



## Change in maximum isolator displacements due to change in orientation of scaled near field ground motion records

Esengül Çavdar, Gökhan Özdemir

Department of Civil Engineering, Anadolu University, Eskişehir, 26555, Turkey

### Highlights:

- Change in ground motion orientation
- Bi-directional dynamic analyses with scaled ground motions
- Deterioration in strength of isolator due to temperature rise in lead core

### Keywords:

- Seismic isolation
- Ground motion orientation
- Scaling of ground motions
- Bi-directional excitations
- Lead rubber bearing

### Article Info:

Received: 21.11.2016

Accepted: 16.03.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416367

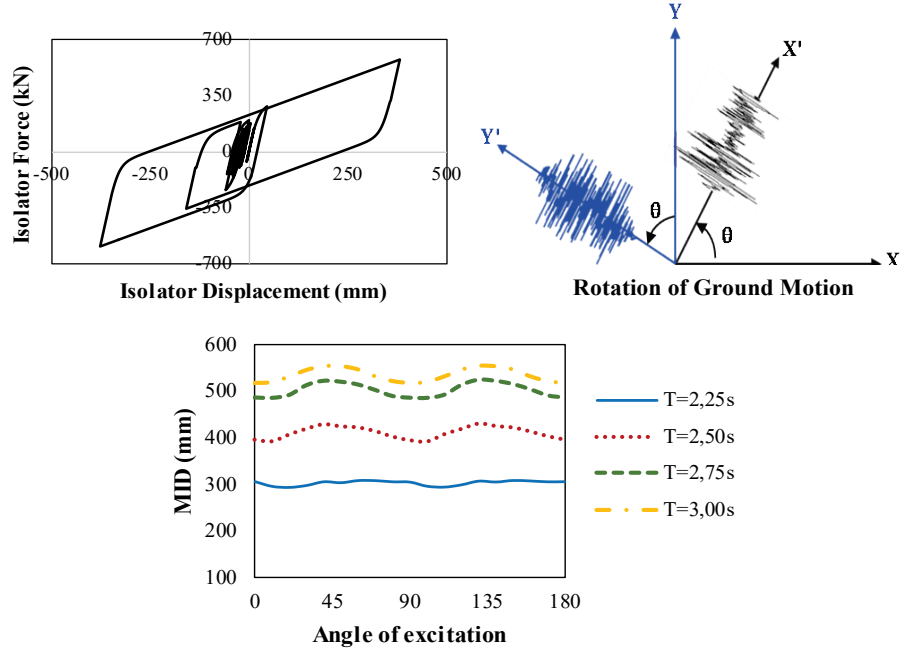
### Acknowledgement:

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) under the grant no: 1139B411502576.

### Correspondence:

Author: Assoc. Prof. Dr. Gökhan Özdemir  
e-mail: gokhan\_ozdemir@anadolu.edu.tr  
phone:+90 222 3213550 / 6304

### Graphical/Tabular Abstract



**Purpose:** To quantify the amplification in maximum isolator displacement due to change in ground motion orientation by means of nonlinear response history analyses performed in accordance with code specifications.

### Theory and Methods:

Analyzed structure is 3-story steel structure seismically isolated by lead rubber bearings. Modelling of lead rubber bearings was accomplished by considering the gradual reduction in their lateral strength due to temperature rise in the lead core under cyclic motion. Hence, instantaneous hysteretic properties of isolators were taken into account during the analyses. Near-field records used in the analyses were selected and scaled according to code provisions. The recorded original forms of selected ground motions were rotated through  $0^\circ$  to  $180^\circ$  with  $10^\circ$  increments in order to represent several ground motion orientations. Maximum isolator displacements obtained from analyses using both original and rotated forms of selected ground motions were compared. Comparisons were performed for several seismic isolation periods. Results were used to quantify the amplification in maximum isolator displacements due to variation in ground motion orientation.

### Results:

The amount of amplification in maximum isolator displacements due to change in ground motion orientation is in between 1.5-2.5% in an average sense. Both the seismicity level and seismic isolation period have only marginal effects on the amount of amplification of isolator displacement.

### Conclusion:

In order to consider the effect of ground motion orientation on maximum isolator displacements during the design phase of seismic isolation system, 5% increment in the design displacement of isolators is found to be enough for selected ground motion records and seismic isolator properties.



## Ölçeklendirilen yakın saha deprem kayıtlarının farklı doğrultularda etkimesi durumunda yalıtım birimi maksimum yer değiştirmelerinde gözlenen değişim

Esengül Çavdar<sup>ID</sup>, Gökhan Özdemir\*<sup>ID</sup>

Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Deprem etkime açısındaki değişim
- Ölçeklendirilmiş deprem kayıtları ile çift doğrultulu dinamik analizler
- Kurşun çekirdekteki ısınmaya bağlı yalıtım biriminde gözlenen dayanım kaybı

### Makale Bilgileri

Geliş: 21.11.2016  
Kabul: 16.03.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416367

### Anahtar Kelimeler:

Sismik izolasyon,  
deprem etkime açısı,  
yer hareketlerinin  
ölçeklendirilmesi,  
çift doğrultulu analiz,  
kurşun çekirdekli kauçuk  
yalıtım birimi

### ÖZET

Bu çalışmada, sismik taban izolasyonu uygulaması kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimleri (KÇKYB) kullanılarak gerçekleştirilen bir yapıda, maksimum izolatör deplasmanlarındaki (MİD) değişim deprem etkime açısına bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, seçilen deprem kayıtlarının orijinal halleri 10° aralıklarla 180° boyunca döndürülerek aynı deprem hareketinin farklı etkime açılarında sahip versiyonları oluşturulmuştur. Yürütülen doğrusal olmayan dinamik analizlerde, dikkate alınan deprem hareketine ait her iki yatay deprem bileşeni oluşturulan yapısal modele eş zamanlı olarak tatbik ettirilmiştir. Analizlerde kullanılan deprem hareketleri, yakın saha kaynaklı kayıtlar arasından seçilmiş olup, tasarım deprem (TD) ve maksimum deprem (MD) seviyelerini temsil edecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Analizlerde, maruz kalınan harekete bağlı olarak KÇKYB'nin histeretik eğrilerinde, kurşun çekirdekteki ısınmaya bağlı, dayanım kaybını dikkate alabilen malzeme modeli kullanılmıştır. Ayrıca, incelemeye konu olan deprem etkime açısına bağlı MİD'deki değişimin izolasyon periyoduna olan hassasiyetini belirleyebilmek adına dört farklı özellikte izolatör tasarlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, orijinal deprem kayıtlarının döndürülmesi sonucu MİD'deki artışın ihmal edilebilir seviyede (ortalama olarak %2 mertebesinde) olduğu gözlenmiştir. Bu artış miktarının TD ve MD seviyeleri için farklılaşmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, deprem hareketinin farklı etkime açısına bağlı olarak ortaya çıkan MİD'deki artışın, izolasyon periyodundaki değişimden etkilenmediği görülmüştür.

## Change in maximum isolator displacements due to change in orientation of scaled near field ground motion records

### H I G H L I G H T S

- Change in ground motion orientation
- Bi-directional dynamic analyses with scaled ground motions
- Deterioration in strength of isolator due to temperature rise in lead core

### Article Info

Received: 21.11.2016  
Accepted: 16.03.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416367

### Keywords:

Seismic isolation,  
ground motion orientation,  
scaling of ground motions,  
bi-directional excitations,  
lead rubber bearing.

### ABSTRACT

In this study, the change in maximum isolator displacements (MIDs) of a seismically isolated structure is studied as a function of ground motion orientation. The isolator units of the analyzed structure is composed of lead rubber bearings (LRBs). For this purpose, selected as-recorded original forms of ground motions are rotated from 0° to 180° with 10° increments to obtain new records with different orientations. In nonlinear response history analyses, both horizontal components of ground motion records are subjected to structure simultaneously. Employed motions are representative of near-field records and scaled to represent two different seismicity levels namely, design based earthquake (DBE) and maximum considered earthquake (MCE). In the analyses, a deteriorating hysteretic behavior, where the deterioration is a function of temperature rise in the lead core, is used to idealize LRBs. Furthermore, to find the effect of isolation period on this amplification, the isolation period is considered to be a parameter. Thus, four different isolators are designed. The analyses results revealed that the variation in MIDs due to change in ground motion orientation is negligible and approximately equals to 2% in an average sense. Same observation is valid for seismicity levels of both DBE and MCE. Also, isolation period is found to be an ineffective parameter in terms of variation in MID when different orientation of motions is of concern.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: gokhan\_ozdemir@anadolu.edu.tr / Tel: +90 222 321 35 50 / 6304

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sismik taban izolasyonlu bir yapının tasarımı aşamasında dikkate alınan ana değişkenlerden biri, izolasyon seviyesindeki deplasman değeridir. Bu değer, i) sismik boşluk olarak adlandırılan ve yapının serbestçe hareket edebilmesi için ihtiyaç duyulan boşluk miktarını; ii) altyapıya aktarılan kesme kuvveti miktarını ve iii) izolatör geometrisini belirlemektedir. Bu sebeple, maksimum izolatör deplasmanının (MİD) belirlenmesi, bu tip yapıların tasarımında büyük önem arz etmektedir. Yalıtım birimi yer değiştirmelerini belirleyebilmenin en gerçekçi yöntemi, izole edilen yapılar ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan (ZTADO) analizler yürütmektir. ASCE [1], Eurocode 8 [2] uluslararası şartnamelerinde ve güncellenen deprem şartnamemiz [3] yer alan hükümler gereğince sismik taban izolasyonu bulunan yapılar için yürütülecek ZTADO analizlerde, dikkate alınan yapısal modelin çift doğrultulu deprem etkileri altında incelenmesi gerekmektedir. Buna göre, analizlerde kullanılacak bir depreme ait her iki yatay bileşen yapısal modele eş zamanlı olarak tatbik edilmelidir.

Şartnameler, yürütülecek analizlerde orijinal deprem kayıtlarının kullanılmasını teşvik etmektedir ancak, bu şartnamelerde deprem hareketlerinin yapıya etkime açısı ile ilgili herhangi bir tanımlama bulunmamaktadır. Unutulmamalıdır ki olası bir depremin tasarlanan yapıya hangi doğrultuda etki edeceği bilinmemektedir. Bu bilinmezlik, araştırmacıları deprem etkime açısının yapısal tepkiler üzerindeki etkilerini araştırmaya yöneltmiştir. Örneğin, Athanapoulou [4], kritik deprem etkime açısını ve maksimum tepkiyi hesaplayabilmek için bir takım analitik formüller geliştirmiştir. Rigato ve Medina [5] ise deprem etkime açısının mühendislik istem parametreleri üzerindeki etkisini çift doğrultulu analizler yaparak tek katlı simetrik ve asimetrik yapılar üzerinde incelemiştir. Ayrıca, Kostinakis vd. [6] betonarme bir yapıda iç kuvvetlerin farklı etkime açısına sahip yer hareketleri altındaki değişimini ele almıştır. Moschonas ve Kappos [7] da deprem etkime açısına bağlı yapısal davranıştaki değişimi belirleyebilmek için doğrusal olmayan statik analiz yöntemi geliştirilmişlerdir. Bunlara ek olarak, Kalkan ve Reyes [8] çok katlı simetrik ve asimetrik yapılar için deprem etkime açısının mühendislik istem parametreleri üzerindeki etkisini yakın saha kaynaklı yer hareketleri altında incelemiştir. Bu kıyaslamalarda, her ne kadar incelenen yapıların ve seçilen depremlerin özellikleri çok büyük farklılıklar içerse de, elde edilen sonuçlar benzerlik göstermekte ve en elverişsiz deprem etkisine neden olacak kritik bir deprem etkime doğrultusunun olduğu vurgulanmaktadır. Bu çalışmalarda, deprem yer hareketinin sadece yapının asal eksenlerine uygulanması durumunda elde edilen elastik ötesi deformasyonların, depremin yapıya farklı doğrultuda uygulandığı durumlarda hesaplanan değerlerden daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Bununla beraber, en elverişsiz sismik etkinin oluşacağı kritik deprem etkime doğrultusunun depremin özelliğine bağlı olduğu kadar ele alınan mühendislik istem parametresine de bağlı olduğu

vurgulanmıştır. Ancak, burada atıf yapılan çalışmaların hiçbirinde sismik taban izolasyonlu bir yapı özelinde inceleme yapılmamıştır. Öte yandan, Erişgen [9] tarafından hazırlanan bir yüksek lisans tez çalışmasında deprem etkime açısının MİD üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yazarın bu çalışma kapsamında yürüttüğü analizlerde yalıtım birimlerini idealize etmek için kullandığı kuvvet-yer değiştirme ilişkisi, gerçek davranışın aksine, çevrimsel yüklemelerden etkilenmemekte ve dayanım kaybı göstermemektedir. Ayrıca, bahsi geçen bu analizlerde kullanılan deprem kayıtları için de herhangi bir ölçeklendirme yapılmamıştır. Erişgen [9] yürüttüğü çalışma sonucunda deprem etkime açısına bağlı olarak “en büyük pik izolatör deplasmanı” için elde ettiği değerler arasında 3 kattan fazla fark olduğunu belirtmiştir. Ancak, Erişgen [9] depremin geliş açısı ve yalıtım birimi yer değiştirmeleri arasındaki ilişkiyi incelerken her iki yatay doğrultudaki yer değiştirmelerin vektörel bileşkesini almak yerine her iki yatay doğrultudaki yalıtım birimi yer değiştirmelerini ayrı ayrı irdelemiştir. Yaklaşımındaki bu farklılık da yazar tarafından belirtilen “en büyük pik izolatör deplasmanı” değerlerinde deprem etkime açısına bağlı artış miktarlarının bu denli yüksek olmasının nedeni olarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak sismik taban izolasyonlu bir yapıda yalıtım birimlerinin maruz kalacağı maksimum yer değiştirmenin deprem etkime açısındaki değişime bağlı olarak nasıl bir değişim gösterdiği üzerine şartname hükümlerine uygun olarak yapılan herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Literatürdeki bu açığı kapatmak için de bu çalışma yürütülmüştür.

Bu çalışmanın amacı, sismik taban izolasyonlu bir yapı modeli için, şartname hükümlerine uygun olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak yürütülen analizler sonucunda, deprem etkime açısındaki değişime bağlı olarak MİD’deki olası artış miktarını belirlemektir. Bu amaçla, orijinal deprem kayıtlarına ait yatay bileşenler 10°’lik aralıklarla 180° boyunca döndürülerek farklı etkime açısına sahip yeni kayıtlar oluşturulmuştur. Hem orijinal kayıtların hem de döndürülerek elde edilen yeni kayıtların kullanıldığı analizlerden elde edilen yalıtım birimi yer değiştirmeleri kıyaslanarak deprem etkime açısına bağlı olarak MİD’deki artış miktarı tespit edilmiştir. Kullanılan tüm deprem kayıtları (hem orijinal hem de döndürüldükten sonra elde edilen kayıtlar) iki farklı sismik seviyeyi (Tasarım Depremi (TD) ve Maksimum Deprem (MD)) temsil edecek şekilde ölçeklendirilmiştir. ZTADO analizler, OpenSees [10] yapısal analiz programı kullanılarak yürütülmüştür. Analizlerde, en yaygın olarak kullanılan yalıtım birimi tiplerinden birisi olan kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimleri (KÇKYB) dikkate alınmış ve bu yalıtım birimlerinin modellenmesi için, gerçekte olduğu gibi tatbik edilen hareketin özelliklerine bağlı olarak kademeli bir şekilde dayanım kaybı gösteren kuvvet-yer değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca, sismik taban izolasyonlu bir yapının performansını etkileyen temel parametrelerden birisi olan izolasyon periyodunun da bu konu özelindeki etkisini belirleyebilmek adına dört farklı izolasyon periyodu için analizler tekrarlanmıştır.

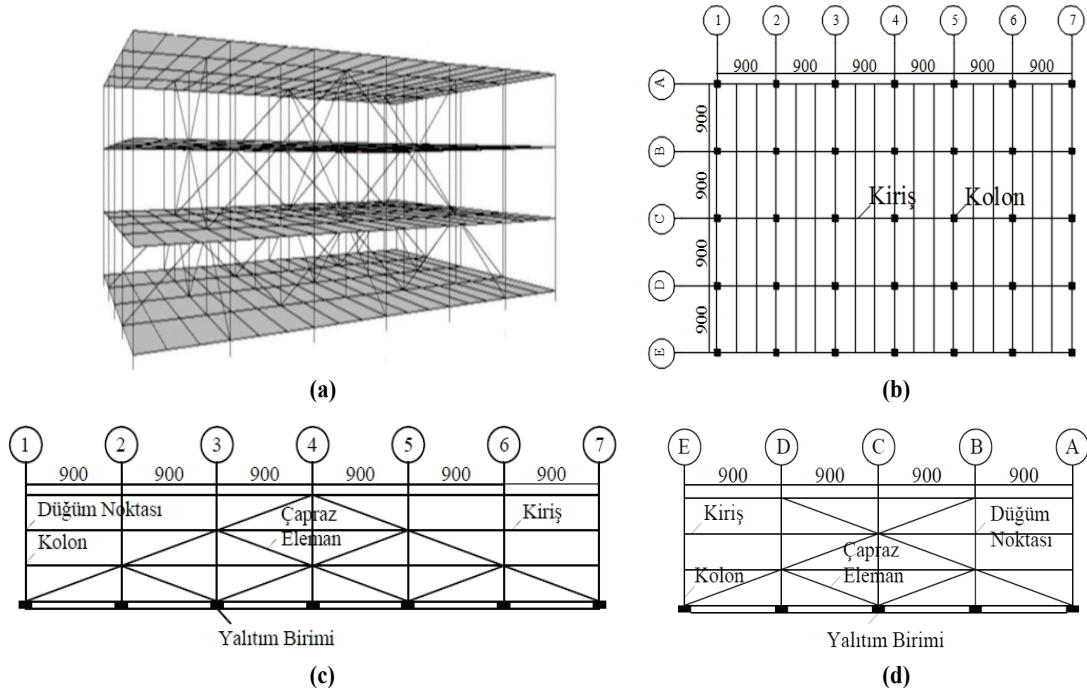
## 2. SİSMİK TABAN İZOLASYONLU YAPI MODELİ (ANALYTICAL MODEL FOR SEISMIC ISOLATED STRUCTURE)

Doğru bir tasarım sürecinden geçen sismik taban izolasyonlu bir yapıda, karşılaşılabilecek açıklık ve taşıyıcı sistem eleman boyutları standart yapısal tasarım yöntemlerinden elde edilenlere kıyasla farklılık göstermektedir. Bu nedenle, incelemeye konu olacak yapının tasarım sürecinin en başından itibaren sismik taban izolasyonlu olarak tasarlanması, analiz sonuçlarının gerçeklik derecesini artırmak adına çok önemlidir. Bu çalışmada kullanılan sismik taban izolasyonlu bina, National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) [11] için sismik taban izolasyonlu yapıların tasarım ilkelerinin incelenmesine yönelik olarak bir acil durum yönetim merkezini temsilen tasarlanmış olup taşıyıcı sistemi çelik elemanlardan oluşmaktadır. Yapıda, her biri 3m yüksekliğe sahip 3 kat bulunmaktadır. Yapının plandaki boyutları 36mx54m olup kısa doğrultuda dört, uzun doğrultuda ise altı adet 9m'lik açıklıklar bulunmaktadır. Modellenen yapıda ayrıca çapraz elemanlar da kullanılmış olup; yapı, hem yatayda hem de düşeyde herhangi bir düzensizlik içermemektedir. Yapının toplam ağırlığı 73000 kN'dur. İzolasyon seviyesi ve ilk iki katın ağırlıkları birbirine eşitken, en üst katın ağırlığı, diğerlerinin %75'i kadardır. Her katta toplam 35 adet kolon yer alıp temel ile üstyapı arasında yerleştirilen yalıtım birimleri kolon altlarına denk gelecek şekilde projelendirilmiştir. Bu durumda, bu yapının sismik taban izolasyonunda 35 adet KÇKİ kullanılmıştır. Üç boyutlu görseli ile birlikte planda ve düşeyde kesit görüntüleri Şekil 1'de verilen sismik taban izolasyonlu yapıya ait taşıyıcı

sistem elemanları hakkında daha detaylı bilgiye NEHRP'den [11] ulaşılabilir. Şekil 1a'da verilen yapısal modelde, izolasyon seviyesinin üstünde kalan tüm taşıyıcı sistem elemanları, sismik taban izolasyonlu bir yapının sismik davranışından beklenildiği üzere, elastik davranış gösterdikleri kabulüyle modellenmiştir [12, 13]. Yapıda kullanılan çelik elemanların elastisite modülü ve poisson oranı sırasıyla 200 GPa ve 0,3 alınmıştır. Her kat seviyesindeki kütleler ait oldukları kattaki düğüm noktalarına eşit bir şekilde dağıtılmıştır.

## 3. KURŞUN ÇEKİRDEKLİ KAUÇUK YALITIM BİRİMLERİNİN MODELLENMESİ (MODELING OF LEAD RUBBER BEARINGS)

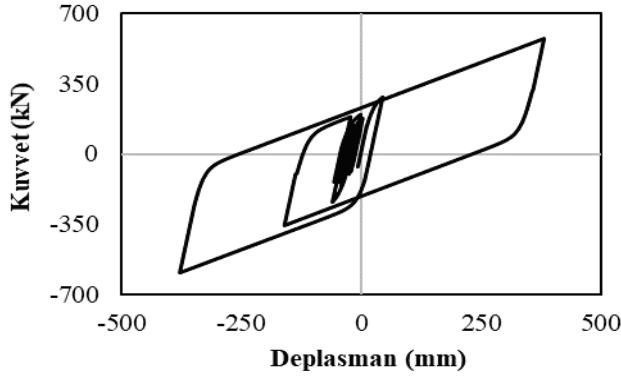
Herhangi bir yapının deprem hareketleri altındaki sismik performansını belirleyebilmenin en gerçekçi yolu ZTADO analizlerdir. Ancak, bu analizlerden elde edilen sonuçların ne derecede gerçekçi olduğu tamamen tasarım aşamasında yapılan modelleme kabulleri ile doğru orantılıdır. Özellikle sismik taban izolasyonlu yapılar söz konusu olduğunda, yapıdaki doğrusal olmayan davranış sadece yalıtım birimleri seviyesinde oluşacağından, yalıtım birimine ait davranışın gerçekçi olarak modellenmesi çok önemlidir. Yürütülen bu çalışmada yalıtım birimi tipi olarak dikkate alınan KÇKYB ile geçmişte yapılan deneysel çalışmalar göstermiştir ki tersinir tekrarlanır hareketlere maruz bırakılan yalıtım birimlerinin dayanımında kademeli olarak bir azalmaktadır [14]. Şekil 2'de tipik bir KÇKYB'nin tasarım deplasmanı altında test edilmesi sonucu elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 1. a) Üç boyutlu bina modeli b) Kat planı c) B ve D akslarına ait düşey kesit görüntüsü d) 2 ve 6 akslarına ait düşey kesit görüntüsü

(( a) 3D structural model b) floor plan c) Side views for B and D axis d) Side views for 2 and 6 axis)





**Şekil 2.** Tipik bir izolatör kuvvet-yer değiştirme eğrisi (Typical isolator force displacement curve).

Ancak, KÇKYB için uygulamada kullanılan mevcut modelleme teknikleri, yalıtım birimi dayanımındaki bu değişimi gerçekçi olarak modelleme yetisine sahip olmadıklarından, yalıtım biriminin gerçek davranışını belirlemek yerine davranışın değişim gösterebileceği bir tanım aralığı belirlemeye yönelim olmuştur. Bunun için de alt ve üst sınır analizleri olarak tanımlanan bir seri dinamik analizin yürütülmesi gerekmektedir [1]. Bu analizlerde kullanılan yalıtım birimi modelleri, gerçek davranışın aksine, dayanım kaybı olmuyormuş kabulüyle idealize edilmektedir. Bu kabul gereğince KÇKYB’ne ait histeretik eğrinin oluşturulması için gerekli değerler bir kez belirlendikten sonra analiz boyunca değişmez ve sabit kalır. Her ne kadar bu kabulün gerçek davranışı yansıtmadığı bilirse de KÇKYB’ne ait histeretik eğrideki değişimin nedeni bilinmediğinden bu modelleme yaklaşımı kullanılmaya devam edilmiştir. Ancak, yakın tarihte yürütülen bir çalışma neticesinde KÇKYB’ne ait histeretik eğrideki değişimin temel nedeni, yalıtım biriminin maruz kaldığı harekete bağlı olarak, kurşun çekirdeğin ısınması ve artan sıcaklıkla beraber dayanımda kayıp yaşanması olarak tespit edilmiştir [15]. Kurşun çekirdekdeki ısınma ve dayanım kaybı arasındaki ilişkiyi modellemeyi başaran Kalpakidis ve Constantinou [15] geliştirdikleri bu modelin geçerliliğini de deneysel veriler aracılığıyla ispatlamıştır [16]. Bu malzeme modeli kullanılarak yürütülen güncel çalışmalarda da gerçek yalıtım birimi davranışı ve uygulamada kullanılan modelleme yöntemi arasındaki farklılaşmanın mertebesi detaylı bir biçimde irdelenmiştir. Özdemir vd. [17], sismik izolasyonu KÇKYB ile sağlanan bir köprüde MİD’nin, kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışına bağlı değişimini kuvvetli yer hareketleri altında incelemişlerdir. Diğer bir çalışmada ise Özdemir ve Dicleli [18], kurşun çekirdekdeki ısı artışının, yalıtım biriminin maruz kaldığı depremin büyüklüğüne, faydan olan uzaklığa ve hareketteki döngü sayısına bağlı olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, analizlerinde sentetik kayıtlar kullanmışlardır. Özdemir [19] tarafından yürütülen bir diğer çalışmada ise, KÇKYB’de gözlenen maksimum ısı artışı ve MİD, farklı zemin tiplerini temsil eden deprem kayıtları altında çift ve tek doğrultulu analizlerle incelemiştir. Özdemir [20] de, kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışına bağlı olarak kuvvet-yer değiştirme ilişkisi azalım gösteren KÇKYB’deki, eş değer sönüm oranının hesaplanması için bir takım yeni formüller geliştirmiştir. Ayrıca, Özdemir ve Bayhan [21] çift doğrultulu deprem hareketleri altında MİD’deki değişimi

yalıtım birimi özelliklerine bağlı olarak incelemişlerdir. Tüm bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında kurşun çekirdekdeki ısınmaya bağlı dayanım kaybının dikkate alındığı ve alınmadığı analizlerden elde edilen maksimum yalıtım birimi yer değiştirme değerleri kıyaslandığında maksimum yer değiştirme değerlerinde farklılaşmalar gözlenmiştir. Yalıtım birimine ait gerçek kuvvet-yer değiştirme ilişkisinde olduğu gibi dayanım kaybı gözlenen malzeme modelinin kullanıldığı analizlerde yalıtım birimi yer değiştirmelerinin kullanılmayanlara kıyasla %20 oranına kadar daha az olduğu belirlenmiştir. Bu farklılığın özellikle çift doğrultulu deprem analizleri için daha belirgin olduğu vurgulanmıştır.

KÇKYB için geliştirilen bu malzeme modeline göre, harekete maruz kalan yalıtım biriminin kurşun çekirdeğindeki sürtünmeyle ortaya çıkan ısınmaya bağlı yalıtım birimi dayanımındaki değişim anlık olarak hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamaya esas teşkil eden eşitlikler Eş. (1-4)’te tanımlanmıştır. Eş. 1’de görülen  $\sigma_{YL}(T_L)$  kurşunun sıcaklığa bağlı kayma gerilmesini,  $\sigma_{YL0}$  kurşunun ilk kayma gerilmesini,  $T_L$  kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışını  $E_2$  en uygun nihai mukavemet sıcaklık eğrisi için kullanılan birimsiz bir parametreyi temsil etmektedir. Eş. 2’de görülen  $\dot{T}_L$  kurşun çekirdekte meydana gelen ısı artışının birim zamanda değişimini,  $Z_X$  ve  $Z_Y$  histeretik kuvvetlerin yönü ve çift eksenli etkileşimin hesaplanabilmesi için kullanılan birimsiz büyüklükleri,  $\dot{U}_X$  ve  $\dot{U}_Y$  yalıtım biriminde her iki yatay yönde meydana gelen yer değiştirmeye ait birim zamanda oluşan değişimi,  $\rho_L$  kurşun çekirdeğin yoğunluğunu,  $c_L$  kurşun çekirdeğin özgül ısınma ısısını,  $h_L$  yalıtım biriminin yüksekliğini,  $k_S$  çelik plakaların ısı iletkenliğini,  $a$  kurşun çekirdeğin yarıçapını,  $t_S$  çelik plakaların toplam kalınlığını,  $t^+$  boyutsuz zamanı ve  $F$  boyutsuz zamana ait bir parametreyi ifade etmektedir. Eş. 4’te görülen  $a_S$  ise çelik plakaların ısıl genleşme katsayısını temsil etmektedir.

$$\sigma_{YL}(T_L) = \sigma_{YL0} * \exp(-E_2 T_L) \quad (1)$$

$$\dot{T}_L = \frac{\sigma_{YL}(T_L) * \sqrt{Z_X^2 + Z_Y^2} * \sqrt{\dot{U}_X^2 + \dot{U}_Y^2}}{\rho_L c_L h_L} \quad (2)$$

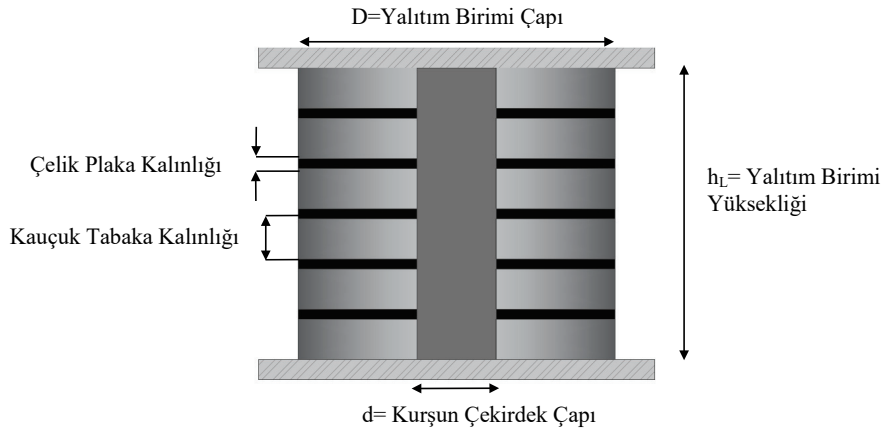
$$F = \left\{ \begin{array}{l} \frac{k_S * T_L}{a \rho_L c_L h_L} * \left( \frac{1}{F} + 1.274 * \left( \frac{t_S}{a} \right) * (t^+)^{-1/3} \right) \\ \left[ 2 * \left( \frac{t^+}{\pi} \right)^{1/2} - \frac{t^+}{\pi} * \left[ 2 - \left( \frac{t^+}{4} \right) - \left( \frac{t^+}{4} \right)^2 - \frac{15}{4} \left( \frac{t^+}{4} \right)^3 \right] \right], \quad t^+ < 0.6 \\ \left[ \frac{8}{3\pi} - \frac{1}{2(\pi * t^+)^{1/2}} * \left[ 1 - \frac{1}{3 * (4t^+)} + \frac{1}{6 * (4t^+)^2} - \frac{1}{12 * (4t^+)^3} \right] \right], \quad t^+ \geq 0.6 \end{array} \right. \quad (3)$$

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

Analizlerde kullanılan dairesel KÇKYB'ne ait kesit görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir. KÇKYB'nde sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelen dayanım kaybının hesaplanmasında kullanılan eşitliklerde malzeme özelliklerinin yanı sıra yalıtım biriminin geometrik özelliklerinin de dikkate alınması, dayanım kaybının hem malzemeye hem de geometriye bağlı bir parametre olduğunu göstermektedir. Bu sebeple, bu modelin kullanılabilmesi için incelemeye konu olan yalıtım birimlerinin boyutlarının tasarlanması ve geometrilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 1 bu çalışma kapsamında yürütülen analizlerde kullanılan KÇKYB özelliklerini vermektedir. Tablo 1'de kullanılan Q yalıtım birimine ait karakteristik dayanımı, W yalıtım birimi üzerindeki yükü,  $n$  toplam kauçuk tabaka sayısını temsil etmektedir.

Tablo 1'de verilen değerlerin elde edilebilmesi için iteratif bir çözüm yönteminin takip edilmesi gerekmektedir. Bu çözüm yönteminde öncelikle yalıtım biriminin Q/W değerine ve izolasyon periyoduna ihtiyaç duyulur. Burada, Q/W değeri yalıtım biriminin üzerine gelen eksenel yükü temsil ederken, izolasyon periyodu ise akma sonrası rijitlik  $k_d$ 'nin hesaplanmasında kullanılır. Bu iki değişkene ek olarak yalıtım birimine ait doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme ilişkisi için kullanılan akma yer değiştirme değeri  $D_y$  de iteratif çözümde bir girdi olarak yer alır. KÇKYB için tipik  $D_y$  değeri 25 mm olarak tanımlanmıştır [22]. Daha sonra tahmini olarak belirlenen bir tasarım yer değiştirme  $D$  ile gerekli hesaplamalara başlanır. Hesaplamalar

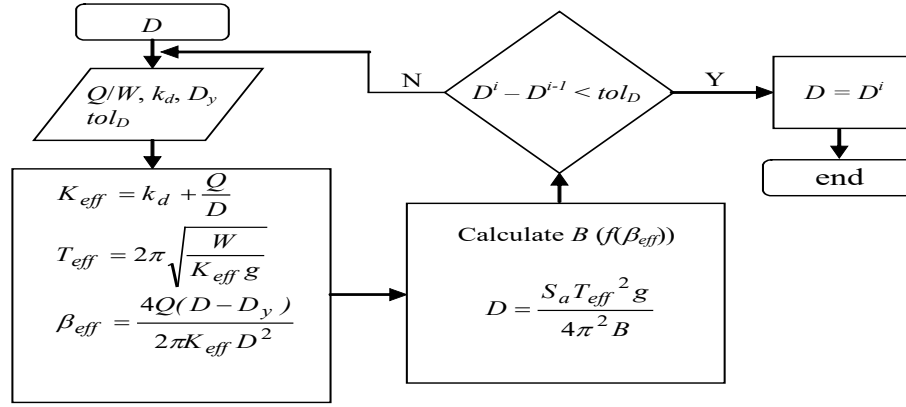
sonucunda elde edilen yalıtım birimi yer değiştirme  $D^i$  başlangıçta kabul edilen tasarım yer değiştirmesinden farklıysa hesaplanan değer ile döngü yeniden başlatılır. Eğer hesaplanan ve başlangıçta kabul edilen değerler birbirlerine daha önceden tanımlanan bir hata payı ( $tol_D$ ) içinde kalacak şekilde yakın ise hesaplama sonlandırılır. Bu çözüm yönteminde, doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme ilişkisi idealize edilerek eşdeğer doğrusal elastik değerler üzerinden hesaplamalar yapılır. Bu yaklaşımın adı eşdeğer kuvvet yöntemidir ve sismik taban izolasyonlu yapıların ön tasarımında kullanılması için şartnameler [1, 2] tarafından önerilmektedir. Tarif edilen bu hesaplamalara ait akış şeması Şekil 4'te verilmiştir. Bu akış şemasında  $K_{eff}$ ,  $T_{eff}$  ve  $\beta_{eff}$  olarak belirtilen değerler eşdeğer elastik sisteme ait eşdeğer rijitlik, eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm oranını simgelemektedir. Elde edilecek sonuçların, kullanılacak tek bir yalıtım birimi davranışına bağlı olmasını önlemek amacıyla, dört farklı izolasyon periyodunu temsil edecek şekilde KÇKYB tasarlanmıştır. Özellikle yakın saha kaynaklı yer hareketlerine maruz kalacak yapıların depreme karşı dayanıklı tasarımında tercih edilen sismik taban izolasyonu uygulamasında kullanılacak yalıtım birimlerine ait tasarım değerleri (izolasyon periyodu ve Q/W değeri) literatürde yer alan çalışmalar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Dicleli [23] tarafından elde edilen sonuçlarda, yakın saha kaynaklı depremler altında uygulanabilir ve kontrol edilebilir yalıtım birimi boyutları ve deplasmanları ile çalışılabilmesi için izolasyon periyodunun 3s'den küçük olması gerektiği vurgulanmıştır. Buna ek olarak, seçilmesi gereken Q/W değerinin ise 0,10'dan az olmaması gerektiği belirtilmiştir. Literatürde yer alan bu değerler neticesinde bu proje için belirlenen yalıtım birimlerinin tasarıma esas teşkil



Şekil 3. Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi kesiti (Section cut of an isolation unit consist of lead rubber bearing)

Tablo 1. Tasarımı yapılan yalıtım birimlerine ait değerler (Properties of the designed isolators)

$n$	$k_d$ (akma sonrası rijitlik) (N/mm)	$T$ (izolasyon periyodu) (s)	$h_L$ (izolator yüksekliği) (mm)
Q/W=0,10; D= 848 mm; $a=83,5$ mm; $Q=295,6$ kN			
19	1675	2,25	187
23	1343	2,50	227
28	1113	2,75	277
33	932	3,00	327



**Şekil 4.** Yalıtım birimi tasarımı için kullanılan iteratif çözüme ait akış şeması  
(Flow chart of iterative solution used for isolator design)

eden değerleri şöyledir: i) İzolasyon periyotları 2,25s, 2,50s, 2,75s, 3,00s; ii) Yalıtım birimlerinin karakteristik dayanımının eksenel yük seviyesine oranı (Q/W) 0,10 (Tablo 1). Bu çalışma kapsamında tasarlanan tüm yalıtım birimleri için tek bir kauçuk tabaka kalınlığı 7 mm iken kullanılan çelik plaka kalınlığı 3 mm olarak belirlenmiştir. Yalıtım birimi yüksekliği  $h_L [nx7+(n-1)x3]$  ifadesiyle belirlenirken toplam çelik plaka kalınlığı  $t_s [(n-1)x3]$  ifadesiyle elde edilir.

#### 4. DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ (SELECTION OF GROUND MOTION RECORDS)

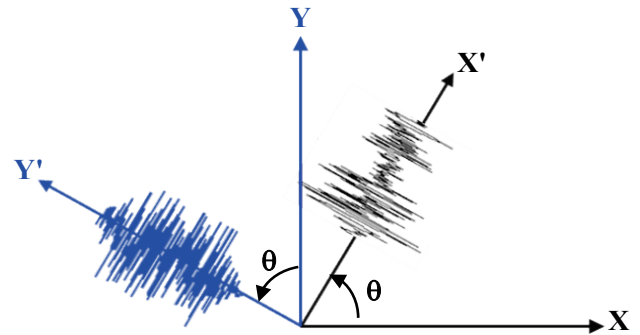
Yürütülen ZTADO analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının gerek seçilmesi gerekse ölçeklendirilmesi işlemlerinin, elde edilecek MİD'yi önemli ölçüde etkilediği literatürde yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. Özdemir [19] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı zemin tiplerini temsil eden deprem kayıtları için yürütülen dinamik analizler neticesinde izolatör deplasman değerlerinde gözlenen artış miktarının seçilen deprem kaydına ait zemin özellerine bağlı olarak önemli oranda değişim gösterdiği belirtilmiştir. Öte yandan, Özdemir ve Gülkan [24], seçilen deprem kayıtlarına uygulanacak ölçeklendirme yöntemi neticesinde hesaplanacak ölçek katsayılarındaki değişim miktarının izolatörlerin maruz kalacağı hareketin genliğini doğrudan etkilediğini belirterek, MİD değerlerini etkilediğini vurgulamıştır. Bu sebeple, yürütülecek analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında yürütülen analizlerde kullanılan deprem kayıtları, yakın saha depremler arasından seçilmiştir. Buradaki “yakın saha” ifadesi, Somerville vd. [25] tarafından tanımlandığı şekliyle, fay kırığına en yakın mesafesi (R) 20 km'den daha az olan istasyonları ifade etmektedir. Ayrıca, büyüklüğü ( $M_w$ ) 6,5'ten daha fazla olan ve en üstteki 30m'lik zemin tabakasındaki kayma dalgası hızı ( $V_s$ ) 180-360m/s arasında olan deprem kayıtları dikkate alınmıştır. Bu seçim kriterlerine ek olarak, kullanılacak deprem kayıtlarına ait pik yer hızı (peak ground velocity, PGV) değerleri de 50cm/s'den daha büyük olacak şekilde bir seçime gidilmiştir. Bunun sebebi, Avşar ve Özdemir [26] tarafından yürütülen çalışmada MİD ile deprem kayıtlarına ait özellikler arasında yüksek korelasyona sahip şiddet

ölçütünün PGV olarak belirlenmesidir. Tablo 2 bu çalışmada kullanılan deprem kayıtlarını ve özelliklerini sunmaktadır. Tablo 2'de belirtilen deprem kayıtları PEER ([www.ngawest2.berkeley.edu](http://www.ngawest2.berkeley.edu)) kuvvetli yer hareketi veri bankasından temin edilmiştir. Tablo 2'de kullanılan PGA ve PGD değerleri ise sırasıyla pik yer ivmesini (peak ground acceleration) ve pik yer deplasmanını (peak ground displacement) temsil etmektedir.

#### 5. DEPREM KAYITLARININ DÖNDÜRÜLMESİ (ROTATION OF GROUND MOTION RECORDS)

Bu bölümde, Kalkan ve Reyes'in [8] yürüttüğü çalışma baz alınarak, seçilen deprem hareketlerine ait orijinal kayıtlar, 10° aralıklarla 180° boyunca döndürülerek yeni kayıtlar elde edilmiştir (Şekil 5). Bahsi geçen döndürme işlemi, Eş. 5 kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede, seçilen her bir orijinal deprem kaydı için ilave 18 yeni ivme-zaman serisi elde edilmiştir. Eş. 5'te gösterilen  $a_x(t)$  ve  $a_y(t)$  ifadeleri orijinal deprem kaydına ait birbirine dik iki yatay doğrultudaki ivme değerlerini temsil ederken,  $a_x'(t)$  ve  $a_y'(t)$  ifadeleri ise orijinal kayda ait ivme değerlerinin  $\theta$  kadar döndürülmesi sonucu elde edilen yeni ivme değerlerini simgelemektedir.

$$\begin{Bmatrix} a_x'(t) \\ a_y'(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$



**Şekil 5** Deprem kayıtlarının döndürülmesi  
(Rotation of the ground motions).

**Tablo 2.** Analizlerde kullanılan yakın saha deprem kayıtları ve özellikleri  
(Selected near field ground motion records for analyses their and properties).

#	Deprem	İstasyon	Büyükölç (Mw)	R (km)	Bileşen	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	Duzce	Duzce	7,1	6,6	270	0,54	83,5	51,8
					180	0,35	60,0	41,8
2	Erzincan	Erzincan	6,7	4,4	NS	0,52	84,0	27,7
					EW	0,50	64,3	21,9
3	Imperial Valley	El Centro Array #4	6,5	7,1	230	0,36	76,5	58,9
					140	0,49	37,4	19,7
4	Imperial Valley	El Centro Array #5	6,5	4,0	230	0,38	90,5	63,0
					140	0,52	46,9	35,3
5	Imperial Valley	El Centro Array #8	6,5	3,9	140	0,60	54,2	32,2
					230	0,45	49,2	35,3
6	Kobe	KJM	6,9	1,0	0	0,82	81,3	17,7
					90	0,60	74,4	20,0
7	Northridge	Sylmar Hospital	6,7	5,3	360	0,84	129,6	32,7
					90	0,60	78,2	16,0
8	Kocaeli	Duzce	7,5	15,4	180	0,31	58,9	44,2
					270	0,36	46,4	17,6
9	Kocaeli	Yarimca	7,5	4,8	60	0,27	65,7	57,2
					330	0,35	62,2	51,1
10	Chi-Chi	TCU109	7,6	13,9	N	0,16	53,1	34,8
					W	0,16	50,8	46,5

## 6. DEPREM KAYITLARININ ÖLÇEKLENMESİ (SCALING OF GROUND MOTION RECORDS)

Şartnamelere uygun olarak yürütülecek ZTADO analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının, tasarım spektrumu ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te (DBYBHY) [27] tanımlanan tasarım spektrumu kullanılmıştır. Bu spektrum, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem seviyesini temsil etmektedir. Bu deprem seviyesi, sismik izolasyonlu yapı tasarımı için DBE seviyesine karşılık gelmektedir. MCE seviyesini temsil eden tasarım spektrumu ise DBE için tanımlanan spektrum eğrisine ait ordinatların 1,5 ile çarpılması sonucu bulunmuştur [27]. Öte yandan, DBYBHY'de [27] sismik taban izolasyonlu yapılar ile yürütülecek analizler ve tasarım ilkelerine ilişkin hükümler yer almadığından, uluslararası standartlarda yer alan ilgili hükümler takip edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ölçeklendirme işlemi birbirini tamamlar nitelikte iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, seçilen deprem kayıtlarının hedef spektrum ile uyumlu hale gelmesi sağlanırken, ikinci aşamada ise şartname hükümleri yerine getirilmiştir. İlk aşamada, Huang vd. [28] tarafından tarif edilen ve geometrik ortalama ölçeklendirmesi (geomean scaling) olarak bilinen yöntem uygulanmıştır. Buna göre, seçilen deprem hareketine ait birbirine dik her iki yatay doğrultudaki kayıtlar için oluşturulan spektrum eğrilerinin geometrik ortalaması ile hedef spektrum arasındaki toplam hata miktarının minimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu yöntem için tanımlanan toplam hata miktarı Eş. 6'da verilmiştir. Eş. 6'da  $T_i$  periyot,  $a$  deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayısı,  $y_i$  spektral koordinatların

geometrik ortalaması,  $y_{Ti}$  hedef spektral ordinat değeri,  $n$  hedef spektral değerlerin sayısı,  $b_i$  ise her bir periyottaki hata miktarının toplam hata miktarına etkisini ifade eden ağırlık katsayısı olarak tanımlanmaktadır [28]. Toplam hatanın miktarını minimuma indirecek  $a$  ölçek katsayısının bulunabilmesi için Eş. 6'nın ölçek katsayısı  $a$ 'ya göre türevi alınarak sıfıra eşitlenmesi yeterli olmaktadır. Uygulama ile ilgili olarak daha detaylı bilgiye [22]'den ulaşılabilir.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n b_i (a * y_i - y_{Ti})^2 \quad (6)$$

Ölçeklendirme yönteminin ikinci aşamasında ise ASCE'de [1] tanımlanan hükümler yerine getirilmiştir. Buna göre, tasarlanan yapı birimi özelliklerine bağlı olarak belirlenen bir periyot aralığı içinde, seçilen deprem hareketlerinin birbirine dik her iki yatay doğrultudaki kayıtlar için oluşturulan spektrum eğrilerinin, kareleri toplamının kareköklerinin (SRSS) ortalaması, hedef spektrumdan daha düşük olmayacak şekilde ikinci bir ölçekleme işlemi daha gerçekleştirilmiştir. Her bir deprem kaydı için hesaplanan ölçek katsayısı, yukarıda tanımlanan birinci ve ikinci aşamalardan elde edilen ölçek katsayılarının çarpımından elde edilmiştir. Hesaplanan ölçek katsayıları Tablo 3'de tüm deprem kayıtları ve her iki deprem seviyesi için verilmiştir. Şekil 6'da ise uygulanan ölçekleme işlemi sonucunda elde edilen ortalama SRSS eğrisi ile hedef spektrumun kıyaslaması her iki deprem seviyesi için ayrı ayrı gösterilmektedir. Hesaplanan ölçek katsayıları dikkate alınan deprem kaydına ait her iki yatay bileşene de uygulanmıştır. Ayrıca, hesaplanan bu ölçek katsayıları döndürülerek elde edilen yeni deprem kayıtlarına da tatbik edilmiştir. Yürütülen bu çalışmada kullanılan ölçek



katsayıları ile ilgili olarak, çok yakın bir tarihte sismik izolasyonu KÇKYB'den oluşan bir yapı özelinde ZTADO analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarına uygulanacak ölçek katsayıları için yapılan tanımlama da dikkate alınmıştır. Özdemir ve Gülkan [24], seçilen deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayısının üst limiti için depremin PGV değerine bağlı olarak bir sınır önermiştir. Buna göre, PGV değeri 70cm/s'den büyük olan deprem kayıtları için ölçek katsayısının 2,0'ı geçmemesi gerekmektedir. Tablo 3'te de görüldüğü üzere hesaplanan en büyük ölçek katsayısı 2,0'dır.

### 7. ÇİFT DOĞRULTULU DEPREM HAREKETLERİ ALTINDAKİ YALITIM BİRİMİ MODELİ (ISOLATOR MODEL UNDER BI-DIRECTIONAL EXCITATIONS)

Bu çalışma kapsamında yürütülen tüm analizler çift doğrultulu deprem hareketleri altında gerçekleştirildiğinden, Park vd. [29] tarafından geliştirilen ve her iki yatay doğrultudaki deprem hareketlerinin etkileşimli çözümüne imkân sağlayan eşitlik takımı (Eş. 7, 9) dikkate alınmıştır. Bu denklem takımı, tek doğrultulu analizlerde olduğu gibi her bir yatay doğrultudaki çözümün birbirinden bağımsız oluşunun aksine, her iki yatay doğrultudaki hareketin birbirine etkisini dikkate alarak çözüme ulaşılmasını sağlamaktadır. Yukarıdaki denklem takımında  $\alpha$ , yalıtım birimine ait çift eğrili kuvvet-yer değiştirme eğrisindeki akma sonrası rijitliğin ilk rijitliğe oranını,  $D_x$  ve  $D_y$  yalıtım biriminin X ve Y doğrultularındaki yer değiştirme değerlerini,  $\dot{U}_x$  ve  $\dot{U}_y$  bu yer değiştirmelere bağlı olarak X ve Y doğrultularındaki yalıtım birimi hızlarını,  $Z_x$  ve  $Z_y$  her iki deprem bileşenini aynı anda etkilebilmek için kullanılan histeretik birimsiz büyüklükleri temsil etmektedir [29]. Eş. 8'deki A ve B katsayıları arasındaki ilişki  $A=2B$  ifadesini

sağlayacak şekilde ( $A=1, B=0,5$ ) seçilmiştir. Bu sayede kuvvet ve yer değiştirme vektörlerinin aynı doğrultuda olması sağlanmıştır [30].

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} \frac{F_y}{D_y} & 0 \\ 0 & \frac{F_x}{D_x} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_x \\ U_y \end{Bmatrix} + (1-\alpha) \cdot \begin{bmatrix} F_y & 0 \\ 0 & F_x \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$D_y \cdot \begin{Bmatrix} \dot{Z}_x \\ \dot{Z}_y \end{Bmatrix} = (A \cdot [I] - B \cdot [\Omega]) \cdot \begin{Bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{U}_y \end{Bmatrix} \quad (8)$$

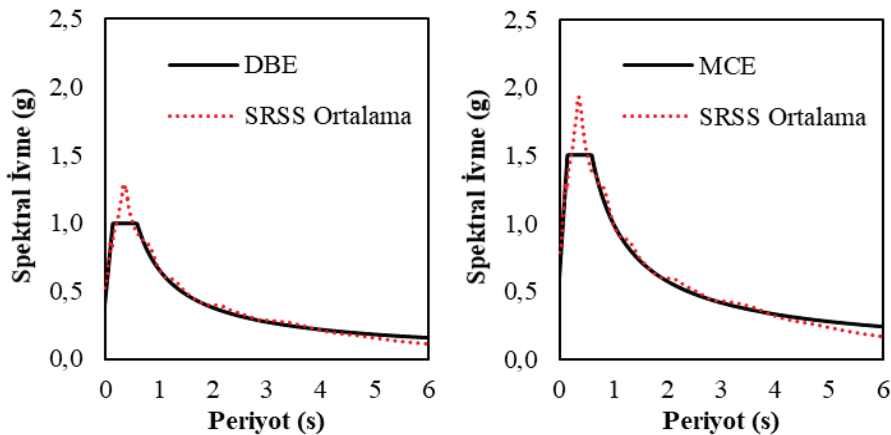
$$[\Omega] = \begin{bmatrix} Z_x^2 \cdot \left[ \text{sgn} \left( \dot{U}_x Z_x \right) + 1 \right] & Z_x Z_y \cdot \left[ \text{sgn} \left( \dot{U}_y Z_y \right) + 1 \right] \\ Z_x Z_y \cdot \left[ \text{sgn} \left( \dot{U}_x Z_x \right) + 1 \right] & Z_y^2 \cdot \left[ \text{sgn} \left( \dot{U}_y Z_y \right) + 1 \right] \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 8. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında, 4 farklı sismik izolasyon periyodu (2,25s, 2,50s, 2,75s, 3,00s), 10 farklı deprem kaydı (Tablo.2), 2 farklı deprem seviyesi (DBE, MCE) ve her bir deprem kaydı için oluşturulan 18 farklı etkiye doğrultusu dikkate alınarak toplamda 1440 (4x10x2x18) adet ZTADO

**Tablo 3.** DBE ve MCE hedef spektrum grafikleri için elde edilen ölçek katsayıları. (Scaling factors for Design and Maximum earthquake levels)

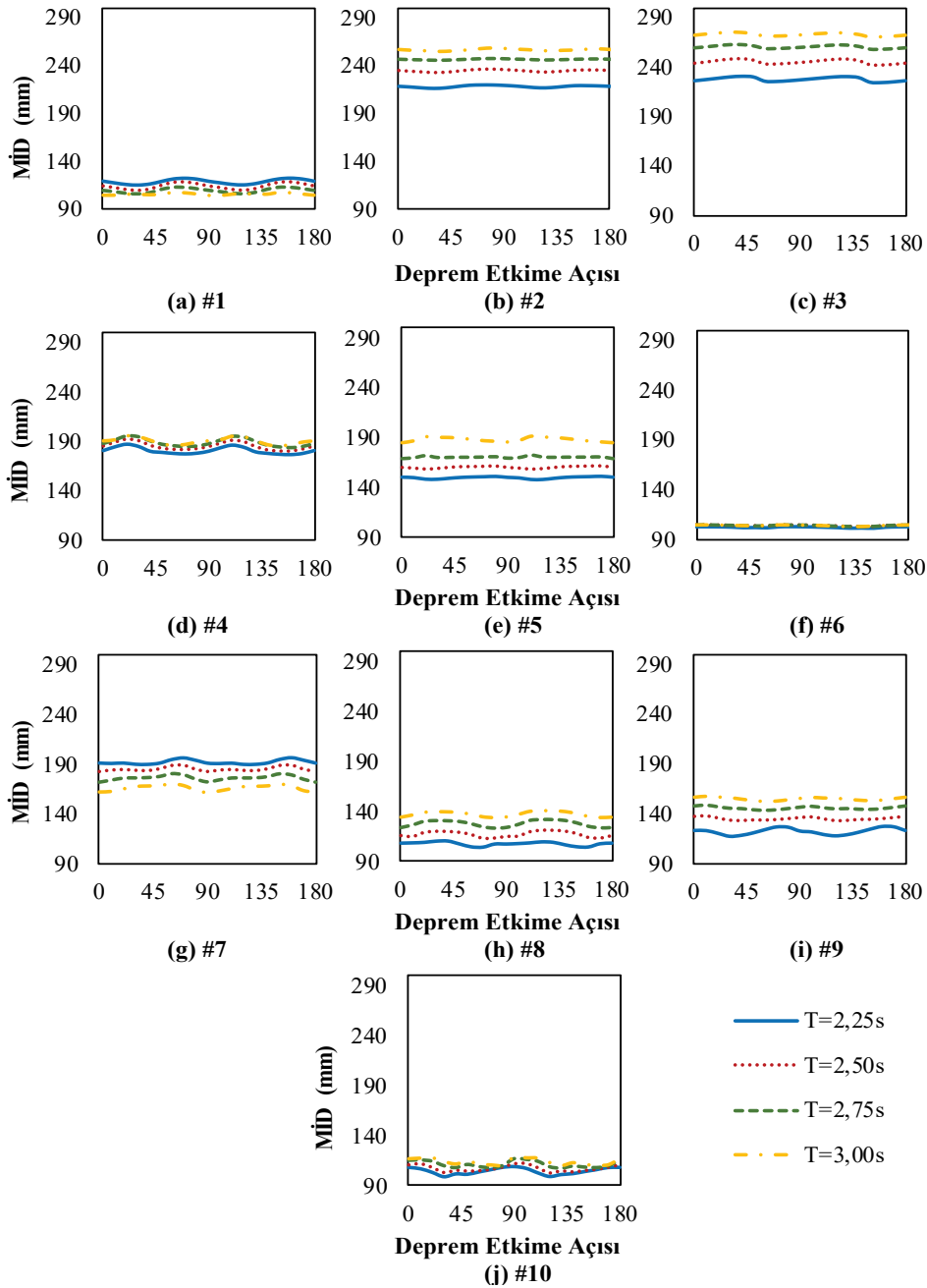
	#	Deprem Kaydı									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ölçek Katsayısı	DBE	0,78	0,67	0,95	0,87	1,33	0,40	0,63	0,95	0,94	1,03
	MCE	1,17	1,01	1,43	1,31	2,00	0,60	0,95	1,42	1,41	1,55



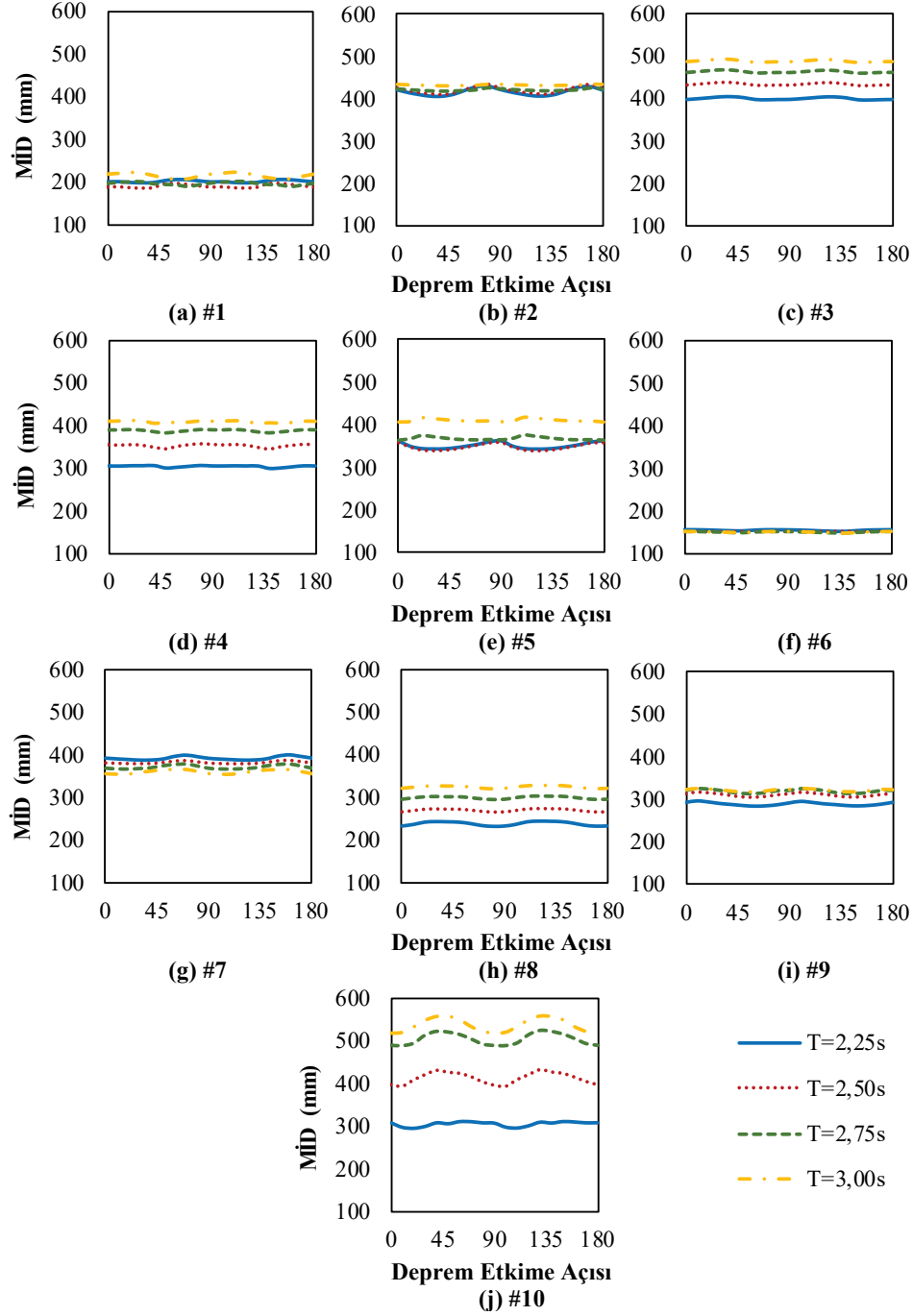
**Şekil 6.** Seçilen deprem kayıtlarına uygulanan ölçeklendirme işlemi sonrasında hedef spektrum eğrileri ile uyumu a) DBE seviyesi için b) MCE seviyesi için (Consistency of selected ground motions and target spectrums after scaling process a) Design earthquake level b) Maximum earthquake level)

analiz gerçekleştirilmiştir. Deprem etkime açısına bağlı olarak yalıtım birimi yer değiştirmelerindeki değişimi belirleyebilmek adına, yürütülen analizlerden elde edilen MİD'ler not edilmiştir. Bunun için, her iki yatay doğrultuda kaydedilen yalıtım birimi yer değiştirmelerinin anlık olarak karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplanan değerler arasından en büyüğü hesaplanmıştır. Şekil 7 ve 8, sırasıyla DBE ve MCE seviyeleri için her bir deprem etkime açısına karşılık gelen MİD değerlerini göstermektedir. Deprem etkime açısına bağlı olarak MİD'deki değişimin miktarını belirleyebilmek için orijinal kayıtlar kullanılarak elde edilen değerlerle, deprem kayıtlarının döndürülmüş

halleri tatbik ettirilerek hesaplanan tüm MİD'ler normalize edilmiştir ( $MİD_{döndürülmüş}/MİD_{orijinal}$ ). Tablo 4 ve 5'de de hem orijinal kayıtlar kullanılarak elde edilen MİD değerleri hem de bu kayıtların döndürülmesi sonucu elde edilen yeni deprem hareketlerinin kullanıldığı analizlerden elde edilen MİD değerlerinin maksimumu sunulmuştur. Ayrıca,  $MİD_{döndürülmüş}/MİD_{orijinal}$  oranlarının en büyük değerleri de bu tablolarda "oran" adı altında paylaşılmıştır. Tablo 4 ve 5'den de anlaşılacağı gibi, deprem seviyesinden bağımsız olarak, farklı deprem etkime açıları için, orijinal kayıtlar kullanılarak elde edilen yalıtım birimi yer değiştirmelerinden daha büyük değerler ile karşı karşıya kalılabilmektedir.



Şekil 7. Farklı etkime açılarına ve izolasyon periyoduna bağlı olarak yürütülen analizler sonucunda DBE deprem seviyesi için elde edilen MİD (Maximum isolator displacements for design earthquake level depending on different incidence angles and isolation periods)



**Şekil 8.** Farklı etkiye açılara ve izolasyon periyoduna bağlı olarak yürütülen analizler sonucunda MCE deprem seviyesi için elde edilen MİD

(Maximum isolator displacements for maximum earthquake level depending on different incidence angles and isolation periods)

Tekil olarak bakıldığında, deprem etkiye açısına bağlı olarak orijinal deprem hareketinden elde edilenlerle kıyaslandığında MİD'ndeki en büyük artış miktarı %8,4 oranında (MCE seviyesi, Deprem 10, T=2,50s) tespit edilse de ortalama değerler %2 mertebesinde. Ortalama değerler baz alındığında ihmal edilebilecek bir seviyede olan artış miktarı, münferit olarak daha kritik olabilmektedir. Öte yandan, DBE seviyesi için MİD'ndeki ortalama artış miktarı her ne kadar izolasyon periyodu arttıkça bir artış eğilimi gösterse de söz konusu artış miktarı ihmal edilebilecek kadar

düşük seviyededir. T=2,25s için ortalama artış miktarı %1,8 iken T=3,0s için bu değer %2,3'tür. Benzer durum MCE seviyesi için de geçerlidir. Bu da izolasyon periyodunun deprem etkiye açısına bağlı MİD üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceğini göstermektedir. Deprem seviyesinin, deprem etkiye açısındaki değişime bağlı olarak MİD'ndeki artış miktarı üzerindeki etkisi incelendiğinde de yine benzer bir sonuca varılmaktadır. Hem DBE hem de MCE seviyeleri için hesaplanan ortalama MİD'ndeki artış miktarları neredeyse aynıdır. Bu da göstermektedir ki şartnamelere uygun olarak

**Tablo 4.** Orijinal ve döndürülmüş deprem kayıtlarına ait değerler (DBE seviyesi)  
(Maksimum izolator displacements for both original and rotated ground motion records for design earthquake level)

Periyot	Deplasman	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Ortalama
T=2,25s	Orijinal	119,0	217,9	225,5	180,4	150,6	103,6	191,0	108,9	123,4	108,9	152,9
	Mak	122,4	219,3	230,0	186,6	151,5	103,7	196,2	111,3	127,5	109,8	155,8
	Oran	2,9	0,6	2,0	3,4	0,6	0,1	2,7	2,1	3,3	0,8	1,8
T=2,50s	Orijinal	113,8	234,3	244,0	185,8	160,8	104,2	182,2	116,2	137,6	110,3	158,9
	Mak	117,7	235,7	248,4	192,3	162,3	104,2	188,4	121,1	138,3	111,6	162,0
	Oran	3,4	0,6	1,8	3,5	0,9	0,0	3,4	4,2	0,5	1,2	2,0
T=2,75s	Orijinal	109,0	246,7	259,2	188,1	169,7	104,3	171,6	124,1	148,2	114,7	163,6
	Mak	112,7	248,0	263,0	196,1	172,5	104,4	179,9	131,5	149,1	116,3	167,3
	Oran	3,4	0,6	1,5	4,3	1,6	0,1	4,9	6,0	0,6	1,4	2,4
T=3,00s	Orijinal	105,0	256,8	272,7	190,5	185,9	104,3	162,1	134,1	156,6	117,3	168,5
	Mak	108,2	258,1	275,9	196,0	192,1	104,4	170,0	140,8	157,6	119,1	172,2
	Oran	3,1	0,5	1,2	2,9	3,4	0,1	4,9	5,0	0,6	1,5	2,3

**Tablo 5.** Orijinal ve döndürülmüş deprem kayıtlarına ait değerler (MCE seviyesi)  
(Maksimum izolator displacements for both original and rotated ground motion records for maximum earthquake level)

Periyot	Deplasman	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Ortalama
T=2,25s	Orijinal	198,9	421,0	395,5	306,4	364,0	154,7	392,7	232,7	292,8	306,4	306,5
	Mak	205,8	429,2	402,4	307,6	364,3	154,7	399,6	243,3	296,4	309,0	311,2
	Oran	3,5	1,9	1,7	0,4	0,1	0,0	1,8	4,6	1,2	0,8	1,6
T=2,50s	Orijinal	189,4	424,3	430,1	353,7	359,9	154,0	379,8	265,6	312,1	396,6	326,5
	Mak	198,2	432,8	436,3	355,7	360,2	154,1	387,0	274,7	315,2	429,9	334,4
	Oran	4,6	2,0	1,4	0,6	0,1	0,0	1,9	3,4	1,0	8,4	2,4
T=2,75s	Orijinal	196,3	421,1	459,7	390,5	366,3	152,9	369,3	294,7	320,8	487,5	345,9
	Mak	200,3	423,6	465,6	391,3	377,2	152,9	377,2	302,4	324,3	525,4	354,0
	Oran	2,0	0,6	1,3	0,2	3,0	0,0	2,1	2,6	1,1	7,8	2,1
T=3,00s	Orijinal	217,4	434,2	486,8	408,7	407,6	151,4	355,0	321,3	323,2	517,4	362,3
	Mak	221,7	434,8	492,1	410,5	419,2	151,4	363,9	328,0	326,2	555,4	370,3
	Oran	1,9	0,1	1,1	0,4	2,8	0,0	2,5	2,1	0,9	7,3	1,9

yapılan deprem kaydı seçimi ve ölçeklendirilmesi neticesinde elde edilen veriler üzerinde deprem seviyesinin de ihmal edilebilir bir etkisi vardır.

## 9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sismik taban izolasyonu KÇKYB ile sağlanan bir yapıda, çift doğrultulu deprem hareketleri altında farklı deprem etkime açılarına bağlı MİD'ndeki değişim incelenmiştir. Opensees analiz programı vasıtasıyla yürütülen analizlerde KÇKYB için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi azalım gösteren doğrusal olmayan bir malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli sayesinde hem yalıtım biriminin maruz kaldığı harekete bağlı dayanımındaki kademeli azalım hem de çift doğrultulu deprem etkileri altındaki etkileşimli çözüm bir arada dikkate alınabilmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere 10 adet yakın saha kaynaklı deprem kayıtları seçilmiş ve seçilen bu kayıtlar 10°'lik aralıklarla 180° boyunca döndürülerek farklı deprem etkime açılarını temsil eden yeni kayıtlar elde edilmiştir. Hem orijinal hem de döndürülerek elde edilen

yeni deprem kayıtları, iki farklı deprem seviyesi için belirlenen spektrum eğrileri ile uyumlu hale gelecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Ayrıca, elde edilen verilerin sismik izolasyon özelliklerine ne derece duyarlı olduğunu tespit edebilmek adına izolasyon periyodu da bir parametre olarak incelemeye dahil edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında şu sonuçlara varılmıştır:

Deprem etkime açısına bağlı olarak, orijinal kayıtlar kullanılarak elde edilenlere kıyasla, MİD'nda belli oranlarda artış olduğu belirlenmiştir. Bu artış miktarının ortalama olarak %2-2,5 mertebesinde olduğu gözlenmiştir. Öte yandan, sonuçlar her bir deprem özelinde münferit olarak incelendiğinde, %10'a yakın artışların olduğu tespit edilmiştir. Sismik izolasyonlu bir yapıda ankastre bir yapıya kıyasla deprem etkime açısına bağlı olarak maksimum yalıtım birimi yer değiştirme değerlerinde bu denli düşük oranda artışların gözlenmesinin sebebi, sismik izolasyonlu yapılarda maksimum yer değiştirme değerlerinin her iki doğrultudaki yer değiştirmelerin vektörel bileşkesi alınarak hesaplanmasıdır. Özellikle bu çalışmada olduğu gibi yakın saha depremlerde, yatay deprem bileşenlerinden biri diğerine



oranla daha güçlüdür. Dolayısıyla, elde edilecek yer değiştirmeler arasında da benzer şekilde büyüklük farkı olacaktır. Bu durumda büyük bir sayı ile küçük bir sayının vektörel bileşkesi alındığında, bileşke değer bileşenlerden büyük olana yakın olacaktır. Orijinal kayıtlar kullanılarak elde edilen MİD'nin %5 oranında büyütülmesi ile deprem etkime açısından değişime bağlı olarak izolatör deplasmanlarındaki artış miktarı %95 oranında güvenli olarak hesaplanabilmektedir. Hem deprem seviyesinin hem de sismik izolasyon periyodunun elde edilen sonuçlar üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen sonuçlar dairesel KÇKYB kullanılarak elde edilen analizler için geçerlidir. Kare ya da dikdörtgen şekilli yalıtım birimleri için benzer bir araştırmanın yürütülmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu çalışmada tamamen simetrik bir yapısal model kullanılarak üst yapı düzensizliğinin etkisi dikkate alınmamıştır. Bu alanda yürütülecek ileriki çalışmalarda bu hususun da göz önünde bulundurulması faydalı olacaktır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209/B programı kapsamında 1139B411502576 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures. Standard ASCE/SEI 7-10, Reston, VA 2010.
2. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance Part 2: Bridges. EN 1998-2, 2005.
3. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
4. Athanatopoulou A.M., Critical orientation of three correlated seismic components, *Engineering Structures* (Eng. Struct.), 27 (2), 301-312, 2005.
5. Rigato A.B., Medina R.A., Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions, *Engineering Structures* (Eng. Struct.), 29 (10), 2593-2601, 2007.
6. Kostinakis K.G., Athanatopoulou A.M., Avramidis I.E., Evaluation of inelastic response of 3D single-story R/C frames under bi-directional excitation using different orientation schemes, *Bulletin of Earthquake Engineering* (Bull. Earthquake Eng.), 11 (2), 637-661, 2013.
7. Moschonas I.F., Kappos A.J., Assessment of concrete bridges subjected to ground motion with an arbitrary angle of incidence: static and dynamic approach, *Bulletin of Earthquake Engineering* (Bull. Earthquake Eng.), 11 (2), 581-605, 2013.
8. Kalkan E., Reyes J.C., Significance of Rotating Ground Motions on Behavior of Symmetric- and Asymmetric-plan Structures: Part 2. Multi-story Structures, *Earthquake Spectra*, 31 (3), 1613-1628, 2015.
9. Erişgen G., Deprem'in Geliş Açısının Sismik İzolasyonlu Binalara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
10. OpenSees, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. <http://opensees.berkeley.edu>, 2009.
11. FEMA 451. National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), Recommended Provisions: Design Examples, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, 2006.
12. Soyluk A., Tuna M.E., Effect of Seismic Base Isolation Usage on the Architectural Design of Irregular Buildings, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (3), 635-642, 2011.
13. Warn G.P., Whittaker A.S., Performance estimates in seismically isolated bridge structures, *Engineering Structures* (Eng. Struct.), 26 (9), 1261-1278, 2004.
14. Robinson W.H., Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Earthquake Eng. Struct. Dyn.), 10 (4), 593-604, 1982.
15. Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearing. I: Theory, *Journal of Structural Engineering* (J. Struct. Eng.), 135 (12), 1440-1449, 2009.
16. Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearing. II: Verification of Theory, *Journal of Structural Engineering* (J. Struct. Eng.), 135 (12), 1450-1461, 2009.
17. Ozdemir G., Avsar O., Bayhan B., Change in Response of Bridges Isolated with LRBs due to Lead Core Heating, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (Soil Dyn. Earthquake Eng.), 31 (7), 921-929, 2011.
18. Ozdemir G., Dicleli M., Effect of lead core heating on the seismic performance of bridges isolated with LRB in near-fault zones, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Earthquake Eng. Struct. Dyn.), 41 (14), 1989-2007, 2012.
19. Ozdemir G., Lead Core Heating in LRBs Subjected to Bidirectional Ground Motion Excitations in Various Soil Types, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Earthquake Eng. Struct. Dyn.), 43 (2), 267-285, 2014.
20. Ozdemir G., Formulations for Equivalent Linearization of LRBs in order to Incorporate Effect of Lead Core Heating, *Earthquake Spectra*, 31 (1), 317-337, 2015.
21. Ozdemir G., Bayhan B., Response of an Isolated Structure with Deteriorating Hysteretic Isolator Model, *Research on Engineering Structures and Materials*, 1 (1), 1-9, 2015.
22. Ozdemir G., Constantinou M.C., Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (Soil Dyn. Earthquake Eng.), 30 (10), 1036-1042, 2010.
23. Dicleli M., Performance of seismic-isolated bridges in relation to near-fault ground-motion and isolator

- characteristics, *Earthquake Spectra*, 22 (4), 887-907, 2006.
24. Ozdemir G., Gulkan P., Scaling Legitimacy for Design of Lead Rubber Bearing Isolated Structures Using a Bounding Analysis, *Earthquake Spectra*, 32 (1), 345-366, 2016.
  25. Somerville P.G., Smith N.F., Graves R.W., Abrahamson N.A., Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, *Seismological Research Letters (Seismol. Res. Lett.)*, 68 (1), 199-222, 1997.
  26. Avsar O., Ozdemir G., Response of Seismic-Isolated Bridges in Relation to Intensity Measures of Ordinary and Pulselike Ground Motions, *Journal of Bridge Engineering (J. Bridge Eng.)*, 18 (3), 250-260, 2013.
  27. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2007.
  28. Huang Y.N., Performance Assessment of Conventional and Base-Isolated Nuclear Power Plants for Earthquake and Blast Loadings, PhD Thesis, State University of New York, Buffalo, 2008.
  29. Park Y.J., Wen Y.K., Ang A.H., Random Vibration of Hysteretic Systems Under Bi-Directional Ground Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics (Earthquake Eng. Struct. Dyn.)*, 14 (4), 543-557, 1986.
  30. Constantinou M.C., Adnane M.A., Dynamics of Soil-Base-Isolated Structure Systems: Evaluation of Two Models for Yielding Systems, Report to NSF, Drexel University, Philadelphia, 1987.