YATAY DEPREM HAREKETİ BİLEŞENLERİ DOĞRULTUSUNUN KÖPRÜ SİSMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

B. Atak[1], Ö. Avşar[2] ve A. Yakut[3]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir*
[2] *Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir*
[3] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara*
Email: bengiatak@anadolu.edu.tr

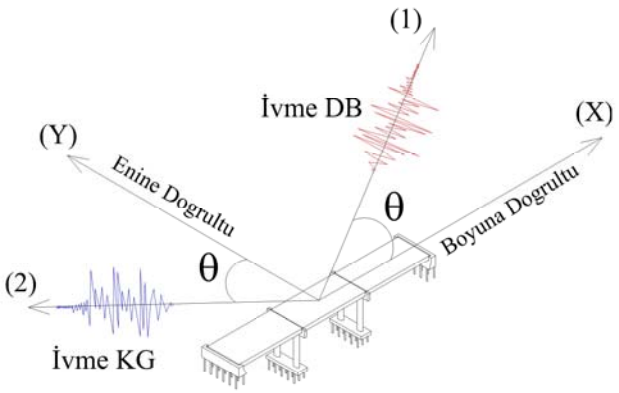
ÖZET:

Bir köprünün sismik yükler altındaki davranışının incelenmesinde deprem yüklerinin köprü geometrisine hangi açıdan uygulandığında en elverişsiz tesirin oluşacağı konusu köprü tasarımında sık karşılaşılan sorunlardan birisidir. Özellikle de verevlik açısı yüksek olan düzensiz yapıdaki köprüler için yaygın olarak kullanılan köprü iki asal eksenine deprem yüklerinin uygulanıp sonra da %30 kombinasyon kuralına göre bileşenlerinin alınması yaklaşımının sadece elastik davranış gösteren yapılarda azami tesirleri verdiği düşünülerek hesaplamalar yapılmaktadır. Diğer taraftan bu kuralın, elastik ötesi davranış sergilemesi beklenen kolon ve başlık kirişi gibi köprü yapı elemanları için uygulanması bir takım belirsizlikleri barındırmaktadır. Aynı zamanda doğrusal olmayan zaman serisi davranış analiz yöntemi ile irdelenen köprülerde iki yatay deprem yükü bileşeninden hangisinin köprünün boyuna yönünde hangisinin enine yönünde uygulanacağı da yoruma açık bir konudur. Ayrıca, en elverişsiz tesirleri elde etmek için, deprem yüklerinin köprüye etkime açılarının köprünün tipine göre (düşük ve yüksek peryotlu) nasıl farklılık göstereceği de doğrusal olmayan analizlerde ayırt edici bir özellik olarak karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada biri rijit diğeri nispeten daha az rijit davranış gösteren iki köprü tipinin her birinde 0'dan başlayarak 10'ar derece artımla 60 dereceye kadar 7 farklı verevlik için toplamda 14 model doğrusal olmayan zaman serisi davranış analizi yöntemi ile incelenmiştir. Her bir modele deprem yükleri ivme zaman serileri olarak 0'dan başlayarak 15'er derece artımla 165 dereceye kadar 12 farklı açı ile uygulanmıştır. Bu işlem 7 farklı şiddetteki deprem kaydı için tekrarlanarak duyarlılık analizleri yapılmıştır. Sismik tepki parametresi olarak analizlerden elde edilen kolon güçlü ve zayıf yönü momentleri ile eğrilik dereceleri karşılaştırılmıştır. Köprü verev açısına göre en elverişsiz tesirlerin oluştuğu deprem etkime açısı değişkenlik göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER : deprem yönü, deprem açısı, köprü sismik analizi, verevlik

1. GİRİŞ

Köprülerin sismik davranışlarının incelenmesi amacıyla yapılan analizlerde modellere uygulanan zaman serisi türündeki kuvvetli yer hareketi kayıtları birbirine dik iki yatay bileşenden oluşmaktadır. Bu iki bileşenden hangisinin köprüye hangi yönde uygulanacağı konusu tasarımda sıkça karşılaşılan sorunlardan biridir. Şekil 1-1 'de görüldüğü gibi bu iki bileşenli kuvvetli yer hareketi verisi köprü asal yönleri ile θ gibi rastgele bir açı ile uygulanabilir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerin uygulanmasındaki amaçlardan biri ve en önemlisi en elverişsiz tepki parametrelerini elde etmektir. Ancak elde edilmek istenen tepki parametresine, yer hareketi verisine ve köprünün gemetrik özelliklerine göre en elverişsiz koşulun oluştuğu kuvvetli yer hareketi etkime açısı, θ farklılık göstermektedir.



Şekil 1-1 En elverişsiz tesirler için yer hareketi çiftinin köprüye uygulanma açısı

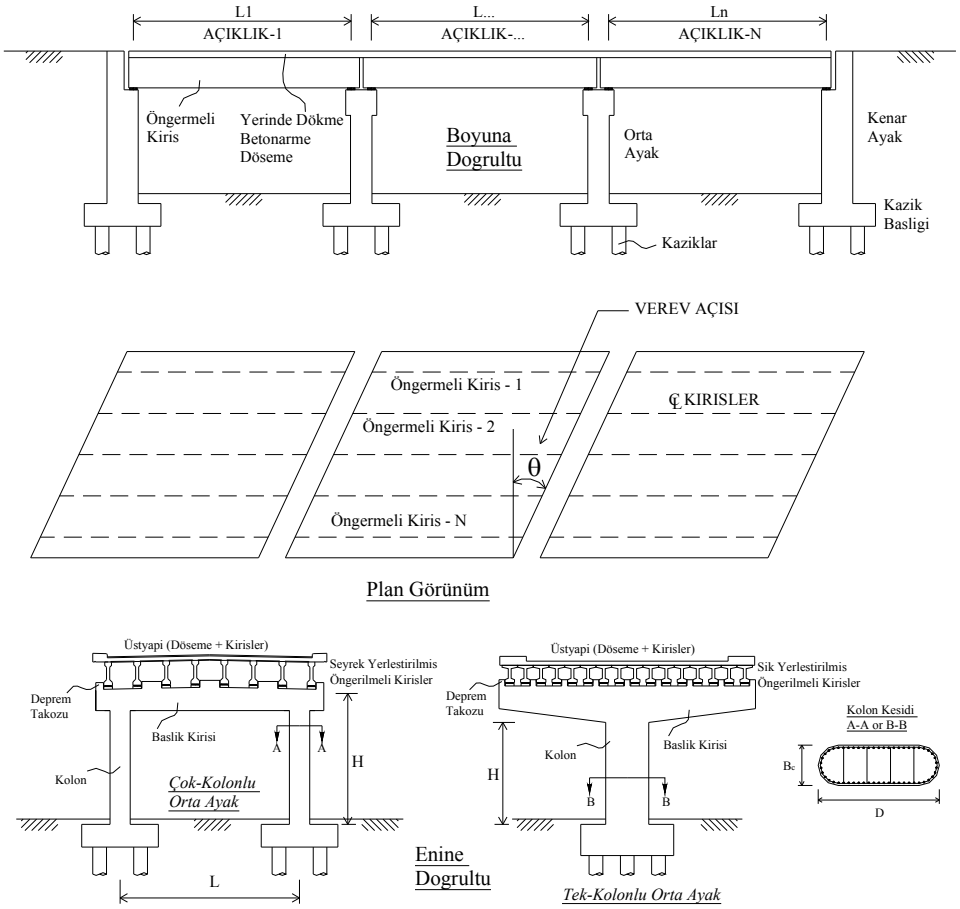
Caltrans (2010)'a göre deprem etkilerini belirlemede iki metot kullanılmaktadır. Bunlardan ilkine göre, kuvvetli yer hareketi bileşenlerinden biri köprünün asal yönlerinden birine diğeri de öteki asal yönüne uygulanır ve en büyük sismik istem %30 birleştirme kuralına göre hesaplanır. İkinci metotta ise deprem kaydının birbirine dik iki bileşeni yeterli sayıda farklı açı için köprüye uygulanıp analiz edilerek her bir kritik köprü elemanı için en büyük sismik istem değerleri tespit edilmeye çalışılır. İlk metotun güvenirliği özellikle de yüksek verevlik açısına sahip düzensiz köprüler için şüphe uyandırmaktadır. Priestley ve diğ. (1996)'ya göre, diğer kombinasyon kuralları gibi %30 birleştirme kuralı da aslında yapıların doğrusal elastik davranışının belirlenmesinde uygulanmalıdır. Kolonlar ve başlık kirişleri gibi köprünün elastik olmayan davranış göstermesi muhtemel elemanlarında bu tür kombinasyon yöntemleri kuşkuya açıktır. Buna bağlı olarak, kritik köprü elemanlarında en büyük sismik istemi yaratan kuvvetli yer hareketi etkime açılarının tayini için biri rijit ve diğeri nispeten daha az rijit iki köprü modeli üzerinde bir çok duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu iki köprü tipinin her biri için 0 dereceden başlayarak 10'ar derece artımla 60 dereceye kadar 7 farklı verev açısına göre modeller oluşturulmuş, her bir modelde deprem ivme kayıtları 0'dan başlayarak 15'er derece artımla 165 dereceye kadar 12 farklı açı ile köprüye uygulanmıştır. Bu analizler 7 farklı kuvvetli yer hareketi verisi için tekrarlanmıştır. Sonuç olarak iki farklı köprü tipinde 588 adet olmak üzere toplamda 1176 analiz gerçekleştirilmiş ve kolon güçlü ve zayıf yön momentleri ile eğrilik dereceleri karşılaştırılarak deprem yüklerindeki açı değişikliğinin etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Doğrusal olmayan analizler OpenSees programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analiz yapmak için tanımlanan ivme zaman verisi köprüye Şekil 1-1'e göre 'X' ve 'Y' yönlerinde uygulanabilmektedir. Bu sebeple θ açısı ile '1' ve '2' yönlerinde uygulanması istenen verinin Denklem (1)' de verilen dönüştürme matrisi ile köprünün global yönleri olan 'X' ve 'Y' yönlerine dönüştürülmesi gereklidir (Khaled ve diğ., 2006).

$$\begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

2. KÖPRÜ MODELLERİNİN TANITILMASI

Türkiye'de özellikle de son 25 yıldır sıkça uygulanan karayolu köprüleri iki veya daha fazla açıklığı olan öngermeli I-kesitli kirişler ile tabliyeden oluşan kompozit üstyapıya sahip betonarme köprülerdir. Bu çalışma kapsamında incelenen ve genel özellikleri Şekil 2-1'de verilen iki köprü tipi de bu anlamda Türkiye'de yaygın olan karayolu köprü tiplerinden olup Caltrans (2010)'a göre Tipik Standart Köprüler olarak sınıflandırılabilir (Avşar ve diğ., 2011).



Şekil 2-1 Tipik karayolu köprülerinin genel özellikleri

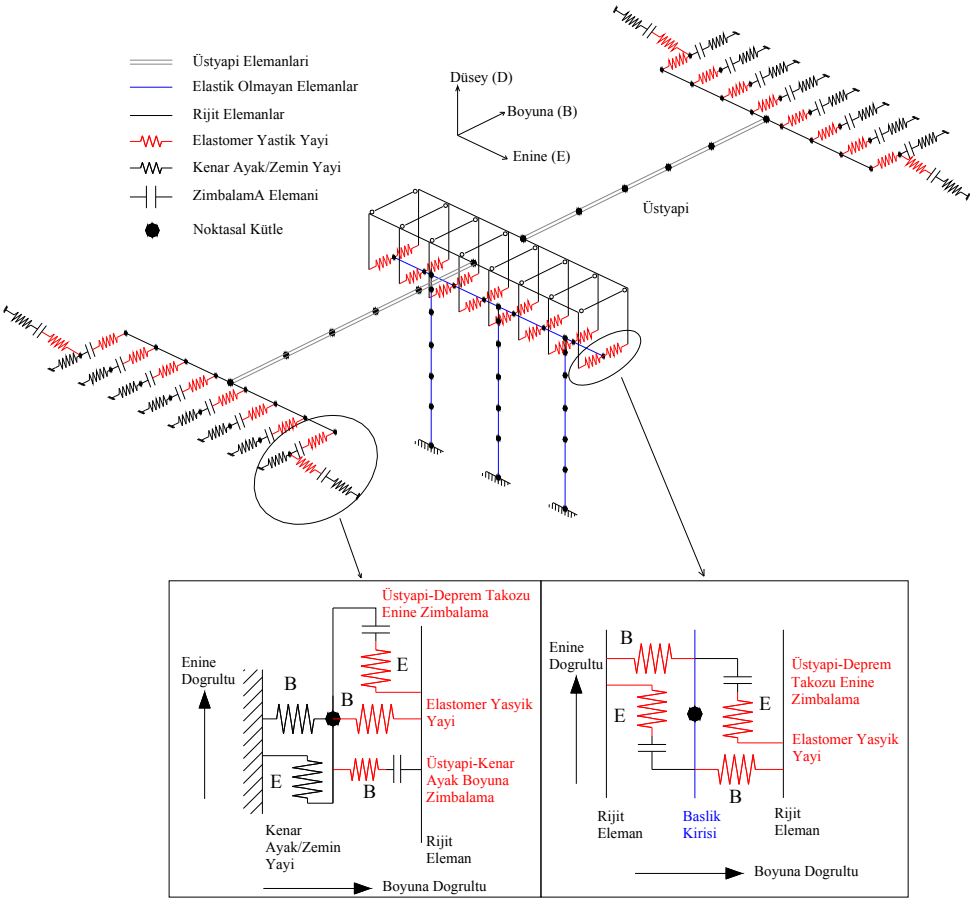
2.1. Köprü Tiplerinin Tanıtılması

Modelleri incelenen iki köprüden ilki daha kısa ve rijit olarak değerlendirilen ve etkin periyotu da her bir verevlik için değişmekle birlikte ortalama 0.5 saniye olan tipik bir betonarme karayolu köprüsüdür. 15'er metrelik iki açıklıktan oluşan bu köprünün üstyapısı 12 m genişliğinde olup 8 adet öngermeli kirişten oluşan kompozit bir yapıdadır. Orta ayağı, 4 m yüksekliğinde 4.7 m aralıklı 3 adet 1m en ve 2 m boyundaki oval kolondan oluşmaktadır. Ayrıca başlık kirişi de 1.2 m eninde ve 1.1 m derinliğinde dikdörtgen kesite sahiptir. Buna karşılık, ikinci tip köprü 35'er metrelik 4 açıklıktan oluşup her bir orta ayağında 8.7 m yükseklikte tek kolon (1.2 m'ye 4 m oval kesit) bulunmaktadır. Ortalama etkin periyotu 0.95 saniye olan bu tipteki köprünün üstyapısı ilk tipteki köprü ile aynı genişliktedir. Her iki tip köprü modelinde de beton sınıfı C25, donatı çeliği

sınıfı ise S420 olarak alınmıştır. Her iki tip köprü için de kolonlar şartnamelerde minimum koşul olarak tanımlanan %1 oranında eğilme donatısı ile donatılandırılmıştır.

2.2. Analitik Modellerin Oluşturulması

Her bir köprü tipi, verevlik ve deprem açısı için OpenSees programı ile gerçekleştirilen analitik model 7 farklı kuvvetli yer hareketi verisi için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile değerlendirilmiştir. Şekil 2-2'de gösterilen köprü bileşenlerinin detaylı modellerinin kullanılmasıyla köprülerin her biri için analitik modeller oluşturulmuştur. Avşar ve diğ. (2011)'de detaylı bir şekilde anlatılan herbir köprü bileşeninin analitik modelleri bu çalışma kapsamında da kullanılmıştır.



Şekil 2-2 Köprü analitik modeli ve bileşenleri

Üstyapının elastik kalacağı kabulü ile köprü üstyapısı elastik çubuk elemanlarla modellenmiş, altyapı ile arasına sadece sürtünmeyi yenene dek yük aktaran sonrasında ise üzerine gelen yükün sabit kaldığı elastomer yastık yayları eklenmiştir.Elastik ötesi davranış sergilemesi beklenen kolon ve başlık kirişi, fiber tabanlı doğrusal olmayan elemanlar ile modellenmiştir. Zemin yapı etkileşimini modellemek için kenar ayakta ve kazıklarda doğrusal olmayan yaylar uygulanmıştır (Caltrans, 2010). Köprü enine doğrultusunda uygulanan deprem takozlarını modellemek amacıyla çarpma etkisinin gözlemlenebildiği kontak elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca

benzer bir çarpma etkisi kenar ayaklar ile üstyapı arasında bırakılan boşluklarda da meydana gelebileceğinden benzer kontak elemanlar bu bölgelerde de modelde uygulanmıştır (Avşar ve diğ., 2011).

3. KUVVETLİ YER HAREKETİ VERİSİ VE ÖZELLİKLERİ

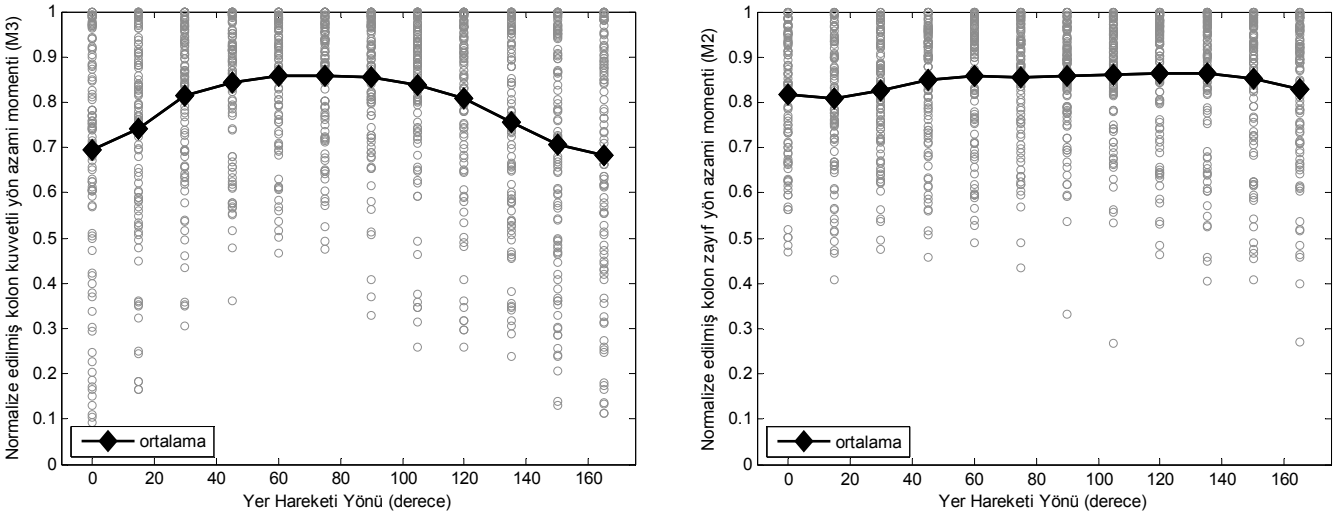
Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde faylanma mekanizması Türkiye'de de yaygın olarak görülen yanal atımlı olan ve iki yatay bileşen sahip kuvvetli yer hareketlerinden Tablo 3-1'de verilen depremlerin ivme zaman kayıtları kullanılmıştır. Ölçeklendirilmemiş bu kayıtların şiddet seviyeleri PGA, PGV ve PGA/PGV oranına ilave olarak Avşar ve diğ. (2011) tarafından tanımlanan ASI (ivme spektrum şiddeti) şiddet ölçütü ile de Tablo 3-1'de verilmiştir.

Tablo 3-1 Seçilen Kuvvetli Yer Hareketleri

Kayıt #	Deprem Merkezi ve Tarihi	İstasyon	Kaynak	ASI (g*s) T_i=0.4s-T_f=1.1s	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGA/PGV (1/s)
1	Duzce, Turkey 1999/11/12	375 Lamont 375	PEER	0.249	0.706	27.15	25.51
2	Denizli, Turkey 1976/08/19	Denizli Directorate of Public Works and Settlement	European Strong Motion Database	0.283	0.300	19.3	15.23
3	Bingol, Turkey 2003/05/01	Bingol Directorate of Public Works and Settlement	General Dir. of Disaster Affairs/ERD	0.284	0.396	28.37	13.67
4	Coyote Lake 1979/08/06 17:05	57383 Gilroy Array #6	PEER	0.346	0.370	34.72	10.46
5	Morgan Hill 1984/04/24 21:15	1652 Anderson Dam (Downstream)	PEER	0.364	0.350	26.42	12.98
6	Landers 1992/06/28 11:58	22170 Joshua Tree	PEER	0.425	0.279	34.47	7.94
7	Superstition Hills(B) 1987/11/24 13:16	286 Superstition Mtn.	PEER	0.528	0.781	37.03	20.68

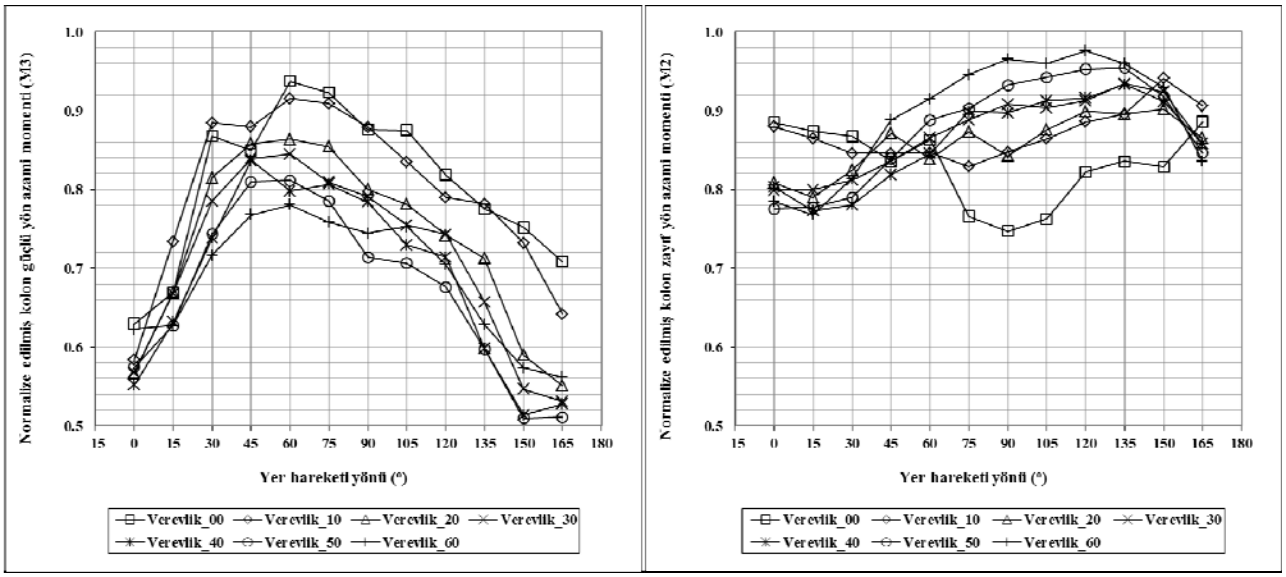
4. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Analizler sonucunda sismik istem parametreleri olarak kolonların güçlü ve zayıf yönlerindeki momentleri (sırasıyla M3 ve M2) ile eğrilik değerleri (sırasıyla K3 ve K2) irdelenmiştir. Farklı tipteki iki köprünün her bir verevlik derecesi için oluşturulan modellerde her bir kuvvetli yer hareketi için çeşitli açılarda uygulanan deprem ivmesi sonuçlarından en yüksek moment değerini ve en yüksek eğrilik değerini verenler tespit edilmiş, diğer açılardan elde edilen sonuçlar da bu ilgili azami değere göre normalize edilerek aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.

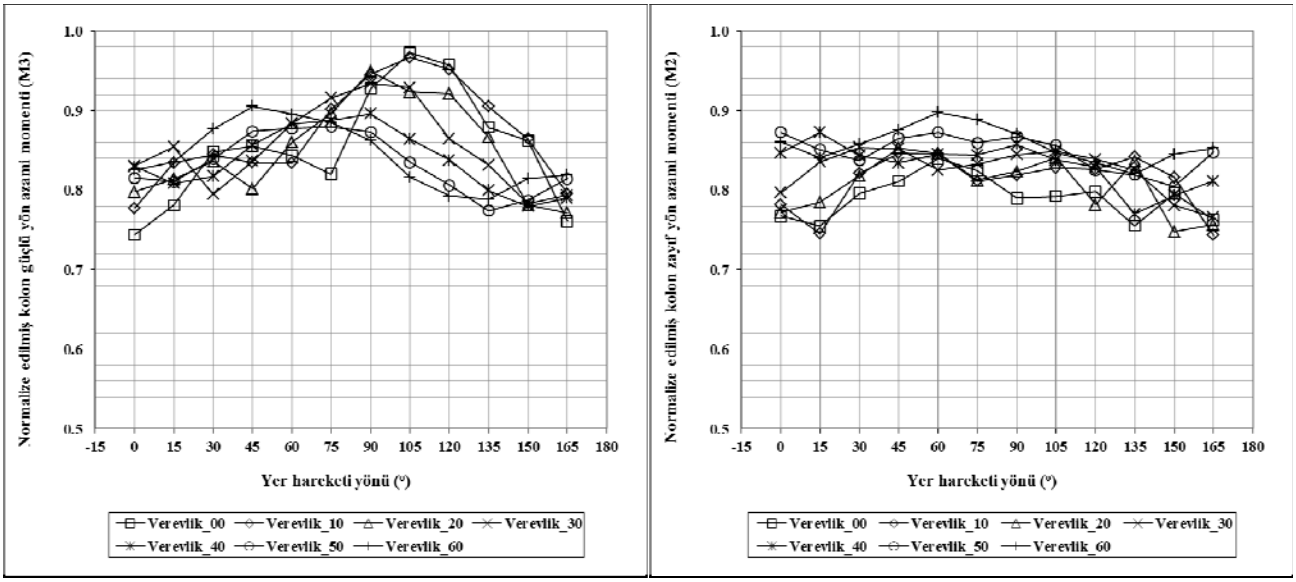


Şekil 4-1 Kolon normalize edilmiş en yüksek güçlü (M3) ve zayıf yön (M2) momentleri dağılımı

Şekil 4-1 [a]'da elde edilen tüm sonuçlar sunulduğundan, azami değerlerin oluştuğu açının verevlik derecesine bağlı olarak nasıl değiştiği gözlenememiştir. Aynı şekilde her iki köprü tipi için de elde edilen sonuçlar yine bu grafikte gösterildiğinden köprü tipine bağlı olarak nasıl değişiklik oluştuğunun da ayırt edilebilmesi için kolon momentleri için benzer bir normalize dağılım bu kez farklı verevliğe sahip farklı tiplerdeki köprüler için ayrı ayrı yapılmış ve Şekil 4-2'de ve Şekil 4-3 'de sunulmuştur.



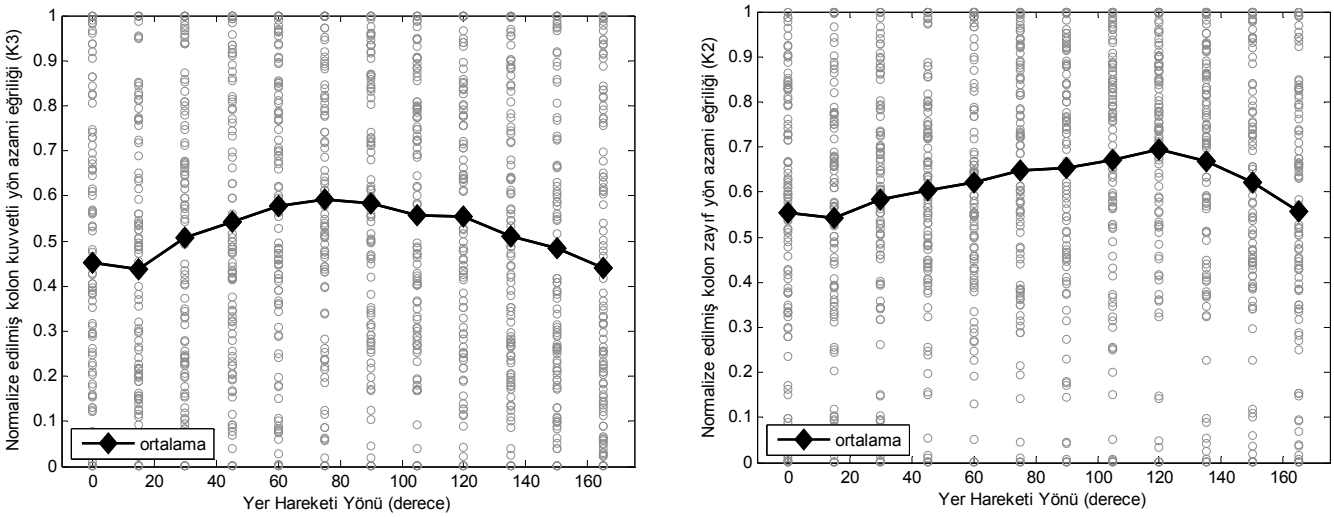
Şekil 4-2 Daha rijit olan birinci tip köprüler için normalize edilmiş kolon momentleri ortalama değer dağılımı



Şekil 4-3 Daha az rijit olan ikinci tip köprüler için normalize edilmiş kolon momentleri ortalama değer dağılımı

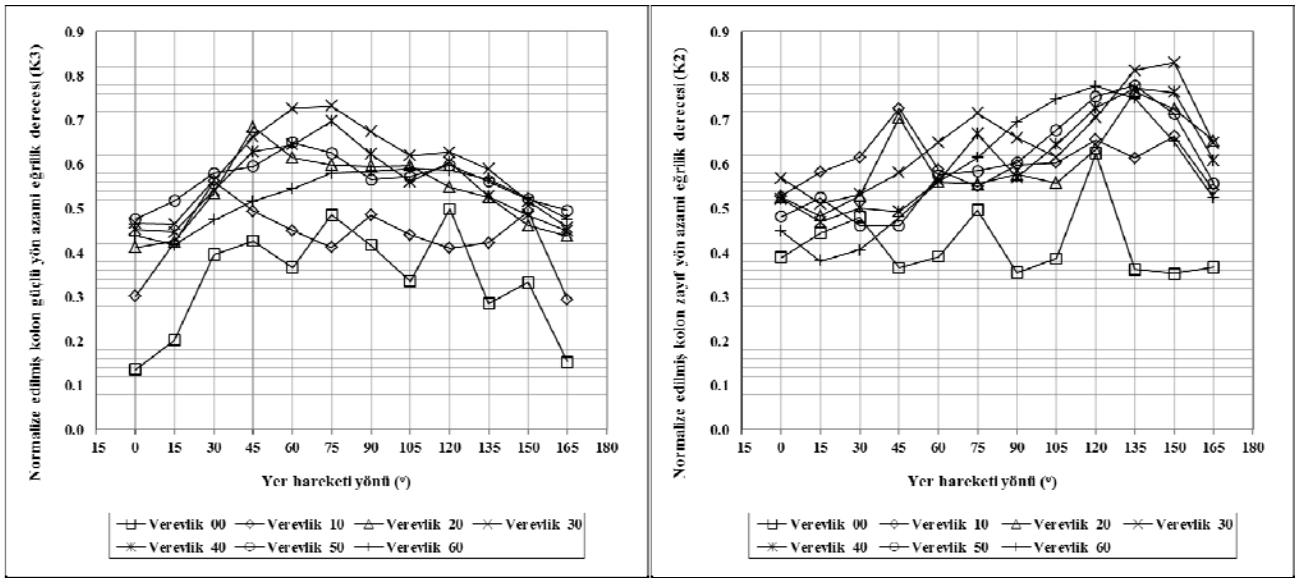
Her iki tip köprü modelleri için de sonuçlar incelendiğinde yer hareketi uygulanma açısının kolon güçlü yön momentinde daha etkili olduğu ve daha fazla fark yarattığı ilk göze çarpan gözlem olarak söylenebilir. Tek bir kritik açı belirlemenin söz konusu olmadığı bu sonuçlar için, her verevlik tipinde farklı bir etkime açısının momentlerde daha çok artışa sebep olduğu sonucu çıkarılabilir. Daha rijit özellik gösteren köprüler için M3 momentini en büyük değerlerine taşıyan yer hareketi açısının tüm verevlikler için 45° ile 90° arasında olduğu gözlemlenirken M2 momentleri için yüksek verevlik derecesine sahip köprülerde kritik açı 90° ile 120° arasında olmakla birlikte düşük verevliğe sahip olanlarda daha düşük etkime açıları M2 momentinin en yüksek oluştuğu açılar bulunmaktadır.Farklı verevliklerde yer hareketi yönlerine göre momentlerdeki değişim eğilimi daha rijit olan köprü tiplerinde daha belirgindir. Şekil 4-2'de M3 momentlerinin düşük verevlik derecesine sahip köprüler için 45° ile 60° arasında maksimize olduğu görülürken Şekil 4-3'de yine düşük verevliğe sahip köprülerde M3'ün en yüksek değerlerine ulaştığı etkime açıları 90° ile 120° arasındadır. Öte taraftan M2 momentlerindeki dağılım ve farklar incelendiğinde her iki köprü tipi için de oluşan farkların %10'dan az olduğu söylenebilir.

Deplasman bazlı istem parametresinin yer hareketi açısındaki değişikliklerde göstereceği değişiminin değerlendirilmesi açısından kolonların güçlü ve zayıf yönlerindeki elde edilen eğrilik değerleri sonuçları aşağıda sunulmuştur. Şekil 4-4' te kolonun güçlü ve zayıf yönlerindeki normalize edilmiş eğrilik değerleri ile ortalamaları sunulmuştur. Güçlü yön için K3, zayıf yön için ise K2 kısaltmaları kullanılacaktır.

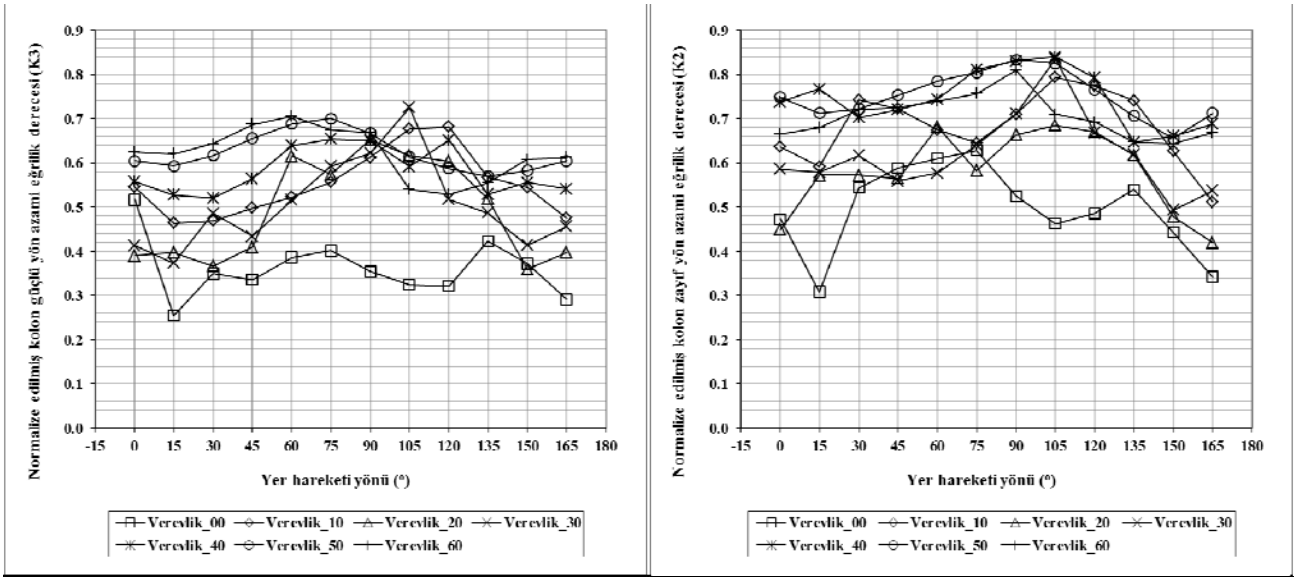


Şekil 4-4 Kolon normalize edilmiş en yüksek güçlü (K3) ve zayıf yön (K2) eğrilik değerleri dağılımı

Şekil 4-1'de moment dağılımlarında olduğu gibi burada da tüm analiz sonuçları aynı anda değerlendirildiğinden eğrilik değerlerine yer hareketi uygulanma yönünün etkisi ancak ortalama olarak görülebilmektedir. Her bir köprü tipinde ve verevlik derecesindeki etkiyi daha iyi inceleyebilmek için Şekil 4-5 ve Şekil 4-6 sunulmuştur.



Şekil 4-5 Daha rijit olan birinci tip köprüler için normalize edilmiş kolon eğrilik ortalama değer dağılımı



Şekil 4-6 Daha az rijit olan ikinci tip köprüler için normalize edilmiş kolon eğrilik ortalama değer dağılımı

Şekil 4-5 ve Şekil 4-6 incelendiğinde genel olarak verevliği yüksek köprülerde eğrilik değerlerinin nispeten daha yüksek olduğu sonucu göze çarpmaktadır. Kolon momentlerinde olduğu gibi, eğrilik derecelerinde de yer hareketi açısındaki değişikliğin etkileri köprünün rijitlik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Örneğin verevliği az olan köprülerden daha az rijit olanlarında yer hareketinin açısının etkileri %10'dan az olduğu halde rijit yapıdaki köprülerde bazı açılarda bu fark %20'yi aşmaktadır.

Kritik yer hareketi uygulama açısının tespiti için yapılan bu çalışmada, genel olarak söylenebilir ki en elverişsiz sonuçlar yer hareketi köprü modellerine iki asal yönlerinden uygulandığında oluşmuştur. Fakat hala yer hareketi verisinin iki yatay bileşeninden hangisinin hangi asal yönde uygulanacağı konusu çelişki barındırmaktadır. Bu soru işaretini gidermek amacıyla bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki analizler her iki kombinasyonun da denenip en elverişsizin seçilmesi şeklinde yapılmıştır.Yani, belli bir köprü tipinin belli bir verevliği için oluşturulan modelle yedi yer hareketinden her biri için yapılacak analiz iki vaka şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilkinde köprünün bir asal yönüne ivme kaydı bileşenlerinden ilki uygulanıp diğer asal yönde de öteki yatay bileşen uygulanırken, ikinci vakada tam tersi uygulanmıştır. Sonuçta da belirlenen sismik istem parametresini en elverişsiz yapan vakaya ait sonuç kabul edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Türkiye'de yaygın olarak kullanılan iki veya daha fazla açıklığı olan öngermeli kirişli betonarme köprüler için rijitlik özelliklerine ve verevlik açılarına göre kuvvetli yer hareketinin uygulanma açısının seçilen sismik istem parametreleri üzerinde yarattığı farklılıkları gözlemlemek amacıyla bir dizi doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Rijit ve daha az rijit olmak üzere iki tip köprü belirlenmiş, her biri yedi farklı verevlik derecesi için modellenmiştir. Bu modellerden her birine yedi farklı yer hareketi ivme verisinin iki yatay bileşeni 12 farklı açıdan uygulanmıştır. Sonuçlar kolon zayıf ve güçlü yön momentleri ile eğrilik değerleri açısından değerlendirilerek yer hareketi açısındaki değişikliğin etkileri incelenmiştir.

Bu analizlerin sonucunda söylenebilir ki açılardaki değişiklik köprünün rijit bir davranışa sahip olup olmamasına ve verevlik açısına göre farklılık göstermektedir. Örneğin daha rijit yapıdaki köprülerde kolon güçlü yön momenti düşük verevliği olan köprülerde 45-60 dereceler arasında en yüksek değerlerine ulaşırken bu durum benzer verevlikteki daha az rijit köprüler için 90-120 derece arasındaki yer hareketi açılarında gözlenmiştir. Benzer şekilde, kolon zayıf yön momentlerindeki değişiklik güçlü yön momentlerine göre oldukça farklıdır. Hatta M2 momentleri üzerindeki yer hareketi açısındaki değişikliklerin her bir verevlik için ±%10'dan fazla değişikliğe sebep olmadığı söylenebilir.

Sismik istem parametresi olarak kolon eğrilik değerleri incelendiğinde yine yer hareketi açısındaki değişikliğin iki farklı köprü tipinde birbirinden farklı davranış gösterdiği söylenebilir. Düşük verevliğe sahip köprülerde rijit olanlarda kolon güçlü yönündeki eğrilik dereceleri yer hareketinin açısına göre yaklaşık %20 oranında değişiklik gösterirken daha az rijit köprülerde benzer verevlikteki köprülerde aynı fark %10 dolaylarını aşmamıştır.

Sonuçta genel olarak, sismik istem parametrelerinin köprünün iki dik yönünde uygulanan yer hareketi ivme kayıtları neticesinde oluştuğu çıkarımı yapılmıştır. Fakat, yer hareketi bileşenlerinden hangisinin köprünün hangi asal yönünde uygulanacağı sorusu cevaplanamadığından her iki durumun da analiz edilerek en elverişsiz olanın kullanılması gereklidir. Bunlarla birlikte, aranan parametreye göre ve köprülerin geometrik ve rijitlik özelliklerine göre yer hareketinin uygulama açısının yaratacağı etkinin farklı olacağı unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR:

AASHTO, 1996. AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, American Association of State Highway and Transportation Officials 16th Ed. with 2001 Interims, Washington D.C.

Avşar, Ö., Yakut, A. ve Caner, A. (2011). Analytical fragility curves for ordinary highway bridges in Turkey. *Earthquake Spectra* **27:4**, 971-996.

Caltrans, 2010 Seismic Design Criteria Version 1.6., California Department of Transportation, Sacramento, CA.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007 (DBYBHY-2007), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

Khaled A., Tremblay R. and Massicotte B., 2006, "Assessing the Adequacy of the 30% Combination Rule in Estimating the Critical Response of Bridge Piers under Multi-Directional Earthquake Components", 7th International Conference on Short&Meduim Span Bridges, Paper No. SD-014-1, Montreal, Canada.

OpenSees, (2005). Open System for Earthquake Engineering Simulation, Version 1.7.3, Pacific Earthquake Engineering Research Center, http://opensees.berkeley.edu.

Priestley M.J.N., Seible F. and Calvi G.M., 1996, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.