye ulaşan köprülerin türüne karar verilirken oldukça dikkatli olunması gerektiği anlaşılmaktadır. Bunun yanında, problemin karmaşık yapısı nedeniyle tek bir kablolu köprü ile asma köprü modeline dayanarak genel sonuçlara varmak oldukça zordur. Ancak, mesnetlerinden farklı yer hareketi uygulaması dikkate alındığında, uzun açıklıkların geçilmesinde kablolu köprülerin asma köprülere ciddi bir rakip olarak düşünülebileceği ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Apaydin, N.M. (2010). Earthquake performance assessment and retrofit investigations of two suspension bridges in Istanbul. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**: 702-710.

Clough, R.W. ve Penzien, J. (1993). *Dynamics of Structures*. McGraw Hill, Inc.

Dumanoglu, A.A. (1992). Seismic Anlaysis of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosporus) Suspension Bridge. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **21**: 881-906.

Eurocode8. (2004). *Design of structures for earthquake resistance. General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brüksel.

Hao, H., Bolt, B.A. ve Penzien, J. (1989). Effects of spatial variation of ground motions on large multiply-supported structures. *Reprot No: UCB/EERC-89/06)*; Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, Kaliforniya.

Harichandran, R.S. ve Vanmarcke, E.H. (1986). Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time. *J. Eng. Mech. Div., ASCE* **112**: 154-174.

Leonhardt, F. ve Zellner, W. (1970). Cable-stayed bridges: Report on latest developments. In: Canadian Steel Industries Construction Council, *Canadian Structural Engineering Conference*; 1970, Kanada.

Nagai, N., Xie, X., Yamaguchi, H. ve Fujino, Y. (1998). Economical comparison between cable-stayed and suspension systems with a span exceeding 1000 meters. *Journal of Construc. Steel Res.* **46**: Sayfa 49.

Podolny, W. (1976). Cable-stayed versus classical suspension bridge. *Transportation Engineering Journal 102*: 291-311.

Soyluk, K., Adanur, S. ve Dumanoglu, A.A. (2007). Değişerek yayılan yer hareketlerinin uzun açıklıklı köprü davranışları üzerindeki etkisi : Caner, A., Oguz, C. and Topcu T.K.,1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu.; 251-261 ; 29-30 Kasım, 2007, Antalya, Turkiye.

Wilson, J.C. ve Gravelle, W. (1991). Modelling of a cable-stayed bridge for dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **20**: 707-721.

Yabuna, M., Fujiwara, T., Sumi, K., Nose, T. ve Suzuki, M. (2001). Design of Tatara bridge. *IHI Engineering Review*: 87-102.