SİSMİK İZOLASYONU LRB İLE YAPILAN YAPILARIN ÇİFT DOĞRULTULU DEPREM HAREKETLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ KURŞUN ÇEKİRDEKTEKİ ISINMAYA BAĞLI DEĞİŞİMİ

G. Özdemir[1] ve U. Akyüz[2]

[1] *Araştırma Görevlisi Doktor, İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: gokas3050@yahoo.com

ÖZET:

Bu makalede, kurşun çekirdekli izolatörlerin çift doğrultulu deprem hareketleri altındaki davranışı kurşun çekirdekteki ısınma dikkate alınarak incelenmiştir. Bu amaçla, her iki yatay doğrultuda eş zamanlı olarak uygulanan depremler ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Bu analizler için seçilen deprem hareketleri sıklıkla kullanılan yakın kaynaklı deprem kayıtlarıdır. Analizler sırasında kurşun çekirdekli izolatörlerin modellenmesinde kullanılan doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi, tekrarlanır hareketler altında kurşun çekirdekte oluşan ısınmaya bağlı olarak izolatörün yatay doğrultudaki dayanımının azalmasına imkan sağlamaktadır. Kurşun çekirdekli izolatörlerin davranışı, analizler sonucunda elde edilen maksimum izolatör deplasmanlarının (MİD'nın) ve kurşun çekirdekteki maksimum ısının (KÇMI'nın) fonksiyonları olarak incelenmiştir. Çift doğrultulu hareketlere bağlı olarak izolatör davranışlarındaki artışın miktarının belirleyebilmek amacıyla tek doğrultulu deprem hareketleri altında da analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında çift doğrultulu analizler sonucunda elde edilen MİD'nda ve KÇMI'da, tek doğrultu altında elde edilenlere göre sırasıyla ortalama %20 ve %50 artış gözlenmiştir. Ayrıca izolatörün Q/W oranı arttıkça elde edilen bu değerler de artış göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Kurşun çekirdekli izolatör, sismik izolasyon, kurşun çekirdekteki ısınma, çift doğrultulu deprem hareketleri, opensees.

1. GİRİŞ

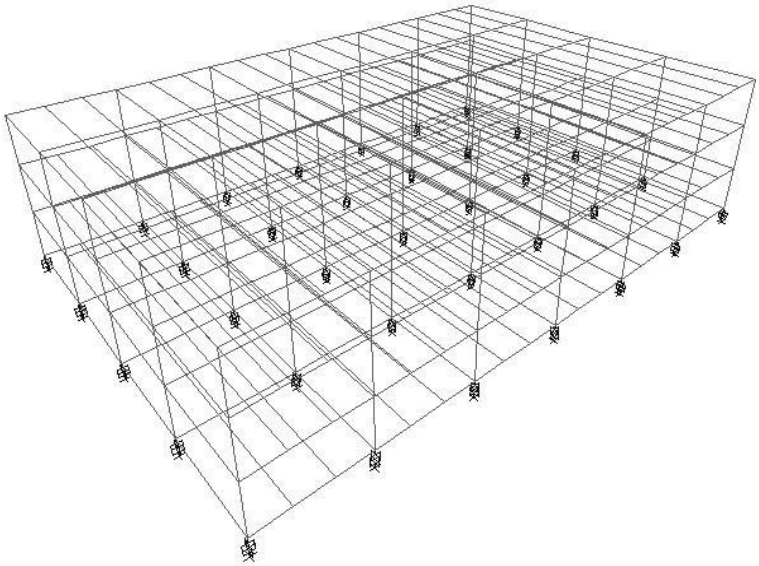
Değişik izolatör türleri içinde en çok tercih edilenlerden birisi olan kurşun çekirdekli izolatörlerin, depremlerin yapılar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltma konusundaki üstün performansları birçok durumda tespit edilmiştir. Örneğin, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri sırasında oldukça etkili performans sergilemişlerdir (Stewart vd., 1999; Nagarajaiah ve Sun, 2000). Yaşanan depremler sonucunda gözlenen bu üstün performans, kurşun çekirdekli izolatörler kullanılan izolasyonlu yapıların analitik olarak da çok sayıda araştırmaya konu olmasına yol açmıştır (Hwang ve Chiou, 1996; Tan ve Huang, 2000; Faravelli, 2001; Kulkarni ve Jangid, 2003). Ancak, her ne kadar geçmişte yürütülen bu çalışmalar, izolasyonlu yapılar hakkında çok değerli bilgi ve tecrübe birikimine öncülük etmiş olsalar da, bu çalışmaların hiçbiri kurşun çekirdekli izolatörler için gerçekçi bir kuvvet-deplasman ilişkisi kullanmamıştır. Bunun yerine alt ve üst sınır analizlerinde kullanılmak üzere, zamanla herhangi bir değişim göstermeyen kuvvet-deplasman eğrileri benimsenmiştir. Halbuki, kurşun çekirdekli izolatörler ile yapılan deneyler göstermiştir ki, tekrarlanır yükler altında izolatör dayanımı azalmaktadır (Robinson, 1982). İzolatör dayanımındaki bu azalımın sebebini araştıran Kalpakidis (2008), esas etkenin büyük ölçüde kurşun çekirdekteki ısınmaya (KÇI'ya) bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında KÇI miktarını hesaplamayı mümkün kılan bir matematik model geliştirilmiş (Kalpakidis ve Constantinou, 2009a) ve önerilen hesaplama yönteminin doğruluğu yürütülen deneysel çalışmalarla da teyit

edilmiştir (Kalpakidis ve Constantinou, 2009b). Önerilen bu matematiksel model sayesinde kurşun çekirdekteki sıcaklık artışı anlık olarak hesaplanıp, kurşunun o andaki yeni kayma dayanımının hesabı mümkün olmaktadır.

Yürütülen bu çalışmada, kurşun çekirdekli izolatörler için Kalpakidis ve Constantinou (Kalpakidis ve Constantinou, 2009a) tarafından geliştirilen doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi, izolasyonlu bir yapı çift doğrultulu deprem hareketlerine maruz kaldığında, tek doğrultulu deprem etkileriyle kıyaslandığında, maksimum izolatör deplasmanlarında nasıl bir artış gözlemlendiği incelenmiştir. Bu amaçla, zaman tanım alanında hem çift hem de tek doğrultulu deprem etkileri altında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bu doğrultuda, tipik bir izolasyonlu yapı OpenSees (2005) programında modellenmiş olup, analizler sonucunda elde edilen veriler KÇI ve MİD dikkate alınarak irdelenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada, izolatörlerin karakteristik dayanımının üstündeki ağırlığa oranını veren Q/W değerinin incelemeye konu olan değerlerin değişimine olan etkisi de araştırılmıştır.

2. YAPI ÖZELLİKLERİ

Analizler sırasında kullanılan yapı, aslen NEHRP Recommended Provisions: Design Examples (FEMA 451, 2006), Bölüm 11'de incelenen ve çatı katıyla birlikte 4 katlı bir binadır. Yapıyı olabildiğince basitleştirmek ve sadece izolasyon seviyesindeki davranışa odaklanabilmek amacıyla, orijinal yapıda bulunan çatı katı dikkate alınmamıştır. Bu durumda, analizlerde kullanılan 3 katlı yapının 3-boyutlu modeli Şekil 1'de görüldüğü gibidir. İncelenen yapı tamamen simetrik olup taşıyıcı çerçeve sistemi çelik elemanlardan oluşmaktadır. Boyuna ve enine doğrultularda sırasıyla 6 ve 4 özdeş açıklığı bulunan yapıda her bir açıklık 9m boyundadır. Toplam plan boyutları 36mx54m'dir. Bütün kat yükseklikleri 3m, dolayısıyla binanın toplam yüksekliği 9m'dir.

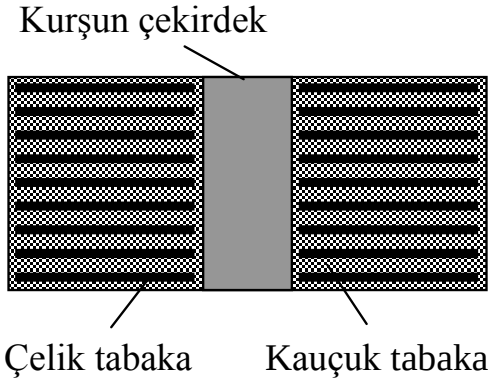


Şekil 1. Analizlerde kullanılan 3-boyutlu, sismik izolasyon uygulanan yapı modeli.

Şekil 1'de görülen binanın toplam ağırlığı 73000 kN olup katlara dağılımı şu şekildedir: izolasyon seviyesi, 1. ve 2. kat seviyeleri eşit ağırlıkta ve 19567 kN; çatı katı ağırlığı ise diğer kat ağırlıklarının %75'ine eşit ve 14600 kN'dur. Her katın ağırlığı o kattaki düğüm noktalarına eşit olarak dağıtılmıştır. İncelenen binada, toplamda 35 izolatör kullanılmıştır ve bu izolatörler, izolasyon seviyesinde her kolon altına bir tane gelecek şekilde yerleştirilmiştir.

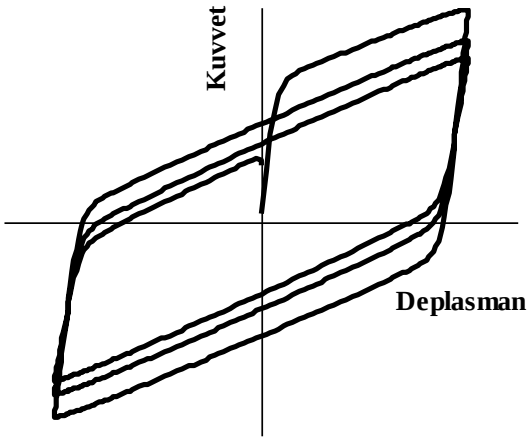
3. İZOLATÖR ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan izolatör tipi, kurşun çekirdekli izolatörlerdir. Bu izolatörlerde, ortasında boydan boya kurşun bir çekirdeğin yer aldığı ve bu çekirdeğin etrafında da kauçuk ve çelik tabakaların ardışık olarak sıralandığı bir yapı söz konusudur (Şekil 2). Kurşun çekirdekli izolatörlerin bu birleşik yapısı, yatay doğrultuda ihtiyaç duyulan esneklik ve dayanımın yanı sıra düşey doğrultuda da rijitliğin tek bir elemanla sağlanabilmesine imkân vermektedir.



Şekil 2. Kurşun çekirdekli izolatörün yapısı.

Geçmişte, kurşun çekirdekli izolatörler ile yürütülen deneysel çalışmalar göstermiştir ki bu izolatörler tekrarlanır yüklere maruz kaldıklarında yatay doğrultudaki dayanımları azalmaktadır (Şekil 3). Yakın zamanda yürütülen bir çalışmada, kurşun çekirdekli izolatörlerin dayanımında gözlemlenen bu azalmanın olası sebepleri araştırılmıştır (Kalpakidis and Constantinou, 2009a,b). Yazarlar bu çalışmalarında, Şekil 3'teki gibi bir dayanım kaybına sebep olan etkenin, tekrarlanır hareketler altında kurşun çekirdekte açığa çıkan ısının olduğunu göstermiştir. Açığa çıkan bu ısı, kurşunun kayma gerilmesini azaltmak suretiyle, yatay doğrultudaki dayanımın azalmasına yol açmaktadır. Kalpakidis and Constantinou (2009a,b) ayrıca bu davranışın benzetimine imkân sağlayacak bir model geliştirmişlerdir. Yazarların önerdiği bu model sayesinde, kurşun çekirdeğin kayma dayanımı, σ_{YL}, maruz kalınan hareket boyunca ortaya çıkan ısıya bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Geliştirilen bu malzeme modelinin detayları bir sonraki bölümde verilmiştir.



Şekil 3. Tekrarlanır hareket altında tipik bir kurşun çekirdekli izolatöre ait kuvvet-deplasman grafiği.

4. KURŞUN ÇEKİRDEKTEKİ ISINMAYA BAĞLI DAYANIM KAYBININ MODELLENMESİ

Kalpakidis and Constantinou (2009a) tarafından önerilen malzeme modeli, esas olarak, tekrarlanır yükler altında kurşun çekirdekte açığa çıkan ısı miktarını hesaplamayı mümkün kılmıştır. Hesaplanan anlık sıcaklık değerleri kurşunun o andaki kayma gerilmesinin, dolayısıyla da izolatörün dayanımının hesaplanmasında kullanılmıştır. Önerilen bu malzeme modelinin kurşun çekirdekli izolatörlerin davranışını benzetimindeki başarısı da deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak ispatlanmıştır (Kalpakidis and Constantinou, 2009b). Bu modele göre, kurşun çekirdekteki ısınmaya bağlı olarak kurşunun kayma gerilmesindeki değişimi ifade eden denklem takımı şu şekildedir:

$$\dot{T}_L = \frac{\sigma_{YL}(T_L)\cdot\sqrt{Z_x^2+Z_y^2}\sqrt{\dot{U}_x^2+\dot{U}_y^2}}{\rho_L\cdot c_L\cdot h_L} - \frac{k_s\cdot T_L}{r\cdot\rho_L\cdot c_L\cdot h_L}\cdot\left(\frac{1}{F}+1.274\cdot\left(\frac{t_s}{r}\right)\cdot\left(t^+\right)^{-1/3}\right) \tag{1}$$

$$F=\begin{cases} 2\cdot\left(\dfrac{t^+}{\pi}\right)^{1/2}-\dfrac{t^+}{\pi}\cdot\left[2-\left(\dfrac{t^+}{4}\right)-\left(\dfrac{t^+}{4}\right)^2-\dfrac{15}{4}\cdot\left(\dfrac{t^+}{4}\right)^3\right], & t^+<0.6 \\ \dfrac{8}{3\cdot\pi}-\dfrac{1}{2\cdot\left(\pi\cdot t^+\right)^{1/2}}\cdot\left[1-\dfrac{1}{3\cdot\left(4\cdot t^+\right)}+\dfrac{1}{6\cdot\left(4\cdot t^+\right)^2}-\dfrac{1}{12\cdot\left(4\cdot t^+\right)^3}\right], & t^+\geq 0.6 \end{cases} \tag{2}$$

$$t^+=\frac{\alpha_s\cdot t}{r^2} \tag{3}$$

$$\sigma_{YL}(T_L)=\sigma_{YL0}\cdot exp(-E_2\cdot T_L) \tag{4}$$

Yukarıdaki denklem takımında h_L, r, σ_{YL0}, ρ_L (11200 kg/m^3) ve c_L (130 J/kg^{o}C) sırasıyla izolatörün yüksekliğini, kurşun çekirdeğin yarıçapını, kurşunun kayma gerilmesinin başlangıç değerini, kurşunun yoğunluğunu ve kurşunun özgül ısısını temsil etmektedir. Ayrıca, t_s, izolatördeki toplam çelik plaka kalınlığını, α_s, çeliğin ısı yayınım katsayısını (1.41x10^{-5} m^2/s), k_s, çeliğin ısı iletkenliği katsayısını (50 W/m^{o}C), t, hareketin başlangıcından itibaren geçen zamanı, t^+, boyutsuz zaman aralığını simgelemektedir. E_2 (0.0069/^{o}C) ise sıcaklığa bağlı kayma gerilmesini, $\sigma_{YL}(T_L)$, hesaplamak için σ_{YL0} ile kurşun çekirdek sıcaklığı, T_L, arasındaki ilişkiyi sağlayan katsayıdır.

5. KULLANILAN PLASTİSİTE MODELİ

Çift doğrultulu deprem analizleri sırasında izolatörler için kullanılan kuvvet-deplasman eğrilerinin her iki yatay doğrultuda etkileşimli olarak çözümünde kullanılan matematiksel model ilk olarak Park et al. (1986) tarafından geliştirilmiştir. Bu model, izolatör her iki yatay doğrultuda da doğrusal olmayan davranış sergilediğinde, izolatör tarafından taşınan bileşke kuvvetin her iki doğrultunun etkileşimli çözümü sonucunda belirlenmesine imkân sağlar. Park et al. (1986) tarafından geliştirilen model aşağıdaki gibidir:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = K\cdot\begin{Bmatrix} U_x \\ U_y \end{Bmatrix} + \left(\sigma_{YL}(T_L)A_L\right)\cdot\begin{Bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{Bmatrix} \tag{5}$$

$$Y \cdot \begin{Bmatrix} \dot{Z}_x \\ \dot{Z}_y \end{Bmatrix} = (A \cdot [I] - B \cdot [\Omega]) \cdot \begin{Bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{U}_y \end{Bmatrix} \tag{6}$$

$$[\Omega] = \begin{Bmatrix} Z_x^2 \cdot [sgn(\dot{U}_x Z_x) + 1] & Z_x Z_y [sgn(\dot{U}_y Z_y) + 1] \\ Z_x Z_y [sgn(\dot{U}_x Z_x) + 1] & Z_y^2 [sgn(\dot{U}_y Z_y) + 1] \end{Bmatrix} \tag{7}$$

Yukarıda verilen denklemlerde *F* ve *U* sırasıyla izolatör kuvvetini ve izolatör deplasmanını simgeler. Alt indis olarak kullanılan *x* ve *y* harfleri ise birbirine dik, yatay doğrultuları temsil eder. Öte yandan, doğrusal olmayan kuvvet-deplasman eğrisinin akma deformasyonu *Y* ile, akma sonrası eğrinin rijitliği *K* değişkenleri ile ifade edilmektedir. A_L ve T_L ise sırasıyla kurşun çekirdeğin kesit alanını ve kurşun çekirdeğin sıcaklığını simgelemek için kullanılmıştır. Bu denklemlerde kullanılan Z_x ve Z_y değerleri birimsiz katsayılar olup +1 ve -1 arasında değişen değerler alırlar. Bu iki katsayı, her iki yatay doğrultudaki izolatör kuvvetlerinin etkileşimli çözümünü ve de kuvvetlerin yönlerinin belirlenmesini sağlar. Denklem 6'da görülen *A* ve *B* arasında $A=2B$ ilişkisi olmalıdır (Mokha vd., 1993). Çünkü, bu ilişki kuvvet ve deplasman vektörlerinin aynı yönde olması için elzemdir. Ayrıca, [I] birim matrisini, *sgn* signum fonksiyonunu temsil etmektedir. Denklem 4 yardımıyla anlık olarak hesaplanan kurşun çekirdeğin kayma gerilmesi, Denklem 5'te yerine koyularak her an için güncellenmiş (azaltılmış) bir izolatör kuvvetinin hesaplanmasına olanak sağlar.

6. SEÇİLEN DEPREM KAYITLARI

Bu çalışmada, literatürde oldukça yaygın biçimde kullanılan 10 çift yakın saha deprem kaydı seçilmiştir. Bu kayıtların seçimi sırasında şu sınırlamalara dikkat edilmiştir: deprem büyüklüğü (M_w) 6.7 ile 7.6 arasında olacak ve faya olan en yakın mesafe (R) 20 km'den az olacak. Ayrıca, seçilen yer hareketlerinin en üstteki 30 m'lik zemin tabakasındaki ortalama kayma dalga hızı 360 m/s ile 750 m/s arasında olacak şekilde gruplandırmaya gidilmiştir. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarına ait tanımlayıcı bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Bu tabloda, PGA, PGV ve PGD sırasıyla maksimum zemin ivmesini, maksimum zemin hızını ve maksimum zemin deplasmanını temsil etmektedir.

Tablo 1. Seçilen deprem kayıtlarının özellikleri.

#	Deprem Kaydı	İstasyon	M_w	R (km)	Bileşen	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	Cape Mendocino	Fortuna Blvd.	7.0	20.0	0	0.12	30.0	27.6
					90	0.11	21.7	12.8
2	Gazli	Karakyr	6.8	5.5	0	0.61	65.4	25.3
					90	0.72	71.6	23.7
3	Kocaeli	Gebze	7.5	10.9	0	0.24	50.3	42.7
					270	0.14	29.7	27.5
4	Kocaeli	Izmit	7.5	7.2	180	0.15	22.6	9.8
					90	0.22	29.8	17.1
5	Kobe	KJM	6.9	1.0	0	0.82	81.3	17.7
					90	0.60	74.4	20
6	Loma Prieta	Saratoga Aloha Ave	6.9	8.5	0	0.51	41.2	16.2
					90	0.32	42.6	27.5
7	Northridge	Newhall W Pico Canyon	6.7	5.5	46	0.46	92.8	56.6
					316	0.33	67.4	16.1
8	ChiChi	TCU057	7.6	11.8	N	0.09	58.8	56.2
					W	0.12	42.6	56.7
9	ChiChi	TCU087	7.6	7.0	N	0.12	37.1	25.5
					W	0.13	40.8	62.6
10	Tabas	Tabas	7.4	2.1	LN	0.84	97.8	36.9
					TR	0.85	121.4	94.6

7. DEPREMLERİN ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

Analizler sırasında kullanılan deprem kayıtlarının seçilen spektrum eğrisi ile uyumlu hale getirilebilmesi için yapılan ölçeklendirme işlemi iki aşamadan oluşmaktadır ve daha önce Özdemir ve Constantinou (2010) tarafından da kullanılmıştır. Birinci aşamada uygulaması yapılan ölçeklendirme işleminin amacı, hedef spektral eğri ile deprem kayıtlarının iki yatay doğrultudaki bileşenlerinin geometrik ortalaması arasındaki toplam hata miktarını belirli bir periyot aralığında en aza indirmektir. Bu sayede, hedef spektrum eğrisi ile mümkün olduğunca uyumlu deprem hareketleri kullanılmış olacaktır. Burada sözü edilen hata miktarı, ε, Denklem 8'de tanımlanmıştır.

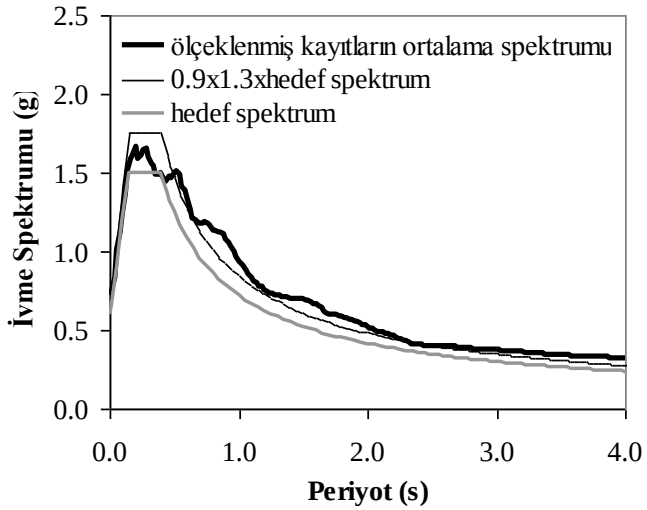
$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} b_i \left(a \cdot y_i - y_{Ti}\right)^2 \tag{8}$$

Yukarıda verilen denklemde b_i, dikkate alınan T_i periyodunun toplam hata miktarına ne kadar katkısının olduğunu belirleyen ağırlık katsayısı; a, kullanılan deprem kayıtlarının her iki yatay doğrultudaki bileşenleri için hesaplanacak olan ölçekleme katsayısı; y_i, incelenen deprem kayıtlarının her iki yatay doğrultudaki bileşenlerinin geometrik ortalamasının, dikkate alınan T_i periyodundaki değeri; y_{Ti}, hedef spektrum eğrisinin, dikkate alınan T_i periyodundaki değeri; n, dikkate alınan T_i sayısıdır. Tariflenen hata miktarının en az olduğu duruma karşılık gelen ölçekleme katsayısı, a, Denklem 9'da gösterildiği gibi Denklem 8'in a'ya göre türevini alıp sıfıra eşitleyerek hesaplanır.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i \cdot y_i \cdot y_{Ti}}{\sum_{i=1}^{n} b_i \cdot y_i^2} \tag{9}$$

Birinci aşama ölçeklemede, izolasyonlu yapıların uzun periyotlara sahip olduğu dikkate alınarak, beş farklı periyot değeri (T_i) seçilmiştir. Bunlar, 1, 2, 3, 4 ve 5 s'dir. Bu periyotların toplam hata miktarına katkısını belirleyen ağırlık katsayıları (b_i), seçilen depremlerin hedef spektrum ile en uyumlu olduğu durumu verecek şekilde belirlenmiştir.

Uygulanan ölçekleme yönteminin ikinci aşamasında ise deprem kayıtlarının yatay bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökü hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin ortalaması, hedef spektrumun 1.3 katının %90'ından daha aşağıda olmayacak şekilde tekrar ölçeklendirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan hedef spektrum eğrisi, 5. Bölüm'de tariflenen zemin koşulları uyarınca Türk Deprem Şartnamesi'nden (2007) alınmıştır. Şekil 4'te hem seçilen hedef spektrum eğrisi hem de ölçeklemesi yapılan deprem kayıtlarının ortalama spektrum eğrisi %5 sönümleme değeri için gösterilmiştir.



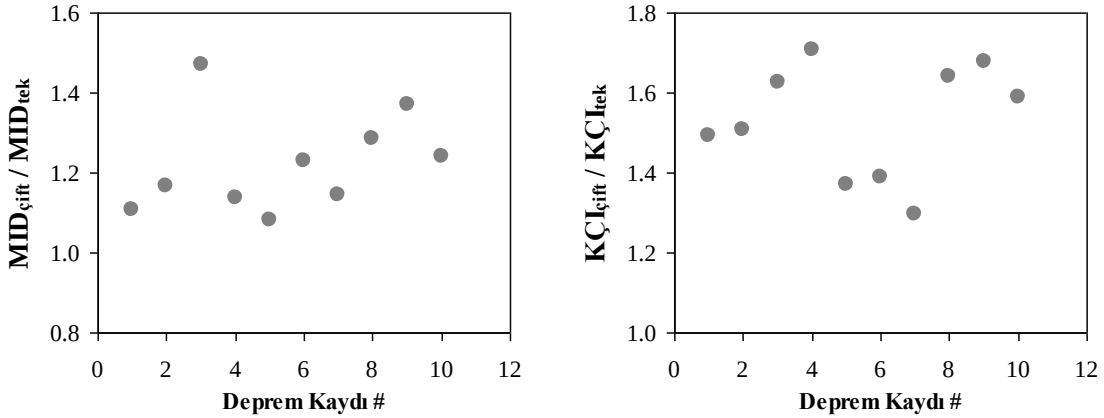
Şekil 4. %5 sönümleme değeri için hedef spektrum ve ölçeklenmiş depremlerin ortalama spektrumu.

8. ÇİFT DOĞRULTULU DEPREM HAREKETLERİNE BAĞLI OLARAK MİD VE KÇI DEĞERLERİNDE GÖZLENEN ARTIŞ MİKTARLARI

Bu bölümde, deprem hareketlerinin tek doğrultuda değil de çift doğrultuda eş zamanlı olarak etkimesi durumunda MİD ve KÇI değerlerinde oluşacak artış miktarları incelenmiştir. Analizler sırasında kullanılan izolatörün tasarım özellikleri şöyledir: izolasyon periyodu 2.5s, Q/W oranı 0.09 (burada Q, hareket başlamadan önce kuvvet-deplasman eğrisinde sıfır deplasman durumuna karşılık gelen kuvvet, W ise tek bir izolatör tarafından taşınan düşey doğrultudaki ağırlık değeridir). Tasarlanan izolatörün yüksekliği, h_L, 230 mm, kurşun çekirdek yarıçapı, a, 77.5 mm, toplam çelik plaka kalınlığı, t_s, 66 mm'dir. Bu değerler ışığında, izolatöre ait doğrusal olmayan kuvvet-deplasman eğrisindeki ilk akma dayanımına karşılık gelen değer 288.6 kN'dur ve Denklem (1)-(4)'te tanımlandığı gibi hareketin başlamasıyla kurşun çekirdekteki ısınmaya bağlı olarak kademeli olarak azalmaktadır.

MİD ve KÇI değerlerindeki artış miktarlarını belirlemek amacıyla incelenen yapıya öncelikle seçilen deprem kayıtlarının yatay doğrultudaki bileşenleri hesaplanan ölçekleme katsayıları kullanılarak ayrı ayrı etki ettirilmiş ve her iki doğrultuda elde edilen MİD ve KÇI değerlerinin en büyük değerleri MİD_{tek} ve KÇI_{tek} olarak adlandırılmıştır. Daha sonra, izolasyonlu yapı deprem kayıtlarının her iki yatay bileşenine eş zamanlı olarak maruz bırakılmıştır ve buradan elde edilen MİD ve KÇI değerleri de $\text{MİD}_{\text{çift}}$ ve $\text{KÇI}_{\text{çift}}$ olarak isimlendirilmiştir.

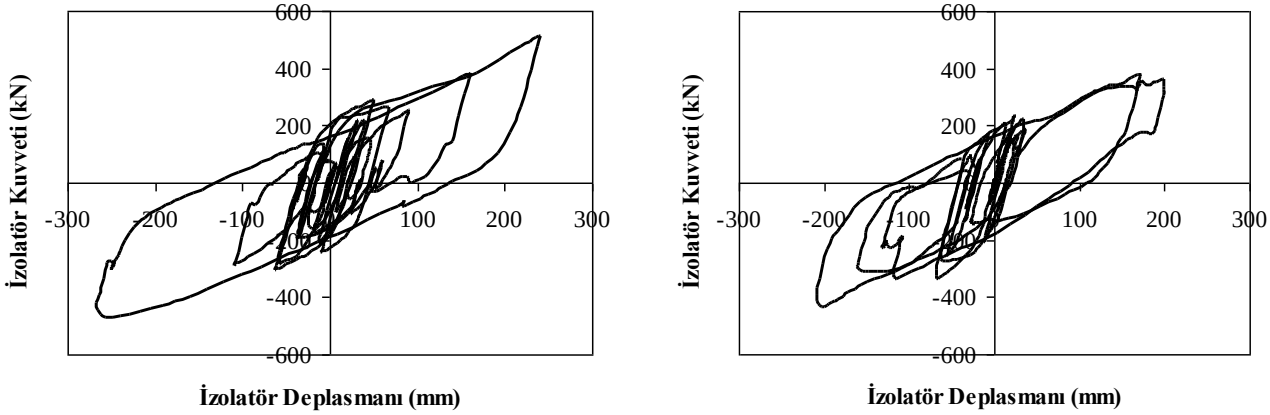
Bu durumda, $MİD_{çift}/MİD_{tek}$ ve $KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ oranları incelemeye konu olan artış miktarlarının belirlenmesine ışık tutmakta kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, sırasıyla, Şekil 5(a) ve 5(b)'de sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 5. Seçilen ve ölçeklenen depremkayıtları ile yapılan analizlerden elde edilen (a)$MİD_{çift}/MİD_{tek}$ değerleri, (b)$KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ değerleri.

Seçilen depremler ve izolatör özellikleri sonucunda, Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi, deprem hareketinin çift doğrultulu olarak etki etmesine bağlı olarak MİD değerindeki artış %8 ile %47 arasında değişim göstermektedir. Bu değerlerin ortalaması ise %22'dir. Öte yandan, Şekil 5(b)'de gösterilen KÇI miktarındaki artış ise %30 ile %71 arasında değişmekte olup %53 gibi bir ortalamaya sahiptir. Şekil 5'teki sonuçlar incelendiğinde çıkan sonuç, çift doğrultulu deprem analizlerinde kurşun çekirdek yaklaşık olarak ortalama %50 daha fazla ısınırken bu oran, deplasmanlar dikkate alındığında, %20 mertebesinde kalmaktadır. Bunun sebebi, deprem kaydındaki ana dalga tarafından harekete zorlanan izolatör maksimum deplasman değerine de burada ulaşmaktadır. Ancak, ana dalgadan sonra da daha küçük dalgalar altında salınıma devam eden izolatör ısınmaya devam etmektedir. Bu artış, maksimum deplasmanı etkilemese de kurşun çekirdekteki sıcaklık artışına doğrudan etki etmektedir. Bu durum Şekil 6'da açık bir şekilde görülmektedir.

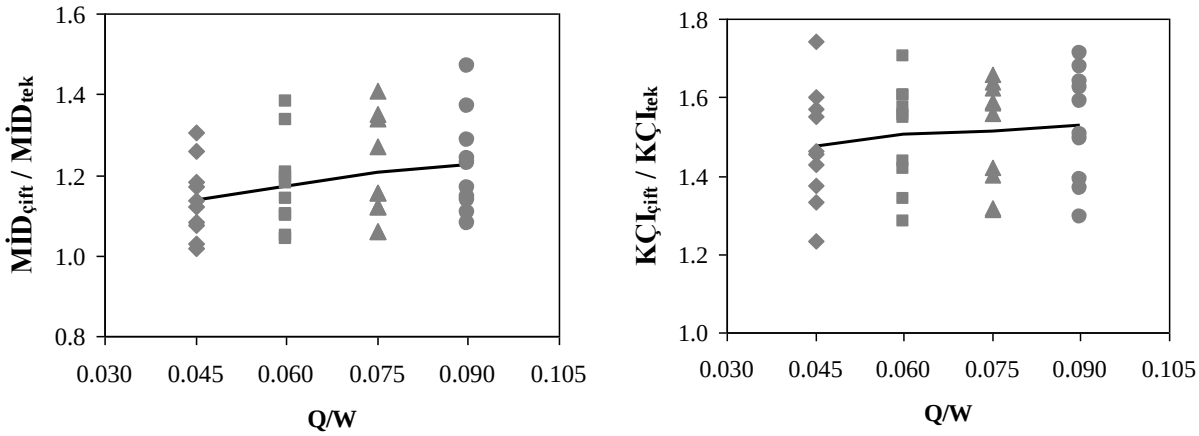


(a) (b)

Şekil 6. Çift doğrultulu deprem analizleri sonucunda elde edilen tipik kuvvet-deplasman eğrileri (a) X doğrultusu için, (b) Y doğrultusu için.

9. Q/W DEĞERİNİN $X_{çift}/X_{tek}$ ORANINA ETKİSİ

Bölüm 8'den farklı olarak, bu bölümde $MİD_{çift}/MİD_{tek}$ ve $KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ oranlarının *Q/W* değerine bağlı olarak nasıl bir değişim sergilediği incelenmiştir. Bu amaçla, izolasyon periyodu 2.5 s'de sabit tutulurken *Q/W* değeri 0.045, 0.060, 0.075 ve 0.090 olacak şekilde parametrik analizler yapılmıştır. Diğer bütün değişkenlerin sabit tutulduğu bu analiz metodu sayesinde *Q/W* değerinin bahsi geçen artış miktarına olan etkisi açık bir şekilde gözlenebilecektir. *Q/W* değerinin $MİD_{çift}/MİD_{tek}$ ve $KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ oranları üzerindeki etkisi Şekil 7 aracılığıyla irdelenecektir. Şekil 7'de görülen kalın siyah çizgiler her bir *Q/W* değeri için elde edilen oranların ortalamasını simgelemektedir. Şekil 7(a)'da görüldüğü gibi, $MİD_{çift}/MİD_{tek}$ oranı, az da olsa, artan *Q/W* değeri ile artış göstermektedir. Örneğin, $MİD_{çift}/MİD_{tek}$ oranı *Q/W*=0.045 iken 1.14, *Q/W*=0.090 iken 1.22'dir. Benzer kıyaslama $KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ oranı için Şekil 7(b)'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere sıcaklık artış miktarında ortalama değerler baz alındığında Q/W değerine bağlı ciddi bir artış görülmemektedir. Örneğin, $KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ oranı *Q/W*=0.045 iken 1.48, *Q/W*=0.090 iken 1.53'tür.



(a) (b)

Şekil 7. Farklı Q/W oranları için elde edilen (a)$MİD_{çift}/MİD_{tek}$ değerleri, (b)$KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ değerleri.

10. SONUÇ

Bu çalışmada sismik izolasyonu kurşun çekirdekli izolatörler ile yapılan bir yapı, hem çift doğrultulu hem de tek doğrultulu deprem hareketlerine maruz bırakılmıştır. İncelenen izolatörlerin modellenmesinde kullanılan kuvvet-deplasman eğrisi, kurşun çekirdekteki ısınmaya bağlı olarak izolatör dayanımındaki azalmayı benzetmeye imkan sağlamaktadır. Yapılan analizler sonucunda kurşun çekirdekli izolatör davranışının çift doğrultulu analizlerde tek doğrultulu olanlara göre nasıl bir değişim gösterdiği incelenmiştir. Kurşun çekirdekli izolatör davranışında incelemeye konu olan parametreler kurşun çekirdekteki ısınma (KÇI) miktarı ve maksimum izolatör deplasmanıdır (MİD). Analizlerde yakın saha deprem kayıtları şartnamelerle uyumlu olması açısından ölçeklendirilerek kullanılmıştır. Yürütülen bu çalışmada ayrıca Q/W değerinin incelemeye konu olan artış miktarı üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

Zaman tanım alanında yürütülen analizler sonucunda görülmüştür ki çift doğrultulu analizlerden elde edilen kurşun çekirdekteki sıcaklık artışı tek doğrultulu analizlerden elde edilenlerden yaklaşık olarak %50 daha fazladır. Bu artış miktarı maksimum izolatör deplasmanları söz konusu olduğunda aşağı yukarı %20 mertebesindedir. Ortalama değerler dikkate alındığında, analiz sonuçlarından yapılan bir diğer çıkarım da Q/W değerindeki artışın $MİD_{çift}/MİD_{tek}$ oranında küçük de olsa artışa sebep olduğudur. Öte yandan, $KÇI_{çift}/KÇI_{tek}$ oranı Q/W değerindeki artıştan ihmal edilebilecek düzeyde az etkilenmektedir.

KAYNAKLAR

Faravelli L. (2001). Modelling the response of an elastomeric base isolator, *Structural Control*, **8**, 17-30.

FEMA 451 (2006). NEHRP Recommended Provisions: Design Examples, Building Seismic Safety Council, National Institude of Building Sciences, Washington.

Hwang J. S. ve Chiou J. M. (1996). An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings, *Engineering Structures*, **18**, 528-536.

Kalpakidis I. V. (2008). Effects of heating and load history on the behavior of lead-rubber bearings, *Ph.D. Thesis*, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo.

Kalpakidis I. V. ve Constantinou M. C. (2009a). Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearing I:Theory, *Journal of Structural Engineering – ASCE*, **135**, 1440-1449.

Kalpakidis I. V. ve Constantinou M. C. (2009b). Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearing II:Verification of Theory, *Journal of Structural Engineering – ASCE*, **135**, 1450-1461.

Kulkarni J. A. ve Jangid R. S. (2003). Effects of superstructure flexibility on the response of base-isolated structures, *Shock and Vibration*, **10**, 1-13.

Mokha A. S., Constantinou M. C. ve Reinhorn A. M. (1993). Verification of friction model of Teflon bearings under triaxial load, *Journal of Structural Engineering – ASCE*, **119**, 240-261.

Nagarajaiah S. ve Sun X. (2000). Response of base isolated USC hospital building in Northridge earthquake, *Journal of Structural Engineering – ASCE*, **126**, 1177-1186.

OpenSees (2005). Open system for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, http://www.opensees.berkeley.edu.

Özdemir G. ve Constantinou M. C. (2010). Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**, 1036-1042.

Park Y. J., Wen Y. K. ve Ang A. H. (1986). Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, 543-557.

Robinson W. H. (1982). Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**, 593-604.

Stewart J. P., Conte J. P. ve Aiken I. D. (1999). Observed behavior of seismically isolated buildings, *Journal of Structural Engineering – ASCE*, **125**, 955-964.

Tan R. Y. ve Huang M. C. (2000). System identification of a bridge with lead-rubber bearings, *Computers and Structures*, **74**, 267-280.

Türk Deprem Şartnamesi (2007). Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye.