

SİSMİK YALITIMLI YAPILAR İÇİN DEPREM YER HAREKETİ ÖLÇEKLENDİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

K. Atasever¹, H. H. Aydođdu¹ ve B. Erkuş²

¹Doktora Öğrencisi, Deprem Müh. Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maslak

²Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maslak

Email: ataseverk@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan zaman-tanım alanı analizlerinde kullanılan tarihsel yer ivme kayıtlarının spektrum uyumlu hale getirilmesi için kullanılan yöntemlerin, yalıtıcı ve üst yapı tasarımına etkisi karşılaştırılmıştır. İvme kayıtlarının verilen bir spektrumuna uyumlu hale getirilmesi için kullanılan yöntemler hakkında son yıllarda önemli araştırmalar yapılmıştır. Ancak, sismik yalıtımlı yapılarda, bu yöntemlerin tasarımın son haline etkisini doğrudan inceleyen ve karşılaştıran uygulamaya yönelik çalışmalar çok azdır. Bu yöntemlerin sismik yalıtımlı yapı tasarımına etkisini incelemek için Türkiye’de inşa edilmiş 5 katlı yalıtımlı bir yapıya benzer özellikli bir bina örnek olarak oluşturulmuştur. İvme spektrumu için geometrik ortalama ve maksimum yön ölçütleri, ölçeklendirme yöntemi için ise katsayı ile ölçeklendirme ve spektral eşleştirme yöntemleri kullanılmıştır. Örnek yapı için üst yapının doğrusal kesme yayları ve yalıtım elemanlarının bir adet çift-doğrusal eleman olarak modellendiği toplu-kütle modeli ve bu modelin doğrusal olmayan zaman-tanım analizlerini yapabilen bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bununla birlikte modelde yalıtıcının çift yönlü etkileşimi modellenmemiştir. Depremsellik ise benzer bir projede kullanılan ve konu hakkında uzman olan akademisyenlerce hazırlanmış deprem tehlike çalışmasından alınmıştır. Depremsellik çalışmasında yedi adet tarihsel ivme kayıt çifti seçilmiş ve spektral eşleştirme yöntemi kullanılarak bu kayıtlar 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan bir deprem spektrumuna uyumlu hale getirilmiştir. Ölçeklendirme yöntemi için dört adet seçenek incelenmiştir. Bu seçenekler, geometrik ortalama ve maksimum yön spektrumlarını ve verilen bir periyot aralığı için ve bir periyot değeri için ölçeklendirme yöntemlerini içermektedir. Her bir seçenek için doğrusal olmayan zaman-tanım analizleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar birbirleri ile ve eşdeğer statik kuvvet yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Nümerik analizler, bir katsayı ile ölçeklendirme yönteminin, spektral eşleştirme yönteminden daha güvenli sonuçlar verdiğini göstermektedir. Eşdeğer statik kuvvet yöntemi tüm zaman-tanım analiz sonuçlarına göre daha yüksek yalıtım yerdeğiştirme ve kuvvetleri üretmiştir. Ancak genel olarak tüm ölçeklendirme yöntemlerinin yapı mühendisleri tarafından doğru anlaşıldıkları, uygulandıkları ve incelendikleri sürece, yalıtımlı yapı tasarımına uygun oldukları gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: sismik yalıtım, ölçeklendirme, maksimum yön, geometrik ortalama, doğrusal olmayan analiz

COMPARISON OF GROUND MOTION SCALING METHODS FOR SEISMIC ISOLATED STRUCTURES

ABSTRACT:

In this paper, methods of obtaining spectrum-compatible versions of historical ground acceleration records data that are used in the nonlinear time-history analyses of base-isolated structure are compared from a perspective of isolation and superstructure design. In recent years, research on methods of deriving spectrum-compatible ground acceleration data has increased significantly. However, research on comparison and the direct effects on the final state of the design of base-isolated structures with practical considerations is scarce. To investigate the effect of these methods on the design of a base-isolated structure, a sample structure that is similar to a five-story seismic isolated structure constructed in Turkey recently is established. For measures of the response spectrum, geometric mean and maximum direction, for method of scaling, scaling with a factor and spectral matching methods are considered. A computer program is developed to make nonlinear time history analysis of selected building. A lumped mass model and a program that can conduct the nonlinear

analyses of this model are developed, where the superstructure is modelled by linear shear springs and isolation layer is modelled by a bilinear spring element. Bidirectional interaction of isolators is not considered. Seismicity is taken from a seismic hazard study prepared for similar project by academicians with expertise on the subject. In this study, seven ground motion records are selected, and these records are spectrally matched to a target spectrum with a 2% probability of exceedance in 50 years. Four possible scaling options are investigated. These options include target spectrum with geometric mean and maximum direction measure and a scaling for a period range and for a single period. Nonlinear time-history analyses are conducted for all scaling and spectral matching options, and results are compared with each other and with results of an equivalent lateral static analysis. Numerical analyses show that scaling methods are more conservative than spectral matching method. Equivalent lateral static analysis procedure results have higher isolation displacement and forces. However, in general it is considered that all methods are suitable for design of base-isolated structures as long as they are understood well, applied and elaborated correctly by the structural engineer.

KEYWORDS: seismic isolation, ground motion scaling, maksimum direction, geometric mean, nonlinear analysis

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımında iki farklı yaklaşımdan söz etmek mümkündür. Tipik yapılara daha uygun olan ilk yaklaşımda, reçete-tabanlı yönetmelikler kullanılarak tasarım yapılır. Bu yaklaşımda, ana hedef can kaybının önlenmesidir ve yapıda sünek davranışı sağlayacak detaylar kullanılması şartı ile deprem kuvvetlerinin azaltılmasına izin verilir. Bundan dolayı tasarım depremi altında yapıda önemli oranda hasar oluşması beklenir. İkinci yaklaşım özellikle maliyeti yüksek yapıların ve/veya deprem sonrası kullanılması planlanan yapıların (hastaneler, ulaşım yapıları, veri merkezleri vb.) tasarımı için kullanılmaktadır. Bu tip yapıların reçete-tabanlı yönetmeliklere göre tasarlanması ve tasarım depreminden sonra hasarlı olmaları uygun olamamakta, daha iyi deprem performansı göstermeleri, hatta belli deprem seviyelerinde elastik kalmaları beklenmektedir. Ancak, geleneksel yapı sistemleri ile yüksek performanslı bina tasarımı hem zordur hem de yapı maliyetini büyük oranda arttırmaktadır. Bu nedenle, yapıda yüksek sismik performans hedefleniyorsa, sismik yalıtım gibi ileri yapı teknolojileri tercih edilmektedir.

Sismik yalıtımlı yapıların davranışı ve tasarımı, tipik yapılardan oldukça farklıdır. Sismik yalıtımlı yapılarda üst yapı, üst yapıya göre daha uzun periyotlara sahip ve çevrimsel davranış ile enerji sönmüleyebilen yalıtıcılar ile zeminden ve yer hareketlerinden yalıtılır. Uygun bir zeminde iyi tasarlanmış bir yalıtım sistemi, üst yapıya iletilen kuvvetleri önemli oranda azaltarak üst yapının yüksek performans hedeflerine ulaşmasını kolaylaştırır. Ancak, yalıtım sisteminin ileri doğrusal olmayan davranışından dolayı tipik yapı tasarımından farklı olarak ileri analizlerin yapılması gerekmektedir ki bu ise boyutlandırmanın önemli oranda tamamlanmış olmasını gerektirir. Bundan dolayı, sismik yalıtımlı yapıların tasarımı genelde üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, yalıtım elemanları için ön tasarım yapılır. İkinci aşamada seçilen yalıtıcı için üst yapı ve alt yapı tasarımı gerçekleştirilir ve yalıtıcı tasarımı teyit edilir. Eğer seçilen yalıtıcı üst yapı tasarımı için uygun değilse birinci ve ikinci aşamalar tekrarlanır. Üçüncü aşamada ise ileri analizler ile tüm yapı davranışı ve performansı incelenerek tasarım teyit edilir.

Sismik yalıtımlı yapı tasarımının tüm aşamalarında karşılaşılan en önemli konulardan birisi deprenselliştir. Deprenselliğin yalıtımlı yapılar açısından iki önemli boyutundan bahsetmek mümkündür. Birincisi, tasarım spektrumunun tanımlanmasında kullanılan ölçüttür. Günümüzde uygulamada ve yönetmeliklerde iki temel ölçüt kullanılmaktadır: Geometrik ortalama (GO) ve maksimum yön (MY). Tasarım spektrumu, yalıtımlı yapı tasarımının birinci aşamasında eşdeğer statik kuvvet yöntemi kullanılarak yalıtıcı yer değiştirmelerinin ve kuvvetlerinin hesabında, ikinci aşamada ise mod birleştirme yöntemi kullanılarak üst ve alt yapı boyutlandırılması ve detaylandırılmasında kullanılır. Tasarımcının her iki ölçütü iyi anlayıp, tasarım aşamalarının hangisinde nasıl uygulaması gerektiğini anlaması gerekmektedir. Bu nokta aynı zamanda aktif araştırma konusu olup, farklı yaklaşımlardan söz etmek mümkündür. Deprenselliğin diğer bir boyutu, üçüncü aşamada doğrusal olmayan zaman-tanım alanı (DO-ZTA) analizlerinde kullanılacak olan tarihsel deprem kayıtlarının öngörülen spektrumu uyumlu hale getirilmesidir (bu makalede uygunlaştırma olarak adlandırılmıştır). Bu konu üzerine son yıllarda önemli araştırmalar yapılmış olup birçok yöntem önerilmiştir. Uygulamada ise kullanılan iki temel yöntem ölçeklendirme (ÖLÇK) ve spektral eşleştirmedir (SP-EŞ).

Depremselliğin spektrum ölçütü ve uygunlaştırılması üzerine çeşitli araştırma ve uygulamalar mevcuttur. Spektrum ölçütlerinden GO, genelde özellikleri birbirine bağlı fakat farklı olan iki yöndeki deprem hareketini bir spektrum ile ifade etmesinden dolayı özellikle sismologlar açısından tercih edilen bir ölçüttür (Abrahamson ve Shedlock, 1997; Boore ve diğ., 2006). GO birçok deprem yönetmeliğinde kullanılmıştır ve kullanılmaktadır (ASCE/SEI-7-05, 2005; TBC2006, 2006; TDY-Taslak, 2017). MY spektrumu iki yönlü depremin üst yapıda oluşturabileceği maksimum etkileri göz önüne alması dolayısı ile önerilmiş (Huang ve diğ., 2008) ve bazı yönetmeliklerde kullanılmıştır (ASCE/SEI-7-10, 2010; ASCE/SEI-7-16, 2016). Deprem kayıtlarının uygunlaştırılması ile ilgili olarak literatürde hem ÖLÇK üzerine hem de SP-EŞ üzerine birçok çalışma mevcuttur (Kalkan ve Chopra, 2010; GCR-11-917-15, 2011). ÖLÇK yöntemi, deprem kaydının bir katsayı ile çarpımıdır. Bu katsayı belirlenirken, hedef spektrum ve kayıt spektrumu arasındaki toplam hatanın belli bir periyot aralığında ve verilen bir ağırlık fonksiyonu ile en aza indirilmesi hedeflenir. SP-EŞ yönteminde deprem kayıtlarının frekans içeriği değiştirilerek, kayıt spektrumunun hedef spektrum ile bire-bir eşleştirilmesi hedeflenir (Atik ve Abrahamson, 2010).

Genel olarak bakıldığında hem spektrum ölçütleri hem de uygunlaştırma yöntemlerinin doğru uygulanması için konu hakkında uzmanlık gerekmektedir. Ancak, uygulamada yapı mühendisleri yöntemlerin ve tanımlamaların genel prensiplerini anlayarak, uygun noktada uygun yöntemi seçebilmelidirler. Örnek olarak, ÖLÇK yöntemi deprem kaydının frekans içeriğine müdahale etmediğinden gerçek deprem etkileri altında yapı davranışının ne olacağı hakkında bir çalışma için daha uygun olabileceği düşünülebilir. ÖLÇK yöntemi ile elde edilen deprem kaydının spektrumu tasarım spektrumundan çok farklılık göstereceğinden farklı periyotlarda tasarım için gerekli deprem etkisinden daha fazla ya da daha az etki yaratacağı ve ortalama davranıştan sapmanın ve saçılımın daha yüksek olacağı tartışılabilir. Bundan dolayı tasarım için SP-EŞ yönteminin daha uygun olduğu düşünülebilir. Benzer tartışma spektra ölçütü için de yapılabilir. MY spektrumu yalıtıcı yerdeğiştirmelerinin hesabına daha uygun olması ile beraber, doğru hesap yöntemi ile GO spektrumu da yalıtıcı yerdeğiştirmelerinin hesabında kullanılabilir. Örnek olarak taslak Türk Deprem Yönetmeliğinde GO spektrumu kullanılmış ve yalıtıcı yerdeğiştirmeleri hesaplanırken GO spektrumu ile elde edilen yerdeğiştirmeler 1.3 katsayısı ile çarpılmıştır. Hem uygunlaştırma yöntemi hem de spektrum ölçütünü ilgilendiren konu ise, SP-EŞ yönteminin GO spektrumuna daha uygun oluşu ve MY spektrumuna doğrudan uygulanamayışıdır. ÖLÇK yöntem ise hem GO hem de MY spektrumlarına rahatça uygulanabilir. Görüldüğü üzere, yapı mühendisleri açısından farklı yöntemlerin yapı tasarımına nasıl etki edeceğinin anlaşılması önemlidir. Her yöntem hakkında detaylı irdelemelerin olduğu araştırmalar literatürde mevcut olup, yalıtımlı yapılarda bu yöntemlerin tasarımın son haline nasıl etkisi olduğu yönünden araştırmalar fazla değildir (Pant ve Maharjan, 2016). Ancak bu araştırmalar tasarım işleminin tümüne odaklanmamıştır. Bahsi geçen yöntemlerin gerçek bir proje de uygulanmış hallerinin karşılaştırılması özellikle uygulamada bulunan mühendisler açısından çok faydalı olacaktır.

Bu çalışmada, deprem yalıtımlı yapılarda DO-ZTA analizlerinde kullanılan ivme kayıtlarının ivme spektrumuna uyumlu hale getirilmesi (uygunlaştırma) için kullanılan yöntemler yalıtım üst yapı tasarımına etkisi bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, uygulamada en çok kullanılan uygunlaştırma yöntemi olan ölçeklendirme (ÖLÇK) ve spektral eşleştirme (SP-EŞ) yöntemleri, ve spektrum ölçütü olarak geometrik ortalama (GO) ve maksimum yön (MY) ölçütleri kullanılmıştır. Yöntemlerin incelenmesi için Türkiye’de inşa edilmiş beş katlı, kurşun-kaucuk tipi yalıtıcı kullanılan bir bina örnek olarak seçilmiştir. Depremsellik ise, başka bir yalıtımlı yapı projesinde kullanılan ve konu hakkında uzman kişilerce hazırlanmış olan bir çalışmadan alınmıştır. Örnek yapı 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem seviyesi için eşdeğer statik yöntem (ESK) ve 7 adet tarihsel deprem için doğrusal olmayan zaman-tanım alanı (DO-ZTA) analizlerine tabi tutulmuştur. DO-ZTA analizlerinde GO ve MY spektrumlarına iki türlü ölçeklendirme yapılmıştır: verilen bir periyot aralığı için ve verilen bir periyot değeri için. SE yöntemine tabi tutulmuş deprem kayıtları depremsellik çalışmasından alınmıştır. DO-ZTA analizleri için üst yapının kesme yayaları ile yalıtıcıların bir adet çift-doğrusal eleman ile ifade edildiği bir model kullanılmıştır. Bu model için Newmark- β ve dengelenmemiş kuvvet düzeltme yöntemlerinin kullanıldığı bir program geliştirilmiştir. Örnek yapı 5 farklı yöntem ile deprem spektrumuna uyumlu hale getirilen 7 yer ivme kayıt çifti için analize tabi tutulmuştur. Sonuçlar grafikler ve tablolar halinde sunularak karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

Bu bölümde, çalışmada kullanılan modelleme, analiz ve uygunlaştırma yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

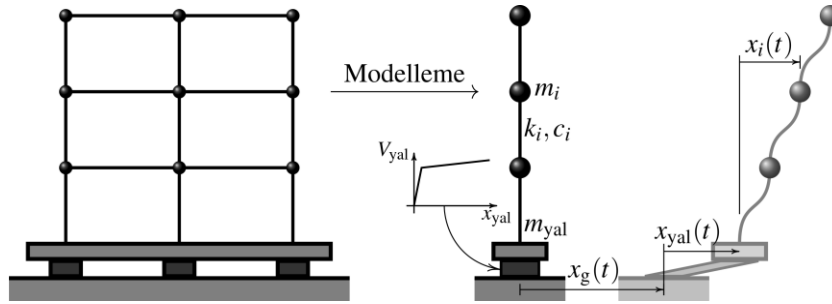
2.1. Sismik Yalıtımlı Yapı Modellenmesi

Sismik yalıtımlı yapıların modellenmesinde çeşitli yöntemler mevcuttur (sonlu elemanlar vb.). Bu çalışmada katların toplu kütle ve kesme yayları, yalıtıcıların ise bir adet doğrusal olmayan eleman ile ifade edildiği bir model kullanılmıştır (Şekil 1.). Modelleme ile ilgili detaylar literatürde mevcut olup (Nagarajaiah ve diğ., 1991; Erkus ve Johnson, 2006) bu bölümde denklemler kısaca verilmiştir. Doğrusal olmayan eleman, tipik çift doğrusal eleman olarak tanımlanmıştır. Yapı her iki yönde de aynı davranışı göstermektedir. Bundan dolayı denklemler sadece bir yön için verilmiştir. Bu modelde, x_{yal} yalıtım yerdeğiştirmesi; x_i , m_i , k_i ve c_i i . katın sırası ile yalıtım döşemesine göre yerdeğiştirmesi, kütlesi, rijitliği ve sönümlenme sabiti; V_{yal} yalıtım kesme kuvveti ve x_g yer yerdeğiştirmesidir. Bu sistemin hareket denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) + \mathbf{F}_s(t) = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_u \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T \mathbf{M}_u \mathbf{R} + m_{yal} & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_u \\ \mathbf{M}_u \mathbf{R} & \mathbf{M}_u \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{yal} & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_u \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T \mathbf{M}_u \mathbf{R} + m_{yal} \\ \mathbf{M}_u \mathbf{R} \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

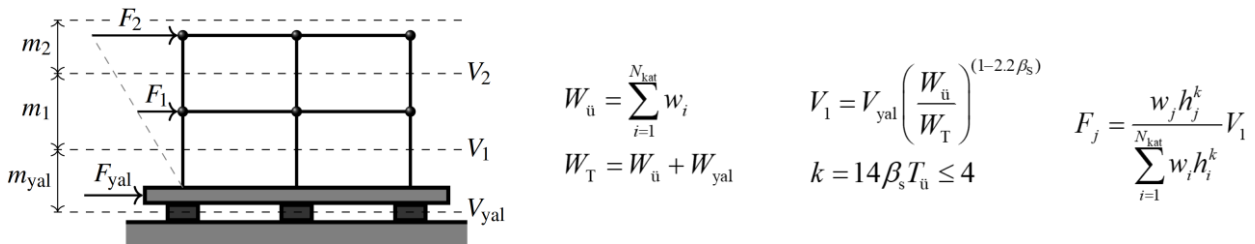
Burada, \mathbf{M}_u , \mathbf{C}_u ve \mathbf{K}_u üst yapı kütle, sönümlenme ve rijitlik matrisi; m_{yal} yalıtım döşeme kütlesi; c_{yal} yalıtım sönümlenmesi; \mathbf{R} "1" sayısından oluşmuş $N_{kat} \times 1$ boyutunda vektör ve \mathbf{F}_s doğrusal olmayan yalıtım kuvvetidir



Şekil 1. Bu çalışmada kullanılan doğrusal olmayan yalıtımlı yapı modellemesi

2.2. Eşdeğer Statik Kuvvet Yöntemi

ESK yönteminde amaç, yalıtımlı yapıyı eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) olarak ifade etmektir. Bunun için tüm yapı doğrusal olmayan bir TSD sisteme çevrilir. TSD sistemin kütlesi, yalıtım seviyesi üstünde kalan tüm yapı kütesidir. TSD yayı ise, tüm yalıtıcıların davranışlarını ifade eden doğrusal olmayan bir yaydır (çift-doğrusal yay). Elde edilen TSD sistemin doğrusal olmayan yayı eşdeğer doğrusal bir yay ve eşdeğer bir viskoz sönümlenmenin toplamı olarak ifade edilir. Eşdeğer ya da efektif olarak adlandırılan yay rijitliği maksimum yerdeğiştirmeye denk gelen sekant rijitliktir ($k_{eş}$). Bu rijitliğe denk gelen TSD sistem periyodu eşdeğer ya da efektif periyot olarak adlandırılmaktadır ($T_{eş}$). Eşdeğer sönümlenme sabiti ise eşdeğer sönümlenme ile sönümlenen enerjinin çift-doğrusal yayın sönümlendiği enerjiye eşit olması ile bulunur: $\xi_{eş} = E_{sön} / 4\pi E_{bse}$. Burada, $E_{sön}$ yay tarafından bir çevrimde sönümlenen enerji; E_{bse} maksimum yerdeğiştirme anında eşdeğer doğrusal yayda depolanan birim şekildeğiştirme enerjisi ve $\xi_{eş}$ eşdeğer viskoz sönümlenme sabitidir.



Şekil 2. ESK yönteminde ASCE/SEI-41-13 (2014)'de belirtilen kat kuvvetleri dağılımı

ESK yönteminde kullanılacak eşdeğer TSD sistemin parametrelerinin bulunması için maksimum yalıtıcı yerdeğiştirmesinin bilinmesi gerekir. Bu değer genellikle bir spektrum ile ifade edilen depremselliğe bağlıdır. Bu değerlerin bulunması için yinelemeli bir yöntem uygulanır. Bu yöntemde ilk önce $T_{eş}$ için bir öngörü yapılır.

Bu periyoda denk gelen eşdeğer yay kuvveti ve yerdeğiştirme verilen spektrumdan elde edilir. Elde edilen yeni yerdeğiştirme için eşdeğer sönümleme ve eşdeğer periyot değerleri hesaplanır. Spektrum bu yeni sönümleme için azaltma katsayıları ile güncellenir ve yeni periyot bilgisi ile yerdeğiştirmeler tekrar hesaplanır. Sönüm azaltma katsayı bu çalışmada AASHTO (2010)'den alınmıştır. Bu yineleme hedeflenen bir tolerans sağlanana kadar devam eder. Bu şekilde yalıtıcılarda oluşan yerdeğiştirme ve kesme kuvveti hesaplanır. Üst yapı kuvvetlerini bulmak için gerekli olan kat kuvvetlerinin dağılımı farklı yönetmeliklerde farklı olabilir. Örnek olarak ASCE/SEI-41-13 (2014)'de kullanılan York ve Ryan (2008) çalışmasına dayanan yöntem Şekil 2'de gösterilmiştir.

2.3. Doğrusal Olmayan Zaman-Tanım Alanı (DO-ZTA) Analizleri

Bu çalışmada doğrusal olmayan analiz için Newmark- β (Newmark, 1959) ve dengelenmiş kuvvet düzeltme (Powell, 1973) yöntemleri kullanılmıştır. Tüm yöntemin detayları Erkus (2004)'da verilmiş olup burada kısaca özetlenmiştir. Denk. (1) ile verilen denklemin t anındaki hali ve $t + \Delta t$ anındaki halinden çıkarılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}}' + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}}' + \mathbf{K}\Delta\mathbf{x}' + \Delta\mathbf{F}_s' = \Delta\mathbf{P}' \quad (3)$$

Burada $\Delta[\]'$, büyüklüğün $t + \Delta t$ ve t anlarındaki değerleri arasındaki farklı göstermektedir. Newmark- β yöntemi ile aşağıda gösterilen artımsal ve cebirsel forma çevrilebilir:

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{x}' + \Delta\mathbf{F}_s' = \Delta\hat{\mathbf{P}}' \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\beta}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{C}, \quad \Delta\hat{\mathbf{P}}' = \Delta\mathbf{P}' + \left(\frac{1}{\beta\Delta t}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta}\mathbf{C}\right)\dot{\mathbf{x}}' + \left[\frac{1}{2\beta}\mathbf{M} + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\mathbf{C}\right]\ddot{\mathbf{x}}' \quad (5)$$

Burada, β ve γ Newmark parametreleridir. Analizde, her zaman adımında için artımsal doğrusal olmayan kuvvet için bir kabul edilir. Bu kabul, sistem tanjant rijitliği üzerinden olabilir. Bu durumda

$$\Delta\mathbf{F}_s^{r,kabul} = \mathbf{K}_T\Delta\mathbf{x}^{r,kabul} \quad \text{ve} \quad (\mathbf{A} + \mathbf{K}_T)\Delta\mathbf{x}^{r,kabul} = \Delta\hat{\mathbf{P}}' \quad (6)$$

olur. Kabul edilen yer değiştirme için, bünye fonksiyonlarından doğrusal kuvvet $\Delta\mathbf{F}_s^{r,\text{çiftdoğ}}$ hesaplanabilir. Bu durumda, t adımı için dengelenmemiş kuvvet şu şekilde olur:

$$\Delta\mathbf{F}_s^{r,denge} = \Delta\mathbf{F}_s^{r,kabul} - \Delta\mathbf{F}_s^{r,\text{çiftdoğ}} \quad (7)$$

Dengelenmemiş kuvvet düzeltmesi yönteminde, bu kuvvet bir sonraki zaman adımında ek dış kuvvet olarak yapıya etkilerek sistem çözülür:

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{x}^{r+1} + \Delta\mathbf{F}_s^{r+1} = \Delta\hat{\mathbf{P}}^{r+1} + \Delta\mathbf{F}_s^{r,denge} \quad (8)$$

2.4. Tasarım Spektrumları için Kullanılan Ölçütler

Bu çalışmada spektrum ölçütlerinden geometrik ortalama (GO) ve maksimum yön (MY) ölçütleri kullanılmıştır. GO spektrumu şu şekilde tanımlanır:

$$S_{GO}(T) = \sqrt{S_x(T) \times S_y(T)} \quad (9)$$

Burada $S_x(T)$ ve $S_y(T)$ sırası ile X - ve Y - yönüne denk gelen spektrumlardır. MY spektrumu her iki yönde aynı özelliğe sahip iki adet tek serbestlik dereceli sistemden meydana gelen iki serbestlik dereceli bir sistemde iki yöndeki deprem etkisi altında oluşan maksimum kuvvet büyüklüğünün kütleyle oranı olarak hesaplanır (Şekil 3a). Depremsellik çalışmalarında uygulanan bir yöntem ise; çalışmanın GO ortalama üzerinden yapılması, MY spektrumunun ise GO spektrumunun bir katsayı ile çarpımı ile elde edilmesidir. Bu çalışmada kullanılan katsayılar Huang ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmaya dayanmaktadır (Şekil 3b).

2.5. Uygunlaştırma Yöntemleri

Bu çalışmada incelenen uygunlaştırma yöntemleri bir katsayı ile ölçeklendirme (ÖLÇK) ve spektral eşleştirme (SP-EŞ) yöntemleridir. ÖLÇK yönteminde deprem ivme kaydı bir skalar ile çarpılır. Bu skaların ne olması

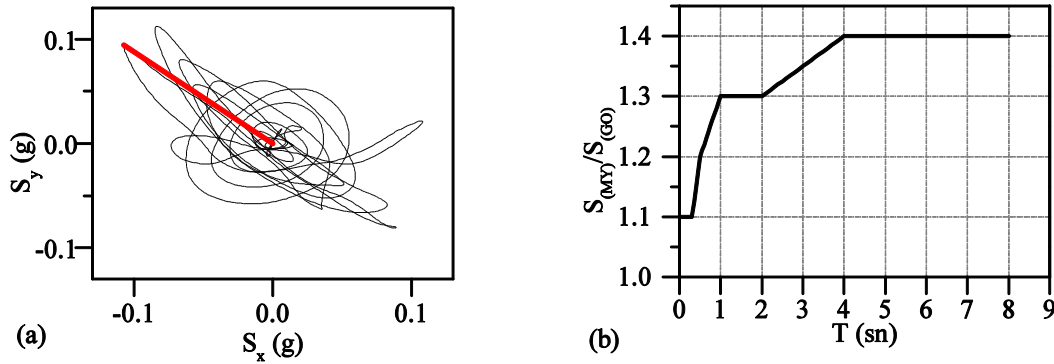
gerektiğine dair iki yöntem vardır. İlk yöntemde bu skalar verilen bir adet periyot (örnek: T_1) için hedef spektrum değerini sağlayan değerdir (Şekil 4a). Matematiksel olarak bu skalar şu şekilde gösterilebilir:

$$SF_{T_1} = S^{\text{Hedef}}(T_1) / S^{\text{Asıl}}(T_1) \quad (10)$$

Burada $S_{\text{hedef}}(T_1)$ hedef spektrum ve $S_{\text{asıl}}(T_1)$ asıl ivme kaydının spektrumudur. İkinci yöntemde, skalar, hedef spektrum ile ölçeklendirilmiş kayıt spektrumu arasında kalan alanı verilen bir periyot aralığında (örnek, $T_A < T < T_B$) yaklaşık olarak sıfırlayan değerdir (Şekil 4b). Bu alan hesaplaması normal ve logaritmik bir yöntemler hesaplanabilir. Bu çalışmada logaritmik yöntem kullanılmış olup bu ölçek katsayısı şu şekilde bulunmuştur.

$$\ln SF_P = \left(\int_{T_A}^{T_B} w(T) \ln \left(S^{\text{Hedef}}(T) / S^{\text{Asıl}}(T) \right) dT \right) / \int_{T_A}^{T_B} w(T) dT \quad (11)$$

Burada, $w(T)$ bir ağırlık fonksiyonudur ve $[\cdot]_P$ ifadesi periyot aralığını vurgulamak için kullanılmıştır. Bu çalışmada ASCE/SEI-7-10 (2010) tarafından önerilen $0.2T_{\text{eff}} < T < 1.5T_{\text{eff}}$ aralık kullanılmıştır. Burada T_{eff} öngörülen bir depremsellik için elde edilen eşdeğer sistemin efektif periyodudur.



Şekil 3. MY Spektrumu a) MY'ün elde edilmesi b) MY/GO oranları Huang ve diğ. (2008)

Bu çalışmada spektral eşleştirme yöntemi olarak Lilhanand ve Tseng (1987) çalışmasında açıklanan, (Hancock ve diğ., 2006) çalışması ile güncellenen ve Atik ve Abrahamson (2010) çalışmaları ile son halini alan yöntem kullanılmıştır (Şekil 4c). Bu yöntemde ilk önce hedef ve asıl spektrum arasındaki fark spektral uyumsuzluk olarak tanımlanır: $\Delta R(T_i) = S^{\text{Hedef}}(T_i) - S^{\text{Asıl}}(T_i)$. Burada amaç, verilen bir periyotta uyumsuzluk değerine eşit spektral ivme yaratacak bir ivme kaydını $\delta \ddot{x}_g(t)$, hesaplamak ve asıl deprem kaydına ekleyerek, uyumsuzluğu gidermektir. M adet dalgacık fonksiyonu $f(t)$, ve bu fonksiyonların katsayıları b , cinsinden ifade edilir.

$$\delta \ddot{x}_g(t) = \sum_{j=1}^M b_j f_j(t) \quad (12)$$

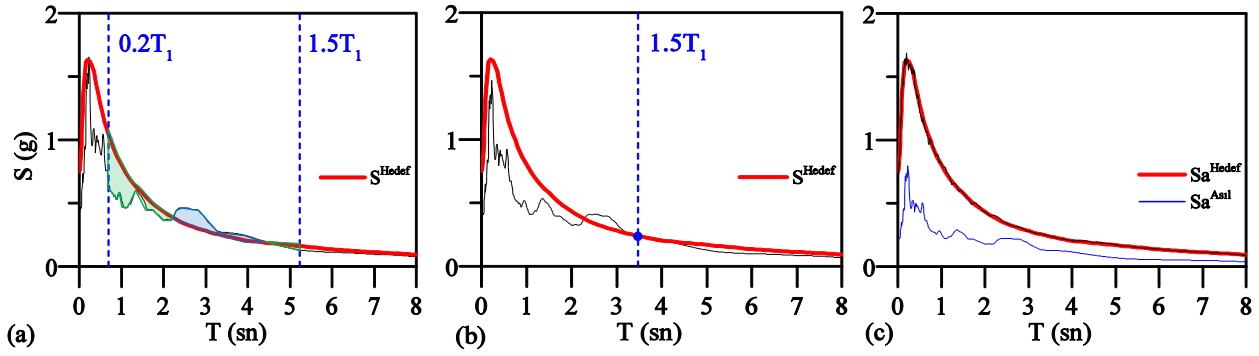
i , numaralı dalgacık fonksiyonunun T_i periyodunda oluşan maksimum yerdeğiştirme anındaki değeri c_{ij} olarak ifade edilirse, spektral uyumsuzluk ve dalgacık fonksiyonları ile çarpılmaları durumunda spektral uyumsuzluğu verecek katsayıların matris hali ve şu şekilde gösterilebilir:

$$\Delta R(T_i) = \sum_{j=1}^M b_j c_{ij} \quad \text{ve} \quad \mathbf{b} = \mathbf{C}^{-1} \Delta \mathbf{R} \quad (13)$$

Burada b katsayılarının bulunması için ardışık bir yöntem takip edilir. Atik ve Abrahamson (2010) çalışmasında asıl yöntemde kullanılan dalgacık fonksiyonları yerine konik kosinüs fonksiyonu olarak adlandırılan ve deprem kayıtlarının durağan olmayan özelliğini koruyan bir dalgacık fonksiyonu önermişlerdir.

3. SAYISAL ÖRNEK VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada kullanılan örnek yapı beş katlı yalıtımlı bir yapı olup doğrusal olmayan analiz için geliştirilen model özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Üst yapı sönümlenme matrisi tüm modal sönümlenme oranı %5 olacak şekilde belirlenmiştir. Örnek yapı sahasına yakın bir sahaya özel olarak geliştirilen olasılıksal depremsellik çalışması kullanılmıştır. Bu çalışma neticesinden elde edilen spektrumlar, Şekil 5'de gösterilmiştir, burada D1, D2 ve D3, 50 yılda aşılma olasılıkları sırası ile %2, %10 ve %50 olan depremlerdir.



Şekil 4. Uygunlaştırma yöntemleri a) Periyot aralığı ve b) Periyot değeri için ölçeklendirme, c) SP-EŞ

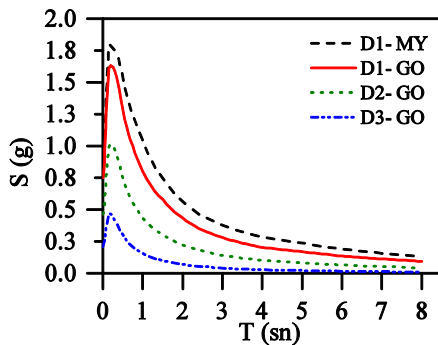
Tablo 1. Örnek yapı özellikleri

Seviye	H (m)	Kütle (ton)	k_i (kN/m)	Yalıtım Özellikleri	
5.Kat	4.5	4335	2432279	k_1 (kN/m)	915263
4.Kat	4.5	5036	3717489	k_2 (kN/m)	77470
3.Kat	4.5	5725	4280883	F_y (kN)	17390
2.Kat	4.5	5773	4485004	Kütle (ton)	7355
1.Kat	5.1	5965	4149892		

Tablo 2. Eşdeğer statik analiz sonuçları

Spektrum	x_{yal} (m)	$\xi_{eş}$	$T_{eş}$ (sn)	F_{yal} (kN)	F_{yal} / W_T (g)	F_1 (kN)	$F_1 / W_{ü}$ (g)
D1-GO	0.48	0.18	3.49	53089	0.16	45944	0.17
D1-MY	0.79	0.13	3.72	77387	0.23	65020	0.25
MY/GO	1.65	0.72 (1.38)	1.07	1.46	1.44	1.42	1.47

Örnek yapı 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremsellik için ASCE/SEI-41-13 (2014)' de açıklanan ve detayları Şekil 2'de verilen ESK yöntemi ile çözümlenmiş ve sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde ilk dikkat çekici sonuç, MY spektrumu üzerinden yapılan ESK yöntemi oldukça yüksek yerdeğiştirmeler üretmiştir. Bu yerdeğiştirme GO spektrumu ile elde edilen yerdeğiştirmenin 1.65 katıdır. Bu oran Şekil 3b'de gösterilen ve eşdeğer sistem periyoduna denk gelen orandan yaklaşık olarak %20 daha fazladır. Bu sonucun aksine MY spektrum analizi ile elde edilen kuvvetler GO spektrumundan elde edilen kuvvetlerin yaklaşık olarak 1.45 katıdır. Bu değerler Şekil 3b'de verilen değerlere daha yakın değerlerdir. Bu sonuç ESK yönteminin uzun periyotlarda hassasiyetini ve kesinliği kaybetmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, sönüm azaltma yönteminin de etkisi olduğu düşünülebilir. Diğer gözlemlenen konu yalıtım seviyesi normalleştirilmiş kat kesme kuvvetlerinin 1. kat kuvvetlerine yakın olmasıdır. Ancak, birinci kat kuvvetleri yalıtım kuvvetlerinden daha küçüktür.



Şekil 5. Kullanılan depremsellik

Tablo 3. Yer hareketleri ve özellikleri

Kayıt ¹	Deprem	İstasyon	Süre	Büyük.	Uzak.
RSN882	Landers, 1992	North Palm Sp.	99.8 sn	7.28 M	26.8 km
RSN1110	Kobe, 1995	Morigawachi	90.0 sn	6.90 M	24.8 km
RSN1166	Kocaeli, 1999	İzmit	30.0 sn	7.51 M	30.7 km
RSN1762	Hector Mine, 1999	Amboy	60.0 sn	7.13 M	43.1 km
RSN3758	Landers, 1992	Thous. Palms P. O.	56.9 sn	7.28 M	36.9 km
RSN5836	El Mayor, 2010	El Centro, M. G. A.	87.5 sn	7.20 M	26.8 km
RSN6953	Darfield, 2010	Pages Rd. Pump St.	54.0 sn	7.00 M	24.8 km

1: Tüm depremlerin fay tipi yatay atılımlı faydır.

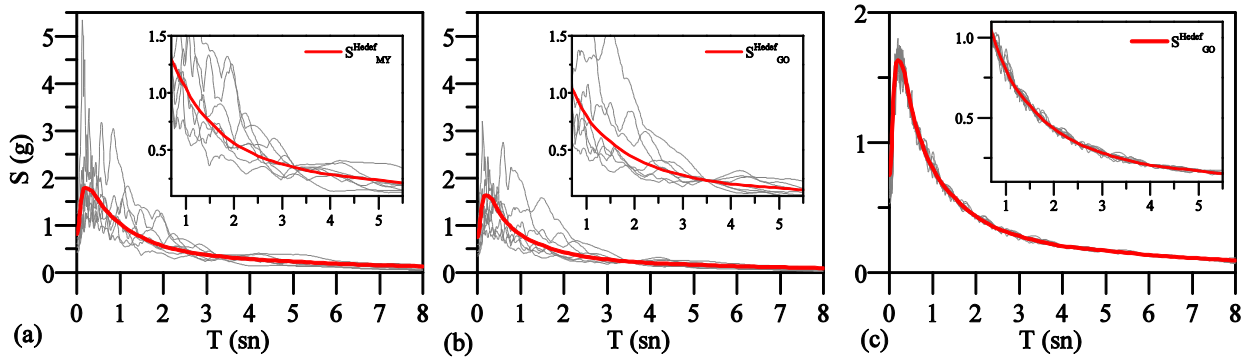
Tablo 4. Ölçeklendirme yöntemleri

Kısaltma	Yöntem	Periyot	Hedef	Çarpan
P-GO	ÖLÇK	$0.2T_{eş}-1.5T_{eş}$	S_{GO}	$SF_{P,GO}$
P-MY	ÖLÇK	$0.2T_{eş}-1.5T_{eş}$	S_{MY}	$SF_{P,MY}$
T ₁ -GO	ÖÇLK	$T_{eş}$	S_{GO}	$SF_{T_1,GO}$
T ₁ -MY	ÖLÇK	$T_{eş}$	S_{MY}	$SF_{T_1,MY}$
SP-EŞ	SP-EŞ	0 sn – 8 sn	S_{GO}	-

Tablo 5. Ölçeklendirme sonuçları

Kayıt	$SF_{P,GO}$	$SF_{P,MY}$	$SF_{T_1,GO}$	$SF_{T_1,MY}$	Maks / Min
RSN6953	2.074	1.899	1.835	1.662	1.25
RSN3758	4.199	4.494	3.266	4.102	1.38
RSN1762	2.747	2.950	2.644	2.389	1.23
RSN1166	4.356	4.492	5.582	7.030	1.61
RSN1110	3.138	3.264	4.303	3.699	1.37
RSN882	5.375	5.825	5.412	5.358	1.09
RSN5836	2.752	2.718	2.482	2.391	1.15

Doğrusal olmayan analizler için depremsellik çalışması kapsamında bilgileri Tablo 3’de verilen 7 adet deprem seçilmiştir. Bu depremler PEER-GMD (2016) yer hareketi veri tabanından alınmıştır. Bu depremler için hedef spektrumuna ölçeklendirme işlemi yapılmıştır. Ölçeklendirme işlemi yapılırken, GO ve MY spektrumları kullanılmış, bir periyot aralığı ve bir periyot değeri için ölçeklendirmeler yapılmıştır. Bu işlemlerin tanımları ve sonuçları Tablo 4 ve Tablo 5’te sunulmuştur. Ölçeklendirme sonuçları grafiksel olarak Şekil 6a ve Şekil 6b’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, ölçeklendirme yöntemi ile elde edilen katsayıların birbirlerinden önemli oranda farklı olabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bazı ölçek değerleri 5 mertebelerinde, bir tanesi de 7 mertebesindedir. Bu değerler, seçilen depremlerin büyüklüğü ve tipi ne kadar uygun olsa bile, ölçeklendirme yöntemlerinin yalıtımlı yapılarda, çok yüksek değerler verebileceğinin iyi bir göstergesidir. RSN1166 kaydında en büyük ile en küçük ölçek katsayıları arasındaki oran 1.61’dir. Ancak RSN882 kaydı için bu oran 1.09’dur. Ölçek katsayılarındaki bu farklılığın DO-ZTA analizlere olan etkisi ilerleyen bölümde irdelenecektir. Depremsellik çalışmasında seçilen deprem kayıtlarına yukarıda açıklanan SP-EŞ yöntemi uygulanmış ve eşleştirilen deprem kayıtları elde edilmiştir. Eşleştirme yönteminin sonuçları grafiksel olarak Şekil 6c’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, SP-EŞ yöntemi hedef spektruma en yakın spektrumu elde edilmiştir. Ancak, depremin doğal özellikleri (örnek farklı periyotlarda sapma) de bu işlem ile değişmiştir.



Şekil 6. Uygunlaştırma sonuçları a) P-MY, b) T1-GO ölçeklendirme ve b) SP-EŞ yöntemleri

Elde edilen beş adet yedi deprem kayıt çifti kullanarak DO-ZTA analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen yalıtım yerdeğiştirmeleri ve üst kat ivmeleri Tablo 6’da, elde edilen yalıtım seviyesi, 1. kat, 3. kat ve 5. kat kesme kuvvetleri Tablo 7’de gösterilmiştir. Bu sonuçlar ile ilk gözlemlenen, ÖLÇK yöntemleri ile elde edilen yerdeğiştirmelerin SP-EŞ yöntemine göre daha yüksek olduğudur. Bu fark MY yerdeğiştirmesi için %34.5’dir. Yerdeğiştirmelerin aksine, üst kat ivmeleri ÖLÇK ve SP-EŞ yöntemlerinde birbirlerine daha yakındır. Hatta, MY ivmeleri ÖLÇK yönteminde SP-EŞ yönteminden daha az çıkmıştır.

DO-ZTA analiz sonuçlarının ESK yöntemi ile karşılaştırılmasında ilk gözlemlenen ESK yöntemi ile elde edilen yerdeğiştirmelerin DO-ZTA ile elde edilen yerdeğiştirmelerden daha yüksek olduğudur. ESK’dan elde edilen yerdeğiştirmeler SP-EŞ yönteminden elde edilen değerlerden GO için %45.5, MY için %96 daha fazladır. ÖLÇK yöntemleri ile karşılaştırıldığında maksimum değerler ESK değerlerinden GO için %30, MY için ise %46 olmuştur. ESK yönteminin genel olarak DO-ZTA analizlerinden daha güvenli yerdeğiştirmeler verdiği bilinmektedir. Ancak MY kullanılması durumunda aşırı güvenli bir durum oluşmuştur ki tasarım için bu değerlerin uygulamadan önce irdelenmesi gerekmektedir.

Tablo 6. Sismik yalıtım sistemi ötelemesi ve üst yapı tepe noktası ivme değerleri

Yöntem	Ortalama Maksimum Yalıtım Yerdeğiş. (m)				Ortalama Maksimum Üst Kat İvmesi (g)			
	X-Yönü	Y-Yönü	GO	MY	X-Yönü	Y-Yönü	GO	MY
SP-EŞ	0.352	0.311	0.330	0.403	0.26	0.30	0.28	0.34
P-GO	0.379	0.384	0.356	0.527	0.29	0.30	0.29	0.32
P-MY	0.395	0.385	0.364	0.542	0.29	0.30	0.30	0.33
T1-GO	0.380	0.393	0.365	0.516	0.29	0.30	0.29	0.33
T1-MY	0.387	0.390	0.368	0.514	0.29	0.30	0.29	0.33
ÖLÇK _{max} / SP-EŞ	12.2%	26.4%	11.5%	34.5%	11.5%	0.0%	7.1%	-2.9%

DO-ZTA analizlerinden elde edilen yalıtım seviyesi, 1. kat, 3. kat ve 5. kat kesme kuvvetlerinin buldukları seviyenin üstünde kalan toplam kat ağırlıkları ile normalleştirildiği değerler Tablo 7’de gösterilmiştir. Normalleştirilmiş kat kesme kuvvetlerinin kullanılmasının sebebi, yapıda oluşan tasarım kuvvetleri hakkında yapıdan bağımsız bilgi veriyor oluşudur. Bu tabloda ayrıca ÖLÇK yöntemi ile elde edilen değerler ile SP-EŞ yöntemi değerleri arasındaki farkın SP-EŞ değerlerine oranı da gösterilmiştir. Bu değerler ilk önce ESK kuvvet yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, yerdeğiştirmelerde gözlemlenen farklılık benzeri burada da gözlemlenmiştir. ESK yönteminde MY spektrumu için elde edilen değerler ile SP-EŞ yönteminden farklı GO spektrumu için elde edilen değerlerden daha fazladır. Bu sonuç, ESK yönteminde gözlenen ve MY spektrum sonuçlarının genel olarak GO sonuçlarından yüksek olması sonucu ile uyumludur. ESK yöntemi ve MY spektrumu ile elde edilen 1. kat kesme kuvvetleri daha doğru olduğuna inanılan DO-ZTA analizlerine göre oldukça fazladır. Bu fazlalığın bir nedeninin ESK yöntemin doğasındaki güvenlik olduğu diğerinin ise MY spektrumunda oluşan tepki artışı olduğu düşünülebilir. Diğer gözlemlenen bir konu SP-EŞ yönteminin üst katlarda MY açısından ve Y- yönünde daha fazla kat kesme kuvveti oluşturduğudur. Bu konu ayrıca araştırılması gereken bir konudur.

Tablo 7. Yalıtım ve kat kesme kuvvetleri ve SP-EŞ yöntemine göre farkları

Kat	Yöntem	Ortalama Maks. Kat Kesme Kuv., F/W (g)				SP-EŞ Yöntemi ile Fark			
		X-Yönü	Y-Yönü	GO	MY	X-Yönü	Y-Tönü	GO	MY
Yalıtım	SP-EŞ	0.13	0.12	0.12	0.15	-	-	-	-
	P-GO	0.14	0.14	0.13	0.18	-	14.1%	6.4%	16.0%
	P-MY	0.14	0.14	0.13	0.18	7.8%	14.3%	7.9%	17.3%
	T1-GO	0.14	0.14	0.13	0.18	5.2%	15.7%	7.9%	14.8%
	T1-MY	0.14	0.14	0.13	0.18	6.3%	15.2%	8.4%	15.1%
	ESK	-	-	0.16	0.23	-	-	33.3%	53.3%
1. Kat	SP-EŞ	0.12	0.11	0.12	0.14	-	-	-	-
	P-GO	0.13	0.13	0.13	0.17	8.9%	19.8%	8.9%	19.3%
	P-MY	0.13	0.13	0.13	0.17	11.3%	19.2%	11.3%	20.4%
	T1-GO	0.13	0.13	0.13	0.17	10.1%	21.1%	10.1%	19.2%
	T1-MY	0.13	0.13	0.13	0.17	10.7%	20.1%	10.7%	19.4%
	ESK	-	-	0.17	0.25	-	-	41.7%	78.6%
3. Kat	SP-EŞ	0.15	0.17	0.15	0.20	-	-	-	-
	P-GO	0.18	0.19	0.18	0.23	16.4%	12.3%	16.4%	14.6%
	P-MY	0.18	0.19	0.18	0.23	17.3%	11.7%	17.3%	15.1%
	T1-GO	0.18	0.19	0.18	0.24	20.8%	12.4%	20.8%	18.0%
	T1-MY	0.19	0.19	0.19	0.24	21.7%	14.1%	21.7%	18.1%
	ESK	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Kat	SP-EŞ	0.26	0.30	0.26	0.34	-	-	-	-
	P-GO	0.29	0.30	0.29	0.32	9.9%	-2.7%	9.9%	-4.4%
	P-MY	0.29	0.30	0.29	0.33	12.8%	-1.5%	12.8%	-2.9%
	T1-GO	0.29	0.30	0.29	0.32	10.2%	-1.1%	10.2%	-3.2%
	T1-MY	0.29	0.30	0.29	0.33	9.9%	-0.9%	9.9%	-1.9%
	ESK	-	-	-	-	-	-	-	-

1: Normalleştirme için kullanılan ağırlık, o kat seviyesinin üstünde kalan ağırlıktır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, deprem yalıtımlı yapıların tasarımında kullanılan tarihsel deprem kayıtlarının uygunlaştırma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, örnek bir yalıtımlı yapı için geometrik ortalama (GO) ve maksimum yön (MY) spektrumları ve ölçeklendirme (ÖLÇK) ve spektral eşleştirme (SP-EŞ) yöntemleri incelenmiştir. Yapı tepkileri hem eşdeğer statik kuvvet (ESK) hem de doğrusal olmayan zaman-tanım alanı analizleri (DO-ZTA) ile elde edilmiştir.

Nümerik analizler, ESK yönteminin genel olarak DO-ZTA analizlerinden daha fazla yalıtım yerdeğiştirmeleri ve kuvvetleri verdiğini MY ile elde edilen değerlerin GO değerlerine göre çok daha fazla olduğunu göstermiştir. ÖLÇK yöntemleri genel olarak SP-EŞ yöntemine göre daha yüksek yalıtım tepkileri ve kat kesme kuvvetleri vermiştir. Ancak, SP-EŞ yönteminde en üst katta MY kat kesme kuvvetleri ÖLÇK yöntemi değerlerinden daha az çıkmıştır. Genel olarak, tüm ÖLÇK ve SP-EŞ yöntemleri doğru yorumlandığı sürece, yapı tasarımı için uygundur. ESK yöntemi ile MY spektrumu uygulamada problem yaratacak mertebelerde güvenli değerler verebilir.

TEŞEKKÜR

Sismik tehlike analizi ve spektral eşleştirme konusunda verdiği destekten ötürü Prof. Dr. Yasin Fahjan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- AASHTO (2010). *LRFD bridge design specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abrahamson, N. A., ve Shedlock, K. M. (1997). "Overview." *Seismological Research Letters*, 68(1), 9.
- ASCE/SEI-7-05 (2005). "*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*." ASCE/SEI 7-05. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ASCE/SEI-7-10 (2010). "*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*." ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ASCE/SEI-7-16 (2016). "*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*." ASCE/SEI 7-16. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- ASCE/SEI-41-13 (2014). "*Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*." ASCE/SEI 41-13. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Atik, L. A., ve Abrahamson, N. (2010). "An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching." *Earth. Spec.*, 26(3), 601-617.
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., ve Abrahamson, N. A. (2006). "Orientation-independent measures of ground motion." *B Seismol Soc Am*, 96(4), 1502-1511.
- Erkus, B. (2004). "Comparison of the techniques used in the Newmark analysis of nonlinear structures." *Proc., 17th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Newark, Delaware.
- Erkus, B., ve Johnson, E. A. (2006). "Smart base-isolated benchmark building Part III: A sample controller for bilinear isolation." *Struct. Contr. Health Monit.*, 13(2-3), 605-625.
- GCR-11-917-15 (2011). "*Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*." Report No: National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., Mccoy, E., ve Mendis, R. (2006). "An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion using Wavelets." *J. Earth. Eng.*, 10(spec01), 67-89.
- Huang, Y. N., Whittaker, A. S., ve Luco, N. (2008). "Maximum spectral demands in the near-fault region." *Earth. Spec.*, 24(1), 319-341.
- Kalkan, E., ve Chopra, A. K. (2010). "*Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures*." Report No: U.S. Geological Survey.
- Lilhanand, K., ve Tseng, W. S. (1987). "Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping design response spectra." *Proc., SMiRT-9 Lausanne*.
- Nagarajaiah, S., Reinhorn, A. M., ve Constantinou, M. C. (1991). "Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures." *J. Struct. Eng., ASCE*, 117(7), 2035-2054.

- Newmark, N. M. (1959). "A Method of Computation for Structural Dynamics." *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 85(3), 67-94.
- Pant, D. R., ve Maharjan, M. (2016). "On selection and scaling of ground motions for analysis of seismically isolated structures." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(4), 633-648.
- PEER-GMD (2016). "*PEER Ground Motion Database*." <<http://ngawest2.berkeley.edu/>>. (June, 2016, 2016).
- Powell, G. H. (1973). "*DRAIN-2D User's Guide*." Report No: EERC 73-22. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Berkeley, California.
- TBC2006 (2006). "*Specifications for Wind-Resistance Designs (Wind Load Provisions of Taiwan Building Code)*." Architectural and Building Research Institute, Ministry of The Interior, Taiwan.
- TDY-Taslak (2017). "*Türk Deprem Yönetmeliği*." Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- York, K., ve Ryan, K. L. (2008). "Distribution of lateral forces in base-isolated buildings considering isolation system nonlinearity." *J. Earth. Eng.*, 12(7), 1185-1204.