

SÖNÜMLEYİCİLİ YAPILARIN DEPREM TASARIMI, BÖLÜM I: ULUSLARARASI YÖNETMELİKLERİN İNCELENMESİ

Yıldırım S.¹, Güler M.D.², Özer C.³, Sütçü F.⁴, Alhan C.⁵ ve Erkuş B.⁶

¹Yük. Müh. Promer Müh. ve Müh., İstanbul

²Yük. Müh., Neosis Müh., İstanbul

³Yük. Müh., Statica Müh., İstanbul

⁴Dr. Öğr. Üye., Deprem Müh. ve Afet Yön. Enst., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

⁵Prof. Dr., İnşaat Müh. Böl., İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İstanbul

⁶Dr. Öğr. Üye., İnşaat Müh. Böl., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Email: syildirim@promerengineering.edu.tr

ÖZET:

Bu bildirinin ilk bölümünde ülkemizde henüz bir yönetmeliği ya da bir tasarım kılavuzu bulunmayan sönümleyici sistemler içeren yapıların deprem tasarımında diğer ülkelerde kullanılan yönetmelik ve kılavuzlar incelenmiştir. Dünyada hem yeni yapıların deprem tasarımı, hem de mevcut yapıların deprem güçlendirmesi amacı ile sönümleyici kullanılan birçok yapı örneği bulunmaktadır. Literatürde, bu yapıların analizi, tasarımı ve detaylandırılmasında kullanılmak üzere uluslararası kabul görmüş yönetmelikler, tasarım önerileri, proje örnekleri ve bu kaynakları destekleyen bilimsel çalışmalar mevcuttur. Ülkemizde ise sönümleyici uygulamaları sınırlı seviyede kalmış olmakla beraber, son yıllarda mühendislik uygulamalarında özellikle mevcut yapıların deprem etkileri altında performansının geliştirilmesinde sönümleyici sistemlerin kullanımı yapı mühendisleri tarafından değerlendirilmektedir. Doğru ve etkin şekilde uygulandığında, deprem performans, maliyet ve saha uygulaması açısından konvansiyonel güçlendirme yöntemlerine göre önemli bir alternatif olan sönümleyici sistemlerin ülkemizdeki uygulamaları sınırlı seviyede kalmasının farklı nedenleri mevcut olup, bunların en başında, ülkemizdeki yapı tiplerine, mühendislik uygulamalarına mevcut deprem ve yapı yönetmeliklerine uyumlu bir yönetmeliğin, bir tasarım kılavuzunun ya da buna benzer, uygulamada mühendisler tarafından kullanılabilir bir kaynağın bulunmaması gelmektedir. Bu çalışma ile kısa vadede mühendislerin sönümleyici sistemleri içeren yapıların tasarımında kullanımlarına yardımcı olunması, uzun vadede ise hazırlanması olası bir ulusal yönetmelik için bir öneri/altlık oluşturulması hedeflenmektedir. Bildirinin ilk bölümünde, ilk aşamada mevcut uluslararası yönetmelikler incelenmiş, bu yönetmeliklerde ve uygulamalarda tasarım esasını teşkil eden ana kriterler belirlenmiştir. İncelenen yönetmelikler; Amerikan Yönetmelikleri (ASCE 7 ve ASCE 41), Avrupa Yönetmelikleri (EN 1998 ve EN 15129) Yönetmelikleri ve Japon Pasif Kontrol Kılavuzu (JSSI Manual) olarak seçilmiştir. Ana kriterlere ek olarak, analiz yöntemleri, sönümleyici tipine bağlı hesap yöntemleri ve detaylandırma şartları da incelenmiş ve özetlenmiştir. Bildirinin ikinci bölümünde, Türkiye’de sönümleyicili yapı tasarımı için 2018 Türk Bina Deprem yönetmeliği ve Türkiye’deki yapı ve mühendislik uygulamalarına uyumlu olduğu düşünülen tasarım esasları, analiz yöntemleri ve temel şartlar sunulmuştur. Bu çalışmadan sonra, tasarım esaslarının daha detaylı hale getirilmesi, bu esaslar kullanılarak proje örnekleri hazırlanması ve yorum ve öneriler için mühendislere ve akademik camiaya sunulması hedeflenmektedir. Bu çalışmanın, ülkemizde sönümleyici sistemlerin uygulamalarında karşılaşılan önemli bir eksikliği kapatacağı düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELE: sönümleyici, deprem, yönetmelik, tasarım esasları.

SEISMIC DESIGN OF STRUCTURES WITH DAMPERS, PART I: REVIEW OF INTERNATIONAL STANDARDS

ABSTRACT:

In the first part of this paper, a review of the international structural codes used for the seismic design of structures with damping systems, where a relevant structural design code or guideline is currently not available in Turkey. There are many examples of structures in the world, where dampers are used in new structures or

seismic retrofit of existing structures. In the literature, there are structural codes that are widely accepted, design recommendations and example projects regarding the analysis, design and detailing of such structures and academic work that supports this literature. In Turkey, although actual applications are still limited, utilization of damping systems are increasingly being evaluated by structural engineers, particularly for seismic performance improvement of existing structures. There are several reasons for the limited applications of damping systems in Turkey although these systems can be a sound alternative, in terms of performance, economy and applicability, to conventional retrofit schemes. One of the most important of these reasons is that there are no structural code, design guide or similar technical resource compatible with current Turkish seismic and structural code that can be used by practicing engineers. This study aims to support the engineers for the design of buildings with damping systems in short term and aims to set a proposal/template for a possible future design standard that can be amended to the Turkish Seismic Code. In the first part of this paper, , international design codes and applications are investigated, where the basic criteria of the design principles are determined. American (ASCE 7 and ASCE 41), European (EN 1998 and EN 15129) Standards and the Japanese Passive Control Manual (JSSI Manual) are selected for this purpose. In addition to the basic criteria, analysis methods and design and detailing requirements based on damper types are summarized. In the second part of the paper, a design basis is proposed for the applications of structures with damping systems in Turkey that is considered to be compatible with the 2018 Turkish Building Seismic Code and engineering practice in Turkey. After this study, further detailing and development of the proposed design basis, preparation of project design examples using this basis and presentation of the complete study to the engineering community and academia is considered. It is believed that this paper will fill an important void regarding the application of damping systems in Turkey.

KEYWORDS: dampers, earthquakes, code, design principles.

1. GİRİŞ

Sönümleyiciler yapıların dış yüklerin etkisi altındaki dinamik davranışını enerji sönümlemesi yoluyla iyileştirmek için kullanılan yapısal elemanlardır. Sönümleyicilerin çok farklı uygulamaları mevcuttur. Örnek olarak yüksek binalarda rüzgâr yükleri altında oluşan salınımın azaltılması için sönümleyiciler kullanılmıştır. Ayrıca sönümleyiciler yapıların deprem performansının artırılması ve mevcut yapıların güçlendirilmesinde de kullanılmaktadır. (Symans vd. 2008). Ülkemizde de sayısı az olmakla beraber bazı yapıların deprem yükleri için güçlendirilmesinde sönümleyiciler kullanılmıştır (Yıldırım vd. 2013, 2015a, 2015b, Özer 2014).

Sönümleyicili yapıların deprem tasarımı konvansiyonel yapıların ya da deprem yalıtımlı yapıların tasarımına göre bazı zorluklar içermektedir. İlk olarak sönümleyici yapıların çoğunda, sönümleyiciler yapı içerisinde bulunmaktadır ve bu tip sistemler yayılı sönümleme (İng. distributed damping) olarak adlandırılmaktadır. Yayılı sönümleme sistemlerinde sönümleyiciler yapı şekil değiştirmeleri ve buna bağlı olarak yapı doğal salınım modları ile etkileşim halinde davranırlar. Sönümleyici tipine bağlı olarak sönümleyiciler yapının mod şeklini ve ilgili periyotlarını önemli oranda değiştirebilir. Bu sebeple, eşdeğer statik kuvvet ve mod birleştirme gibi yöntemlerin uygulanması konvansiyonel ve deprem yalıtımlı yapılara göre daha zordur. Diğer bir konu ise farklı davranış özellikleri gösteren birçok sönümleyici tipinin mevcut olmasıdır. Bundan dolayı, tüm sönümleyicileri kapsayan etkin ve genel bir davranış modeli önermek mümkün olamamaktadır. Mevcut yönetmeliklerde genellikle sönümleyici davranışının hız veya yerdeğiştirme bağılılığına göre yapılan temel bir sınıflandırma için genelleştirmeler yapılmıştır. Ayrıca bazı sönümleyicilerin davranışı büyük ölçüde hıza bağılıdır ve bundan dolayı, deprem yönetmeliklerindeki en temel yaklaşımlardan eşdeğer statik kuvvet ve mod birleştirme yöntemleri bu sönümleyicilerin tasarımında etkin olarak kullanılamamaktadır. Bu ve benzer sebeplerden dolayı, sönümleyicili yapıların tasarımında zaman-tanım alanında analiz yöntemi, tasarlanan yapıların gerçek davranışının anlaşılması ve tüm tasarımın teyidi için tercih edilmektedir.

Sönümleyicili yapıların deprem tasarımı ile ilgili literatürde birçok akademik çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bazıları sönümleyiciler ile ilgili yönetmeliklerin ve kılavuzların hazırlanmasında da kullanılmıştır (örnek Ramirez vd., 2002 Amerikan yönetmelikleri ve Kasai vd., 1998 Japon tasarım kılavuzları için). Yönetmelikler açısından bakıldığında Amerikan ASCE 7, ASCE 41 standartlarında sırasıyla, sönümleyicilerin yeni yapıların deprem tasarımında ve güçlendirilmesi için kullanımı ile ilgili detaylı bölümler mevcuttur.

Avrupa EN 15129 standardı deprem yalıtımı ile beraber genel olarak depreme karşı kullanılan tüm cihazların bulunduğu yapıların tasarımına ilişkin temel tasarım esaslarını belirtmiştir ve ayrıca bu cihazların sağlaması gereken mekanik şartları detaylı olarak içermektedir. Yapısal tasarım ile ilgili esaslar, Amerikan yönetmeliklerine göre daha az detaylı olmakla beraber, söz konusu cihazlar ile ilgili şartlar daha detaylıdır. Avrupa EN 1998-1 standardında da sönümleyicili yapıların deprem tasarımı ile ilgili bir bölüm bulunmamaktadır. Japon yapı yönetmeliğinde sönümleyiciler hakkında özel bir bölüm bulunmamaktadır. Ancak JSSI Pasif Kontrol Kılavuzu, sönümleyicili binaların tasarım şartları hakkında detaylı bilgi ve örnek uygulamalar içermektedir.

Ülkemizde 2019 yılında yürürlüğe giren yeni deprem yönetmeliği (TBDY, 2018), yerini aldığı 2007 tarihli yönetmeliğe göre birçok yeni bölüm içermekle beraber, sönümleyiciler ile ilgili bir bölüm içermemektedir. Bu durum, özellikle mevcut yapı stoğunun büyük olduğu ülkemizde önemli bir eksikliktir. Mevcut yapıların güçlendirilmesi konusunda konvansiyonel yöntemlerle her zaman en etkin, en düşük maliyetli ve inşa edilebilir çözümler üretilmemektedir ve birçok durumda mühendisler, sönümleyici ve deprem yalıtımı gibi alternatif ve yenilikçi yöntemleri değerlendirmek istemektedirler. Sönümleyicilerin mevcut yapılara uygulanması birçok durumda deprem yalıtımına göre daha kolay ve ekonomik olduğu için, bu durumlarda sönümleyici kullanımı deprem yalıtımına göre daha doğal ve cazip bir alternatif olmaktadır. Ancak, hem yukarıda açıklanan tasarım zorlukları hem de yönetmelik veya kılavuz benzeri kaynakların olmaması nedeni ile ülkemizde sönümleyici kullanımı çok sınırlı seviyede kalmıştır. Sonuç olarak, ülkemizin yönetmeliklerine uyumlu ve mühendislik uygulamalarına yönelik, sönümleyicili yapı tasarımına yardımcı olacak bir tasarım kılavuzunun hazırlanması, bu kılavuz çerçevesinde yeni yapıların tasarımında ve mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılacak ana tasarım esaslarının belirlenmesi önemli bir eksikliği giderecektir.

Bu çalışma ile ülkemizde yapıların deprem tasarımı ve güçlendirilmesinde sönümleyicilerin kullanılması için, TBDY 2018 ve ülkemiz mühendislik uygulamaları ile uyumlu olduğu düşünülen temel tasarım esasları önerilmiştir. Bildirinin ilk bölümünde ilk önce sönümleyiciler ve sönümleyicili yapıların deprem tasarımında kullanılan temel yöntemler hakkında kısa bilgi verilmiştir. Daha sonra Amerika ve Avrupa yönetmelikleri ve Japon tasarım kılavuzunda bulunan tasarım esasları ve yöntemler özet olarak açıklanmıştır. Bu bilgilere dayalı olarak ülkemizde kullanılması önerilen tasarım esasları ve analiz yöntemleri önerisi ikinci bölümde sunulmuştur. Uzun vadede burada önerilen temel tasarım esaslarının geliştirilerek kapsamlı bir kılavuz halini alması hedeflenmektedir.

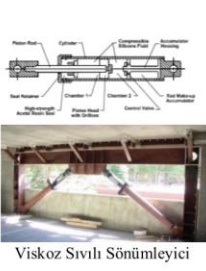
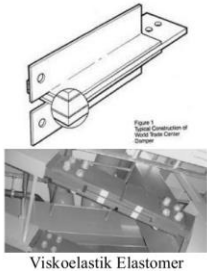
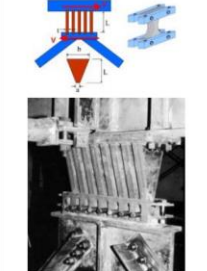
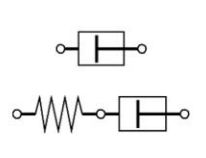
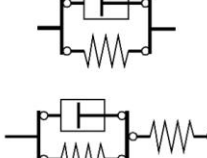
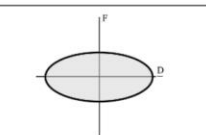
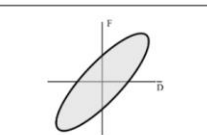
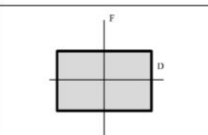
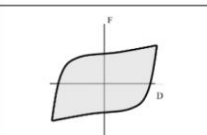
2. SÖNÜMLEYİCİLER

Yapıların deprem tasarımında kullanılan sönümleyicileri ikiye ayırmak mümkündür: hıza bağlı sönümleyiciler (HBSler) ve yerdeğiştirmeye bağlı sönümleyiciler (YBSler) (bakınız Tablo 1).

HBSler, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin büyük oranda sönümleyicideki göreceli hıza bağlı olduğu sönümleyicilerdir ve kendi içerisinde de viskoz ve viskoelastik olmak üzere ikiye ayrılır. Viskoz sönümleyiciler teoride tamamen hıza bağlı bir davranış göstermelerine rağmen, uygulamada kullanılan metal aksamlarından ve bağlantı elemanlarından dolayı hıza bağlı davranışa seri bağlı olduğu kabul edilen bir rijitlik sergilerler. Bundan dolayı bu sönümleyiciler yerdeğiştirmeye bağlılık ta gösterebilir. Viskoz sönümleyicilerin hıza bağlılığı doğrusal ($F = cv$) veya doğrusal olmayan ($F = cv^\alpha$) şekilde ifade edilebilir.

YBSler, kuvvet-değiştirme ilişkisi büyük oranda yerdeğiştirmeye bağlı olan ve hıza bağlılığı hemen hemen olmayan sönümleyicilerdir. Bu tip davranış gösteren iki tür sönümleyici olup bunlar sürtünme esaslı sönümleyiciler ve metal-akma esaslı sönümleyicilerdir. Burkulması engellenmiş çelik çaprazlar uluslararası yönetmeliklerin bazılarında ana taşıyıcı sistem in bir parçası olarak tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Ancak burkulması engellenmiş çelik çaprazlar, akma ve rijitlik değerleri yapıya göre çok düşük ise ve yapıda bu çaprazlardan farklı olarak yönetmeliklerdeki ilgili şartları sağlayan ana bir taşıyıcı sistem mevcut ise metal-akma esaslı sönümleyici gibi kullanılabilirler. Görüldüğü üzere HBSler, viskoz enerji sönümleyiciler ve yapıya düşükte olsa doğrusal rijitlik katarlar. YBSler yapıya doğrusal olmayan rijitlik katkısında bulunurlar ve çevrimsel enerji sönümleyiciler.

Tablo 1. Sönümleyici tipleri

	Hıza Bağlı Sönümleyiciler		Yerdeğiştirmeye Bağlı Sönümleyiciler	
	Viskoz	Viskoelastik	Sürtünme	Akma
Örnek	 Viskoz Sıvılı Sönümleyici	 Viskoelastik Elastomer Sönümleyici	 Dönme-Sürtünme Sönümleyici	 Metal-Akma Sönümleyici
Model				
F-D İlişkisi				

3. SÖNÜMLEYİCİLİ YAPILARIN TASARIMINDA TEMEL YAKLAŞIMLAR

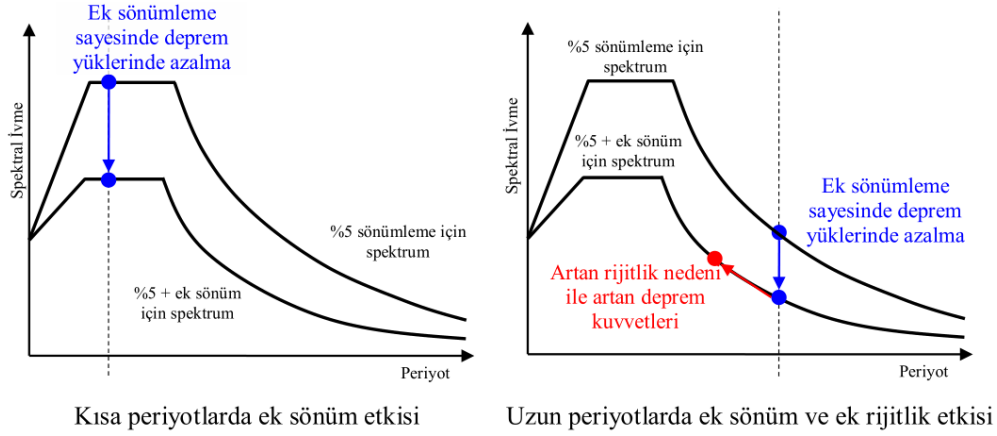
Sönümleyicili yapıların deprem tasarım ve güçlendirmesinde izlenen temel yaklaşımların genel olarak iki aşamalı olduğu kabul edilebilir:

1. Aşamada seçilen bir sönümleyici yerleşimi ve davranışı için sönümleyiciler tarafından sönmölen enerji, eşdeğer modal viskoz sönmöleme olarak ifade edilir:

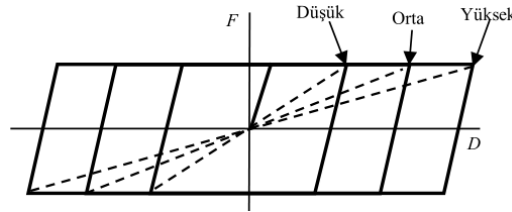
$$\xi_{\text{eşdeğer}} = \frac{E_s}{4\pi E_{B\bar{s}}} \quad (1)$$

Burada E_s sönümleyici sisteminin yapının ilgili modda bir çevrim yapması durumunda sönmölediği enerji ve $E_{B\bar{s}}$ ise en büyük çevrimin yerdeğiştirmesi anında yapıdaki birim şekildeğiştirme enerjisidir. Bu amaçla ilgili mod genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sisteme (TSDSe) çevrilir. Sonra, bu sönmöleme yapı içsel sönmölemesine eklenerek toplam modal sönmöleme bulunur ve tasarımda kullanılan ivme spektrumu, bu sönmöleme oranına uyumlu hale gelmesi için spektrum azaltma katsayısı ile azaltılır (bakınız Şekil 1). Mod birleştirme yöntemi ile yapı bu yeni spektrum ile tasarlanır. Eğer kullanılan sönümleyici yapıya rijitlik katkısında bulunuyor ise bu rijitlik tasarımda kullanılan yapısal modele yansıtılır. Eğer yerdeğiştirmeye bağlı sönümleyici kullanılıyor ise yapıya, spektrum neticesinde oluşan yerdeğiştirmeye denk gelen efektif rijitlik eklenir (bakınız Şekil 2). Bu aşama, konvansiyonel yapılarda uygulanan ve itme analizleri ile elde edilen doğrusal olmayan davranış ve bu davranışa denk gelen çevrimsel enerjinin eşdeğer viskoz sönmöleme olarak ifadesi üzerinden gerçekleştirilen kapasite spektrumu yaklaşımları ile aynıdır. Benzer şekilde deprem yalıtımlı yapılarda kullanılan eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem hesabı da aynı yaklaşımı kullanmaktadır.

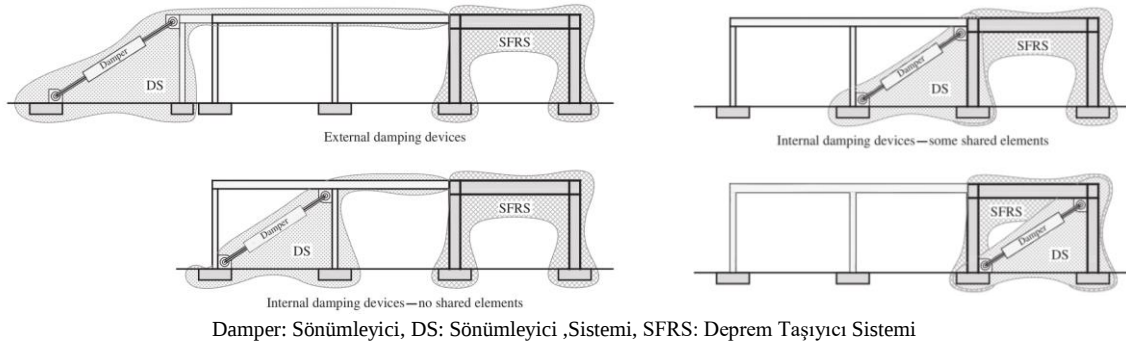
2. Aşamada tasarlanan yapı doğrusal olmayan zaman-tanım alanı analizleri ile kontrol edilerek tasarım teyit edilir. Bu aşamada bina yapıları için genellikle dönüş periyodu 2475 yıl olan ve en büyük deprem olarak tabir edilen deprem seviyesi kullanılır ve yapıda en az göçme öncesi performans seviyesi hedeflenir. Bu aşamada kullanılan matematiksel modelde, yapısal elemanlar ile beraber sönümleyicilerin de davranışlarını en doğru yansıtan eleman modelleri kullanılmalıdır.



Şekil 1. Ek sönümleme ile ivme spektrumunun azaltılması ve ek rijitlik etkisine örnekler



Şekil 2. YBSlerde farklı deprem seviyeleri için hesaplanan efektif rijitlikler



Şekil 3. ASCE 7’de tanımlanan sönümleyici, sönümleyici sistemi ve deprem taşıyıcı sistemi
(ASCE 7-16, 2016’den alınmıştır)

4. ASCE 7 YÖNETMELİĞİ

4.1. Genel Tanımlar

Amerikan ASCE 7 yönetmeliği (ASCE 7-16, 2016), Bölüm 18, sönümleme sistemine sahip yeni yapıların deprem yükleri için tasarımı hakkında olup bu yönetmelikteki tasarım kriterleri Şekil 3’de gösterilen yapısal sistem elemanları üzerinden tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar, ASCE 7 yönetmeliğinin deprem ile ilgili diğer bölümleri ile de uyumludur. ASCE 7 yönetmeliğinde Türkiye’deki yönetmelik ve uygulamalardan farklı olarak, tasarımcının deprem taşıyıcı sisteminin ana elemanlarını tanımlamasına izin verir. Bu elemanlar dışındaki elemanlar “deprem taşıyıcı sisteminin parçası olmayan elemanlar” olarak adlandırılır ve birim şekildeğiştirme uyumluluğu prensibi kullanılarak tasarlanır. Buna benzer olarak, sönümleyicili bir yapıda “sönümleyici” ve “sönümleyici sistemi” bölümleri de ayrı ayrı tanımlanmıştır. Yönetmelikte sönümleyici olarak adlandırılan şey, sönümleyici cihaz ve bağlantı elemanlarının (örnek: guse plakaları) tümüdür. Sönümleyici sistemi ise, sönümleyici kuvvetlerini deprem taşıyıcı sistemine taşıyan ara elemanların tümüdür. Bu üç bölüm farklı yerleşimler nedeni ile etkileşim halinde olabilir. Yönetmelik, bu üç bölüm elemanlarının tasarımı için ayrı ayrı kuralları tanımlamaktadır.

4.2. Deprem Taşıyıcı Sistem Tasarımı

ASCE 7 yönetmeliğinde, sönümleyici yapıda Bölüm 12. Tablo 12.2-1’de tanımlanan ve izin verilen ana deprem taşıyıcı sistemlerden birisi olmalıdır ve bu sistem konvansiyonel yapı tasarımında ve R , Ω_0 ve C_d değerlerinin kullanıldığı yöntemler ile tasarlanmalıdır. Bu noktada ASCE 7 yönetmeliği deprem taşıyıcı sistemi ana elamanlarının tasarımında kullanılacak taban kesme kuvvetinin en az, tüm yapı için hesaplanan taban kesme kuvvetinin en az %75’i olmasını şart koşmaktadır. Bu şart, sönümleyici sisteminde oluşabilecek bir fonksiyon kaybına karşı bir önlemdir. Ancak yapının düzensiz olması durumunda ya da burulmaya karşı uygun yerleşim ve yeterli sayıda sönümleyici olmaması durumunda bu şart %100 olarak belirlenmiştir. Ana taşıyıcı sistemin tasarımında kullanılacak deprem seviyesi dönüş periyodu 475 yıl olan seviyedir ve tasarım depremi olarak adlandırılmaktadır.

Yukarıda açıklanan %75 şartına ek olarak taban kesme kuvvetinin en az $V_{min} = V / B_{visk+ıçs}$ olma şartı mevcuttur. Burada $B_{visk+ıçs}$ viskoz ve içsel sönümlemeye denk gelen sönüm azaltma katsayısıdır. Bu şartın, yapıda sadece viskoz sönümleme olması ve yapının doğrusal kalması durumu ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

4.3. Sönümleyici Sistem Tasarımı

Sönümleyici sistemi olarak tanımlanan bölümdeki tüm elemanlar, 2475 yıllık en büyük deprem altında doğrusal kalacak şekilde tasarlanmalıdır ve malzeme faktörleri ve dayanım fazlalığı faktörü (Ω_0) kullanılmamalıdır. Bu sistem, sönümleyicinin kendisi, sönümleyici bağlantı elemanları (pinler, olası çapraz ve ankrajlar, çapraz guse plakaları) ve sönümleyici kuvvetlerini ana deprem sistemine taşıyan elemanlarını içermektedir. Yönetmelik, sönümleyicilerde olumsuz bir etki yaratmayacağının kapsamlı deney ve/veya analizler ile gösterilmesi ve bu elemanların tüm matematiksel modellerinin doğru yansıtılması kaydı ile sönümleyici dışında kalan tüm sönümleyici sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranışına izin vermektedir. Ancak bu yaklaşım tavsiye edilen bir yaklaşım değildir. Ayrıca yönetmelikte sönümleyici sistemindeki kuvvet-kontrolüne dayalı elemanların (örnek: gevrek elemanlar), 2475 yıllık deprem düzeyindeki kuvvetlerden %20’den fazla değerlere göre tasarlanmalıdır. Yapı düzensizliği ile ilgili olarak, burulmaya karşı uygun yerleşim ve yeterli sayıda sönümleyici olmaması durumunda sönümleyicilerin yer değiştirme ve hız kapasiteleri, 2475 yıllık deprem kuvvetleri altındaki yer değiştirme ve hız değerlerinin %30 üstünde olmalıdır. Sönümleyici özellikleri için üst ve alt sınır değerler yönetmelikçe verilen katsayılar ile bulunmaktadır. Doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analizler bu iki değer için de yapılmalıdır. Sönümleyici elemanların deneyleri ve sağlaması gereken mekanik özellikleri ile ilgili şartlar da detaylı şekilde verilmiştir.

4.4. Analiz Yöntemleri – Doğrusal Olmayan Zaman-Tanım Alanı Analizleri

ASCE 7 yönetmeliğinde sönümleyici tasarımında kullanılacak temel analiz yöntemi doğrusal olmayan zaman-tanım analiz (DOZTA) yöntemidir. Ancak bazı şartların sağlanması durumunda *yaklaşık yöntem olarak kabul edilen* eşdeğer statik kuvvet (ESK) ve mod birleştirme (MB) yöntemlerinin kullanılmasına izin verilmektedir.

DOZTA, hem HBSler hem de YBSler için en doğru sonuçları veren yöntemdir. ASCE 7’de DOZTA analizlerinin hem 475 yıllık hem de 2475 yıllık deprem düzeyleri için yapılması istenmektedir. 475 yıllık deprem yükleri kullanılarak ana deprem taşıyıcı sistemin, 2475 yıllık deprem kullanılarak sönümleyici sistemin tasarlanması gerekmektedir. Analizlerde kullanılacak içsel sönümleme oranı %3’tür. Ötelenme şartları 2475 yıllık deprem düzeyi için verilmiştir. Ana deprem taşıyıcı sistemi için geçerli olan %75 şartı DOZTA ile 485 yıllık deprem için yapılan tasarımda da geçerlidir. DOZTA yönteminde kullanılacak deprem kayıtlarının uygulanması ile ilgili şartlar da verilmiştir.

4.5. Analiz Yöntemleri – Yaklaşık Yöntemler

ASCE 7 yönetmeliğinde sönümleyicili yapı tasarımı için izin verilen eşdeğer statik kuvvet (ESK) ve mod birleştirme (MB) yöntemlerinin temel uygulama prensibi, bu yöntemlerin konvansiyonel yapılarda uygulanmasından farklılık göstermektedir. Konvansiyonel yapılarda elastik deprem kuvvetleri R değerine bölünerek tasarım kuvvetleri elde edilir. Bu kuvvetler yük kombinasyonları ile birleştirilerek tasarım bu kuvvetler için yapılır. Dayanım fazlalığının gerekli olduğu durumlarda Ω_0 faktörü kullanılır. Göreli kat ötelemeleri, C_d faktörü kullanılarak yapılır.

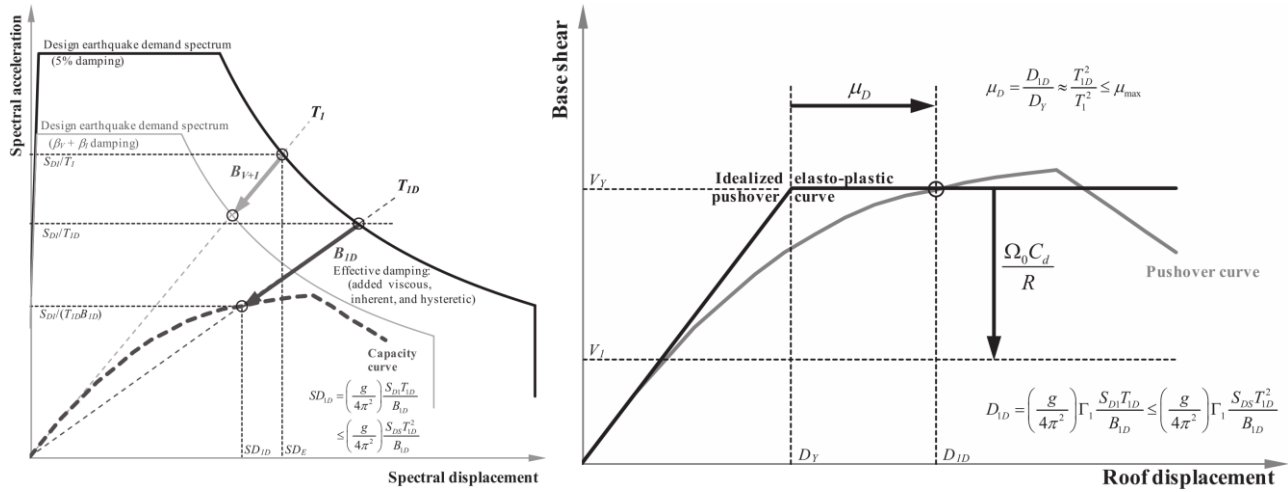
Sönümleyicili yapılarda takip edilen yöntem kapasite spektrum yöntemlerine benzerdir (bakınız Şekil 4). Bu yöntemde yapının doğrusal olmayan davranış bilgisinin bir itme analizinden geldiği, böyle bir analiz yok ise, mevcut R , Ω_0 ve C_d değerlerinden idealize bir eğri edildiği kabul edilmektedir. Spektral yer değiştirme-spektral

ivme eğrisinin eşdeğer sönüm ve bu sönüme denk gelen sönüm azaltma katsayısı ile azaltılmış deprem tasarım spektrumunun kesiştiği nokta tasarım noktası olarak kabul edilir. Daha sonra spektral ivmeler Ω_0 değerine bölünerek tasarım kuvvetleri bulunur. Ancak ASCE 7 yönetmeliği yerdeğiştirme hesabında C_d kullandığından dolayı elde edilen kuvvetler R / C_d değeri ile güncellenmektedir:

$$V_i = \frac{S_s}{\Omega_0 B_i} \left(\frac{R}{C_d} \right) \bar{W}_{s,i} \quad \text{for } T_{\text{eff},i} < T_s \quad V_i = \frac{S_s}{(\Omega_0 B_i) T_{\text{eff},i}} \left(\frac{R}{C_d} \right) \bar{W}_{s,i} \quad \text{for } T_{\text{eff},i} > T_s \quad (2)$$

Burada, V_i i. mod için hesaplanan taban kesme kuvveti, S_s spektrum parametresi, B_i sönüm azaltma katsayısı, $\bar{W}_{s,i}$, i. modun efektif kütlesi ve $T_{\text{eff},i}$ i. modun efektif periyotudur.

Burada vurgulanması gereken nokta, itme eğrisi için kullanılacak model yapıdaki YBSlerin doğrusal olmayan davranışı da içermelidir. Ayrıca, rijitlik katkısı olan tüm sönümleyici elemanların rijitlik etkileri yapı rijitliğine yansıtılmalıdır. Yaklaşık yöntemlerin önemli bir ayağını efektif periyot ve eşdeğer sönümleme hesabı oluşturmaktadır. Bu iki konu ayrı bir bölümde açıklanmıştır.



Şekil 4. ASCE 7’de yaklaşık yöntemlerin temelini oluşturan hesap yöntemi (ASCE 7-16, 2016’den alınmıştır.)

4.6. Analiz Yöntemleri – Yaklaşık Yöntemler: Mod Birleştirme Yöntemi

MB yönteminde, her mod için yukarıda temel prensibi anlatılan yaklaşımla hesap yapılmaktadır. Daha sonra bu modlardan elde edilen yapısal cevaplar mod birleştirme kurallarından birisi ile (karelerin toplamının karekökü ya da tam karesel birleştirme) birleştirilir. Bu yöntem için verilen denklemlerin, çok katlı yapılar ve sönümleyicilerin katlar arasında oluşan göreceli kat ötelemeleri ile aktive olduğu kabulüne uygun olduğu görülmektedir. Denklemler hem 475 yıllık, hem de 2475 yıllık deprem düzeyleri için verilmiştir.

4.7. Analiz Yöntemleri – Yaklaşık Yöntemler: Eşdeğer Statik Kuvvet Yöntemi

ESK yönteminde, birinci mod için MB yöntemine benzer modal yöntem kullanılarak birinci moda ait yapı tepkileri elde edilir. Diğer modlar “artık mod” olarak adlandırılır ve bu artık mod için yapı tepkileri elde edilir. Birinci mod ve artık mod tepkileri karelerin toplamının karekökü yöntemi ile birleştirilir. Yine MB yöntemine benzer şekilde, denklemlerin çok katlı yapılar ve sönümleyicilerin katlar arasında oluşan göreceli kat ötelemeleri ile aktive olduğu kabulüne uygun olduğu görülmektedir.

4.8. Analiz Yöntemleri – Yaklaşık Yöntemler: En Büyük Tepki Kuvvetler

ESK ve MB yöntemlerinde sönümleyici kuvvetlerinin maksimum tepkiler sırasındaki değerleri doğru hesaplanamaz. Bundan dolayı, yönetmelik en büyük tepki değerlerinde kuvvetler kuvvet katsayıları kullanarak yaklaşık hesaplanır.

$$\text{En büyük yerdeğiştirme anında: } Q_E = \Omega_0 \sqrt{\sum_i (Q_{i,\text{SFRS}})^2} \pm Q_{\text{DSD}} \quad (3)$$

$$\text{En büyük hız anında: } Q_E = \sqrt{\sum_i (Q_{i,DSV})^2} \quad (4)$$

$$\text{En büyük ivme anında: } Q_E = \sqrt{\sum_i (C_{i,FD} \Omega_0 Q_{i,SFRS} + C_{i,FV} Q_{i,DSV})^2} \pm Q_{DSD} \quad (5)$$

4.9. Analiz Yöntemleri – Yaklaşık Yöntemler: Efektif Süneklik Talebi

Yaklaşık yöntemlerde efektif süneklik talebi şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\mu = \frac{D_1}{D_Y} < \mu_{\max}, \quad \mu_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{\Omega_0 I_e} \right)^2 + \frac{1}{2} \text{ for } T_{\text{eff},i} < T_S, \quad \mu_{\max} = \frac{R}{\Omega_0 I_e} \text{ for } T_1 \geq T_S \quad (6)$$

Burada, T_1 akma öncesi periyot ve I_e önem katsayısıdır. Görüldüğü üzere, buradaki süneklik tipik sünekliktir ancak bu hali ile hesaplanacak yerdeğiştirmelere bağlıdır. Bu formül yerine hesabı daha kolay başka bir denklem de kullanılabilir:

$$\mu = \left(\frac{T_{\text{eff},1}}{T_1} \right)^2 < \mu_{\max} \quad (7)$$

4.10. Efektif Periyot

Efektif periyot en büyük yerdeğiştirmelere denk gelen sekant periyotudur. Matematiksel olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$T_{\text{eff},1} = T_1 \sqrt{\mu} \quad (8)$$

Ancak matematiksel modelin oluşturulmuş olması durumunda, bu periyot değeri matematiksel modelden de elde edilebilir.

4.11. Efektif Sönüm

Yapıda i . modda HBSler ile sönümlenen viskoz sönümleme $\beta_{i,v}$ Denklem (1) ile verilmiştir. Yapıda yerdeğiştirmeye bağlı sönümleyicilerin ve buna ek olarak yapının kendisinin doğrusal olmayan davranışı nedeni ile oluşan çevrimsel sönümleme β_H şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\beta_{i,H} = q_H (0.64 - \beta_i) \left(1 - \frac{1}{\mu} \right), \quad i > 1 \text{ için } \beta_{i,H} = 0, \quad q_H = 0.67 \frac{T_S}{T_1}, \quad 1.0 > q_H > 0.5 \quad (9)$$

Burada q_H , çevrim şekline bağlı sönüm kalibrasyon katsayısıdır. Yapıda oluşan toplam sönümleme şu şekilde bulunmaktadır:

$$\beta_i = \beta_1 + \beta_{i,v} \sqrt{\mu} + \beta_{i,H}, \quad i > 1 \text{ için } \mu = 1, \beta_{i,H} = 0 \quad (10)$$

Burada β_1 içsel sönümlemedir ve %3 alınmaktadır.

4.12. Sönümleyici Üst ve Alt Sınır Değerleri

ASCE 7 yönetmeliği ile tüm analiz ve tasarımların sönümleyici özelliklerinin olası üst ve alt sınır değerleri için yapılmasını gerektirmektedir. Üst ve alt sınır değerleri için en az sırası ile 1.2 ve 0.85 katsayıları kullanılmalıdır.

4.13. Özet ve Genel Değerlendirme

ASCE 7 yönetmeliğinin genel özellikleri şu şekilde özetlenmiştir:

- Tanımlı ve izin verilen bir bina deprem taşıyıcı sistemi olması gerekir.
- Deprem taşıyıcı sistemi 475 yıllık deprem düzeyi için tasarlanmaktadır. Ancak tasarım kuvvetleri elastik kuvvetlerin R katsayısı ile bölünmesinden elde edilmemektedir.
- Deprem taşıyıcı sisteminde kullanılacak kuvvetler, eğer eşdeğer statik kuvvet veya mod birleştirme yöntemi ile hesaplanacaksa, tasarım kuvvetleri bulunurken, deprem ana taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı, ampirik bir formül ile hesaplanan eşdeğer sönüm oranı ile ifade edilmekte, bu orana denk gelen deprem azaltma katsayıları ve daha sonra dayanım fazlalığı katsayısı ile deprem kuvvetleri azaltılmaktadır. En sonunda bu kuvvetleri yerdeğiştirme hesabında kullanılan katsayı ile ilgili olarak bir ayarlama yapılmaktadır. Eğer sistemde yerdeğiştirmeye bağlı sönümleyici var ise bu sönümleyiciye denk gelen eşdeğer sönümleme de ana taşıyıcı deprem sisteminin eşdeğer sönümlemesine eklenmektedir. Eğer sistemde viskoz sönümleyici var ise, bu sönümleyicilere denk gelen eşdeğer sönümleme hesabı tipik yöntemler ile yapılmaktadır.
- Tasarım kuvvetleri doğrusal olmayan analizlerden alınması halinde, herhangi bir eşdeğer sönüm hesabına gerek yoktur. Ancak tüm sönümleyiciler doğru bir şekilde analiz modeline yansıtılmalıdır.
- Sönümleyici sistemi 2475 yıllık deprem düzeyi seviyesinde doğrusal kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Kuvvet-kontrollü elemanlar bu kuvvetlerin %20 daha fazlasına göre tasarlanmalıdır.
- Düzensizlik durumunda, sönümleyici yerdeğiştirme ve hız kapasiteleri, 2475 yıllık deprem düzeyine denk gelen değerlerden %30 daha fazla olmalıdır.
- Doğrusal olmayan analizler temel tasarım yöntemidir. Bazı durumlarda eşdeğer statik kuvvet ve mod birleştirme yöntemi kullanılabilir. Analizler hem 475 hem de 2475 yıllık deprem düzeyleri için hem de sönümleyici üst ve alt limit özellikleri için yapılmalıdır.

ASCE 7 Sönümleyici yönetmeliği görüldüğü üzere oldukça karmaşık denklemler içermektedir. Bunun nedeni önceden de bahsedildiği gibi sönümleyici yapı tasarımının genel olarak zor oluşudur. Reçete-tabanlı bir yaklaşım yöntemin karmaşık bir hal almasına neden olmuştur. Ayrıca yönetmelik performans-dayalı bir yaklaşım içermemektedir. Bundan dolayı, farklı performans hedefleri ve özellikleri olan yapılara uygulanması zordur. Örnek olarak ülkemizde sıklıkla karşılaşılan güçlendirme projelerinde, yapı özellikleri güncel yönetmeliklerde verilen ana deprem taşıyıcı sistem özellikleri ile örtüşmemektedir. Genel olarak bu yönetmeliğin ülkemize doğrudan uyarlaması uygun görülmemektedir.

5. ASCE 41 YÖNETMELİĞİ

ASCE 41-17 (ASCE 41, 2017) mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için Amerikan İnşaat Mühendisleri Topluluğu (ASCE) tarafından hazırlanmış bir standarttır. Bölüm 15’de ek sönümleyici içeren yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için gereksinimleri ortaya koymuştur. Bölüm 15.1 gereksinimleri, 15.4 ve 15.5 doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerini, 15.6 ek gereksinimleri, 15.7 bağımsız denetçi tarafından yapılması gerekli kontrolleri ve 15.8 testleri tarifler.

Bölüm 15.2’de detayları verilen koşullar ile sönümleyicilerin farklı çevre koşulları için kontrolleri, bu çevre koşulları için toleransları ve servis yaşamı boyunca performansı etkileyecek diğer etkenlerin dikkate alınmasını öngörür.

Bölüm 15.2.2.4’de Katlardaki rijitlik merkezine göre sönümleyici yerleşim yeri ve adetlerine göre sönümleyici kapasitelerini düzenleyerek sönümleyici içeren sistemlerin sistem fazlalığını düzenler. Yine aynı bölümde performans hedefleri için verdiği koşullarda, sönümleyicilerin bağlantı elemanlarının doğrusal kalmasını şart koşar ancak yük yolu üzerindeki diğer sönümleyici sistem yapısal elemanlarının sönümleyici performansını etkilenmediğini göstermek şartı ile doğrusal olmayan evreye geçmesine izin verilebilir. Bu bölümde nispetend düzenli yapılarda sönümleyicilerin yerdeğiştirme ve hız kapasitesinin en büyük deprem altında hesaplanan değerlerden %30 daha fazla olma şartı vardır. Sönümleyici sisteminin düzensiz olması durumunda bu değer 100’dür. Ayrıca sönümleyici yerleşiminin düzenli ve düzensiz olması durumunda sönümleyicilerin bağlantıları da en büyük depremde hesaplanan değerlerin sırası ile %30 ve %100 fazlası olmalıdır.

Bölüm 15.3 sönümleyiciler için tasarım kriterlerini verir iken, alt ve üst davranış limitleri için kontrol istemektedir.

Bölüm 15.4 analiz yöntemi seçimi koşullarını verir. Yapı analizi için ana yöntem doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizdir. Ancak verilen bazı şartları sağlaması şartı ile eşdeğer statik ve mod birleştirme yöntemleri de kullanılabilir. Doğrusal analiz uygulanabilmesi koşulları;

1. Sönümleyici içeren yapı, sönümleyicinin etkisi altında seçilmiş deprem etkisi altında doğrusal kalmalıdır;
2. Sönümleyici sisteminin sönümlediği etkin modda sönümleme oranı % 30 üzerinde olmamalıdır;
3. İyileştirilmiş yapının matematik modelinde her bir sönümleyicinin etkin (sekant) rijitliği dikkate alınmalıdır;
4. Yapı düzensizliklerinin değerlendirilmesinde matematik model sönümleyicileri içermelidir.

Doğrusal analizlerde sönümleyiciler tarafından sağlanan sönümleme katkısı tüm sönümleyici tipleri için Denklem (1) ile hesaplanmaktadır. En büyük tepkiler ise Denklemler (3), (4) ve (5)'e benzer yöntemler ile hesaplanmaktadır. Bu şartlara bölüm 15.9.2.1'de ilave olarak iki koşul daha eklenmiştir:

1. Yapının her bir katındaki hesap yapılan yöndeki maksimum dayanımın kapasitesinin kata gelen deprem kesme kuvvetine oranı diğer katlardaki aynı oranın % 80' i ile % 120'si arasında olacaktır. Kat dayanımında kattaki tüm elemanlar ve sönümleyiciler de dahil olacaktır.
2. BSE-2X seviye depremi etkisinde sönümleyicilerin maksimum dayanımı yapının geri kalanının dayanımının % 50 sinden fazla olmayacaktır. Sönümleyicilerin dayanımının hesabında yaşlanma, çevre vb. etkiler dikkate alınacaktır.

Burada BSE-2X ASCE 41'e göre BSE-2N, BSE-2E, BSE-1N ve BSE-1E olabilir ve tüm bu depremler farklı dönüş periyotlarına sahip deprem seviyelerine denk gelmektedir. Bunun nedeni, ASCE 41 farklı seviye değerlendirme ve farklı yapı tipleri için farklı deprem seviyeleri kullanmaktadır. Ülkemizdeki uygulamalar uyumlu olduğu düşünülen deprem seviyeleri BSE-2N ve BSE-1N'dir ve sırası ile TBDY 2018'deki DD-1 ve DD-2 seviyelerine denk gelmektedir.

Doğrusal olmayan dinamik analizler için kurallar bölüm 15.5'de verilmiştir. Bu bölümde uygulanacak doğrusal olmayan yapı ve sönümleyici modelleme koşulları YBS ce HBS için ayrı ayrı verilmiştir. Matematik modelde hem plan hem katlar arasındaki sönümleyici yerleşimleri modellenmelidir. Sönümleyicilerin deneyler ile de doğrulanmış rijitlik ve sönümleme özellikler modele yansıtılmalıdır. Doğrusal olmayan kuvvet-hız-yerdeğiştirme karakteristikleri modellenmelidir. Sönümleyiciler frekans, çalışma sıcaklığı, deformasyon, yük miktarı vb. etkilerden etkileniyorlar ise modelleme ve analizlerde bu alt ve üst koşullar dikkate alınmalıdır. Sönümleyici içeren yapı sistemlerinin doğrusal kalıyor ise doğrusal modellenebilir. HBS'de viskoz kuvvetler tasarım ve yerdeğiştirmelerin hesabında dikkate alınmalıdır. Ancak genel yapı sönümü sebebi ile sönümleyicilerdeki viskoz etkilerin değişimine zaman tanım alanındaki analizlerde izin verilmez.

Yerdeğiştirmeye bağlı sönümleyicilerdeki kuvvetler şu şekilde ifade edilmiştir:

$$F = k(D)D \quad (11)$$

Burada $k(D)$ yerdeğiştirmeye bağlı rijitlik, D sönümleyicinin iki ucu arasındaki görelî yerdeğiştirmedir. HBS'deki kuvvetler ise şu şekilde ifade edilmiştir:

$$F = \text{sgn}(\dot{D}) \cdot C_0 \cdot |\dot{D}|^\alpha \quad (12)$$

Burada C_0 viskoz sönüm sabiti, $\dot{D}$ sönümleyicinin iki ucu arasındaki görelî hız ve α doğrusal olmayan viskoz sönümleyiciler için davranış parametresidir. Viskoelastik sönümleyicilerin kuvvetleri şu şekildedir:

$$F = k(D)D + C\dot{D} \quad (13)$$

Burada C viskoz sönüm sabiti ve $\dot{D}$ sönümleyicinin iki ucu arasındaki görelî hızdır. Zaman-tanım analizlerinde kullanılacak ivme kayıtları için de Bölüm 2.4.3 ve Bölüm 16.2 referans verilmiş ancak ilave iki uyarılama verilmiştir:

1. Her bir hedef spektrumu için en yedi kayıt kullanılmalıdır.

2. Ölçekleme için kullanılacak periyot aralığı, sönümleyici üst sınır özellikleri kullanılmış olan $0.2T_{1min}$ ve sönümleyici alt sınır özellikleri kullanılmış $1.5T_{1max}$ kullanılacaktır. Burada T_{1min} ve T_{1max} göz önüne alınan her iki deprem yönü için maksimum ve minimum etkin periyotlardır.

Bölüm 15.6'da üst ve alt limit analizleri, rüzgar yükleri, gözlem ve ulaşılabilme, bakım gibi ek şartlar verilmiştir.

Bölüm 15.7'de tasarım gözetmeni şartı ve gözetmen için kontrol şartları (sıralanan şartlar ile sınırlı kalmamak üzere) sıralanmıştır. Sönümleyici içeren yapıların tasarım ve analiz ve test aşamalarının tamamının sönümleyici tasarımı ve analizinde tecrübeli, sertifikalanmış tasarım gözetmeni mühendis(ler)in gözetiminde olmasını şart koşturmuştur. Burada listelenenler ile sınırlı olmamak kaydı ile tasarım gözetmeninin kontrol edeceği tasarımlar;

1. Sahaya özel tasarım spektrumu ve yer hareketi kayıtları,
2. Sönümleyicilerin seçimi ve onların tasarım parametreleri,
3. Ön tasarım, yapı yerdeğiştirme, sönümleyici hız ve yerdeğiştirme ve kuvvet hesapları,
4. Bölüm 15.8.1'e veya benzer sönümleyici testlerine göre hazırlanmış ilk örnek test proframı,
5. Seçilmiş sönümleyicinin üretim test dokümanları ve modifikasyon parametrelerinin incelenmesi,
6. Tüm yapısal sistemin final tasarımı, Sönümleyicilerin modellemesi ve destekleyen analizler,
7. Sönümleyici üretim test programı.

Bölüm 18.8'de detaylı olarak üretim ve prototip testleri için gereklilikler harekete ve hıza duyarlı Sönümleyiciler için ayrı ayrı olmak üzere verilmiştir.

Standartta esas analiz yöntemi olarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz tariflenmiştir. Ancak tanımlanmış kriterlerin karşılanması durumunda kullanılmak üzere bölüm 15.9'da doğrusal analiz yöntemi ve 15.10'da doğrusal olmayan statik yöntem de tariflenmiştir.

Doğrusal analiz yöntemlerinde harekete ve hıza duyarlı sönümleyiciler için ayrı ayrı olmak üzere eşdeğer rijitlik ve eşdeğer sönüm hesabı anlatılmıştır.

ASCE 41 yönetmeliğinde kullanılan, yapı deprem taşıyıcı sistemi, sönümleyici sistemi ve sönümleyici tanımları ASCE 7 ile aynıdır. ASCE 41, ASCE 7'de yaklaşık yöntemler için verilen formülleri içermemektedir. Bunun nedeni ASCE 41'in ilgili diğer bölümlerde itme ve DOZTAların nasıl yapılacağı kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca, ASCE 41 mevcut yapılar ile ilgili bir yönetmelik olduğundan ASCE 7 gibi 475 yıllık deprem seviyesinde tasarım ile ilgili şartlar bulunmamakta, sadece 2475 yıllık deprem seviyesi için değerlendirme şartları bulunmaktadır. Bundan dolayı ASCE 41 doküman daha az detay içermektedir.

6. AVRUPA YÖNETMELİĞİ

Avrupa (Eurocode) yönetmeliklerinde sönümleyici cihazların tasarımı ile ilgili olarak EN 15129 kullanılmakta olup yapısal tasarım ile ilgili kriterler için ise EN 1998-1 (Eurocode 8, Part 1) yönetmeliğine atıfta bulunmaktadır. Söz konusu yönetmelikler Avrupa Birliği ile uyum yasaları çerçevesinde Türkçe'ye de çevrilmiştir. EN 15129 ve Eurocode 8 yönetmelikleri çevirileri Türk Standartları Enstitüsü tarafınan "yürürlükte olan standard" sınıfında kategorize edilmiştir. Ancak ilgili standartların çevirileri esnasında Eurocode yönetmeliklerinin uygulamalarında kullanılan Ulusal Ek'ler (National Annex) hazırlanmamış olup sadece bire bir çevirileri yapılmıştır. EN 15129 yönetmeliği sönümleyici cihazlar haricinde izolatörleri de kapsamakta olup bu doğrultuda değerlendirildiğinde ilgili standardın direkt çevirisinin yürürlükte bulunması güncel "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği" belirli bölümlerde tezat oluşturmaktadır.

EN 15129'da yerdeğiştirmeye bağlı cihazlar, hıza bağlı cihazlar, izolatörler gibi deprem cihazları çok geniş bir yelpazede tanımlanmaktadır. Söz konusu cihazlar ile ilgili olarak tasarımda kullanılacak efektif sönüm, efektif rijitlik gibi değerlerin elde edilmesine yönelik tanımlar genellikle tip testleri ve üretim testleri üzerinden ifade edilmiştir. Sönümleyici cihazlar ile yapı tasarımı veya güçlendirilmesi ile ilgili kurallar çok genel bir çerçevede tanımlanmış olup yapıların olası düzensizlikleri, sönümleyici cihazların bulunmaması durumundaki dayanımları, yapı için beklenen performans kriterleri vb. ile ilgili gereksinimlere ise değinilmemiş veya çok sınırlı olarak yer verilmiştir. Yapılan literatür incelemesinde de, Avrupa'da sönümleyiciler kullanılarak yapılan tasarımlar ile ilgili yayınlanan çalışmalarda büyük ölçüde Amerikan yönetmeliklerinden faydalandığı gözlemlenmiştir.

Eurocode yönetmeliklerinde yapıların tasarımında iki farklı koşul gözetilerek tasarım yapılması gerekmektedir. Bu koşullar Üst Limit Durumu (İng. Ultimate Limit State - ULS) ve Kullanılabilirlik Durumu (İng. Serviceability Limit State - SLS) olarak tanımlanmaktadır. Deprem cihazların tasarımında da benzer yaklaşım takip edilmektedir. Bu kriterler gözetilerek SLS ve ULS durumları için göz önüne alınması önerilen deprem seviyeleri;

- SLS için 10 yılda aşılma olasılığı %10 olan veya 95 yıl dönüş periyotlu deprem
- ULS için 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan veya 475 yıl dönüş periyotlu deprem

olarak tanımlanmaktadır. SLS için kullanılan cihazlarda hasar oluşmaması veya hasarın oldukça sınırlı kalması hedeflenmekteyken, ULS kontrolleri için ise kullanılan cihaz, cihaz bağlantıları ve yapısal elemanlarda göçme oluşmaması hedeflenmektedir. Cihazların ve yapıların tasarımında ülkemizde ve Amerikan yönetmeliklerinde tanımlandığı şekilde 2475 yıl dönüş periyotlu deprem seviyesi için herhangi bir kriter bulunmamakta olup ULS kontrollerinin gerçekleştirildiği 475 yıl dönüş periyotlu deprem düzeyi gözetilerek hesaplanan cihaz yerdeğiştirme ve yük kapasitelerinde belirli bir güvenlik katsayısı γ_b, γ_x kullanılmaktadır.

Bu kapsamda değerlendirildiğinde Avrupa yönetmeliklerinin sönümleyici cihazları daha çok bir yapısal eleman olarak göz önüne aldığı düşünülmektedir. Sönümleyici cihazların yapı tasarımında kullanımına yönelik parametreler cihaz tipine bağlı olarak birincil rijitlik, ikincil rijitlik, efektif rijitlik ve efektif sönüm olarak tanımlanmış olup bu cihazların kullanılması durumunda uyulması gereken herhangi bir ilave koşul belirtilmemektedir. Yönetmeliğin geri kalan bölümlerinde cihaz tiplerine bağlı olarak yapısal tasarım parametrelerinin belirlenmesine yönelik tip testleri ve üretim testleri detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca cihazların üretiminde kullanılacak malzemelerin sağlaması gerekli koşullar da ayrıntılı olarak verilmektedir.

7. JAPON YÖNETMELİĞİ

Japon Bina Deprem Yönetmeliği BSL-1981, ilgili bakanlık olan MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism: Arazi, Altyapı, Ulaşım ve Turizm Bakanlığı) tarafından en son 1981 yılında çıkarılmış olup sonrasında 2000 ve 2006 yıllarında bazı yeni düzenlemeler yapılmış ve ek bölümler ilave edilmiştir ama hesap yöntemlerinde bir değişiklik olmamıştır. Bu yönetmelik binaların yapısal tasarımı hakkında olup içerisinde yapısal sönümleyicili binalara yönelik ayrı bir bölüm bulunmamaktadır. Bununla beraber, Japon yönetmeliğinin yerdeğiştirmeye-bağlı davranış gösteren metal veya sürtünme esaslı sönümleyicileri çiftdoğrusal (İng. bilinear) davranış ile tanımlanabilen yapısal sistemlerde ayırmamaktadır. Bu nedenle, bu tür sönümleyiciler, yönetmelikte tarif edilen eşdeğer doğrusallaştırma ve enerji esaslı yöntemler kullanılarak yapının bir parçası gibi tasarlanabilmektedir. Bu yönetmelikte sönümleyicilerin özellikleri, tasarımı, modellenmesi, analizi, testleri ve bakımı hakkında bilgi yoktur.

JSSI (Japanese Society of Seismic Isolation: Japon Deprem İzolasyon Derneği) 2003 yılında pasif kontrollü binaların tasarım ve imalatına yönelik bir kılavuz çıkarmıştır. Günümüzde Japonya'daki sönümleyicili binaların tasarımında bu kılavuz aktif olarak kullanılmaktadır.

JSSI Kılavuzu sönümleyici cihaz ve sönümleyicili binaların performans sınırlarını belirlerken, analiz ve davranış tahmini metotlarının da sınırlarını mümkün olduğu kadar açıkça tartışmaktadır. Bunu ötesinde kılavuz, sönümleyicili binadaki çeşitli sistem bileşenlerinin tasarım, imalat ve inşasındaki her aşamada dikkat edilmesi gereken hususlara geniş bir şekilde yer vermektedir. Bu bakımdan kılavuzun, yapı tasarımcısı, sönümleyici üreticisi ve müteahhittin görüş birliği ve uyumunu teşvik etmesi ve binalarda öngörülen performansın elde edilmesi bakımından olumlu katkı yapması beklenmektedir.

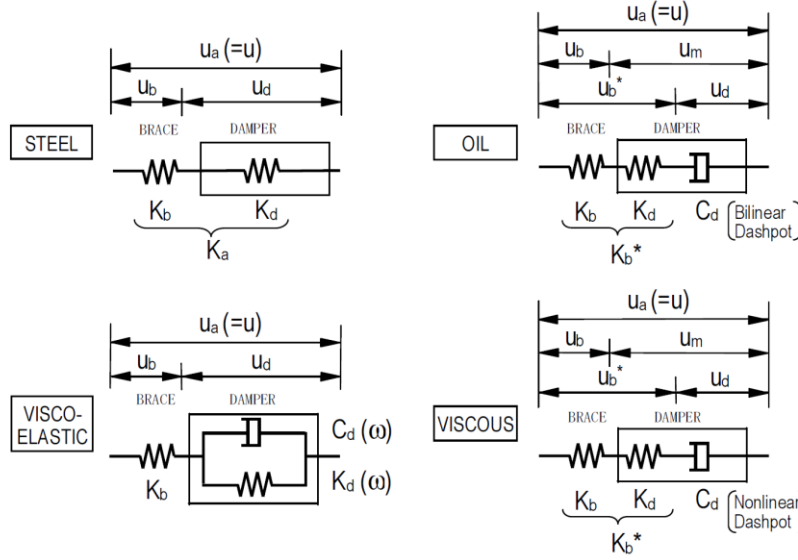
JSSI Kılavuzu sönümleyicileri temel olarak Viskoz, Yağ esaslı, Viskoelastik ve Çelik/Metal sönümleyiciler olarak 4 sınıfa ayırmıştır. 2007 yılında yapılan düzenleme ile kılavuz içerisinde sürtünme esaslı sönümleyiciler Metal sönümleyicilerden ayrılarak bağımsız bir sınıf olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte kılavuz sönümleyicilerin çerçevelere bağlanma şeklini aşağıdaki gibi üç tipe ayırmıştır.

- Doğrudan bağlantı: Duvar tipi, çapraz tipi, kesme bağlantısı tipi.
- Dolaylı bağlantı: Ara-kolon tipi, dirsek tipi, dolaylı duvar tipi
- Özel bağlantı: Kolon tipi, giriş tipi.

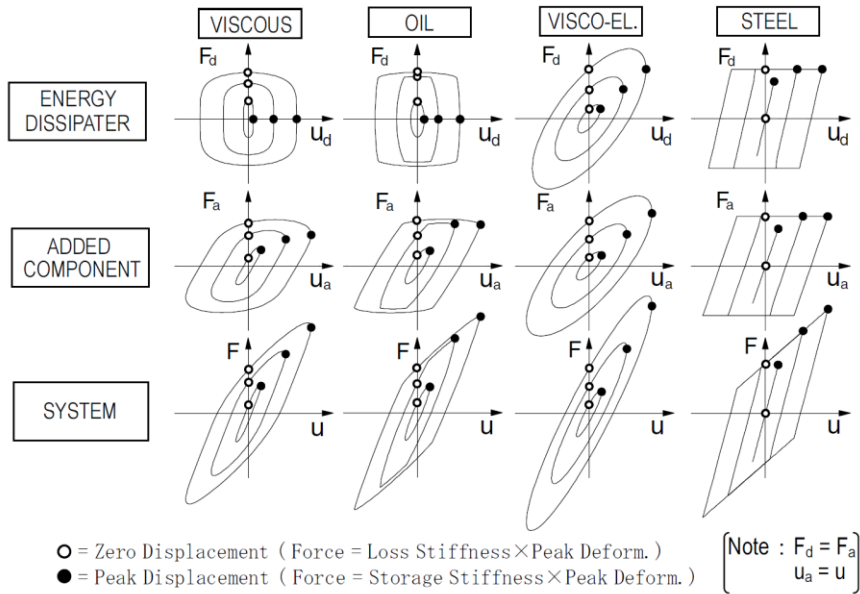
En genel uygulamanın çapraz tipi bağlantı olduğu kabul edilirse, sönümleyicili yapı davranışını etkileyen parametreler: kütle, çapraz ve yapı çerçevesi rijitliği ve sönümleyicinin sönümü ve rijitliği olur. Birbirine seri

olarak bağlı olan çapraz ve sönümleyici JSSI Kılavuzunda “ilave bileşen” olarak tanımlanır. Şekil 5’te 4 farklı sönümleyici tipine bağlı olarak ilave bileşen modelleri gösterilmektedir. Bu şekillerde çaprazlar doğrusal kabul edilmiş olup rijitlikleri K_b ile gösterilmektedir.

Şekil 6’te sönümleyici, ilave bileşen ve yapı çerçevesi de dahil tüm sistem için çevrimsel davranış eğrileri 4 farklı sönümleyici tipi için gösterilmektedir. Bu şekillerde dolu noktalar en büyük yer değiştirme sırasındaki kuvveti göstermektedir. En büyük yer değiştirmenin olduğu andaki rijitlik depo rijitliği (İng. storage stiffness) olarak isimlendirilmekte olup sönümleyici için K_d parametresi ile gösterilir. Şekillerdeki içi boş noktalar ise yer değiştirmenin sıfır olduğu andaki kuvveti göstermektedir. Bu kuvvetin aynı çevrimdeki en büyük yer değiştirmeye bölünmesi ile elde edilen değere kayıp rijitlik (İng. loss stiffness) denmekte olup sönümleyici için K_d'' ile gösterilir. Basit bir dille söylemek gerekirse depo rijitliği sönümleyicinin enerji depolama yeteneğini, kayıp rijitliği ise enerji sönümleme yeteneğini göstermektedir.



Şekil 5. Sönümleyici tipleri ve ilave bileşen modelleri (JSSI Kılavuzu, 2003’ten alınmıştır)



Şekil 6. Dört tip sönümleyici ve 3 farklı pik yer değiştirme durumunda sönümleyici, ilave bileşen ve sistem için verilmiş çevrimsel davranış eğrileri (JSSI Kılavuzu, 2003’ten alınmıştır)

JSSI Kılavuzunda sönümleyicilerle birlikte yapısal sistem eşdeğer ter serbestlik dereceli sisteme dönüştürülmekte ve kılavuzdaki “performans eğrileri” kullanılarak sönümleyicilerin ön tasarımı yapılmaktadır. (Şekil 7) Performans eğrilerinin eksen takımları ilgili eşdeğer sistem için yerdeğiştirme azalma oranı R_d ve kuvvet (veya ivme) azalma oranı R_a parametreleridir. Burada sözü geçen azalma oranları, sönümleyicili sistemin en büyük yerdeğiştirme veya kuvvet değerlerinin, sönümleyicisiz sistemdeki değerlere göre normalize edilmiş halidir. Performans eğrileri ise en basit tarifi ile sönümleyici rijitliğinin, yapı çerçevesi rijitliğine oranı şeklinde çizilmiştir (K_d/K_f). Seçilen sönümleyici tipine bağlı olarak K_d/K_f oranı, sönümleyici rijitliği yerine ilave bileşen rijitliği, kayıp rijitlik gibi parametrelerle hesaplanabilir. Bu şekillerde sözde hız spektrumu (İng. pseudo-velocity response spectrum) tüm periyot aralıkları için sabit kabul edilmiş olup orta ve yüksek binalarda yapılan genel uygulama da bu yöndedir.

Performans eğrileri sönümleyicilerin ilavesi ile birlikte beklenen yapısal davranıştaki azalmayı hızlı bir şekilde elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Her ne kadar artan sönümleyici miktarının yerdeğiştirme ve kuvvet değerlerini azaltması beklense de, belirli bir sınırın üzerinde sönümleyici kullanmanın, özellikle kuvvet üzerinde olan olumsuz etkisi de eğrilerde görülebilmektedir. Performans eğrileri ayrıca çapraz rijitliğinin sönümleyici verimliliği üzerindeki etkisini de göstermektedir. Çaprazların yeterli rijitlikte olmaması çaprazların şekil değiştirmesine sebep olmakta ve bu yüzden sönümleyicinin yer değiştirmesi ve dolayısı ile enerji sönümleme yeteneği azalmaktadır.

Performans eğrileri hedeflenen deplasman ve kuvvet için gerekli olan sönümleyici ve çapraz boyutlarının tespiti için etkili şekilde kullanılmaktadır. Tasarım spektrumlarına bağlı olarak yerdeğiştirme ve taban kesme kuvveti tespit edilmiş bir binada hedeflenen yerdeğiştirme ve kuvvet azaltma oranına bağlı olarak istenilen sönümleyici ve çapraz rijitliği hızlıca tespit edilebilir. Bununla birlikte eğriler kullanılarak seçilen sönümleyiciler ve elde edilen davranış azaltmaları optimize edilebilir. Tek serbestlik dereceli sistem için elde edilmiş bu K_d/K_f sönümleyici-çerçeve rijitliği oranı, yapının kat rijitlikleri ile ayrı ayrı çarpılarak çok serbestlik dereceli sistemde her kat için gerekli sönümleyici miktarı belirlenir. Sonuçlar zaman tanım alanında analizle teyit edilerek uygulama adımına geçilir.

JSSI Kılavuzunda, BSL-1981 yönetmeliğinde belirtilmemiş olan sönümleyicili binaların performans hedefleri, sönümleyicilerin testleri, sönümleyicilerin kalite kontrolü ve bakımı hakkında ayrı ayrı bölümler mevcuttur. Ayrıca kılavuzda hesap adımlarına, sönümleyicilerin bağımsız veya bağlantı tipine bağlı olarak ilave bileşen şeklindeki modelleme yöntemlerine ve örnek uygulamalara da geniş yer verilmiştir.

Görüldüğü üzere, Japon tasarım kılavuzunda, tüm yapısal sistemin tasarımı ile ilgili kriterlerden çok sönümleyicilerin modellenmesi ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Tasarım ile ilgili diğer kriterlerin ilgili deprem yönetmeliklerinde bulunduğu ve bunların uygulanması gerektiği anlaşılmaktadır.

8. GENEL DEĞERLENDİRME VE UYGULAMALAR

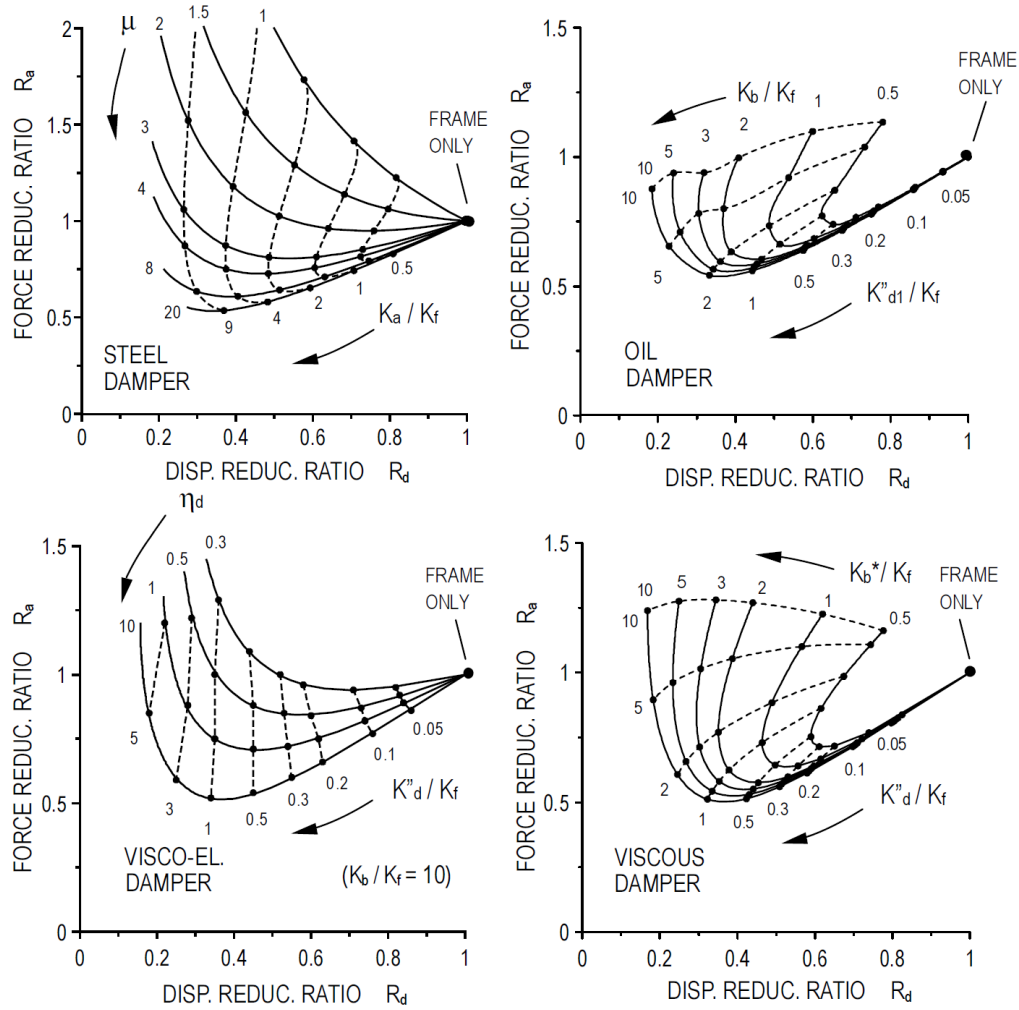
Tüm yönetmelikler incelendiğinde, Amerikan yönetmeliklerinin oldukça kapsamlı olduğu ve tüm yapı tasarımına yönelik olduğu görülmektedir. Ancak, ASCE 7’de tasarım depreminin 475 yıllık deprem olması ve YBS’lerin yapı çevrimsel davranışına etkisinden dolayı azaltılmış deprem kuvvetlerinin hesabı için kapasite spektrum yöntemi kullanılmaktadır. Bu yaklaşımı hesapların oldukça karmaşık bir hal almasında neden olmuştur. Amerikan yönetmeliklerinde yeni bina tasarımında, bina ana deprem taşıyıcı sistem dayanımının en az verilen bir değeri sağlaması öngörülmüştür. Ayrıca, sönümleyicilerin hem yerdeğiştirme/hız hem de bağlantı elemanların 2475 yıllık deprem de kontrol edilmesi ve en az verilen değerleri sağlaması şart koşulmuştur. Mevcut yapıların güçlendirmesinde de benzer şartlar olmakla beraber 475 yıllık deprem ile ilgili şartlar bulunmamaktadır ve analizler ile ilgili detaylar yönetmeliğin ilgili bölümlerinde detaylı olarak verilmiştir.

Avrupa yönetmeliğinde sönümleyiciler anti-deprem cihaz olarak tanımlanmış ve deprem yalıtım ile aynı yönetmelik çerçevesinde irdelenmiştir. Yönetmelik şartları 90 ve 475 yıllık deprem seviyeleri için tanımlanmış olup, 2475 yıllık deprem için bir şart bulunmamaktadır.

Sönümleyiciler ile ilgili Japon yönetmeliği bulunmamakla beraber bir tasarım kılavuzu mevcuttur. Bu tasarım kılavuzu, sönümleyicilerin kapsamlı modellenmesi hakkında bilgi vermekle beraber, yapısal tasarım ile ilgili kriterler bulunmamaktadır. Bu yaklaşımın Japon mühendislik uygulamaları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Japonya'daki uygulamalar incelendiğinde, Amerikan yaklaşımından farklı olarak ana deprem taşıyıcı sistemi ile ilgili sınırlayıcı şartların bulunmadığı görülmektedir.

Literatürdeki uygulamalar incelendiğinde, sönümleyicili yeni yapı tasarımı veya mevcut yapı güçlendirmesi ile ilgili olarak yönetmeliklerin nasıl uygulandığına ilişkin bilgilerden çok sönümleyici yapının DOZTA ile performans değerlendirme çalışmaları bulunmaktadır. Bundan dolayı, kapsamlı bir uygulama literatürüne burada yer verilmemiştir.



Şekil 7. Dört tip sönümleyici kullanan pasif kontrol sistemi performans eğrileri
(JSSI Kılavuzu, 2003'ten alınmıştır)

9. SONUÇ

Bu bildirinin Türkiye'de sönümleyicili yapıların deprem tasarımı ile öneri tasarım esasları sunulması hedeflenmiştir. İlk bölümde, diğer ülke yönetmelikleri ve kılavuzları incelenmiş ve bu metinlerin ana hatları özetlenmiştir. İncelenen yönetmelikler, Amerikan ASCE 7, ASCE 41, Avrupa EN 15129 yönetmelikleri ve Japon JSSI kılavuzudur. Yapılan inceleme sonucunda, ASCE 7 yönetmeliğinin oldukça kapsamlı olduğu, ASCE 41 yönetmeliğinin mevcut yapılar için daha uygun olduğu, Avrupa yönetmeliklerinden taşıyıcı sistem ile ilgili kriterlerin genel hatları ile verildiği ve sönümleyici mekanik özellikleri ile ilgili detaylı şartların olduğu, Japon yönetmeliğinde sönümleyicilerin matematiksel modellemesi hakkında kapsamlı bilgiler olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- ASCE 7-16 (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7-16. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- ASCE 7-16 (2016). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-17. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- BSL-1981 (1981), The Building Standard Law Enforcement Order, Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism, Japan.
- DBYBHY (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- EN 1998-1 (2004). Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee For Standardization. Brussels, Belgium.
- EN 15129 (2018). Anti-seismic Devices. European Committee For Standardization. Brussels, Belgium.
- JSSI Manual, (2003) Design and Construction Manual for Passively Controlled Buildings, Japan Society of Seismic Isolation (JSSI), Japan.
- Kasai K, Yaoumin F, and Watanabe A (1998). "Passive Control Systems for Seismic Damage Mitigation," *ASCE Journal of Structural Engineering*, **124(5)**: 501–512.
- Özer C. (2014) Maltepe Plaza Sönümleyici Cihazlar ile Yapısal Güçlendirme Projesi, Yapısal Hesap Raporu, Statika Mühendislik, İstanbul.
- Ramirez OM, Constantinou MC, Whittaker AS, Kircher CA, and Chrysostomou CZ (2002). "Elastic and Inelastic Seismic Response of Buildings with Damping Systems," *Earthquake Spectra*, **18(3)**: 531–547.
- Symans MD, Charney FA, Whittaker AS, Constantinou MC, Kircher CA, Johnson MW ve McNamara RJ (2008). "Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments." *ASCE Journal of Structural Engineering*, **134(1)**: 3-21.
- TBDY (2018). Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Yıldırım S, Aşık G, Erkuş B, ve Tonguç YI (2013) "Sismik Sönümleyici ve Klasik Güçlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması." 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konf., Hatay, Türkiye, Eylül 25-27.
- Yıldırım S, Kalyoncuoğlu A, Erkuş B, ve Tonguç YI (2015a) 1Betonarme Prefabrike Yapıların Sönümleyiciler ile Sismik Güçlendirme Uygulaması." 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konf., İzmir, Türkiye, Ekim 14-16.
- Yıldırım S, Kalyoncuoglu A, Erkus B, ve Tonguc YI (2015b) "Seismic Retrofit of Industrial Precast Concrete Structures Using Friction Dampers: Case Study from Turkey." 2nd ATC-SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, San Francisco, California, December 10-12.