

SÖNÜMLEYİCİLER İLE BAĞLI BETONARME PERDE DUVARLI YÜKSEK YAPILARDA EŞDEĞER SÖNÜMLEME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF EQUIVALENT DAMPING METHODS FOR TALL BUILDINGS WITH DAMPER COUPLED SHEAR WALLS

M. Emre ERDEMLİ¹ ve Barış ERKUŞ²

ÖZET

Bu bildiride, sönümleyiciler ile bağlı betonarme perde duvarları içeren yüksek yapılar için eşdeğer sönümleme yöntemleri incelenmiştir. Yüksek yapılarda bağ kirişlerin hasarını azaltarak yapı performansını artırmak amacı ile bağ kirişler yerine sönümleyici kullanılması çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Bu tip yapısal sistemlerin tasarımında kullanılmak üzere yapılacak modal birleştirme çözümlemelerinde eşdeğer sönümleme hesabı gerekmektedir. Literatürde sönümleyiciler için önerilen yöntemlerden en bilinen olanı bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye’de inşası yakın dönemde tamamlanmış, 43 katlı betonarme perde duvarlı bir yapı örnek olarak ele alınmıştır. Orijinal yapıda kullanılan çelik bağ kirişler yerine, dönme sürtünmesine dayalı sönümleyiciler kullanılmıştır. Verilen bu sönümleyici yerleşimi için enerji sönümlemeler bulunmuştur. Ancak yöntemlerin orijinal hallerinin yüksek yapılarda doğrudan uygulanmasının yapı yüksek modlarının etkin olmalarına bağlı olarak bazı zorluklar içerdiği gözlemlenmiş ve uygulamayı kolaylaştıran basitleştirmeler önerilmiştir. Söz konusu örnek yapı için verilen tasarım spektrumu için eşdeğer sönümlemeler kullanılarak modal birleştirme yöntemi ile çözümlemeler yapılmıştır. Sonuçlar, iki farklı modelin tasarım spektrumuna ölçeklendirilmiş yedi çift tarihsel deprem ivme kaydı için zaman tanım aralığında yapılan çözümlemelerinde elde edilen sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Birinci modelde yapısal sistem doğrusal ve sönümleyiciler doğrusal olmayan modeller ile modellenmiştir. İkinci modelde yapı doğrusal, sönümleyiciler eşdeğer rijitlik olarak düşünülmüş ve eşdeğer sönümleme yapı doğal sönümlemesi kapsamında hesaba katılmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde sönümleyiciler için kullanılan eşdeğer sönümleme yöntemleri ve önerilen basitleştirmeler ile elde edilen değerlerin yapı tasarımında kullanılmasına izin verecek şekilde kesinlik içerdiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Eşdeğer sönüm, yüksek yapı, sönümleyici

ABSTRACT

This paper presents seismic design considerations for tall buildings with reinforced concrete shear walls that are coupled with energy dissipation devices (dampers). The necessity of nonlinear analysis procedures and an advanced dynamics background during the design process of dampers increase the amount of time and workforce required to design them. Thus, calculating an effective damping value which allows a linear analysis method to be applied in the pre-design stage of dampers is a very critical issue in the matter. In this study, the reliabilities of equivalent damping methods are investigated. For this purpose, a 43-story tall building that has been recently built in Istanbul, Turkey is considered, where a reinforced concrete core shear Wall formed by two C-shaped walls that are coupled by steel beams are the main elements of the seismic force resisting system. Rotational friction dampers that are arranged to resist shear-type force is used as the coupling dampers.

Keywords: Equivalent damping, tall buildings, dampers

¹İnşaat Yüksek Müh., Arup, İstanbul, emreerdemli@gmail.com

²Yrd. Doç. Dr., İTÜ, İstanbul, bariserkus@gmail.com

GİRİŞ

Günümüzde, yapıların daha yüksek ve narin yapılması isteği, yapıların yatay kuvvetlere karşı daha hassas hale gelmelerine neden olmaktadır. Yüksek yapılar, servis süreleri boyunca rüzgar etkisine maruz kaldıklarından yatay kuvvet taşıyıcı sistemleri rüzgar yüklerine uygun olarak tasarlanmaktadır. Bununla birlikte sismik bölgelerde bulunan yüksek yapıların yatay taşıyıcı sistemlerinin tasarımının ise tamamen farklı bir yaklaşım ile yapılması gerekmektedir. Bağ kirişli betonarme perde duvar sistemi, sismik risk altındaki bölgelerde inşa edilen yüksek yapılarda yaygın olarak kullanılan yatay yük taşıyıcı sistemlerdendir. Bu sistemler, daha yüksek yatay rijitlik sağlamalarının yanı sıra sismik enerjiyi sönümleme özellikleri sayesinde yüksek yapılara daha üstün sismik performans sağlamaları ile bilinmektedirler. Bu sisteme sahip yüksek yapılar genellikle yapının orta kısmında bir çekirdek perde duvar sistemi ve yapı cephesinin hemen arkasına konumlandırılmış çevre kolonlarından oluşmaktadır. Ekonomik kısıtlamalar nedeni ile bu tür yapılar tasarım depremi (D2) veya tahmin edilen en büyük depreme (D3) maruz kaldıklarında yapısal elemanların elastik sınırların ötesine geçmelerine, yani hasar görmelerine izin verilmektedir. Bununla birlikte yapısal elemanlarında hasar oluşmayan yapıların, deprem sonrası kullanılmaları ise yapısal olmayan elemanların hasar görmesi nedeni ile mümkün olamamaktadır (Şekil 1 a-b). Bu nedenle son yıllarda yapılarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan enerji sönümleyici sistemler sismik ve rüzgar kuvvetleri altında yapıların yapısal ve yapısal olmayan hasar seviyelerini düşürerek, performans seviyelerini arttırmaktadır.



Şekil 1. (a) 1994 Northridge depremi sonrası ve, (b) 2001 Peru depremi sonrası oluşan yapısal olmayan hasarlar (FEMA E-74, 2011)

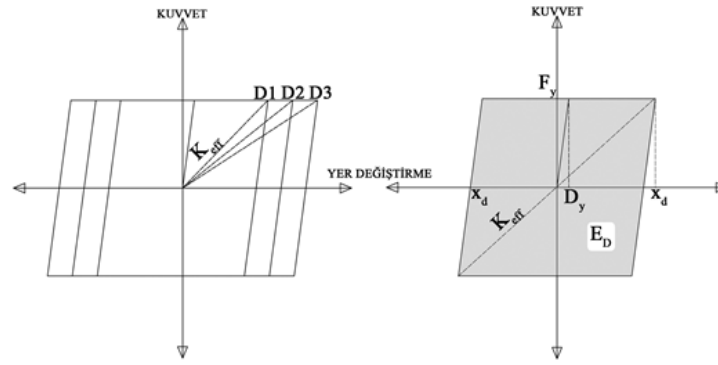
Enerji sönümleyici sistemler, pasif, aktif, hibrit ve yarı aktif sistemler olarak sınıflandırılabilirler. Pasif sönümleyici cihazların dinamik etkileri azalttığı kanıtlanmış olup, çalışma prensipleri de iyice anlaşıldığından yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada kullanılmış sürtünme ile çalışan sönümleyicilerin yanı sıra visko-elastik sönümleyiciler, metalik sönümleyiciler, viskoz akışkanlı sönümleyiciler, ayarlı kütle sönümleyicileri, ayarlı akışkan sönümleyiciler ve sismik izalatörler pasif enerji sönümleyici sistemlere örnek olarak verilebilir.

Yüksek yapılarda yaygın olarak kullanılan enerji sönümleyici sistemler, ayarlı akışkan sönümleyiciler ve ayarlı kütle sönümleyicileridir. Bu tip sistemler genellikle yüksek yapıların temel titreşim periyoduna göre ayarlanarak rüzgar etkileri altında performansını arttırmak için kullanılmaktadırlar. Bu sistemler genellikle yapının en yüksek kısmına yerleştirilirler ve düşey taşıyıcı sistem üzerinde ekstra yüke neden olurlar. Bununla birlikte büyük hacimlere sahip olan bu sistemler yüksek yapılardaki kullanım alanlarını da kısıtlamaktadır. Yüksek sismik tehlike bulunan bölgelerde inşa edilen yüksek yapılarda ise yapı yüksekliği boyunca dağıtılmış ek sönümleyici sistemler, son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu cihazlar yatay kuvvetler altında göreceli hareketler yapan taşıyıcı elemanlar arasına yerleştirilerek enerji sönümlemesi sağlanmaktadır. Ayrıca bu cihazların elemanlar arasındaki farklı büyüklükteki yer değiştirmelere karşı hassas olması,

yapının her modu için sönümleme sağlamaktadır. Özellikle yüksek yapılarda yüksek modların etkisi düşünüldüğünde, bu sönümleyiciler etkin bir şekilde kullanılabilirler.

Enerji sönümleyici sistemleri kullanıldığı yapıların tasarımındaki en önemli nokta, bu sistemlerin yapıya kattığı modal sönümleme miktarının belirlenmesidir. Bu tip sistemlerin kullanıldığı yapılarda sağladığı ek sönüm miktarlarının belirlenmesi ile doğrusal analiz yöntemi kullanılarak ön tasarımlarının yapılması mümkün olmaktadır. Böylece bu sistemlerin ön tasarım aşamalarında önemli miktarda zaman ve iş gücü gerektiren doğrusal olmayan analiz modellerine gerek kalmamakta, hızlı bir şekilde ön tasarım aşaması tamamlanmaktadır. Bununla birlikte, ileriki tasarım aşamalarında taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak kontrol edilmesi önerilmektedir.

Sönümleyici sistemlerin yapıya kattığı sönüm miktarının yaklaşık olarak belirlenmesi farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu çalışmada bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılan modal şekil değiştirme enerjisi metodu incelenmiştir. Bu metod ile yapısal sistem, eşdeğer sönüme sahip tek serbestlik dereceli sistem olarak ifade edilmektedir. Yapısal sisteme eklenen sönümleyicilerin harmonik hareket altında belirlenen mod için bir çevrim sonucu sönümlediği enerjinin, harmonik hareket altında tek serbestlik dereceli sistemin bir çevrim sonucu sönümlediği enerjiye eşit olduğu varsayılır. Tek serbestlik dereceli sistemin sahip olduğu bu sönümleme gerçek sistemin eşdeğer modal sönümünü temsil etmektedir. Bununla birlikte bu yöntem lineer sönümleyicilerin kullanıldığı lineer yapı sistemleri için geçerlidir. Yapısal sistemin ya da sönümleyicinin doğrusal olmayan davranış gösterdiği durumlarda ise, her kritik yükleme seviyesi için (örn. D1, D2, D3 deprem seviyeleri) analizleri yapıp her durum için uygun eşdeğer sönümleme miktarı bulunmalıdır. Bu çalışmada kullanılan sürtünme tipi sönümleyici cihazlar lineer ötesi davranışa sahip olmaları sebebiyle her kritik yük seviyesi için farklı enerji sönümleme kapasitelerine sahiptirler. Dolayısıyla her yükleme seviyesine karşı gelen yer değiştirme ve efektif sönümleme miktarının bulunması gerekmektedir (Şekil 2) Bu çalışma kapsamında eşdeğer sönüm hesabı D3 deprem seviyesi için yapılmıştır.



Şekil 2. Sürtünme tipi sönümleyicinin farklı seviye yükler altındaki davranışı ve enerji sönüm miktarı

MODAL ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ METODU

Teori

Modal şekil değiştirme enerjisi yöntemi, eşdeğer sönüm hesaplama yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılanıdır. Bu yöntem temel olarak yapının modal davranışının viskoz sönüme sahip eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem ile ifade edilmesine dayanmaktadır. Tek serbestlik dereceli sistemler üzerinde geliştirilen bu yöntem, çok serbestlik dereceli sistemler için de kullanılmaktadır (Şekil 3).. Yapının bu şekilde ifade edilebilmesi için, yapısal taşıyıcı sistemin içsel sönümünün yanı sıra sistemde bulunan sönümleyicilerin yapıya ek olarak sağladığı sönüm miktarının da bilinmesi

gerekmektedir. Bu ek sönüm miktarı, sönümleyicilerin yapının herhangi bir modu için harmonik hareketin bir çevrimi sonucu sönümlediği enerjinin, eşdeğer tek serbest dereceli sistemin harmonik hareket altında bir çevrim sonucu sönümlediği enerji miktarına eşit olduğu kabulü ile hesaplanmaktadır. Ek sönümün sayısal olarak hesabı şu şekilde yapılmaktadır.

$$E = \int f \, du = \int_0^{2\pi/w} (c\dot{u})\dot{u} \, dt = 2\pi\zeta \frac{w}{w_n} k u_0^2 \quad (1)$$

Denklem içerisinde, E tek serbestlik dereceli sistem için, harmonik titreşimin bir çevrimi sonucu sönümlenen viskoz enerji miktarını, ζ sönüm miktarını, w sisteme etkiyen harmonik kuvvetin frekansını ifade etmektedir.

$$E_S = \frac{1}{2} k u_0^2 \quad (2)$$

E_S yapısal sistemin şekil değiştirme enerjisini ifade etmektedir. Formülden anlaşılacağı gibi yapısal sistemin şekil değiştirme enerjisi doğrusal davranış sınırları içerisinde dikkate alınmaktadır. Şekil değiştirme enerjisi denklemi, 1 denklemi içerisinde yerleştirilerek 3 denklemi elde edilir.

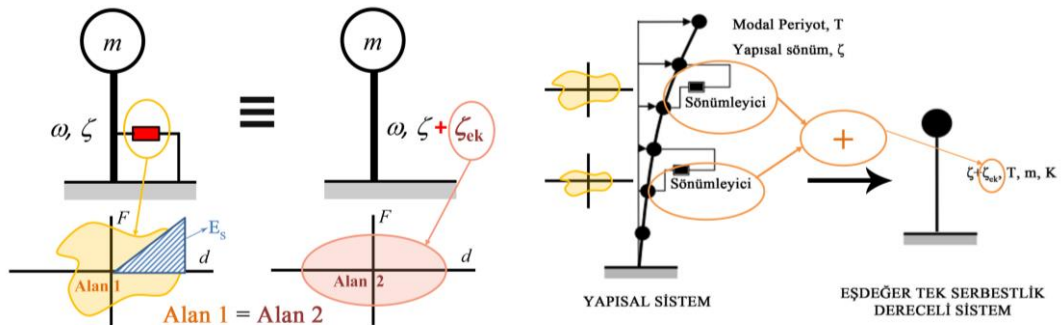
$$E = 4\pi\zeta \frac{w}{w_n} E_S \quad (3)$$

Yapısal sistemdeki sönümleyici cihazların sönümlediği enerji miktarı E_D , 3 denkleme eşitlenerek ek sönüm miktarı bulunmuş olur.

$$E_D = E = 4\pi\zeta \frac{w}{w_n} E_S \longrightarrow \zeta_{EK} = \frac{E_D w_n}{4\pi E_S w} \quad (4)$$

Formül içerisindeki w_n/w oranının, sönüm değerinin yapısal sistem istemleri üzerinde en çok etkili olduğu durumun sağlanması için 1 ($w=w_n$) olarak alınması gerekmektedir. Bununla birlikte bu oranın 1'den farklı değerleri için elde edilen sönüm değeri, 1 değeri kullanılarak elde edilen sonuçlara yeterli yakınlık sağlaması ile 4 denklemi şu şekilde sadeleştirilebilir.

$$\zeta_{EK} = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (5)$$



Şekil 3. Eşdeğer sönüm konsepti

İncelenen Yapısal Sistemin Özellikleri

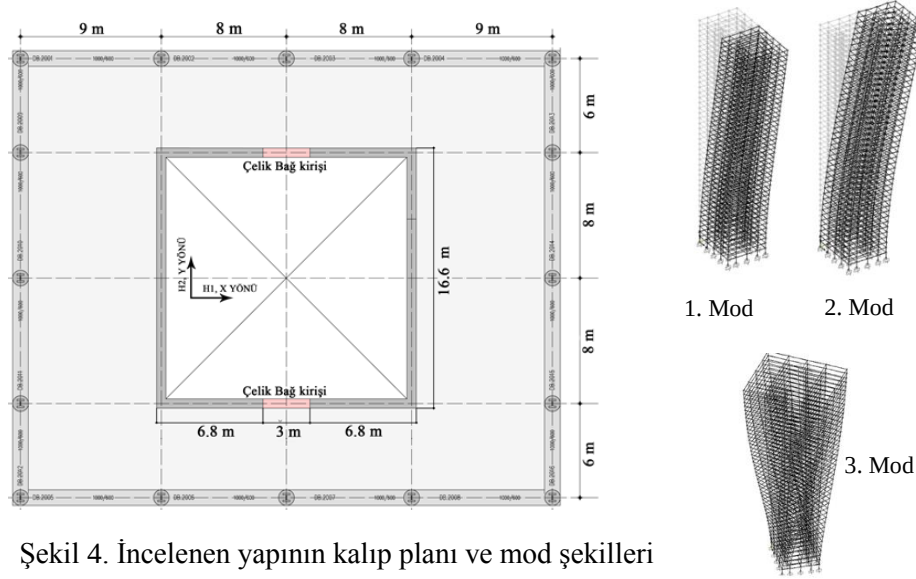
Bu çalışmada, yapılan analizler için İstanbul Levent bölgesinde yer alan 43 katlı yüksek bir binanın yapısal sistemi kullanılmıştır. Orijinal yapısal sistemden farklı olarak, bazı basitleştirmeler yapılmış ve yapıda kullanılan bütün çelik bağ kirişleri arasına sürtünme tipi sönümleyiciler yerleştirildiği düşünülmüştür.

Orijinal yapısal sistem kenar uzunlukları 26 m ve 34 m olan dikdörtgen taban alanına sahiptir. Yapı, orta kısımda birbirine çelik bağ kirişleri ile bağlı U şeklinde iki adet perde duvar ve kenarlarda ise betonarme çevre kirişler ile bağlı toplam 16 adet kompozit kolondan oluşan bir taşıyıcı sisteme sahiptir. Çekirdek perdeleri ve kolonlar kalınlığı 26 cm olan bir döşeme ile birbirlerine bağlanmışlardır. Kat yüksekliği 3.8 m olan yapı aynı özelliklere sahip 43 kattan oluşmakta ve toplam yüksekliği 163.4 m'ye ulaşmaktadır. Ayrıca kat kalıp planı, taşıyıcı sistem mod şekilleri ve modal kütle katılımları şekil ve çizelgelerle gösterilmiştir (Çizelge 1, Şekil 4).

Çizelge 1. Yapısal sistem modal kütle katılımları ve periyotları

Mod Numarası	Periyot	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	5.61	66.3	0.0	0.0	0.0	34.1	0.0
2	5.10	0.0	62.0	0.0	37.8	0.0	0.0
3	2.70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.4

*Değerler % olarak verilmiştir

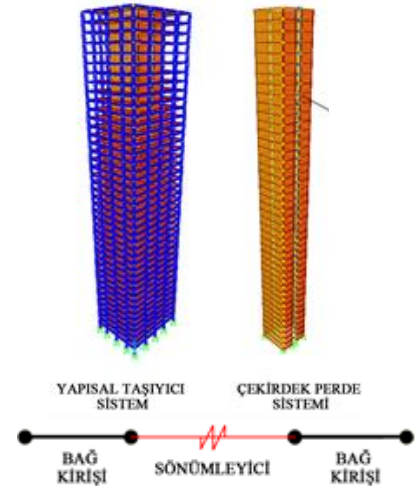


Şekil 4. İncelenen yapının kalıp planı ve mod şekilleri

İncelenen Yapı İçin Eşdeğer Sönüm Hesabı

Bu bölümde modal şekil değiştirme enerjisi yöntemi kullanılarak, incelenen yapının birinci modu için eşdeğer sönüm hesabı SAP2000 programı yardımı ile yapılmıştır. Analiz modelinde yapısal elemanlar için efektif rijitlik değerleri kullanılmıştır. Sönümleyiciler ise sadece düşey yönde yer değiştirmeye izin veren *link elemanlar* olarak tanımlanmışlardır (Şekil 5). Yapının içsel sönümü %2.5 olarak hesaba katılmış ve yapılan eşdeğer sönüm hesabında yapının uygulanan deprem kuvvetleri altında doğrusal davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) 1 olarak alınmış ve İstanbul Yüksek Yapılar Yönetmeliğinde (2008) D3 depremine denk gelen ivme spektrumu kullanılmıştır. Kullanılan sürtünme tipi sönümleyicilerin akma kuvveti 1500 kN, akma yerdeğiştirmesi 3 mm'dir

Modal şekil değiştirme enerjisi yöntemi ile yapılan eşdeğer sönüm hesabı için şu adımlar izlenmiştir;



Şekil 5. SAP2000 analiz modeli

1. Yapının içsel sönümü %2.5 ve sönümleyiciler tarafından sağlanan ek sönüm ise %7.5 olarak kabul edilmiş ve bu sönüm değerine uygun ivme spektrumu eğrisi oluşturulmuştur.
2. Sönümleyicinin maksimum yer değiştirmesi esnasındaki modal periyodun tahmin edilmesi: Bu periyodun belirlenmesi için iterasyon işlemleri uygulanmıştır. İlk olarak, başlangıç rijitlik değeri atanan sönümleyiciler ile oluşturulan modelde, %10 sönüme göre oluşturulmuş ivme spektrum eğrisi kullanılarak analiz yapılmış ve link elemanlarının düşey yönde yaptıkları yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Bu yer değiştirme değerleri kullanarak, sönümleyicilerin kapasiteleri sabit kalmak koşulu ile yeni rijitlik değerleri atanmıştır. Yapılan bu işlemler bir kaç kez tekrarlanarak yer değiştirmeler için yeterli yaklaşıklık sağlanmış ve yapının efektif periyodu (T_{eff}) belirlenmiştir.
3. Efektif periyoda sahip analiz modelinde eşdeğer sönüm hesabı yapılmak istenen birinci mod için spektrum analizi yapılmış ve 2. adımda belirtilen iterasyon tekrarlanmıştır. Yeterli yaklaşıklık sağlandıktan sonra, elde edilen analiz modelinden birinci mod için sönümleyicilerin yaptığı maksimum yer değiştirmeler elde edilmiştir.
4. Sürtünme tipi sönümleyicilerin enerji yutma kapasiteleri, üzerlerine uygulanan yük seviyesi ile yaptıkları maksimum yer değiştirmeye bağlıdır. Dolayısıyla bu tip sönümleyicilerin her deprem seviyesi için sönümledikleri enerji miktarları ayrı ayrı hesaplanmalıdır. İncelenen yapıda D3 deprem seviyesi için hesap yapılmakta olup, kullanılan sürtünme tipi sönümleyiciler tarafından sönümlenen enerji şu şekilde ifade edilmektedir.

$$E_D = 4(x_d - D_y)F_y \quad (6)$$

Denklem içerisinde F_y sürtünme tipi sönümleyicinin akma kuvvetini, D_y akma yer değiştirmesini ve x_d sönümleyicide oluşan maksimum yer değiştirmeyi ifade etmektedir.

5. Hesaplanan E_D değeri sönümleyicinin, harmonik titreşim altında maksimum yer değiştirme yaptığı çevrimi için sönümlediği enerjiye, yani histeretik eğrisinin içerisinde kalan alana eşittir. Kullanılan sönümleyiciler için 3 mm olan akma yer değiştirmesi enerji hesaplamaları sırasında ihmal edilmiştir.
6. Sönümleyicilerin yaptığı maksimum şekil değiştirmenin elde edildiği analiz modelinden yararlanarak yapının şekil değiştirme enerjisi hesaplanmıştır. Bu hesap için 7 denklemi kullanılmıştır.

$$E_s = \frac{1}{2} w^2 (m_1 x_{1,max}^2 + m_2 x_{2,max}^2 + + m_n x_{n,max}^2) \quad (7)$$

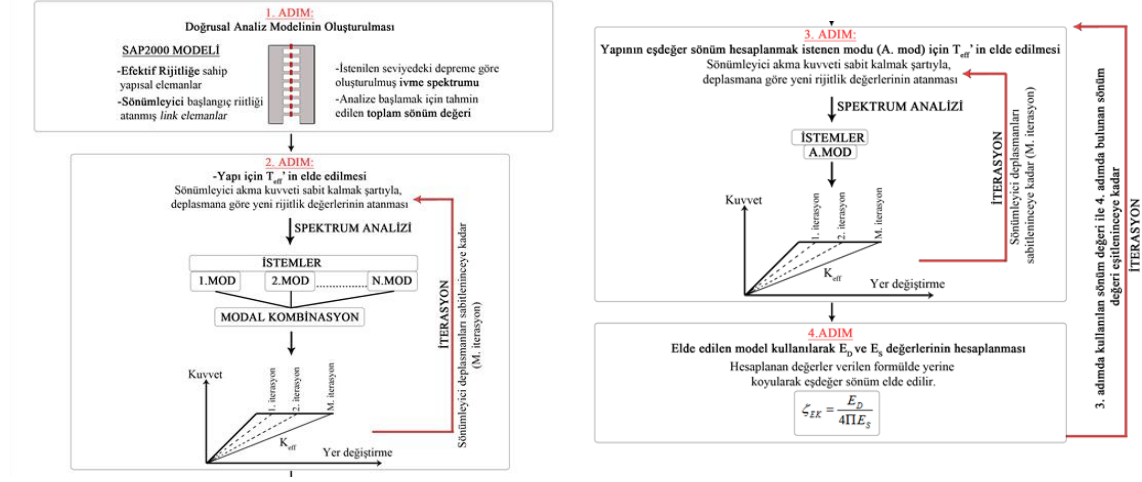
Denklem içerisinde, m_n ilgili katın kütlelerini, w ilgilenilen modun frekansını ve x_n ilgilenilen mod için n. kat maksimum yer değiştirmesini ifade etmektedir.

7. Dördüncü ve beşinci adımda elde edilen E_D ve E_s değerleri 5 denklemde yerine koyularak sönümleyiciler tarafından yapıya sağlanan ek sönüm miktarı (ζ_{EK}) bulunmuş olur.
8. Bulunan ek sönüm miktarı kullanılarak, ilk adımda %10 sönüm kabulü ile oluşturulan ivme spektrumu eğrisi tekrar oluşturularak üçüncü adımdan itibaren tüm adımlar tekrarlanır. Bu işlemlerin sonunda yeni bir sönüm değeri elde edilmiştir. Elde edilen sönüm değeri ile, bu sönümü elde etmek için kullanılan sönüm değeri eşitleninceye kadar bu adımlardaki işlemler tekrarlanmıştır. Gerekli yaklaşıklık sağlandığında birinci mod için eşdeğer sönüm değeri elde edilmiş olmaktadır.

Modal enerji metodu kullanılarak, incelenen yapıda sönümleyicilerin birinci mod için %15 eşdeğer sönüm sağladıkları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, toplam sönüm değeri %17.5 olarak hesaplanmıştır. Eşdeğer sönüm hesabı, ASCE/FEMA dokümanlarında belirtilen diğer bir yöntem ile tekrar yapılmış ve benzer sönüm değerleri elde edilmiştir (Çizelge 2) (Erdemli, 2015). Yakın değerlerin elde edilmesi bu iki yöntemin birbirleri yerine kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 7’de modal şekil değiştirme metodunun hesap adımları özetlenmiştir.

Çizelge 2. Eşdeğer sönüm hesap metodları karşılaştırması

Metod	Eşdeğer Ek Sönüm (ÇEK)	Yapı İç Sönümü (Ç)	TOPLAM SÖNÜM
Modal Şekil Değiştirme Enerjisi	15%	2.50%	17.50%
ASCE/FEMA Yaklaşımı	13.50%	2.50%	16%

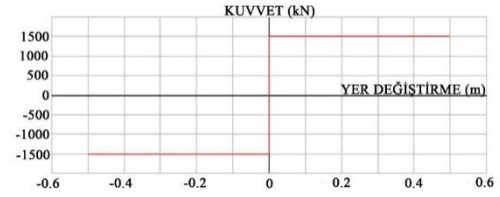


Şekil 6. Modal şekil değiştirme enerjisi yöntemi hesap adımları

Eşdeğer Sönüm Hesabı İncelemesi

Giriş

Bu bölümde, ASCE/FEMA yaklaşımı ile elde edilen efektif sönüm değerinin güvenilirliği araştırılmıştır. Bu araştırma için iki adet analiz modeli oluşturulmuştur. SAP2000 programında oluşturulan birinci modelde tüm yapısal elemanlar doğrusal olarak tanımlanmış spektrum ve zaman tanım alanında analiz yapılmıştır. Birinci mod için bir önceki bölümde hesaplanan eşdeğer sönüm oranı %16, diğer modlar içinse sabit %2.5 sönüm kullanılmıştır. İkinci model ise PERFORM-3D programında oluşturulmuş ve sönümleyici dışındaki tüm elemanlar doğrusal olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan davranışa sahip sönümleyicilerin özellikleri Şekil 7'da gösterilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler için 7 adet deprem kaydı kullanılmıştır (Çizelge 3).



Şekil 7. sürtünme tipi sönümleyici davranışı

Çizelge 3. Analizde kullanılan deprem kayıtları ve ölçeklendirme katsayıları

Deprem Referans Numarası	PEER Kayıt Numarası	Deprem İsmi	Süre (sn)	Zaman Aralığı (sn)	Ölçekleme Katsayısı
S1	821	Erzincan, Turkey	20.775	0.005	1.09
S2	1176	Kocaeli, Turkey	34.995	0.005	0.92
S3	838	Landers	39.98	0.02	2.86
S4	1634	Manjil, Iran	29.48	0.01	1.92
S5	180	Imperial Valley	39.28	0.005	1.1
S6	1165	Kocaeli, Turkey	29.995	0.005	2.29
S7	1605	Düzce, Turkey	25.88	0.005	0.85

Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

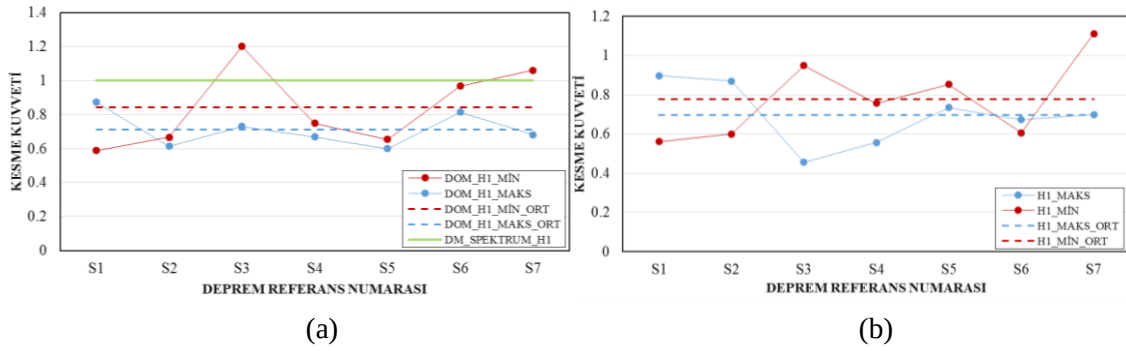
Bu bölümde yukarıda tanımlanan analiz modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma X (H1) ve Y (H2) yönlerindeki taban kesme kuvvetleri, devrilme momentleri ve kolon tepe noktası yer

değiştirmesi arasında yapılmıştır. Grafiklerdeki “DOM” kısaltması doğrusal olmayan sönümleyicinin kullanıldığı PERFORM-3D modelinin, “DM” kısaltması ise SAP2000 de oluşturulan doğrusal modelin sonuçlarını ifade etmektedir. “MAKS” kısaltması ilgili doğrultunun pozitif yönünü, “MİN” kısaltması ise ilgili doğrultunun negatif yönünü ifade etmektedir. Kesikli çizgiler 7 adet deprem kaydı için elde edilen sonuçların ortalamasını göstermektedir.

Taban Kesme kuvveti

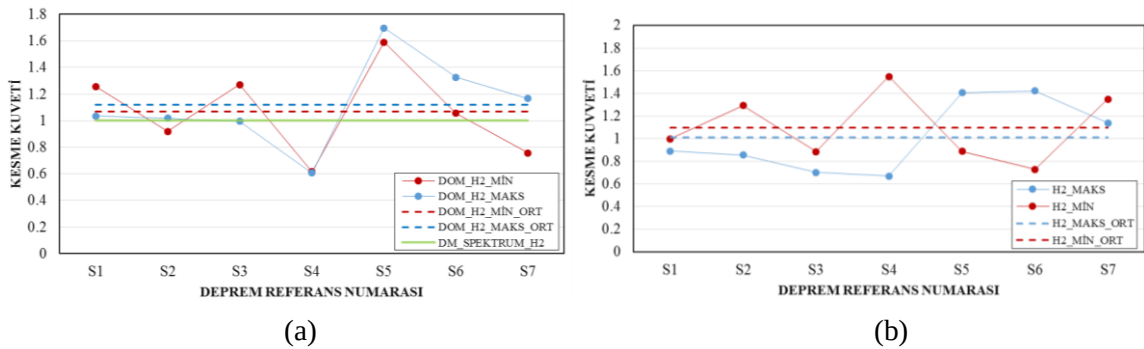
Şekil 8-a’da doğrusal model kullanılarak yapılan spektrum analizi ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen X (H1) yönü taban kesme kuvveti değerleri görülmektedir. Grafikteki tüm değerler, doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucu elde edilen kesme kuvvetine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değer arasında yaklaşık %15-%30 fark gözlemlenmiştir.

Şekil 8-b’de doğrusal model ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen X (H1) yönü taban kesme kuvveti değerleri karşılaştırması görülmektedir. Grafikteki tüm değerler, ilgili deprem için doğrusal olmayan model sonuçlarının doğrusal model sonuçlarına oranını göstermektedir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması arasında yaklaşık %20-%30 fark gözlemlenmiştir.



Şekil 8. X (H1) yönü taban kesme kuvvetleri karşılaştırması

Şekil 9-a’da doğrusal model kullanılarak yapılan spektrum analizi ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen Y (H2) yönü taban kesme kuvveti değerleri görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucu elde edilen taban kesme kuvvetine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değer arasında yaklaşık %6-%12 fark gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Y (H2) yönü taban kesme kuvvetleri karşılaştırması

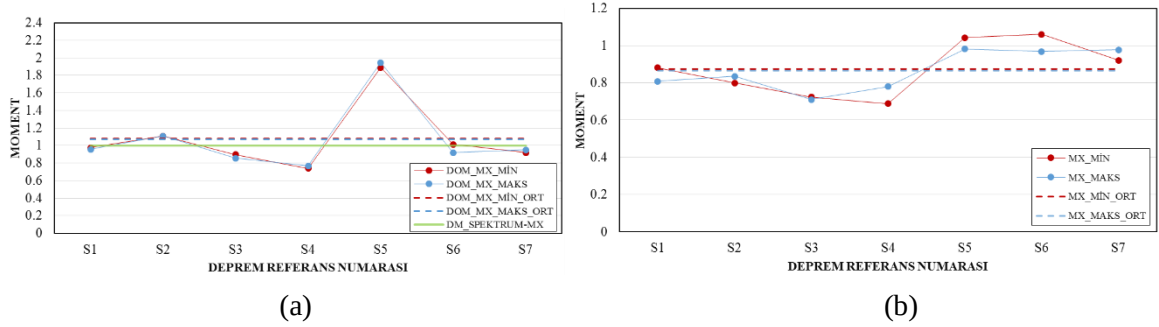
Şekil 9-b’de doğrusal model ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen Y (H2) yönü taban kesme kuvveti değerleri karşılaştırması görülmektedir.

Grafikteki tüm değerler, ilgili deprem için doğrusal olmayan model sonuçlarının doğrusal model sonuçlarına oranını göstermektedir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması arasında %1-%10 fark gözlemlenmiştir.

Devrilme Momenti

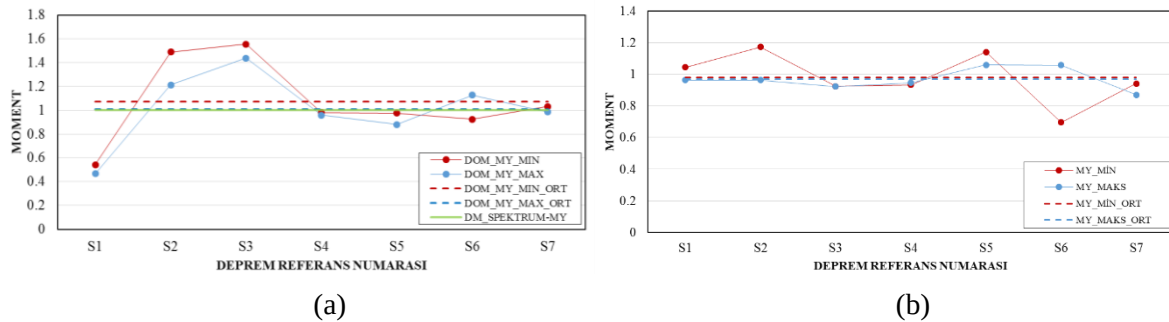
Şekil 10-a'da doğrusal model kullanılarak yapılan spektrum analizi ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen X (H1) doğrultusu etrafında devrilme momenti değerleri görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucunda bulunan devrilme momenti değerine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değer arasında yaklaşık %8 fark gözlemlenmiştir.

Şekil 10-b'de doğrusal model ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen X (H1) doğrultusu etrafında devrilme momenti değerleri karşılaştırması görülmektedir. Grafikteki tüm değerler, ilgili deprem için doğrusal olmayan model sonuçlarının doğrusal model sonuçlarına oranını göstermektedir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması arasında maksimum %15 fark gözlemlenmiştir.



Şekil 10. X (H1) doğrultusu etrafında devrilme momentleri karşılaştırması

Şekil 11-a'da doğrusal model kullanılarak yapılan spektrum analizi ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen Y (H2) doğrultusu etrafında devrilme momenti değerleri görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucunda bulunan devrilme momenti değerine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değer arasında yaklaşık %7 fark gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Y (H2) doğrultusu etrafında devrilme momentleri karşılaştırması.

Şekil 11-b'de doğrusal model ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen Y (H2) doğrultusu etrafında devrilme momenti değerleri karşılaştırması görülmektedir. Grafikteki tüm değerler, ilgili deprem için doğrusal olmayan model sonuçlarının doğrusal model sonuçlarına oranını göstermektedir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde

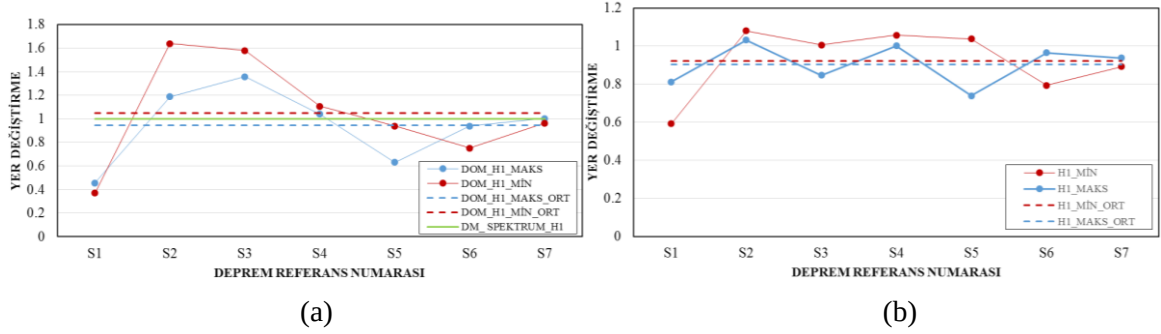
edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması arasında en fazla %3 fark gözlemlenmiştir.

Yer Değiştirme

Yer değiştirme karşılaştırması yapının çatı seviyesinde birer adet köşe kolon ve perde duvar uç noktası için yapılmıştır. Yapılan iki karşılaştırma yakın sonuç verdiği için, sadece kolon uç noktası için elde edilen değerler bu bölümde gösterilmiştir.

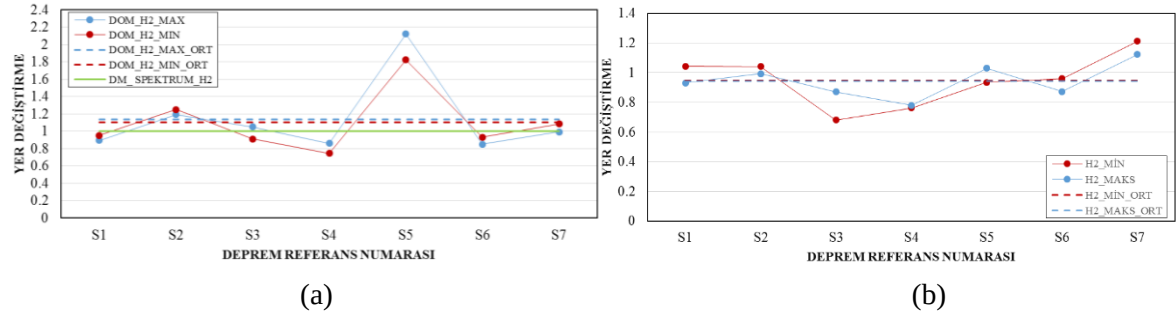
Şekil 12-a'da doğrusal model kullanılarak yapılan spektrum analizi ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen X (H1) yönü yer değiştirme değerleri görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucunda bulunan yer değiştirme değerine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değer arasında yaklaşık %5 fark gözlemlenmiştir.

Şekil 12-b'de doğrusal model ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen X (H1) yönünde yer değiştirme değerleri karşılaştırması görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucunda bulunan yer değiştirme değerine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması arasında yaklaşık %10 fark gözlemlenmiştir.



Şekil 12. X (H1) yönünde kolon uç noktası için yer değiştirme karşılaştırması

Şekil 13-a'da doğrusal model kullanılarak yapılan spektrum analizi ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen Y (H2) yönü yer değiştirme değerleri görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucunda bulunan yer değiştirme değerine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değer arasında yaklaşık %10-%14 fark gözlemlenmiştir.



Şekil 13. Y (H2) yönünde kolon uç noktası için yer değiştirme karşılaştırması

Şekil 13-b'de doğrusal model ve doğrusal olmayan model kullanılarak yapılan zaman tanım alanında analiz sonucu elde edilen Y (H2) yönünde yer değiştirme değerleri karşılaştırması görülmektedir. Grafikteki tüm değerler doğrusal modelde yapılan spektrum analizi sonucunda bulunan yer

değiştirme değerine oranlanarak gösterilmiştir. Doğrusal olmayan çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması ile eşdeğer sönüm kullanılan doğrusal çözümleme sonucu elde edilen değerlerin ortalaması arasında en fazla %6 fark gözlemlenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bağ kiriş sönümleyicili yüksek bir yapının eş değer sönüm hesabı için kullanılan modal şekil değiştirme enerjisi yöntem incelenmiştir. Kullanılan yöntemler sonucu elde edilen sönüm değeri ile doğrusal analizler yapılarak elde edilen sonuçlar, doğrusal olmayan analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve eşdeğer sönüm yöntemlerinin doğruluğu araştırılmıştır.

- Her iki eşdeğer sönüm hesap metodu (ASCE/FEMA yaklaşımı ve Modal Şekil Değiştirme Enerjisi Metodu) kullanılarak gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen eşdeğer toplam sönüm miktarları birbirleri ile oldukça yakın çıkmıştır. Dolayısıyla ön tasarım aşamasında, iki yöntem birbirinin alternatifi olarak kullanılabilir.
- Eşdeğer sönümleme kullanılarak yapılan spektrum analizi sonuçlarının zaman tanım alanında, yapının doğrusal, sönümleyicilerin doğrusal olmadığı model için yapılan analiz sonuçlarından,
 - Taban kesmesi için %20 mertebelerinde daha büyük olduğu
 - Devrilme momenti ve çatı katı kolon uç yer değiştirmeleri için ise %5-%10 mertebelerinde daha büyük olduğu görülmüştür.

Bu farkların mühendislik pratiği için kabul edilebilir farklar olduğu düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen sayısal çalışmanın bir adım daha ileriye götürülmesi amacıyla sunulan öneriler şu şekilde sıralanabilir,

- Kullanılan sürtünme tipi sönümleyicilerin yüksek modlar etkisindeki katkıları ihmal edilmiştir. Konunun bir adım daha ileriye götürülmesi amacıyla yapılacak çalışmalarda, incelenen taşıyıcı sistemin yüksek modları içinde eş değer sönüm değerleri hesaplanıp bu durumun etkileri araştırılabilir.
- Bu çalışma kapsamında incelenen yapısal taşıyıcı sistem, deprem etkisi altında son derece rijit bir davranış göstermektedir. Efektif sönüm yöntemleri standart performanslı bir yapı için ayrıca incelenmelidir.
- İncelenen yapıdaki her katta kullanılan sürtünme tipi sönümleyiciler için farklı düzenlemeler denenerek (3 katta bir, 5 katta bir gibi), elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir ve en etkin sönümleyici sayısı ve yeri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Christopoulos, C., Filiatrault, A. (2006) Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation, IUSS Press, Pavia, Italy
- Chopra, A.K., (2000) Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey
- Chung, H. S., Moon, B. W., Lee, S. K. and Park, J. H. (2009) "Seismic performance of friction dampers using flexure of RC shear wall system", *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 18:7,807-822
- Erkus, B. (2012) "Preliminary Design of Supplemental Energy Dissipation Devices" Arup, *DTF East Asia, Research Report*, Project No: 6689, Hong Kong, 19 October 2012 (confidential report)
- Erdemli, E. (2015) Sönümleyiciler ile bağlı betonarme perde duvarlı yüksek yapılarda eşdeğer sönümleme yöntemlerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- FEMA-450, (2004) "NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. 2003 Edition" Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- FEMA E-74, January 2011 Reducing the risks of nonstructural earthquake damage-a practical guide, ATC, California-94065, USA
- Ramirez O.M., Michael C. Constantinou, Juan D. Gomez, Andrew S. Whittaker, and Christis Z. Chrysostomou (2002a) "Evaluation of Simplified Methods of Analysis of Yielding Structures with Damping Systems" *Earthquake Spectra*, 18:3, 501-530
- Ramirez O.M., Michael C. Constantinou, Andrew S. Whittaker, Charles A. Kircher, and Christis Z. Chrysostomou (2002b) "Elastic and Inelastic Seismic Response of Buildings with Damping Systems." *Earthquake Spectra*, 18:3, 531-547
- Whittaker A.S., Michael C. Constantinou, Oscar M. Ramirez, Martin W. Johnson, and Christis Z. Chrysostomou (2003) "Equivalent Lateral Force and Modal Analysis Procedures of the 2000 NEHRP Provisions for Buildings with Damping Systems." *Earthquake Spectra*, 19:4, 959-980