

DEPREM YALITIMLI VERİ MERKEZİ TİPİ YAPILARDA EŞDEĞER STATİK KUVVET YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ

B. Erkuş¹, B. Kasapoğlu² ve M. D. Güler³

¹Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

²Yük. Lis. Öğr., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

³Yük. Müh., Neosis Mühendislik, İstanbul

Email: bariserkus@itu.edu.tr

ÖZET:

Bu bildiride, deprem yalıtımlı ve veri merkezi tipi yapılarda, eşdeğer statik kuvvet yöntemi ile elde edilen ve üst yapı tasarımında kullanılan taban kesme kuvvetlerinin geçerliliği farklı yapı rijitliği ve yalıtım üstü döşeme kütlesi değerleri için incelenmiştir. Deprem yalıtımlı yapılarda, üst yapı tasarımı için gerekli olan taban kesme kuvvetinin hesabı için genellikle eşdeğer statik kuvvet yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, klasik eşdeğer statik kuvvet yöntem yalıtımlı yapılarda gözlemlenen dinamik etkileri her zaman etkin bir şekilde yansıtamamaktadır. Eşdeğer statik kuvvet yöntemin geliştirilerek tipik yalıtımlı yapıların dinamik davranışını daha iyi yansıttığı çalışmalar mevcut olup sonuçlar bazı güncel yönetmeliklere yansıtılmıştır. Yalıtımlı veri merkezi tipi yapıların özellikleri tipik yalıtımlı yapılardan farklı olup bu tip yapılarda eşdeğer statik kuvvet yönteminin geçerliliği ayrıca incelenmelidir. Bu amaçla, Türkiye’de inşası tamamlanan bir ve iki katlı iki deprem yalıtımlı veri merkezi binası örnek yapılar olarak seçilmiştir. Analiz modeli olarak üst yapının doğrusal kesme yayları ve toplu kütlelerle ve tüm izolatörlerin bir adet çift-doğrusal elemanla ifade edildiği bir model kullanılmıştır, ve iki yapı için iki temel model oluşturulmuştur. Bu temel modellerin üst yapı rijitliği ve yalıtım üstü döşeme kütlesi değiştirilerek farklı modeller türetilmek sureti ile veri merkezlerinin olası yapısal özellikleri de gözönünde bulundurulmuştur. Yapıların tasarımında kullanılan depremselliklere yakın bir depremsellik için tüm modellerin taban kesme kuvvetleri eşdeğer statik kuvvet yöntemi ve zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile elde edilmiştir. Zaman-tanım analizleri için bir 2500 yıllık tasarım spektrumuna ölçeklendirilmiş 14 deprem kaydı kullanılmıştır. Sonuçlar eşdeğer statik kuvvet yöntemi ile elde edilen kat kesme kuvvetlerinin üst yapı rijitliğine ve yalıtım üstü döşeme kütlesine bağlı olarak zaman-tanım alanı ile elde edilen değerlerden önemli oranda farklı olabileceğini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: sismik yalıtım, deprem, eşdeğer statik kuvvet yöntemi, veri merkezi, taban kesme kuvveti

INVESTIGATION OF EQUIVALENT LATERAL FORCE PROCEDURE FOR BASE-ISOLATED DATA CENTER-TYPE STRUCTURES

ABSTRACT:

This paper investigates the validity of the base shear forces obtained from an equivalent lateral force procedure and that are used for the design of superstructure for base-isolated data center-type structures. Equivalent lateral force procedure is generally used to estimate base shear forces that are required for the design of the superstructure of a base-isolated building. However, conventional method does not reflect the dynamic behavior of base-isolated structures effectively. There are research on equivalent lateral force procedure to make it account for the dynamic behaviour of typical base-isolated structures more accurately, and the results are reflected to some of the recent codes. Base-isolated data centers, on the other hand, have characteristics different than that of typical base-isolated structures, and effectiveness of equivalent lateral force procedure should be investigated for this type of structures also. For this purpose, a single-story and a two-story data-center buildings that are recently constructed in Turkey are considered as examples. A model with linear shear springs and lumped masses for the superstructure and one bilinear element for the isolators is used, and two base models are established for two buildings. Possible properties of data-center structures are considered

by changing the isolation slab mass and superstructure rigidity of the base models. Base shears are obtained using equivalent lateral force and time-history analysis procedures for a seismicity similar to the seismicities used for the design of the structures. For the time-history analyses, seven pairs of historical ground motion records that are spectrally matched to a design spectrum with 2500 years return period. Results show that base shear obtained from equivalent lateral force method may differ significantly from the shear obtained from time-history analyses based on the superstructure rigidity and isolation slab mass.

KEYWORDS: seismic isolation, earthquake, equivalent lateral force procedure, data center, base shear

1. GİRİŞ

Sismik yalıtımlı yapı tasarım aşamalarının ilki olan ön tasarım birçok bakımdan oldukça önemlidir ve bazı zorluklar içerir. Bu aşamada hem yalıtıcıların genel özellikleri ve hem de üst yapının ana hatları ortaya çıkar ve ileriki aşamalarda büyük değişime uğraması tüm proje açısından istenen bir durum değildir. Kullanılan yöntemlerin doğruluğu ne kadar yüksek ve bu yöntemler gerçek davranışı ne kadar iyi yansıtır ise, seçilen sistemin ileriki aşamalarda değişme olasılığı o kadar azalacaktır. Ancak, birçok yalıtıcı ve üst yapı seçeneği değerlendirildiğinden, ileri analizlerin yapılması genellikle mümkün olamamakta, hata oranı daha fazla, ancak hesaplama ve yorumlama süreleri daha az, uygulaması kolay olan bazı statik yöntemler tercih edilmektedir. Sonuç olarak, basitleştirilmiş yöntemler kullanılarak sonraki aşamalarda değişme olasılığı az olan bir tasarım elde etmek ön tasarımda karşılaşılan en önemli zorluktur. Bu durumda, çok güvenli tasarım yaparak değişim riskini azaltmak bir seçenektir; ancak bu yaklaşımda maliyetler çok yüksek olabilir. Diğer bir yaklaşım ön tasarımda kullanılan basitleştirilmiş yöntemin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yöntemin özelliklerinin ve gerçek davranışı ne kadar yansıyabileceğinin anlaşılmasıdır.

Ön tasarımda kullanılan yöntemlerin başında Eşdeğer Statik Kuvvet (ESK) Yöntemi gelir. Bu yöntemde yalıtıcı sisteminin doğrusal olmayan davranışı eşdeğer bir doğrusal yay ve eşdeğer bir viskoz sönümleme elemanlarının süperpozisyonu olarak ifade edilir. Tüm yapı kütlelerinin yalıtım döşemesinde toplandığı kabul edilerek, yalıtıcı yerdeğiştirmeleri ve kesme kuvvetleri öngörülen bir depremsellik için yinelemeli bir yöntem ile elde edilir. Yerdeğiştirmeler ve yalıtıcı eksenel kuvvetleri ile yalıtıcı ön tasarımı yapılır. Üst yapı tasarımında, yalıtım seviyesi kesme kuvvetleri taban kesme kuvveti olarak kabul edilir. Bu kuvvet belli dağılım kabulleri ile üst yapıya dağıtılarak kat kuvvetleri elde edilir. Üst yapı bu kuvvetler etkisinde statik analize tabi tutularak tasarlanır. ESK yöntemi deprem yönetmelikleri kapsamında kullanılabilir ve değişik yönetmeliklerde, ana prensipleri aynı olmakla beraber, yukarıda özetlenen yaklaşımlarda farklılıklar olabilmektedir. Görüldüğü üzere, ESK yöntemi birçok basitleştirme ve kabul içermekte olup, yalıtımlı yapının ön tasarımının ne kadar başarılı olduğunu anlamak için ESK yönteminde kullanılan kabullerin ve basitleştirmelerin anlaşılması ve araştırılması gerekmektedir.

ESK yönteminde kullanılan kabulleri yalıtıcılar ve üst yapı için yapılan kabuller olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Yalıtıcılar için yapılan tipik kabullerden ilki kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin birincil ve ikincil rijitliklere sahip tipik çift-doğrusal eleman ile ifade edilmesidir. Diğer bir kabul doğrusal olmayan davranışın eşdeğer doğrusal bir yay-sönümleyici sistemi ile ifade edilmesidir. Ayrıca, eşdeğer özellikler hesaplanırken genellikle modal birim şekildeğiştirme enerjisi yöntemi kullanılır. Üst yapı için yapılan kabullerden ilki üst yapı tasarımında kullanılan taban kesme kuvveti ile ilgilidir. Bir yaklaşımda, bu değer doğrudan yalıtıcı kesme kuvveti olarak alınır. Diğer bir yaklaşımda, yapı birinci katında kat kesme kuvveti yalıtım kesme kuvvetin üst yapı katlarına dağılımı esnasında belirlenir. İkinci bir kabul, kat kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu kabul için önerilen bazı yöntemler, her kata eşit kuvvet dağıtılması, kuvvetlerin kat kütlelerine ve yüksekliklere bağlı olarak dağıtılması ve bazı araştırmalara dayanan ampirik bir dağıtım kullanılmasıdır.

ESK yönteminin gerçek davranışını ne kadar yansıttığı, kullanılan kabullerin davranışa hangi yönde etkilediği değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Theodossiou ve Constantinou (1991); Winters ve Constantinou (1993) ESK yönteminin dönemin yönetmeliklerinde tanımlandığı halini, zaman-tanım alanındaki analizler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ESK yönteminin birçok bakımdan kabul edilebilir sonuçlar verdiğini, ancak üst yapı dinamik davranışını etkin bir şekilde yansıtamadığından kat kesme kuvvetlerini daha güvensiz olarak hesaplayabileceğini göstermiştir. York ve Ryan (2008) tarafından yapılan çalışmada, farklı üst yapı rijitliğine ve yalıtım döşeme kütlelerine sahip olan yapılar için bu parametrelerin üst yapı kat kesme kuvvetlerine olan etkileri incelenmiş ve kat kuvvetlerinin dağılımı için ampirik bir formül önerilmiştir.

ESK yöntemi deprem yönetmeliklerden birçok bakımdan benzer olarak uygulanmaktadır. Örnek olarak tüm yönetmelikler eşdeğer sönümleme ve eşdeğer rijitlik hesabında modal birimşekildeğiştirme enerjisi yöntemini ve sekant rijitliği kullanırlar. Ancak, sönüme bağlı spektrum azaltma katsayıları farklı olabilmektedir. Yönetmeliklerdeki bir farklılık, kat kesme kuvvetlerindeki dağılımında kullanılan yöntem olabilir. Örnek olarak, ASCE/SEI-7-10 (2010) ve TDY-Taslak (2017) yönetmelikleri kat kesme kuvvetini üçgen dağılımı kabulü ile yaparken, ASCE/SEI-41-13 (2014) ve ASCE/SEI-7-16 (2016) yönetmelikleri York ve Ryan (2008) çalışması tarafından önerilen ampirik yaklaşımı kullanır.

ESK yönteminde kullanılan kabullerin sonuçları önemli oranda etkileyebileceği bir yapı türü veri merkezi binalarıdır. Sismik yalıtımlı veri merkezleri genellikle bir ya da iki katlıdır. Kullanımı nedeni ile yapısal sistem açıklıkları geniş olabilir. Eğer üst yapıda ana taşıyıcı sistem perdesiz çerçeve ise üst yapı rijitliği oldukça düşük olabilir. Veri merkezlerinde yalıtım döşemesinin kütlesi ekipman ağırlıklarından dolayı diğer katlara göre oldukça fazladır. Tüm bu özelliklerinden dolayı, veri merkezi yapıları tipik yalıtımlı yapılardan oldukça farklı olabilir. Yukarıda bilgileri verilen çalışmalar daha çok tipik yalıtımlı yapılar için yapılmış olup, benzer çalışmaların veri merkezi tipi yapılarında yapılması ve ESK yönteminin geçerliliğin bu yapı tipi için araştırılması oldukça faydalı olacaktır.

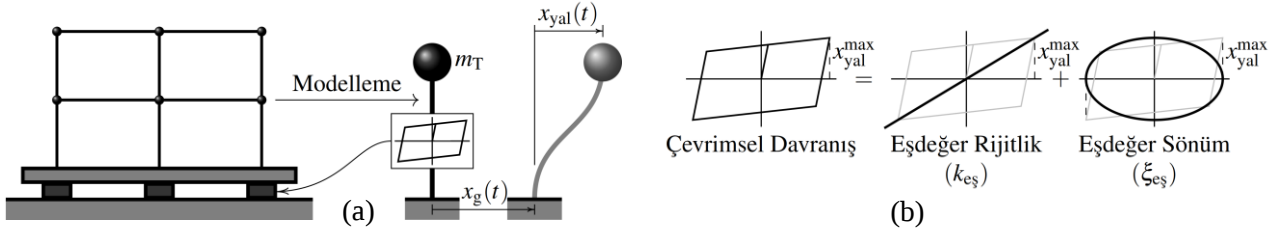
Bu bildiride, deprem yalıtımlı ve veri merkezi tipi yapılarda, ESK yöntemi ile elde edilen ve üst yapı tasarımında kullanılan taban kesme kuvvetlerinin geçerliliği farklı yapı rijitliği ve yalıtım üstü döşeme kütlesi değerleri için incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye’de inşası tamamlanan bir ve iki katlı iki deprem yalıtımlı veri merkezi binası örnek yapılar olarak seçilmiştir. İlk önce, ESK yöntemi ve bu makale kapsamında kullanılan modelleme, analiz ve deprem ölçeklendirme yöntemleri hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Analiz modeli olarak üst yapının doğrusal kesme yayları ve toplu kütlelerle ve tüm izolatörlerin bir adet çift-doğrusal elemanla ifade edildiği bir model kullanılmıştır. Tasarım spektrumuna uyumlu deprem kayıtlarının elde edilmesinde, spektral eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Sonra, örnek olarak seçilen yapıların özellikleri açıklanmıştır ve iki yapı için iki temel model oluşturulmuştur. Seçilene örneklerde üst yapı çeliktir ve yapısal sistem olarak çerçeve sistem ve çarprazlı sistem kullanılmıştır. Yalıtım döşemesi betonarme kiriş-döşeme sistemidir. Yalıtıcılar üçlü sürtünme pendulum tipi yalıtıcılardır, ancak analizlerde çift-dorğusal model kullanılmıştır. Seçilen temel modellerin üst yapı rijiliği ve yalıtım üstü döşeme kütlesi değiştirilerek farklı modeller türetilmek sureti ile veri merkezlerinin olası yapısal özellikleri de gözönünde bulundurulmuştur. Yapıların tasarımında kullanılan depremselliklere yakın bir depremsellik için tüm modellerin taban kesme kuvvetleri ESK yöntemi ve zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile elde edilmiştir. Zaman-tanım analizleri için bir 2500 yıllık tasarım spektrumuna ölçeklendirilmiş 14 deprem kaydı kullanılmıştır. Her iki yöntem ile elde edilen, yalıtım yerdeğiştirmeleri, kesme kuvvetleri ve üst yapı kat kesme kuvvetleri grafikler ve tablolar ile karşılaştırılarak, ESK yönteminin veri merkezi tipi yapılarda geçerliliği irdelenmiştir.

1. TEORİK BİLGİLER

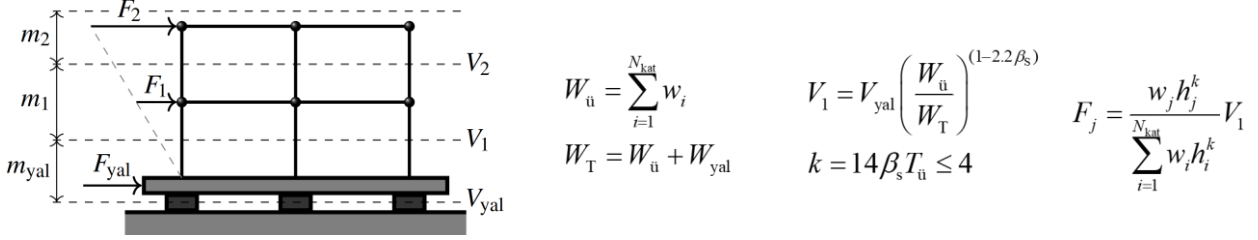
Bu bölümde bu makale kapsamında kullanılan yöntemler ve modellemeler hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Bunlar ESK yöntemi, yalıtımlı yapı modellemesi, doğrusal olmayan analiz yöntemi ve spektral eşleştirme yöntemidir.

1.1. Eşdeğer Statik Kuvvet (ESK) Yöntemi

ESK yönteminde amaç, yalıtımlı yapıyı eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) olarak ifade etmektir. Bunun için tüm yapı doğrusal olmayan bir TSD sisteme çevrilir (Şekil 1a). TSD sistemin kütlesi, yalıtım seviyesi üstünde kalan tüm yapı kütlesidir. 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 sönümlemenin toplamı olarak ifade edilir (Şekil 1b). 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 sönümleme sabiti ise eşdeğer sönümleme ile sönümlenen enerjinin çift-doğrusal yayın sönümlediği enerjiye eşit olması ile bulunur: $\xi_{eş} = E_{sön} / 4\pi E_{bşe}$. Burada, $E_{sön}$ doğrusal olmayan yay tarafından bir çevrimde sönümlenen enerji; $E_{bşe}$ maksimum yerdeğiştirme anında eşdeğer doğrusal yayda depolanan birim şekildeğiştirme enerjisi ve $\xi_{eş}$ eşdeğer viskoz sönümleme sabitidir.



Şekil 1. ESK yönteminde yalıtımlı yapının (a) doğrusal olmayan TSD sisteme çevrilmesi ve (b) çevrimsel davranışın eşdeğer özellikler ile ifadesi



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

ESK yönteminde kullanılacak eşdeğer TSD sistemin parametrelerin bulunması için maksimum yalıtıcı yerdeğiştirmesinin bilinmesi gerekir. Bu değer genellikle bir spektrum ile ifade edilen depremselliğe bağlıdır. Bu değer 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. Bu yineleme hedeflenen bir tolerans sağlanana kadar devam eder. Bu şekilde yalıtıcılarda oluşan yerdeğiştirme ve kesme kuvveti hesaplanır. Üst yapı kuvvetlerini bulmak için yalıtıcı kesme kuvvetleri üst yapı katlarına dağıtılarak statik analiz yapılır. Kat kuvvetlerinin dağılımı farklı yönetmeliklerde farklı olabilir. Bir örnek Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu dağılım York ve Ryan (2008) çalışmasına dayanmaktadır.

1.2. Yalıtımlı Yapıların Doğrusal Olmayan Modellemesi

Yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan analizi için birkaç modelleme yöntemi kullanılabilir. Bu makalede katların toplu kütle ve kesme yayları ve yalıtıcıların bir adet doğrusal olmayan eleman ile ifade edildiği bir model kullanılmıştır (Erkus ve Johnson, 2006). Doğrusal olmayan eleman tipik çift doğrusal elemandır. Bu modelde, x_{yl} yalıtım yerdeğiştirmesi; x_i , m_i , k_i ve c_i i . katın sırası ile yalıtım döşemesine göre yerdeğiştirmesi, kütlesi, rijitliği ve sönümleme sabiti; V_{yl} yalıtım kesme kuvveti ve x_g yer yerdeğiştirmesidir. Bu sistemin hareket denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

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

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

Burada, $\mathbf{M}_u$, $\mathbf{C}_u$ ve $\mathbf{K}_u$ üst yapı kütle, sönümleme ve rijitlik matrisi; m_{yl} yalıtım döşeme kütlesi; c_{yl} yalıtım sönümlemesi; $\mathbf{R}$ “1” sayısından oluşmuş $N_{kat} \times 1$ boyutunda vektör ve $\mathbf{F}_s$ doğrusal olmayan yalıtım kuvvetidir.

1.3. Doğrusal Olmayan Analiz (DOA) Yöntemi

Bu makalede doğrusal olmayan analiz (DOA) için Newmark- β ve dengelenmiş kuvvet düzeltme yöntemleri kullanılmıştır. 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:

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

Burada $\Delta[\]^t$, büyüklüğün $t + \Delta t$ ve t anlarındaki değerleri arasındaki farklı göstermektedir. Newmark- β yöntemi ile aşağıda gösterilen artımsal ve cebirsel forma çevrilebilir:

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

$$\mathbf{A} = \frac{\beta}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{C}, \quad \Delta\hat{\mathbf{P}}^t = \Delta\mathbf{P}^t + \left(\frac{1}{\beta\Delta t}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta}\mathbf{C}\right)\dot{\mathbf{x}}^t + \left[\frac{1}{2\beta}\mathbf{M} + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\mathbf{C}\right]\ddot{\mathbf{x}}^t \quad (5)$$

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

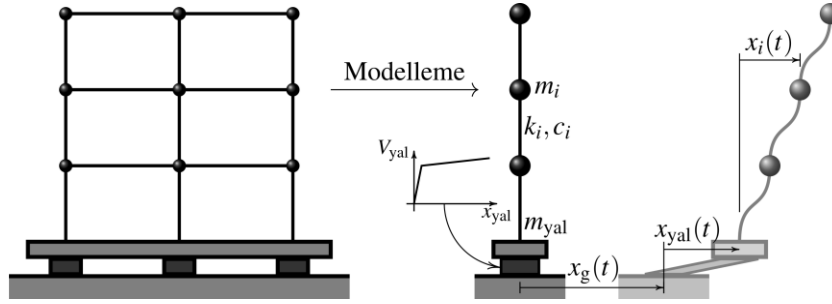
$$\Delta\mathbf{F}_s^{t,kabul} = \mathbf{K}_T\Delta\mathbf{x}^{t,kabul} \quad \text{ve} \quad (\mathbf{A} + \mathbf{K}_T)\Delta\mathbf{x}^{t,kabul} = \Delta\hat{\mathbf{P}}^t \quad (6)$$

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

$$\Delta\mathbf{F}_s^{t,denge} = \Delta\mathbf{F}_s^{t,kabul} - \Delta\mathbf{F}_s^{t,\text{çift}doğ} \quad (7)$$

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

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



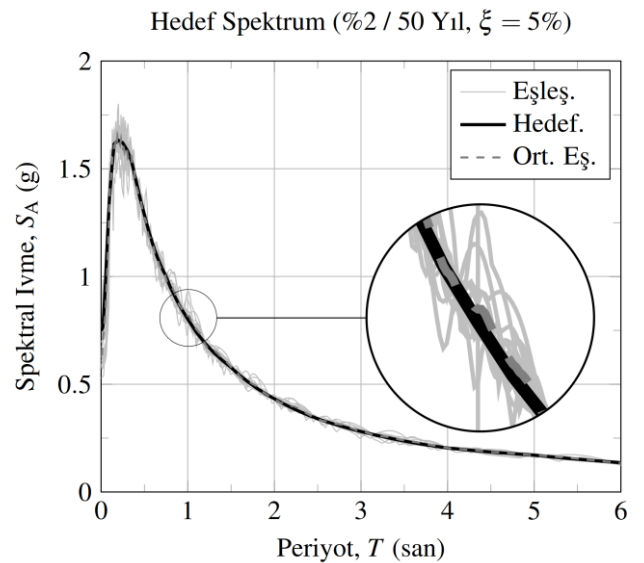
Şekil 3. Bu makalede kullanılan doğrusal olmayan yalıtımlı yapı modellemesi

1.4. Spektral Eşleştirme Yöntemi

Bu makalede, tarihsel deprem kayıtlarının öngörülen bir depremselliğe uyumla hale getirilmesinde Atik ve Abrahamson (2010) tarafından önerilen spektral eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin esası, ivme kayıtlarını dalgacık fonksiyonları ile güncellemeye dayanır. Detayları söz konusu makalede bulunabilir.

2. ÖRNEK YAPILAR VE DEPREMSELLİK

Bu makalede iki yapı incelenmiştir. Bu yapılar 2017 yılında inşasının tamamlanan iki veri merkezinin özelliklerinden yaklaşık olarak elde edilmiştir (Tablo 2). Her iki yapıda betonarme yalıtım döşemesi bulunmaktadır ve üst yapı çeliktir. Yapı-A taşıyıcı sistemi çerçeve, Yapı-B ise çaprazlı çerçevedir. Veri ekipmanlarından dolayı yalıtım döşeme kütlesi kat kütlelerine göre oldukça yüksektir.



Şekil 4. Kayıtların %2/50 yıl hedef depreme eşleştirilmesi

Bu çalışma kapsamında kullanılan deprem kayıtları Tablo 1’de gösterilmiştir. Yukarıda özellikleri verilen yapıların tasarımında kullanılan 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan (yaklaşık olarak 2500 yıl dönüş periyotlu) depremsellik birbirlerine çok benzer olduğundan bu çalışmada tek katlı yapı için hazırlanan ve Şekil 4’de gösterilen depremsellik kullanılmıştır.

3. NÜMERİK ANALİZ VE DEĞERLENDİRME

Yukarıda ana parametreleri verilen iki yapı, eşdeğer statik yöntem ile incelenmiş, yalıtıcı yerdeğiştirme ve kesme kuvvetleri ve birinci kat kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Birinci kat kesme kuvvetleri hesaplanırken, ASCE/SEI-41-13 (2014)’de belirtilen kat kuvvet dağılım yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca sönümleme azaltma katsayısı için (AASHTO, 2010)’ de verilen yöntem kullanılmıştır.

Daha sonra yapılar hedef depremselliğe uyumlu hale getirilen tarihsel depremlerin her iki bileşeni için toplam 14 adet DOA’e tabi tutulmuştur. Bu analiz için (MATLAB, 2016) paketi ile yukarıda teorisi verilen ve doğrusal olmayan dinamik analiz yapabilen bir program geliştirilmiştir. Bu program ile elde edilen sonuçlar, doğruluğu genel kabul görmüş olan (SAP2000, 2016) programının sonuçları ile karşılaştırılarak yazılan programın doğruluğu teyit edilmiştir. ancak bu sonuçlar burada gösterilmemiştir.

Veri merkezi tipi yapılarıdaki olası kütle ve rijitlik farklılıklarını yansıtmak için yalıtım döşeme kütlelerinin ve üst yapı rijitliğinin Tablo 2’de verilen değerlerden %50 daha az ve %50 daha fazla olduğu durumlar da göz önüne alınmıştır. Birçok bakımdan bu değerler çok ekstrem durumları ifade etmektedir. Ancak, farklı yapı tiplerinde ESK yöntemi ile elde edilen sonuçların doğruluğunu anlamak açısından bu değişken tanım alanının seçilmesi uygun görülmüştür. Bu ek analizlerde yalıtım efektif periyotlarının değişmemesi için yalıtım çift-doğrusal parametreleri, yapı kütlesi ile normalleştirilmiştir. Bu şekilde, sadece yalıtım döşeme kütlesi, üst yapı kütlesi ve üst yapı rijitliğinin etkilerinin incelenmesi sağlanmıştır.

ESK ve DOA sonuçları Tablo 3’de gösterilmiştir. Bu sonuçlar, özellikleri Tablo 2’de verilen asıl yapı içindir. Bu tabloda ayrıca ESK yöntem ile elde edilen sonuçların DOA sonuçlarından farkının DOA sonuçlarına oranı yüzde olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre örnek veri merkezi yapılarında ESK yöntemi ve DOA yöntemleri ile elde edilen yerdeğiştirmelerde %60-%70 mertebelerinde farklılık görülmektedir. Bu farklılığın ESK yönteminin yaklaşık bir yöntem olması nedeni ile oluştuğu ve tipik yalıtımlı yapılarda da oluşacağı düşünülmektedir. Yalıtım kesme kuvvetlerindeki farklılık %20-%30 mertebelerindedir. Kuvvetlerdeki farklılığın yerdeğiştirmelere göre daha az olmasının, yalıtım elemanlarının ikincil rijitliğinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İlk kat kesme kuvvetlerinin mutlak değerleri ve normalleştirilmiş değerleri incelendiğinde ilk gözlemlenen, ilk katta yalıtım seviyesi normalleştirilmiş kesme kuvvet değerlerinden daha yüksek normalleştirilmiş kesme kuvvetlerinin oluştuğudur. Bu sonuçlar, York ve Ryan (2008) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile örtüşmekte olup, veri merkezi tipi yapılarda farkın daha yüksek olacağı anlaşılmaktadır. Sonuçlara göre ASCE/SEI-41-13 (2014) ile önerilen ve York ve Ryan (2008) çalışmasına dayanan ampirik kat kuvveti dağılım yaklaşımı tek katlı veri merkezi yapısı %14 fark yaratmıştır ancak bu fark iki katlı veri merkezi için %30 mertebesine çıkmıştır. Bu durum, tek katlı veri merkezi yapısındaki kütle oranlarının bahsi geçen çalışmalarda öngörülen yapılardaki kütle oranlarına yakın olması ile açıklanabilir.

Tablo 2. İncelenen veri merkezlerinin özellikleri

Özellik	Yapı-A	Yapı-B
Kat Adedi	1	2
Yalıtım Döş. Kütlesi	$m_{yal} = 15\ 000$ ton	$m_{yal} = 27\ 000$ ton
Yalıtım Rijitliği	$k_{yal}^1 = 1.07e7$ kN/m $k_{yal}^2 = 2.32e4$ kN/m $\chi_{yal}^{ak} = 1$ mm	$k_{yal}^1 = 1.14e7$ kN/m $k_{yal}^2 = 4.16e4$ kN/m $\chi_{yal}^{ak} = 2$ mm
Yalıtım Viskoz Sön.	$\xi_{yal} = \%0.5$	$\xi_{yal} = \%0.5$
Üst Yapı Kütlesi	$m_1 = 2500$ ton	$m_1 = 4000$ ton $m_2 = 1700$ ton
Üst Yapı Rijitlikleri	$k_1 = 3.0e5$ kN/m	$k_1 = 2.5e6$ kN/m $k_2 = 2e5$ kN/m
Üst Yapı Sönüm.	$\xi_u = \%5$	$\xi_u = \%5$ ($T_u = 5$ sn) $\xi_u = \%5$ ($T_u = 0.1$ sn)
Üst Yapı Periyodu	$T_u = 0.573$ sn	$T_u = 0.520$ sn

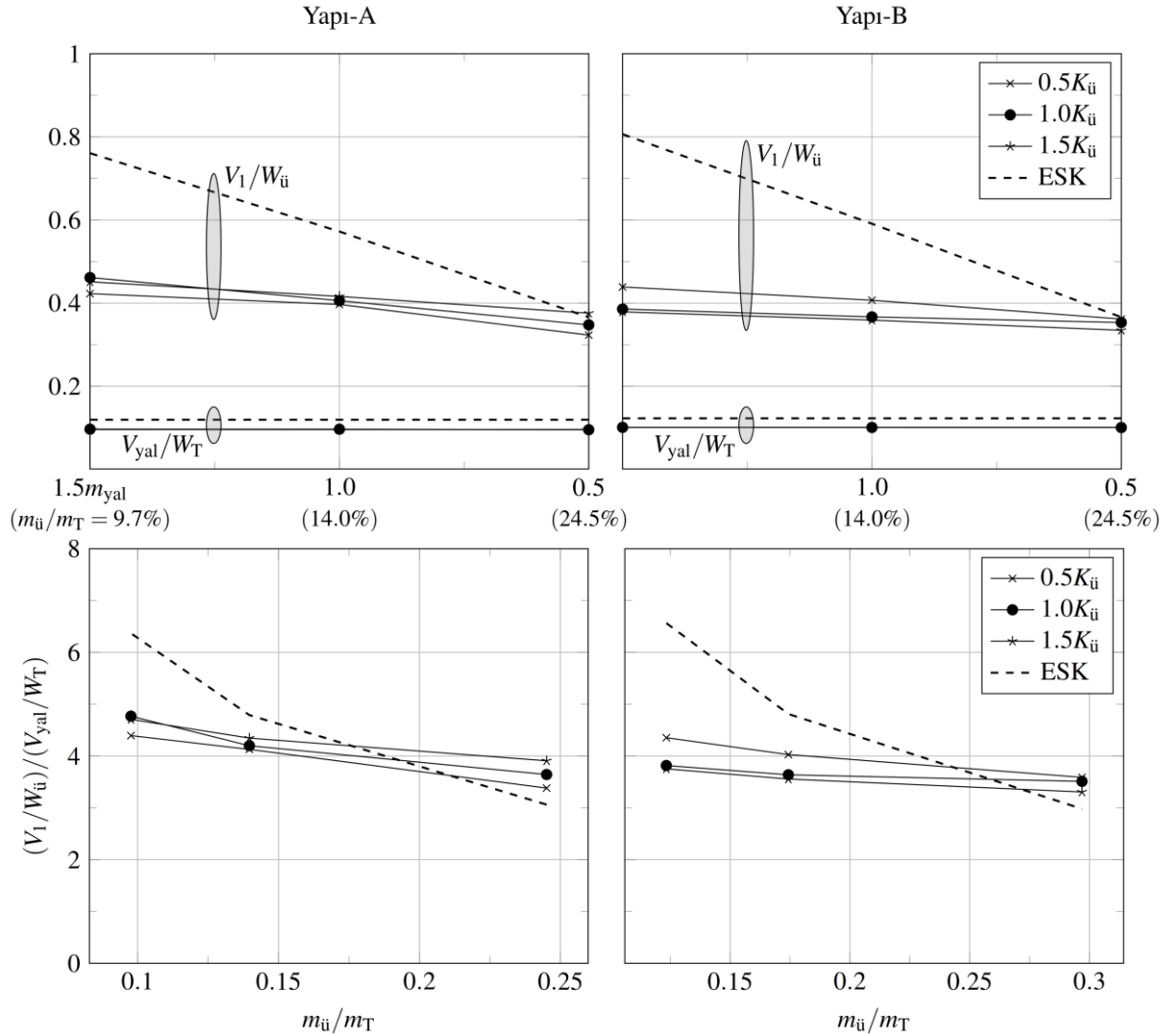
Tablo 1. Kullanılan PEER-GMD (2016) deprem yer ivme kayıtları

Kayıt No	Deprem	Süre / Δt	Büyük.	Fay. Uz.
RSN882	Landers, 1992	99.8 sn / 0.005 sn	7.28 M	26.8 km
RSN1110	Kobe, 1995	90.0 sn / 0.010 sn	6.90 M	24.8 km
RSN1166	Kocaeli, 1999	30.0 sn / 0.005 sn	7.51 M	30.7 km
RSN1762	H. Mine, 1999	60.0 sn / 0.020 sn	7.13 M	43.1 km
RSN3758	Landers, 1992	56.9 sn / 0.005 sn	7.28 M	36.9 km
RSN5836	El Mayor, 2010	87.5 sn / 0.005 sn	7.20 M	26.8 km
RSN6953	Darfield, 2010	54.0 sn / 0.005 sn	7.00 M	24.8 km

Tablo 3. ESK ve DOA yöntemlerinin asıl yapı için karşılaştırmalı sonuçları

Özellik	Yapı-A		Yapı-B	
	ESK ¹	DOA	ESK ¹	DOA
Efektif Periyot, $T_{eş}$	3.93 sn	-	3.70 sn	-
Eşdeğer Sönümlleme, $\xi_{eş}$	%32	-	%36	-
Yerdeğiştirme, x_{yal}	0.458 m (61 %)	0.283 m	0.418 m (71 %)	0.245 m
Kesme Kuvveti, V_{yal}	21386 kN (23 %)	17305 kN	40172 kN (22 %)	32970 kN
V_{yal} / W_T Oranı	12.0 % (23 %)	9.7 %	12.3 % (22 %)	10.1 %
Kesme Kuvveti, V_1	14307 kN (41 %)	10147 kN	33688 kN (61 %)	20906 kN
$V_1 / W_{\bar{u}}$ Oranı	57.2 % (41 %)	40.6 %	59.1 % (61 %)	36.7 %
V_1 / V_{yal} Oranı	67.0 % (14 %)	58.6 %	83.9 % (32 %)	63.4 %
$(V_1 / W_{\bar{u}}) / (V_{yal} / W_T)$ Or.	4.79 (14 %)	4.20	4.81 (32 %)	3.64

1: Parantez içerisinde gösterilen değerler, ESK sonuçları ile DOA sonuçları arasındaki farkın DOA sonuçlarına bölümüdür.



Şekil 5. Normalleştirilmiş yalıtım seviyesi ve 1. kat kesme kuvvetleri

Sonuçların daha iyi irdelenebilmesi için, sonuçlar grafiksel olarak Şekil 5’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde ilk önce yalıtım seviyesi ve birinci kat seviyesi normalleştirilmiş taban kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, örnek veri merkezi yapılarında birinci kat normalleştirilmiş taban kesme kuvveti % 40

mertebelerindedir ve yalıtım seviyesi değerinden (%10 mertebeleri) oldukça farklılık göstermektedir. ESK yöntemi ile elde edilen birinci kat kesme kuvvetleri yalıtım döşeme kütlesi tipik yalıtımlı yapılara benzer olmaya başladıkça DOA sonuçlarına yaklaşmaktadır. Şekil 5’de ikinci olarak gösterilen grafik normalleştirilmiş kesme kuvvetlerin oranını göstermektedir Burada da kesme kuvvetlerinde gözlemlenen sonuçlar teyit edilmiştir ve ASCE/SEI-41-13 (2014) ile önerilen ve York ve Ryan (2008) çalışmasına dayanan ampirik yöntemin veri merkezleri için kütle oranlarının uygunluğu durumunda kullanılabileceği anlaşılmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu makalede, sismik yalıtımlı veri merkezi yapı tipi için eşdeğer statik kuvvet (ESK) yönteminin geçerliliği incelenmiştir. Bu amaçla iki veri merkezi yapısı örnek olarak alınmıştır. ESK kuvveti yönteminde kat kesmelerinin dağılımı için en güncel yönetmelikler kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizler (DOA) için örnek projelerden ilkinin tasarımında kullanılan depremsellik çalışması kullanılmıştır.

Nümerik analiz sonuçları örnek veri merkezi yapıları için ESK yöntemi ile elde edilen yalıtım yerdeğiştirme ve kesme kuvvetlerinin DOA ile elde edilen değerlerden oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun nedenlerinden birisinin ESK yönteminin doğasında bulunan güvenlik olduğu düşünülmektedir. Diğer bir nedenin ise, uzun periyotlarda spektrumun şeklinden dolayı ESK yönteminin hassasiyetini kaybetmesi olduğu düşünülmektedir. Diğer bir sonuç normalleştirilmiş kat kesme kuvvetleri ile ilgilidir. 1. Katta elde edilen normalleştirilmiş kuvvetin yalıtım seviyesindeki değerinden çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu değerler sadece ESK yönteminden gelen güvenli sonuçlara atfedilememektedir. Özellikle, yüksek yalıtım döşemesi rijitliği, düşük üst yapı rijitliği, tipik yalıtımlı yapılardan farklı bir dinamik davranışın oluşmasına sebebiyet vermiştir. Bu farklı davranışı ampirik bir formülle ESK yöntemine yansıtan güncel yaklaşımlar, bu yaklaşımlarda öngörülen kütle oranlarının oluşması durumunda iyi sonuç vermekle beraber, öngörülmeyen kütle oranları oluşması durumunda, çok güvenli seviyelerde ilk kat kesme kuvvetleri üretmektedirler. Bundan dolayı, ESK yöntemi ile yalıtım tasarımı önemli olduğu projelerde, bu güvenlik göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- AASHTO (2010). *LRFD bridge design specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- 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.
- 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.
- MATLAB. 2016. MATLAB, version 2016a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts.
- PEER-GMD (2016). "PEER Ground Motion Database." <<http://ngawest2.berkeley.edu/>>. (June, 2016, 2016).
- SAP2000. 2016. SAP2000, version v18, Computer and Structures, Inc., Berkeley, California.
- TDY-Taslak (2017). "Türk Deprem Yönetmeliği." Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Theodossiou, D., ve Constantinou, M. C. (1991). "Evaluation of SEAOC Design Requirements for Sliding Isolated Structures." Report No: NCEER-91-0015. NCEER, SUNY, Buffalo, NY.
- Winters, C. W., ve Constantinou, M. C. (1993). "Evaluation of Static and Response Spectrum Analysis Procedures of SEAOC/UBC for Seismic Isolated Structures." Report No: NCEER-93-0004. NCEER, SUNY, Buffalo, NY.
- 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.