



Influence of ground motion scaling methodology and lead rubber bearing seismic isolator modelling technique on seismic response of an isolated structure

Hakan Öztürk^{1*}, Gökhan Özdemir²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sakarya University, 54050, Sakarya, Türkiye

²Seismic Isolator Test Laboratory, Eskişehir Technical University, 26555, Eskişehir, Türkiye

Highlights:

- Bi-directional dynamic analyses with different ground motion scaling methods
- Seismic isolator modelling technique
- Effect of isolation period and characteristic strength ratio change

Keywords:

- Seismic isolation
- Ground motion scaling methods
- Lead rubber bearing
- Bounding analysis
- Bi-directional analysis

Article Info:

Research Article

Received: 22.05.2022

Accepted: 24.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1119686

Acknowledgement:

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK, 2218-118C510)

Correspondence:

Author: Hakan Öztürk
e-mail: hakanozturk@sakarya.edu.tr
phone: +90 264 295 7037

Graphical/Tabular Abstract

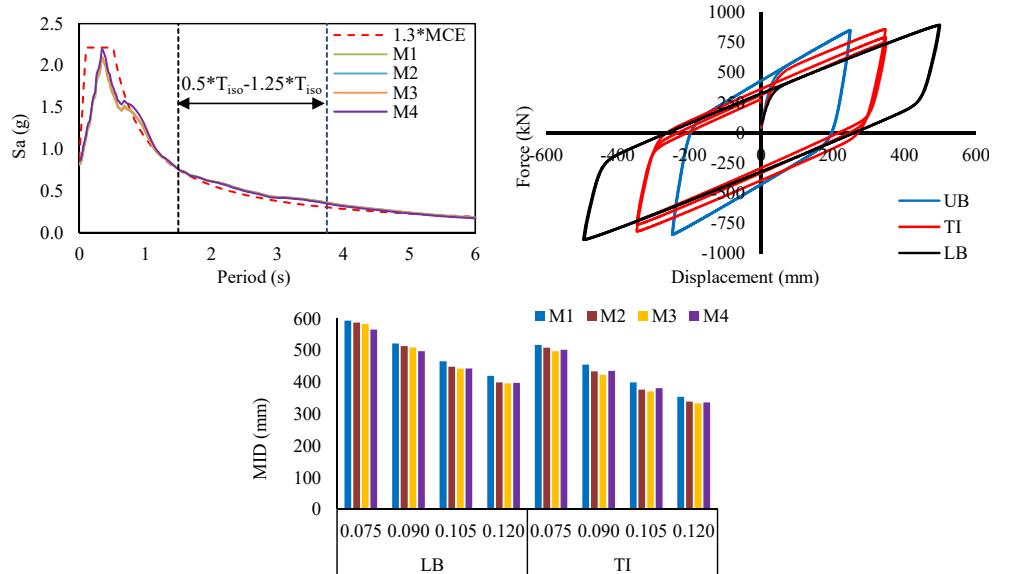


Figure A. Ground motion scaling methodology and seismic isolator behavior

Purpose:

The aim of this study to investigate the effects of different scaling methods on structural responses in dynamic analyzes carried out with structural models whose seismic isolation system consists of lead rubber bearings.

Theory and Methods:

Bi-directional analyzes were carried out for models consisting of lead rubber bearings using ground motion records scaled by different methods. In the analyses, a deteriorating hysteretic behavior due to the temperature increase in the lead core due to the cyclical motion was taken into account. The analyses to model seismic isolation units were also carried out for the cases where the lower and upper bound properties are used (boundary analyses) where the deteriorating is not taken into account, as suggested by the specifications. In order to observe the effects of the isolation unit properties under the effect of hysteretic motion on the structural responses depending on the applied scaling, the isolation period (T_{iso} : 2.5s, 2.75s, 3.0s, 3.25s, and 3.5s) and characteristic strength ratio (Q/W : 0.75, 0.90, 0.105, and 0.120) values were also chosen as research parameters (Figure A).

Results:

While the variation in the scaling method does not create a significant change on the maximum isolator forces, it is observed that it may cause changes up to 25% in the maximum isolator displacements and maximum acceleration values.

Conclusion:

Depending on the scaling method, different results are obtained for different isolation periods and characteristic strength ratios. While this variation is negligible for the forces, it becomes more evident, especially in isolator displacements and accelerations.



Deprem kaydı ölçeklendirme yönteminin ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatör modelleme tekniğinin sismik izolatörlü bir yapının sismik performansı üzerindeki etkileri

Hakan Öztürk^{1*}, Gökhan Özdemir²

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

²Eskişehir Teknik Üniversitesi, Sismik İzolatör Test Laboratuvarı, 26555, Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı deprem kaydı ölçeklendirme yöntemleri ile çift yönlü dinamik analizler
- Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör modelleme tekniği
- İzolasyon periyodu ve karakteristik dayanım oranının etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.05.2022

Kabul: 24.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1119686

Anahtar Kelimeler:

Sismik izolasyon,
deprem kaydı ölçeklendirme
yöntemleri,
kurşun çekirdekli kauçuk
izolatör, sınır analizler,
çift doğrultulu analizler

ÖZ

Bu çalışmada zaman tanım alanında doğrusal olmayan (ZTADO) hesap yöntemi kullanılarak sismik izolasyonlu yapılarda yalıtım seviyesinde meydana gelen en büyük deplasman (MID), en büyük kuvvet (MIF) ve en büyük ivme (MA) değerleri dört farklı ölçeklendirme yöntemi dikkate alınarak incelenmiştir. Yalıtım birimi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ile modellenmiş olup farklı yöntemler ile ölçeklendirilen deprem kayıtlarının her iki yatay bileşeni yalıtım birimine eş zamanlı olarak etki ettirilmiş ve çift doğrultulu analizler gerçekleştirilmiştir. Yürütülen analizlerde kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, kurşun çekirdekte ısınma etkisi nedeniyle meydana gelen dayanım kaybının dikkate alındığı (sıcaklık etkisi dahil, TI) ve alınmadığı durumlar (sınır analizler, LB-UB) için iki farklı yaklaşımla modellenmiştir. Analizlerde yalıtım birimi dayanımını temsilen dört farklı Q/W oranı (0.75, 0.90, 0.105 ve 0.120) ile izolasyon periyodunu temsilen beş farklı T_{iso} (2.5s, 2.75s, 3.0s, 3.25s ve 3.5s) dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, ölçeklendirme yöntemindeki farklılaşma maksimum izolatör kuvvetleri üzerinde önemli bir değişiklik yaratmazken, maksimum izolatör deplasmanları ve maksimum ivme değerlerinde %25'e varan değişimlere sebep olabilmektedir. Bu değerlerin sismik izolatör modelleme tekniğine bağlı değişimi ihmal edilecek seviyededir.

Influence of ground motion scaling methodology and lead rubber bearing seismic isolator modelling technique on seismic response of an isolated structure

H I G H L I G H T S

- Bi-directional dynamic analyses with different ground motion scaling methods
- LRB Seismic isolator modelling technique
- Effect of isolation period and characteristic strength ratio change

Article Info

Research Article

Received: 22.05.2022

Accepted: 24.08.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1119686

Keywords:

Seismic isolation,
ground motion scaling
methods, lead rubber
bearing, bounding analysis,
bi-directional analyses

ABSTRACT

In this study, the maximum isolator displacement (MID), maximum isolator force (MIF), and maximum acceleration (MA) values that occur at the isolation level in seismically isolated structures were investigated using the nonlinear response history analyses (NRHA) by considering four different scaling methods. Both horizontal components of the ground motion records scaled with different scaling methods were applied simultaneously to the isolation unit modeled with lead rubber bearing, and bi-directional analyses were performed. In the analyses, lead rubber bearings were modeled with two different approaches as the case deterioration due to the heating effect in the lead core is considered (Temperature Included, TI) and the case it is not considered (Boundary Analysis, LB-UB). In the analyses, four different Q/W ratios (0.75, 0.90, 0.105, and 0.120) representing the isolation unit strength, and five different T_{iso} (2.5s, 2.75s, 3.0s, 3.25s, and 3.5s) representing the isolation period were taken into account. As a result, while the variation in the scaling methods does not create a significant change on the maximum isolator forces, it is observed that it can cause changes up to 25% in the maximum isolator displacements and maximum acceleration values. This differentiation is negligibly affected by how the seismic isolator is modeled.

1. Giriş (Introduction)

Sismik izolasyonlu yapıların tasarımında en önemli parametreler yalıtım seviyesinde meydana gelen en büyük deplasman (MID) ve üst yapıya aktarılan en büyük kuvvettir (MIF). Hassas ekipmanları barındıran yapılarda bunlara ek olarak en büyük ivme (MA) değerleri de dikkate alınmaktadır. Sismik yalıtım birimlerinin kullanılması ile standart bir yapıya kıyasla tasarım sırasında daha küçük kuvvet ve ivmeler söz konusu olurken izolasyon seviyesinde ise çok daha büyük deplasmanlar ile çalışılmaktadır [1]. Sismik izolasyonlu bir yapıda söz konusu tepkilerin hesaplanabilmesi için önerilen yöntemlerin başında eşdeğer deprem yükü yöntemi (EDYY) ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan (ZTADO) hesap yöntemi gelmektedir [2-4]. Bu yöntemler içerisinde, ZTADO, yapı davranışının analitik ortamda gerçeğe en yakın biçimde incelenebilmesine imkan sağlayan hesap yöntemidir [5-7]. ZTADO hesap yönteminde, sismik yalıtım birimlerinin nasıl modellendiğinin yanı sıra analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi de önemli bir rol oynamaktadır [8]. Kullanılacak deprem kaydının seçilmesi ve ölçeklendirilmesinde göz önüne alınan yöntem, hesap sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Ancak yönetmeliklerde deprem kayıtlarının seçilmesi için birtakım kriterler (deprem büyüklüğü, faya uzaklık, mekanizma tipi, zemin özelliği, deprem kaydı sayısı) tanımlanmakla birlikte ölçeklendirme işlemine ilişkin tek bir kriter yer almaktadır. Bu nedenle de ölçeklendirme yönteminin nasıl yapıldığından bağımsız olarak söz konusu kriterin (seçilen deprem kayıtlarına ait bileşke yatay spektrum değerlerinin ortalamasının ilgili periyot aralığında tasarım spektrumunun 1,3 katından daha küçük olmaması) sağlanması yeterli olmaktadır. Dolayısı ile analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi sırasında kullanılan yöntem tasarım mühendislerinin tercihlerine göre gerçekleştirilmektedir.

Literatürde deprem yer hareketlerinin tasarım spektrumları ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmesi ve yapısal tepkilerin belirlenmesi kapsamında alternatif yöntemlerin önerildiği ve incelendiği çok sayıda çalışma yer almaktadır [9-12]. Bu çalışmalarda yapısal tepkilerdeki dağılımı en aza indirecek deprem kaydı sayısı ve ölçeklendirme yöntemleri incelenmiştir. Kalkan ve Chopra [13] tarafından deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için MPS adı verilen yöntem geliştirilmiş ve ASCE/SEI 7-05 tarafından tanımlanan ölçeklendirme yöntemi ile karşılaştırılmıştır. MPS yöntemiyle ölçeklenen yer hareketi sonuçlarının dağılımının, ASCE/SEI 7-05 ölçeklendirme yöntemiyle karşılaştırıldığında çok daha küçük olduğu vurgulanmıştır. Huang vd. [14] yürüttüğü çalışmada ise yazarların önerdiği D-scaling isimli yöntemin farklı ölçeklendirme yöntemleri ile kıyaslamalı sonuçları sunulmuştur. Yazarlar tarafından önerilen ölçeklendirme yönteminin, farklı özelliklere sahip binaların performans dayalı sismik değerlendirmesi için kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ay ve Akkar [15] tarafından doğrusal olmayan yapısal sistemlerin performans değerlendirmesi için deprem kaydı seçimi ve ölçeklendirmesi prosedürü önerilmiş ve önerilen prosedür farklı yöntemlerle (Shome vd. [10] ve Baker [16]) karşılaştırılmıştır. Önerilen metodolojinin çalışmada belirlenen hedef tehlike senaryosu için doğrusal olmayan yapısal sistemler için verimli bir araç olarak kabul edilebileceği, doğrusal sistemler için ise oldukça uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Michaud ve Leger [17] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tek serbestlik dereceli ve dört katlı çelik yapı sistemleri için dokuz farklı ölçeklendirme yönteminin performansı üç ve yedi adet deprem kaydı kullanılarak araştırılmıştır. Ankastre mesnetli yapıların incelendiği çalışmada elde edilen yapısal tepkiler sonucunda tek ve çok serbestlik dereceli modeller için uygulanabilecek tek bir ölçeklendirme yönteminin olmadığı ifade edilmiştir. Reyes vd. [18] dinamik analizlerde kullanmak üzere ASCE-7'ye göre seçmiş oldukları 30 adet deprem kaydını simetrik/asimetrik yapılara uygulamak üzere tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirmişlerdir. Çalışmada spektral eşleştirme, genlik ölçeklendirme yöntemi ile kıyaslanmış ve spektral eşleşmenin düşük sünegliğe sahip yapılar için daha uygun olduğunu bildirilmiştir. Pant

ve Maharjan [19], spektral eşleştirme ve genlik ölçeklendirme yöntemlerini kullanarak sismik izolatörlü yapıların analizlerini çift yönlü olarak gerçekleştirmiş ve ölçeklendirme yöntemlerinin yalıtım sistemi deplasman talepleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yalıtım sistemi tepkilerinin doğru ve tutarlı bir şekilde belirlenebilmesi için yedi deprem kaydının kullanılmasının yeterli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca güvenli tarafta kalmak amacıyla genlik ölçeklendirme yönteminin kullanılmasının daha uygun olduğu ifade edilmiştir. Pant [20] çalışmasında, farklı özelliklere sahip sismik izolatörlü yapılar için alt ve üst sınır özellikleri dikkate alarak dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Bu analizlerde deprem kayıtları genlik ölçeklendirme ve spektral eşleştirme yöntemleri ile ölçeklendirilmiştir. Sismik izolatörlü yapılar için ortaya çıkan yapısal tepkilerin deprem kaydı seçimine ve dikkate alınan ölçeklendirme yöntemine bağlı olduğu belirtilmiştir.

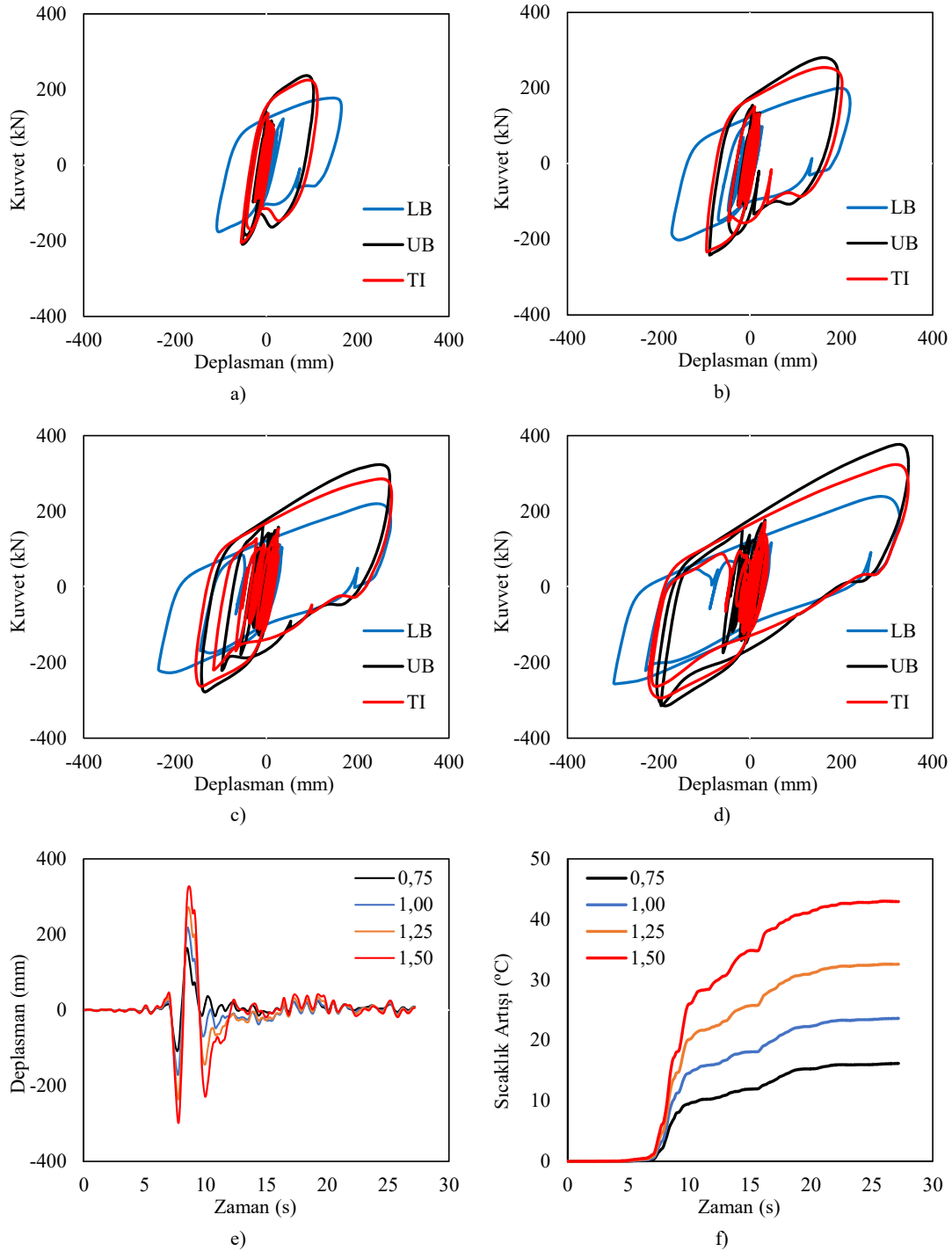
Yukarıda atfı yapılan çalışmalar incelendiğinde seçilen deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için farklı yöntemlerin kullanıldığı ve önerildiği görülmektedir. Bu çalışmalar çoğunlukla ankastre mesnetli yapılar özelinde incelenmiş olup [21-23] sismik izolasyonlu yapılar için yürütülen az sayıdaki çalışmada ise [19, 20] sismik yalıtım birimlerinin maruz kaldıkları hareket sırasında oluşan dayanım kaybı dikkate alınmamıştır. Bu çalışma kapsamında, sismik izolasyon sistemi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerden (KÇKİ) oluşan yapı modelleri ile yürütülen dinamik analizlerde farklı ölçekleme yöntemlerinin yapısal tepkiler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yürütülecek analizlerde KÇKİ'lerin çevrimsel hareket nedeniyle kurşun çekirdeğinde oluşan sıcaklık artışına bağlı olarak dayanımındaki kayıp dikkate alınmıştır. Ayrıca, sismik yalıtım birimlerinin modellenmesi için şartnamelerin önerdiği sınır analizleri yöntemi gereği alt sınır ve üst sınır (LB ve UB) özelliklerinin kullanıldığı ve dayanım kaybının dikkate alınmadığı durumlar için de analizler yürütülmüştür. Bu sayede kullanılan ölçeklendirme yönteminin sismik yalıtım biriminin histeretik davranışındaki değişime bağlı olarak yapısal tepkileri ne ölçüde değiştirdiği incelenmiştir. Çalışma kapsamında, seçilen deprem kayıtlarının sadece genliğini değiştiren dört farklı ölçeklendirme yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ölçeklenen deprem kayıtlarının birbirine dik her iki yatay bileşeni eş zamanlı olarak yapısal modele etki ettirilmiş ve çift doğrultulu analizler gerçekleştirilmiştir. Yalıtım birimi özelliklerinin uygulanan ölçeklendirmeye bağlı olarak yapısal tepkiler üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için izolasyon periyodu (T_{iso}) ve karakteristik dayanımın yalıtım birimine etki eden ağırlığa oranı (Q/W) da birer parametre olarak seçilmiştir. Buna göre, beş farklı T_{iso} (2,5s, 2,75s, 3,0s, 3,25s ve 3,5s) ve dört farklı Q/W oranı (0,75, 0,90, 0,105 ve 0,120) için analizler yürütülmüştür. İncelemeye konu olan yapısal tepkiler yalıtım sistemi seviyesinde oluşan MID, MIF ve MA değerleridir.

2. Araştırmanın Önemi (Significance of Research)

ZTADO analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının belirli bir spektrum ile eşleştirilmesi sonucunda ölçek katsayıları belirlenmektedir. Diğer taraftan, ölçek katsayıları için yönetmeliklerde herhangi bir alt ya da üst sınır tanımlanmamaktadır. Yapısal tepkileri etkilemesi nedeniyle ölçek katsayıları için alt ve üst sınırının olup olmayacağı konusunda literatürde yapılmış çalışmalarda [24-26], incelenen yapıya ve yapısal tepkilere bağlı olarak ölçek katsayısının belirli sınırları aşmaması önerilmektedir [27-30]. Bazı çalışmalarda deprem kayıtlarına uygulanacak alt ve üst limit için sırasıyla 1/4 ve 4 önerilirken [8, 29, 31, 32], sıvılaşma analizleri için üst sınır 2 olarak belirtilmiştir [30]. Bunlara ek olarak, doğrusal elastik analizlerde üst sınır için 4 verilirken, doğrusal elastik olmayan analizlerde sınırın 0,5 ile 2 arasında olması gerektiği ifade edilmiştir [33]. Özdemir ve Gülkan [31] tarafından gerçekleştirilen çalışmada sismik izolatörlü yapılar için gerçekleştirilecek analizlerde kullanılacak deprem kayıtları için ölçek katsayılarına ait üst sınır

değerleri kaydın en büyük yer hızına (PGV) bağlı olarak önerilmiştir. Özdemir ve Gülkan [31] çalışmalarında KÇKİ davranışını incelemiş ve çevrimsel yüklemeye bağlı olarak kurşun çekirdekteki sıcaklık artışı nedeniyle izolatör dayanımındaki kademeli azalmayı analizlerine yansıtmışlardır. Bu bölüm, farklı ölçekleme yöntemleri kullanıldığında bir deprem kaydı çiftine ait ölçek katsayısındaki değişimin KÇKİ davranışı üzerindeki etkisini daha iyi gösterebilmek için oluşturulmuştur. Bu amaçla, Kocaeli-Düzce (detaylı bilgi için Tablo 1'e bakınız) kayıt çifti farklı ölçek katsayıları kullanılarak tek serbestlik dereceli ve sismik izolasyonlu temsili bir yapı modeline etki

ettirilmiştir. Bu modelin sismik izolasyon periyodu 3,0 s ve Q/W oranı 0,105'tir. Ölçek katsayılarının 0,75, 1,00, 1,25 ve 1,50 olması durumları için şartnamelerde tanımlanan sınır analizleri yöntemi ile (LB ve UB) ve dayanım kaybının dikkate alındığı model (TI) arasındaki farklılaşma kıyaslamalı olarak Şekil 1'de sunulmuştur. Şekil 1'de TI ile temsil edilen KÇKİ davranışını modellemek için geliştirilen ve izolatör dayanımındaki kaybı dikkate alan analitik modelin detaylı anlatımına Bölüm 6'da yer verilmiştir. Şekil 1f'de sunulan sıcaklık değerleri söz konusu analitik model aracılığıyla hesaplanmıştır.



Şekil 1. Ölçek katsayısının sismik izolatör davranışına etkisi (Effect of scale coefficient on seismic isolator behavior)

Tablo 1. Deprem kaydı bilgileri (Ground motion information)

EQ Numara	EQ İsim	İstasyon	Büyüklik (Mw)	R (km)	Bileşen	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Anlamli Süre (s)
1	Kocaeli	Duzce	7,5	15,4	180	0,31	58,9	44,2	10,8
					270	0,36	46,4	17,6	
2	Kocaeli	Yarimca	7,5	4,8	060	0,27	65,7	57,2	15,1
					330	0,35	62,2	51,1	
3	Erzincan	Erzincan	6,7	4,4	NS	0,52	84,0	27,7	7,4
					EW	0,50	64,3	21,9	
4	Imperial Valley	El Centro Array #4	6,5	7,1	230	0,36	76,5	58,9	6,7
					140	0,49	37,4	19,7	
5	Imperial Valley	El Centro Array #5	6,5	4,0	230	0,38	90,5	63,0	8,3
					140	0,52	46,9	35,3	
6	Duzce	Duzce	7,1	6,6	270	0,54	83,5	51,8	10,9
					180	0,35	60,0	41,8	
7	Imperial Valley	El Centro Array #10	6,5	6,2	050	0,17	47,5	31,1	12,1
					320	0,22	41,2	18,0	
8	Chi-Chi	CHY024	7,6	9,6	W	0,28	52,9	43,6	24,2
					N	0,18	49,0	31,1	
9	Duzce	Bolu	7,1	12,0	090	0,82	62,1	13,6	8,6
					000	0,73	56,4	23,1	
10	Chi-Chi	TCU109	7,6	13,1	N	0,16	53,1	34,8	31,2
					W	0,16	50,8	46,5	
11	Kobe	KJM	6,9	1,0	000	0,82	81,3	17,7	8,4
					090	0,60	74,4	20,0	

Şekil 1 incelendiğinde, ölçek katsayısı 1 ve 1'den küçükken alt sınır analizinden elde edilen maksimum izolatör deplasmanları gerçek izolatör davranışının dikkate alındığı (izolatör dayanımının kademeli olarak azaldığı durum) analizlerden elde edilenlerden daha büyüktür (Şekil 1a ve Şekil 1b). Bu sınır analizleri yöntemini kullanarak yapılacak tasarımların güvenli tarafta kalacağını gösterir bir sonuçtur. Öte yandan, ölçek katsayısı 1'den büyük olmaya başladıkça alt sınır analizlerinden elde edilen maksimum deplasman değerlerinin artık güvenli tarafta kalmaya yeterli olmadığı görülmektedir (Şekil 1c ve Şekil 1d). Bu gözlem ölçek katsayısı büyüdükçe daha da belirgin hale gelmektedir. Bu durumun temel nedeni ölçek katsayısı büyüdükçe deplasman değerlerinin artması (Şekil 1e) ve bu artışa bağlı olarak da kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışının belirgin hale gelerek (Şekil 1f) daha fazla dayanım kaybının oluşmasıdır. Burada ölçek katsayısı için seçilen 1,5 değeri, ölçek katsayısı için tanımlanan üst sınır değerlerinin altında kaldığı halde böylesi bir durumun gözleniyor olması önemlidir. Çünkü, farklı ölçeklendirme yöntemleri ile hesaplanan ölçek katsayıları arasında küçük farklılıklar olsa bile sınır analizleri yöntemi baz alınarak elde edilen analiz sonuçlarının güvenli bir tasarıma yol açmayabileceği görülmektedir. Bu nedenle ölçek katsayısını belirlemek için tasarım mühendisi tarafından tercih edilen yöntemin nasıl bir farklılık yaratacağının belirlenmesi önem taşımaktadır.

3. Deprem Kayıtlarına Ait Bilgiler (Information on Ground Motion Records)

Deprem kayıtları, genellikle tasarım ivme spektrumuna uygun olacak şekilde, moment büyüklüğüne, fay kırığına olan mesafeye ve yerel zemin sınıfı özellikleri gibi parametrelere bağlı olarak seçilir [2-4]. Buna göre, analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının belirtilen parametreler cinsinden benzer özellikler taşıyacak şekilde seçilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının moment büyüklükleri (Mw) 6,5 ile 7,6 arasında, fay kırığına olan en yakın mesafeleri (R) 20 km'den az, zeminin ilk 30m'lik kısmına ait kayma dalgası hızı (Vs), 180m/s ile 360m/s arasında olacak şekilde seçilmiştir. Bu çalışmada, seçim kriteri olarak ayrıca deprem kayıtlarına ait anlamlı süre de dikkate alınmıştır. Seçilen deprem kayıtlarına ait anlamlı sürelerin 45 s'den ([34] tarafından yapılan gruplandırmaya göre 45 s kısa ve uzun süreli depremler için sınır değer olarak tanımlanmaktadır) küçük olmasına dikkat edilmiştir. Yukarıda verilen kriterlere uygun olarak 11 adet deprem kaydı çifti

Pasific Earthquake Engineering Research Center (PEER) veri tabanından indirilmiştir [35]. Seçilen deprem kayıtlarının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen PGA, PGV, PGD kısaltmaları sırasıyla en büyük ivme, hız ve deplasmanı ifade etmektedir.

4. Deprem Kaydı Ölçeklendirme Yöntemleri (Ground Motion Scaling Methods)

Sismik izolasyonlu yapıların tasarımı amacıyla yürütülecek ZTADO analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme yöntemine ilişkin şartnamemizde yer alan kriter şu şekildedir: her bir deprem kaydına ait yatay bileşenlerin spektrumların kareleri toplamının kare kökü alınarak elde edilen bileşke yatay spektrumların ortalamasının ilgili periyot aralığındaki genliklerinin tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklere oranı 1,3'ün altına düşmemelidir. Burada atıf yapılan şartnamelerin tamamında benzer hükümler yer almakta ve belirtilen kriteri sağlayan farklı ölçeklendirme yöntemlerine literatürde sıkça rastlanmaktadır. Temelde tüm yöntemlerin hedefi tasarım spektrumu ile uyumu sağlamaktır, bu hedefe nasıl gidildiği birbirinden farklılaşmaktadır. Bu çalışma kapsamında basit ölçeklendirme yöntemi referans alınarak dört farklı ölçeklendirme yöntemlerinin, sismik izolasyonlu yapılarda dayanım kaybının dikkate alındığı (TI) ve alınmadığı (LB-UB) durumlar için ZTADO analizler sonucunda elde edilen en büyük deplasman, kuvvet ve ivme değerlerini ne ölçüde etkilendiği incelenmiştir.

5. Çalışma Kapsamında İncelenen Ölçeklendirme Yöntemleri (Scaling Methods Investigated in The Scope of the Study)

Bu bölümde literatürde sıkça kullanılan dört farklı ölçekleme yönteminin kullanımına ilişkin aşamalar adım adım tanıtılmıştır (Tablo 2). Her bir deprem kaydı için hesaplanan ölçek katsayıları Tablo 3'de sunulmuştur. Ölçeklendirme sırasında dikkate alınan 50 yılda aşılma olasılıkları %2 ve %10 olan en büyük deprem yer hareketi düzeyi (MCE/DD1) ve tasarım deprem yer hareketi düzeyi (DBE/DD2) için spektrum eğrilerine ait 1 s periyot tasarım spektral ivme katsayıları (S_{D1}) sırasıyla 0,87 ve 0,56'dır. Bu bilgiler doğrultusunda tanımlanan tasarım spektrumu dikkate alınarak seçilen deprem kayıtları için ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayıları dikkate alınan beş

Tablo 2. Deprem kaydı ölçeklendirme yöntemlerine ait işlem adımları (Process steps of ground motion scaling methods)

Yöntem \ Adım	1	2	3	4	5
Metot: 1 (M1)	Her bir depreme ait yatay bileşenlerin kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak bileşke spektrum elde edilir	Tüm kayıtlara ait ortalama bileşke yatay spektrum elde edilir	Tasarım spektrumu ile ortalama bileşke yatay spektrum uyumu için ölçek katsayısı belirlenir	-	-
Metot: 2 (M2)	Her bir depreme ait yatay bileşenlerin kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak bileşke spektrum elde edilir	Tasarım spektrumu ile her bir bileşke spektrumun uyumunu sağlamak için hata miktarı hesaplanarak birinci ölçek katsayısı belirlenir	Birinci ölçek katsayısı ile ölçeklendirilmiş olan tüm bileşke spektrum eğrilerinin ortalaması alınır	Bileşke spektrumların ortalamasının tasarım spektrumu ile uyumunu belirleyebilmek için ikinci ölçek katsayısı belirlenir	Nihai ölçek katsayısı birinci ve ikinci ölçek katsayısının çarpımına eşittir
Metot: 3 (M3)	Her bir depreme ait yatay bileşenlerin kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak bileşke spektrum elde edilir	Her bir bileşke spektrum eğrisi ilgili periyot aralığında tasarım spektrumunun 1.3 katından küçük olmayacak şekilde ilk ölçek katsayısı ile ölçeklendirilir	Ölçeklendirilen tüm bileşke spektrum eğrilerinin ortalaması alınır	Bileşke spektrumların ortalamasının tasarım spektrumu ile uyumunu belirleyebilmek için ikinci ölçek katsayısı belirlenir	Nihai ölçek katsayısı birinci ve ikinci ölçek katsayısının çarpımına eşittir
Metot: 4 (M4)	Her bir depreme ait yatay bileşenlerin geometrik ortalaması alınarak bileşke spektrum elde edilir	Tasarım spektrumu ile her bir bileşke spektrumun uyumu sağlamak için hata miktarı hesaplanarak birinci ölçek katsayısı belirlenir	Birinci ölçek katsayısı ile ölçeklendirilmiş olan tüm bileşke spektrum eğrilerinin, kareleri toplamının kareköklerinin (SRSS) ortalaması alınır	Bileşke spektrumların ortalamasının tasarım spektrumu ile uyumunu belirleyebilmek için ikinci ölçek katsayısı belirlenir	Nihai ölçek katsayısı birinci ve ikinci ölçek katsayısının çarpımına eşittir

farklı izolasyon periyodu (T_{iso}) için dört farklı ölçeklendirme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

5.1. Metot:1 (M1) (Method:1 (M1))

Seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak bileşke yatay spektrumlar elde edilir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamaları alınarak ilgili periyot aralığındaki ($0,5T_{iso}-1,25T_{iso}$) genliklerinin, %5 sönümlü yatay elastik tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1,3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenleri ölçeklendirilir [2].

5.2. Metot:2 (M2) (Method:2 (M2))

Seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak deprem kaydını temsil eden bileşke spektrum eğrisi elde edilir. Her bir deprem kaydı için oluşturulan bileşke spektrum eğrisi ile şartnamenin önerdiği tasarım spektrumu arasında uyumu sağlamak amacıyla hata miktarı belirlenir. Hata miktarı spektrum eğrileri arasındaki farkın kareleri toplamı olarak hesaplanır. Hesaplamaya katılan periyot değerleri için

belirlenen hata miktarının toplam hata miktarına ne ölçüde dahil edileceğini tanımlayan ağırlık katsayısı kullanılarak ilk ölçek katsayısı belirlenir. Burada amaç hata miktarını en aza indirecek ölçek katsayısını hesaplayabilmektir. İlk ölçek katsayısı ile oluşturulan bileşke spektrum eğrilerinin ortalaması alınır. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının ilgili periyot aralığındaki ($0,5T_{iso}-1,25T_{iso}$) genliklerinin, %5 sönümlü yatay elastik tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1,3'ten daha küçük olmaması kuralına göre ikinci kez ölçeklendirilir. Her bir deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayısı ise her iki aşamada hesaplanan ölçek katsayılarının çarpımına eşittir.

5.3. Metot:3 (M3) (Method:3 (M3))

Seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü (SRSS) alınarak deprem kaydını temsil eden bileşke spektrum eğrisi elde edilir. Elde edilen her bir bileşke spektrum eğrisi ilgili periyot aralığında ($0,5T_{iso}-1,25T_{iso}$) tasarım spektrumunun 1,3 katından daha küçük olmayacak şekilde bir kez ölçeklendirilir. Daha sonra ölçeklendirilmiş olan tüm bileşke spektrum eğrilerinin ortalaması alınır. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının ilgili periyot aralığındaki ($0,5T_{iso}-1,25T_{iso}$) genliklerinin, %5 sönümlü yatay elastik tasarım

spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1,3'ten daha küçük olmaması kuralına göre ikinci kez ölçeklendirilir. Her bir deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayısı ise her iki aşamada hesaplanan ölçek katsayılarının çarpımına eşittir.

5.4. Metot:4 (M4) (Method:4 (M4))

Seçilen deprem kayıtlarının her iki yatay bileşenine ait spektrum eğrileri elde edilerek geometrik ortalaması hesaplanır ve deprem kaydını temsil eden bileşke spektrum eğrisi oluşturulur. Her bir deprem için oluşturulan bileşke spektrum eğrisi ile şartnamenin önerdiği tasarım spektrumu arasında uyumu sağlamak için hata miktarı belirlenir. Hata miktarı spektrum eğrileri arasındaki farkın kareleri toplamı olarak hesaplanır. Hesaplamaya katılan periyot değerleri için belirlenen hata miktarının toplam hata miktarına ne ölçüde dahil edileceğini tanımlayan ağırlık katsayısı kullanılarak ilk ölçek katsayısı belirlenir. Burada amaç hata miktarını en aza indirecek ölçek katsayısını hesaplayabilmektir. İlk ölçek katsayısı ile oluşturulan bileşke spektrum eğrilerinin, kareleri toplamının kareköklerinin (SRSS) ortalaması alınır. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının ilgili periyot aralığındaki ($0,5T_{iso}-1,25T_{iso}$) genliklerinin, %5 sönümlü yatay elastik tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1,3'ten daha küçük olmaması kuralına göre ikinci kez ölçeklendirilir. Her bir deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayısı ise her iki aşamada hesaplanan ölçek katsayılarının çarpımına eşittir [36-38]. Çalışma kapsamında dikkate alınan dört farklı deprem kaydı ölçeklendirme

yöntemine ait işlem adımları, yöntemler arasındaki farkın daha net bir şekilde anlaşılabilmesi için Tablo 2'de sunulmuştur.

Seçilen 11 adet deprem kaydı çifti için dört farklı ölçeklendirme yönteminden elde edilen ölçek katsayıları ve ortalama değerleri Tablo 3'de beş farklı periyot değerleri için sunulmuştur.

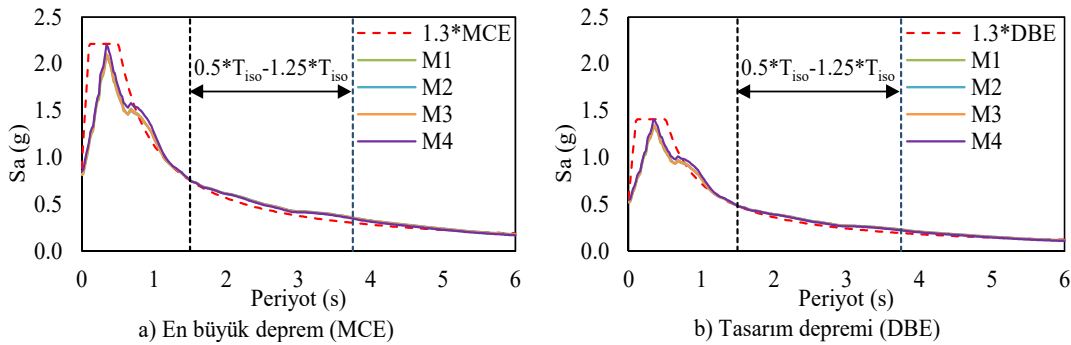
Çalışma kapsamında incelenen dört farklı ölçeklendirme yöntemi sonucunda elde edilen ortalama spektrum eğrileri ile MCE ve DBE spektrumunun uyumu sırasıyla Şekil 5a ve Şekil 5b'de $T_{iso}=3$ saniye periyot dikkate alınarak görsel olarak sunulmuştur.

6. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Yalıtım Birimi Modeli (Lead Rubber Bearing Model)

Sismik izolasyonlu yapıların tasarımında izolasyon seviyesinde doğrusal olmayan davranışın meydana geldiği, üst yapının ise rijit bir davranış sergilediği (elastik sınırlar içinde kaldığı) kabul edilmektedir. Bu nedenle yalnızca izolasyon seviyesinde meydana gelen tepkileri (MID, MIF, MA) belirlemek amacıyla çalışma kapsamında incelenen yalıtım birimi tek serbestlik dereceli sistem olarak, üst yapı ise rijit bir kütle olarak modellenmiştir. Yalıtım birimi modellemesi dünyada yaygın olarak kullanılan OpenSees analiz programındaki [39] "Zero Length Element" isimli bağlantı elemanı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir [40]. Bu eleman, yalıtım birimi özelliklerini tanımlamak için kullanılan öteleme ve dönme yaylarıyla birbirine bağlanan izolatörün üst ve altını temsil eden iki düğüm

Tablo 3. Ölçek katsayıları (Scale factors)

Periyot	Ölçeklendirme Yöntemi	Deprem Kaydı Numarası											
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	Ortalama
T=2,5 s	M1	1,38											
	M2	1,40	1,26	1,03	1,48	1,21	1,33	1,88	1,83	1,80	1,30	1,19	1,43
	M3	1,64	1,32	0,86	1,30	1,53	1,08	1,44	1,92	1,69	1,84	1,30	1,45
	M4	1,44	1,22	1,02	1,57	1,22	1,30	1,88	1,73	1,68	1,23	1,30	1,42
T=2,75 s	M1	1,38											
	M2	1,40	1,26	1,03	1,48	1,21	1,33	1,88	1,83	1,80	1,30	1,19	1,43
	M3	1,64	1,32	0,93	1,30	1,52	1,08	1,35	1,73	1,68	1,68	1,40	1,42
	M4	1,44	1,22	1,02	1,57	1,22	1,30	1,88	1,73	1,68	1,23	1,30	1,42
T=3,0 s	M1	1,38											
	M2	1,40	1,26	1,03	1,48	1,21	1,33	1,88	1,83	1,80	1,30	1,19	1,43
	M3	1,56	1,26	1,00	1,22	1,40	1,03	1,29	1,51	2,13	1,40	1,57	1,40
	M4	1,44	1,22	1,02	1,57	1,22	1,30	1,88	1,73	1,68	1,23	1,30	1,42
T=3,25 s	M1	1,36											
	M2	1,37	1,23	1,01	1,45	1,18	1,31	1,84	1,79	1,76	1,27	1,17	1,40
	M3	1,54	1,24	1,18	1,05	1,26	1,02	1,34	1,40	2,26	1,08	1,69	1,37
	M4	1,41	1,20	1,00	1,54	1,20	1,28	1,84	1,69	1,65	1,21	1,27	1,39
T=3,5 s	M1	1,33											
	M2	1,34	1,20	0,99	1,42	1,16	1,28	1,80	1,76	1,73	1,25	1,14	1,37
	M3	1,49	1,20	1,30	0,96	1,12	0,98	1,37	1,35	2,18	1,00	1,82	1,34
	M4	1,38	1,17	0,99	1,51	1,18	1,25	1,81	1,66	1,62	1,19	1,25	1,36



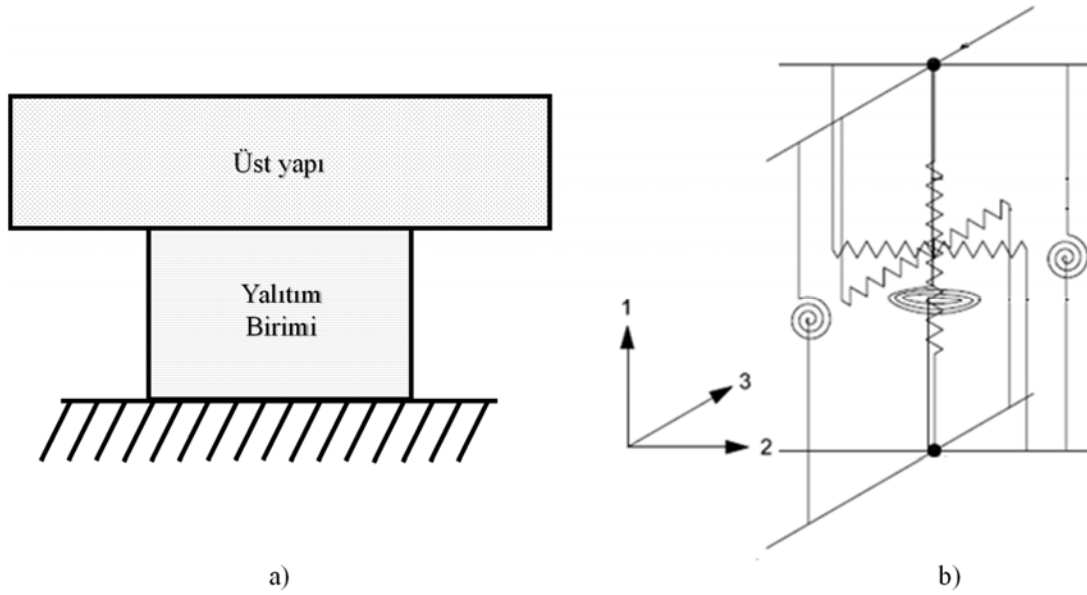
Şekil 5. Ölçeklendirme yöntemleri ve hedef spektrum eğrilerinin uyumu (Consistency of scaling methods and target spectrum curves)

noktasını dikkate almaktadır. Şekil 6b’de kurşun çekirdekli kauçuk izolatore ait yay modeli sunulmuştur. Yalıtım birimi üzerinde bulunan ve üst yapıyı temsil eden ağırlık 1308 kN olup düğüm noktasına uygulanmıştır (Şekil 6a).

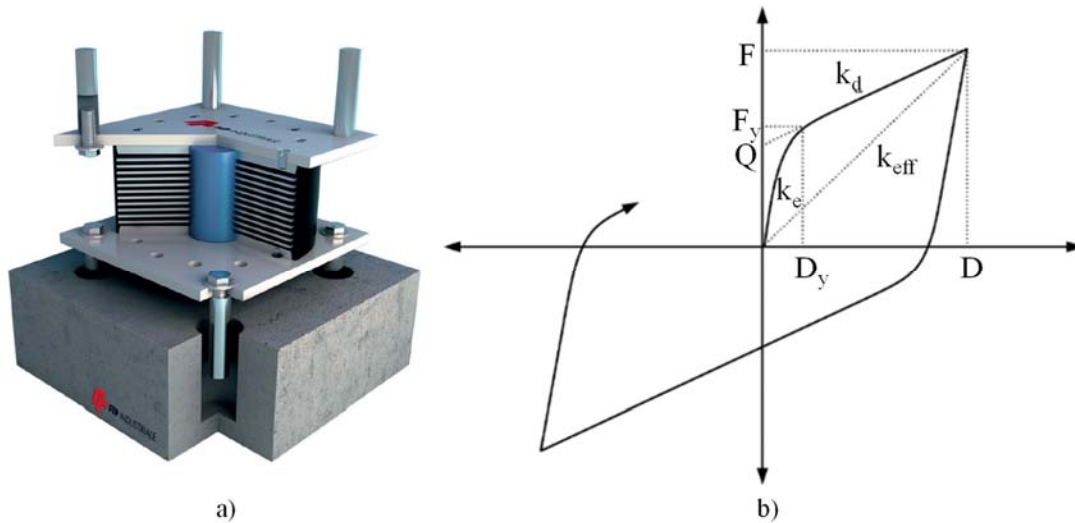
Çalışma kapsamında Şekil 7a’da temsili olarak görseli sunulan kurşun çekirdekli kauçuk izolatorler (KÇKİ) kullanılmıştır. KÇKİ’ler ortasında kurşun çekirdeğin bulunduğu, üst üste sıralanmış çelik ve kauçuk plakalardan oluşmaktadır. Yatay rijitliğinin belirlenmesinden kauçuk sorumlu iken enerjinin sönümlenmesi görevini kurşun çekirdek üstlenmiştir. Sismik izolasyon periyodunun (T_{iso}) hesabı için kauçuk özellikleri, dayanım (Q/W oranı) hesabı için kurşun çekirdek özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu izolatorler için tanımlanan idealize edilmiş kuvvet-deplasman ilişkisi Şekil 7b’de verilmiştir. Burada k_e izolatore ait akma öncesi elastik rijitliği, k_d akma sonrası rijitliği, D_y akma deplasmanını, F_y akma dayanımını, Q karakteristik dayanımı, D izolatorün yaptığı deplasmanı, F izolator deplasmanına

karşılık gelen yatay kuvveti ve k_{eff} etkin rijitliği ifade etmektedir. Çalışma kapsamında akma deplasman değeri D_y : 25 mm, olarak belirlenmiştir [40-42]. ZTADO analizlerde KÇKİ’lerin kuvvet-deplasman ilişkisi iki doğrulu eğriler ile temsil edilmektedir. Yönetmeliklerde tanımlanan bu eğrilerden ilkinde kuvvet-deplasman eğrisi dayanım kaybı göstermemektedir (Şekil 8a). KÇKİ’ler için tanımlanan ikinci eğride ise kuvvet-deplasman ilişkisi çevrimsel hareket nedeniyle kurşun çekirdekte oluşan sıcaklık artışı sonucu dayanım kaybına uğramaktadır. Çevrimsel hareket nedeniyle oluşan ısınma sonucu kurşun çekirdek akma dayanımı ve buna bağlı olarak yalıtım biriminin dayanımı her bir döngüde kademeli bir şekilde azalmakta ve daralan kuvvet-deplasman ilişkisi ortaya çıkmaktadır [40, 41]. Şekil 8b’de görülen bu davranış KÇKİ’lerin gerçek davranışını temsil etmektedir.

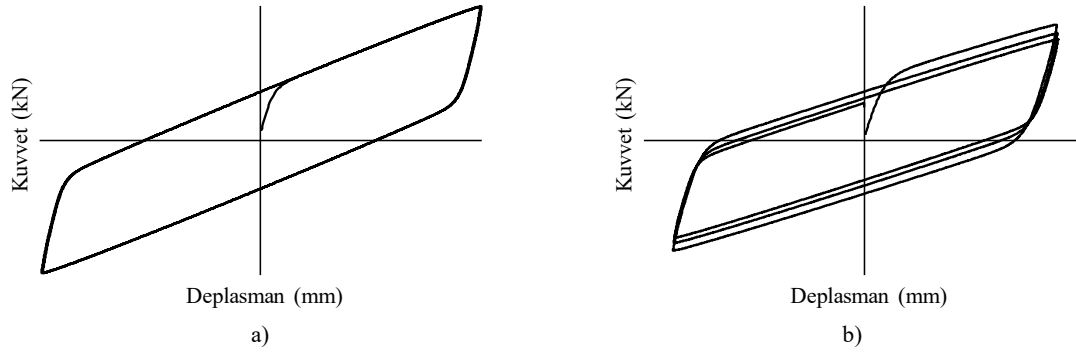
Söz konusu dayanım kaybının nedeninin sismik izolatore uygulanan hareket sırasında kurşun çekirdekte oluşan sıcaklık artışı olduğu



Şekil 6. a) Yalıtım birimi modeli (Isolation unit model) ve b) OpenSees eleman modeli (OpenSees Element model) [40]



Şekil 7. a) Kuşun çekirdekli kauçuk izolator [43] ve b) kuvvet-deplasman eğrisi [36]
(a) Lead rubber bearing and b) Force-displacement curve



Şekil 8. KÇKİ için çevrimsel Kuvvet-Deplasman ilişkisi a) Dayanım kaybı olmayan b) Dayanım kaybı olan
(Hysteretic force-deformation relationship for LRB a) Nondeteriorating b) deteriorating)

gerçekleştirilen çalışmalarla belirlenmiştir [44, 45]. Bu çalışmalarda kurşunun kayma gerilmesi, kurşun çekirdek sıcaklığının bir fonksiyonu olacak şekilde tanımlanmıştır (Eş. 1-Eş. 4). Eş. 1'de görülen $\sigma_{YL}(T_L)$ kurşunun sıcaklığa bağlı kayma gerilmesini, σ_{YLO} kurşunun ilk kayma gerilmesini ifade etmektedir. T_L kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışını temsil etmekte olup E_2 ise sabit (0,0069) bir sayıdır. İki doğrultuda harekete maruz kalan KÇKİ'ün kurşun çekirdeğinde oluşması beklenen sıcaklık artışı ise Eş. 2'de tanımlanmıştır. Bu eşitlikte, KÇKİ'ün malzeme ve geometrik özellikleri kullanılmaktadır. Burada, a , t_s ve h_L sırasıyla kurşun çekirdeğin yarıçapını, çelik plakalara ait toplam kalınlığı ve izolatör yüksekliğini temsil etmektedir. $\dot{T}_L$ kurşun çekirdekte ortaya çıkan anlık sıcaklık artışını belirtmektedir. Z_x ve Z_y birimsiz büyüklükler olup $\dot{U}_x$ ve $\dot{U}_y$ iki yatay doğrultuda izolatörün hızını ifade etmektedir. ρ_L, c_L, h_L, r_L kurşuna ait özellikler olup sırasıyla yoğunluğu, özgül ısıyı, yüksekliği ve yarıçapı, k_s, a_s, t_s ise çelik plakaya ait özellikler olup ısı iletkenliğini, ısı genleşme katsayısını, ve toplam çelik plaka kalınlığını göstermektedir. Ayrıca t^+ boyutsuz zamanı ve F ise bu zamana ait parametreyi temsil etmektedir [32].

$$\sigma_{YL}(T_L) = \sigma_{YLO} \cdot \exp(-E_2 T_L) \quad (1)$$

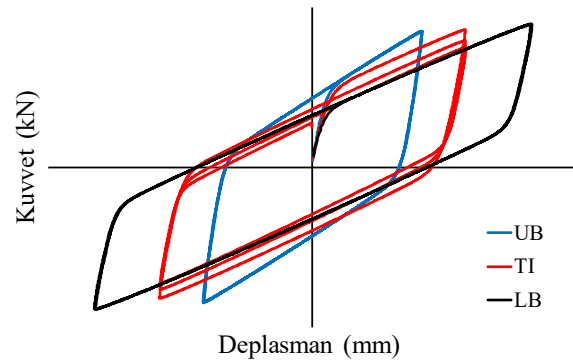
$$\dot{T}_L = \frac{\sigma_{YL}(T_L) \cdot \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} \sqrt{\dot{U}_x^2 + \dot{U}_y^2}}{\rho_L c_L h_L} - \frac{k_s \cdot T_L}{a \rho_L c_L h_L} \cdot \left(\frac{1}{F} + 1.274 \cdot \left(\frac{t_s}{a} \right) \cdot (t^+)^{-1/3} \right) \quad (2)$$

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

$$t^+ = \frac{\alpha_s t}{a^2} \quad (4)$$

Eş. 1-Eş. 4 ile hesaplanacak kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışı, sadece izolatörün geometrik özelliklerine bağlı olarak değil izolatöre uygulanan hareketin özelliklerine göre de farklılaşmaktadır. Bu farklılaşmaya neden olan parametreler, izolatörün maruz kaldığı hareketteki (i) deplasman miktarı, (ii) yükleme hızı ve (iii) döngü sayısıdır. KÇKİ davranışının ve kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışının sıralanan bu parametrelere bağlı değişimini inceleyen çalışmalara bakıldığında deplasman miktarı, yükleme hızı ve döngü sayısı arttıkça kurşun çekirdekdeki sıcaklığın da arttığı kaydedilmiştir. Buna paralel olarak, KÇKİ'e ait kuvvet-deplasman eğrilerindeki dayanım kaybının da arttığı raporlanmıştır [46, 47]. DeneySEL ve analitik olarak kaydedilen kuvvet-deplasman ilişkilerinin kıyaslanması sonucunda, KÇKİ'ün çekirdeğinde oluşan sıcaklık artışı nedeniyle dayanımında görülen kademeli kaybın modellenebilmesi için geliştirilen Eş. 1-Eş. 4'ün farklı yükleme koşulları altındaki geçerliliği gösterilmiştir.

Çalışmada kurşun çekirdeğin kayma gerilmesi (σ_{YLO}) 10 MPa, kauçuğun kayma gerilmesi (G) ise 0,5 MPa seçilmiştir [48]. Kurşun çekirdeğin ve kauçuğun kayma gerilmesi için dayanım kaybının dikkate alınmadığı alt ve üst sınır analizlerde kullanılan katsayılar sırasıyla 0,9 ve 1,3 olarak belirlenmiştir [48, 49]. Dayanım kaybının dikkate alındığı analizlerde ise bu değerler sırasıyla kurşun çekirdek için 1,3 ve kauçuk için 1,0 olarak alınmıştır. Bu katsayılar kullanılarak dayanım kaybının dikkate alındığı (TI) ve alınmadığı (UB-LB) analizlere ait temsili kuvvet-deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. UB, TI ve LB analizlerine ait temsili kuvvet-deplasman eğrisi
(Representative force-displacement curve of UB, TI and LB analyzes)

Çalışma kapsamında yalıtım biriminin davranışını en gerçekçi şekilde ortaya koyan sıcaklık etkisi nedeniyle dayanım kaybının dikkate alındığı analizlerin (TI) yanı sıra alt ve üst sınır değerlerin kullanıldığı dayanım kaybının dikkate alınmadığı sınır analizler (LB-UB) de gerçekleştirilmiş ve deplasman, kuvvet ve ivme sonuçları karşılaştırılmıştır.

7. Dinamik Analizler (Dynamic Analysis)

ZTADO analizlerde seçilen ve ölçeklendirilen deprem kayıtlarının her iki yatay doğrultudaki bileşenlerinin eş zamanlı olarak yalıtım birimine uygulanması gerekliliği yönetmelikler tarafından belirtilmektedir. Bu nedenle çalışmada Park vd. [50] tarafından geliştirilen ve yatay yöndeki deprem hareketlerinin etkileşimli çözümüne olanak sağlayan eşitlik takımı (Eş. 5-Eş. 7) kullanılmıştır. Geliştirilen bu eşitlik takımı, tek doğrultulu analizlerde yapılan birbirinden bağımsız çözümün aksine, yatay yöndeki her iki hareketin birbirine olan etkisini dikkate almaktadır. Bu eşitlik takımı Özdemir [51] tarafından OpenSees [39] programına dahil edilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \end{Bmatrix} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} \frac{F_y}{D_y} & 0 \\ 0 & \frac{F_y}{D_y} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_X \\ U_Y \end{Bmatrix} + (1-\alpha) \cdot \begin{bmatrix} F_y & 0 \\ 0 & F_y \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{Bmatrix} \quad (5)$$

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

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} Z_x^2 \cdot \left[\operatorname{sgn}(\dot{U}_X Z_x) + 1 \right] & Z_x Z_y \cdot \left[\operatorname{sgn}(\dot{U}_Y Z_y) + 1 \right] \\ Z_x Z_y \cdot \left[\operatorname{sgn}(\dot{U}_X Z_x) + 1 \right] & Z_y^2 \cdot \left[\operatorname{sgn}(\dot{U}_Y Z_y) + 1 \right] \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu eşitliklerde α , akma sonrası (ikinci) rijitliğin elastik (birinci) rijitliğe oranını, D_x ve D_y izolatörün her iki yatay doğrultudaki yer değiştirmesini, $\dot{U}_X$ ve $\dot{U}_Y$ izolatörün her iki yatay doğrultudaki hızını, Z_x ve Z_y histeretik birimsiz büyüklükleri ifade etmektedir. A ve B ise

kuvvet ve deplasman vektörlerinin aynı doğrultuda olmasını sağlamak amacıyla kullanılan birimsiz büyüklükleri ifade etmekte olup $A=2B$ ($A=1$, $B=0,5$) olacak şekilde seçilmiştir [52].

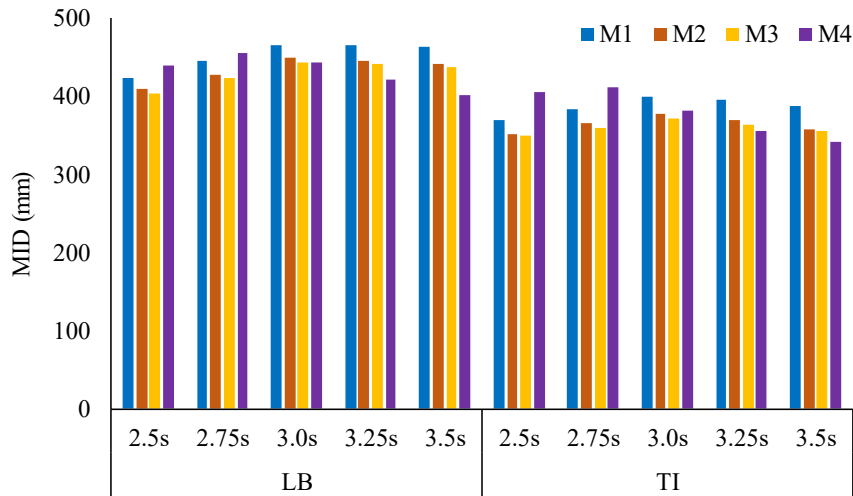
8. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde dinamik analizler sonucunda elde edilen MID, MIF ve MA değerleri incelenmiştir. Deplasman ve ivme değerleri, birbirine dik iki doğrultudan elde edilen verilerin karelerinin toplamının karekökü $(x^2+y^2)^{1/2}$ ile hesaplanırken kuvvet değeri ise her iki doğrultudan elde edilen en büyük değer olarak belirlenmiştir. Analizlerde 5 farklı periyot (T_{iso}) ve 4 farklı karakteristik dayanım oranı (Q/W) dikkate alınarak 4 farklı ölçeklendirme yönteminden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Ayrıca kurşun çekirdekten çevrimsel hareket sonucu ısınmaya bağlı olarak meydana gelen dayanım kaybını dikkate alan analiz (TI) sonuçları ile dayanım kaybının dikkate alınmadığı sınır analiz (LB ve UB) sonuçları kıyaslamalı olarak sunulmuştur. İzolasyon seviyesinde meydana gelen MID değerleri, en büyük deprem etkisi (MCE) dikkate alınarak, MIF ve MA değerleri ise tasarım deprem etkisi (DBE) dikkate alınarak her bir ölçeklendirme yöntemi için tüm depremlerden elde edilen sonuçların ortalaması olacak şekilde izolasyon periyodu ve karakteristik dayanım oranına bağlı olarak aşağıda sunulmuştur.

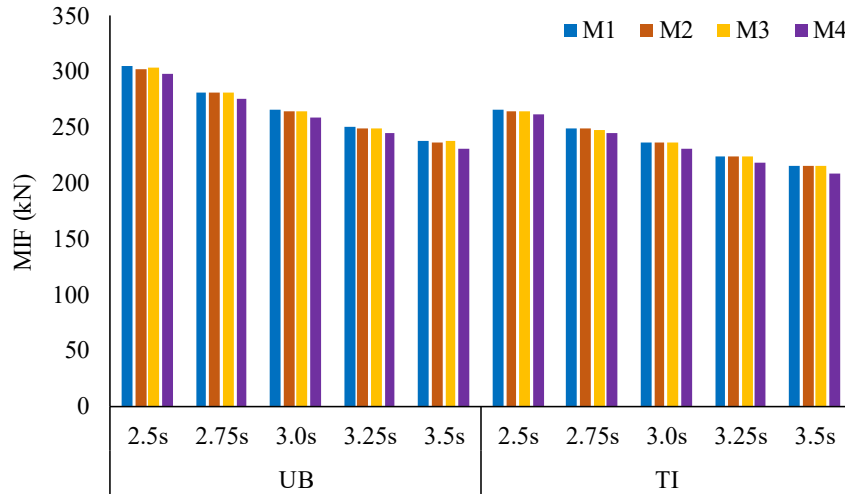
8.1. İzolasyon Periyodunun Etkisi (Effect of Isolation Period)

MID, MIF ve MA değerlerinin izolasyon periyoduna bağlı değişimini inceleyebilmek amacıyla karakteristik dayanım oranı sabit tutularak ($Q/W=0,105$) farklı izolasyon periyotlarına sahip ($T=2,5s$, $T=2,75s$, $3,0s$, $T=3,25s$ ve $3,5s$) modeller dikkate alınmıştır. Gerçek izolatör davranışını temsil eden dayanım kaybının dikkate alındığı (TI) analiz sonuçları ile sınır analiz (LB-UB) sonuçları MID, MIF ve MA verileri olarak sırasıyla Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de sunulmuştur. Burada düşey eksen sırasıyla MID, MIF ve MA gösterirken yatay eksen ise izolasyon periyodunu ifade etmektedir. Sunulan sayısal değerler her bir izolasyon periyodu ve her bir ölçeklendirme yöntemi için 11 deprem kaydına ait sonuçların ortalama değerlerini göstermektedir.

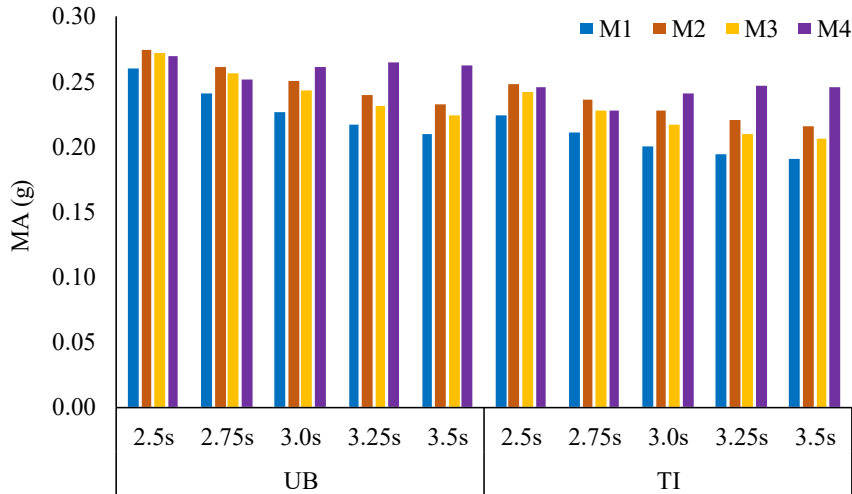
Şekil 10’da sabit Q/W (0,105) oranı için, beş farklı periyot ve dört farklı ölçeklendirme yöntemi için LB ve TI analiz sonuçları MID bakımından sunulmuştur. LB analiz sonuçları farklı periyot değerleri için ölçeklendirme yöntemleri açısından kıyaslandığında izolasyon periyodundaki artış ile birlikte ölçeklendirme yöntemleri arasındaki



Şekil 10. İzolasyon periyoduna bağlı deplasman değişimi ($W/Q=0,105$)
(The change in displacement depending on isolation period ($W/Q=0,105$))



Şekil 11. İzolasyon periyoduna bağlı kuvvet değişimi (W/Q=0,105)
(The change in force depending on isolation period (W/Q=0,105))



Şekil 12. İzolasyon periyoduna bağlı ivme değişimi (W/Q=0,105)
(The change in acceleration depending on isolation period (W/Q=0,105))

fark artmaktadır. Fark 2,5s için %4 iken 3,5s için %15 mertebesine ulaşmaktadır. Benzer durum TI analiz sonuçları için de geçerli olup bahsi geçen izolasyon periyodu değerleri için fark %8 ile %13 arasında değişim göstermektedir. LB ve TI analiz sonuçları birbiri ile kıyaslandığında izolasyon periyodunun artışına bağlı olarak fark artmaktadır. Bu oran %15-%23 mertebesinde olup LB analizlerinde daha büyük MID değerleri elde edilmiştir.

Şekil 11'de sabit Q/W (0,105) oranı için, beş farklı periyot ve dört farklı ölçeklendirme yöntemi için UB ve TI analiz sonuçları MIF bakımından sunulmuştur. Farklı ölçeklendirme yöntemleri ile elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Referans olarak seçilen M1 ölçeklendirme yöntemine göre kıyaslama yapıldığında diğer ölçeklendirme yöntemlerinden elde edilen MIF sonuçlarının farkı en fazla %3 mertebesindedir. Ölçeklendirme yöntemleri arasındaki MIF değişimi oldukça küçük olup ihmal edilebilecek bir seviyededir. UB ve TI analiz sonuçları birbiri ile kıyaslandığında izolasyon periyodunun artışına bağlı olarak fark azalmaktadır. Bu oran %10-%14 mertebesinde olup UB analizlerinde daha büyük MIF değerleri elde edilmiştir. Şekil 12'de sabit Q/W (0,105) oranı için, beş farklı periyot ve dört farklı ölçeklendirme

yöntemi için UB ve TI analiz sonuçları MA bakımından sunulmuştur. UB analiz sonuçları farklı periyot değerleri için ölçeklendirme yöntemleri açısından kıyaslandığında izolasyon periyodu arttıkça ölçeklendirme yöntemleri arasındaki fark artmaktadır. Fark 2,5s için %5 iken 3,5s için %20 mertebesine ulaşmaktadır. Benzer durum TI analiz sonuçları için de geçerli olup bahsi geçen izolasyon periyodu değerleri için fark %8 ile %22 arasında değişim göstermektedir. UB ve TI analiz sonuçları birbiri ile kıyaslandığında izolasyon periyodunun artışına bağlı olarak fark azalmaktadır. Bu oran %6-%15 mertebesinde olup UB analizlerinden daha büyük MA değerleri elde edilmiştir.

8.2. Karakteristik Dayanım Oranı Etkisi (Effect of Characteristic Strength Ratio)

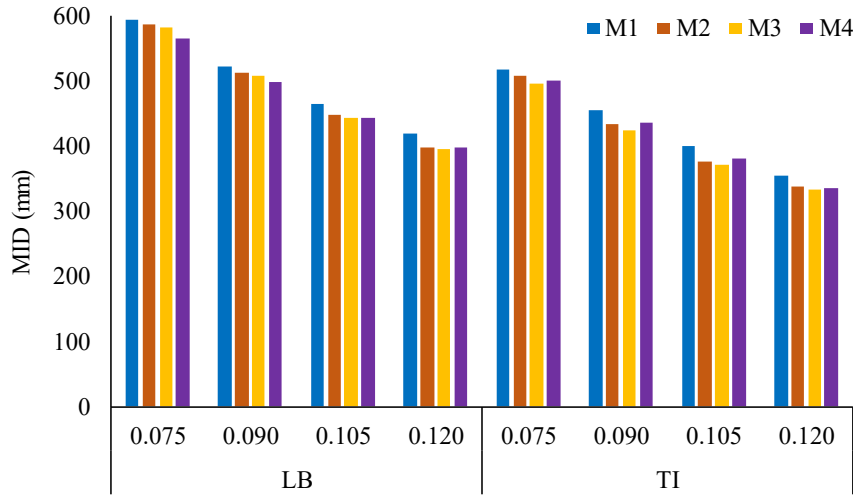
Bu bölümde MID, MIF ve MA değerlerinin karakteristik dayanım oranlarına bağlı değişimini inceleyebilmek amacıyla izolasyon periyodu ($T_{iso}=3,0s$) sabit tutularak farklı karakteristik dayanım oranlarına sahip ($Q/W=0,90, 0,105, 0,125$) modeller dikkate alınmıştır. Gerçek izolator davranışını temsil eden dayanım kaybının dikkate alındığı (TI) analiz sonuçları ile sınır analiz (LB-UB)

sonuçları MID, MIF ve MA değerleri olarak sırasıyla Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15’de sunulmuştur. Burada düşey eksen sırasıyla MID, MIF ve MA gösterirken yatay eksen karakteristik dayanım oranını ifade etmektedir. Sunulan sayısal değerler her bir izolasyon periyodu ve her bir ölçeklendirme yöntemi için 11 deprem kaydına ait sonuçların ortalama değerlerini göstermektedir.

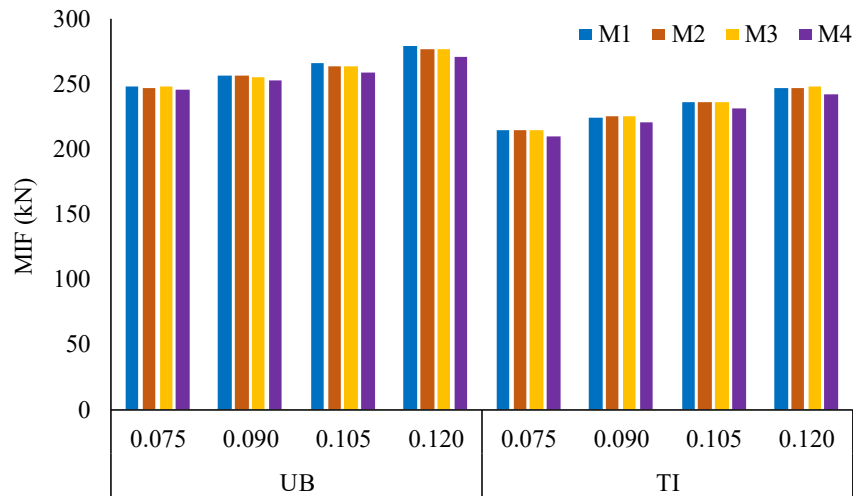
Şekil 13’de sabit T (3,0s) için, dört farklı karakteristik dayanım oranı ve dört farklı ölçeklendirme yöntemi için LB ve TI analiz sonuçları MID bakımından sunulmuştur. LB analiz sonuçları farklı karakteristik dayanım oranı değerleri için ölçeklendirme yöntemleri açısından kıyaslandığında karakteristik dayanım oranının artışı ile ölçeklendirme yöntemleri arasındaki fark artmaktadır. Fark $Q/W=0,075$ için %2 iken $Q/W=0,120$ için %6 mertebesine ulaşmaktadır. Benzer durum TI analiz sonuçları için de geçerli olup bahsi geçen karakteristik dayanım oranları için fark %4 ile %7 arasında değişim göstermektedir. LB ve TI analiz sonuçları birbiri ile kıyaslandığında %13-%20 mertebesinde fark olup LB analizlerinde daha büyük MID değerleri elde edilmiştir. Şekil 14’de sabit T (3,0s) için, dört farklı karakteristik dayanım oranı ve dört farklı ölçeklendirme yöntemi için UB ve TI analiz sonuçları MIF

bakımından sunulmuştur. Farklı ölçeklendirme yöntemlerinde birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Referans olarak seçilen M1 ölçeklendirme yöntemine göre kıyaslama yapıldığında diğer ölçeklendirme yöntemlerinden elde edilen MIF sonuçlarının farkı en fazla %3 mertebesinde. Ölçeklendirme yöntemleri arasındaki MIF değişimi oldukça küçük olup ihmal edilebilecek bir seviyededir. UB ve TI analiz sonuçları birbiri ile kıyaslandığında karakteristik dayanım oranının artışına bağlı olarak fark azalmaktadır. Bu fark %11-%16 mertebesinde olup UB analizlerinde daha büyük MIF değerleri elde edilmiştir.

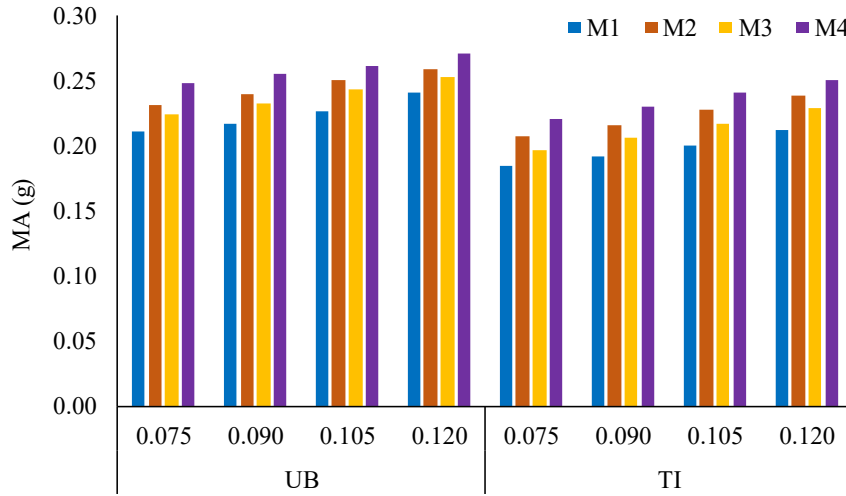
Şekil 14’de sabit T (3,0s) için, dört farklı karakteristik dayanım oranı ve dört farklı ölçeklendirme yöntemi için UB ve TI analiz sonuçları MA bakımından sunulmuştur. UB analiz sonuçları farklı karakteristik dayanım oranı değerleri için ölçeklendirme yöntemleri açısından kıyaslandığında karakteristik dayanım oranının artışı ile ölçeklendirme yöntemleri arasındaki fark azalmaktadır. UB ve TI analiz sonuçları birbiri ile kıyaslandığında karakteristik dayanım oranının artışına bağlı olarak fark azalmaktadır. Bu oran %8-%13 mertebesinde olup UB analizlerinden daha büyük MA değerleri elde edilmiştir.



Şekil 13. Karakteristik dayanım oranına bağlı deplasman değişimi (T=3,0s)
(The change in displacement depending on characteristic strength ratio (T=3,0s))



Şekil 14. Karakteristik dayanım oranına bağlı kuvvet değişimi (T=3,0s)
(The change in force depending on characteristic strength ratio (T=3,0s))



Şekil 15. Karakteristik dayanım oranına bağlı ivme değişimi ($T=3,0s$)
(The change in acceleration depending on characteristic strength ratio ($T=3,0s$))

9. Sonuçlar (Conclusions)

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında sismik yalıtım birimi kurşun çekirdekli kauçuk izolatorlerden oluşan tek serbestlik dereceli bir sistem için dört farklı ölçeklendirme yönteminin yapısal tepkiler üzerindeki etkisi yürütülen dinamik analizlerle incelenmiştir. Analizlerde KÇKI'nın kurşun çekirdeğinde çevrimsel hareket nedeniyle meydana gelen dayanım kaybı dikkate alınmıştır. Dayanım kaybının dikkate alındığı analizlerin yanı sıra sismik yalıtım birimlerinin modellenmesi için şartnamelerin önerdiği ve dayanım kaybının dikkate alınmadığı sınır analizleri yöntemi gereği alt ve üst sınır özelliklerinin kullanıldığı durumlar için de analizler yürütülmüştür. Böylece her iki durum için incelenen dört farklı ölçeklendirme yönteminin sismik yalıtım biriminin histeretik davranışındaki değişime bağlı olarak yapısal tepkileri ne ölçüde değiştirdiği incelenmiştir. Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için kayıtların sadece genliğini değiştiren dört farklı ölçeklendirme yöntemi kullanılmış ve ölçeklendirilen deprem kayıtlarının her iki yatay bileşeni eş zamanlı olarak etki ettirilerek çift doğrultulu analizler gerçekleştirilmiştir. Yalıtım birimi özelliklerinin yapısal tepkiler üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için izolasyon periyodu (T_{iso}) ve karakteristik dayanım oranı (Q/W) değerleri birer parametre olarak seçilmiştir. Böylece beş farklı T_{iso} (2,5s, 2,75s, 3,0s, 3,25s ve 3,5s) ve dört farklı Q/W oranı (0,75, 0,90, 0,105 ve 0,120) için yalıtım birimi seviyesinde meydana gelen MID, MIF ve MA değerlerinin belirlenmesi amacıyla dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Farklı periyot değerlerinde dört farklı ölçeklendirme yönteminden her bir deprem kaydı için farklı ölçek katsayıları elde edilmiştir.
- Ölçek katsayısının büyümesi ile çevrimsel hareket sonucu kurşun çekirdekte oluşan sıcaklık artışı daha fazla olup bu durum kurşun çekirdeğin dayanım kaybetmesine ve böylece yalıtım biriminin daha fazla deplasman yapmasına neden olmaktadır.
- İzolasyon periyodu artışına bağlı olarak yalıtım birimi deplasman değerleri genel olarak artış eğilimindedir. İzolasyon periyodunun artışı ile ölçeklendirme yöntemleri arasındaki deplasman farkı artmaktadır. Yürütülen analizler özelinde M1 yöntemi ile ölçeklendirilen deprem kayıtları diğer yöntemlere kıyasla daha büyük izolator deplasmanlarına yol açmıştır.
- Yalıtım birimine etkiyen kuvvet değerleri izolasyon periyodu artışına bağlı olarak azalmaktadır. Ölçeklendirme yöntemleri

arasındaki kuvvet değişimi oldukça küçük olup ihmal edilebilecek bir seviyededir. Dikkate alınan dört farklı ölçeklendirme yönteminin analizler sonucunda elde edilen sismik izolator kuvvetleri açısından bir farklılık yaratmadığı görülmüştür.

- Yalıtım birimine etkiyen ivme değerleri izolasyon periyodu artışına bağlı olarak azalmaktadır. İzolasyon periyodunun artışı ile ölçeklendirme yöntemleri arasındaki ivme farkı artmaktadır. Öte yandan, M4 yöntemi ile ölçeklendirilen deprem kayıtlarının kullanıldığı analizler sonucunda elde edilen ivme değerlerinin sistematik olarak daha büyük olduğu görülmüştür.
- Karakteristik dayanım oranının artışına bağlı olarak deplasman değerleri azalmaktadır. Ancak karakteristik dayanım oranının artışı ile ölçeklendirme yöntemleri arasındaki deplasman farkı artmaktadır.
- Yalıtım birimine etkiyen kuvvet değerleri karakteristik dayanım oranı artışına bağlı olarak artmaktadır. Ölçeklendirme yöntemleri arasındaki kuvvet değişimi oldukça küçük olup ihmal edilebilecek bir seviyededir.
- Yalıtım birimine etkiyen ivme değerleri karakteristik dayanım oranı artışına bağlı olarak artmaktadır. Karakteristik dayanım oranının artışı ile ölçeklendirme yöntemleri arasındaki ivme farkı azalmaktadır.

Farklı izolasyon periyodu ve karakteristik dayanım oranları için ölçeklendirme yöntemine bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu farklılaşma kuvvet için ihmal edilebilir seviyede iken özellikle izolator deplasman ve ivmeleri için daha belirgin hale gelmektedir. Dayanım kaybının dikkate alındığı (TI) analizlerle kıyaslandığında, kurşun çekirdekli kauçuk izolatorler için sınır analizlerden (LB-UB) elde edilen ortalama sonuçların güvenli tarafta kaldığı görülmektedir. Bu durum analizlerde dikkate alınan karakteristik dayanım oranı (Q/W) ve izolasyon periyodu (T_{iso}) parametrelerine ve ölçek katsayılarına bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada dikkate alınan parametreler için ölçek katsayısının 1'den daha büyük olması durumunda dayanım kaybının dikkate alındığı (TI) analizlerden elde edilen sonuçların, sınır analizlerden (LB-UB) elde edilen sonuçlardan daha fazla olacağı gösterilmiştir. Ayrıca dikkate alınan ölçeklendirme yöntemleri kuvvet açısından yakın sonuçlar sunarken elde edilen deplasman ve ivme değerlerinde farklılıklar meydana gelmektedir. Bu farklılaşmanın özellikle ivme değerlerinde daha belirgin olduğu görülmüştür. Deprem kayıtlarının nasıl ölçeklendiğine bağlı olarak ortaya çıkan bu sonuç, analiz edilen sismik izolasyonlu yapıda ivme sınırlandırmasını gerektirecek hassas

ekipman bulunması durumunda tasarım açısından önemli hale gelebilecektir. Yapısal tepkilerdeki bu değişimin sismik izolasyonlu yapı tasarımı sırasında dikkate alınması önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2218 programı kapsamında 118C510 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

- Naeim, F. ve Kelly, J.M., Design of seismic isolated structures : from theory to practice. A.B.D., 1999.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2018.
- Eurocode8: Design of Structures for Earthquake Resistance- Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, EN 1998-1, 2004.
- American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute (ASCE/SEI), Minimum Design Loads For Buildings And Other Structures, ASCE/SEI 7-16, Reston, V.A. 2016.
- Whittaker A.S., Atkinson G.M., Baker J.W., Bray J.D., Grant D.N., Hamburger R., Haselton C., *et al.*, Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Analyses, 1–256, 2011.
- Patil A.S., Kumbhar P.D., Time History Analysis of Multistoried RCC Buildings for Different Seismic Intensities, *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, 2 (3), 195–201, 2013.
- Soyluk, K., Karaca, H., Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 727-742, 2021.
- Bommer J.J., Acevedo A.B., The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis, *J. Earthq. Eng.*, 8 (1), 43–91, 2004.
- Nau J.M., Hall W.J., Scaling Methods for Earthquake Response Spectra, *J. Struct. Eng.*, 110, (7), 1533–1548, 1984.
- Shome N., Cornell C.A., Bazzurro P., Carballo J.E., Earthquakes, records, and nonlinear responses, *Earthq. Spectra*, 14 (3), 469–500, 1998.
- Kwong N.S., Chopra A.K., McGuire R.K., Evaluation of ground motion selection and modification procedures using synthetic ground motions, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 44 (11), 1841–1861, 2015.
- Eren N., Sucuoğlu H., Pinho R., Interstory drift based scaling of earthquake ground motions, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 50 (14), 3814–3830, 2021.
- Kalkan E., Chopra A.K., Modal-Pushover-Based Ground-Motion Scaling Procedure, *J. Struct. Eng.*, 137 (3), 298–310, 2011.
- Huang Y.-N., Whittaker A.S., Luco N., Hamburger R.O., Scaling Earthquake Ground Motions for Performance-Based Assessment of Buildings, *J. Struct. Eng.*, 137 (3), 311–321, 2011.
- Ay B.Ö., Akkar S., A procedure on ground motion selection and scaling for nonlinear response of simple structural systems, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 41 (12), 1693–1707, 2012.
- Baker J.W., Measuring bias in structural response caused by ground motion scaling, *Pacific Conf. Earthq. Eng.*, (056), 1–6, 2007.
- Michaud D., Léger P., Ground motions selection and scaling for nonlinear dynamic analysis of structures located in Eastern North America, *Can. J. Civ. Eng.*, 41 (3), 232–244, 2014.
- Reyes J.C., Riaño A.C., Kalkan E., Quintero O.A., Arango C.M., Assessment of spectrum matching procedure for nonlinear analysis of symmetric- and asymmetric-plan buildings, *Eng. Struct.*, 72, 171–181, 2014.
- Pant D.R., Maharjan M., On selection and scaling of ground motions for analysis of seismically isolated structures, *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 15 (4), 633–648, 2016.
- Pant D.R., Influence of scaling of different types of ground motions on analysis of code-compliant four-story reinforced concrete buildings isolated with elastomeric bearings, *Eng. Struct.*, 135, 53–67, 2017.
- Reyes J.C., Riaño A.C., Kalkan E., Quintero O.A., Arango C.M., Assessment of spectrum matching procedure for nonlinear analysis of symmetric- and asymmetric-plan buildings, *Eng. Struct.*, 72, 171–181, 2014.
- Roy R., Thakur P., Chakroborty S., Scaling of ground motions and its implications to plan-asymmetric structures, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 57, 46–67, 2014.
- Samanta A., Huang Y.N., Ground-motion scaling for seismic performance assessment of high-rise moment-resisting frame building, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 94, 125–135, 2017.
- Reyes J.C., González C., Kalkan E., Improved ASCE/SEI 7-10 Ground-Motion Scaling Procedure for Nonlinear Analysis of Buildings, *J. Earthq. Eng.*, 25 (4), 597–620, 2021.
- Watson-Lamprey J., Abrahamson N., Selection of ground motion time series and limits on scaling, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26 (5), 477–482, 2006.
- Çavdar E., Özdemir G., Change in maximum isolator displacements due to change in orientation of scaled near field ground motion records, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 599–609, 2018.
- Ozdemir G., Avsar O., Bayhan B., Change in response of bridges isolated with LRBs due to lead core heating, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 31 (7), 921–929, 2011.
- Luco N., Bazzurro P., Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses?, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 36 (13), 1813–1835, 2007.
- Krinitzsky E., Chang F., Specifying Peak Motions for Design Earthquakes, State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, 1977.
- Vanmarcke E., Representation of earthquake ground motion: Scaled accelerograms and equivalent response spectra, *Mississippi US Army Eng. Waterw. Exp. Stn.*, 1979.
- Özdemir G., Gülkan H.P., Scaling legitimacy for design of lead rubber bearing isolated structures using a bounding analysis, *Earthq. Spectra*, 32 (1), 345–366, 2016.
- Çavdar E., Ozdemir G., Bayhan B., Significance of ground motion scaling parameters on amplitude of scale factors and seismic response of short- And long-period structures, *Earthq. Spectra*, 35 (4), 1663–1688, 2019.
- Fahjan Y.M., Kara F.I., Mert A., Selection and scaling time history records for performance-based design, *Performance-Based Seismic Design of Concrete Structures and Infrastructures*, Pennsylvania, USA: IGI Global, 1–35, 2017.
- Chandramohan R., Baker J.W., Deierlein G.G., Quantifying the Influence of Ground Motion Duration on Structural Collapse Capacity Using Spectrally Equivalent Records, *Earthq Spectra*, 32 (2), 927–950, 2016.
- PEER Ground Motion Database-Beta Version, Technical Report for the PEER Ground Motion Database Web Application, California, [Online]. Available: <https://ngawest2.berkeley.edu/>, 2010.
- Ozdemir G., Constantinou M.C., Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 30 (10), 1036–1042, 2010.
- Constantinou M. C., Whittaker A. S., Fenz D. M., Apostolakis G., Seismic Isolation of Bridges, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, State University of New York at Buffalo, 2007.
- Huang Y.N., Whittaker A.S., Luco N., Performance assessment of conventional and base-isolated nuclear power plants for earthquake and blast loadings, MCEER-08-0019, University at Buffalo, The State University of New York, Buffalo, NY, 2008.
- OpenSees, University of California, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 2021.
- Ozdemir G., Dicleli M., Effect of lead core heating on the seismic performance of bridges isolated with LRB in near-fault zones, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 41 (14), 1989–2007, 2012.
- Ayşar Ö., Özdemir G., Response of Seismic-Isolated Bridges in Relation to Intensity Measures of Ordinary and Pulselike Ground Motions, *J. Bridg. Eng.*, 18 (3), 250–260, 2013.
- Kitayama S., Constantinou M.C., Implications of strong earthquake ground motion duration on the response and testing of seismic isolation systems, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 50 (2), 290–308, 2021.
- Charleson A., Adriana Guisasaola, *Seismic Isolation for Architects*. London, UK; New York, NY, USA: Routledge, Taylor & Francis Group, 2017.
- Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. I: Theory, *J. Struct. Eng.*, 135, 1440–1449, 2009.

45. Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. II: Verification of Theory, J. Struct. Eng., 135, 1450–1461, 2009.
46. Kalpakidis, I.V., Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Modeling strength degradation in lead–rubber bearings under earthquake shaking. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39 (13), 1533-1549, 2010.
47. Özdemir, G., Bayhan, B., Gülkan, P., Variations in the hysteretic behavior of LRBs as a function of applied loading. Structural Engineering and Mechanics, 67 (1), 69-78, 2018.
48. Erdik M., Constantinou M.C., Design and Analysis of Seismic Isolation System for Erzurum Hospital, Turkey, Ankara, 2005.
49. Ülker Mühendislik, Moda Grup Apartmanı Yapısal Güçlendirme Projesi, Rapor No: U15-20-02R3, İstanbul, 2015.
50. Park Y., Wen Y., Ang A.H.S., Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 14 (4), 543–557, 1986.
51. Özdemir G., Response of Isolated Structures under Bi-Directional Excitations of Near-Field Ground Motions, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 2010.
52. Ozdemir G., Lead core heating in lead rubber bearings subjected to bidirectional ground motion excitations in various soil types, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 43 (2), 267–285, 2014.

