

MESNETLERİNDEN FARKLI YER HAREKETLERİNE MARUZ KABLOLU KÖPRÜLERİN STOKASTİK ANALİZİ

¹Zeliha TONYALI, ²Şevket ATEŞ, ³Süleyman ADANUR

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
Tel: (0462) 377 43 62 E-mail: zelihakuyumcu@hotmail.com

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
Tel: (0462) 377 27 03 E-mail: sates@ktu.edu.tr

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon
Tel: (0462) 377 26 48 E-mail: sadanur@ktu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, sismik yüklere maruz kablolu köprünün dinamik karakteristiklerinde çok mesnetli titreşim ve zemin-yapı etkileşiminin etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, yer hareketindeki değişimler korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi bileşenleri ile dikkate alınıp, değişerek yayılan yer hareketine bağlı ivme-zaman kayıtları, çok mesnetli titreşimler için üretilmiştir. Çok mesnetli titreşim durumunda, kablolu köprülerin dinamik analizinde zemin-yapı etkileşiminin etkilerini belirlemek için, örnek sistem olarak seçilen Quincy Bayview köprüsü SAP2000 programında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Kazık temel sistemini saran köprü temel zemini ve kazık; zeminin elastik davranışını temsilen yatak katsayısına bağlı, eşit aralıklı bir seri yaylarla idealize edilmiştir. Bu çalışmada, mesnetlerinden farklı yer hareketlerine maruz ve farklı zeminlere mesnetli kablolu köprünün zemin-yapı etkileşimli ve etkileşimsiz analizlerinden elde edilen sonuçlarla köprünün dinamik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

Giriş

Mühendislik yapılarının dinamik analizinde, genellikle deprem hareketinin sonsuz bir alanda yayıldığı kabul edilmekte ve yayılma anındaki yer hareketi değişimi dikkate alınmamaktadır. Ancak depremin yayılma anında, frekans içeriği ve genliği değişmekte, farklı mesnet noktalarına farklı zamanlarda ulaşmaktadır. Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak, bu değişimin yapının dinamik davranışı üzerinde ne kadar etkili olacağı araştırılmıştır. Kawano ve Furukawa (1988) çalışmalarında, kablolu köprü sistemlerinin davranışlarını zemin-yapı etkileşimi etkisindeki dinamik davranışının belirlenmesi için alt sistem yaklaşımının kullanıldığı rasgele titreşim yöntemi kullanılmıştır. Zemin-yapı etkileşimi, empedans fonksiyonları ile dikkate alınmıştır. Zemin-yapı etkileşiminin ve zemin özelliklerinin kablolu köprü dinamik davranışı üzerinde önemli etkilerinin olduğu görülmüştür. Zheng ve Takeda (1995) çalışmalarında, ana kaya üzerinde derin zemin tabakaları üzerindeki kablolu köprü sistemin dinamik zemin yapı etkileşimini incelemişlerdir. Zemin-yapı etkileşimi sonlu eleman yöntemi kullanılarak, kütle yay modeli ile

dikkate alınmıştır. Rijitlik ve temel derinliği parametrelerinin zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkileri incelemiş ve analiz sonuçları zemin-yapı etkileşiminin sonuçları etkilediğini göstermiştir.

Chow 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. Üst yapı ve zemin ortamı sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Yer hareketinin değişimini içeren yer hareketleri, Japon tasarım spektrumuna ve ampirik bir uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak oluşturulmuştur. Quan ve diğ. (2008), çok bileşenli çok mesnetli deprem uyarılmaları altında kablolu köprülerin sismik tepkilerini araştırmıştır. Köprüye ait farklı mesnetlerin yer hareketi değişim bileşenleri arasında korelasyonun etkileri incelenmiştir. Bai ve diğ. (2010) çalışmalarında, çelik kemer köprülerin değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki dinamik davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, yer hareketi yapıya yatay ve düşey doğrultuda etki ettirilmiştir. Yer hareketindeki değişim; dalga yayılma, korelasyon ve zemin etkileri ile dikkate alınmıştır. Sonuçlar, üniform yer hareketi etkisi altında elde edilen yapı davranışı ile karşılaştırıldığında, yer hareketindeki değişimin yerel zemin koşullarındaki farklılık ile beraber dikkate alınması durumunda sonuçları arttırdığı görülmüştür. Bunun yanında yer hareketi değişim bileşenlerinin her birinin yapısal tepkiler üzerinde önemli etkilerinin olduğu gözlenmiştir. Sıcacık (2011) ve Soyluk ve Sıcacık (2012) çalışmasında, uzun açıklıklı kablolu köprü sistemlerinin dinamik davranışta, yapı-zemin etkileşimi ve yer hareketindeki değişim etkilerini karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmasında, yer hareketi değişim bileşenlerinden, korelasyon, dalga yayılma ve zemin etkisi ile bu etkilerin birlikte dikkate alındığı analiz durumları için, farklı yer hareketleri üretilmiş ve bu yer hareketlerine maruz üst yapının dinamik davranışı yapı-zemin etkileşimi açısından incelemiştir. Çalışmadan edilen sonuçlar, hem yapı zemin etkileşiminin hem de yer hareketi değişim bileşenlerinin köprü tepkilerini önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermiştir. Zhou ve diğ. (2014) çok mesnetli uyarılmalar altında üç kuleli kablolu köprü ölçekli maket modelinin sismik tepkilerini ve iki çeşit lineer olmayan sonlu eleman modeli kullanarak iki şiddetli deprem uyarılması durumundaki göçme modlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, kazık temel sistemine oturan kablolu köprünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde zemin-yapı etkileşimi ve çok mesnetli uyarılmaların etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Formülasyon

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşim problemi, tüm sistem yapısal sistem ve zemin sistemi olmak üzere iki alt sisteme ayıran alt-sistem yaklaşımı kullanılarak 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.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s^t \\ \ddot{\mathbf{u}}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_s^t \\ \dot{\mathbf{u}}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t \\ \mathbf{u}_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$ ve $[\mathbf{K}]$ 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. $\{\ddot{\mathbf{u}}\}$, $\{\dot{\mathbf{u}}\}$ and $\{\mathbf{u}\}$ sırasıyla ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini, $\{\mathbf{P}_b\}$ ise etkileşim kuvvetlerini göstermektedir. Toplam yerdeğiştirme vektörü, zahiri-statik ve dinamik bileşenlere bağlı olarak,

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^t \\ \mathbf{u}_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^d \\ \mathbf{u}_b^d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^{qs} \\ \mathbf{u}_g \end{Bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $\{\mathbf{u}_b^d\}$ zemin-yapı temas noktalarındaki etkileşim yerdeğiştirme vektörü, $\{\mathbf{u}_g\}$ ise 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:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^{qs} \end{Bmatrix} = -[\mathbf{K}_{ss}^{-1}][\mathbf{K}_{sb}]\{\mathbf{u}_g\} \quad (3)$$

Frekans alanına dönüştürüldükten sonra, hareket denklemi dinamik yerdeğiştirmeler cinsinden yazılırsa;

$$\begin{Bmatrix} -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^d(i\omega) \\ \mathbf{u}_b^d(i\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [\mathbf{M}_{ss}][\mathbf{K}_{ss}^{-1}][\mathbf{K}_{sb}]\{\ddot{\mathbf{u}}_g(i\omega)\} \\ -[\mathbf{M}_{bb}]\{\ddot{\mathbf{u}}_g(i\omega)\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_b(i\omega) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

olarak elde edilir. Burada etkileşim kuvvetleri $(\mathbf{P}_b(i\omega))$, empedans matrisine $(\mathbf{K}_1(i\omega))$ bağlı olarak;

$$-P_b(i\omega) = K_I(i\omega) u_b^d(i\omega) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir (Hao ve diğ. 1989). Empedans fonksiyonları zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğini gösteren frekans alanında tanımlı ifadelerdir. Aralarında etkileşim olmadığı kabul edilen m adet temel için empedans matrisi:

$$K_I(i\omega) = \begin{bmatrix} K_{I1} & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & K_{I2} & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & K_{I3} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & K_{Im} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Zemin-yapı etkileşim probleminde, altsistem yaklaşımının formülasyonunda en önemli parametre temel empedans matrisinin belirlenmesidir. Bu çalışmada rijit kütsüz dikdörtgen temel, zemin alt sistemi homojen, izotropik ve lineer elastik olarak tanımlı zemine oturmaktadır. Eşitlik (5), Eşitlik (4)' de yerine konulup, sol taraftaki matris ifadeleri toplanırsa, hareket denkleminin frekans alanındaki ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} I_{ss}(i\omega) & I_{sb}(i\omega) \\ I_{bs}(i\omega) & I_{bb}(i\omega) + K_I(i\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^d(i\omega) \\ u_b^d(i\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [M_{ss}] [K_{ss}^{-1}] [K_{sb}] \{ \ddot{u}_g(i\omega) \} \\ -[M_{bb}] \{ \ddot{u}_g(i\omega) \} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Yer Hareketinin Üretilmesi

Deprem kayıtlarının elde edilebileceği üç kaynaktan bahsetmek mümkündür:(i) Yapay yollar kullanılarak oluşturulan *tasarım ivme spektrumu* ile uyumlu kayıtlar, (ii) Kaynak ve dalga yayılımı özellikleri fiziksel olarak *benzeştirilmiş kayıtlar* ve (iii) *Gerçek depremlerden* elde edilen kayıtlar. Bu çalışmada, yer hareketinin değişim etkilerinin dikkate alındığı Hao ve diğ. (1989) tarafından önerilen benzeştirilmiş yer hareketi yönteminde, yer hareketine ait ivme zaman eğrileri, rasgele titreşim teorisi esas alınarak oluşturulmaktadır. Yer hareketleri önceden tanımlı spektral yoğunluk fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonuna uyumlu olacak şekilde belirlenmektedir. Mesnetlere etkileyen yer hareketi, yer hareket ivmesi spektral yoğunluk fonksiyonuna bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$S_{\ddot{u}_g I \ddot{u}_g m}(i\omega) = \gamma_{Im}(i\omega) S_{\ddot{u}_g}(\omega) \quad (8)$$

Burada $\gamma_{Im}(i\omega)$ uygunluk fonksiyonu, $S_{\ddot{u}_g}(\omega)$ yer hareket ivmesini spektral yoğunluk fonksiyonunu göstermektedir. Yer hareketi ivmesi için bu çalışmada Clough ve Penzien (1993) tarafından düzeltilerek elde edilen filtre edilmiş beyaz gürültü spektral yoğunluk fonksiyonu

kullanılmıştır. Yer hareketinin değişimi frekans alanındaki uygunluk fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Denklem 8'de kullanılan uygunluk fonksiyonu, yer hareketinin değişimini frekans alanında tanımlanmaktadır. l ve m mesnet noktalarındaki yer hareket ivmeleri için uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

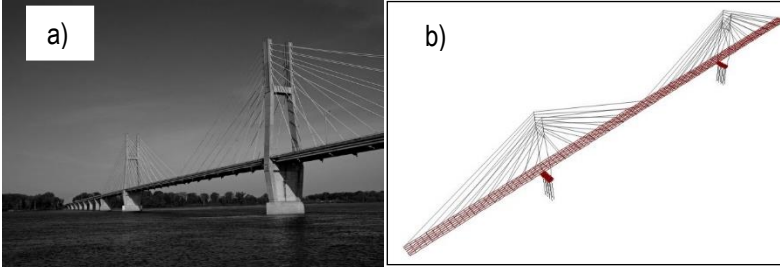
$$\gamma_{lm}(i\omega) = |\gamma_{lm}(\omega)|^k \gamma_{lm}(\omega)^d = |\gamma_{lm}(\omega)|^k \exp\left[i\left(\theta_{lm}(\omega)^d\right)\right] \quad (9)$$

bu ifadede $|\gamma_{lm}(\omega)|^k$ ve $\theta_{lm}(\omega)^d$ sırasıyla, korelasyon ve dalga yayılma etkilerini göstermektedir (Der Kiureghian ve Neuenhofer, 1991). Bu çalışmada kullanılan korelasyon modeli için bu çalışmada Harichandran ve Vanmarcke (1986) tarafından önerilen model dikkate alınmıştır. Söz konusu modelde gerekli olan deneysel sabitler için Harichandran ve diğ.(1996) tarafından önerilen değerler kullanılmıştır:

($A=0.636$, $\alpha=0.0186$, $k=31200$, $f_0=1.51$, $b=2.95$). Bu çalışmada oluşturulan tüm yer hareketi ivme kayıtları dikkate alınan zemin sınıfı için Eurocode 8'de tanımlanan, %2 sönüm oranı için ve $0.5g'$ ye göre normalize edilmiş hız spektrumu ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. 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 olabilmektedir. Bunun için elde edilen ivme-zaman eğrilerine eksen düzeltilmesi yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, mesnetlerde eksen düzeltilmesi yapılmış ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman grafikleri kullanılmıştır.

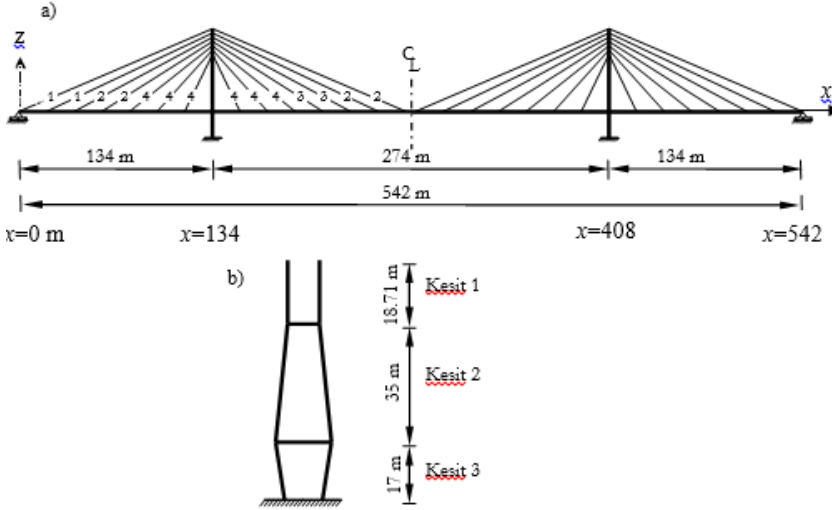
Kablolu Köprü Modeli

Bu çalışmada analizi yapılmak üzere seçilen örnek köprü, Illinois-Quincy'de Mississippi Nehri üzerindeki Quincy Bay-view köprüsüdür. Şekil 1'de gösterilen Quincy Bay-view Köprüsü H şeklindeki iki beton kuleden, yelpaze şeklindeki kablolardan ve kompozit köprü tabliyesinden oluşmaktadır. Köprü'nün ana açıklığı 274m ve her bir kenar açıklığı 134m olup iki kenar açıklığa sahiptir. Kulenin toplam yüksekliği 70.71m' dir. Ana açıklığı destekleyen 28 kablo, her bir kenar açıklığı destekleyen 14 kablo olmak üzere toplam 56 kablo eleman kullanılmıştır (Şekil 2). Kullanılan kabloların çapları 107mm, 92mm, 41mm ve 66mm' dir. Kablolar yelpaze şeklinde düzenlenmiş olup köprü'nün H-şeklindeki kule elemanında 2.75m aralıklarla ve ana açıklığın yanı sıra kenar açıklıklarda da köprü tabliyesi üzerinde 19.14m aralıklarla dizilmiştir. Köprü tabliyesinin genişliği kablonun merkezinden merkezine 12m' dir.



Şekil 1. a) Quincy Bay-view Köprüsü; b) Köprünün 3 boyutlu modeli

Bu çalışmada, yumuşak ve sert zemine mesnetli köprüde, zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığı ve ihmal edildiği çok mesnetli uyarılma durumlarında oluşabilecek dinamik tepkiler incelenmiştir. Kazık grubunu saran temel zemini, zemin-yapı etkileşimini temsil eden yaylarla idealize edilmiştir. Kule ve tabliye kiriş elemanlarla, kablolar kafes elemanlarla modellenmiştir. Kablolardaki lineer olmayan etkiyi gidermek için analizlerde eşdeğer elastisite modülü dikkate alınmıştır. Tablo 1'de tabliye ve kuleye ait özellikler, Tablo 2'de ise kablolara ait özellikler verilmektedir.



Şekil 2. a) Köprü kesiti, b) Kule kesiti

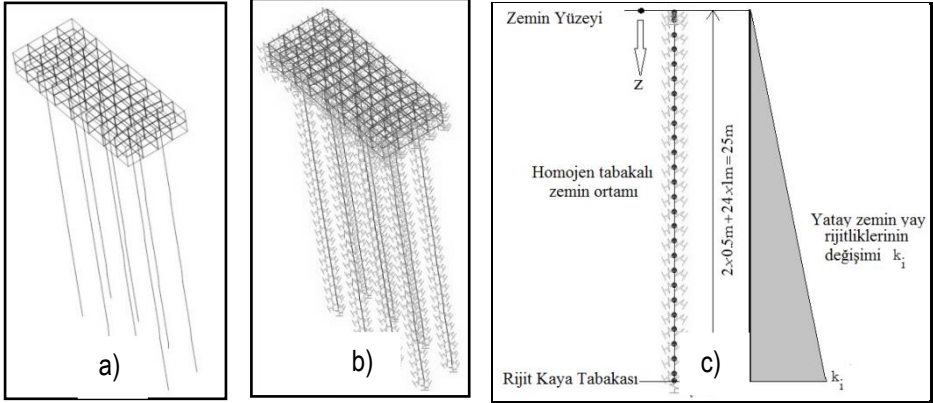
Tablo 1. Kule ve tabliye kesit özellikleri

Eleman	Alan $A \text{ (m}^2\text{)}$	Atalet momenti			Elastisite modülü $E \text{ (kN/m}^2\text{)}$	Birim uzunluğa düşen ağırlık $W \text{ (kN/m)}$
		$I_{x-x} \text{ (m}^4\text{)}$	$I_{y-y} \text{ (m}^4\text{)}$	$I_{z-z} \text{ (m}^4\text{)}$		
Tabliye	0.83	0.03	19.76	0.34	2.1×10^8	63.68
Kule (1)	14.12	15.39	532.20	28.05	30.787×10^6	332.44
Kule (2)	14.12	15.39	795.20	28.05	30.787×10^6	332.44
Kule (3)	30.75	27.64	1250.40	32.75	30.787×10^6	332.44

Tablo 2. Kablo özellikleri

Kablo Numarası	Alan $A \text{ (m}^2\text{)}$	Elastisite Modülü $E \text{ (kN/m}^2\text{)}$	Birim uzunluğa düşen ağırlık $W \text{ (kN/m)}$
1	0.0180	2.1×10^8	1.76580
2	0.0135	2.1×10^8	1.32435
3	0.0107	2.1×10^8	1.04967
4	0.0070	2.1×10^8	0.68670

Zemin koşullarının elverişli olmadığı durumlarda kazıklı-radye temel uygulamaları kullanılabilir. Kazıklı-radye temeller yapı yüklerinin zemine aktarılmasında, hem radyenin hem de kazıkların kullanıldığı bir temel sistemidir. Bu çalışmada, köprü kazıklı radye temele oturmaktadır. Kazıklı radye temellerin tasarımında, zemin-kazık etkileşimi, zemin-radye etkileşimi, kazık-radye etkileşimi, kazık-kazık etkileşimi dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, kazık temel sistemi köprünün sağında ve solunda olmak üzere (2x4) kazıktan oluşur. Köprünün dinamik analizinde, köprü mesnetlerinin homojen tabakalı yumuşak ve sert zemine mesnetli olduğu kabul edilir. Dinamik davranış sırasında zeminden dolayı oluşabilecek etkiyi en iyi şekilde temsil etmek için, kazık boyunca yeterli sayıda yay kullanılmalıdır. Kazığın tepkisini belirlemede yüzeye yakın yaylar daha önemli olduğu için bu bölgede yaylar daha yakın aralıklarda idealize edilir. Şekil 3'de köprüye ait kazık temel sistemi görülmektedir.



Şekil 3. a) Kazıklı radye-temel sistemi; b) Kazık grubu ve kazık başlığında eşdeğer zemin yay modeli; c) Tek bir kazığa ait eşdeğer zemin yay modeli ve zemin yay rijitliklerinin değişimi

Bu çalışmada, kazıkların çapı ve uzunluğu, sırasıyla, 2.0m ve 25m olarak kabul edilmiştir. Şekil 3c'den de görüldüğü gibi kazığın iç kısımlarda yaylar arası mesafe 1.0m iken, kazıkların uçlarında yaylar arası mesafe 0.5m' dir. Analizlerde kazık başlığındaki etkiler de dikkate alınmıştır.

Kazıklı temellerin yatay yükler altındaki davranışını modellemede zemin yatay yatak katsayısı kullanılır. Kohezyonsuz zeminlerde, yatay yatak katsayısı zemin sıkılığına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$k_h = \frac{n_h z}{D} \quad (10)$$

Burada z serbest zemin yüzeyinden olan mesafe, n_h zemin sıkılığına bağlı katsayı, D ise kazık çapıdır. Yatay yatak katsayısına bağlı olarak eşdeğer zemin yatay yay rijitliği;

$$k_i = k_h D H_{trib} \quad (11)$$

Burada H_{trib} zemin yayları arasındaki etkili mesafedir. Eşitlik (10), Eşitlik (11)'de yerine konulup tekrar düzenlenirse;

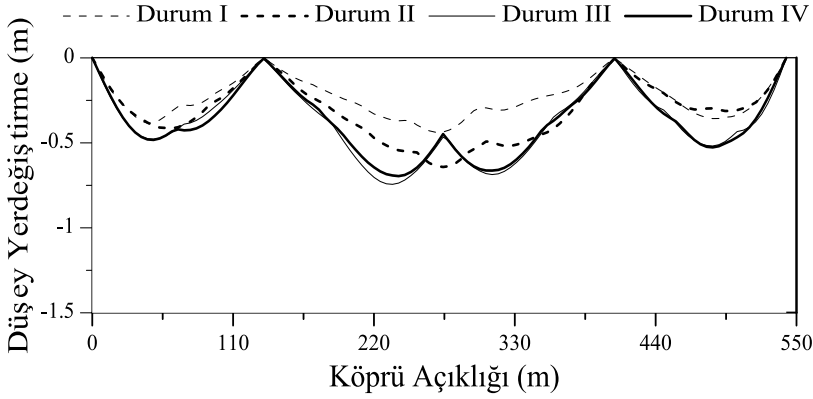
$$k_i = n_h z H_{trib} \quad (13)$$

olarak elde edilir. $H_{trib} = 1.0$ m olduğunda farklı zemin türleri için yatay zemin yay rijitlikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

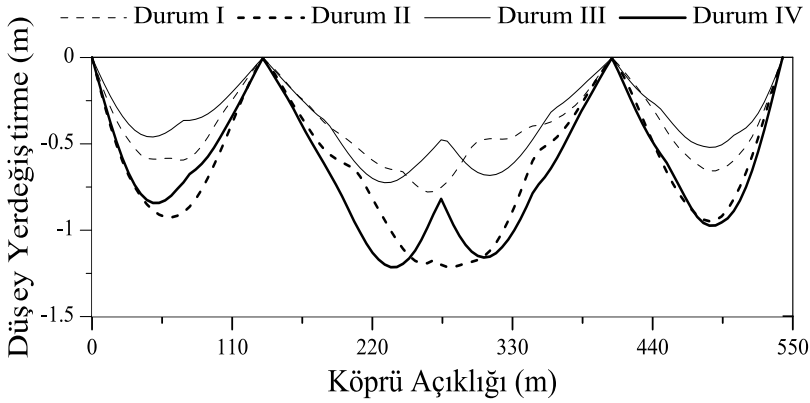
Tablo 3. Farklı zemin türleri için yatay zemin yay rijitlikleri, k_i

z (m)	Yumuşak k_i (kN/m)	Sert k_i (kN/m)
0.5	915	2 705
1.5	2 745	8 115
2.5	4 575	13 525
3.5	6 404	18 935
4.5	8 235	24 345
5.5	10 065	29 755
6.5	11 895	35 165
7.5	13 725	40 575
8.5	15 555	45 985
9.5	17 385	51 395
10.5	19 215	56 805
11.5	21 045	62 215
12.5	22 875	67 625
13.5	24 705	73 035
14.5	26 535	78 445
15.5	28 365	83 855
16.5	30 195	89 265
17.5	32 025	94 675
18.5	33 855	100 085
19.5	35 685	105 495
20.5	37 515	110 905
21.5	39 345	116 315
22.5	41 175	121 725
23.5	43 005	127 135
24.5	48 835	132 545
25.0	Rijit kaya	Rijit kaya

Bu çalışmada, **Durum I:** zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmadığı üniform yer hareketine; **Durum II:** zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmadığı çok mesnetli titreşim hareketlerine; **Durum III:** zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı üniform yer hareketine; **Durum IV:** zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı çok mesnetli titreşim hareketlerine maruz köprüde oluşabilecek yerdeğiştirmeler, değişik zemin türleri için incelenmiştir. Köprünün mesnetlendiği zemin ortamının yumuşak ve sert zemin olarak kabul edildiği durumda köprü tabliyesinde ve kulede oluşan yerdeğiştirmeler, sırasıyla, Şekil 4 ve Şekil 5' te gösterilmiştir.



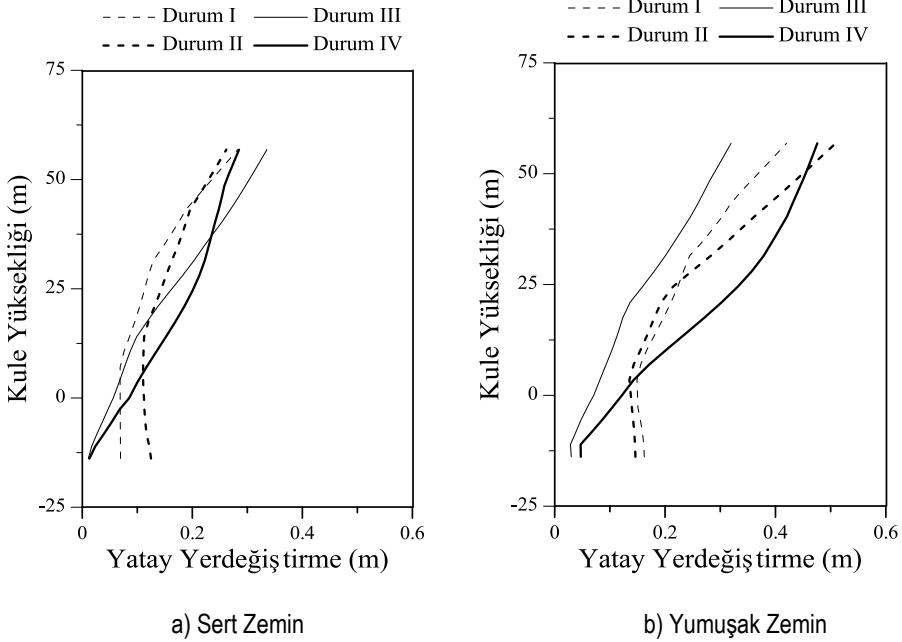
a) Sert Zemin



a) Yumuşak zemin

Şekil 4. Tabliye yerdeğiştirmeleri

Yumuşak ve sert zemin mesnetli köprüde, en büyük tabliye ve kule yerdeğiştirmeleri, sırasıyla, köprü açıklık ortasında ve kule tepe noktasında oluşmaktadır. Dört durumda da yumuşak zemine mesnetli köprüde oluşan tabliye yerdeğiştirmelerinin sert zemine göre oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmadığı Durum I ve Durum II' de, çok mesnetli titreşim uyarılmaları durumunda köprü tabliyesinde ve kulesinde oluşan yerdeğiştirmelerin daha fazla olduğu elde edilmiştir. Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı Durum III ve Durum IV' de oluşan yerdeğiştirmeler, zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmadığı Durum I ve Durum II' de oluşan yerdeğiştirmelerden oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Kule yerdeğiştirmeleri

Sonuçlar

Bu çalışmada, mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki farklı zeminlere mesnetli kablolu köprünün emin-yapı etkileşiminin dikkate alınan ve ihmal edilen analizlerinden elde edilen sonuçlarla köprüde oluşabilecek yerdeğiştirmeler belirlenmeye çalışılmıştır.

Farklı zeminlere mesnetli köprüde oluşan yerdeğiştirmeler incelendiğinde, yumuşak zemine mesnetli köprü tabliesinde ve kulesinde oluşan yerdeğiştirmelerin sert zemine mesnetli köprüye göre oldukça fazla olduğu elde edilmiştir.

Dinamik analiz sonunda, hem yumuşak hem de sert zemine mesnetli köprüde, gerek zemin-yapı etkileşiminin ihmal edildiği ankastre durum da ve gerekse de zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı çok mesnetli uyarılma etkileri durumunda kulede ve tabliyede oluşan yerdeğiştirmelerin, üniform yer hareketine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

1. Kawano K., Furukawa K., (1988) "Random seismic response analysis of soil cable-stayed bridge interaction", Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Kyoto Japan, 495-500, August 2-9

2. Zheng, J., Takeda, T., (1995) "Effects of soil-structure interaction on seismic response of PC cable-stayed bridge", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14, 6, 427-437
3. 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
4. Quan W., Li H.N. ve Liu X.Z., (2008) "Seismic response of large-span cable-stayed bridge under multi-component multi-support earthquake excitation", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China
5. Bai, F.L., Hao, H., Li, H.N., (2010) "Seismic Response of a steel trussed arch structure to spatially varying earthquake ground motions including site effect", *Advances In Structural Engineering*, 13, 6, 1089-1103.
6. Sıcacık, E.A., (2011) "Mesnetlerinden farklı yer hareketi etkisindeki kablolu köprülerin yapı-zemin etkileşim analizi", *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara*
7. Zhou R., Zong Z.H., Huang X.Y., Xia Z.H., (2014) "Seismic response study on a multi-span cable-stayed bridge scale model under multi-support excitations, Part II: numerical analysis", *J Zhejiang Univ-Sci A, Appl Phys & Eng*, 15, 6, 405-418
8. Hao, H., Bolt, B.A. ve Penzien, J., (1989). "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.*
9. Der Kiureghian, A. ve Neuenhofer, A., (1991) "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).*
10. Harichandran, R.S. ve Vanmarcke, E.H., (1986) "Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time", *Journal of Engineering Mechanics*, 112, 2, 154-174
11. Harichandran, R.S., Hawwari, A. ve Sweiden, B.N., (1996) "Response of long-span bridges to spatially varying ground motion", *Journal of Structural Engineering*, Cilt 122, No 5, 476- 484
12. Selvadurai, A.P.S., (1984) "Circular raft foundation with a restrained boundary", *Geotechnical Engineering*, 15, 171-192
13. Soyuluk K., Sıcacık E.A., (2012) "Soil-structure interaction analysis of cable-stayed bridges for spatially varying ground motion components", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 35, 80-90

Anahtar Sözcükler: Zemin-yapı etkileşimi, Üniform yer hareketi, Yer hareketi değişim bileşenleri, Kablolu köprü, Çok mesnetli titreşim,