

Türk Deprem Yönetmelikleri (DBYBHY ve TBDY) Spektrum Tanımlarının Deprem Yalıtım Sistemi Tasarımı Özelinde Karşılaştırılması

Hicran ERDOĞDU¹
Esengül ÇAVDAR²
Gökhan ÖZDEMİR³

ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik koşulları dikkate alınarak tasarlanmış deprem yalıtımlı bir yapı modeli için, spektrum tanımındaki değişime bağlı olarak maksimum yalıtım birimi deplasmanının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Yapıdaki deprem yalıtım sistemi kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimlerinden oluşurken, seçilen ve ölçeklenen deprem kayıtlarına ait yatay bileşenlerin eş zamanlı etkisine maruz bırakılmıştır. Analizler, çevrimsel yüklemeye altında yalıtım birimindeki dayanım kaybını dikkate alan ve almayan durumlar için tekrarlanmıştır. Yalıtım birimi dayanımını temsilen Q/W oranı ve yapının inşa edileceği alan seçilen parametrelerdir. Sonuç olarak, her iki deprem yönetmeliğinin tanımladığı spektrum eğrilerine göre tasarlanan yalıtım birimlerinin maksimum deplasmanlarında yapı koordinatına bağlı olarak farklılaşma %50 mertebelerine varabilmektedir. Yalıtım birimindeki dayanım kaybının dikkate alındığı durumlar için bu farklılaşmanın daha da fazla olduğu kaydedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem yalıtımı, dinamik analiz, kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi.

ABSTRACT

Comparison of Design Spectra in Turkish Earthquake Codes (TEC and TBEC) in Terms of Seismic Isolator Design

In this study, for a seismically isolated structural model designed in accordance with the design spectra defined by both Turkish Earthquake Codes 2007 and 2018, variation of

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 2 Nisan 2020 günü ulaşmıştır. 2 Ekim 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.713068>

1 Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Eskişehir
hicranerdogdu@eskisehir.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-5218-1857>

2 Eskişehir Teknik Üniversitesi, Sismik İzolatör Test Laboratuvarı, Eskişehir -
esengulcavdar@eskisehir.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1497-0908>

3 Eskişehir Teknik Üniversitesi, Sismik İzolatör Test Laboratuvarı, Eskişehir -
gokhan_ozdemir@eskisehir.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-2962-2327>

maximum isolator displacement was studied. The isolation system in the structure was composed of lead rubber bearings. Selected and scaled ground motion records were used to perform bi-directional analyses where both horizontal components of records were subjected to analytical model, simultaneously. Analyses were repeated for both deteriorating and non-deteriorating hysteretic representations of isolators. Considered parameters were Q/W ratio of the isolator and the construction site. Results showed that analyses based on design spectra of different versions of Turkish Earthquake Code may lead to variation in maximum isolator displacements up to 50% depending on the coordinate of the structure. It is also observed that use of deteriorating hysteretic representation for seismic isolators will result in even higher variations in maximum isolator displacements.

Keywords: Seismic isolation, dynamic analysis, lead rubber bearing.

1.GİRİŞ

Deprem yalıtımı teknolojisi, olası bir deprem sırasında meydana gelebilecek hem yapısal hem de yapısal olmayan hasarlara karşı binaları korumayı amaçlayan bir uygulamadır. Bu uygulamadaki temel hedef, yapının depreme karşı dayanımını artırmak yerine oluşacak sismik talebi azaltmaktır. Bu amaçla kullanılan yapı malzemelerine deprem yalıtım birimi adı verilmektedir. Dünya genelinde en çok kullanılanları, kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi ve sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım birimidir. Her iki tip yalıtım biriminin kullanılmasındaki sebep yatay doğrultudaki rijitliklerinin kullanıldıkları yapının yanal rijitliğine kıyasla çok düşük olmasıdır. Bu sayede, yapının titreşim periyodu uzamakta ve olası kuvvetli yer hareketlerinin yıkıcı etkilerinin yüksek olduğu periyot aralığından uzaklaşılması mümkün olmaktadır [1]. Ancak, yapı davranışındaki söz konusu iyileşmenin bedeli, deprem yalıtım sistemi seviyesinde oluşan yüksek merteye deplasman değerleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple yalıtım sisteminin maksimum deprem seviyesi altında yapabileceği en büyük yer değiştirme olan maksimum yalıtım birimi deplasmanının (MİD) doğru belirlenmesi büyük önem taşır. MİD'in belirlenmesi için deprem şartnameleri [2-5] tarafından önerilen ve yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır: (i) eşdeğer deprem yükü yöntemi (EDYY); (ii) zaman tanım alanında doğrusal olmayan (ZTADO) dinamik analiz yöntemi. EDYY genellikle ön tasarım aşamasında kullanılan bir yöntem olmakla beraber sınırlı koşullar altında kesin tasarım amaçlı da kullanılabilir. Öte yandan, ZTADO dinamik analiz yöntemi ise her koşulda kesin tasarım amacıyla kullanılmaktadır. EDYY, belirli bir deprem senaryosu için hazırlanan tasarım spektrumunun ve kullanılacak deprem yalıtım birimlerine ait eşdeğer rijitlik ve sönüm değerlerinin dikkate alındığı bir hesap yöntemidir. Bu yöntemde, deprem yalıtım biriminin doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkisi yerine, basitleştirilmiş eşdeğer elastik özellikleri kullanılmaktadır. ZTADO dinamik analiz yönteminde ise belirlenen tasarım spektrumu ile uyumlu deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi söz konusudur. Deprem kayıtları kullanılarak analiz edilen yapısal modeldeki deprem yalıtım birimi davranışı, deneysel verilere dayanan doğrusal olmayan kuvvet-deplasman ilişkileri ile tanımlanır. Bu nedenle, ZTADO dinamik analiz yönteminin gerçek davranışa en yakın yapısal tepkileri verdiği kabul edilir [6].

Deprem yalıtımlı yapılarda MİD belirlemek üzere hangi yöntem tercih edilirse edilsin, farklı yöntemler kullanılarak elde edilen deplasman değerleri birbirleri ile uyumlu olmalıdır. Böylelikle tercih edilen yöntemin doğru bir şekilde uygulandığı kontrol edilmiş olur.

Literatürde EDYY ve ZTADO dinamik analiz yönteminin kıyaslanması amacıyla yürütülen çok sayıda çalışma vardır. Örneğin, Pant vd. [7] çalışmalarında EDYY ile elde edilen sonuçların doğruluğunu değerlendirmek amacıyla birçok farklı parametre için ZTADO dinamik analiz hesap yönteminden elde edilen sonuçları kıyaslamıştır. Sonuç olarak deprem kaydı seçimi ve ölçeklendirme yönteminin dinamik analiz sonuçlarını ve buna bağlı olarak EDYY'nin doğruluk oranını önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Fadi ve Constantinou [8] tarafından yürütülen çalışmada, EDYY ile elde edilen MİD farklı zemin sınıflarını temsilen seçilen iki farklı deprem seti için çok sayıda dinamik analiz yürüterek doğrulanmıştır. Özdemir ve Constantinou [9] ise ZTADO dinamik analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için önerdikleri yöntem neticesinde elde ettikleri MİD ile EDYY'den elde edilenleri kıyaslamışlardır. Yazarlar, önerdikleri ölçekleme yöntemi kullanıldığında her iki yöntemin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Deprem yalıtımlı yapı tepkilerini belirlemek için literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında öne çıkan bir diğer önemli nokta da dinamik analizlerin tek doğrultulu [10-12] ya da çift doğrultulu [13-15] deprem etkileri altında yürütülmesidir. Özdemir ve Akyüz [16] çift ve tek doğrultulu deprem etkileri altında yürüttükleri analizler sonucunda MİD'in ne ölçüde etkilendiğini göstermek üzere, çift doğrultulu analizler ile edilen yalıtım birimi deplasmanlarını tek doğrultulu analizlerden elde edilenler ile kıyaslamışlardır. Yazarlar, depremin her iki yatay bileşeninin eş zamanlı olarak kullanıldığı çift doğrultulu analizlerde elde edilen MİD'in tek doğrultulu analizlere göre %20'lere varan miktarda artış gösterebileceğini vurgulamışlardır. Ancak, Özdemir ve Akyüz [16] analizlerinde deprem yalıtım birimleri için çevrimsel yüklemeye bağlı dayanım kaybının dikkate alınmadığı bir kuvvet-deplasman ilişkisi kullanmışlardır. Diğer taraftan, deprem yalıtım birimlerinin çevrimsel yükleme sırasında hareket boyunca kademeli olarak dayanım kaybına uğradığı bilinmektedir [17-21]. Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimlerinde (KÇKİ) söz konusu dayanım kaybının sebebi, çevrimsel hareket sırasında kurşun çekirdekteki sıcaklık artışına bağlı olarak kurşunun ilk dayanımında azalma olmasıdır. Sürtünmeli sarkaç tipi deprem yalıtım biriminde ise gözlenen dayanım kaybının sebebi sürtünen yüzeylerdeki sıcaklık artışına bağlı olarak sürtünme katsayısının azalmasıdır. Özdemir [22] tarafından KÇKİ'nin kullanıldığı deprem yalıtımlı bir yapı modeli dikkate alınarak yürütülen çalışmada, yalıtım birimi davranışını idealize etmek için hem dayanım kaybı olan hem de olmayan kuvvet-deplasman ilişkileri kullanılmıştır. Çift doğrultulu deprem etkilerine maruz bırakılan yapısal modelden elde edilen sonuçlar, yalıtım birimi deplasmanlarında sadece çift/tek doğrultulu deprem etkisine bağlı artış olmadığı, aynı zamanda kurşun çekirdekteki sıcaklık değişimine bağlı da artış olduğu raporlanmıştır. Özdemir [22] ayrıca yalıtım birimi deplasmanlarındaki artış miktarının zemin tipine bağlı olarak da değiştiğini göstermiştir.

Kısaca özetlenmeye çalışılan literatür taramasına baktığımızda, deprem yalıtımlı yapıların tasarımı amacıyla yapılacak hesaplamalarda yalıtım birimi davranışının nasıl modellendiği, analizlerin çift/tek doğrultulu deprem etkileri altında yürütülüp yürütülmediği, hangi hesap yönteminin tercih edildiği, tasarım spektrumu ile uyumlu deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi gibi faktörlerin analiz sonuçları üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bu durumda, söz konusu etkenlerde yapılacak herhangi bir değişiklik, tasarımı da etkileyecektir. Bu açıdan bakıldığında, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) [23] ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) [2] arasında hem EDYY hem de ZTADO dinamik analiz yönteminde ortak olarak kullanılan önemli değişimlerden biri tasarım spektrumunun tanımlanması aşamasında meydana gelmiştir.

DBYBHY 'de [23] deprem bölgesine dayalı bir tanımlama kullanılmakta iken, yeni şartname ile Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH) [24] vasıtasıyla yapının koordinatına bağlı bir tasarım spektrumu tanımlanır hale geçilmiştir. Yolcu vd. [25] tarafından yürütülen çalışmada TBDY [2] dikkate alınarak deprem yalıtımlı yapılar için temsili tasarım değerleri ışığında yalıtım birimi deplasmanı ve kesme kuvveti ilişkileri çalışılmıştır. Ancak, söz konusu çalışmada DBYBHY [23] tarafından önerilen tasarım spektrumu değerlerinin güncellenmesi sonrasında yalıtım birimi deplasman değerlerinde nasıl bir değişimin oluştuğuna ilişkin değerlendirme yapılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, eski ve yeni deprem şartnamemizdeki tasarım spektrumu tanımındaki değişikliğe bağlı olarak deprem yalıtım birimi tasarımındaki farklılaşmanın mertebesini deprem yalıtımlı yapı tasarımında en önemli yapısal tepki olan maksimum yalıtım birimi deplasmanı üzerinden ortaya koymaktır.

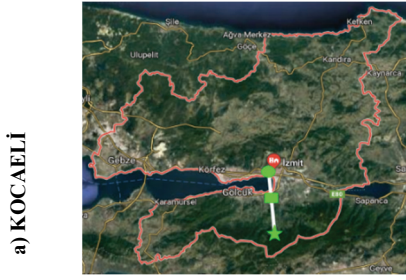
2. YÖNTEM

Bilindiği üzere, DBYBHY [23] deprem yalıtımlı yapıların tasarım ilkelerini içermiyor, bu konuda uluslararası şartnamelere atıf yapıyordu. Ancak, özel yapılar için sahaya özgü spektrum analizi yapılmasını belirtiyor ve elde edilecek spektrum eğrisinin hiçbir zaman DBYBHY'de [23] tanımlanan spektrum değerinden daha düşük olamayacağı vurgulanıyordu. Bu açıdan bakıldığında, DBYBHY'de [23] tanımlanan spektrum eğrisi özellikle uzun periyot bölgesinde çoğu durumda sahaya özel oluşturulan ve uluslararası şartnameler tarafından tanımlanan spektrum eğrilerinden daha yukarıda kalmaktaydı [16, 26]. Bu durumda, uluslararası şartnamelere uygun olarak tasarımı yapılan binalar için DBYBHY'de [23] verilen spektrum eğrisi kullanılmak durumunda kalınıyordu. Sunulan bu çalışmada da incelenen yapısal modelin inşa edileceği bölge için sahaya özel oluşturulan spektrum eğrisinin hem DBYBHY [23] hem de TDTH [24] tarafından önerilen spektrum eğrilerinden daha düşük olduğu kabulü yapılmıştır.

Tablo 1- Seçilen il ve ilçelerin DBYBHY'ye göre deprem bölgeleri

Şehir	İsimlendirme	İlçe	Deprem Bölgesi	
			İlçe	İl
KOCAELİ	K1	İzmit	1	1
	K2	Başiskele	1	
	K3	Başiskele	1	
İSTANBUL	İ1	Fatih	2	1
	İ2	Zeytinburnu	1	
	İ3	Sarıyer	3	
ERZURUM	E1	Yakutiye,Palandöken	2	2
	E2	Palandöken	2	
	E3	Aziziye,Yakutiye	2	
VAN	V1	Tuşba,İpekyolu	2	2
	V2	İpekyolu,Edremit	2	
	V3	Tuşba	2	

Tablo 2- Türkiye Deprem Tehlike Haritasından a) Kocaeli, b) İstanbul, c) Erzurum, d) Van illeri için seçilen noktalar, koordinatları ve tasarım spektral ivme katsayısı değerleri



	K1	K2	K3
Enlem	40.77	40.70	40.58
Boylam	29.94	29.94	29.94
S_{d1}	1.392	1.503	1.051



	İ1	İ2	İ3
Enlem	41.01	41.00	41.19
Boylam	28.97	28.90	29.01
S_{d1}	0.861	0.928	0.625



	E1	E2	E3
Enlem	39.90	39.85	40.03
Boylam	41.27	41.31	41.11
S_{d1}	0.960	1.098	0.652



	V1	V2	V3
Enlem	38.50	38.45	38.67
Boylam	43.39	43.44	43.34
S_{d1}	0.620	0.584	0.909



: 1 numaralı konum



: 2 numaralı konum



: 3 numaralı konum

TDTH'ye [24] göre, farklı alanlara inşa edilecek binalar birbirinden farklı harita spektral ivme katsayılarına sahip olurken, DBYBHY'ye [23] göre aynı deprem bölgesi içinde seçilen farklı noktalar için aynı etkin yer ivmesi katsayısı (A_0) kullanılmaktaydı. Bu çalışmada, eski yönetmeliğe göre aynı deprem bölgesinde bulunan farklı noktalar seçilerek, bu noktalar üzerinde yeni yönetmelikteki tasarım spektrumu tanımında meydana gelen değişimlerin analizler sonucunda elde edilecek yalıtım birimi deplasmanlarında sebep olacağı değişim incelenecektir. Bu amaçla, deprem tehlikesi yüksek, farklı coğrafi bölgelerimizde yer alan 4 farklı ilimiz için deprem yalıtım birimi tasarımı hem EDYY hem de ZTADO dinamik analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu illerimiz, İstanbul, Kocaeli, Erzurum ve Van olarak seçilmiştir. Ayrıca, her il için 3 farklı konum dikkate alınmıştır. Seçilen bu noktalar rastgele belirlenmiş olup, tercih edilen konumlar çalışma açısından özel herhangi bir önem arz etmemektedir. Buradaki temel amaç, il sınırları içerisinde farklı koordinatlara sahip

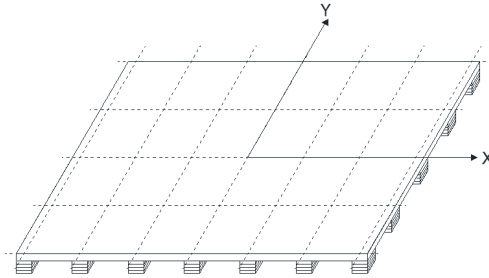
noktaların dikkate alınmış olmasıdır. Bu bölgelerdeki zemin tiplerinin DBYBHY [23] için Z4, TBDY [2] için ise ZD olduğu kabulü yapılmıştır. Tablo 1’de seçilen coğrafi noktaların DBYBHY’ye [23] göre hangi deprem bölgelerinde olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen konumların isimlendirilmesi için önce buldukları ilin baş harfi sonrasında da kaçınıcı nokta olduklarını temsil eden sayı gelmektedir. Örneğin, İ1, İ2 ve İ3 sırasıyla İstanbul’da dikkate alınan 1., 2. ve 3. noktaları temsil etmektedir. Belirlenen bölgelerin koordinatları ve uzun periyot için tasarım spektral ivme katsayıları (S_{d1}) ise TDTH [24] web uygulaması (<https://tdth.afad.gov.tr/>) aracılığı ile elde edilmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.

Elde edilecek sonuçların KÇKİ dayanımına ne ölçüde duyarlı olduğunu belirleyebilmek için yalıtım biriminin karakteristik dayanımının üzerindeki bina ağırlığına oranı (Q/W) ayrıca bir parametre olarak seçilmiştir. Bu nedenle, Q/W değerleri 0.100, 0.125 ve 0.150 olan üç farklı durum için analizler tekrarlanmıştır. Deprem yalıtım periyodu olarak 3 s seçilmiştir. KÇKİ özellikleri için oluşturulan kuvvet-deplasman eğrileri, çevrimsel yüklem sırasında yalıtım biriminde gözlenen dayanım kaybını göz önüne alan ve almayan durumlar için ayrı ayrı oluşturulmuş ve bu modelleme yaklaşımının MİD üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Yürütülen ZTADO dinamik analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi şartname hükümlerini sağlayacak şekilde yapılmıştır. Seçilen her bir deprem kaydına ait her iki yatay bileşen eş zamanlı olarak incelenen yapısal modele etki ettirmek suretiyle çift doğrultulu analizler yapılmıştır.

3. DEPREM YALITIMLI YAPI MODELİ

3.1. Üst Yapı Modeli

Deprem yalıtımlı yapı tasarımında deprem etkisi altında doğrusal olmayan davranışın sadece deprem yalıtım sistemi seviyesinde görüldüğü, üst yapının ise elastik sınırlar içinde kalarak rijit bir davranış sergilediği kabul edilmektedir. Bu sebeple bu çalışmada sadece yalıtım birimi tepkisine odaklanmak adına üst yapı için mümkün olduğu kadar basit bir yapısal model tercih edilmiştir. Bu kapsamda, üst yapı rijit bir döşeme olarak modellenmiştir. Benzer modelleme yaklaşımı daha önce farklı çalışmalarda da tercih edilmiştir [27, 11]. OpenSees [28] yapısal analiz programı kullanılarak modellenen deprem yalıtımlı binanın plandaki boyutları birbirine eşit 4 açıklığa sahip kısa doğrultuda 36m, 6 açıklığa sahip uzun doğrultuda ise 54m’dir. Rijit döşemenin ağırlığı, 73000 kN’luk toplam bina ağırlığını temsil edecek

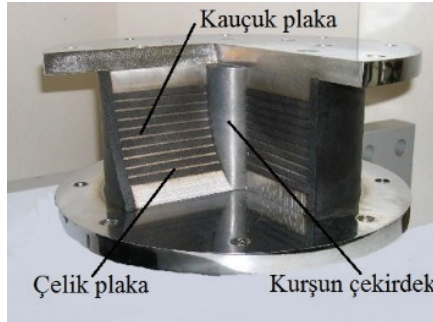


Şekil 1- Deprem yalıtımlı yapı modeli

şekilde düğüm noktalarına eşit olarak dağıtılmıştır. İncelenen yapısal modelde toplam 35 adet KÇKİ bulunmaktadır. Kullanılan yapı modelinin görseli Şekil 1’de verilmiştir. Yalıtım birimleri, OpenSees [28] analiz programındaki “Zero Length Element” isimli bağlantı elemanı vasıtasıyla rijit döşemeye bağlanmıştır. Başlangıç ve bitiş koordinatları aynı olan bu bağlantı elemanının özelliği, herhangi bir eleman uzunluğu tanımlanmasına ihtiyaç duyulmadan arzu edilen malzeme davranışının (kuvvet-deplasman ilişkisinin) bu elemanlara atanabiliyor olmasıdır.

3.2. Deprem Yalıtım Sistemi

İncelenen yapıdaki deprem yalıtım sisteminin KÇKİ’den oluştuğu kabulü yapılmıştır. Bu yalıtım birimi tipi, üst üste sıralanmış kauçuk ve çelik plakaların ortasından yükseklik boyunca geçen bir kurşun çekirdekten oluşmaktadır (Şekil 2). Kauçuk, yalıtım biriminin yatay rijitliğinin belirlenmesinden sorumlu iken kurşun çekirdek de yalıtım biriminin yüksek oranda enerji sönmülmesini sağlar. Bu durumda, deprem yalıtımı periyodunun (T_{iso}) hesabı kauçuk özelliklerine, yalıtım biriminin dayanımı (Q/W oranı) ise kurşun çekirdek özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Analizler sonrasında elde edilecek sonuçların gerçekçi durumları temsil edebilmesi için seçilen Q/W ve T_{iso} değerlerinin de gerçekçi olması gerekmektedir. Bu durumda, deprem yalıtım sisteminin tasarımını domine eden yalıtım birimi deplasmanlarının kabul edilebilir sınırlar içinde kalması için Dicleli [29] tarafından Q/W ve T_{iso} için önerilen değerler dikkate alınmıştır. Seçilen Q/W ve T_{iso} değerleri kullanılarak İstanbul, Erzurum, Kocaeli ve Van illeri için farklı yalıtım birimi tasarımları yapılmıştır. Kocaeli için seçilen koordinatlardan elde edilen Tablo 2’de verilen tasarım spektral ivme katsayısı (S_{d1}) değerlerinin diğer illere göre daha büyük değerler olması dolayısıyla gerekli stabiliteyi sağlayabilmek amacıyla yalıtım birimi geometrisi büyütülmüştür. Tasarlanan KÇKİ’lerin özellikleri Tablo 3’de sunulmuştur.



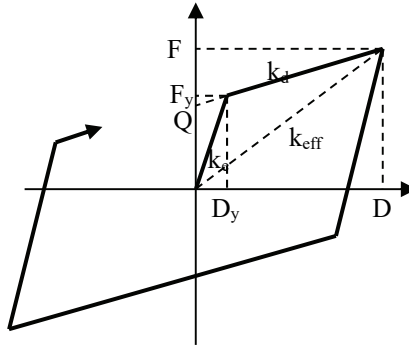
Şekil 2- Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi [30]

Tablo 3’de kullanılan α (k_d/k_e), yalıtım biriminin akma sonrası rijitliğinin elastik rijitliğine oranını, F_y , akma kuvvetini, r_L , kurşun çekirdek yarıçapını, D_b , yalıtım birimi çapını, h_L , yalıtım birimi yüksekliğini, t_s , toplam çelik plaka kalınlığını ve D , ise eşdeğer deprem yükü yöntemi ile her iki yönetmelik için ayrı hesaplanan maksimum yalıtım birimi deplasmanını temsil etmektedir. Tablo 3’de verilen değerler EDYY kullanılarak elde edilmiştir. EDYY yeni yönetmelikte değişen tasarım koşulları dikkate alınarak her iki

yönetmelik için ayrı ayrı yürütülmüştür. EDYY iteratif bir yöntemdir ve çözüme başlayabilmek için Q/W , T_{iso} , D_y (akma deplasmanı) ifadelerine ihtiyaç duyulmaktadır [31]. Yürütülen bu çalışmada, KÇKİ'e ait kuvvet-deplasman eğrilerinin tasarımı için kullanılan D_y değeri 25mm olarak seçilmiştir [9]. Şekil 3'te verilen temsili kuvvet-deplasman eğrisinde k_d , akma sonrası rijitliği, k_{eff} , eşdeğer rijitliği, temsil etmektedir. Dinamik analizlerde kullanılan yalıtım birimlerine ait kuvvet-deplasman ilişkilerini tanımlamak için Tablo 3'te verilen değerler Şekil 3 yardımıyla görselleştirilebilir.

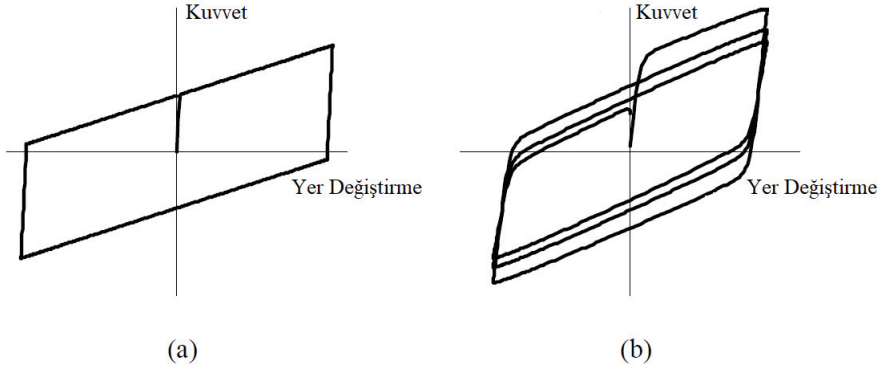
Tablo 3- Tasarlanan kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi özellikleri

İl	Q/W	r_L (mm)	α (k_d/k_e)		F_y (kN)		D (mm)					
			Isınma Etkisi Yok	Isınma Etkisi Var	Isınma Etkisi Yok	Isınma Etkisi Var	DBHYBHY (2007)			TBDY (2018)		
							1	2	3	1	2	3
$T_{iso} = 3$ s; $D_b = 1143$ mm; $k_d = 935.1$ N/mm $h_L = 757$ mm; $t_s = 225$ mm												
KOCAELİ	0.100	81.5	0.101	0.077	231.9	304.9	832			937	1055	596
	0.125	91.1	0.082	0.062	284.1	375.3	712			820	929	507
	0.150	99.8	0.070	0.052	336.2	445.7	612			724	825	437
$T_{iso} = 3$ s; $D_b = 965.2$ mm; $k_d = 933.1$ N/mm $h_L = 537$ mm; $t_s = 159$ mm												
İSTANBUL	0.100	81.5	0.101	0.077	231.9	304.9	507	832	239	423	483	243
	0.125	91.1	0.082	0.062	284.1	375.3	416	712	216	352	405	225
	0.150	99.8	0.069	0.052	336.2	445.7	359	612	195	325	359	208
ERZURUM	0.100	81.5	0.101	0.077	231.9	304.9	507			512	641	257
	0.125	91.1	0.082	0.062	284.1	375.3	416			431	548	238
	0.150	99.8	0.069	0.052	336.2	445.7	359			376	474	221
VAN	0.100	81.5	0.101	0.077	231.9	304.9	507			240	222	466
	0.125	91.1	0.082	0.062	284.1	375.3	416			222	204	390
	0.150	99.8	0.069	0.052	336.2	445.7	359			206	189	350



Şekil 3- Yalıtım birimi kuvvet-deplasman eğrisi

KÇKİ için ZTADO dinamik analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan çift eğrili kuvvet-deplasman ilişkileri için iki farklı model dikkate alınmıştır. İlkinde, tanımlanan kuvvet-deplasman eğrisi herhangi bir dayanım kaybına uğramamaktadır (Şekil 4.a). Şartnamelerde tanımlandığı üzere maksimum yalıtım birimi deplasmanının belirlenmesine yönelik yalıtım biriminin alt sınır özellikleri dikkate alınarak söz konusu kuvvet-deplasman eğrisi oluşturulmuştur. Yalıtım biriminin dayanımını belirlemek için kurşun çekirdeğin akma gerilmesi 10 MPa seçilmiştir [17]. İkincisinde ise kuvvet-deplasman eğrisi çevrimsel yüklemeye altında dayanım kaybına uğramaktadır (Şekil 4.b). Bu dayanım kaybının nedeni kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışıdır.



Şekil 4- KÇKİ için (a) dayanım kaybı göstermeyen ve (b) dayanım kaybı gösteren kuvvet-deplasman eğrisi [32]

Sıcaklık artışına bağlı olarak kurşun çekirdeğin akma dayanımının kademeli olarak azaldığı kuvvet-deplasman ilişkisi, KÇKİ'lerin test sonuçlarından elde edilen gerçek davranışı temsil etmektedir. Şekil 4.b'de görüldüğü üzere, harekete maruz bırakılan yalıtım biriminin dayanımı hareket boyunca sabit kalmayıp, her bir yüklemeye döngüsü boyunca sürekli azalım göstermektedir. Bu davranış, grafik üzerinde daralarak kaydedilen kuvvet-deplasman ilişkisi ile görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, yalıtım biriminin ilk dayanımını bulmak için 10 MPa olarak belirlenen kurşunun akma gerilmesi değerinin %35 oranında artırılması gerektiği vurgulanmıştır [33]. Bu durumda, kurşunun ilk akma gerilmesi 13.5 MPa olarak seçilmiş ve Kalpakidis ve Constantinou [18,19] tarafından geliştirilen ifadeler kullanılarak her bir yüklemeye adımında bu değer güncellenmiştir. Yalıtım biriminin karakteristik dayanımı, kurşun çekirdek çapı ve akma gerilmesinin çarpımına eşit olduğundan, kurşun çekirdek çapı sabitken akma gerilmesinin artan sıcaklığa bağlı olarak azalması sonucunda yalıtım biriminin dayanımı düşmektedir. Her bir yüklemeye adımı için sürekli olarak güncellenen yalıtım birimi dayanımı, hareket boyunca sabit kalmak yerine kademeli olarak azalmaktadır. Hesap için kullanılan ifadeler Denklem (1-4) kullanılarak tanımlanmıştır. Denklem (1)'de kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışına bağlı olarak, kurşunun anlık akma gerilmesi hesap edilirken Denklem (2-4) arasında kurşun çekirdekte meydana gelen anlık sıcaklık artışı hesaplanmaktadır.

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

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

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

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

Denklemlerde kullanılan $\sigma_{YL}(T_L)$ sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanan kurşunun akma gerilmesini, σ_{YL0} kurşunun ilk akma gerilmesini, $E_2=0.069$ sabit bir sayıyı, T_L kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışı, \dot{T}_L kurşun çekirdekte meydana gelen anlık sıcaklık değişimini, Z_x ve Z_y birimsiz büyüklükleri, \dot{U}_x ve \dot{U}_y her iki yatay yönde izolatorün maruz kaldığı hızı, ρ_L , c_L , h_L , r_L sırası ile kurşun çekirdeğin yoğunluğunu, özgül ısısını, yüksekliğini ve yarıçapını, k_s , a_s , t_s sırası ile çelik plakaların ısı iletkenliğini, çelik plakaların ısıl genleşme katsayısını, toplam çelik plaka kalınlığını, t^+ boyutsuz zamanı ve F de boyutsuz zamana ait bir parametreyi temsil etmektedir.

4. DEPREM KAYDI SEÇİMİ VE ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

Dinamik analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi işleminin elde edilecek sonuçları önemli ölçüde etkilediği yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur [32, 34-36]. Özellikle deprem yalıtımlı yapılarda, maksimum yalıtım birimi deplasmanlarını belirlemek üzere yürütülen analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının seçiminde şartname esaslarına (deprem büyüklüğünün, zemin koşullarının, faya olan mesafenin benzer olması) ilave olarak seçilen deprem kayıtlarına ait pik yer hızı (peak ground velocity, PGV) değerinin de uyumlu olması gerektiği vurgulanmıştır [35]. Seçilen kayıtların ölçeklendirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda ise öncelikle deprem kayıtlarına ait spektrum eğrilerinin tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmesi daha sonra da şartname esaslarının uygulanması üzerinde durulmuştur [9,13,31,34,36]. Ayrıca, sismik izolasyonlu yapı analizlerinde kullanılan deprem kayıtlarına uygulanacak ölçek katsayılarının üst limiti üzerinde duran Ozdemir ve Gulkan [32] yaptıkları araştırma sonucunda söz konusu değerlerin PGV'ye bağlı olarak farklılaşması gerektiğini göstermiştir. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda yürütülen ZTADO dinamik analizlerde kullanılmak üzere seçilen ve ölçeklenen deprem kayıtları için yürütülen işlemlerde yukarıda özetlenen tüm kriterlere dikkat edilmiştir. Buna göre, deprem büyüklüğü, fay kırığına olan uzaklık ve yerel zemin koşulları deprem kaydı seçim kriteri olarak dikkate alınmıştır. Deprem kayıtlarının moment büyüklüğü (M_w) 6.5 ile 7.6 arasında, fay kırığına uzaklıkları (R) 20km'den az, zemin tabakasının en üst 30m'lik kısmındaki kayma dalgası hızı (V_s) değeri 180m/s ile 360m/s arasında olacak şekilde seçim yapılmıştır. TBDY'ye [2] göre dinamik analizlerde kullanılmak üzere 11 adet deprem kaydı çifti seçilmiş ve bunların en fazla 3 tanesinin aynı depreme ait olmasına dikkat edilmiştir. Her ne kadar DBYBHY [23] 7 adet deprem kaydının kullanılmasına izin verse de, kıyaslamalı olarak sunulacak analiz sonuçlarının deprem kaydı sayısı ve seçilen depremin karakteristik özelliklerinden etkilenmemesi adına hem DBYBHY [23] hem de TBDY [2] için aynı deprem kayıtları kullanılmıştır. Tablo 4, dinamik analizler için seçilen ve PEER [37] kuvvetli yer

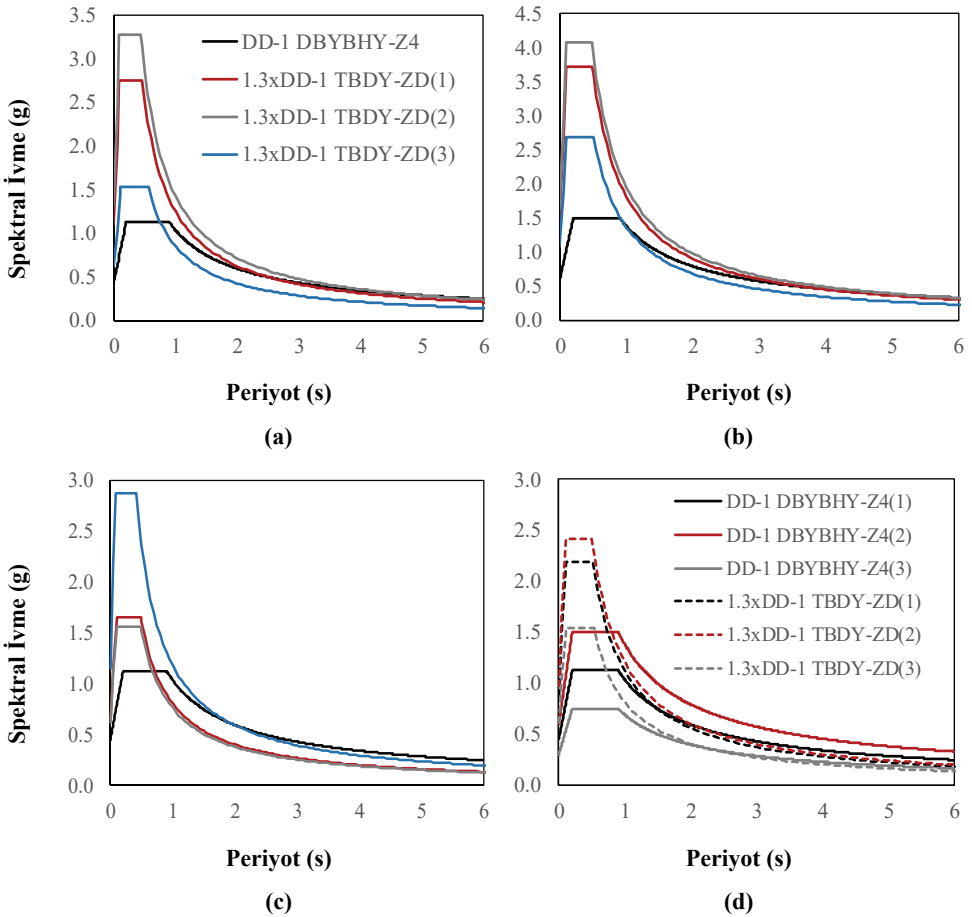
hareketi veri bankasından indirilen deprem kayıtlarına ait özellikleri sunmaktadır. Tablo 4’de kullanılan PGA, PGV, PGD değerleri sırasıyla pik yer ivmesi, pik yer hızı ve pik yer deplasmanını temsil etmektedir. Tablo 4’te sıralanan deprem kayıtlarının ZTADO dinamik analizlerde kullanılabilmesi için ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, seçilen deprem kayıtları hem DBYBHY’de [23] hem de TBDY’de [2] tanımlanan farklı tasarım spektrumları dikkate alınarak ayrı ayrı ölçeklendirilmiştir. TBDY’de [2] sismik izolasyonlu yapıların MİD hesabı için yürütülecek analizlerde DD-1 deprem seviyesine (50 yılda aşılma ihtimali %2) karşılık gelen spektrum eğrisinin kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu sebeple, TBDY [2] tarafından tanımlanan tasarım spektrumu oluşturulurken TDTH [24] ara yüzü kullanılarak çalışma kapsamında incelenen 4 ildeki 3’er farklı koordinat için DD-1 seviyesi dikkate alınmıştır. Diğer taraftan, DBYBHY’ye [23] uygun bir biçimde tanımlanan spektrum eğrileri ise söz konusu 4 ildeki 3’er farklı koordinatın hangi deprem bölgesinde olduğuna bağlı olarak oluşturulmuştur. Burada vurgulanması gereken husus, DBYBHY [23] tarafından tanımlanan tasarım spektrumu 50 yılda aşılma ihtimali %10 olan depremi temsil etmektedir. 50 yılda aşılma ihtimali %2 olan depreme ait spektrum eğrisinin oluşturulabilmesi için tasarım spektrumuna ait spektral ivme değerleri DBYBHY [23] Bölüm 7.8.1’de tanımlandığı üzere 1.5 kat büyütülmüştür.

Tablo.4- Seçilen deprem kayıtları ve özellikleri

No	Deprem İsmi	Kayıt İstasyonu	Büyüklik (M _w)	R* (km)	Bileşen	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	Kocaeli	Duzce	7.5	15.4	180	0.31	58.9	44.2
					270	0.36	46.4	17.6
2	Kocaeli	Yarımca	7.5	4.8	060	0.27	65.7	57.2
					330	0.35	62.2	51.1
3	Erzincan	Erzincan	6.7	4.4	NS	0.52	84.0	27.7
					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
					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
					140	0.52	46.9	35.3
6	Duzce	Duzce	7.1	6.6	270	0.54	83.5	51.8
					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
					320	0.22	41.2	18.0
8	Chi-Chi	CHY024	7.6	9.6	W	0.28	52.9	43.6
					N	0.18	49.0	31.1
9	Duzce	Bolu	7.1	12.0	090	0.82	62.1	13.6
					000	0.73	56.4	23.1
10	Chi-Chi	TCU109	7.6	13.1	N	0.16	53.1	34.8
					W	0.16	50.8	46.5
11	Kobe	KJM	6.9	1.0	000	0.82	81.3	17.7
					090	0.60	74.4	20.0

*Fay kırığına olan en kısa mesafe

Belirtilmesi gereken bir diğer husus da, hem DBYBHY [23] hem de TBDY[2] tarafından önerilen spektrum eğrilerinin olası yakın saha etkilerini gözetmeden hazırlanmış olmalarıdır. Öte yandan, yakın saha kayıtlarına özgü olarak spektrum eğrisinde özellikle uzun periyot bölgesinde farklılaşmalar gözlemlenmektedir [38]. Her ne kadar bu çalışmanın amacı yakın saha etkileri üzerine kurulmasa da, yakın saha etkileri dikkate alınarak hazırlanmış bir spektrum eğrisi ile DBYBHY [23] tarafından önerilen spektrum eğrisinin kıyaslandığı bir çalışmaya ilişkin sonuçlar burada paylaşılmıştır. Zekiöğlü vd. [26] tarafından yürütülen ve İstanbul Sabiha Gökçen Havalimanı deprem yalıtım sistemi tasarımının işlendiği çalışmada DBYBHY [23] tarafından önerilen spektrum eğrisinin uzun periyot bölgesinde yakın saha etkileri dikkate alınarak üretilen spektrum eğrisinden daha büyük spektral ivme değerleri verdiği gösterilmiştir. Bu çalışmada da seçilen noktalar özelinde benzer bir durum olduğu kabulü yapılmıştır [39,40]. Tablo 1 ve 2’de bilgileri paylaşılan konumlar için hem DBYBHY [23] hem de TBDY [2] tanımları gereği dinamik analizlerde kullanılan spektrum eğrileri Şekil 5’te kıyaslamalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5 -a) Erzurum b) Kocaeli c) Van d) İstanbul illerinde 1, 2 ve 3 numaralı konumlar için DBYBHY ve TBDY tarafından önerilen spektrum eğrileri.

Bu çalışmada kullanılan ölçekleme yöntemi, birbirini tamamlar mahiyette iki aşamadan oluşmaktadır [9,31,41]. İlk aşamada, deprem kaydına ait birbirine dik her iki yatay doğrultudaki bileşenler için oluşturulan spektrum eğrilerinin geometrik ortalaması alınıp, deprem kaydını temsil eden tek bir spektrum eğrisi oluşturulmaktadır. Bu temsili spektrum eğrisi ile şartnamenin önerdiği spektrum eğrisi arasında uyumu sağlamak için bir hata miktarı tanımlanmaktadır. Bu hata miktarı ε ile ifade edilmekte ve spektrum eğrileri arasındaki farkın kareleri toplamı olarak Denklem (5)'te görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Denklem (5)'te a ölçek katsayısını, b_i hesaplamaya katılan periyot değerleri için belirlenen hata miktarının toplam hata miktarına ne ölçüde dahil edileceğini tanımlayan ağırlık katsayısını, n hesaplamaya katılan periyot sayısını, y_i temsili geometrik ortalama spektrumundaki ivme değerlerini ve y_{Ti} ise şartname tarafından tanımlanan tasarım spektrumundaki ivme değerlerini temsil etmektedir. Söz konusu hata miktarını en aza indirecek ölçek katsayısını hesaplayabilmek için Denklem (5)'in ölçek katsayısı a 'ya göre türevini alıp sıfıra eşitlenir ve Denklem (6) elde edilir.

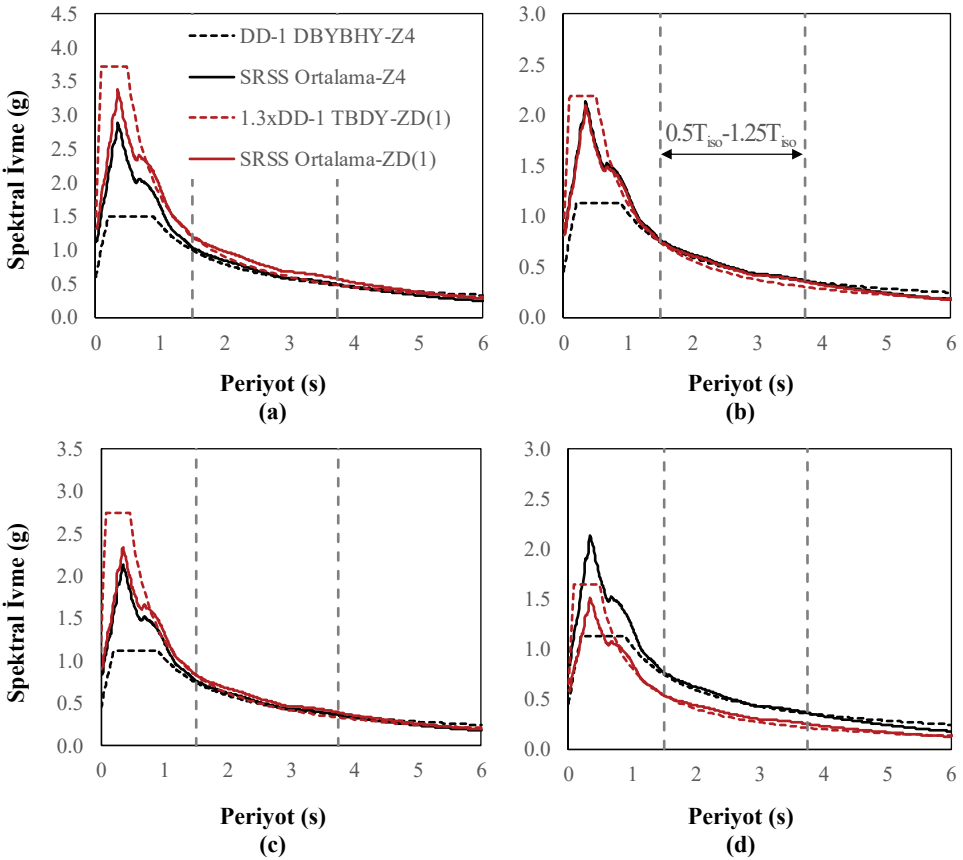
$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n b_i (a * y_i - y_{Ti})^2 \quad (5)$$

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

Tablo 5- DD-1 deprem yer hareketi düzeyindeki tasarım spektrumu için deprem kayıtlarına uygulanan ölçek katsayıları

		Deprem Kayıtları#											
Konum	Deprem Yönetmeliği	Zemin Sınıfı	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
KOCAELİ	DBYBHY	Z4	1,96	1,69	1,40	2,15	1,72	1,79	2,57	2,40	2,27	1,73	1,75
		ZD(1)	2,30	1,94	1,64	2,50	1,96	2,08	3,00	2,76	2,68	1,98	2,07
	TBDY	ZD(2)	2,48	2,09	1,77	2,70	2,12	2,24	3,24	2,98	2,89	2,14	2,24
		ZD(3)	1,73	1,46	1,24	1,89	1,49	1,57	2,27	2,09	2,02	1,50	1,57
İSTANBUL	DBYBHY	Z4(1)	1,45	1,25	1,04	1,59	1,27	1,33	1,90	1,77	1,68	1,28	1,30
		Z4(2)	1,96	1,69	1,40	2,15	1,72	1,79	2,57	2,40	2,27	1,73	1,75
		Z4(3)	0,98	0,84	0,70	1,07	0,86	0,90	1,29	1,20	1,14	0,87	0,88
	TBDY	ZD(1)	1,42	1,20	1,02	1,55	1,22	1,29	1,86	1,71	1,66	1,23	1,28
		ZD(2)	1,52	1,28	1,08	1,65	1,30	1,37	1,98	1,82	1,77	1,31	1,37
		ZD(3)	1,03	0,87	0,74	1,13	0,88	0,94	1,35	1,24	1,21	0,89	0,93
ERZURUM	DBYBHY	Z4	1,45	1,25	1,04	1,59	1,27	1,33	1,90	1,77	1,68	1,28	1,30
		ZD(1)	1,59	1,34	1,13	1,73	1,36	1,44	2,07	1,91	1,85	1,37	1,43
	TBDY	ZD(2)	1,82	1,53	1,30	1,98	1,55	1,64	2,37	2,18	2,12	1,57	1,64
VAN	DBYBHY	Z4	1,45	1,25	1,04	1,59	1,27	1,33	1,90	1,77	1,68	1,28	1,30
		ZD(1)	1,03	0,87	0,73	1,12	0,88	0,93	1,34	1,23	1,20	0,89	0,93
	TBDY	ZD(2)	0,97	0,82	0,69	1,05	0,83	0,88	1,26	1,16	1,13	0,84	0,87
		ZD(3)	1,50	1,27	1,07	1,64	1,29	1,36	1,96	1,81	1,75	1,30	1,35

Ölçeklendirme işleminin ikinci aşamasında ise DBYBHY [23] ve TBDY [2] tarafından tanımlanan ölçekleme esasları dikkate alınmıştır. Buna göre, deprem kayıtlarının her iki yatay bileşeni için oluşturulan spektrum eğrilerinin, kareleri toplamının kareköklerinin (SRSS) ortalaması, ilgili periyot aralığında ($0.5T_{iso}-1.25T_{iso}$) eski yönetmeliğe göre tasarım spektrumdan, yeni yönetmeliğe göre ise tasarım spektrumunun 1.3 katından daha düşük olmayacak şekilde bir kez daha ölçeklendirilmiştir. Her bir deprem kaydına uygulanacak ölçek katsayısı ise her iki aşamada hesaplanan ölçek katsayılarının çarpımına eşittir. Bu şekilde hesaplanan ölçek katsayıları Tablo 5’de il bazında hem DBYBHY [23] hem de TBDY [2] için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 6’da ise temsili olarak seçilen durumlar için ölçekleme işlemi sonrasında ortalama SRSS spektrum eğrileri ile tasarım spektrumlarının uyumu görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 6 -a) Kocaeli b) İstanbul c) Erzurum d) Van ili 1 numaralı konumları için uygulanan ölçeklendirme işlemi sonucunda elde edilen spektrum eğrileri arasındaki uyum.

5. DİNAMİK ANALİZLER

Üç boyutlu yapı modellerinin kullanıldığı ZTADO dinamik analizlerde, hem DBYBHY [23] hem de TBDY [2] hükümlerine göre, seçilen deprem kayıtlarına ait birbirine dik her iki yatay doğrultudaki bileşenlerin eş zamanlı olarak yapısal modele etki ettirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, Tablo 4'te bilgileri paylaşılan deprem kayıtlarının yatay bileşenleri Şekil 1'deki üç boyutlu modele eş zamanlı olarak tatbik edilerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çift doğrultulu analizler sırasında deprem yalıtım birimlerine ait kuvvet-deplasman ilişkilerinin her iki yatay doğrultudaki etkileşimli çözümünde Denklem (7)-(9)'da tanımlanan ifadeler kullanılmıştır [42]. Burada α , yalıtım birimine ait kuvvet-deplasman 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 kullanılan histeretik birimsiz büyüklükleri temsil ederken, A ve B birimsiz büyüklükleri ise kuvvet ve deplasman vektörlerinin aynı yönde olmasını sağlamak için $A=2B$ olacak şekilde ($A=1$, $B=0.5$) seçilmiştir [43]. Aşağıda verilen denklem takımı Özdemir [44] tarafından OpenSees [28] yapısal analiz programına eklenmiştir. Detaylı modelleme bilgisi ve kaynak koda Özdemir [44]'den ulaşılabilir.

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \end{Bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} \frac{F_y}{D_y} & 0 \\ 0 & \frac{F_x}{D_x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_X \\ U_Y \end{Bmatrix} + (1 - \alpha) \begin{bmatrix} F_y & 0 \\ 0 & F_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{Bmatrix} \quad (7)$$

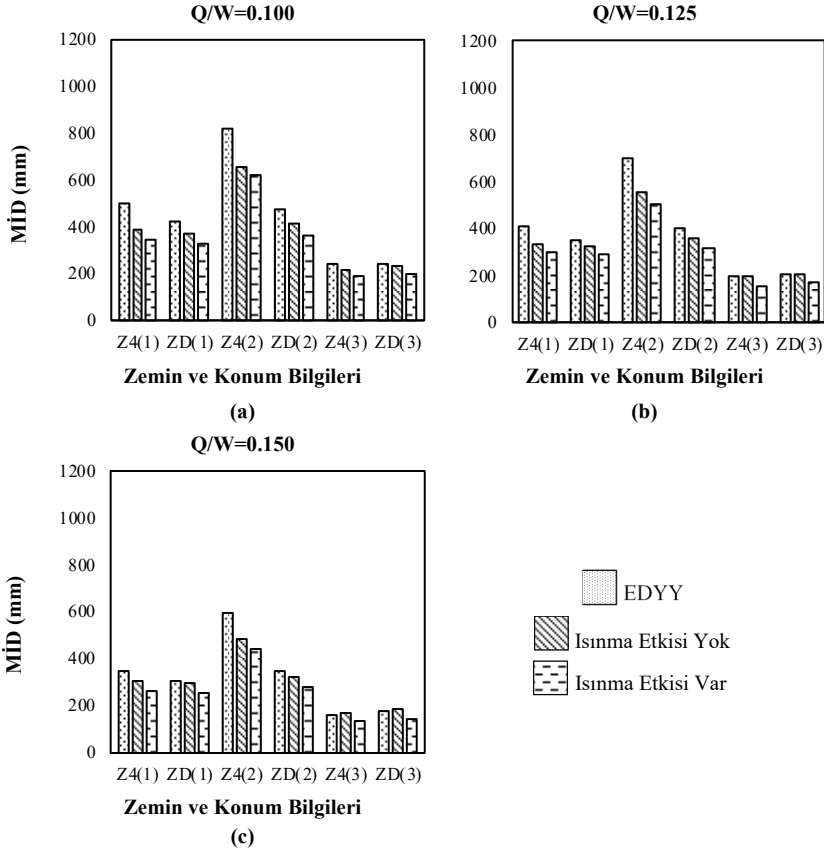
$$D_y \begin{Bmatrix} \dot{z}_x \\ \dot{z}_y \end{Bmatrix} = (A[I] - B[\Omega]) \begin{Bmatrix} \dot{U}_X \\ \dot{U}_Y \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$[\Omega] = \begin{Bmatrix} Z_x^2 [sgn(\dot{U}_X Z_x) + 1] & Z_x Z_y [sgn(\dot{U}_X Z_x) + 1] \\ Z_x Z_y [sgn(\dot{U}_X Z_x) + 1] & Z_y^2 [sgn(\dot{U}_X Z_x) + 1] \end{Bmatrix} \quad (9)$$

6. TESPİT VE DEĞERLENDİRMELER

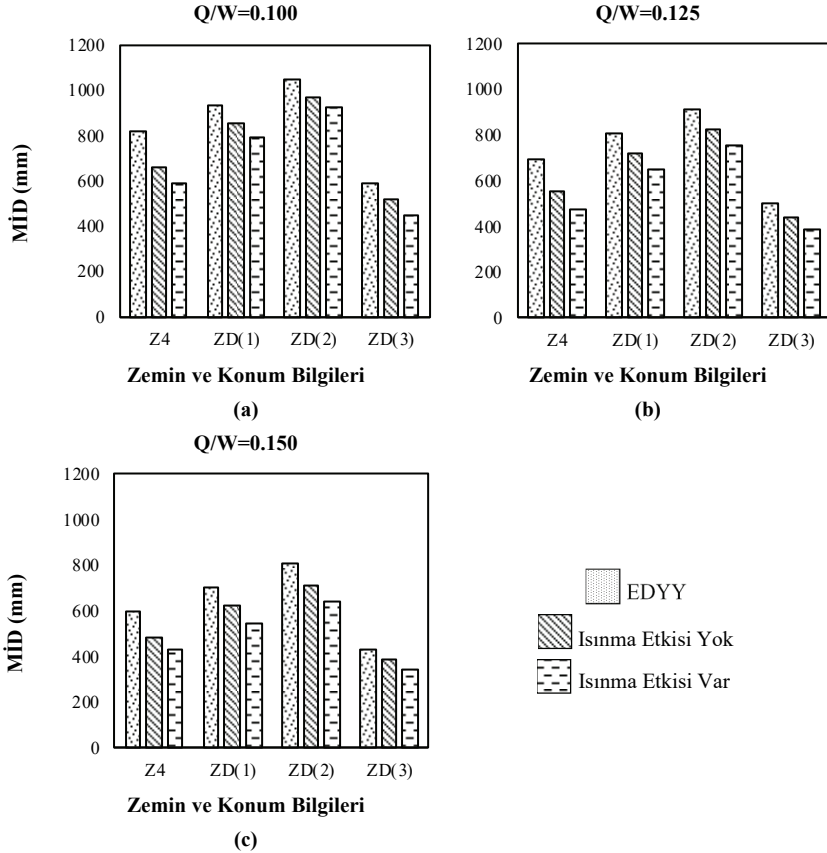
Bu bölümde, sismik izolasyon sistemi KÇKİ'den oluşan bir yapı modeli için hem EDYY hem de ZTADO dinamik analiz yöntemi ile elde edilen maksimum izolatör deplasmanları kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Çift doğrultulu analizler sonucunda her iki yatay doğrultuda kaydedilen izolatör deplasmanları D_x ve D_y olarak adlandırılırsa, maksimum izolatör deplasmanının hesaplanması için $(D_x^2 + D_y^2)^{1/2}$ ifadesi kullanılmıştır. ZTADO dinamik analizler KÇKİ'nin modellenmesi için kullanılan kuvvet-deplasman eğrisinin dayanım kaybını yansıtan ve yansıtmayan (Şekil 4) durumlar için tekrarlanmıştır. Bu durumda, toplamda 1188 ZTADO dinamik analiz yürütülmüştür. Elde edilen analiz sonuçları Şekil 7-10'da sunulmuştur. Bu tablolarda, KÇKİ'ye ait kuvvet-deplasman eğrilerindeki farklılaşmanın neden olduğu değişim "ısınma etkisi var" ve "ısınma etkisi yok" etiketleri ile temsil edilmiştir. Ayrıca, sunulan sayısal ifadeler 11 deprem kaydından elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Şekil 7-10'da düşey eksen maksimum yalıtım birimi deplasmanını (MİD) gösterirken, yatay eksen deplasmanını Z4 ifadesi DBYBHY'ye [23] uygun yürütülen analiz sonuçlarını, ZD(1), ZD(2) ve ZD(3) ise TBDY'ye [2] göre söz konusu

il sınırları içindeki 3 farklı nokta özelinde yürütülen analiz sonuçlarını yansıtmaktadır. İstanbul özelinde ise Z4(1), Z4(2) ve Z4(3) ifadeleri seçilen koordinatların DBYBHY'ye [23] göre farklı deprem bölgelerinde olması nedeniyle kullanılmıştır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesine geçmeden önce, Şekil 5'te verilen grafikler kıyaslandığında ilk yapılan tespit, DBYBHY [23] ve TBDY [2] tarafından tanımlanan spektrum eğrileri özellikle kısa periyot bölgesinde çok büyük farklılıklar gösterirken uzun periyot bölgesinde görece daha küçük farklılaşma söz konusudur. Bu çalışmada, uzun periyot bölgesindeki bir yapı davranışı incelense de kısa periyot bölgesindeki spektrum eğrilerindeki değişime bağlı olarak ankastre mesnetli modellenen yapı tepkilerinde daha büyük farklılaşmaların olacağı aşikardır.



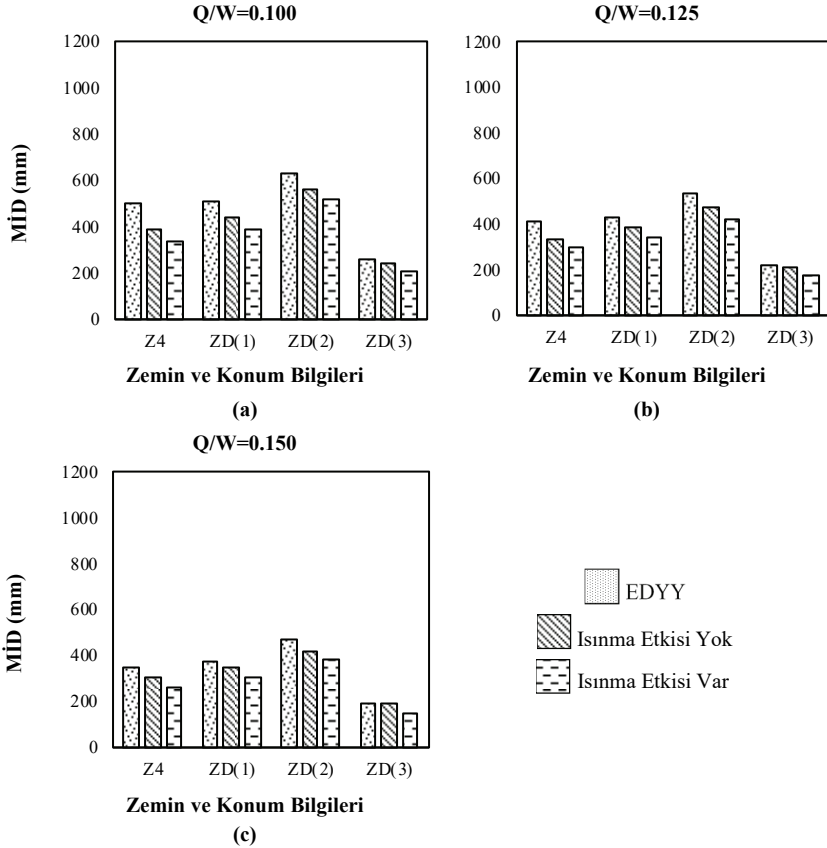
İstanbul özelinde seçilen 3 koordinatın DBYBHY [23] kapsamında 3 farklı deprem bölgesine karşılık gelmesi nedeniyle hem DBYBHY [23] hem de TBDY [2] kapsamında 3'er analiz yapılmıştır. Şekil 7'de İstanbul için elde edilen analiz sonuçları paylaşılmıştır. Her iki yönetmelikte tanımlanan spektrum eğrilerindeki değişime bağlı olarak hem EDYY ile hem de ZTADO dinamik analiz yöntemiyle hesaplanan maksimum yalıtım birimi

deplasmanlarında farklılaşma görülmüştür. Deprem yalıtım birimlerinin ön tasarımı amacıyla kullanılan EDYY yöntemi için bu farklılaşmanın mertebesi DBYBHY [23] kapsamında 1. deprem bölgesinde yer alan konum (İ2) ve Q/W oranının 0.100 olduğu durum için %-42 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, yeni şartnameye göre ön tasarımı yapılan bir yalıtım biriminin maksimum deplasmanı eski şartnameye kıyasla %42 daha azdır. Bu oranlar İstanbul'da 2. (İ1) ve 3. (İ3) deprem bölgeleri için seçilen diğer konumlarda sırasıyla %-16 ve %-2 olarak belirlenmiştir. Aynı kıyaslama kurşun çekirdekteki sıcaklık artışına bağlı dayanım kaybının dikkate alınmadığı "ısınma etkisi yok" durumu için yapıldığında da yeni ve eski şartnamelere göre yürütülen analiz sonuçlarında benzer miktarda değişim olduğu görülmektedir. Eski şartnameye göre 1., 2. ve 3. deprem bölgelerinde yer alan konumlar için eski ve yeni şartnamelere göre yürütülen analiz sonuçlarında %-38, %-4 ve %-6 oranlarında değişim hesaplanmıştır. Kurşun çekirdekteki sıcaklık artışına bağlı yalıtım birimi dayanımındaki kaybın dikkate alındığı "ısınma etkisi var" durumu için yapılan kıyaslamada ise bu oranlar %-42, %-4 ve %-7 olarak elde edilmiştir. Söz konusu değişim miktarları Q/W oranının 0.125 ve 0.150 olarak değiştirilmesinden neredeyse etkilenmeyerek Q/W=0.100 olan durum ile benzerdir.



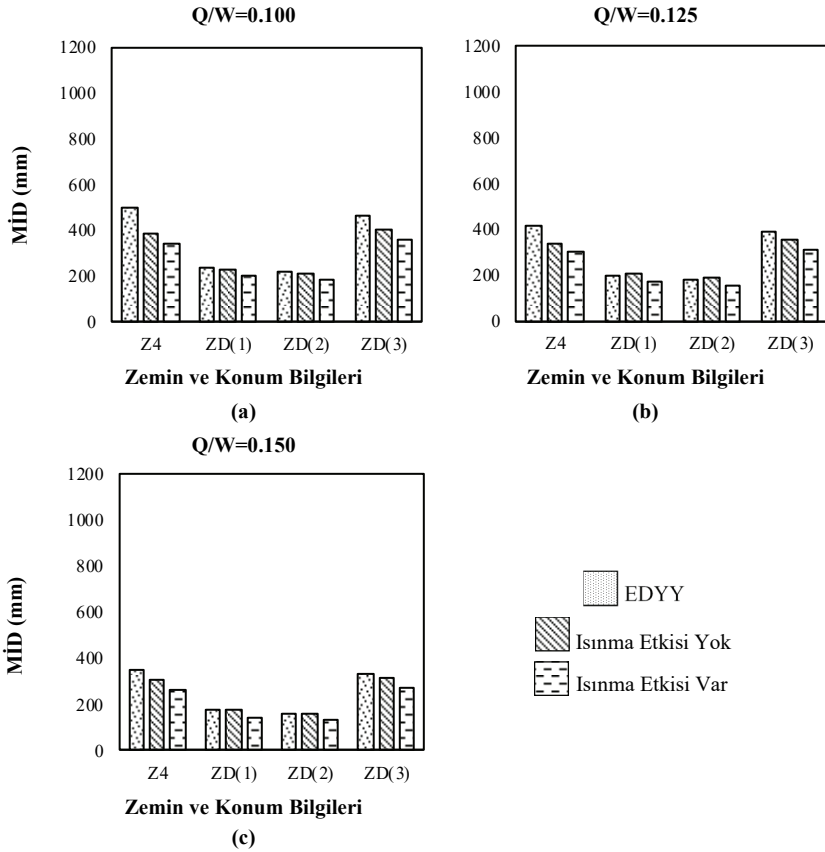
Şekil 8- Kocaeli ili için yürütülen EDYY ve ZTADO dinamik analizler sonucunda elde edilen MİD (mm) değerleri

Kocaeli’nde seçilen 3 farklı konum için elde edilen analiz sonuçları Şekil 8’de sunulmuştur. Eski şartnameye göre dikkate alınan her 3 konum da 1. deprem bölgesinde yer almaktadır. Yeni deprem şartnamesine göre ise bu noktadaki deprem tehlikesi değişmektedir. Belirtmek gerekirse, Kocaeli’nde yeni şartnamenin tanımladığı deprem tehlikesi İstanbul’da seçilen konumlarınkine kıyasla daha yüksektir. İstanbul özelinde elde edilen sonuçların tersine, Kocaeli’nde seçilen konumlar için eski şartname için hesaplanan maksimum yalıtım birimi deplasmanları yeni şartname için hesaplanandan daha düşüktür. EDYY ile Q/W oranının 0.100 olduğu durum için yeni şartnameye göre hesaplanan maksimum yalıtım birimi deplasmanlarının eski şartnameye kıyasla değişim miktarı K1, K2 ve K3 noktaları için sırasıyla %13, %28 ve %-29’dur. Yalıtım birimi dayanımındaki kaybın dikkate alınmadığı durum için yürütülen ZTADO dinamik analiz sonuçları için yapılan kıyaslamada söz konusu değişim miktarları %30, %48 ve %-21’dir. Kurşun çekirdekteki anlık sıcaklık artışına bağlı olarak yalıtım birimindeki dayanım kaybının hesaplara dahil edildiği durum için yapılan kıyaslamada ise değişim miktarları %35, %57 ve %-23’tür. Q/W değerinin 0.125 ve 0.150 olduğu durumlar için de Q/W oranının 0.100 olduğu durumdakilere çok benzer değişim oranları gözlenmiştir.



Şekil 9- Erzurum ili için yürütülen EDYY ve ZTADO dinamik analizler sonucunda elde edilen MID (mm) değerleri

Eski şartnameye göre 2. deprem bölgesinde yer alan Erzurum ve Van sınırları içinde seçilen 3 farklı konumdaki deprem yalıtımlı yapı inşaatları için hesaplanan yalıtım birimi deplasmanları sırasıyla Şekil 9 ve 10'da verilmiştir. Maksimum yalıtım birimi deplasmanları kıyaslandığında ZD(1) ve ZD(2) durumlarında yeni şartnamenin Erzurum için elde edilen yalıtım birimi deplasmanlarını eski şartnameye göre arttırdığı görülmektedir. ZD(3) durumu için ise yeni şartname eskisine kıyasla daha düşük yalıtım birimi deplasmanları hesaplanmasına neden olmaktadır. Hem artış hem de azalış miktarları %50 mertebelerine kadar çıkabilmektedir (analiz yöntemine ve konuma bağlı olarak). Van için elde edilen maksimum yalıtım birimi deplasmanları incelendiğinde de çok benzer değişim oranları hesaplanmıştır. Her iki il için de hesaplanan değişim miktarlarının Q/W oranından çok az miktarda etkilendiği gözlenmiştir.



Şekil 10- Van ili için yürütülen EDYY ve ZTADO dinamik analizler sonucunda elde edilen MİD (mm) değerleri

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik koşulları dikkate alınarak tasarlanmış sismik taban izolasyonlu bir yapı modeli için, spektrum tanımındaki değişime bağlı olarak maksimum yalıtım birimi deplasmanının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bu amaçla, modellenen deprem yalıtımlı yapının İstanbul, Kocaeli, Erzurum ve Van illerinde üçer farklı konumda inşa edildiği ve yalıtım sisteminin kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimlerinden oluştuğu varsayılmıştır. Elde edilecek sonuçların yalıtım birimi özelliklerine bağlı değişim gösterip göstermediğini belirlemek adına Q/W oranı bir parametre olarak seçilmiştir. Maksimum yalıtım birimi deplasmanları hem eşdeğer deprem yükü yöntemiyle hem de zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Dinamik analizler için seçilen ve ölçeklenen deprem kayıtlarının birbirine dik her iki yatay bileşenleri yapısal modele eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Analizler, deplasman sırasında kurşun çekirdekteki sıcaklık artışı nedeniyle yalıtım biriminde gözlenen dayanım kaybını dikkate alan ve almayan durumlar için tekrarlanmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde elde edilen çıkarımlar şu şekilde sıralanabilir:

- TBDY'nin ve DBYBHY'nin önerdiği tasarım spektrumlarının özellikle kısa periyot bölgesinde birbirinden çok farklı iken uzun periyot bölgesinde görece olarak birbirine daha yakın olduğu değerlendirilmiştir.
- TBDY tarafından koordinata göre tanımlanan spektrum eğrilerinin kullanıldığı analizlerden elde edilen maksimum yalıtım birimi deplasmanları DBYBHY'de yer alan spektrum eğrisinin kullanıldığı analizlerden elde edilenlerle kıyaslandığında genelleme yapılabilecek bir davranış belirlenmemiştir. Dikkate alınan illerin bazılarında yeni şartnamenin neden olduğu deplasman değerleri eskisine göre yüksek kalırken bazı illerde de tam tersi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çıkarımların il sınırları içindeki farklı konumlar için tersine dönebildiği de ortaya konulmuştur.
- Q/W oranındaki değişimin, eski ve yeni şartnamelere uygun olarak yürütülen analiz sonuçlarındaki değişim miktarı üzerinde çok sınırlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Kurşun çekirdekteki sıcaklık artışına bağlı olarak yalıtım birimi dayanımındaki kaybın dikkate alındığı analizlerden elde edilen maksimum yalıtım birimi deplasmanlarının eski ve yeni şartnamelerdeki değişimden daha fazla etkilendiği görülmüştür.

TBDY tarafından koordinata göre tanımlanan spektrum eğrilerinin DBYBHY'de yer alan spektrum eğrisine kıyasla nasıl bir değişiklik getirdiği ve bu değişikliğin farklı özelliklerdeki yapıların davranışı üzerindeki etkilerinin ne olduğu yeteri kadar incelenmemiştir. Bu çalışmada özellikle deprem yalıtımlı yapılar özelinde incelemelerde bulunulmuştur. Ancak, unutulmamalıdır ki burada sunulan sonuçlar incelemeye konu olan noktalarla sınırlıdır ve tasarım mühendislerine ışık tutmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu bağlamda, sunulan sonuçlar her ne kadar kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimlerine ait olsa da, sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım birimleri için de sürtünme yüzeyinin çevrimsel yükleme sırasında ısındığı bilinmektedir. Bu ısınmaya bağlı olarak sürtünme katsayısının yalıtım birimine uygulanan hareket boyunca değişkenlik gösterdiği (azaldığı) deneysel olarak gözlenmiştir. Dolayısı ile,

burada sunulan sonuçlara çok benzer çıkarımların sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım birimleri özelinde de geçerli olacağı tasarım mühendisleri tarafından dikkate alınmalıdır. Ayrıca, olası yön etkisi ve yönelim gibi yakın saha koşullarında gündeme gelebilecek deprem parametreleri çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.

Semboller

A	Kuvvet ve deplasman vektörlerinin aynı yönde olmasını sağlayan birimsiz büyüklük
a	Ölçek katsayısı
A_0	Ekin yer ivmesi katsayısı
α_s	Çelik plakaların ısıl genleşme katsayısı
B	Sönüm azaltma katsayısı
B	Kuvvet ve deplasman vektörlerinin aynı yönde olmasını sağlayan birimsiz büyüklükler
b_i	Ağırlık katsayısı
c_L	Kurşun çekirdeğin özgül ısısı
D	EDYY ile hesaplanan maksimum yalıtım birimi deplasmanı
D_b	Yalıtım birimi çapı
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DD-1	50 yılda aşılma ihtimali %2 olan maksimum deprem seviyesi
D_X	X doğrultusundaki yalıtım birimi deplasmanı
D_y	Yalıtım birimine ait kuvvet-deplasman eğrisindeki akma deplasmanı
D_Y	Y doğrultusundaki yalıtım birimi deplasmanı
E_2	Sabit bir sayı (0.0069)
EDYY	Eşdeğer deprem yükü yöntemi
F	Boyutsuz zamana ait bir parametre
F_y	Yalıtım birimine ait kuvvet-deplasman eğrisindeki akma kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
h_L	Yalıtım birimi yüksekliği
KÇKİ	Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi
k_d	Yalıtım biriminin akma sonrası rijitlik değeri
k_e	Yalıtım biriminin elastik rijitlik değeri

K_{eff}	Yalıtım biriminin eşdeğer rijitlik değeri
k_s	Çelik plakaların ısı iletkenliği
$M_{İD}$	Maksimum yalıtım birimi deplasmanı
M_w	Deprem kaydının moment büyüklüğü
n	Ölçekleme hesabında dikkate alınan periyot sayısı
PGA	Pik yer ivmesi
PGD	Pik yer deplasmanı
PGV	Pik yer hızı
Q	Yalıtım birimi karakteristik dayanımı
R	Fay kırığına olan en kısa mesafe
r_L	Kurşun çekirdek yarıçapı
S_a	Spektral ivme
S_{dl}	Uzun periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
$SRSS$	Kareler toplamının karekökü (Square Roots of Sum of the Squares)
t^+	Boyutsuz zaman
$TBDY$	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
$TDTH$	Türkiye Deprem Tehlike Haritası
T_{eff}	Eşdeğer yalıtım periyodu
T_{iso}	Deprem yalıtım periyodu
T_L	Kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışı
\dot{T}_L	Kurşun çekirdekte meydana gelen anlık sıcaklık değişimi
t_s	Toplam çelik plaka kalınlığı
\dot{U}_x	X yönünde yalıtım biriminin maruz kaldığı hız
\dot{U}_y	Y yönünde yalıtım biriminin maruz kaldığı hız
V_s	Kayma dalgası hızı
W	Yalıtım birimine etki eden ağırlık
y_i	Geometrik ortalama spektrumundaki ivme değerleri
y_{Ti}	Tasarım spektrumundaki ivme değerleri
$Z4(1)$	DBYBHY'ye göre Z4 zemin sınıfı ve 1 numaralı konum
$Z4(2)$	DBYBHY'ye göre Z4 zemin sınıfı ve 2 numaralı konum
$Z4(3)$	DBYBHY'ye göre Z4 zemin sınıfı ve 3 numaralı konum

ZD(1)	TBDY'ye göre ZD zemin sınıfı ve 1 numaralı konum
ZD(2)	TBDY'ye göre ZD zemin sınıfı ve 2 numaralı konum
ZD(3)	TBDY'ye göre ZD zemin sınıfı ve 3 numaralı konum
ZTADO	Zaman tanım alanında doğrusal olmayan
Z_x ve Z_y	Histeretik birimsiz büyüklükler
α (k_d/k_c)	Yalıtım biriminin akma sonrası rijitliğinin elastik rijitliğine oranı
β_{eff}	Eşdeğer sönüm oranı
ε	Ölçekleme yönteminde kullanılan toplam hata miktarı
ρ_L	Kurşun çekirdeğin yoğunluğu
$\sigma_{YL}(T_L)$	Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanan kurşunun akma gerilmesi
σ_{YL0}	Kurşunun ilk akma gerilmesi

Kaynaklar

- [1] Pınarbaşı, S., Akyüz, U., Sismik İzolasyon ve Elastomerik Yastık Deneyleri, Teknik Dergi, 16(78), 3581-3598, 2005.
- [2] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [3] American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures: ASCE7-16, Reston, Virginia, 2017.
- [4] Eurocode8: Design of Structures for Earthquake Resistance- Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, EN 1998-1, 2004.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specification for Seismic Isolation Design 4th Edition, Washington, DC, 2014.
- [6] Patil, A. S., Kumbhar, P. D., Time History Analysis of Multistoried RCC Buildings for Different Seismic Intensities, International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 2(3), 194-201, 2013.
- [7] Pant, D. R., Constantinou, M. C., Wijeyewickrema, A. C., Re-evaluation of Equivalent Lateral Force Procedure for Prediction of Displacement Demand in Seismically Isolated Structures, Engineering Structures, 52, 455-465, 2013.
- [8] Fadi, F., Constantinou, M. C., Evaluation of Simplified Methods of Analysis for Structures with Triple Friction Pendulum Isolators, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39, 5-22, 2010.
- [9] Özdemir, G., Constantinou, M. C., Evaluation of Equivalent Lateral Force Procedure in Estimating Seismic Isolator Displacements, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 1036-1042, 2010.

- [10] Özdemir, G., Avşar, Ö., Bayhan, B., Change in Response of Bridges Isolated with LRBs due to Lead Core Heating, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 921-929, 2011.
- [11] Özdemir, 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*, 41, 1989-2007, 2012.
- [12] Shao, B., Mahin, S. A., Zayas, V., Achieving Targeted Levels of Reliability for Low-rise Seismically Isolated Structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105744, 2019.
- [13] Pant, D. R., Maharjan, M., On Selection and Scaling Ground Motions for Analysis of Seismically Isolated Structures, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15, 633-648, 2016.
- [14] Cancellara, D., Angelis, F. D., Dynamic Assessment of Base Isolation Systems for Irregular in Plan Structures: Response Spectrum Analysis vs Nonlinear Analysis, *Composite Structures*, 215, 98-115, 2019.
- [15] Mavronicola, E. A., Polycarpou, P. C., Komodromos, P., Effect of Ground Motion Directionally on the Seismic Response of Base Isolated Buildings Pounding Against Adjacent Structures, *Engineering Structures*, 207, 110202, 2020.
- [16] Özdemir, G., Akyüz, U., Dynamic Analyses of Isolated Structures Under Bi-directional Excitations of Near-field Ground Motions, *Shock and Vibration*, 19, 505-513, 2012.
- [17] Robinson, W.H., Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(4), 593-604, 1982.
- [18] Kalpakidis, I. V., Constantinou, M. C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearing. I: Theory, *Journal of Structural Engineering*, 135, 12, 1440-1449, 2009.
- [19] Kalpakidis, I. V., Constantinou, M. C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearing. II: Verification of Theory, *Journal of Structural Engineering*, 135, 12, 1450-1461, 2009.
- [20] Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., Warn, G. P., Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading, Technical Report, MCEER-07-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, New York, 2007.
- [21] Quaglini, V., Bocciarelli, M., Gandelli, E., Dubini, P., Numerical Assessment of Frictional Heating in Sliding Bearings for Seismic Isolation, *Journal of Earthquake Engineering*, 18, 1198-1216, 2014.
- [22] Özdemir, G., Lead Core Heating in Lead Rubber Bearings Subjected to Bidirectional Ground Motion Excitations in Various Soil Types, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43, 267-285, 2014.

- [23] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2007.
- [24] Türkiye Deprem Tehlike Haritası. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018. (<https://tdth.afad.gov.tr>) (01 Ocak 2019).
- [25] Yolcu, A., Tanırcan, G., Tüzün, C., Acceleration Displacement Response Spectra for Design of Seismic Isolation Systems in Turkey, *Teknik Dergi*, DOI: <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.511798>.
- [26] Zekioğlu, A., Darama, H., Erkuş, B., Performance-Based Seismic Design of a Large Seismically Isolated Structure: Istanbul Sabiha Gökçen International Airport Terminal Building, *Structural Engineers Association of California*, San Diego, California, 2009.
- [27] Jangid, R. S., Kelly, J. M., Base Isolation for Near-fault Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 691–707, 2001.
- [28] OpenSees, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, ABD, 2010. (<http://opensees.berkeley.edu>).
- [29] Dicleli, M., Performance of Seismic-Isolated Bridges in Relation to Near-Fault Ground-Motion and Isolator Characteristics, *Earthquake Spectra*, 22, 4, 887-907, 2006.
- [30] Blanford, E., Keldrauk, E., Laufer, M., Mieler, M., Wei, J., Stojadinovic, B., Peterson, P. F., Advanced Seismic Base Isolation Methods for Modular Reactors, Final Repot, UCBTH-09-004, Departments of Civil and Environmental Engineering and Nuclear Engineering University of California, Berkeley, California, 2009.
- [31] Çavdar, E., Özdemir, G., Ölçeklendirilen Yakın Saha Deprem Kayıtlarının Farklı Doğrultularda Etkimesi Durumunda Yalıtım Birimi Maksimum Yer Değiştirmelerinde Gözlenen Değişim, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33, 2, 585-598, 2018.
- [32] Özdemir, G., Gülkan, P., Scaling Legitimacy for Design of Lead Rubber Bearing Isolated Structures Using a Bounding Analysis, *Earthquake Spectra*, 32, 1, 345-366, 2016.
- [33] 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.
- [34] Samanta, A., Huang, Y. N., Ground-motion Scaling for Seismic Performance Assessment of High-Rise Moment-Resisting Frame Building, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94, 125-135, 2017.
- [35] Avşar, Ö., Özdemir, G., Response of Seismic-Isolated Bridges in Relation to Intensity Measures of Ordinary and Pulselike Ground Motions, *Journal of Bridge Engineering*, 18, 250-260, 2013.
- [36] Çavdar, E., Özdemir, G., Bayhan, B., Significance of Ground Motion Scaling Parameters on Amplitude of Scale Factors and Seismic Response of Short- and Long-Period Structures, *Earthquake Spectra*, 35(4), 1663-1688, 2019.

- [37] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database, University of California, Berkeley, USA, 2015. (<https://ngawest2.berkeley.edu>).
- [38] Bommer, J. J., Ruggeri, C., The Specification of Acceleration Time-Histories in Seismic Design Codes, *European Earthquake Engineering*, 16(1), 3-17, 2002.
- [39] Malhotra, P. K., Response of Buildings to Near-Field Pulse-Like Ground Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(11), 1309-1326, 1999.
- [40] Chopra, A. K., Chintanapakdee, C., Comparing Response of SDF Systems to Near-Fault and Far-Fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(12), 1769-1789, 2001.
- [41] 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 at Buffalo, New York, ABD, 2008.
- [42] Park, Y. J., Wen, Y. K., Ang, A. H., Random Vibration of Hysteretic Systems Under Bi-Directional Ground Motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 4, 543-557, 1986.
- [43] 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.
- [44] Özdemir, G., Response of Isolated Structures under Bi-directional Excitations of Near-Field Ground Motions, PhD Thesis, Middle East Technical University, Turkey, 2010.