

ORTAK YALITIM DÜZLEMİNE SAHİP SİSMİK YALITIMLI İKİ YAPININ PARAMETRİK İNCELENMESİ*

Bekin M.¹ ve Erkuş B.²

¹Doktora Öğr., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

²Dr. Öğr. Üye., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Email: bariserkus@itu.edu.tr

ÖZET:

Bu bildiri, aynı yalıtım düzlemi üzerinde bulunan sismik yalıtımlı iki yapının davranışları kapsamlı bir parametrik çalışma ile incelenmiş ve yapısal tepkiler tekil yalıtımlı yapı tepkileri ile karşılaştırılmıştır. Güncel yönetmelikler ve klasik yalıtımlı yapı teorisi, bir üst yapıdan oluşan yalıtımlı yapılara uygundur ve çoklu üst yapı sistemine doğrudan uygulanamamaktadır. Sismik yalıtımlı çoklu üst yapıların tasarımında izlenen bir yol, yalıtım birimlerinin tasarımında tüm üstyapıları bir kütle olarak kabul etmek, üst yapıların tasarımında ise bu yapıları tekil yalıtımlı yapı olarak kabul etmek ve bu kabuller ile yönetmeliklerde verilen yöntemleri kullanmaktır. Elde edilen tümleşik tasarımın son hali ise zaman-tanım analizleri ile kontrol edilmektedir. Bu kabullerden tekil yapı kabulünün tümleşik yapı için geçerliliği ile ilgili sınırlı sayıda literatür bulunmaktadır. Bu kabulünün doğruluğu hakkında kapsamlı bir parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında üst yapı sayısı iki olarak seçilmiş ve üst yapı katlarının 1'den 10'a kadar değiştiği 100 adet üstyapı çifti oluşturulmuştur. Üst yapılar kat kütlelerinin kat hizalarında toplandığı çok serbestlik dereceli sistem olarak modellenmiştir. Kat rijitlikleri doğrusal elastik kesme yaylarından oluşmaktadır. Kesme yay rijitlikleri örnek bir yalıtımlı yapı kat rijitliğini temsil eden bir mertebede seçilmiştir. Bu modeller ile çok farklı üstyapı periyotlarının göz önüne alınması hedeflenmiştir. Buna ek olarak yalıtım eşdeğer periyodunun 1.50 sn, 2.50 sn ve 4.00 sn ve eşdeğer sönümlemenin %10, %20 ve %30 olduğu 9 adet yalıtım seti düşünülmüştür. İzolatörlerin doğrusal olmayan davranışları çift doğrusal eleman ile temsil edilmiştir. Değişen üst yapı özelliklerine göre hedef eşdeğer periyot ve sönümü elde etmek amacıyla yalıtıcıların doğrusal olmayan davranışını belirleyen parametreler her analiz için literatürde bulunan bir yöntem ile kalibre edilmiştir. Üstyapı ve yalıtım setleri ile 900 adet model oluşturulmuştur. Bu yapıların analizlerinde kullanılmak üzere yedi adet tarihsel deprem kayıt çiftleri belirlenmiş ve bu kayıtlar öngörülen bir spektruma spektral eşleştirme yöntemi ile uygun hale getirilmiştir. Tüm yapılar zaman-tanım alanı analizlerine tabi tutularak, tüm yapı tepkilerinin en büyük değerlerinin ortalamaları elde edilmiştir. Bu çalışmaya paralel olarak üstyapıların tekil yalıtımlı yapı halleri de aynı deprem kayıtları için zaman-tanım analizlerine tabi tutulmuştur. Yapı tepkilerini karşılaştırmak için bazı indeksler tanımlanmıştır. Tepkiler, bu indeksler üzerinden karşılaştırılmış ve sonuçlar grafiksel ve tablo olarak sunulmuştur. Sonuçlar, iki üstyapının özellikleri birbirinden farklılaştıkça, ortak yalıtımlı çoklu sistem tepkilerinin, tekil hallerinin tepkilerinden önemli oranda farklılaştığını göstermektedir. Bundan dolayı, tekil yapılar için yönetmeliklerde önerilen ve mühendislik uygulamalarında kullanılan yöntemlerin ortak yalıtımlı yapılara uygulanması durumunda ve bu yapılar mutlaka zaman-tanım analizleri ile incelenmeli ve tasarım teyit edilmelidir.

ANAHTAR KELİMELER: sismik yalıtım, deprem, ortak yalıtım düzlemi.

PARAMETRIC INVESTIGATION OF TWO SEISMICALLY BASE-ISOLATED STRUCTURES WITH COMMON ISOLATION PLANE

ABSTRACT:

In this paper, behavior of two base-isolated structures having the same isolation plane is investigated by a comprehensive parametric study, and the structural responses are compared with their conventional counterparts.

*Bu çalışma Bekin (2018)'den alınmıştır.

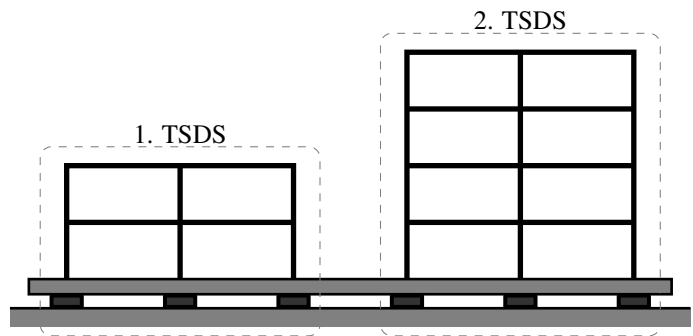
Current standards and classical theory of base-isolation are suitable for structures with one superstructure, and they cannot be directly applied to the multi-superstructure systems. On approach to design multiple base-isolated structures with common isolation plane is to assume all superstructures as one mass for the isolation design and to assume each superstructure as separate single isolated structure for the superstructure and utilize the methods available in the structural codes. The final multi-superstructure system is then verified with time-history analyses. Among these assumptions, there is a limited number of literature on the one regarding the consideration of separate isolated structures. A parametric study is performed to investigate the validity of this assumption. As the scope of this study, number of the superstructures is selected as, two and 100 pairs of superstructure models, where the number of stories of the superstructures varied from 1 to 10, are generated. The superstructures are modeled as multiple degree of freedom systems, where the floor mass is concentrated at the floor level, and story stiffness are represented by linear shear springs. The spring stiffness is selected to represent an exemplary base-isolated structure. The purpose of having many types of superstructure is to consider a large range of possible superstructure periods. In addition, 9 isolation sets are considered for equivalent periods of 1.50 sec, 2.50 sec and 4.00 sec and equivalent damping values of 10%, 20% and 30%. The nonlinear behavior of the isolators is represented by a bilinear element. The parameters that determine the nonlinear behavior of the isolators are calibrated by a method available in the literature for each analysis in order to obtain the target equivalent period and damping values due to the changing superstructure properties. In total, 900 models are established. Seven historical earthquake ground acceleration pairs are selected for the analysis of these structures, and these records are spectrally matched to a given spectrum. Time-history analyses are performed on all the structures, and averages of the maximum values of all structure responses are obtained. In addition, conventional base-isolated versions of the superstructures are analyzed using the same ground motion data. Some indices are defined to compare the structural responses, The results are compared graphically and tabularly though these indices. The results show that responses of the structures with common isolation plane differ more significantly from the responses of their conventional counterparts as the properties of the two superstructures differ. It is understood that if the methods used for conventional base-isolated structures are applied to the multiple base-isolated structures with common isolation plane, final design should be investigated and verified with time-history analysis.

KEYWORDS: base-isolation, earthquake, common base-isolation plane.

1. GİRİŞ

Sismik yalıtım, yapıyı esnek bir katman ile yerden izole ederek yer hareketinin yapı üzerindeki etkilerini azaltmayı hedefler. Azalan yapı tepkileri yalıtım katmanının çevrimsel enerji sönümlenmesi ile daha da azalır. Bu yapılarda yalıtım sayesinde üstyapı toplu bir kütle davranışı gösterir. Bundan dolayı, tüm yapının tek serbestlik dereceli bir sistem (TSDS) ile ifade edildiği yaklaşımlar yalıtımlı yapı tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda üstyapı tümünden bir kütle olarak, esnek yalıtım katmanı doğrusal olmayan bir yay ile ifade edilir. Yayda oluşan kuvvet ve yerdeğiştirmeler yalıtım kuvvet ve yerdeğiştirmelerine denk gelmektedir. Bu kuvvetler daha sonra üstyapıya ayrıca statik bir yaklaşımla dağıtılarak üstyapı tasarımı da yapılabilmektedir.

Sismik yalıtımlı yapı uygulamalarının artması ile beraber, son yıllarda bu yapılar ile ilgili olarak farklı mimari taleplerde gündeme gelmektedir. Bunlara örnek olarak iki yapının aynı yalıtım katmanını üzerinden bulunması verilebilir (örnek: Şekil 1). Normalde yan yana olan iki ayrı yalıtımlı yapının birbirlerine göre yerdeğiştirmeleri, yalıtım katmanlarının esnek olması nedeni ile, yüksek olabilir. Eğer bu yapıların kullanım açısından mimari geçişler ile birbirlerine bağlı olması gerekiyor ise geçişi sağlayan yapısal olmayan elemanların tasarımı ol-



Şekil 1. Ortak yalıtım düzlemine sahip iki yalıtımlı yapı ve TSDS yaklaşımı.

dukça zor ve maliyetli olabilmektedir. Eğer bu iki yapı aynı yalıtım katmanı üzerinde ise görelî yerdeğiştirmelerin çok daha düşük mertebelerde olması ve mimari geçişlerin daha kolayca tasarlanıyor olması beklenir. Eğer birbirleri ile mimari kullanım ilişkisi bulunan ikiden fazla yapı var ise tüm yapıların ortak yalıtım katmanını kullanması da mümkündür. Bu şekilde ikiden fazla yapının birbirleri arasındaki mimari geçişleri daha kolayca tasarlanabilir.

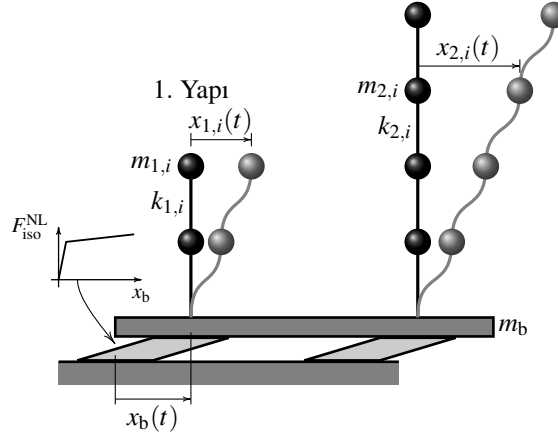
İki ya da daha fazla yapının ortak yalıtım katmanına sahip olması, tasarım açısından bazı zorlukları beraberinde getirmektedir. Bunlardan en bilineni, tasarımda TSDS yaklaşımının doğrudan kullanılamaması, belli kabuller dahilinde ve zaman-tanım analizleri ile yapı performansı teyidini yapmak kaydı ile kullanılmaktadır (Şekil 1). TSDS yaklaşımında bir adet üstyapı var iken, çoklu üstyapı olması durumunda, birbirleri ile, yalıtım döşemesi tabir edilen ve yalıtıcıların üst noktalarından bağlandığı döşeme ile bağlı olan, birden fazla üstyapı mevcuttur. TSDS yöntemi üstyapıların kütle ve rijitlik açısından, ya da periyot açısından, birbirlerinin yakın değerlere sahip olması durumunda kabul edilebilir bir hata payı ile kullanılabilir. Aksi durumda, TSDS yöntemi ile yapılacak tasarımda hataların yüksek olacağı açıktır. Bundan dolayı, bu tip yapılarda bileşik tüm yapı modelinin zaman-tanım analizleri ile değerlendirmesi uygun olmaktadır. Bu noktada, özellikle üstyapı özelliklerinin birbirinden çok farklı olduğu bir durum söz konusu ise ve TSDS gibi yaklaşık yöntemlerin mutlaka ön tasarımda kullanılması gerekiyor ise, TSDS yöntemi ile oluşacak hata payını anlamak ve buna göre tasarımda gerekli önlemleri almak, zaman-tanım analizleri ile yapılan değerlendirmelerde beklenmeyen problemlerin ortaya çıkma ihtimalini azaltacaktır. Bundan dolayı, aynı yalıtım düzlemine sahip çoklu yapıların incelenmesi faydalı olmaktadır.

Ortak yalıtım düzlemine sahip çoklu yapılar üzerine literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Tsopelas v.d. (1991) ve Tsopelas v.d. (1994) tarafından yapılan çalışmalarda, çoklu yapılar için bir yazılım geliştirilmiş ve iki adet yapı bu yazılım ile incelenmiştir. Selek ve Alhan (2013) tarafından yapılan çalışmada ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılar yapı kat sayısı, yapıların plandaki konumu, dış merkezlik ve yalıtıcı periyodu birer parametre olarak belirlenerek üç farklı deprem kaydı altında analiz edilerek sonuçlar konvansiyonel yapı tasarımı ile karşılaştırılmıştır. Güler v.d. (2017) tarafından yapılan çalışma ise 4 ve 7 katlı iki yapının görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri ve en büyük kat ivmeleri bağımsız ve ortak yalıtım düzlemlerinde bulunmaları durumuna göre karşılaştırılmıştır. Tüm bu çalışmalar dışında kapsamlı bir parametrik çalışma literatürde bulunmamaktadır.

Bu çalışma ile ortak yalıtımlı yapılar kapsamlı bir parametrik incelemeye tabi tutulması ve tekil yalıtımlı yapılarda hem yalıtım katmanı hem de üstyapı tasarımı için kullanılan yöntemlerin çoklu yapılarda geçerliliği araştırılmıştır. Üstyapı sayısı iki olarak belirlenmiştir. Bu yapıların her biri kat sayıları 1'den 10'a kadar değişecek şekilde oluşturmuştur. Üst yapıların matematiksel modelinde toplu kütle ve doğrusal kayma çerçeve kabulü kullanılmıştır. Kesme yay rijitlikleri istenilen üstyapı periyotlarının elde edilmesini sağlayacak şekilde elde edilmiştir. Bu üst yapı setine ek olarak olarak öngörülen bir depremsellik altında yalıtım eşdeğer periyotlarının 1.50 sn, 2.50 sn ve 4.00 sn ve eşdeğer sönümlenmelerinin %10, %20 ve %30 olduğu 9 adet yalıtım seti düşünülmüştür. Yalıtım elemanlarının doğrusal olmayan davranışlarının çiftdoğrusal eleman olduğu kabul edilmiştir. Farklı üst yapı durumları (katsayısına bağlı olarak kütle ve rijitlikteki değişiklikler) için hedef yalıtım eşdeğer periyot ve sönüm değerlerini veren çiftdoğrusal eleman özellikleri literatürde bulunan bir yöntem ile elde edilmiştir. Farklı üstyapı ve yalıtım özellikleri ile oluşturulan yapı sayısı 900 adettir. Bu yapıların analizleri için yedi adet tarihsel güçlü deprem kayıt çiftleri seçilmiş ve bu kayıtlar öngörülen bir spektruma, spektral eşleştirme yöntemi ile uygun hale getirilmiştir. Tüm yapılar zaman-tanım alanı analizlerine tabi tutulmuş ve yapısal tepkilerin ortalama maksimum değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda üstyapıların tekil yalıtımlı yapı halleri de aynı deprem kayıtları altında zaman-tanım analizlerine tabi tutulmuş ve yapıların ortak yalıtımlı halleri ile tekil halleri seçilen bazı indeksler ile karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER

Bu bölümde, ortak yalıtım düzlemine sahip iki yapının doğrusal olmayan dinamik denge denklemi, bu denklemin çözüm yöntemi ve TSDS yöntemi kısaca açıklanmıştır. Ayrıca yalıtım birimi histeretik eğri parametrelerinin hedef eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm değerine ulaşmak için kullanılan yöntem açıklanmıştır. Daha sonra çoklu yapı ile tekil yapı tepkilerinin karşılaştırılmasında kullanılan indisler tanımlanmıştır.



Şekil 2. Ortak yalıtım düzlemine sahip iki yalıtımlı yapı modeli

2.1. Ortak Yalıtım Düzlemine Sahip İki Yapının Hareket Denklemi

Ortak yalıtım düzlemine sahip iki yapının hareket denklemi Tsopelas v.d. (1994) tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak elde edilmiş ve burada özet olarak verilmiştir. Burada üst yapıların hareket denklemi yalıtım düzlemine göre bağıl olarak elde edilir. Yalıtım düzlemi hareket denklemi ise üst yapının taban kesme kuvveti, yalıtıcı kuvveti ve yalıtım düzlemi atalet kuvvetleri dikkate alınarak zemine göre bağıl olarak yazılır. Denklemlerin son hali şu şekildedir:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{F}_s(t) = -\mathbf{M}\mathbf{S}_1\ddot{x}_g^{\text{abs}}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s\mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T\mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T\mathbf{M}_s\mathbf{R} + M_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_s(t) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t) + \mathbf{S}_1 F_{\text{iso}}^{\text{NL}}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} M_{s,1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_{s,2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} K_{s,1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_{s,2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} C_{s,1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_{s,2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_1 = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s^b(t) \\ \mathbf{x}_b^g(t) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{x}_s^b = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{s,1}^b \\ \mathbf{x}_{s,2}^b \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{x}_{s,j}^b = \begin{Bmatrix} \vdots \\ x_{j,i}(t) \\ \vdots \end{Bmatrix}, \quad i = 1, \dots, n_j, \quad j = 1, 2 \quad (4)$$

Burada Denklem 4'te verilen i ve j indisleri sırası ile indisi bina kat ve yapı numaralarını ifade etmektedir. $\mathbf{M}_{s,j}, \mathbf{C}_{s,j}$ ve $\mathbf{K}_{s,j}$ sırası ile üst yapıların kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. $\mathbf{x}_{s,j}^b$ üst yapı katlarının yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirmelerini içeren sütun matrisi ve \mathbf{x}_b^g terimi ise yalıtım düzleminin zemine göre bağıl yer değiştirmesidir. $F_{\text{iso}}^{\text{NL}}(t)$ ise yalıtım seviyesinde oluşan doğrusal olmayan kesme kuvvetleridir.

2.2. Hareket Denklemine Doğrusal Olmayan Çözüm Yöntemi

Bu çalışmada hareket denklemi Newmark- β yöntemi Newmark (1959) ile çözülmüştür. Bu yöntemde hareket denkleminin artımsal formu aşağıdaki gibi yazılır.

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}}_i + \Delta\mathbf{F}_{s,i} = \Delta\mathbf{P}_i \quad (5)$$

Newmark- β yönteminde hız ve ivme için şu kabuller yapılır:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta\mathbf{x}_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\mathbf{x}}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{x}}_i, \quad \Delta\ddot{\mathbf{x}}_i = \frac{1}{\beta\Delta t^2} \Delta\mathbf{x}_i - \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{\mathbf{x}}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{x}}_i \quad (6)$$

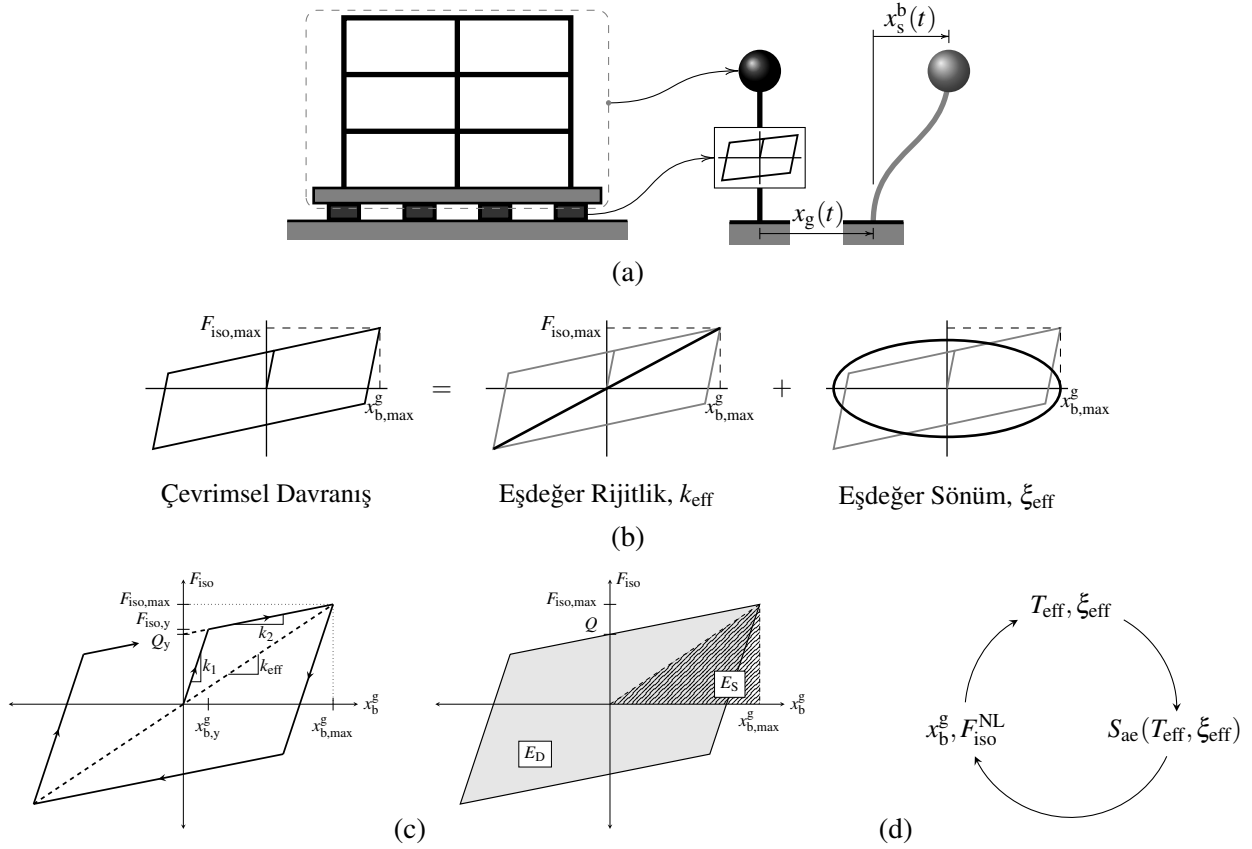
Denklem 6, denklem 5 yerine konulursa aşağıda verilen cebirsel form elde edilir:

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{x}_i + \Delta\mathbf{F}_{s,i} = \Delta\hat{\mathbf{P}}_i \quad (7)$$

Burada \mathbf{A} ve $\Delta\hat{\mathbf{P}}_i$ terimleri aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\beta\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \mathbf{C}, \quad \Delta\hat{\mathbf{P}}_i = \Delta\mathbf{P}_i + \left(\frac{1}{\beta\Delta t} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C}\right) \dot{\mathbf{x}}_i + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) \mathbf{C}\right] \ddot{\mathbf{x}}_i \quad (8)$$

Denklem 7, $\Delta\mathbf{F}_{s,i}$ 'in $\Delta\mathbf{x}_i$ 'ye bağıl olmasından dolayı ancak Newton-Raphson veya benzeri yöntemler ile çözülebilmektedir. Doğrusal olmayan denklem çözümüne ait detaylar Erkus (2004)'de bulunabilir.



Şekil 3. TSDS yönteminde (a) yalıtımlı yapının TSDS'e indirgenmesi, (b) eşdeğer yay ve sönümleme, (c) E_D ve E_S tanımları ve (d) yinelemeli hesap.

2.3. TSDS Yöntemi

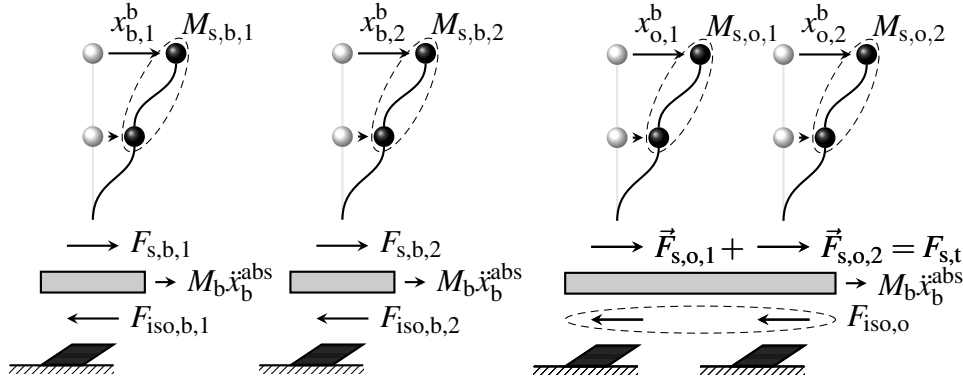
Tek serbestlik dereceli sistem (TSDS) yöntemi, tekil yalıtımlı yapıların tasarımında kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yalıtım elemanlarının doğrusal olmayan davranışı bir eşdeğer doğrusal yay ve bir viskoz sönümleme ile ifade edilerek yapı tek serbestlik dereceli bir sistem olarak temsil edilir (Şekil 3) Bu yöntemde amaç yalıtım seviyesi kesme kuvvetini ve en büyük yer değiştirmeyi verilen bir ivme spektrumu için belirlemektir.

TSDS yönteminde ilk önce yalıtım yer değiştirmesi hakkında bir kabul yapılır. Bu kabul ve yalıtım çift-doğrusal davranışı üzerinden ya da eşdeğer rijitlik (sekant rijitlik), eşdeğer periyot ve eşdeğer sönümleme hesaplanır. Öngörülen ve %5 sönümleme oranı için hazırlanmış ivme spektrumu, eşdeğer sönüm için genellikle yönetmeliklerce verilen formüller ile hesaplanan sönüm azaltma katsayısı ile güncellenir. Azaltılmış spektrum kullanılarak, eşdeğer periyotta denk gelen spektral ivme ve bu ivmeye denk gelen spektral yer değiştirme bulunur. Hesaplanan bu yeni yer değiştirme ile hesap değerler yakınsayınca kadar yinelemeli devam eder (Şekil 3). Aşağıda bu yöntemde kullanılan temel formüller verilmiştir:

$$k_{eff} = \frac{f_{max}}{x_{max}}, \quad T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{k_{eff}}}, \quad \xi_{eff} = \frac{E_D}{4\pi E_S}, \quad E_D = 4Q_y(u_{max} - u_y), \quad E_S = \frac{k_{eff} u_{max}^2}{2} \quad (9)$$

Burada E_D bir çevrimde sökülünen enerjiyi, E_S maksimum yer değiştirme anındaki birim şekildeğiştirme enerjisini ifade etmektedir. Yalıtım seviyesi kesme kuvvetleri hesaplandıktan sonra, üst yapı kuvvetleri eşdeğer statik yöntemler kullanılarak (örnek: ters üçgen dağılım) elde edilir ve üst yapı tasarlanır. Kat kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan eşdeğer statik yöntemler genellikle yönetmeliklerde verilmiştir.

TSDS yöntemi ortak yalıtım düzlemine sahip çoklu yapılarda da benzer şekilde uygulanır. Yalıtım seviyesi kesme kuvvetleri hesaplanırken tüm üst yapıların ve ortak yalıtım döşemesinin toplam kütlesi TSDS kütlesi olarak kabul edilir. Üst yapı kat kuvvetleri bulunurken de, ilk önce toplam yalıtım kesme kuvveti üst yapılara onların ağırlıkları oranında dağıtılır. Daha sonra her bir yapı için eşdeğer statik yöntemler kullanılarak (örnek: ters üçgen) kat kuvvetleri hesaplanır. Ancak, statik olarak hesaplanan kat kesme kuvvetleri, özellikle üst yapılar birbirinden farklılaştıkça önemli oranda hatalar içerir (Güler v.d. 2017).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan notasyonlar.

2.4. Yalıtıcı Çiftdoğrusal Özelliklerinin Belirlenmesinde İzlenen Yol

Bu çalışmada, parametrik olarak yapılan analiz sonuçlarını daha etkin olarak karşılaştırmak amacı ile, üst yapı özellikleri değişikçe aynı eşdeğer eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla York ve Ryan (2008)'da açıklanan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, temel çiftdoğrusal eleman özellikleri (Q_y ve k_2), verilen bir eşdeğer periyot ve eşdeğer sönümleme çifti için şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Q_y = \frac{\pi \xi_{eff} k_{eff} u_{max}^2}{2(u_{max} - u_y)}, \quad k_2 = \frac{k_{eff} u_{max} - Q_y}{u_{max}} \quad (10)$$

Denklem 10'de görüldüğü gibi Q_y ve k_2 parametrelerinin belirlenebilmesi u_{max} ve u_y değerlerinin bilinmesi ile mümkündür. Bu çalışmada u_y yalıtıcı akma yer değiştirmesi Ryan ve Chopra (2004) tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak kurşun çekirdekli yalıtıcılar için 1 cm alınmıştır. İzolatör en büyük yer değiştirmeleri ise eşdeğer rijitiliğin kullanıldığı bir TSDS'in ilgili deprem kaydı altında doğrusal zaman-tanım analizlerinden elde edilmiştir. Doğrusal analizlerde kullanılacak yalıtıcı sönüm ve rijitlik değerleri hedef eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm değerleri için $C_b = 2M_t \xi_{eff} \omega_{eff}$ ve $k_{eff} = M_t / (T_{eff}/2\pi)^2$ kullanılarak elde edilmektedir. Her analizden elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinin ortalaması alınarak u_{max} değeri hesaplanmıştır. Burada doğrusal analiz sonuçlarına göre hesaplanan u_{max} değerine karşılık belirlenen çiftdoğrusal eğrinin doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilecek değerinin u_{max} değerinden farklı olacağı açıktır. Ancak, yapılan analizlerde bu farkın kabul edilebilir mertebede olduğu görülmüş ve York ve Ryan (2008) tarafından kullanılan yinelemeli bir çözüme ihtiyaç duyulmamıştır.

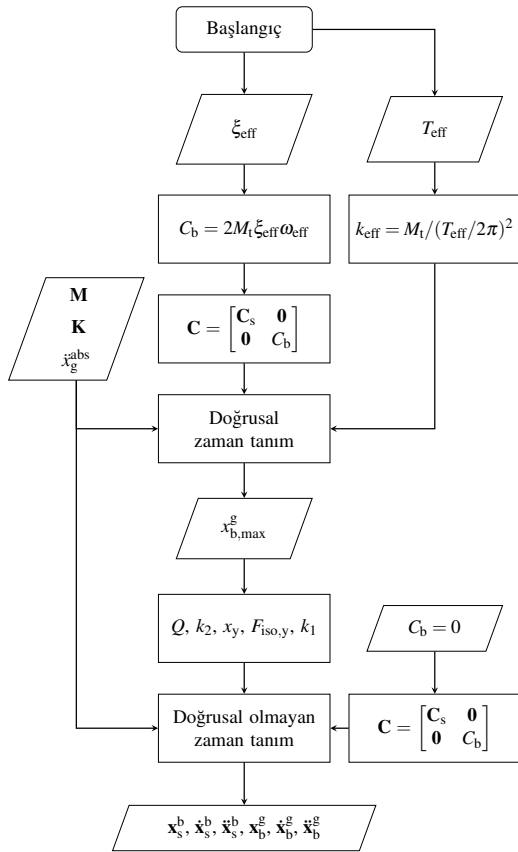
2.5. Karşılaştırma için Kullanılan Notasyon ve İndisler

Sonuçların daha anlaşılır olması için çalışmada kullanılan notasyon ve indisler Şekil 4'de gösterilmiştir. Üst yapı kat yer değiştirme değerleri yalıtım düzlemine göre bağıl olarak verilmiştir. Dolayısıyla değişkenin nereye göre bağıl olarak verildiği üst indis ile ifade edilmiştir. M_s üst yapı kat kütlelerinin toplamını, F_s taban kesme kuvvetini, F_{iso} yalıtıcı kesme kuvvetini, x_b^b bağımsız yalıtımlı yapı modelindeki kat yer değiştirmelerini ve x_o^b ise ortak yalıtım düzlemine sahip çoklu üstyapıların kat yer değiştirmeleridir. Şekil 4'de "b" alt indisi ilgili değer "bağımsız" yapılara ait olduğunu, "o" alt indisi ilgili değer "ortak" yalıtımlı çoklu yapıya ait olduğunu belirtmektedir. Ardından gelen rakamlar ise üst yapı numarasını ifade etmektedir. Bunlardan ayrı olarak M_b yalıtım düzlemi kütlelerini ve \ddot{x}_b^{abs} ise yalıtım düzlemi mutlak ivmesini ifade etmektedir. Üst yapı ve yalıtım düzlemi için verilen göreceli ivmeler şunlardır:

$$\ddot{x}_{s,j,i}^{abs} = \ddot{x}_{j,i}^b + \ddot{x}_b^{abs}, \quad \ddot{x}_b^{abs} = \ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{abs}, \quad j = 1, 2 \quad (11)$$

Burada $\ddot{x}_{s,j,i}^{abs}$ üst yapı kat mutlak ivmesi, $\ddot{x}_{j,i}^b$ üst yapı katının yalıtım düzlemine göre bağıl ivmesi, \ddot{x}_b^{abs} yalıtım düzlemi mutlak ivmesi, \ddot{x}_b^g yalıtım düzleminin zemine göre bağıl ivmesi ve \ddot{x}_g^{abs} zeminin mutlak ivmesidir. Şekil 4'de verilen taban kesme kuvvetlerinin ilgili kütlelere bölünmesi ile tanımlanan *taban kesme kuvveti katsayıları* ve *bağıl hata* şu şekilde elde edilmiştir:

$$C_{s,o,1} = \frac{F_{s,o,1}}{W_{s,o,1}}, \quad C_{s,t} = \frac{F_{s,t}}{W_{s,o,1} + W_{s,o,2}}, \quad C_{s,o,1,err} = \frac{C_{s,o,1} - C_{s,t}}{C_{s,t}}, \quad C_{s,t,err} = \frac{(C_{s,o,1} + C_{s,o,2}) - 2C_{s,t}}{2C_{s,t}} \quad (12)$$



Şekil 5. Analiz programı akış şeması.

Tablo 1. Üstyapı özellikleri

Yapı	Kat	T_1 (s)	ω_1 (r/s)	ω_n (r/s)
1	1	0.1573	39.94	–
2	2	0.2546	24.68	64.62
3	3	0.3535	17.77	71.97
4	4	0.4530	13.87	75.06
5	5	0.5527	11.37	76.64
6	6	0.6526	9.63	77.56
7	7	0.7525	8.35	78.13
8	8	0.8525	7.37	78.52
9	9	0.9525	6.60	78.79
10	10	1.0526	5.97	78.98

Tablo 2. Analiz parametreleri

Analiz No.	T_{eff}	ξ_{eff}
1	1.5	0.10
2	1.5	0.20
3	1.5	0.30
4	2.5	0.10
5	2.5	0.20
6	2.5	0.30
7	4.0	0.10
8	4.0	0.20
9	4.0	0.30

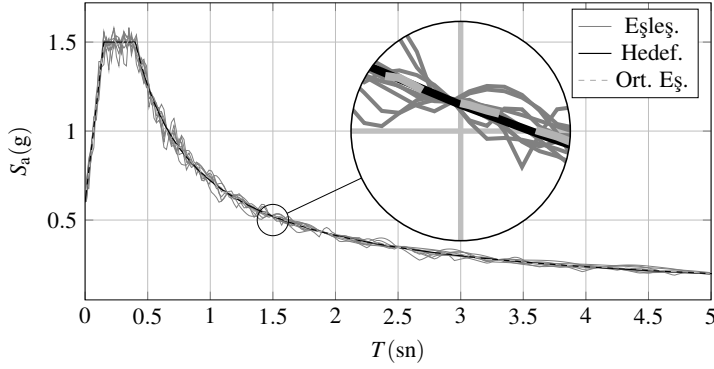
Burada $F_{s,t}$ üst yapıların taban kesme kuvvetlerinin vektörel toplamıdır. Bu değer doğrusal olmayan zaman tanım analizlerinin her bir zaman adımında yapıların taban kesme kuvvetlerinin vektörel olarak toplanarak bulunan en büyük değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. $C_{s,o,1,err}$ ile tanımlanan bağıl hata yapıların herbirinde oluşan gerçek taban kesme kuvvet katsayısının, TSDS kabulü ile yapılan ve tümleşik yapı için hesaplanan taban kesme kuvvet katsayısından ne kadar farklı olduğunu göstermektedir. Bu bağıl hataya indisine ek olarak, tümleşik yapının üstyapılarında oluşan taban ve kat kesme kuvvetlerinin, aynı yapıların bağımsız olması durumunda oluşan taban ve kat kesme kuvvetlerinden farkı da incelenmiştir.

3. PARAMETRİK ANALİZLER

Bu bölümde, ilk önce sırası ile çalışmada ele alınan üst yapıların yapısal özellikleri, analiz programına ait algoritma detayları, analizlerde kullanılan deprem kayıtları seçimi ve uygunlaştırma yöntemi ile ilgili bilgi verilmiştir. Daha sonra analiz sonuçları Bölüm 2.5.'de verilen notasyon ve indislere uygun olarak sunulmuştur.

3.1. İncelenen Yapıların Özellikleri

Çalışmada 1'den 10'a değişen yapı kat sayısı ve 3'er adet eşdeğer sönüm ile eşdeğer periyot değerleri parametre olarak kullanılmıştır. 10 farklı yapının tüm aynı yalıtım düzleminde bulunma kombinasyonları 9 adet yalıtım birimi parametresi için tekrarlanmıştır. Üst yapılar yalnızca doğrusal kesme yayları kullanılarak kat hizalarında toplu kütleler ile çok serbestlik dereceli olarak modellenmiştir. Kat kesme rijitliği $k_i = 1036800$ kN/m, kat kütlesi $m_i = 650$ t ve üst yapı sönüm oranı $\xi = 0.05$ olarak alınmıştır. Bu değerler ile hesaplanan üst yapıların ankastre mesnetli periyot ve açısal frekans özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca her bir yapı için yalıtım düzlemi kütlesi $M_b = 981$ t olarak alınmıştır. Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan özellikleri parametrik olarak belirlenmiş olup detayları Bölüm 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 6. Hedef spektruma uygunlaştırma.

Tablo 3. Deprem kayıtları

Kayıt	Deprem	Faya Uz.	Süre
P0017	Imperial Valley	18.2 km	39.0 sn
P0012	Imperial Valley	18.2 km	39.0 sn
P0730	Superstition Hills	13.3 km	40.0 sn
P0898	Northridge	47.4 km	35.0 sn
P0856	Landers	69.2 km	50.0 sn
P0967	Northridge	32.7 km	40.0 sn
P0003	Imperial Valley	1.0 km	39.3 sn
P0020	Imperial Valley	8.5 km	37.8 sn
P0856	Landers	88.5 km	50.0 sn
P0051	Imperial Valley	23.8 km	39.5 sn

3.2. Analiz Prosedürü

Parametrik çalışmayı yapmak amacı ile bir analiz programı yazılmıştır. Programın akış şeması Şekil 5'de verilmiştir. Analizde kullanılan parametreler ve bu parametrelere karşılık gelen analiz adetleri Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Kat sayısı 1'den 10'a kadar değişen yapıların tüm kombinasyonları 3 farklı eşdeğer sönüm ve eşdeğer periyot için analiz edilmiştir. Üst yapı sönüm matrisleri is Rayleigh sönümleme kullanılmıştır.

Global matrislerin kurulması için yalıtım birimine ait doğrusal olmayan parametreler Bölüm 2.4.'de verilen yöntem ile elde edilmiştir. Özetle, Tablo 3'te verilen deprem kayıtları için doğrusal zaman tanım analizleri ile yalıtıcı maksimum yerdeğiştirmelerin ortalamaları bulunmuştur. Yalıtıcılara ait doğrusal olmayan parametreler Denklem 10 yardımıyla hesaplanmıştır. Son olarak ortak yalıtım düzlemi üzerinde bulunan sismik yalıtımlı yapılar doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlere tabi tutulmuştur. Bu aşamada yalıtıcılarda yalnızca histeretik sönüm kullanılmış olup ilave viskoz sönüm tanımlanmamıştır.

3.3. Depremsellik

Çalışmada Fahjan (2008) tarafından DBYBHY (2007)'de yer alan Z2 zemin sınıfı için önerilen ivme kayıtları kullanılmıştır (Tablo 3). Tasarım spektrumu yapı önem katsayısı, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan en büyük deprem spektrumunu elde edebilmek amacıyla $I = 1.5$ seçilmiştir. İvme kayıtları Atik ve Abrahamson (2010) tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak elde edilen tasarım spektrumuna eşleştirilmiştir (Şekil 6).

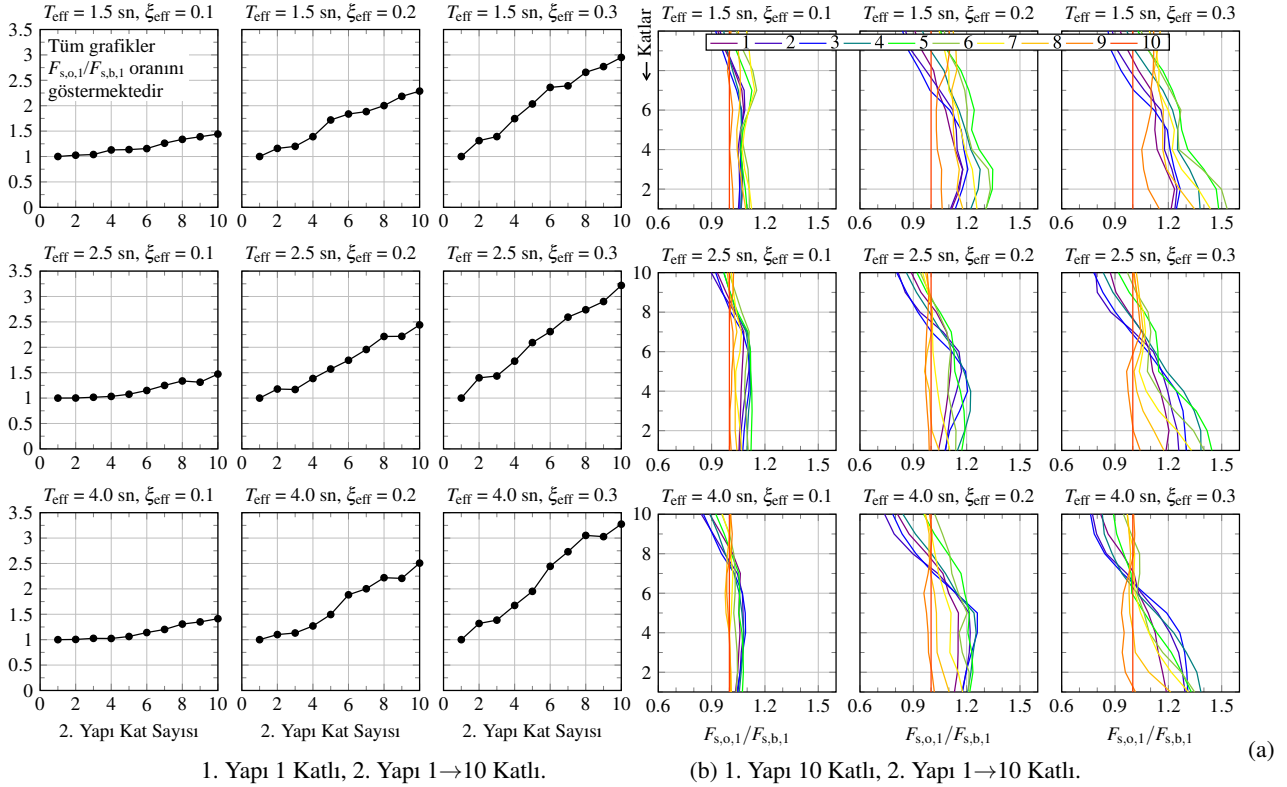
3.4. Sayısal Sonuçlar

Şekil 7'de verilen grafiklerde 1. yapının taban kesme kuvvetleri incelenmiştir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan 1. yapının taban kesme kuvvetleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapı taban kesme kuvvetlerine göre normalize edilmiştir. Burada 1. yapının 1 katlı olması durumuna karşılık 2. yapının kat sayısı 1'den 10'a değişmektedir. Elde edilen bu grafik, yalıtım birimleri için belirlenen her eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm değerleri için hesaplanmıştır.

Şekil 7'de verilen analiz sonuçları incelendiğinde 2. yapının 1 katlı olması durumu için normalize taban kesme kuvvetlerinin her durumda 1 olduğu görülmektedir. Buna karşılık sonuçların artan 2. yapı kat sayısına ve artan eşdeğer sönüm değerine karşılık arttığı görülebilir. Dolayısıyla 1. yapı taban kesme kuvvetinin ortak yalıtım düzleminde bulunması halinde bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre 3.25 katına çıktığı görülebilir. Bunun yanında eşdeğer periyot değişiminin etkisi görece olarak düşüktür.

Şekil 7'de verilen grafikte ortak yalıtım düzleminde bulunan 1. yapının 10 katlı olması durumuna karşılık 2. yapı kat sayısının 1'den 10'a değiştiği durumlar için 1. yapı normalize kesme kuvvetleri gösterilmiştir. Burada 2. yapının da 10 katlı olduğu durumda normalize kesme kuvvetleri tüm katlarda 1 olmaktadır. Artan yalıtıcı eşdeğer sönümler ile taban kesme kuvvetlerinde en fazla %50'nin üzerinde bir artış olduğu görülmektedir. 1. yapının taban kesme kuvvetindeki artışın 2. yapının kat sayısının artmasıyla artarak 6 katlı yapıda en yüksek değerini aldığı görülebilir. Ardından 2. yapının kat sayısının artmasıyla 1. yapı taban kesme kuvvetinde artış azalmaya başlamaktadır.

Yalıtım birimi özellikleri ve bina kat sayılarına bağlı olarak yapılan tüm analizlerin sonuçları, Denklem 12



Şekil 7. (a) 1 katlı yapı normalize taban kesme kuvvetleri. (b) 10 katlı yapı normalize taban kesme kuvvetleri.

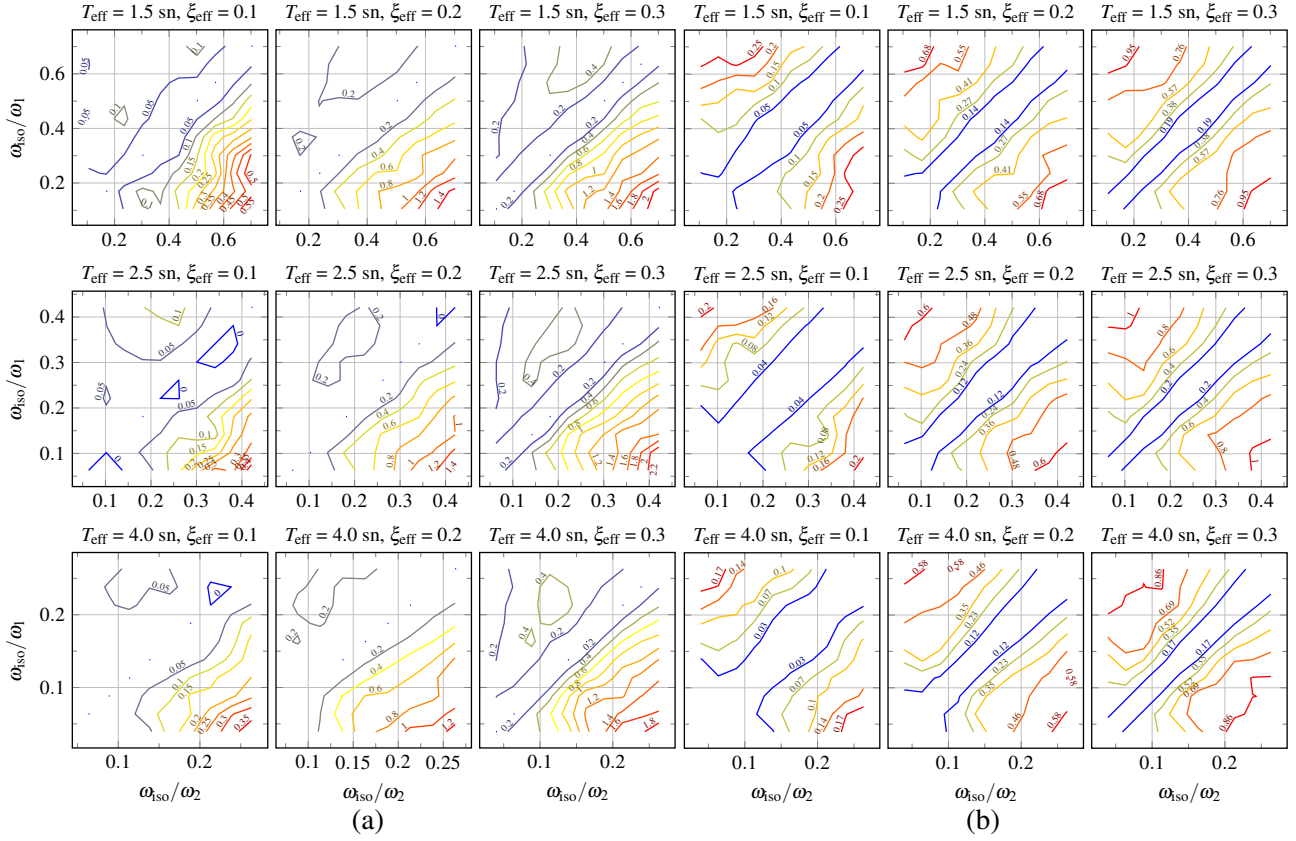
ile verilen $C_{s,o,1,err}$ bağıl hata formülü Şekil 8(a)'da gösterilen grafikte verilmiştir. Burada, sonuçları analizlerde kullanılan yapıların yapısal özelliklerinden bağımsızlaştırmak amacıyla 1. ve 2. yapı açılmalık frekansları yalıtıcı açılmalık frekansına göre normalize edilerek verilmiştir. Ayrıca analiz sonuçları Denklem 12'de görüleceği gibi 1. yapı taban kesme kuvveti katsayılarındaki artışlar toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağıl olarak verilmiştir. Şekil 8(b)'de ise Denklem 12 ile verilen $C_{s,t,err}$ bağıl hata formülü gösterilmiştir. Bu grafik, ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvvetlerinin en büyük değerlerinin toplamı ile yapıların toplam taban kesme kuvvetinin doğrusal olmayan analiz adımları içinde vektörel olarak toplanarak elde edilen değer arasındaki farkı göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma neticesinde yapıların farklı yapısal özellikteki diğer bir yapı ile ortak yalıtım düzleminde bulunmaları, yapının bağımsız yalıtım düzleminde tasarlanması durumunda oluşacak olan taban kesme kuvvetlerinin önemli ölçüde artacağı sonucuna varılmıştır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının tüm yapısal özelliklerinin aynı olması durumunda yalıtıcı özelliklerinden bağımsız olarak taban kesme kuvvetinde artış olmadığı görülmüştür. Ortak yalıtım düzleminde bulunan ve yapısal özellikleri bir birinden farklı yapıların taban ve kat kesme kuvvetlerinde her durumda artış olduğu belirlenmiştir. Taban kesme kuvvetlerinde oluşan artışların yalıtıcının artan eşdeğer sönüm oranı ile arttığı, bununla birlikte yalıtıcı eşdeğer periyot değişiminin taban kesme kuvvetleri değişiminde etkisinin düşük olduğu belirlenmiştir. Taban kesme kuvvetindeki en büyük artışın 1 ile 10 katlı yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması ve yalıtıcı eşdeğer sönüm oranının %30 olması durumunda 1 katlı yapı için 3 kat olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Atik LA ve Abrahamson N (2010). "An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching," *Earthquake Spectra*, **26** (3): 601–617.



Şekil 8. Normalleştirilmiş hata indisleri (Denklem 12): (a) $C_{s,o,1,err}$ ve (b) $C_{s,t,err}$

- Bekin M (2018). *Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan Sismik Yalıtımlı İki Bağımsız Yapının Kapsamlı Parametrik İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- DBYBHY (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik*. Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- Erkus B (2004). "Comparison of the Techniques Used in the Newmark Analysis of Nonlinear Structures." *Proc. of the 17th ASCE Engineering Mechanics Conference* (June 13, 2004). Newark, Delaware.
- Fahjan YM (2008). "Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi," *İMO Teknik Dergi*, **292**: 4423–4444.
- Güler MD, Yılmaz C, ve Erkuş B (2017). "Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan Bağımsız Yapıların Davranışlarının İncelenmesi". *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*. Eskişehir.
- Newmark NM (1959). "A Method of Computation for Structural Dynamics," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **85** (3): 67–94.
- Ryan KL ve Chopra AK (2004). "Estimation of Seismic Demands on Isolators Based on Nonlinear Analysis," *Journal of Structural Engineering*, **130** (3): 392–402.
- Selek M ve Alhan C (2013). *Ortak bir izolasyon tabanına sahip olan binaların sismik davranışı*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- Tsopelas P, Nagarajaiah S, Constantinou MC, ve Reinhorn AM (1991). *3D-BASIS-M: Nonlinear Dynamic Analysis of Multiple Building Base Isolated Structures*. Report NCEER 91-0014. Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York.
- Tsopelas P, Nagarajaiah S, Constantinou M, ve Reinhorn A (1994). "Nonlinear dynamic analysis of multiple building base isolated structures," *Computers & Structures*, **50** (1): 47–57.
- York K ve Ryan KL (2008). "Distribution of Lateral Forces in Base-Isolated Buildings Considering Isolation System Nonlinearity," *Journal of Earthquake Engineering*, **12** (7): 1185–1204.