

Yapısal Düzensizliğe Sahip Çelik Yapılarda Viskoz Sönümleyici Etkilerinin Araştırılması  
ve Yeni Bir Bağlantı Tipi Önerisi

Murat Hiçyılmaz

**DOKTORA TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2017

Investigation of Supplemental Viscous Damper Effects on Steel Structures Under the  
Variation of Isolation and Superstructure Parameters

Murat Hicyilmaz

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Civil Engineering

January 2017

Yapısal Düzensizliğe Sahip Çelik Yapılarda Viskoz Sönümleyici Etkilerinin Araştırılması  
ve Yeni Bir Bağlantı Tipi Önerisi

Murat Hiçyılmaz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Hasan Gönen

Ocak 2017

## ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Murat Hiçyılmaz'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Yapısal Düzensizliğe Sahip Çelik Yapılarda Viskoz Sönümleyici Etkilerinin Araştırılması ve Yeni Bir Bağlantı Tipi Önerisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Hasan Gönen

İkinci Danışman:

### **Doktora Tez Savunma Jürisi:**

Üye: Prof. Dr. Hasan Gönen

Üye: Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

Üye: Prof. Dr. Eşref Ünlüoğlu

Üye: Doç. Dr. Mizan Doğan

Üye: Yard. Doç. Dr. Ahmet Raif Boğa

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## **ETİK BEYAN**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Hasan GÖNEN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yapısal Düzensizliğe Sahip Çelik Yapılarda Viskoz Sönümleyici Etkilerinin Araştırılması ve Yeni Bir Bağlantı Tipi Önerisi” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 05/01/2017

Murat HİÇYILMAZ

İmza

## ÖZET

Sismik izolasyonun temel hedefi, yapıya gelen dinamik etkilerin sönümleyici araçlar yardımıyla tamamen ya da büyük ölçüde ortadan kaldırılması ve yapı güvenliğinin sağlanmasıdır. Geleneksel güçlendirme yöntemlerinde sismik performansın artırılması genel anlamda rijitlik artışı ile mümkün olmakta, bu da yapıya gelen dinamik yüklerin artmasına sebep olmaktadır. Pasif sismik kontrol sistemlerinden viskoz sönümleyiciler, yapılarda oluşabilecek kalıcı hasarların önüne geçerek yapıları dinamik etkilerden korurlar, can ve mal güvenliğini garanti altına alırlar. Son yirmi yılda farklı ülkelerde geniş bir uygulama alanı bulmuş olsalar da ülkemizde henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Bu çalışmada, çeşitli yapısal düzensizlikleri ve süreksizlikleri bulunan çelik çerçevelere ve üç boyutlu modellere yapılan viskoz sönümleyici ilavesinin, modellerin dinamik davranışlarını ne oranda iyileştirdiği incelenmiştir. Bununla beraber yeni bir konfigürasyon önerisi yapılmıştır.

Birinci uygulamada, farklı konfigürasyona (bağlanma geometrisine) sahip viskoz sönümleyiciler ele alınarak bu farklılıklarının sismik performansı nasıl etkilediği ve yeni önerilen konfigürasyonun ne derece verimli olduğu incelenmiştir. İkinci uygulamada, burulma düzensizliği görülen çelik yapılara viskoz sönümleyici ilavesinin olumlu ve olumsuz etkileri incelenmiştir. Üçüncü uygulamada, geri çekme düzensizliği bulunan iki adet çelik çerçeveye viskoz sönümleyiciler ilave edilmiş, uniform dağılım ve optimum dağılım sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Dördüncü uygulamada ise viskoz sönümleyici ilave edilmiş kısmi dolgu duvarlı çelik çerçevelerin sismik performansı incelenmiştir. Dolgu duvar süreksizlikleri ile ortaya çıkan düzensizlik durumları, viskoz sönümleyici ilavesi ile ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik yapılar, viskoz sönümleyiciler, sönümleyici konfigürasyonları, yapısal düzensizlikler, optimum dağılım.

## SUMMARY

The main goal of seismic isolation is to eliminate the dynamic effects to structure as completely or largely and to ensure that structural safety by using damping devices. Generally increasing the seismic performance in conventional retrofit methods is feasible by increasing the stiffness and this leads to increase the dynamic loads on the structure. Viscous dampers which are passive seismic control systems are protects the constructions from dynamic effects and prevent permanent damages that can occur on the structures and they guaranteed the safety of life and property. Although they have found wide application areas in variety of countries over the past two decades, they have not been used widely in our country.

In this study, it was investigated that the addition of viscous dampers to steel frames and three-dimensional models with various structural irregularities and discontinuities how could be improved the dynamic behavior of the models. In addition a new configuration proposal was suggested.

In the first application, viscous dampers with different configurations (fixation) were examined to see how these variations affect the seismic performance and how efficient the newly proposed configuration. In the second application, the effects of viscous dampers on steel structures with torsional irregularities are investigated. In the third application, viscous dampers are added to the two steel frames with set-back irregularities, data obtained from uniform and optimum distribution are compared. In the fourth application, the seismic performance of with viscous damper added steel frames with partial infill walls were investigated. The irregularities due to infill wall discontinuities are tried to remove by the addition of viscous dampers.

**Keywords:** Steel structures, viscous dampers, damper configurations, structural irregularities, optimum distribution.

## TEŞEKKÜR

Bu akademik çalışmanın yürütülmesi sırasında bana yol göstererek desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Hasan GÖNEN'e, tez izleme komitesinde yer alan ve her an bilgi ve tecrübelerinden istifade etmeme izin veren Sayın Doç. Dr. Mizan DOĞAN ve Sayın Prof. Dr. Gülgün YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın analiz kısımlarında kullanmış olduğum Sap2000 yapısal analiz programını sağlayan Computer&Structures Genel Müdürü Sayın Suat BAŞER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Varlıkları ile bana her daim destek olan anne baba ve kardeşime, bu meşakkatli yolda her türlü fedakârlığı gösteren sevgili eşime minnet duygularımı sunarım.

Murat Hiçyılmaz

Ocak, 2017



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xvi
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xviii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	5
<b>3. GENEL BİLGİLER</b> .....	13
3.1. Yapı Dinamiği Genel İlkeleri .....	13
3.1.1. Titreşim olgusu ve titreşim sistemlerinin ana elemanları .....	13
3.1.2. Yapısal titreşimlerin sınıflandırılması .....	14
3.1.3. Tek serbestlik dereceli bir sistemin dinamik davranışının incelenmesi .....	14
<u>3.1.3.1. Serbest titreşim</u> .....	15
<u>3.1.3.2. Sönümlü titreşim</u> .....	17
<u>3.1.3.3. Tek serbestlik dereceli sistem serbest titreşim uygulama</u> .....	20
<u>3.1.3.4. Zorlanmış titreşim (harmonik yük altında çözümleme)</u> .....	22
<u>3.1.3.5. Tek serbestlik dereceli zorlanmış sistem uygulama</u> .....	24
3.2. Dinamik Yük Faktörü Ve Rezonans Durumu .....	25
3.3. Duhamel İntegrali.....	27
3.4. Logaritmik Azalım .....	28
3.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler.....	29
3.6. Sönümlü Kayma Çerçevesi Ve Denklemler.....	32
<b>4. VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİLER VE YENİ BİR KONFIGÜRASYON ÖNERİSİ</b> .....	34
4.1. Yapılarda Sönüm.....	34
4.1.1. Yapılarda meydana gelen sönüm türleri.....	34
4.1.2. Sönüm matrisi .....	35
4.1.3. Klasik ve klasik olmayan sönüm.....	36
4.1.4. Eşdeğer viskoz sönüm.....	36
4.1.5. Rayleigh sönüm yaklaşımı .....	37
4.1.6. Yapılarda ortaya çıkan enerji .....	39
4.2. Viskoz Sönümleyiciler .....	40

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.2.1. Viskoz sönümleyicinin çalışma prensibi .....	41
4.2.2. Viskoz sönümleyici tipleri.....	43
4.2.3. Sönümleyici katsayısı hesabı .....	45
4.3. Yeni Bir Konfigürasyon Önerisi .....	45
4.3.1. Önerilen bağlantı tipi ve büyütme katsayısının hesabı.....	45
4.3.2. Tek serbestlik dereceli sistem yeni konfigürasyon uygulaması .....	51
<b>5. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>56</b>
5.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi .....	56
5.2. Mod Birleştirme Yöntemi .....	57
5.2.1. Mod katkılarının birleştirilmesi.....	59
5.2.2. Karelerin toplamının karekökü yöntemi.....	59
5.2.3. Tam karesel birleştirme yöntemi .....	60
5.2.4. Mutlak değerlerin toplamı yöntemi.....	60
5.2.5. Mod katkılarının birleştirilmesi ile ilgili uygulama.....	61
5.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi.....	65
5.4. Modal Spektral Çözümleme Yöntemi.....	66
5.5. Deprem Spektrumları .....	67
5.5.1. Spektrum değerlerinin hesabında Duhamel integrali kullanılması.....	68
5.5.2. Yer hareketinin zaman tanım alanında ölçeklenmesi .....	72
5.6. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri .....	73
5.6.1. Taylor seri açılımı .....	74
5.6.2. Merkezi farklar yöntemi .....	74
5.6.3. Newmark yöntemi .....	75
5.7. Çelik Yapılarda Plastikleşme ve Dizayn.....	77
5.7.1. Yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışının nedenleri.....	78
5.7.2. Plastik mafsallık hipotezi .....	79
5.7.3. Çeliğin enerji yutma özelliği.....	80
5.8. Çelik Yapıların DBYYHY'e (2007) Uygun Olarak Boyutlandırılması.....	81
5.8.1. Göreli kat ötelenmeleri ve ikinci mertebe etkileri.....	84
5.8.2. Boyutlandırma esasları.....	85
5.8.3. Kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulu.....	86
5.8.4. Başlık enkesit kontrolleri .....	87
5.8.5. Kirişlerde kayma gerilmesi ve sehim tahkiki .....	89

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.9. Basit Eğilme .....	89
5.9.1. I profil için elastik - plastik moment hesabı ve şekil faktörü kavramı .....	91
5.9.2. Çerçeveler için plastik mafsalları tanımlanması .....	92
5.10. Dolgu Duvar Modeli .....	95
5.11. Basitleştirilmiş Sıralı Arama Algoritması (Simplified Sequential Search Algorithm) .....	97
5.12. Yapısal Düzensizlikler .....	98
5.12.1. Planda düzensizlik durumları .....	98
<u>5.12.1.1. Burulma düzensizliği</u> .....	98
<u>5.12.1.2. Döşeme süreksizlikleri</u> .....	101
<u>5.12.1.3. Planda çıkıntılar bulunması</u> .....	101
5.12.2. Düşey doğrultuda düzensizlik durumları .....	102
<u>5.12.2.1. Komşu katlar arası dayanım düzensizliği (Zayıf kat, B1)</u> .....	102
<u>5.12.2.2. Komşu katlar arası rijitlik düzensizliği (Yumuşak kat, B2)</u> .....	103
<u>5.12.2.3. Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği (B3)</u> .....	104
<u>5.12.2.4 Düşeyde kütle ve rijitlik değişimleri</u> .....	104
<u>5.12.2.5. Kısa kolon oluşumu</u> .....	106
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>108</b>
6.1. Uygulama I. Farklı Konfigürasyona Sahip Viskoz Sönümleyicilerin İncelenmesi.....	108
ve Yeni Bir Konfigürasyon Önerisi .....	108
6.1.1. Uygulamanın amacı.....	108
6.1.2. Kullanılan çelik çerçeveler.....	108
6.1.3. Zaman tanım alanında analiz.....	109
6.1.4. Yer ivmeleri.....	110
6.1.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı .....	111
6.1.6. Sönümleyici katsayısı hesabı .....	111
6.1.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	113
6.1.8. Uygulama I için sonuçlar .....	116
6.2. Uygulama II. Burulma Düzensizliği Bulunan Çelik Yapılara Viskoz Sönümleyici	
Uygulanması .....	117
6.2.1. Uygulamanın amacı.....	117
6.2.2. Kullanılan çelik binalar .....	117
6.2.3. Zaman tanım alanında analiz.....	119
6.2.4. Yer ivmeleri.....	120

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.2.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı .....	121
6.2.6. Sönümleyici katsayısı hesabı .....	121
6.2.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	122
6.2.8. Uygulama II için sonuçlar .....	127
6.3. Uygulama III. Geri Çekme Düzensizliği Olan Çelik Çerçeve Sistemlerde Optimum Sönümleyici Dağılımının İncelenmesi .....	128
6.3.1. Uygulamanın amacı.....	128
6.3.2. Kullanılan çelik çerçeveler.....	128
6.3.3. Zaman tanım alanında analiz.....	129
6.3.4. Yer ivmeleri.....	130
6.3.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı .....	131
6.3.6. Sönümleyici katsayısı hesabı .....	131
6.3.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	132
6.3.8. Sönümleyici dağılımının 5 farklı ivme kaydı için belirlenmesi .....	133
6.3.9. Uygulama III için sonuç ve öneriler.....	139
6.4. Uygulama IV. Viskoz Sönümleyici İlave Edilmiş Kısmi Dolgu Duvarlı Çelik Çerçevelerin Sismik Performans Analizi.....	140
6.4.1. Uygulamanın amacı.....	140
6.4.2. Kullanılan çelik çerçeveler.....	140
6.4.3. Doğrusal olmayan analizler.....	141
6.4.4. Yer ivmeleri.....	142
6.4.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı .....	142
6.4.6. Sönümleyici katsayısı hesabı .....	143
6.4.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	143
6.4.8. Uygulama IV için sonuç ve öneriler.....	148
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>150</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>154</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>160</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sönümleyici konfigürasyonları .....	5
2.2 Viskoz sönümleyici paneller .....	6
2.3 39 katlı yapıya ait sönümleyici konumlandırılması, rüzgâr yüküne bağlı kat ötelenme .....	8
3.1. Çok serbestlik dereceli bir kayma çerçevesi .....	13
3.2. Toplu kütleli tek serbestlik dereceli sistemler .....	15
3.3. Genlik-zaman grafiği.....	17
3.4. T.s.d. sönümlü sistem yerdeğiştirme-zaman grafiği.....	20
3.5. T.s.d. çelik çerçeve .....	20
3.6. T.s.d. sönümsüz sistem deplasman grafiği (serbest titreşim) .....	21
3.7. T.s.d. sönümlü sistem deplasman grafiği (serbest titreşim) .....	21
3.8. T.s.d. sönümsüz zorlanmış sistem deplasman grafiği .....	24
3.9. T.s.d. sönümlü zorlanmış sistem deplasman grafiği .....	25
3.10. Dinamik yük faktörü- frekans oranı ilişkisi .....	27
3.11. Çok serbestlik dereceli sönümlü sistem ve eşdeğer gösterimi .....	33
4.1. Sönüm oranı-doğal frekans değişim ilişkisi .....	38
4.2. Tipik bir viskoz sönümleyici (Lee ve Taylor, 2001).....	41
4.3. a) Kuvvet-hız grafiğinin $\alpha$ üs değeri ile ilişkisi .....	42
4.4. Farklı konfigürasyonda sönümleyici uygulamaları .....	44
4.5. Dünyada viskoz sönümleyici uygulamaları .....	44
4.6. Önerilen bağlantı a) stabil durum b-c) dinamik etkiler altında zorlanmış durum .....	46
4.7. Dinamik etkiler altında zorlanmış durum.....	47
4.8. e ve d noktaları hareket detayı.....	48
4.9. Farklı n katsayıları için büyütme faktörü değerleri a) n=4, b) n=3, c) n=2, d) n=1 .....	50
4.10. Çerçeveye ait görünüm.....	51
4. 11. El Centro deprem kaydı.....	52
4.12. En büyük taban kesme kuvveti ve eksenel kuvvet değerleri .....	52
4.13. En büyük taban kesme kuvveti ve eksenel kuvvet değerleri.....	53
4.14. Sistem yatay hareketi-sönümleyici eksenel hareketi ilişkisi a) n=1 b) n=2 c) n=3 d) n=4 .....	54
5.1. Beş katlı kayma çerçevesine ait görünüş.....	61
5. 2. Mod katkılarının birleştirilmesi ile bulunan deplasmanlar ve kuvvetler.....	65
5. 3. Çeşitli davranış spektrum örnekleri a) Spektral yerdeğiştirme, b) spektral hız, c) sözde .....	70
5. 4. Farklı zemin sınıfları için tasarım spektrum ve spektral ivme katsayıları.....	72

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5. 5. Moment-eğrilik ilişkisi.....	78
5. 6. Basit eğilme etkisi altındaki bir enkesitin gerilme-şekildeğiştirme davranışı.....	79
5. 7. Baushinger etkisi .....	80
5. 8. Basit eğilme etkisi altında bir cisim .....	90
5. 9. Basit kiriş moment-eğrilik ilişkisi .....	90
5. 10. I profilde plastikleşme.....	91
5. 11. Genelleştirilmiş kuvvet – deformasyon eğrisi .....	93
5. 12. Konsol ve çerçeve kirişlerde dönme tanımlaması.....	93
5. 13. Eşdeğer basınç çubuğu modeli.....	95
5. 14. Eşdeğer basınç çubuğu kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi.....	96
5. 15. X yönünde ötelenme.....	99
5. 16. Y yönünde ötelenme.....	100
5. 17. Düşey eksen etrafında dönme .....	100
5. 18. Planda düzensiz yapıların dilatasyon derzi ile ayrılması.....	102
5. 19. Yumuşak kat düzensizliği .....	103
5. 20. B3 düzensizliği durumu .....	104
5. 21. Geri çekme düzensizliği görülen binalar.....	105
5. 22 Geri çekme düzensizliğine ilişkin kurallar .....	106
5. 23. Yapılarda kısa kolon davranışı.....	107
6. 1. Çerçevelere ait görünüşler .....	109
6. 2. Ölçeklendirilmiş spektral ivme-zaman grafikleri.....	110
6. 3. Farklı konfigürasyonlar için ölçüler .....	111
6. 4. Modellere ait doğal titreşim periyotları ve mod şekilleri .....	113
6. 5. Farklı sönümleyici konfigürasyonları için kat yerdeğiştirmeleri ve eksenel kuvvet.....	114
6. 6. Farklı sönümleyici konfigürasyonları için kat kesme kuvveti ve eğilme momenti .....	115
6. 7. Sönümsüz durum ve yeni tip konfigürasyon için taban kesme kuvveti değerleri.....	116
6. 8. Tepe noktası yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvetleri.....	116
6. 9. Model U'ya ait görünüşler .....	118
6. 10. Model L'ye ait görünüşler.....	119
6. 11. Ölçeklendirilmiş spektral ivme-zaman grafikleri.....	120
6. 12. Her iki modele ait ilk üç mod şekli .....	123
6. 13. Her iki modele ait burulma katsayıları ( $\eta_{bi}$ ) .....	124

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6. 14. Modeller için taban kesme kuvveti-sönüm oranı ilişkisi.....	124
6. 15. Taban kesme kuvveti ve burulma momenti değerleri .....	125
6. 16. Kolonlarda oluşan en büyük iç kuvvet değerleri (Model U).....	126
6. 17. Kolonlarda oluşan en büyük iç kuvvet değerleri (Model L) .....	127
6. 18. Çerçevelere ait görünümeler .....	129
6. 19. Ölçeklendirilmiş spektral ivme-zaman grafikleri.....	130
6. 20. Ölçeklendirilmiş spektral ivme grafikleri.....	131
6. 21. İlk üç mod için modellere ait doğal titreşim periyotları ve mod şekilleri .....	133
6. 22. Model I'e ait sönümleyici dağılım yüzdeleri .....	134
6. 23. Model II'e ait sönümleyici dağılım yüzdeleri .....	134
6. 24. Model I için görel kat yerdeğiştirme oranları (%).....	135
6. 25. Model II için görel kat yerdeğiştirme oranları (%) .....	136
6. 26. Model I için 1.kat en büyük iç kuvvet değerleri ve düşüş aralıkları .....	137
6. 27. Model II için 1.kat en büyük iç kuvvet değerleri ve düşüş aralıkları .....	137
6. 28. Model I ve II için taban kesme kuvveti-tepe noktası yerdeğiştirme değerleri .....	138
6. 29. Model II için optimum ve uniform sönüm kuvvetleri.....	138
6. 30. Çalışmada kullanılan modeller.....	141
6. 31. Northridge depremine ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği .....	142
6. 32. Kapasite spektrum yöntemine göre performans noktaları.....	143
6. 33. Model I'e ait kapasite eğrisi .....	144
6. 34. Tüm modeller için tepe noktası yerdeğiştirmesi .....	145
6. 35. Tüm modeller için görel kat yerdeğiştirme oranları.....	146
6. 36. Tüm modeller için kolon aksenal kuvvetleri.....	146
6. 37. Tüm modeller için kolon kesme kuvvetleri.....	147
6. 38. Tüm modeller için kolon eğilme momentleri.....	148

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Sönüm oranları (Newmark ve Hall, 1982) .....	35
4.2 İlk ve son konumda noktaların koordinatları .....	47
4.3. Sönümleyici katsayısı hesabı .....	52
5. 1. Çerçeveye ait rijitlik ve sönüm matrisleri .....	61
5. 2. Çerçeveye ait mod, periyot ve açısal hız değerleri.....	61
5. 3. Normal ve normalize edilmiş modlar .....	62
5. 4. Doğal titreşim modları için ivme spektrumu ordinatları .....	63
5. 5. Genelleştirilmiş kütle matrisi .....	63
5. 6. Birinci mod için modal etkin kütle hesabı.....	63
5. 7. İlk beş mod için deplasman değerleri.....	64
5. 8. İlk beş mod için ivme değerleri.....	64
5. 9. İlk beş mod için yatay kuvvet değerleri .....	64
5. 10. Serbest titreşim frekans oranları ( $r_{ij}$ ).....	64
5. 11. Çapraz korelasyon katsayıları ( $\rho_{ij}$ ).....	65
5. 12. Yapısal çelik mekanik özellikleri (Mpa).....	82
5. 13. Nominal rüzgâr basıncı .....	83
5. 14. Çalışmada kullanılan 41 adet yük birleşimi .....	83
5. 15. Enkesit koşulları (DBYYHY, 2007) .....	85
5. 16. Yapısal çelik bileşenleri için doğrusal olmayan çözümlerinde modelleme parametreleri ve uygunluk kriterleri (FEMA 356, 2000).....	94
6. 1. Analizler neticesinde seçilen kesitler.....	109
6. 2. Yer ivmesi kayıtları.....	111
6. 3. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model a, Diyagonal Tip, 0,08 sönüm oranı).....	112
6. 4. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model a, Diyagonal Tip, 0,08 sönüm oranı).....	112
6. 5. Viskoz sönümleyici parametreleri.....	112
6. 6. Analizler neticesinde seçilen kesitler .....	119
6. 7. Yer ivmesi kayıtları.....	120
6. 8. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model U-X Yönü) .....	121
6. 9. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model L-Y Yönü).....	122
6. 10. Tüm durumlar için hesaplanan sönümleyici katsayıları (kN sn/m).....	122
6. 11. İlk yedi mod için modellere ait veriler .....	123
6. 12. Analizler neticesinde seçilen kesitler .....	129



**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6. 13. Yer ivmesi kayıtları.....	130
6. 14. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model I, diyagonal tip, 0,15 sönüm oranı) .....	131
6. 15. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model II, diyagonal tip, 0,15 sönüm oranı) .....	132
6. 16. Yer ivmeleri .....	142
6. 17. Sönümleyici katsayısı hesabı (Tüm modeller, diyagonal tip, 0,18 sönüm oranı) .....	143
6. 18. Çerçevelerde Oluşan Plastik Mafsal Dağılımları .....	144

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Kesit Alanı
$A_0$	Etkin Yer İvme Katsayısı
$A_g$	Perde Elemanlarının Enkesit Alanlarının Toplamı
$A_i$	Rüzgâr Yüğü Aktaran Alan
$A_k$	Kâgir Dolgu Duvar Alanlarının Toplamı
$A_w$	Kolon Enkesiti Etkin Gövde Alanı
C	Viskoz Sönüm Katsayısı
$c_f$	Aerodinamik Yüğü Katsayısı
$C_{cr}$	Kritik Sönüm Katsayısı
$C_{mi}$	Uç Momentleri
$D_a$	Moment Arttırma Katsayısı
$D_i$	Moment Büyütme Katsayısı
$E_ç$	Çelik Elastisite Modülü
$E_d$	Viskoz Sönümde Bir Çevrimde Harcanan Enerji
$E_c$	Çerçeve Elastisite Modülü
$e_{sdi}$	Sönümleyici Merkezi Koordinatları
$E_w$	Dolgu Duvar Elastisite Modülü
$E_{x±}$	Eksantirik Yüğü
$f_0$	Zorlama Genliğı
$F_b$	Basınç Başlığı Ve Gövde Basınç Bölgesinin $1/3$ ' Ünden Oluşan Kesit Alanı
$F_{ye}$	Malzeme Akma Gerilmesi
F	Sönümleyici Kuvveti
f	Şekil Faktörü
$f_w$	Dolgu Duvar Prizma Basınç Dayanımı
g	Yerçekimi İvmesi
G	Sabit Düşey Yüğü
$h_c$	Kolon Yüksekliğı
$h_i$	Kat Yüksekliğı
$h_w$	Dolgu Duvar Yüksekliğı
I	Bina Önem Katsayısı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$I_i$	Atalet Momenti
$I_i$	Kesit Atalet Momenti
$I_\theta$	Kütle Eylemsizlik Momenti
$i_b$	Basınç Başlığı Ve Gövde Basınç Bölgesinin $1/3$ ' ünün Atalet Yarıçapı
$K_i$	Basınç Çubuklarında Burkulma Boyu Katsayısı
$k$	Rijitlik
$l_b$	Kirişlerin Yanal Doğrultuda Mesnetlendiği Noktalar Arasındaki Uzaklık
$l_b$	Kiriş Boyu
$l_c$	Kolon Boyu
$l_w$	Dolgu Duvar Boyu
$m$	Kütle
$M_1$	Kiriş Yanal Desteklerinin Olduğu Noktalardaki Uç Momentlerinin Küçüğü
$M_2$	Kiriş Yanal Desteklerinin Olduğu Noktalardaki Uç Momentlerinin Büyüğü
$M_{ce}$	Beklenen Eğilme Dayanımı
$M_n$	Modal Etkin Kütle
$M_p$	Plastikleşme Momentine
$M_{pa}$	Kolonun Altında Oluşan Moment
$M_{pi}$	Kirişin Sağında Oluşan Moment
$M_{pj}$	Kirişin Solunda Oluşan Moment
$M_{pü}$	Kolonun Üstünde Oluşan Moment
$m_{\theta i}$	Kütle Eylemsizlik Momenti
$n$	Hareketli Yük Katılım Katsayısı
$N_i$	Normal Kuvvet
$P$	Hedef Deplasman Anında Eleman Üzerine Gelen Eksenel Kuvvet
$P_{ye}$	Eksenel Akma Kuvveti
$q$	Nominal Rüzgâr Basıncı
$Q$	Hareketli Yük
$R_a(T_i)$	Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı
$r_y$	Kiriş Başlığının Ve Gövdenin $1/5$ ' inin Yanal Doğrultudaki Atalet Yarıçapı
$r$	Doğal Titreşim Frekansının Zorlanmış Titreşim Frekansına Oranı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
R	Eşdeğer Basınç Çubuğu Taşıma Kapasitesi
$R_a$	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
$S_{ae}(T_i)$	Elastik Spektral İvme
$S_a^{hedef}$	Hedef İvme Davranış Spektrumu
$S_{aR}(T_i)$	Azaltılmış Spektral İvme Katsayısı
$\sin(\omega t)$	Zorlama Frekansı
$S_{ki}$	Burkulma Boyu
$S_x$	Yarım Kesit İçin Statik Moment
s	Kirişin Basınç Başlığında Dönmeye Karşı Mesnetlendiği Noktalar Arası Mesafe
S(T)	Spektrum Katsayısı
$S_a^{gerçek}$	Mevcut Deprem Kaydı İvme Spektrumu
T	Doğal Titreşim Periyodu
$t_g$	Kesit Gövde Kalınlığı
$t_w$	Dolgu Duvar Kalınlığı
$u(t)$	Zamana Bağlı Yerdeğiştirme
$\dot{u}(t)$	Zamana Bağlı Hız
$\ddot{u}(t)$	Zamana Bağlı İvme
$u_D$	Sönümleyicinin Aksı Doğrultusunda Yaptığı Rölatif Deplasman
$V_i$	Kat Kesme Kuvveti
$V_{max}$	En Büyük Kesme Kuvveti
$v_{max}(t)$	Dinamik Yük Faktörü
W	Bina Toplam Ağırlığı
w	Eşdeğer Basınç Çubuğu Efektif Genişliği
$W_i$	Rüzgâr Yüğü
$W_{x,y}$	Kesit Mukavemet Momenti
$Z_i$	Yerel Zemin Sınıfı Periyotları
$\emptyset$	Genlik Vektörü
$\emptyset_{ii}$	İ'inci Mod Şeklinin Yatay Bileşeni
$\emptyset_{jn}$	J. Kat n. Mod Deplasman Değerleri
$\emptyset_{\theta i}^2$	İ'inci Mod Şeklinin Düşey Eksen Etrafındaki Dönme Bileşeni

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\delta_i$	Etkin Göreli Kat Ötelemesi
$\Delta_{i_{ort}}$	Azaltılmış Ortalama Göreli Kat Ötelenmesi
$\Delta_y$	Akma Anındaki Yerdeğiştirme
$\Delta F_n$	Tepe Noktasına Etkiyen Kuvvet
$\Delta u$	Şekil Değiştirme Sınırı
$\Delta y$	Taşıma Kapasitesine Karşı Gelen Şekil Değiştirme
$\epsilon_i$	Birim Boy Değişimi
$\eta_{bi}$	Burulma Düzensizliği Katsayı
$\eta_{ci}$	Dayanım Düzensizliği Katsayısı
$\eta_{ki}$	Rijitlik Düzensizliği Katsayısı
$\theta_y$	Akma Anındaki Dönme
$\lambda_i$	Narinlik
$\xi$	Sönüm Oranı
$\xi_{eff}$	Efektif Sönüm Oranı
$\rho_{ij}$	Çapraz Korelasyon Katsayısı
$\sigma_a$	Akma Gerilmesi Sınır Değeri
$\sigma_{bem}$	Basınç Emniyet Gerilmesi
$\sigma_{bi}$	Yalnızca Eğilme Momenti Altında Hesaplanan Gerilme
$\sigma'_i$	Burkulma İçin Hesaplanan Ve Euler Gerilmesinden Türetilen Değer
$\omega_0$	Doğal Açısız Frekans
$\sigma_{\zeta}$	Çekme Gerilmesi
$\tau_{em}$	Kesme Gerilmesi
$\Gamma$	Modal Katılım Çarpanı
$\gamma_i$	Optimum Yerleşim İndisi
$\delta$	Logaritmik Azalım
$\Delta$	Toplam Elastik Ve Plastik Yerdeğiştirme
$\theta$	Kiriş Veya Kolonda Meydana Gelen Toplam Elastik Ve Plastik Dönme
$\rho$	Eğrilik Yarıçapı
$\omega$	Sönümlü Frekans

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
ATC	Applied Technology Council
SSSA	Basitleştirilmiş Sıralı Tarama Algoritması
BF	Büyütme Faktörü
DBYYHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007)
DYF	Dinamik Yük Faktörü
FEMA	Federal Emergency Management Agency
SRSS	Karelerin Toplamının Karekökü
ABS	Mutlak Değerlerin Toplamı
PSA	Pseudo Spectral Acceleration
SSA	Sıralı Arama Algoritması
CQC	Tam Karesel Birleştirme

## 1. GİRİŞ

Depremler, yer kabuğunun herhangi bir noktasında ani kırılmalar sonucu oluşan titreşimlerin dalgalar halinde yayılması sonucu meydana gelen doğal afetlerdir. Uzun yıllar boyunca yapılan araştırmalara rağmen, depremin meydana geleceği yerin kesin koordinatlarının ve oluş zamanının tespit edilmesi günümüz teknolojisi ile mümkün değildir. Sadece geçmişte olan deprem istatistiklerine bağlı olarak, yeryüzünün risk haritaları çıkarılmakta ve olası deprem senaryoları türetilmektedir.

Ülkemiz coğrafi konum açısından oldukça aktif bir deprem kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre topraklarımızın yaklaşık 2/3'ü birinci ve ikinci derece deprem bölgelerinde, yani aktif fay hatları üzerinde bulunmaktadır ve Türkiye nüfusunun yaklaşık % 70'i bu bölgelerde yaşamaktadır. Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay Hattı ve Batı Anadolu Fay Hattı ülkemizde geçmişte ciddi can ve mal kayıplarına sebep olmuş ve gelecek için de önemli riskler oluşturan aktif fay hatlarıdır. Son 60 yıl içerisinde yaklaşık 60.000 insan kaybı ve 500.000 konut yıkımı gerçekleşmiştir (Mertol, 2002). Özellikle 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinin ardından ortaya çıkan acı fotoğraf, ülkemizde özellikle bu yıllar öncesinde yapılan yapıların büyük bir kısmının, yürürlükte olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'te (DBYYHY, 2007) öngörülen dayanım şartlarını sağlamayacağı yönündedir.

Dünyada depremlerin en sık görüldüğü ülkeler arasında Amerika ve Japonya ilk sıralarda yer almaktadır. Dolayısıyla bu konuda en yoğun çalışmalar da bu ülkelerde yapılmaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde, 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremleri sonucu oluşan can kayıpları ve ortaya çıkan maddi zarar, depreme dayanıklı yapı tasarımları için bir milat olmuştur ve Applied Technology Council (ATC) ve Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından depreme dayanıklı tasarım yönetmelikleri yayınlanmıştır (ATC 40, FEMA273, FEMA 356). Büyük bütçeli ve alanında uzman kişilerle yapılan çalışmalar, çelik yapılar alanında çelik malzeme ve kaynak türleri, büyük kat ötelemelerini karşılayabilir nitelikteki düğüm noktalarının incelenmesi ve tasarım esaslarının belirlenmesi ve yapıların daha gerçekçi olarak modellenmesi üzerinde yoğunlaşmıştır (Özhendekçi, N., D.,2011).

Bu yönetmeliklerin öncekilerden temel farkı, yapılarda deprem etkisi ile oluşan yer değiştirmelere ve şekil değiştirmelere bağlı olarak tanımlanan daha gerçekçi performans kriterlerini esas almalarıdır (Küleççi, 2010).

Modern yaklaşımlardan önce inşa edilmiş olan yapıların büyük bir kısmında taşıyıcı sistem güçlendirmesine ihtiyaç duyulacağı açıktır. En genel anlamda güçlendirmenin tarifi, yapısal bir elemanın ya da tüm taşıyıcı sistemin daha üst bir güvenlik seviyesine çıkartılması olarak yapılabilir. Geleneksel yöntemlerle yapıların güçlendirilmesi, taşıyıcı sistem rijitliğinin artırılması ya da eleman sünekliğinin artırılması suretiyle deformasyonların sınırlandırılması şeklindedir. Bu durumda yapının periyodu azalmakta ve spektral ivmeler ve buna bağlı olarak taban kesme kuvvetleri artmaktadır. Tüm sistemin rijitleştirilmesine alternatif olarak son yıllarda güçlendirme yöntemi olarak sismik izolasyon sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Böylelikle sistemde toplam sönüm miktarı artırılmış olur (Celep ve Kumbasar, 2004). Sismik izolatörler, ilave edildikleri sistemde, dinamik etkiler sonucu ortaya çıkan enerjinin bir kısmını ya da tümünü kendi içlerinde absorbe etmek suretiyle yapının sismik performansına önemli katkı sağlamaktadırlar.

Her yapının dinamik etkilerle oluşan enerjiyi sönümlene yeteneği vardır. Bu sönümlene içsel gerilmeler, sürtünmeler ya da çatlamlar sonucu ortaya çıkar ve yapıdan yapıya değişkenlik gösterir. Bu sönümlenenin yetersiz olduğu durumlarda sönüm elemanları ilave edilerek sönüm oranı artırılır. Sismik kontrol sistemleri aktif, pasif ve hibrit kontrolü içermektedir. Aktif kontrol sistemi bir dış kaynaktan yapıya kuvvet uygulanması ile çalışır. Yapı üzerine gelen dinamik etkileri tespit eden dış kaynak karşı kuvvetler üretmek yapıyı korur. Pasif kontrol sistemlerinde ise dinamik etkiler sonucu sisteme giren enerjinin bir kısmı ya da tamamı, kontrol elemanı tarafından sönümlenerek yapısal performans artışı sağlanır. Hibrit sistemler ise bu iki sistemin bileşkesinden oluşmaktadır fakat hesap ve uygulama zorlukları bakımından fazla tercih edilmezler.

Pasif kontrol sistemlerinden olan viskoz sönümleyiciler, yapıları deprem, rüzgâr vb. tekrarlı (dinamik) yüklerden korurlar. İlk uygulamaları Amerika Birleşik Devletleri ordusunda ve havacılık uygulamalarında görülür. 90'lı yılların başında viskoz sıvı ihtiva eden sönüm elemanlarının, binaları, köprüleri ve diğer yapıları titreşim etkisinden koruyabileceği anlaşılmıştır. Viskoz sönümleyiciler yapısal verimi arttırmak için alternatif



bir yol sunarlar. Yapıya gelen dinamik bir kuvvetin neredeyse tüm enerjisini, yapı neredeyse tamamen ayakta kalacak şekilde absorbe ederler ve yapısal hareketlere direnen bir kuvvet sağlarlar. Yapısal kuvvetler ve sönümleyici kuvvetleri arasında  $90^0$ 'lık bir faz farkı bulunmasından dolayı yapının doğal titreşim periyodunu değiştirmezler (Constantinou vd., 1998).

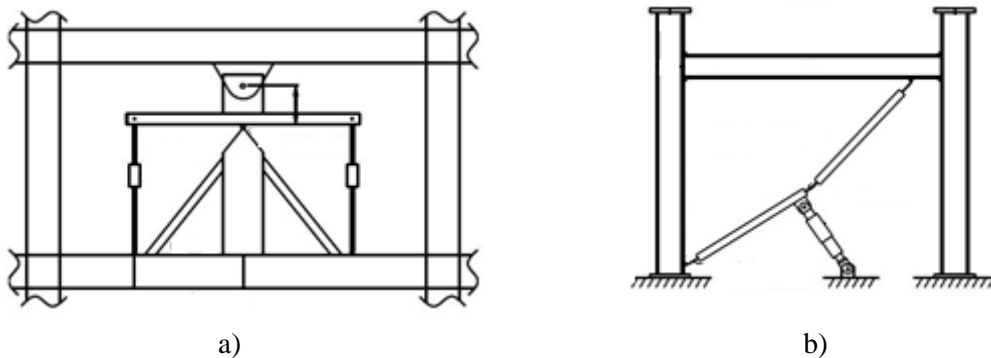
Bu çalışmada, çeşitli yapısal düzensizlikleri ve süreksizlikleri bulunan çelik çerçevelere ve üç boyutlu modellere yapılan viskoz sönümleyici ilavesinin, sistemlerin sismik performansına ne derece katkı sağladığı ortaya konmaya çalışılmıştır. Tezde ilk olarak yapı dinamiğinin genel ilkelerinden söz edilmiştir. Yapılarda enerji ve sönüm yaklaşımlarından bahsedilerek viskoz sönümleyiciler hakkında bilgi verilmiştir. Yeni önerilen bağlantı konfigürasyonu hakkında bilgi verilerek, kat yatay hareketine bağlı olarak sönümleyicinin yaptığı eksenel hareket matematiksel olarak tanımlanmış ve seçilen konfigürasyona uygun olan büyütme katsayısının elde edilebileceği grafikler sunulmuştur. Daha sonra çalışmada kullanılan yöntemlerden bahsedilmiş, plastikleşme ve çelik yapıların tasarımı konularına değinilmiştir. Çalışmanın son kısmında dört adet uygulama bulunmaktadır. Birinci uygulamada farklı konfigürasyona (bağlanma geometrisine) sahip viskoz sönümleyiciler incelenmiştir. Bunun için 5 ve 11 katlı çelik çerçeveler tasarlanarak diyagonal, alt dirsek, üst dirsek ve yeni önerilen konfigürasyona sahip sönümleyiciler, sırayla çerçevelere ilave edilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece konfigürasyon farklılıklarının sismik performans üzerinde ne gibi etkiler ve davranış farklılıkları ortaya çıkardığı, bununla beraber yeni önerilen konfigürasyonun diyagonal ve dirsek tipi sönümleyicilere oranla nasıl bir performans gösterdiği ortaya konulmaya çalışılmıştır. İkinci uygulamada burulma düzensizliği olan planda düzensiz (asimetrik) U ve L şeklinde iki adet çelik yapı modeli tasarlanarak, bu modeller zaman tanım alanında çözümlenmiş ve sonuçlar sönümleyicisiz ve sönümleyici ilave edilmiş durumlar için karşılaştırılmıştır. Böylelikle viskoz sönümleyicilerin burulma düzensizliği görülen yapılarda ne gibi davranış değişiklikleri meydana getirebileceği araştırılmıştır. Üçüncü uygulamada, farklı geri çekilme düzensizliği olan çelik çerçeve sistemlerde optimum sönümleyici dağılımı incelenmiştir. Geri çekilmeden kaynaklanan gerilme yığılmaları bulunan on katlı çelik çerçevelere viskoz sönümleyiciler ilave edilmiştir. Uygun sönümleyici dağılımının belirlenebilmesi için basitleştirilmiş sıralı tarama algoritması kullanılmıştır. Düşeyde üniform dağılım (her kata bir adet sönümleyici) sonucu

elde edilen sonuçlar ile optimum dağılıma göre elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dördüncü uygulamada ise viskoz sönümleyici ilave edilmiş kısmi dolgu duvarlı çelik çerçevelerin sismik performans analizi yapılmıştır. Yedi katlı çelik bir çerçeve üzerinde farklı dolgu duvar dağılımları ile oluşturulan yapısal süreksizlik etkileri, viskoz sönümleyici ilavesi ile ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. En son bölümde ise sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Constantinou ve Symans 1992 yılında yaptıkları çalışmada, çeşitli dinamik girdiler kullanarak bir dizi deney yapmışlar ve viskoz sönümleyicilerin mekanik karakterini ortaya koyup, davranışı tanımlayan bir matematik model geliştirmişlerdir. Bununla beraber farklı sıcaklık ve frekans değerleri altında sönümleyicilerin davranışını incelemişlerdir. Deneysel çalışmada, bir katlı ve üç katlı çelik yapılar kullanılmışlar, sönümleyicisiz ve sönümleyici ilave edilmiş durumlar için bir dizi analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde sönümleyicilerin kat deplasmanlarını ve kesme kuvvetlerini azalttığı görülmüş olup aynı zamanda deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması mümkün olmuştur.

Rijit yapı sistemlerinde görelî kat ötelenmeleri düşük olduğundan, klasik sönümleyici konfigürasyonları bu tür yapılarda çok verimli olmamaktadır. Bu sebeple Constantinou ve Taylor (1997) düşük kat ötelenmelerinden büyük sönüm kuvvetlerinin elde edildiği mekanik dirsek tipi sönümleyiciler üzerinde çalışmıştır. Bu örneklerin ilki Şekil 2.1.a'da görülen ve Hibino vd. (1989) tarafından geliştirilen Dreamy sistemidir



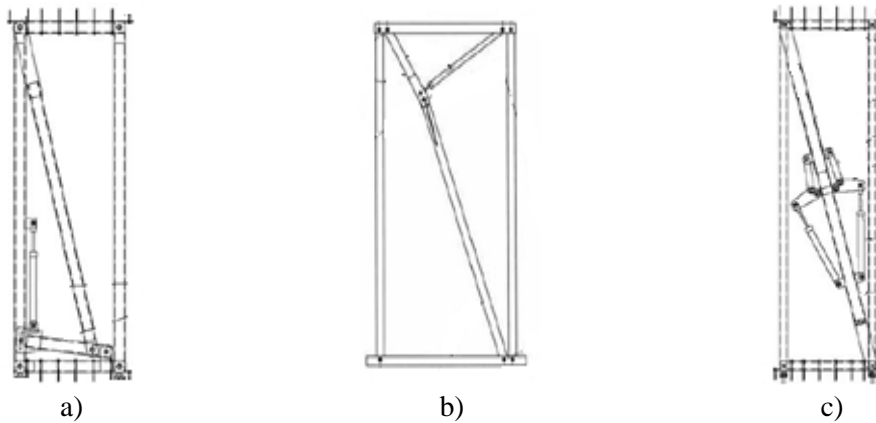
Şekil 2.1. Sönümleyici konfigürasyonları a) Dreamy b) Dirsek tipi (Constantinou ve Taylor, 1997)

Bu sistemin alışlagelen sistemlerden farkı, yatay harekete oranla fazla hareket etmesi ve aynı zamanda montaj noktalarına uygulanan kuvvetlerin daha az olmasıdır. Bununla beraber bu sistemin bina ve köprü türü yapılarda kullanılmasının bazı sıkıntıları vardır. Konfigürasyon elemanlarının yeterince rijit olmaması halinde, burulma etkilerine maruz kalarak muhtemelen deforme olmasıdır. Böyle bir durumda tasarım iyileşmesi elde edilemez. Mekanizmanın burulma etkilerinden etkilenmemesi için mesnet noktalarının

birbiriyle uyum içinde olması gereklidir ki bu da maliyeti yükselten bir unsurdur. Dirsek tipi sönümleyicilerde sönümleyicinin bir ucu mafsallı birleşimine diğer ucu ise bina çerçevesine mafsallı olarak tutturulur. Bina çerçevesinde oluşan ötelenme, sönümleyicide daha büyük bir ötelenmeye sebebiyet verir. Bu oran dört kata kadar çıkabilir.

Deneysel çalışma 32.000 lb'lik, iki viskoz sönümleyici ve iki dirsek elemanı içeren bir test çerçevesi üzerinde yapılmıştır. Oldukça rijit davranış gösteren çerçevenin doğal titreşim frekansı 3,2 Hz'dir. Tüm deneysel çalışma için çerçevenin yatay deplasmanı 1,25 cm mertebesinde düşük tutulmuştur. Çerçeve hem dalga biçimi hem de yoğunluğu bakımından farklı titreşimlere tabi tutulmuştur yapının dikey yüksekliğinin sadece %5'i kadar bir yatay deplasman olmasına rağmen mükemmel bir sönüm performansı sağlanmıştır. Mafsallar ve bağlantı elemanları düzlem dışı sapma göstermemişlerdir.

Constantinou ve Symans (1998) doğrusal ve doğrusal olmayan sönümleyici ihtiva eden idealize edilmiş tek katlı bir yapı üzerinde çalışmışlardır. Optimum sönümleyici üssünü belirlemek için sisteme bir ilk deplasman verilmiş ve tepkiler kaydedilmiştir. Kaydedilen tepkilere bakıldığında, sönüm elemanına gelen kuvveti tanımlayan hıza bağlı üssün ( $\alpha$ ), 0,5 olarak seçilmesi 1 veya 2 olarak seçilmesinden daha olumlu sonuç vermiştir.



Şekil 2.2 Viskoz sönümleyici paneller (a) Geniş kapasiteli döner dirsek panel (dört kollu) (b) Üst dirsek tipi panel (c) Kol lineer boru panel (Symans vd., 2015)

Symans vd. (2015) ahşap taşıyıcı sistemlerin performansının viskoz sönümleyici ilavesi ile artırılması üzerine çalışmışlardır. Bu eskiyen ahşap binaların güçlendirilmesi için ekonomik bir çözümdür. Üzerinde çalışılan üç adet panel tipi viskoz sönümleyici

Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Döner dirsek tipi panel, verilen bir frekans ve hareket genliği için en büyük miktarda kesme kuvveti sağlayacağından büyük binalarda kullanım için uygundur.

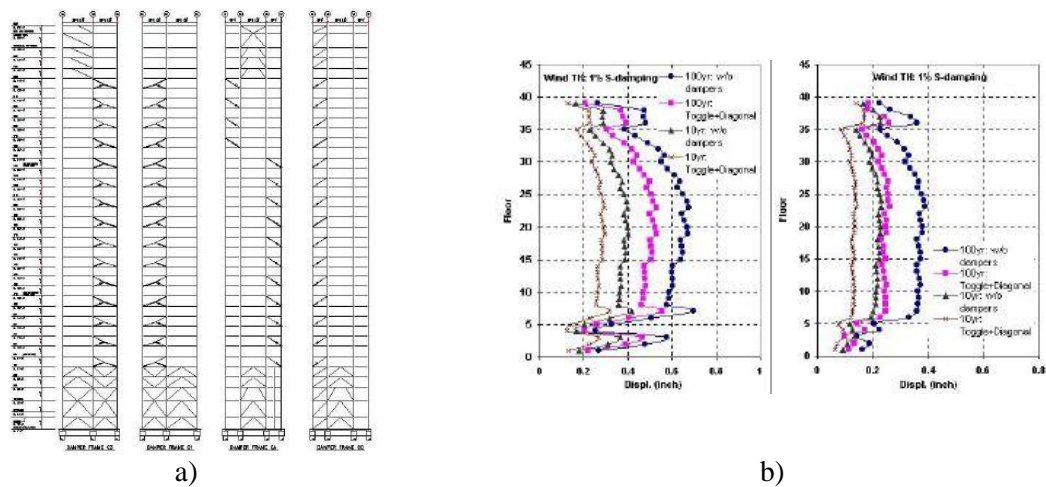
Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, panellerdeki sabitlenmiş bağlantılar bir mekanizma gibi davranırlar ve takılı olan sönümleyici yanal harekete direnç sağlar. Panellerin sönümlenme kabiliyeti geometrilerine göre değişim gösterir. Örneğin üst dirsek tipi için büyütme faktörü yanal hareketin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olup bu değer yaklaşık 1,6’dır. Bu bağlantı tipi hâlihazırda birçok yapıda kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada ahşap taşıyıcı sistemli ve yumuşak kat düzensizliğine sahip dört katlı bir model kullanılmıştır. Üst dirsek tipi panele ek olarak diğer iki panel de sayısal simülasyonlar ile test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte farklı en-boy oranına sahip modeller de nümerik olarak incelenmiştir. Viskoz sönümleyici paneller ahşap taşıyıcı sistemli yapının sismik direncini etkili şekilde arttırmıştır. Sönümleyicisiz durumda 50 yılda görülme olasılığı %90 olan DBE (Design Basis Earthquake) depremi için can güvenliği seviyesi sağlanırken (en büyük kat ötelenme oranı  $< 0,02$ ), 50 yılda görülme olasılığı %2 olan MCE (Maximum Considered Earthquake) depremi için göçme meydana gelmiştir. Yukarıda bahsi geçen paneller ahşap sisteme ilave edildiğinde, farklı genişlik ve yüksekli oranlarının hepsi için (2:8, 3:8 ve 4:8), DBE depreminde hemen kullanım seviyesi sağlanırken (en büyük kat ötelenme oranı  $< 0,01$ ), MCE depreminde can güvenliği seviyesi (en büyük kat ötelenme oranı  $< 0,02$ ) sağlanmıştır. Sönümleyicilerin etkinliği konfigürasyon ve kat en-boy oranı ile yakından ilgilidir. Zemin kat ötelenmesi bakımından en etkili konfigürasyon kol lineer boru panel iken en az etkili olan ise üst dirsek tipi panel olmuştur. Büyütme faktörünün çok büyük tutulması, genel anlamda hasarın zemin kattan üst katlara taşınmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak tüm sönümleyici panelleri sönümleyicisiz duruma göre olumlu sonuç vermiştir.

McNamara ve Taylor (2003) yüksek yapılarda rüzgâr kaynaklı oluşan titreşimlerin viskoz sönümleyiciler ilave edilerek azaltılması üzerine çalışmışlardır. Sönümleyici sistem tanımlanarak dizayn kriterleri üzerinde durulmuş ve sonra maliyet araştırması yapılmıştır. 39 katlı model geleneksel rüzgâr yükü yönetmeliği ile dizayn edilmiş ve model rüzgâr tribününde testlere tabi tutulmuştur. Testler sonucu yapıda kabul edilemeyecek derecede yüksek kat ivme değerleri görülmüştür. Bu değerler ofis binaları için öngörülenlerin yaklaşık iki katıdır. Sönümleyicilerin yerleştirilmesindeki temel amaç düşük kat ötelenmelerinde

yüksek bir sönüm kuvveti sağlayarak rüzgâr kaynaklı salınımların düşürülmesidir. Sönümleyici maliyetinin ve adedinin düşürülmesi için büyütme faktörü yüksek olan dirsek tipi sönüm elemanları kullanılmıştır.

Bir yapı ne kadar uzun, hafif ve narin olursa yaygın rüzgâr olayları sırasında nispeten üst katların ivmelenmesi daha olası hale gelir. İnsanlar hız ve yer değişimine göre ivmelenmeye karşı daha hassastırlar. Apartman ya da otellerde 5 mg'ye kadar normal görülen ivmelenme eşik değeri 20 mg 'ye ulaştığında oldukça can sıkıcıdır. Ofis binalarında ise 10 yılda bir görülebilecek yer hareketi için bu değer 30 mg' ye kadar kabul edilebilir. Bu yapı için kullanılan dirsek tipi sönümleyiciler 100 yılda bir görülebilecek rüzgâr yükleri için dizayn edilmiştir.

Binanın ilk yedi katında ve 34. kat üzerinde diyagonal tip, diğer katlarda ise dirsek tipi sönümleyiciler kullanılmıştır. Bina tipik bir moment-çerçeve-tüp sistem şeklinde tasarlanmıştır. Bina oturma alanı 2000 m<sup>2</sup> ve toplam ağırlığı 62.000 ton 'dur.



Şekil 2.3 39 katlı yapıya ait a) Sönümleyici konumlandırılması b) Rüzgâr yüküne bağlı kat ötelenme değerleri

Yapısal rüzgâr yüklerini ve rüzgâr kaynaklı ivmelerin hesaplanabilmesi için 1/400 ölçekli model ve gerçek ölçekte 500 m etrafında bulunan yapılar rüzgâr tüneline yerleştirilmiştir. Rüzgâr yüklemesi neticesinde oluşan eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri direk olarak model üzerinden alınmış ve bu bilgiler kütle, mod şekilleri vb. yapısal özelliklerle birleştirilerek gerçek yapının dinamik karakteri hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Ofis binası üzerinde Ulusal Yapı Yasası (BOCA, 1996) rüzgâr ve sismik etki

karşılaştırması neticesinde rüzgâr etkilerinin daha baskın olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde sönümleyici ilavesi ile binanın dinamik karakterlerinde (taban kesme kuvvetleri, kat ivme değerleri vb.) %20 - 30 arasında bir artış elde edilmiştir.

Güler ve Piroğlu (2015) üç katlı Seattle yapısı üzerinde viskoz sönümleyiciler ile güçlendirme uygulaması yapmışlardır. Öncelikle mevcut yapı üzerinde doğrusal olmayan performans analizleri yapılmıştır. Çalışmada plastik mafsallık kabulü ile deformasyonların kesit uç noktalarında oluştuğu kabul edilmiştir. Mafsallar iki doğrultulu dönme grafikleri ile tanımlanmış ve akma sonrası %3 pekleşme olduğu kabul edilmiştir. Viskoz sönümleyici ilave edilen yapıda içsel sönüm %2 olarak alınmış ve zemin yapısı etkileşimi ihmal edilmiştir. Güçlendirme yapılırken hedef 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için göreceli kat ötelenmelerinin %2 mertebesini aşmaması olarak belirlenmiştir. Her bir kat rijitliğine, istenilen sönüm derecesine ve yapı ağırlığına bağlı olarak bulunan sönümleyici katsayıları kullanılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan sönümleyiciler için hesaplar ayrı ayrı incelenmiş ve bu çalışmada doğrusal olmayan sönümleyicilerin daha iyi performans sağladığı ortaya konmuştur.

Garcia (2001), sönümleyici yerleşiminde kullanılan optimizasyon tekniklerinin, her katta farklı büyüklükte sönümleyici kullanılması sebebiyle yeterince basit ve uygulanabilir olmadığı düşüncesi ile yeni bir yöntem geliştirmiştir. SSSA (basitleştirilmiş sıralı tarama algoritması) adını verdiği yöntem Zhang ve Soong'un (1992) ortaya koyduğu sıralı tarama algoritmasının geliştirilmiş halidir. Yeni yöntemde sönümleyiciler en büyük kat ötelenmesinin ya da kat hızının görüldüğü seviyeye (optimum yerleşim indisinin en büyük olduğu kat seviyesi) birer birer konularak işlemler tekrar edilir. Yapılan uygulama neticesinde, bu metodun bilinen ve karmaşık eski metotlar ile karşılaştırıldığında, uygun yer ivmesi seçildiğinde ve sistem doğrusal davranış gösterdiği limitler içinde kaldığında olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Garcia ve Soong (2002), farklı titreşim periyodu, kat adedi ve sönümleyici dağılımı olan binalara doğrusal sönümleyiciler ilave etmiş ve yer ivmeleri altında analiz etmişlerdir. SSSA metodu ile özellikle düşük ve orta katlı binalar için, kat adedinin 1,5-2 katı kadar sönümleyici kullanılması durumunda oldukça verimli sonuçlar alındığını ve elde edilen

verimin kullanılan yer hareketinin karakteri ile yakından ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Leu ve Chang (2011), iki adet on katlı ve bir adet yirmi katlı bina üzerinde optimum viskoz sönümleyici dağılımı gerçekleştiren bir yaklaşım geliştirmişler ve sonuçları SSSA metodu ile karşılaştırmışlardır. Kat deplasmanları doğrusal olmayan analizler ile bulunmuştur. En büyük kat deplasman oranının olduğu kata, en küçük deplasman oranının bulunduğu kattaki sönümleyici kaydırılmak suretiyle işlemler istenen kriter sağlanıncaya kadar devam ettirilmiştir. İki adet yer ivmesi ve iki adet doğrusal olmayan sönümleyici üs katsayısı kullanılmıştır. Çalışma neticesinde SSSA yöntemine göre daha az analiz ile sonuca ulaşılmış ve doğrusal olmayan sönümleyici yerleşimlerinde doğrusal olanlara göre daha büyük verim alınmıştır.

Goel (1998), tek katlı, lineer elastik ve asimetric planlı sistemlerde viskoz sönümleyici ilavesinin sismik dayanıma etkilerini araştırmıştır. Simetrik sistemlerle mukayese edilecek olursa, asimetric sistemler yatay hareketler etkisinde daha büyük deformasyona uğrarlar. Simetrik sistemlerde viskoz sönümleyici ilavesinin deformasyonları azalttığı bilinmektedir. İlk olarak karakteristik sönümleyici parametreleri ve planda dağılımı belirlenmiştir. Daha sonra sönüm oranı, sönümleyici ve sistem arasındaki eksantirisite ve dönme yarıçapı parametrelerine bağlı olarak sistem incelenmiştir. Sonuçta, asimetric sistem deformasyonlarının sadece sönümleyici ilavesi ile (rijitlik ve kütle değerlerinde değişiklik olmaksızın) simetrik bir sisteme eşit ya da daha düşük bir seviyeye indirgenebileceği belirtilmiştir.

Landi vd. (2013), planda asimetric binaların viskoz sönümleyicilerle rehabilitasyonu üzerine çalışmışlardır. Planda simetrik ve asimetric iki betonarme yapıya sönümleyici ilave ederek, ortaya çıkan durumları karşılaştırmışlardır. Kullanılan beş adet yer ivmesi, dizayn spektrumunda yapının birinci periyoduna karşılık gelen değerle aynı olacak şekilde ölçeklenmiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizler neticesinde en büyük sönümleyici kuvveti ve katlar arası deplasman değerleri elde edilmiştir. Yüksek mod katkılarının dikkate alınmasıyla ve ötelenme modu yerine dönme modunun dikkate alınmasıyla daha gerçekçi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.



Mansoori ve Moghadam (2009), asimetric planlı çelik çerçevelerde viskoz sönümleyici kullanarak yerdeğiştirme ve kat ivmesi değerlerinin eş zamanlı kontrolünün olabirliğini araştırmışlardır. Farklı eksantirisiteye sahip modeller üzerinde klasik olmayan doğrusal modal analizler ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Sonuç olarak sönümleyici merkezini kütle merkezinden rijitlik merkezine doğru kaydırınca burulma etkileri azalıp, yanal ötelenme etkilerinin arttığı ve yanal deplasman ve burulma tesirlerini kontrol eden optimum sönümleyici eksantirisitesinin, ağırlık merkezine göre rijitlik merkezinin karşı tarafında olması gerektiği ifade edilmiştir.

Chopra ve Lin (2001), simetrik olmayan yapıların simetrik olanlarla karşılaştırıldığında deprem kaynaklı hasarlara karşı daha savunmasız olduklarını ve bu hasarların viskoz sönümleyiciler ilave edilerek azaltılabileceğini belirtmişlerdir. Tek katlı, doğrusal elastik ve asimetric bir yapıyı ele alarak viskoz sönümleyicilerin plan üzerinde dağılımlarının etkisini araştırmışlardır. İlk olarak sönümleyicilere katkı sağlayacak olan ve kabul edilen deprem doğrultusuna dik bir parametre geliştirilmiştir. Ardından sönüm parametreleri ve sönümleyici dağılımı arasında bir ilişki belirlenmiştir. Modal sönüm oranlarına bağılı olarak, plan üzerinde sönümleyici dağılımının etkilerini tahmin etmeye çalışmışlar ve bunu bilgisayar programı ile birleştirilmiştir. Sönümleyicilerin asimetric olarak dağılımı, simetrik dağılıma nispeten daha etkili sonuçlar vermiştir.

Viskoz sönümleyicilerin ilk gelişimleri, çerçevelere diyagonal bağlantı şeklinde olmuştur. Daha sonra sismik enerji sönüm kabiliyeti daha yüksek olan Chevron tipi bağlantı kofigürasyonu geliştirilmiştir. Yüksek katlı binalarda deprem ve rüzgâr yüklerini sönümlemek için bu bağlantı geometrileri alt ve üst dirsek olarak genişletilmiştir. Bo ve Xingwen (2008), bağlantıları direk giriş kolon birleşim (düğüm) noktasına yapılan gelişmiş tip dirsek tipi sönümleyiciler üzerinde araştırma yapmışlar ve bir bina üzerine ilave edilen gelişmiş viskoz sönümleyiciler tarafından sağlanan eşdeğer viskoz sönüm oranını tahmin etmeye çalışmışlardır. Uygulamada Çin tasarım spektrumuna dayalı basitleştirilmiş bir yöntem kullanılmıştır. Performans hedefini sağlamak için sönümleyici katsayıları bina yüksekliği boyunca rölafif modal deplasmanlar ile orantılı olacak şekilde dağıtılmıştır. Sonuç olarak, gelişmiş dirsek tipi sönümleyicilerin, konvansiyonel dirsek tipi ve diyagonal sönümleyicilere nispeten kat yerdeğiştirmeleri ve kat kesme kuvveti taleplerinde düşüş sağladığını gözlemlenmiştir.

Constantinou vd. (2001), özellikle düşük deplasmanlı uygulamalarda etkili biçimde kullanılabilir, etkisi artırılmış üç adet dirsek tipi sönümleyici konfigürasyonu geliştirmişlerdir. Bu konfigürasyonlarının faydasını anlayabilmek için, büyük ölçekli modeller sarsma tablası deneyine maruz bırakılmıştır. Daha küçük boyutlu damper kullanılmasına rağmen, deneysel sonuçlar sönüm oranında etkili bir artış ve yapının sismik talebinde önemli bir azalış olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar ile analitik tahminler de birbiriyle tutarlılık göstermiştir.

Zhao ve Chan (2015), dirsek tipi sönümleyici ilave edilen çelik yapılarda ön geometrik dizayn adımları üzerine yoğunlaşmışlardır. İlk olarak bağlantı geometrisine ve açılara göre sönümleyicilerin tesir derecelerini gösteren grafikler elde edilmiştir. Büyütme faktörleri bu grafiklerden kolayca okunabilir. İki adet çok katlı çerçeveye sönümleyici ilave edilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar, diyagonal tipe oranla dirsek tipi bağlantı şekli kullanılmasının, en büyük kat ötelenmesi değerlerinde üç katlı yapıda %21, altı katlı yapıda ise %26'ya kadar iyileşme sağladığı şeklindedir. Yine yer sarsıntısı sonucu ortaya çıkan enerjinin %74'ü sönümleyiciler tarafından harcanmıştır.

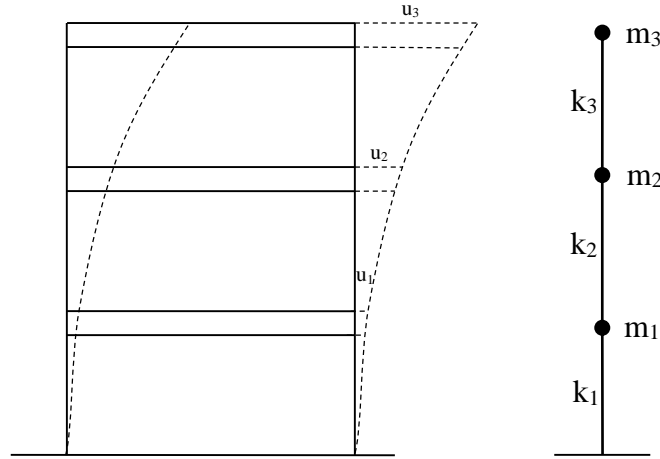
Mociran ve Pantel (2009), çelik çerçevelerin sismik tepkisini azaltmak için dirsek tipi sönümleyicilerinin etkinliğini araştırmışlardır. Referans olarak seçilen beş katlı ve üç açıklıklı çerçeveye, dirsek tipi doğrusal viskoz sönümleyiciler ilave edilerek farklı sönüm oranları için dinamik analizler yapılmıştır. Sonuç olarak kat kesme, kat ötelenme ve kat yatay ivme değerlerinde iyileşme sağlandığı görülmüştür.

### 3. GENEL BİLGİLER

#### 3.1. Yapı Dinamiği Genel İlkeleri

##### 3.1.1. Titreşim olgusu ve titreşim sistemlerinin ana elemanları

Titreşim, referans bir denge noktası etrafında oluşan salınımdır ve mühendislik problemlerinde mutlaka göz önünde tutulması gereken bir olgudur. Bir sistemin dinamik bir yük altında incelenebilmesi için matematik bir modelle temsil edilmesi gerekir. Sistemin titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için gerekli olan minimum parametre sayısına serbestlik derecesi adı verilir (Celep ve Kumbasar, 2004). Diğer bir anlatımla serbestlik derecesi, sistemde bağımsız olarak yerdeğiştiren kinematik nokta sayısıdır. Yapılar pratikte sürekli olmalarına rağmen, teorik olarak kat kütlelerinin kat seviyelerinde toplanmış olduğu varsayımı ile çok serbestlik dereceli sistemler olarak düşünülebilirler. Böylece sistem parametreleri ayrık ve sonlu sayıdadır. Kiriş ve döşemelerin de sonsuz rijit olduğu ve sadece yanal deplasman yaptığı kabul edilen bir kayma çerçevesi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çok serbestlik dereceli bir kayma çerçevesi

Titreşim yapan sistemlerde belli başlı üç ana elemandan söz edilebilir. Bunlar kütle, yay ve sönüm elemanlarıdır. Kütle elemanı, sistemin kütle ve atalet karakterini tanımlar. Ağırlığın yer ivmesine bölünmesiyle hesap edilir. Sistemdeki kinetik enerjinin depolandığı bölümdür. Kayma çerçevelerinde, sürekli olan sistem idealize edilerek kat seviyelerinde

yoğunlaştırılmış kütleler halinde tanımlanmıştır. Yaylar kütlelerin birbirine bağlanmasını sağlayarak sistemin elastik veya elastik olmayan dengeleyici kuvvetini tanımlamakta kullanılırlar. Sistemde potansiyel enerjinin depo edildiği ortamdır ve bir harekete başlayan sistemi durgun haline geri getiren kuvvetleri temsil ederler. Sönüm elemanları ise, sistemdeki enerji tüketimini tanımlarlar. Viskoz sönümleyiciler hareket enerjisini ısı enerjisine dönüştürürler. “C” viskoz sönüm katsayısının birimi kuvvetle zamanın çarpılıp boyuta bölünmesiyle elde edilir. Kütle yay ve sönüm elemanlarına ait denklemler aşağıdadır.

$$f_t = m\ddot{u}_1 \quad f_k = k(u_2 - u_1) \quad f_c = c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (3.1)$$

### 3.1.2. Yapısal titreşimlerin sınıflandırılması

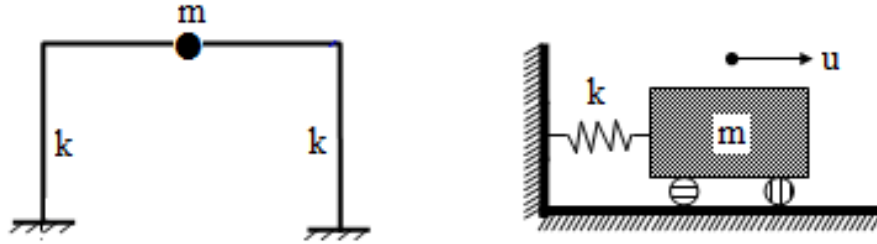
Yapısal titreşimlerin sınıflandırılması, titreşim parametreleri açısından şu şekilde yapılabilir; Sönümsüz serbest titreşimde, sistem serbestlik derecesi doğrultusunda dinamik bir kuvvet etkimemesi durumunda başlangıç etkileri altında serbest titreşim yapar. Sistemin hareket denkleminin çözümü bu etkiler altında yapılır. Sönümsüz zorlanmış titreşim, serbest titreşimden farklı olarak sisteme başlangıçta ya da sonrasında, bir süreliğine ya da sürekli olarak dinamik bir yük etki etmesiyle oluşan titreşimdir. Sönümlü serbest titreşim, başlangıç etkileri altında titreşime başlayan bir sistemin bir müddet salınım yaptıktan sonra denge konumuna gelmesi halidir. Sönümlü zorlanmış titreşim ise titreşim problemlerinin en genel hali olup, başlangıç şartları ve dış yükler altında, sönüm özelliği olan bir sistemin titreşimidir. Bir diğer sınıflandırma biçimi ise serbestlik derecesine göre sınıflandırmadır. Bu açıdan bakılacak olursa titreşimler, tek serbestlik dereceli sistemler, çok serbestlik dereceli sistemler ve sürekli sistemler olarak sınıflandırılabilirler (Polat, 2005).

### 3.1.3. Tek serbestlik dereceli bir sistemin dinamik davranışının incelenmesi

Bir sistemin titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için yeterli parametre sayısı bir ise bu sistem tek serbestlik dereceli olarak isimlendirilmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemlerini yazmak için bir denklem yeterli olmaktadır. Sistemin kütlelerinin tek bir noktada toplanmış olduğu, rijitliğinin de tek bir kolon elemanında toplanmış olduğu varsayımı, hareket denklemlerinin yazımında oldukça pratiklik sağlamaktadır.

### 3.1.3.1. Serbest titreşim

Sistem üzerine etki eden herhangi bir dinamik kuvvet olmaması durumunda, başlangıç koşulları altında sistem serbest titreşim hareketi yapar. Tek serbestlik dereceli sönümsüz bir sistemin model gösterimi Şekil 3.2'deki gibidir.



Şekil 3.2. Toplu kütleli tek serbestlik dereceli sistemler

Herhangi bir zorlamanın ve sönümün olmadığı (ihmal edildiği) tek serbestlik dereceli doğrusal bir sisteme ait genel hareket denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$m \ddot{u}(t) + k u(t) = 0 \quad (3.2)$$

Burada  $m$  sistemin kütlesi,  $k$  rijitliği,  $u(t)$  ve  $\ddot{u}(t)$  sırayla zamana bağlı yerdeğiştirme ve ivme fonksiyonlarıdır. Doğal açısal frekans  $\omega_0$ , kütle ve rijitlik cinsinden Denklem 3.3' deki gibi ifade edilebilir.

$$\omega_0^2 = k/m \quad (3.3)$$

Doğal açısal frekans değeri Denklem 3.4'de yerine konulur ve  $m$ 'ler sadeleştirilir.

$$\ddot{u}(t) + \omega_0^2 u(t) = 0 \quad (3.4)$$

Bu denklemin doğrusal ve homojen bir çözümü vardır ve Denklem 3.5'de verilen dönüşümler yapılmak suretiyle  $C$  ve  $\alpha$  sabitleri elde edilir.

$$u(t) = C e^{\alpha t}, \quad \dot{u}(t) = C \alpha e^{\alpha t}, \quad \ddot{u}(t) = C \alpha^2 e^{\alpha t} \quad (3.5)$$

$$(\alpha^2 + \omega_0^2) C e^{\alpha t} = 0 \quad (3.6)$$

Burada  $C e^{\alpha t}$  çarpanı sıfırdan farklı olması gerektiğinden, parantezin içi sıfıra eşitlenir. Başlangıçta kabul edilen çözümün geçerli olabilmesi için Denklem 3.7'den faydalanılır.

$$\alpha_1 = i\omega_0 \quad \alpha_2 = -i\omega_0 \quad (3.7)$$

Sonuç olarak Denklem 3.8 elde edilir.

$$u(t) = C_{1x} e^{i\omega_0 t} + C_{2x} e^{-i\omega_0 t} \quad (3.8)$$

Trigonometrik ilişkiler için Euler Bağıntısı Denklem 3.9'da görülmektedir.

$$e^{\pm i\omega_0 t} = \cos(\omega_0 t) \pm i \sin(\omega_0 t) \quad (3.9)$$

Bu bağıntı Denklem 3.8'de yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılır ise Denklem 3.10 ve 3.11 elde edilmiş olur.

$$u(t) = C_{1x} (\cos(\omega_0 t) + i \sin(\omega_0 t)) + C_{2x} (\cos(\omega_0 t) - i \sin(\omega_0 t)) \quad (3.10)$$

$$u(t) = (C_{1x} + C_{2x}) \cos(\omega_0 t) + i (C_{1x} - C_{2x}) \sin(\omega_0 t) \quad (3.11)$$

Hareket denklemi aşağıdaki gibi sadeleşir.

$$u(t) = C_1 \cos(\omega_0 t) + C_2 \sin(\omega_0 t) \quad (3.12)$$

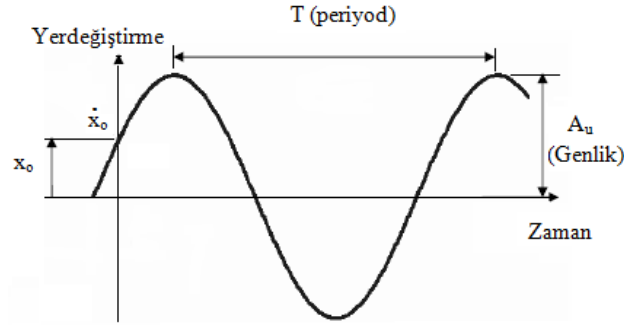
Başlangıç şartları denklemin zamana göre birinci türevi alınmak suretiyle bulunur.

$$\dot{u}(t) = -\omega_0 C_1 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 C_2 \cos(\omega_0 t) \quad (3.13)$$

$$u(0) = C_1 \quad \frac{\dot{u}_0}{\omega_0} = C_2 \quad (3.14)$$

Bu ifadeler Denklem 3.12’de yerine yazılırsa hareket Denklem 3.15 ile ifade edilebilir (Yerlici ve Luş, 2014). Hareketin genlik-zaman grafiği Şekil 3.3’ de verilmiştir.

$$u(t) = u(0) \cos(\omega_0 t) + \frac{\dot{u}_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \quad (3.15)$$



Şekil 3.3. Genlik-zaman grafiği

### 3.1.3.2. Sönümlü titreşim

Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sisteme ait model gösterim şekli ve genel hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = 0 \quad (3.16)$$

Sönümsüz sisteme sönüm bileşeni ilave edilmiştir. Burada  $c$  sönüm katsayısı  $\dot{u}(t)$  ise hıza bağlı fonksiyondur. Hareket denkleminin çözümü için  $u(t) = C e^{\alpha t}$  kabulü yapılır ve zamana bağlı olarak 1. ve 2. türevleri ( $\dot{u}(t) = C \alpha e^{\alpha t}$ ,  $\ddot{u}(t) = C \alpha^2 e^{\alpha t}$ ) alınarak Denklem 3.16’da yerine yazılır ve Denklem 3.17 elde edilir.

$$(m\alpha^2 + c\alpha + k) C e^{\alpha t} = 0 \quad (3.17)$$

Burada  $C e^{\alpha t}$  çarpanı sıfırdan farklı olması gerektiğinden, parantezin içi sıfıra eşitlenir. Gerçek kökler Denklem 3.18’de verilmiştir.

$$\alpha_{1,2} = \frac{-c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega_0^2} \quad (3.18)$$

Burada belirleyici olan bileşen karekök içerisidir ve üç durum söz konusudur. Karekök içindeki ifade sıfırdan büyük ise birbirinden farklı iki gerçel kök vardır. Sıfırdan küçük ise kökler gerçel kısmı karmaşık, sıfıra eşit ise kökler eşit negatif gerçel sayılardır. Kritik sönüm durumunda Denklem 3.18'de karekök içinde verilen ifade sıfıra eşitlenir ve kritik sönüm katsayısı elde edilir.

$$\left(\frac{c_{cr}}{2m}\right)^2 - \omega_0^2 = 0, \quad c_{cr} = 2m\omega_0 \quad (3.19)$$

$\xi = c/c_{cr}$  olduğundan, sonuç olarak bulunan sönüm katsayısı Denklem 3.20'de görülmektedir.

$$c = 2m\omega_0\xi \quad (3.20)$$

Kritik altı sönüm hali için  $c$  sönüm katsayısı için bulunan yeni değerler Denklem 3.18'de yerine yazılır ve gerekli sadeleştirme işlemleri yapılırsa oluşan yeni durum aşağıdaki gibi olur.

$$\alpha_{1,2} = \frac{-2m\omega_0\xi}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{2m\omega_0\xi}{2m}\right)^2 - \omega_0^2} \Rightarrow \alpha_{1,2} = -\omega_0\xi \pm i\omega_0\sqrt{1-\xi^2} \quad (3.21)$$

Sistemin sönümlü frekansı ve doğal frekansı arasında bir ilişki kurularak Denklem 3.21 sadeleştirilir.

$$\omega = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}, \quad \alpha_{1,2} = -\omega_0\xi \pm i\omega \quad (3.22)$$

Denklem 3.22'de bulunan  $\alpha_{1,2}$  köklerine bağlı olarak yazılan hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$u(t) = C_{1x} e^{(-\omega_0\xi + i\omega)t} + C_{2x} e^{(-\omega_0\xi - i\omega)t} = e^{-\omega_0\xi t} (C_{1x} e^{i\omega t} + C_{2x} e^{-i\omega t}) \quad (3.23)$$

Denklem 3.23, tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin çözümünün (Denklem 3.15),  $e^{-\omega_0\xi t}$  sönüm bileşeni ile çarpılmış halidir. Burada doğal açıl frekansın sistemin sönümlü açıl frekansına dönüştüğü göz önünde bulundurulmalıdır.



$$u(t)=e^{-\omega_0 \xi t} [C_1 \cos(\omega t)+C_2 \sin(\omega t)] \quad (3.24)$$

Denklem 3.24'ün zamana göre birinci türevi alınır.

$$\dot{u}(t)=-\omega_0 \xi e^{-\omega_0 \xi t} [C_1 \cos(\omega t)+C_2 \sin(\omega t)]+e^{-\omega_0 \xi t} [-C_1 \omega \sin(\omega t)+C_2 \omega \cos(\omega t)] \quad (3.25)$$

Denklem 3.24 ve 3.25 sıfıra eşitlenerek  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları bulunur.

$$C_1=u(0) \quad C_2=\frac{\dot{u}(0)+\omega_0 \xi u(0)}{\omega} \quad (3.26)$$

Bulunan katsayılarla birlikte Denklem 3.24'te verilen genel hareket denklemi,

$$u(t)=e^{-\omega_0 \xi t} \left[ u(0) \cos(\omega t) + \frac{\dot{u}(0)+\omega_0 \xi u(0)}{\omega} \sin(\omega t) \right] \quad (3.27)$$

şeklini alır. Bu noktada alternatif olarak  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları yerine  $A_u$  ve  $\varphi$  sabitlerine de geçilebilir.  $\varphi$  başlangıç faz açısını göstermektedir.

$$C_1=A_u \sin(\varphi) \quad C_2=A_u \cos(\varphi) \quad A_u^2=C_1^2+C_2^2 \quad (3.28)$$

Denklem 3.28'deki ifadeler Denklem 3.27'de yerine yazılır.

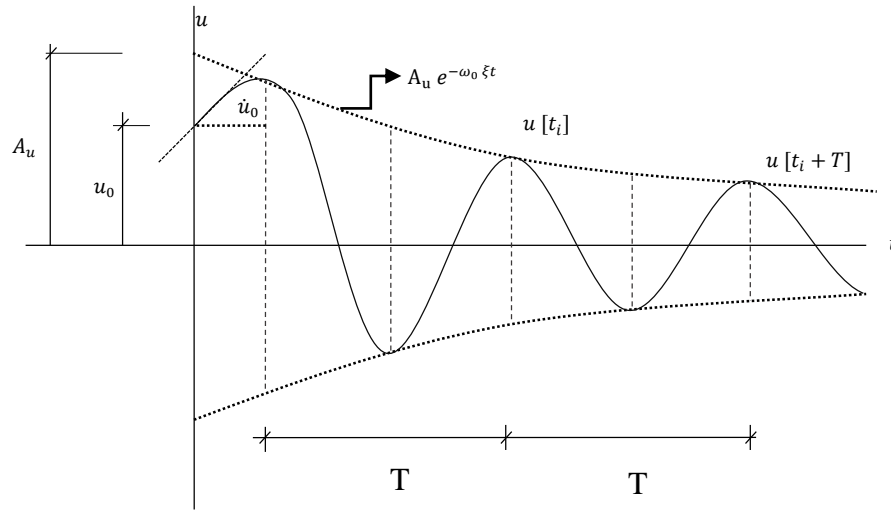
$$u(t)=e^{-\omega_0 \xi t} [A_u \sin\varphi \cos(\omega t)+A_u \cos\varphi \sin(\omega t)] \quad (3.29)$$

Trigonometrik açılım yardımıyla Denklem 3.29 sadeleştirilir ve nihai durumda Denklem 3.30 elde edilmiş olur (Yerlici ve Luş, 2014).

$$u(t)=e^{-\omega_0 \xi t} A_u \sin(\varphi+\omega t) \quad (3.30)$$

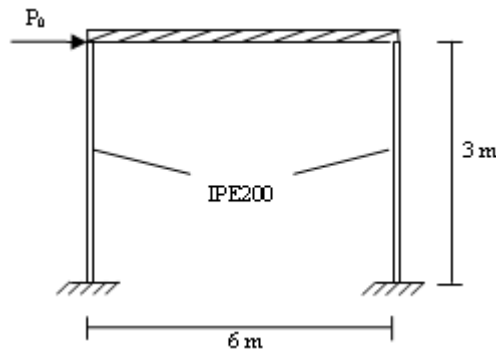
$$u(t)=e^{-\omega_0 \xi t} \sqrt{u(0)^2 + \left( \frac{\dot{u}(0)+\omega_0 \xi u(0)}{\omega} \right)^2} \sin \left[ \tan^{-1} \left[ \frac{u(0) \omega}{\dot{u}(0)+\xi \omega u(0)} \right] + \omega t \right] \quad (3.31)$$

Şekil 3.4'de Denklem 3.31 yardımıyla bulunan, tek serbestlik dereceli sönümlü sisteme ait yerdeğiştirme-zaman grafiği görülmektedir.



Şekil 3.4. T.s.d. sönümlü sistem yerdeğiştirme-zaman grafiği

### **3.1.3.3. Tek serbestlik dereceli sistem serbest titreşim uygulama**



Şekil 3.5. T.s.d. çelik çerçeve

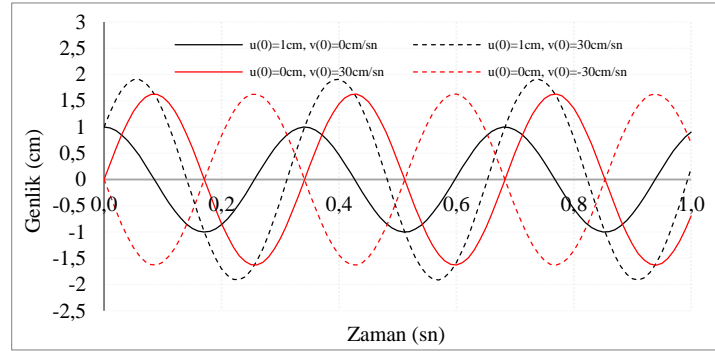
Ağırlığı 100 kN olan tek serbestlik dereceli çelik çerçevenin çözümlenmesi yapılacaktır (Şekil 3.5). Çelik elastisite modülü ( $E_c$ )  $2.10^8$  kN/m<sup>2</sup>, IPE200 atalet momenti ( $I_k$ ) 0,01943 m<sup>4</sup>, bina toplam ağırlığı ( $W$ ) 100 kN, hareketli yük katılım katsayısı ( $n$ ) 0,3, etkin yer ivme katsayısı ( $A_0$ ) 0,4, yerel zemin sınıfı periyotları ( $Z_3/T_1 - T_2$ ) 0,15-0,6 sn, taşıyıcı sistem davranış katsayısı ( $R_a$ ) 6, bina önem katsayısı ( $I$ ) 1.

$$m_i = \frac{w_i}{g} = \frac{100 \text{ kN}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{sn}^2}} = 10,19 \frac{\text{kNsn}^2}{\text{m}} \quad (3.32)$$

$$k=2 \frac{12EI}{l^3}=2 \frac{12*2.10^8*1.943 \cdot 10^{-3}}{3^3}=3454 \text{ kN/m} \quad (3.33)$$

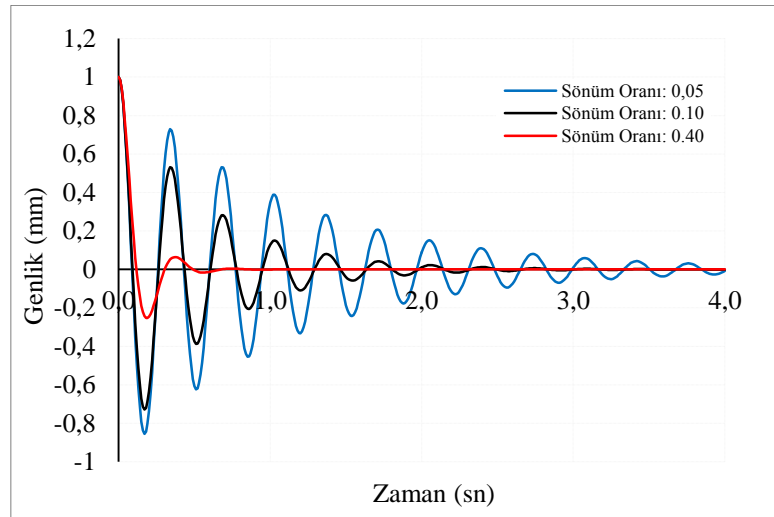
$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{3454*9,81}{100}}=18,41 \text{ rad/sn} \quad (3.34)$$

$$u(t)=u(0) \cos(\omega_0 t)+\frac{\dot{u}_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \quad (3.35)$$



Şekil 3.6. T.s.d. sönümsüz sistem deplasman grafiği (serbest titreşim)

Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistem deplasman grafiği Şekil 3.6' da sönümlü sistem deplasman grafiği ise Şekil 3.7' de verilmiştir. Sönümlü hale ait genel hareket denklemi 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.7. T.s.d. sönümlü sistem deplasman grafiği (serbest titreşim)

$$u(t)=e^{-\omega_0 \xi t} \sqrt{u(0)^2+\left(\frac{\dot{u}(0)+\omega_0 \xi u(0)}{\omega}\right)^2} \sin\left[\tan^{-1}\left[\frac{u(0) \omega}{\dot{u}(0)+\xi \omega u(0)}\right]+\omega t\right] \quad (3.36)$$

### 3.1.3.4. Zorlanmış titreşim (harmonik yük altında çözümleme)

Tek serbestlik dereceli sönümsüz bir sisteme sinüzoidal bir kuvvetin tesir ettiği düşünülürse, bu hareketin denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$m \ddot{u}(t) + k u(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (3.37)$$

Burada  $f_0$  zorlama genliği,  $\sin(\omega t)$  zorlama frekansı,  $\omega_0$  doğal frekans ve  $\omega$  zorlanmış frekanstır. Bu denklemin çözümü, denklemin sol tarafının sifıra eşitlenmesiyle elde edilecek ifadenin çözümüne (homojen çözüm) denklemin sağ tarafındaki kuvvet ifadesinin özel çözümünün eklenmesi ile bulunabilir. Özel çözüm için  $f_0/m = U$  olarak kabul edilir.

$$\ddot{u}(t) + \omega_0^2 u(t) = U \sin(\omega t) \quad (3.38)$$

Denklem 3.38'in sağ tarafı  $u(t)$  olarak düşünüldüğünde, bu ifadenin zamana göre birinci ve ikinci türevleri alınır ve yine Denklem 3.38'de yerlerine koyulup sadeleştirilir.

$$u(t) = U \sin(\omega t) \quad \dot{u}(t) = \omega U \cos(\omega t) \quad \ddot{u}(t) = -\omega^2 U \sin(\omega t) \quad (3.39)$$

$$-\omega^2 U \sin(\omega t) + \omega_0^2 U \sin(\omega t) = \frac{f_0}{m} \sin(\omega t) \Rightarrow -\omega^2 U + \omega_0^2 U = \frac{f_0}{m} \quad (3.40)$$

Denklem 3.40  $\omega_0^2$  ile bölünür ve bir  $r$  katsayısı tanımlanırsa, oluşacak yeni denklem aşağıdadır.

$$\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) U = \frac{f_0}{m \omega_0^2} \quad r^2 = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \quad \Rightarrow \quad U = \frac{f_0}{k(1-r^2)} \quad (3.41)$$

Bu durumda Denklem 3.37'nin genel çözümü, homojen ve özel çözümün birlikte yazılmasıyla Denklem 3.42'de verilmiştir.

$$u(t) = C_1 \cos(\omega_0 t) + C_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{f_0}{k(1-r^2)} \sin(\omega t) \quad (3.42)$$

Başlangıç şartlarından  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları bulunmuş ve çözüm Denklem 3.42’de verilmiştir.

$$C_1=u(0) \quad C_2=\frac{\dot{u}(0)-\frac{f_0 \omega}{k(1-r^2)}}{\omega_0} \quad (3.43)$$

$$u(t)=u(0) \cos(\omega_0 t) + \left[ \frac{\dot{u}(0)}{\omega_0} - \frac{f_0 r}{k(1-r^2)} \right] \sin(\omega_0 t) + \frac{f_0}{k(1-r^2)} \sin(\omega t) \quad (3.44)$$

Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sisteme sinüzoidal bir kuvvetin tesir ettiği düşünülürse, bu hareketin denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (3.45)$$

Bu denklemin çözümü, denklemin sol tarafının sıfıra eşitlenmesiyle elde edilecek ifadenin çözümüne (homojen çözüm) denklemin sağ tarafındaki kuvvet ifadesinin özel çözümünün eklenmesi ile bulunabilir. Homojen çözüm Denklem 3.27’de verilmişti. Özel çözüm için dönüşüm yapılır ve ifadenin ilk iki türevi alınır.

$$u(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (3.46)$$

$$\dot{u}(t) = -A \omega \sin(\omega t) + B \omega \cos(\omega t) \quad (3.47)$$

$$\ddot{u}(t) = -A \omega^2 \cos(\omega t) - B \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3.48)$$

Bulunan yeni ifadeler Denklem 3.34’de yerine yazılır.

$$\begin{aligned} -A \omega^2 m \cos(\omega t) - B \omega^2 m \sin(\omega t) - A \omega c \sin(\omega t) + B \omega c \cos(\omega t) \\ + A k \cos(\omega t) + B k \sin(\omega t) = f_0 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Denklem 3.49’daki A ve B bilinmeyenleri, değişkenlere ait katsayıların karşılaştırılması yöntemiyle bulunur. Sönüm katsayısı ifadesinin açık şekli ile katsayılar aşağıdaki hale gelirler.

$$A(k - \omega^2 m) + B\omega c = 0 \quad B(k - \omega^2 m) - A\omega c = f_0 \quad (3.50)$$

$$A = \frac{-2 f_0 \xi r}{k [(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2]} \quad B = \frac{f_0 (1 - r^2)}{k [(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2]} \quad (3.51)$$

Denklem 3.51'de bulunan A ve B katsayılarına bağlı olarak nihai denklem aşağıda verilmiştir. Bu yüklemde homojen çözümü oluşturan kısım, birkaç devir sonunda sıfıra yaklaşacağından, ihmal edilmesi büyük bir hataya sebebiyet vermez. Homojen çözüm veren kısma geçici (transient), özel çözümü veren kısma kalıcı (steady-state) kısım adı verilir. Bu sebepten dolayı önemli olan kısım, dış yük tesiri altında oluşan özel çözümdür (Yerlici ve Luş, 2014).

$$u(t) = \frac{f_0}{k} \left[ \frac{-2 \xi r \cos(\omega t) + (1 - r^2) \sin(\omega t)}{(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2} \right] \quad (3.52)$$

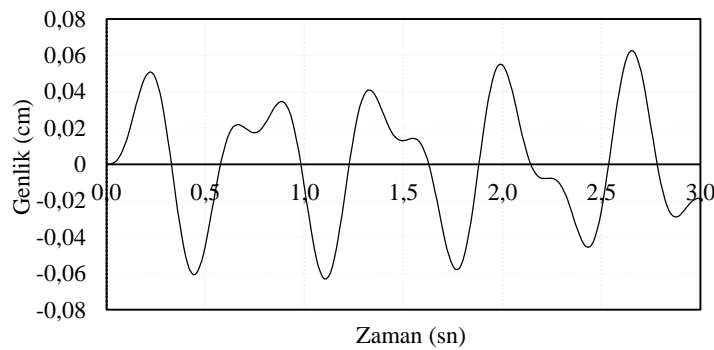
### **3.1.3.5. Tek serbestlik dereceli zorlanmış sistem uygulama**

Sönümsüz hal:

$$P_0 = 100 \cdot \sin(10t), \quad r = \frac{\omega}{\omega_0} = 0,543 \quad (3.53)$$

Başlangıç konumunda,  $u(0) = \dot{u}(0) = 0$

$$u(t) = 0 \cdot \cos(18,41t) + \left[ \frac{0}{18,41} - \frac{100 \cdot 0,543}{3454 \cdot (1 - 0,543^2)} \right] \sin(18,41t) + \left[ \frac{100}{3454 \cdot (1 - 0,543^2)} \right] \sin(10t) \quad (3.54)$$



Şekil 3.8. T.s.d. sönümsüz zorlanmış sistem deplasman grafiği

Örneğin  $t=2$  sn için

$$u(t_2)=0. \cos(36,82) + \left[ \frac{0}{18,41} - \frac{100. 0,543}{3454.(1-0,543^2)} \right] \sin (36,82) + \left[ \frac{100}{3454.(1-0,543^2)} \right] \sin(20) \quad (3.55)$$

$$=0,0546$$

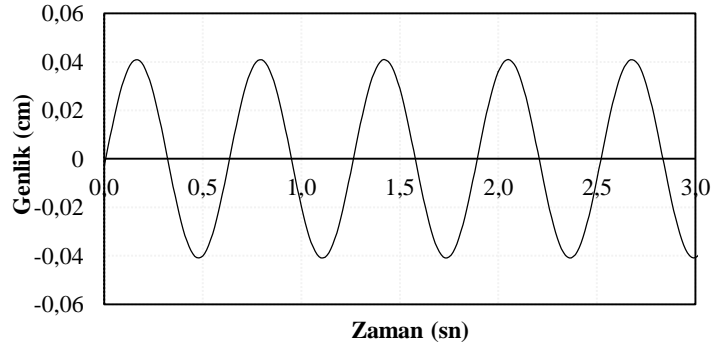
Tek serbestlik dereceli sönümsüz zorlanmış sistem deplasman grafiği Şekil 3.8' de sönümlü sistem deplasman grafiği ise Şekil 3.9' da verilmiştir. Sönümlü Hal:

$$P_0=100. \sin(10t) \quad \xi=0,05 \quad (3.56)$$

$$u(t)=\frac{100}{3454} \left[ \frac{-2.0,05. 0,543. \cos(10t)+(1- 0,543^2)\sin (10t)}{(1- 0,543^2)^2 +(2.0,05.0,543)^2} \right] \quad (3.57)$$

Örneğin  $t=3$  sn. için

$$u(t_3)=\frac{100}{3454} \left[ \frac{-2.0,05. 0,543. \cos(30)+(1- 0,543^2)\sin(30)}{(1- 0,543^2)^2 +(2.0,05.0,543)^2} \right] =-0,0408 \text{ cm} \quad (3.58)$$



Şekil 3.9. T.s.d. sönümlü zorlanmış sistem deplasman grafiği

### 3.2. Dinamik Yük Faktörü Ve Rezonans Durumu

Denklem 3.50'de en büyük yerdeğiştirme değerini bulmak için, denklemin zamana göre birinci dereceden türevi alınarak sonucun sıfıra eşitlenmesi gerekir.

$$v(t) = \frac{-2 \xi r \cos(\omega t) + (1 - r^2) \sin(\omega t)}{(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2} \quad (3.59)$$

$$u_{\delta}(t) = \frac{f_0}{k} v(t) \quad u_{\delta \max}(t) = \frac{f_0}{k} v_{\max}(t) \quad v_{\max}(t) = \frac{u_{\delta \max}(t)}{\frac{f_0}{k}} \quad (3.60)$$

Burada  $v_{\max}(t)$  değeri dinamik yük faktörü (DYF) olarak isimlendirilir. Bu katsayı statik yükler vasıtasıyla dinamik yük tesirlerini elde etmeye yarar. Denklem 3.60'da bulunan  $f_0/k$  ifadesi statik yükler altındaki yanal ötelenmeyi verir ve değeri sabittir.  $v(t)$  ifadesinde hem sinüs hem de kosinüs değerleri bulunduğundan türevini elde etmek zordur. Bu sebeple Denklem 3.59 trigonometrik fonksiyonlar yardımıyla ifade edilebilir.

$$v(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (3.61)$$

Bu ifadeyi açısal faz farkı ile gösterebilmek de mümkündür.

$$A = K \sin(\varphi) \quad B = K \cos(\varphi) \quad K = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (3.62)$$

$$v(t) = K \sin(\omega t - \varphi) \quad \varphi = \arctan \frac{-2 \xi r}{1 - r^2} \quad (3.63)$$

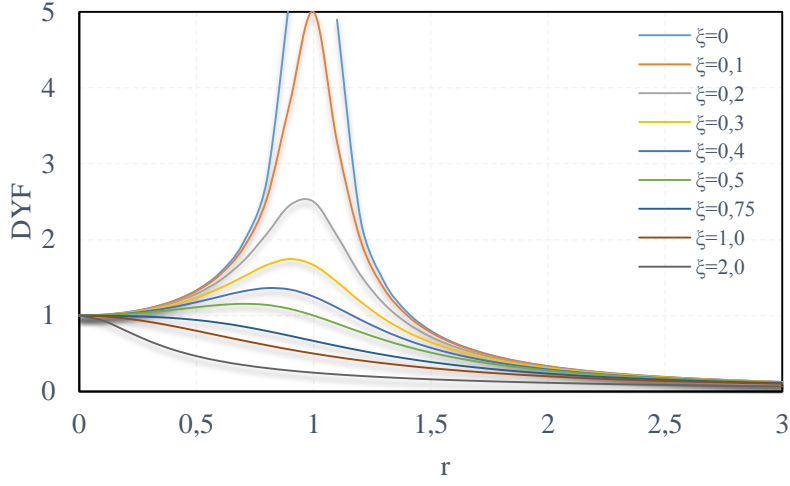
Yeni A ve B değerleri eski yerlerine konularak gerekli sadeleştirme işlemleri yapılırsa Denklem 3.64 elde edilir.

$$K = \frac{f_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2 \xi r)^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.64)$$

Yukarıdaki ifadelerdeki  $\xi$  sönüm katsayısı,  $\varphi$  faz açısını,  $\omega$  zorlanmış açısal frekansı,  $r$  doğal titreşim frekansının zorlanmış titreşim frekansına oranını gösterir. Bu denklemin en büyük değeri  $\sin(\omega t - \varphi)$  değerinin en büyük olması (+1,-1) ile mümkün olur. Bu durumda elde edilen dinamik yük faktörü Denklem 3.65'de verilmiştir (Yerlici ve Luş, 2014).



$$DYF = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (3.65)$$



Şekil 3.10. Dinamik yük faktörü- frekans oranı ilişkisi

Sönümsüz bir sisteme etki eden zorlanmış titreşim frekansının, doğal titreşim frekansına eşit olması halinde ( $r = 1$ ) dinamik yük faktörünün sonsuza vardığı görülür (Şekil 3.10). Bu olaya rezonans adı verilir ve mühendislik hesaplarında göz önünde bulundurulması gereken bir etkidir.

### 3.3. Duhamel İntegrali

Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sisteme kısa süreli (sistem birinci doğal periyodunun yaklaşık onda birinden daha kısa) ve gelişigüzel (bilinen bir matematik fonksiyonu ile ifade edilemeyen) bir yük etkiğinde, integral işlemleri oldukça güçleşir. Bu durumda kullanılacak pratik bir metot Duhamel İntegrali yöntemidir. Kütlesi  $m$  olan bir elemana sonsuz küçük bir  $\tau$  zamanında bir  $P_0$  kuvveti etki eder ve sistem üzerinde başka herhangi bir kuvvetin bulunmadığı düşünülürse, burada  $P_0 \cdot d\tau$  çarpımı,  $m$  kütlesine etkiyen impuls şiddetini verir. Newton'un birinci hareket kanununa göre,  $m \cdot \dot{u}(t)$  çarpımı da aynı şiddeti verir. Bu iki ifade birbirine eşitlenecek olur ise Denklem 3.66 elde edilmiş olur.

$$P_0 d\tau = m \cdot \dot{u}(t) \quad \dot{u}(t) = \frac{P_0}{m} d\tau. \quad (3.66)$$

Bu ifadenin kararlı (steady-state) kısmının çözümü Denklem 3.60'de, zamana göre birinci türevi ise Denklem 3.61'de görülmektedir.

$$u(t)=C_1 \cos \omega_0(t-\tau)+C_2 \sin \omega_0(t-\tau) \quad (3.67)$$

$$\dot{u}(t)=-C_1 \omega_0 \sin \omega_0(t-\tau)+C_2 \omega_0 \cos \omega_0(t-\tau) \quad (3.68)$$

Başlangıç anı ( $t=\tau$ ) sınır şartlarından  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları bulunur ve genel hareket denklemi elde edilir.

$$u(\tau)=C_1 \cos \omega_0(0)+C_2 \sin \omega_0(0)=0 \quad \Rightarrow C_1=0 \quad (3.69)$$

$$\dot{u}(\tau)=-C_1 \omega_0 \sin \omega_0(0)+C_2 \omega_0 \cos \omega_0(0) \quad \Rightarrow C_2 = \frac{P_o}{m \omega_0} d\tau \quad (3.70)$$

$$u(t) = \frac{P_o}{m \omega_0} \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (3.71)$$

Denklem 3.71 verilen ifadenin 0-t aralığında integrali alınacak olursa Duhamel İntegrali elde edilmiş olur (Denklem 3.72). Sönümlü durumda bu ifade  $e^{-\xi\omega(t-\tau)}$  ile çarpılacaktır (Yerlici ve Luş, 2014).

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_0} \int_0^t P_o \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (3.72)$$

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_0} \int_0^t e^{-\xi\omega(t-\tau)} P_o \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (3.73)$$

### 3.4. Logaritmik Azalım

Sönümlü bir sistemin sönüm oranını pratik bir şekilde bulabilmenin yolu, sistemin serbest titreşim grafiğine dayanır. Yerdeğiştirme grafiğinde birbirini takip eden genlikler arasında sabit bir oran vardır ve bu oran iki genliğin oranının logaritması alınarak bulunabilir (Denklem 3.74).

$$\delta = \ln \frac{u(t_i)}{u(t_i+T)} \quad (3.74)$$

Buna logaritmik azalım (logarithmic decreement) adı verilir. Denklem 3.30’da verilen genel hareket denklemleri yardımıyla değerler yerine yazılır.

$$\delta = \ln \frac{e^{-\omega_0 \xi t} A_u \sin(\varphi + \omega t)}{e^{-\omega_0 \xi (t+T)} A_u \sin(\varphi + \omega t + T)} \quad (3.75)$$

Denklem 3.75’de  $\sin(\varphi + \omega t)$  ile  $\sin(\varphi + \omega t + T)$  eşit olacağından ifade sadeleşir.

$$\delta = \omega_0 \xi T \quad (3.76)$$

T periyot ifadesi yerine yazılarak logaritmik azalım ve sönüm değerleri elde edilir.

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \Rightarrow \xi = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (3.77)$$

$\xi$ ’nin küçük değerleri için yaklaşık olarak Denklem 3.78’deki gibi alınabilir.

$$\delta = 2\pi\xi \quad (3.78)$$

Sistemin  $t_i$  anında genliği  $u(i)$ , ve bundan “n” devir sonraki genliği de  $u(i+n)$  ise bu iki genliğin oranının doğal logaritması  $n\delta$  kadar olur ve devir sayısına bağlı olarak sönüm oranı ifadesi Denklem 3.79’deki gibi olur (Yerlici ve Luş, 2014).

$$\xi = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{u_i}{u_{i+n}} \quad (3.79)$$

### 3.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Çok serbestlik dereceli bir sisteme ait genel hareket denklemleri sönümsüz ve sönümlü hal için sırasıyla Denklem 3.80 ve 3.81’de verilmiştir.

$$[m] \ddot{u} + [k] u = 0 \quad (3.80)$$

$$[m] \ddot{u} + [c] \dot{u} + [k] u = -[m] \ddot{x}_g \quad (3.81)$$

$[u]$  deplasman vektörü,  $[\emptyset]$  genlik vektörü ve  $\sin(\omega t)$  açısal hız olmak üzere, deplasman vektörü genlik vektörü ve açısal hızın çarpımı olarak ifade edilebilir. Bu ifadenin zamana göre birinci ve ikinci türevleri alındığında Denklem 3.82 elde edilir.

$$[u] = [\emptyset] \sin(\omega t) \quad [\dot{u}] = [\emptyset] \omega \cos(\omega t) \quad [\ddot{u}] = -[\emptyset] \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3.82)$$

Bu ifadeler hareket Denklem 3.80'de yerine yazılıp ve gerekli sadeleştirmeler yapılır.

$$-[\emptyset] \omega^2 [m] \sin(\omega t) + [k] [\emptyset] \sin(\omega t) = 0 \quad \Rightarrow \quad |k - \omega^2 m| [\emptyset] = 0 \quad (3.83)$$

Problem bir özdeğer problemi olarak adlandırılır. Denklem 3.83'ün çözümünden  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$  serbest titreşim frekansları bulunabilir.  $[\emptyset]$  özvektörleri kütle ve rijitlik matrisleri ile ilgili olarak ortogondur ve i. moda ait açısal frekans  $\omega_i$  ise bu moda ait periyod değeri aşağıda verilmiştir.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (3.84)$$

Sistemin serbestlik derecesi miktarınca elde edilen mod vektörleri (özvektörler) her modun birinci serbestlik derecesindeki genlik değerine bölünerek normalize edilirler. Deplasman vektörünü  $[u] = [\emptyset][U]$  şeklinde yazacak olursak, I bütün elemanları 1 olan kolon vektörünü göstermek üzere, genelleştirilmiş koordinatlar ile hareket denklemi aşağıdaki hali alacaktır (Yerlici ve Luş, 2014).

$$[m] [\emptyset][\ddot{U}] + [c][\emptyset][\dot{U}] + [k] [\emptyset][U] = -[m] \ddot{x}_g \quad (3.85)$$

Betti Maxwell karşılık teoremine göre  $[\phi_j]$  modundaki kuvvetlerin aynı sisteme ait bir  $[\phi_k]$  modundaki deplasmanlarında yaptığı virtüel iş,  $[\phi_k]$  modundaki kuvvetlerin aynı sisteme ait bir  $[\phi_j]$  modundaki deplasmanlarında yaptığı virtüel işe eşittir (Denklem 3.86).

$$(\omega_j^2 - \omega_k^2) [\phi_j]^T [m] [\phi_k] = 0 \quad (3.86)$$

Bu denklemin 0 olması için;  $\omega_j = \omega_k$  olmalıdır. (  $j=k$  aynı mod olması durumu),  $[\phi_j]^T [m] [\phi_k] = 0$  (İki modun ortogonal olması durumu) olmalıdır. Aynı şekilde sönüm ve rijitlik matrisleri ile ilgili olarak  $j \neq k$  için ortogonalite şartları sağlanmaktadır (Denklem 3.87).

$$[\phi_j]^T [c] [\phi_k] = 0 \quad [\phi_j]^T [k] [\phi_k] = 0 \quad (3.87)$$

Genelleştirilmiş koordinatlar ile yazılan hareket denklemini soldan  $[\phi_j]^T$  ile çarpılacak olursa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$[\phi_j]^T [m] [\phi_j] [\ddot{U}_j] + [\phi_j]^T [c] [\phi_j] [\dot{U}_j] + [\phi_j]^T [k] [\phi_j] [U_j] = -[\phi_j]^T [m] I \ddot{x}_g \quad (3.88)$$

Genelleştirilmiş kütle, sönüm ve yay katsayıları (Denklem 3.89) kullanılarak sadeleştirilen hareket denklemini Denklem 3.90'da verilmiştir. Modal katılım çarpanı Denklem 3.91'de görüldüğü gibi tarif edilir ise hareket denkleminin son hali Denklem 3.92'de görüldüğü gibi olur.

$$M_j = [\phi_j]^T [m] [\phi_j] \quad C_j = [\phi_j]^T [c] [\phi_j] \quad K_j = [\phi_j]^T [k] [\phi_j] \quad (3.89)$$

$$[\ddot{U}_j] + \frac{C_j}{M_j} [\dot{U}_j] + \frac{K_j}{M_j} [U_j] = -\frac{[\phi_j]^T [m] I}{M_j} \ddot{x}_g \quad (3.90)$$

$$\Gamma = \frac{[\phi_j]^T [m] I}{[\phi_j]^T [m] [\phi_j]} \quad (3.91)$$

$$[\ddot{U}_j] + 2 \omega_j \xi_j [\dot{U}_j] + \omega_j^2 [U_j] = -\Gamma \ddot{x}_g \quad (3.92)$$

Her mod için katlara etkiyen kuvvetler ve kat yerdeğiştirmelerinin hesaplanabilmesi için gerekli olan spektral ivme katsayısı  $A(T)$  ve %5 sönüm oranı için tanımlanan elastik ivme spektrumunun ordinatı olan elastik spektral ivme, Denklem 3.93' de, bunlara bağlı olarak bulunan kuvvetler ve kat yerdeğiştirmeleri Denklem 3.94' de verilmiştir.

$$A(T) = A_0 I S(T) \quad S_{ae}(T) = A(T)g \quad (3.93)$$

$$F_{(i)} = \Gamma_i S_{ae(i)} [m] \{\phi_i\} \quad u_{(i)} = \frac{\Gamma_i S_{ae(i)} \{\phi_i\}}{\omega_i^2} \quad (3.94)$$

### 3.6. Sönümlü Kayma Çerçevesi Ve Denklemler

$$m_1 \ddot{u}_1 + \dot{u}_1(c_1 + c_2) + \dot{u}_2(-c_2) + u_1(k_1 + k_2) + u_2(-k_2) - f_1(t) = 0 \quad (3.95)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + \dot{u}_1(-c_2) + \dot{u}_2(c_2 + c_3) + \dot{u}_3(-c_3) + u_1(-k_2) + u_2(k_2 + k_3) + u_3(-k_3) - f_2(t) = 0 \quad (3.96)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + \dot{u}_2(-c_3) + \dot{u}_3(c_3) + u_2(-k_3) + u_3(-k_3) - f_3(t) = 0 \quad (3.97)$$

Denklem 3.95, 3.96 ve 3.97'de verilen ve Şekil 3.11'de görülen çok serbestlik dereceli sisteme ait olan denge denklemlerinin bir arada yazılıp matris şeklinde gösterimi ile kütle, sönüm ve rijitlik matrislerine bağlı olarak elde edilen hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

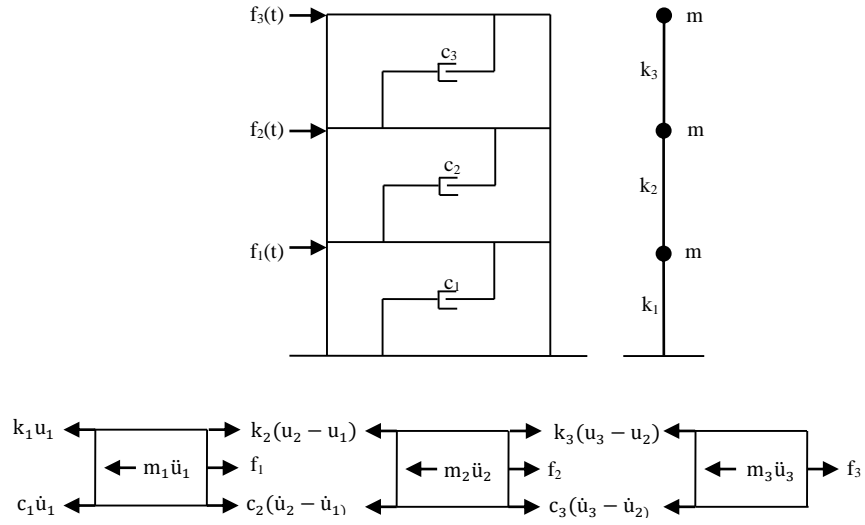
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} \quad (3.98)$$

Denklem 3.98 genelleştirilerek sol tarafından  $[\phi]_n^T$  ile çarpılır ve gerekli sadeleştirmeler yapılır ise sönümlü kayma çerçevesine ait genel hareket denklemi elde edilmiş olur (Yerlici ve Luş, 2014).

$$[\phi]_n^T m [\phi] [\ddot{u}] + [\phi]_n^T c [\phi] [\dot{u}] + [\phi]_n^T k [\phi] [u] = [\phi]_n^T [F_t] \quad (3.99)$$

$$\ddot{u} + 2\xi_n \omega_n \dot{u} + \omega_n^2 u = F_n(t)$$

(3.100)



Şekil 3.11. Çok serbestlik dereceli sönümlü sistem ve eşdeğer gösterimi

## 4. VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİLER VE YENİ BİR KONFIGÜRASYON ÖNERİSİ

### 4.1. Yapılarda Sönüm

#### 4.1.1. Yapılarda meydana gelen sönüm türleri

Yer hareketi esnasında yapı ve zemin özelliklerine bağlı olarak yapılarda sönüm meydana gelir. Yapıda oluşacak sönüm gücünün yüksek olması, deprem esnasında ortaya çıkan enerjinin sönmülenmesi ve yapının ayakta kalması bakımından önem taşır. Her malzemenin yapısına özgü olarak iç ve dış sürtünmeden dolayı bir sönmleme gücü vardır. Bir yapının sönmleme kapasitesi yapıda kullanılan malzemelerle, yapının geometrisiyle, birleşim (düğüm) noktası özellikleriyle, kullanılan dolgu duvarlar ve de yapının üzerinde yer aldığı zemin özellikleriyle doğrudan ilişkilidir.

Dış viskoz sönüm, yapının içinde bulunduğu ortamın meydana getirdiği sönümdür. İhmal edilebilir seviyededir. İç viskoz sönüm, yapı malzemesinin iç sönümü olup hızla doğru orantılı olarak değişir. Taşıyıcı sistem modellenirken mutlaka göz önünde bulundurulması gerekir. Yapıda meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin büyük oluşu ve taşıyıcı olan ya da olmayan elemanlarda oluşan çatlaklar sönümü artırır. Coulomb sönümü, taşıyıcı sistem mesnetlerinde ve birleşim bölgelerinde ortaya çıkar. Hız ve yerdeğiştirmeden bağımsız ve sabittir. Yerdeğiştirmeler küçük ise iç sönümle, büyük ise çevrimsel sönümle birleştirilerek dikkate alınır. Çevrimsel sönüm, malzemenin doğrusal elastik olmayan davranışında ve yükün yön değiştiren türde olması halinde ortaya çıkar. Kuvvet-yerdeğiştirme düzleminde bir çevrimde kaybolan enerji, çevrim içinde kalan alana eşittir. Hızdan bağımsız ve yerdeğiştirmeye bağımlıdır. Bu sönüm yerine eşdeğer viskoz sönüm kullanılması tercih edilir (Celep ve Kumbasar, 2004).

Mevcut bir yapının sismik güvenliği değerlendirilmek istenirse, ideal olan, sönüm oranını da kapsayan yapının önemli özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesidir. Fakat maddi sebepler ve zaman darlığı yüzünden bu yöntem fazla rağbet görmez. Yeni bir bina tasarlanırken binanın sönümü ve diğer özelliklerinin tam olarak belirlenmesi mümkün değildir. Bu sebeplerden dolayı yapının sönümü daha önceden yapılmış benzer yapılar



vasıtasıyla tahmin edilmelidir. Bu konuda birçok anlamlı ve değerli veriler bulunmasına rağmen, bu verilerin hepsi deprem analizinde kullanmaya uygun olmayabilir. Yapılan araştırmalar düşük genlikli zorlanmış titreşimler sonucu elde edilen sönüm oranlarının yapıda büyük bir harekete sebep olan depremler için doğrudan kullanılmasının uygun olmadığını göstermiştir (Chopra, 1995).

Yapıların modal sönüm oranları hesap edilirken, önceden kaydedilmiş yer hareketlerinin kullanılması uygun olur. Farklı tipte malzemeler (çelik, beton, ahşap vs.) kullanılarak yapılan yapıların modal sönümleri bize yeni yapılacak yapıların olası sönüm oranları ve sismik güvenliği hakkında fikir verebilir. Birçok deprem yönetmeliği, yapıdaki sönüm oranını, yapısal malzemedeki sönümü incelemeyen kabaca %5 olarak alır. Yapılar için tavsiye edilen sönüm oranları Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sönüm oranları (Newmark ve Hall, 1982)

<b>Gerilme Seviyesi</b>	<b>Yapı Tipi</b>	<b>Sönüm Oranı (%)</b>
Gerilme akma gerilmesinin yarısından daha az	Kaynaklı Çelik, Öngerilmeli Beton, Betonarme (Çatlaksız ya da önemsiz derecede çatlaklı)	2-3
	Çatlaklı Betonarme	3-5
	Bulonlu ve/veya perçinli Çelik, Çivili ve/veya bulonlu Ahşap	5-7
Gerilme akma gerilmesinin yarısından daha fazla	Kaynaklı Çelik, Öngerilmeli Beton,	5-7
	Öngerilmesini yitirmiş Beton	7-10
	Betonarme	7-10
	Bulonlu ve/veya perçinli Çelik, Bulonlu Ahşap	10-15
	Çivili Ahşap	15-20

#### 4.1.2. Sönüm matrisi

Sönüm matrisi yapının boyutuna, eleman sayısına veya yapısal malzemenin sönümüne göre değişkenlik gösterdiği için, hesaplanması rijitlik matrisi kadar kolay ve açık olmayan bir matristir. Rijitlik hesabında kullanılan elastisite modülü gibi sabit bir sayıya da bağımlı olmadığından, malzemenin sönüm özelliklerinin kesin olarak belirlenmesi mümkün değildir. Kaldı ki bu özellikler tam olarak bilinse bile, çelik ve betonarme birleşim bölgelerinde ve betonarme çatlakların açılıp kapanması sonucu harcana enerji, yapısal olmayan elemanlardaki gerilme, yapının içsel ve yapısal olmayan elemanlar ile sürtünmesi vb. mekanizmalar kesin bir sönüm matrisi elde etmeyi imkânsız kılar. Bu sebeple tüm enerji sarf eden mekanizmaların topluca ve yaklaşık olarak dikkate alındığı bir modal sönüm

oranından bahsetmek uygun olacaktır. Böylelikle klasik sönüm için, kütle ve rijitlik matrislerine bağlı bir sönüm matrisi bulunabilir (Chopra, 1995).

#### 4.1.3. Klasik ve klasik olmayan sönüm

Klasik sönümün tüm katlar boyunca benzer yapısal taşıyıcı bir sisteme ve benzer yapısal elemanlara sahip çok katlı bir binada kullanılması uygundur. Klasik sönüm matrisi hesabı için kullanılan Rayleigh yaklaşımı bölüm 4.1.5’de incelenmiştir.

Aralarında belirli sönüm farkı olan yapılarda klasik sönüm matrisi kullanılması uygun olmaz. Arkasında su toplanmış bir baraj örneği incelenecek olursa, bu tip önemli bir yapının deprem parametrelerinin seçiminde özen gösterilmesi esastır. Sönüm de bu parametrelerden biridir. Baraj-su sisteminde suyun sönümü barajın yanında ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu tip problemlerde sadece yapı için bir sönüm oranı kabul edip dinamik analiz yapmak uygun olmadığı gibi, suyun sönümünü yapı ile eşit almak da uygun bir yaklaşım olmaz. Bu tip yapıların bazı özel çözüm yöntemleri ile (Lagrange, Euler... vs.) analizi mümkün olduğu gibi, iki alt matrisin ( yapı-su, yapı-zemin vb.) bileşikleri ile elde edilen kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri kullanılarak analiz edilmesi mümkündür (Chopra, 1995).

#### 4.1.4. Eşdeğer viskoz sönüm

Genel anlamda yapıların, yer hareketine bağlı olarak ortaya çıkan enerjiyi viskoz sönüm şeklinde bertaraf ettikleri düşünülür. Bu varsayım elastik sınırlar içinde titreşim yapan sönümlü dinamik sistemlerin hareketinin diferansiyel denkleminin lineer kalması bakımından çok büyük avantaj sağlar. Sönüm değerinin nümerik olarak hesaplanması, sisteme harmonik yükler verilerek yapılan deneysel çalışmalara ve eşdeğer viskoz sönümün belirlenmesine bağlıdır (Paz ve Leight, 2006).

Harmonik bir kuvvet etkisinde ve  $\omega$  açısal hızına sahip bir sistemde, viskoz sönümde bir çevrimde harcanan enerji  $E_d$ , du diferansiyel yerdeğiştirmesine sebep olan sönüm kuvvetinin bir periyotluk ( $t=2\pi/\omega$ ) zaman diliminde entegre edilmesi ile bulunan enerjiye eşittir. Bu ifade Denklem 4.1’de görülmektedir.

$$E_d = \int_0^{2\pi/\omega} c \dot{u} du = \int_0^{2\pi/\omega} c \dot{u} \frac{du}{dt} dt = \int_0^{2\pi/\omega} c \dot{u}^2 dt \quad (4.1)$$

$$F = f_0 \sin(\omega t - \theta) \quad u = u_0 \sin(\omega t - \theta) \quad \dot{u} = u_0 \omega \cos(\omega t - \theta) \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de verilen kuvvet, yerdeğiştirme ve hız bileşenleri bir önceki denklemde yerine yazılır.

$$E_d = \int_0^{2\pi/\omega} c (u_0 \omega \cos(\omega t - \theta))^2 dt = c u_0^2 \omega^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2(\omega t - \theta) dt = \pi c u_0^2 \omega \quad (4.3)$$

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad c_{cr} = 2 m \omega_0 = 2 \frac{k}{\omega_0} \quad r = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (4.4)$$

$$E_d = 2 \pi \xi r k u_0^2 \quad (4.5)$$

Aynı ifade sönüm cinsinden yazılışı Denklem 4.6’da görülmektedir. Elastik bir sistemde en büyük yer değiştirme anında sistemin toplam enerjisi Denklem 4.7’de verilmiştir.

$$E_d = \frac{2 \pi^2}{T} c u_0^2 \quad (4.6)$$

$$E_s = \frac{1}{2} k u_0^2 \quad (4.7)$$

Böylelikle sönüm oranı Denklem 4.8’deki son halini almış olur.

$$\xi = \frac{E_d}{4 \pi r E_s} \quad (4.8)$$

#### 4.1.5. Rayleigh sönüm yaklaşımı

Viskoz sönümün hesabı için kullanılan yaklaşımlardan ikisi Rayleigh ve Coughy sönüm yaklaşımlarıdır. Rayleigh yaklaşımı Coughy yaklaşımının özel halidir. Titreşim sistemlerini tanımlayan doğrusal diferansiyel denklemlere yine doğrusal bir eleman olarak

katılmasından ve hesapları kolay olduğundan tercih edilmektedir. m ve k sırasıyla mekanik titreşim sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri ve  $\alpha$ ,  $\beta$  sabit sayılar olmak üzere Rayleigh sönüm modelinde doğal sönüm matrisi Denklem 4.9'da görüldüğü gibidir.

$$C = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4.9)$$

Bu denklem, herhangi bir i modu için soldan  $[\Phi]_n^T$  ve sağdan  $[\Phi]$  ile çarpılır ve gerekli düzenlemeler yapılır. Sönüm oranı  $\alpha$ ,  $\beta$  katsayılarına bağlı olarak Denklem 4.12'de verilmiştir.

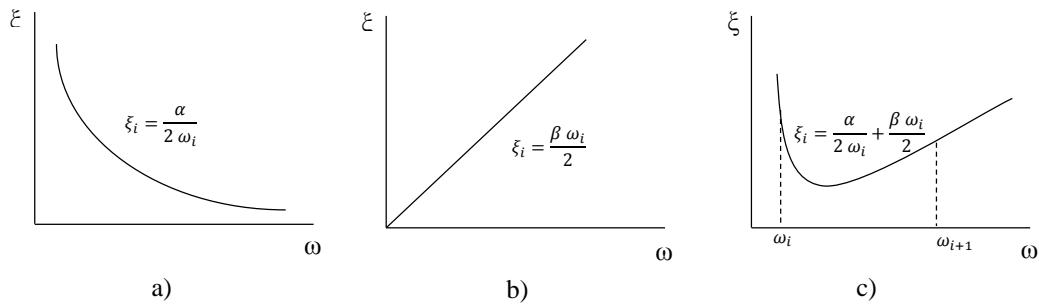
$$[\Phi]_n^T c [\Phi] = \alpha [\Phi]_n^T m [\Phi] + \beta [\Phi]_n^T k [\Phi] \quad (4.10)$$

$$C = \alpha M_n + \beta \omega_n^2 M_n \quad 2 M_n \omega_i \xi_i = (\alpha + \beta \omega_n^2) M_n \quad (4.11)$$

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_i} + \frac{\beta \omega_i}{2} \quad (4.12)$$

İki ardışık moda ait sönüm oranları birbirine eşit alınacak olursa  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\alpha = \xi \frac{2 \omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \beta = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (4.13)$$



Şekil 4.1. Sönüm oranı-doğal frekans değişim ilişkisi a) Kütle ile orantılı b) Rijitlik ile orantılı c) Kütle ve rijitlik ile orantılı (Chopra, 1995)

Denklem 4.13'de artarda gelen iki moda ait sönüm oranları verildiğinde  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları bulunarak diğer modlara ait sönüm oranları hesaplanabilir. Eğer  $\alpha = 0$  alınacak

olursa sönüm matrisi rijitlik ile orantılı,  $\beta = 0$  alınacak olursa sönüm matrisi kütle ile orantılı olur. Sönüm oranı-doğal frekans değişim ilişkisi Şekil 4.1' de görülmektedir.

#### 4.1.6. Yapılarda ortaya çıkan enerji

Geleneksel sismik dizayndaki düşünce, yapıların deprem, rüzgâr vb. yatay yüklere elastik olarak karşı koyması, daha şiddetli yüklerde hasar görmesi fakat göçmemesidir. Şiddetli salınımlarda yapıdaki sismik enerjinin bertaraf edilmesi için plastik mafsal oluşumu gereklidir. Plastik mafsal oluşumu deformasyonlara ve yapının düktilitesine bağlıdır. Bununla beraber bazı önemli yapılar (hastaneler, itfaiye binaları, sivil savunma merkezleri vb.) büyük bir depremden sonra da görevlerini eksiksiz yerine getirmelidirler. Yapıda büyük deformasyon ve yerdeğiştirmelere izin veren tasarım felsefeleri bu tür binalar için uygun değildir. Bahsi geçen binalarda büyük deplasman ve ivme oluşumuna engel olunmalıdır. Yapısal pasif kontrol sistemleri, geleneksel sismik tasarım yöntemlerinden farklı bir mantıkla geliştirilmiştir. Bu kontrol sistemleri öncelikli olarak sismik izolasyon ve enerji sönüm sistemlerini içermektedir. Sönümleyici uygulanan bir yapıda sismik enerjinin yutulması plastik mafsal oluşumuna bağlı olmamaktadır. Enerji sönümleyiciler tarafından yutulması yapısal hasar azaltılmakta ve yapının fonksiyonlarını sürdürmesi mümkün olmaktadır (Hwang, 2002).

Sismik yüklere direnç sağlamak için yapıya ilave edilen viskoz sönümleyicilerin etkileri enerji bağıntıları ile örneklendirilebilir. Uang ve Bertero (1988) tarafından önerilen enerji dengesi, Denklem 4.14'de verilmiştir.

$$E_I = E_k + E_s + E_h + E_d \quad (4.14)$$

Burada  $E_I$  yapıya gelen toplam deprem enerjisi,  $E_k$  hıza bağlı kinetik enerji,  $E_s$  elastik şekil değiştirme enerjisi,  $E_h$  plastik deformasyonlara bağlı olarak ortaya çıkan histeretik enerji,  $E_d$  yapının doğal sönümü ve/veya ilave edilen sönümleyicilerin enerjisi olarak tarif edilebilirler. Bir yapının depremde ayakta kalabilmesi için enerji sarfiyatının enerji talebinden fazla olması gerekir. Viskoz sönümleyicili yapılarda enerji tüketimi  $E_d$  artımına bağlı olarak artar. Böylelikle taşıyıcı sistem daha iyi korunur ve yapının yer hareketine bağlı performansı artmış olur (Hwang, 2002).

## 4.2. Viskoz Sönümleyiciler

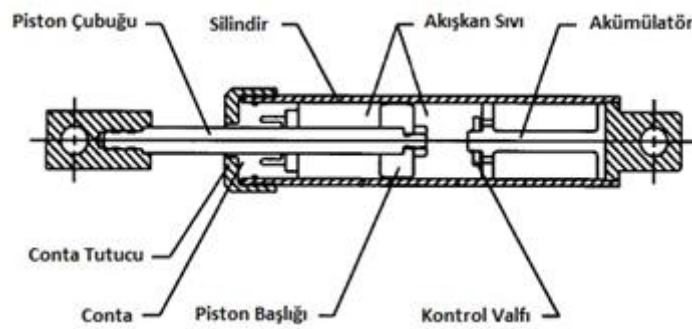
Viskoz sönümleyiciler yapıları deprem, rüzgâr vb. tekrarlı yüklerden korurlar. İlk uygulamaları Amerika Birleşik Devletleri ordusunda ve havacılık uygulamalarında görülür. 90'lı yılların başında viskoz sıvı ihtiva eden sönüm elemanlarının, binaları, köprüleri ve diğer yapıları titreşim etkisinden koruyabileceği anlaşılmıştır. Geleneksel yapılarda enerji, malzemelerin deformasyonu, yani çelik kirişler ve kolonların plastik mafsallaşması, betonun çatlaması vb. sönümlenir. Viskoz sönümleyiciler yapısal verimi arttırmak için alternatif bir yol sunarlar. Yapıya gelen dinamik bir kuvvetin neredeyse tüm enerjisini, yapı neredeyse tamamen ayakta kalacak şekilde absorbe ederler ve yapısal hareketlere direnen bir kuvvet sağlarlar. Viskoz sönümleyiciye gelen kuvvet, sönümleyici uçları arasındaki rölatif hız ile doğru orantılı olarak Denklem 4.15'de verilmiştir.

$$F=C \cdot |\dot{u}|^\alpha \quad (4.15)$$

Burada F sönümleyici kuvveti, C sönüm katsayısı,  $\dot{u}$  hız,  $\alpha$  sabit bir değerdir. Sönümleyici kuvveti sadece hıza bağlı olarak değişim gösterir. Verilen bir hız için kuvvet tüm sönümleyicide aynı olacaktır. Sönümleyicinin kuvvet almadığı yerde yapı kendisi direnç gösterecektir. Viskoz sönümleyiciye yük yavaş etkidiğinde tepki düşük, hızlı etkidiğinde ise tepki yüksek olur. Bir yapıya viskoz sönümleyici ilave edildiğinde, taşıyıcı sistem elemanları ve birleşim noktalarında deformasyon ve kalıcı hasara sebebiyet verecek sismik enerjinin sönümlendiği görülür (Lee ve Taylor, 2001).

Viskoz bir sönümleyicinin çalışma prensibinin anlaşılabilmesi için, sönümleyiciyi meydana getiren elemanların tanınmasında fayda vardır (Şekil 4.2). Piston çubuğu paslanmaz çelikten imal edilir ve cilalanır. Piston çubuğundan beklenen en önemli özellik yapıdan kendisine iletilen kuvveti deformasyona uğramadan viskoz sıvıya aktarmaktır. Silindir, dikişsiz çelik tüplerden imal edilir. İçinde akışkan sıvıyı depolar ve sönümleyici çalıştığında ortaya çıkan yüksek basınç kuvvetine dayanır. Hareket enerjisinin ısı enerjisine çevrildiği kısım akışkan sıvıdır. Bu sıvının sıcaklık farklarından etkilenmeyecek yapıda olması gerekir. Ayrıca uzun servis süresi boyunca bozulmaya uğramamalıdır. Sürtünme katsayısının aşırı düşük olması, sıkıştırılmaz olması, sıvının normal koşullarda hareket yeteneğinin fazla olması, çok büyük elastik şekil değiştirmelere izin verebilmesi, içinde

bulunduğu malzemeyi korozyona uğratmaması, yanıcı olmamasıdır. Polimer conta sıvıyı silindir içinde hapsetmeye yarar. Yüksek dayanımlı yapısal polimerden imal edilir. Servis ömrü boyunca sızdırmazlık ve yapışmazlık özelliğini muhafaza etmelidir. Conta tutucu contayı silindir içinde tutan dayanaktır. Piston başlığı piston çubuğunun ucunda ve silindir içinde yer alır ve üzerinde içinden akışkan sıvının geçmesine izin veren delikler bulunur. Akümülatör, sönümleyici içinde piston vuruşundan kaynaklanan hacim değişikliğini telafi etmeye yarar. Kapalı hücre Şeklinde plastik köpükten ya da kauçuk lastikten olabilir. Viskoz sıvının termal genişlemesine olanak verir (Lee ve Taylor, 2001).

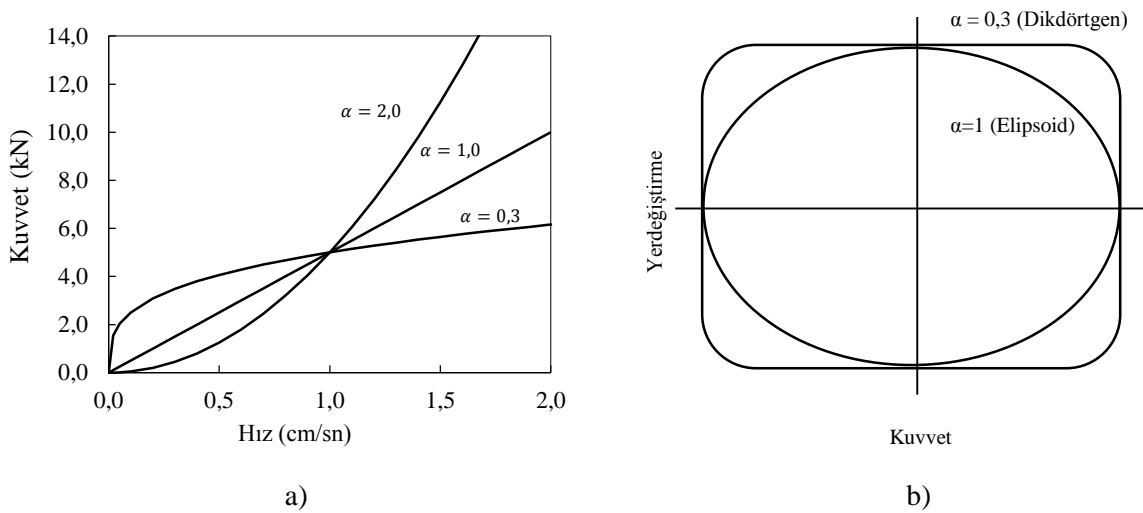


Şekil 4.2. Tipik bir viskoz sönümleyici (Lee ve Taylor, 2001)

#### 4.2.1. Viskoz sönümleyicinin çalışma prensibi

Titreşim etkisi ile piston çubuğuna gelen kuvvet, piston çubuğunu ve başlığını iter. Hızla itilen piston başlığı bir kinetik enerji kazanır ve akışkan sıvı içinde yol almaya başlar. Başlık üzerinde bulunan deliklerden geçen sıvı pistonun sahip olduğu kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürür. Akışkan sıvının tümü başlığın diğer tarafına geçtiğinde, başlığın önünde arkasına oranla oldukça yüksek basınç oluşur. Bu basınç farkı, pistonun hızına direnen karşı bir kuvvet oluşturur. Böylece titreşim enerjisi sönümlenmiş olur.

Şekil 4.3 a' da tekrarlanan hız ve değişken  $\alpha$  üs değerleri için kuvvet-hız grafiği görülmektedir.  $\alpha=1$  değeri için kuvvet ve hız doğrusal olarak ilişkilidir. Bu şekilde bakıldığında yüksek hızlı titreşimlerde doğrusal olmayan (non-lineer) sönümleyicinin daha uygun olduğu görülür. Küçük bağıl hız değerleri için üs değeri küçük olan bir sönümleyici, üs değeri büyük olana göre daha yüksek bir sönüm kuvveti gösterir.



Şekil 4.3. a) Kuvvet-hız grafiğinin  $\alpha$  üs değeri ile ilişkisi b) Kuvvet-yerdeğiştirme grafiğinin  $\alpha$  değeri ile ilişkisi (Lee ve Taylor, 2001)

Şekil 4.3 b' de ise  $\alpha$  değerine bağlı olarak histeresis eğrisinin biçimini göstermektedir. Yapısal sönümleyiciler için uygun aralık  $\alpha = 0,3-1$  arasında olmalıdır.  $\alpha > 1$  olduğunda performans düşük olur. Lineer çözümleme birçok bilgisayar programı tarafından yapılabilen basit bir analizdir. Yapısal kuvvetler azami değerine ulaştığında sönümleyici kuvveti sıfır, sönümleyici kuvveti azami değerine ulaştığında yapısal kuvvetler sıfır olur.  $\alpha = 0,3$ 'e yakın değerler alınca kuvvet-yerdeğiştirme grafiği dikdörtgen şeklinde,  $\alpha = 1$ 'e yakın değerler alınca grafik elipsoid şeklinde olur.

Viskoz sönümleyicilerin avantajlarından bahsetmek gerekirse ilk olarak analizlerinin kolay olduğundan bahsedilebilir. Bununla beraber yapısal kuvvetler ile sönüm kuvvetleri arasındaki etkileşim çok azdır. Diğer bir avantajı servis ömürleri boyunca bakım ve onarım gerektirmemeleridir. Yüksek stabilite ve dayanıma sahip olmaları ve mevcut yapılara da kolayca uygulanabilmeleri olumlu özellikleridir. Diğer sönümleme sistemlerine göre maliyetlerinin fazla olması ve yapıların dış yüzeylerine uygulandıklarında estetik kayıplara sebebiyet vermeleri ise başlıca dezavantajlarıdır.

Viskoz sönümleyiciler yapının titreşimlere karşı lineer-elastik durumunu korumasını sağlarlar. Kritik efektif sönüm oranı için pratik üst sınır viskoz sönüm oranı ile yapısal sönüm oranı toplamı olarak 0,30'dur. Bunun yaklaşık olarak 0,05'i yapısal sönüm, 0,25'i viskoz sönümdür. Yapısal kuvvetler ile viskoz sönüm kuvvetleri arasında doksan derecelik faz farkı bulunmasından dolayı viskoz sönümleyiciler yapının doğal titreşim periyodunu



önemli ölçüde değiştirmeyizler. Viskoz sönümleyiciye yük yavaş etkidiğinde tepki düşük, hızlı etkidiğinde ise tepki yüksek olur. Bir yapıya viskoz sönümleyici ilave edildiğinde taşıyıcı sistem elemanları ve birleşim noktalarında deformasyon ve kalıcı hasar oluşturacak sismik enerjinin sönümlendiği görülür (Constantinou vd., 1998).

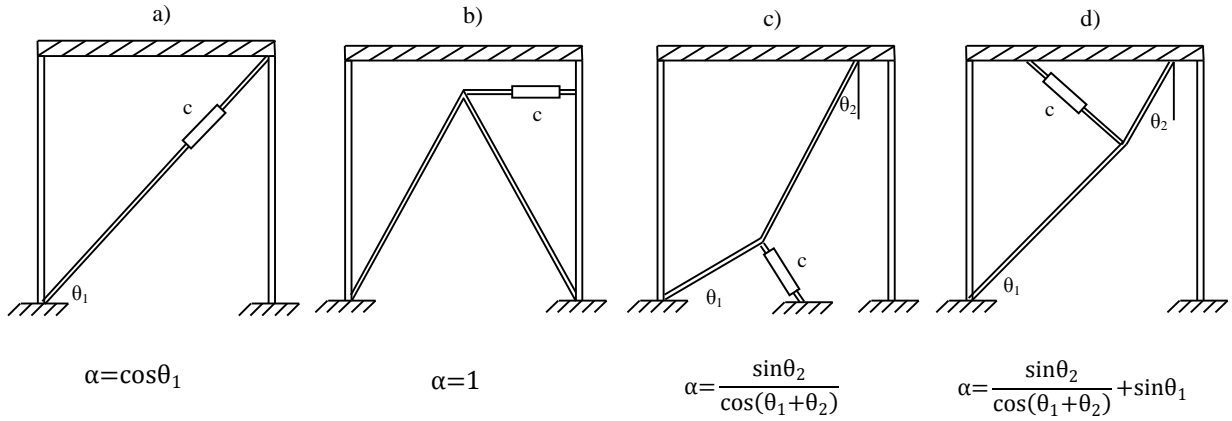
#### 4.2.2. Viskoz sönümleyici tipleri

Bir yapıya uygulanacak sönümleyici kapasitesinin belirlenmesi ve sönümleyicin yapı üzerindeki dağılımı planlanırken, düşey yükler dikkate alınmayarak sadece yatay yüklere göre hesap yapılır. Yüklerin çok büyük olmadığı durumlarda sönümleyici kuvvet yerdeğiştirme davranışının doğrusal bölgede kalması, yüklerin büyük olduğu durumlarda ise sönümleyicinin doğrusal olmayan davranış göstererek kesit ekonomisini koruması hedeflenir. Viskoz akışkanlı sönümleme sistemlerinin ilk gelişimi; çerçeve sistemler arasında kullanılan diyagonal bağlantılarla olmuştur. Daha sonra, sadece sismik enerjinin yutulması konusunda etkin olan chevron tipi geliştirilmiştir.

Enerji sönümleyici sistemler yeni yapılan yapıların ve ya güçlendirmeye tabi tutulan yapıların, deprem, rüzgâr vb. dış etkilere karşı korunmasını arttırmak amacıyla uygulanırlar. Tasarımcılar yapısal sönüm sağlamak için sıklıkla diyagonal ve chevron tipi sönümleyiciler kullanmaktadır. Sönümleyicilerin yaptıkları deplasman, chevron tipinde yatay kat deplasmanına eşit, diyagonal tipte ise daha düşüktür. Sönümleyici yerdeğiştirmesi ve kat yerdeğiştirmesi arasında Denklem 4.16'daki gibi bir bağıntı yazılabilir.

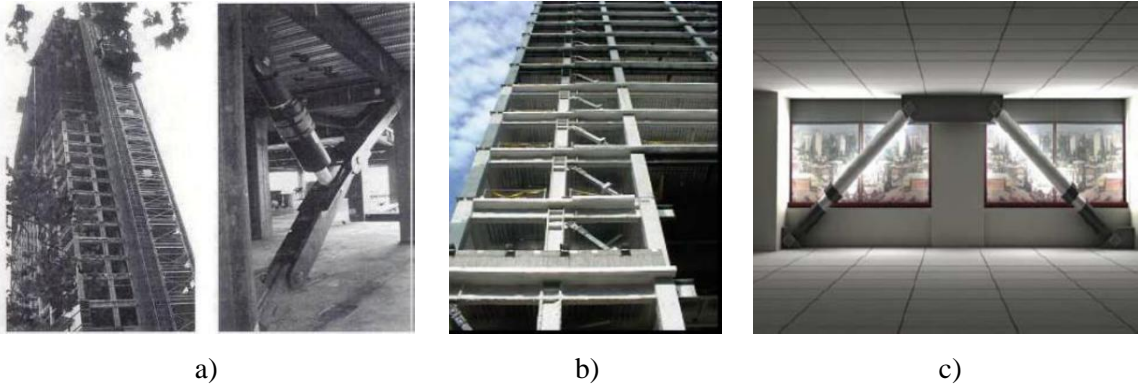
$$u_D = \alpha u \quad (4.16)$$

Burada  $u_D$  sönümleyicinin aksı doğrultusunda yaptığı rölatif deplasman,  $u$  kat yerdeğiştirmesi,  $\alpha$  büyütme katsayısıdır. Yatay yükler etkisi altında rijit yapıların yatay yerdeğiştirmeleri ve hızları düşük, gerekli sönüm kuvvetleri ise büyüktür. Şekil 4.4 c) ve d) şıklarında görülen dirsek tipi konfigürasyonlar sönümleyicinin yapısal yerdeğiştirmeye bağlı olarak yaptığı deplasmanı, dolayısı ile sönümleyici kuvvetini arttıırırlar. Bu konfigürasyonlarda kat yerdeğiştirmeleri ve sönümleyici aksenel deplasmanı arasında karmaşık ve doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Bu ilişkilere ait bağıntılar (büyütme faktörü) aşağıda verilmiştir (Park vd., 2005).



Şekil 4.4. Farklı konfigürasyonda sönümleyici uygulamaları a) Diyagonal b) Chevron c) Alt dirsek d) Üst dirsek

Viskoz akışkanlı sönümleme sistemlerinde, yerdeğiştirmenin en büyük olduğu anda hız sıfır, hızın en büyük olduğu anda yerdeğiştirme sıfırdır. Elde edilen yüksek sönümleme etkisi ile yapıya etkiyen kuvvet ve yerdeğiştirmelerde önemli azalmalar meydana gelir. Kullanılan sönümleyicinin getirdiği sönüm oranındaki artış ile spektral ivme ve yerdeğiştirme azalmaktadır. Bu azalma eğilme momenti ve kesme kuvvetindeki azalmayı sağlar. Viskoz akışkanlı sönümleyiciler genellikle çerçeve sistemlere monte edildiğinden, duvarların ya da bölmelerin arkasına saklanabilir, bu sayede yapının mimari bütünlüğünü bozulmaz.



Şekil 4.5. Dünyada viskoz sönümleyici uygulamaları a) Yerba Buena Tower (A.B.D), b) Buddist Headquarters (Tayvan), c) California Dept. of Trans. District Headquarters (Özcan, 2009)

Viskoz sönümleme teknolojisinin uygulama açısından yeni gelişiyor olması ve binalara monte edilen sönümleyicilerin farklı sıcaklık, nem vb. koşullar altında zaman içindeki davranışlarının test edilmemesi nedeniyle tam anlamıyla sağlıklı bulgulara yoktur (Özcan, 2009).

### 4.2.3. Sönümleyici katsayısı hesabı

Doğrusal sönümleyiciler için sönümleyici katsayısı hesabı (efektif sönüm oranı) FEMA273 dokuzuncu bölümden alınmıştır. Yapılarda efektif sönüm oranının hesaplanabilmesi için bu yönetmelikte verilen denklem ve açıklamalar aşağıda belirtildiği gibidir.

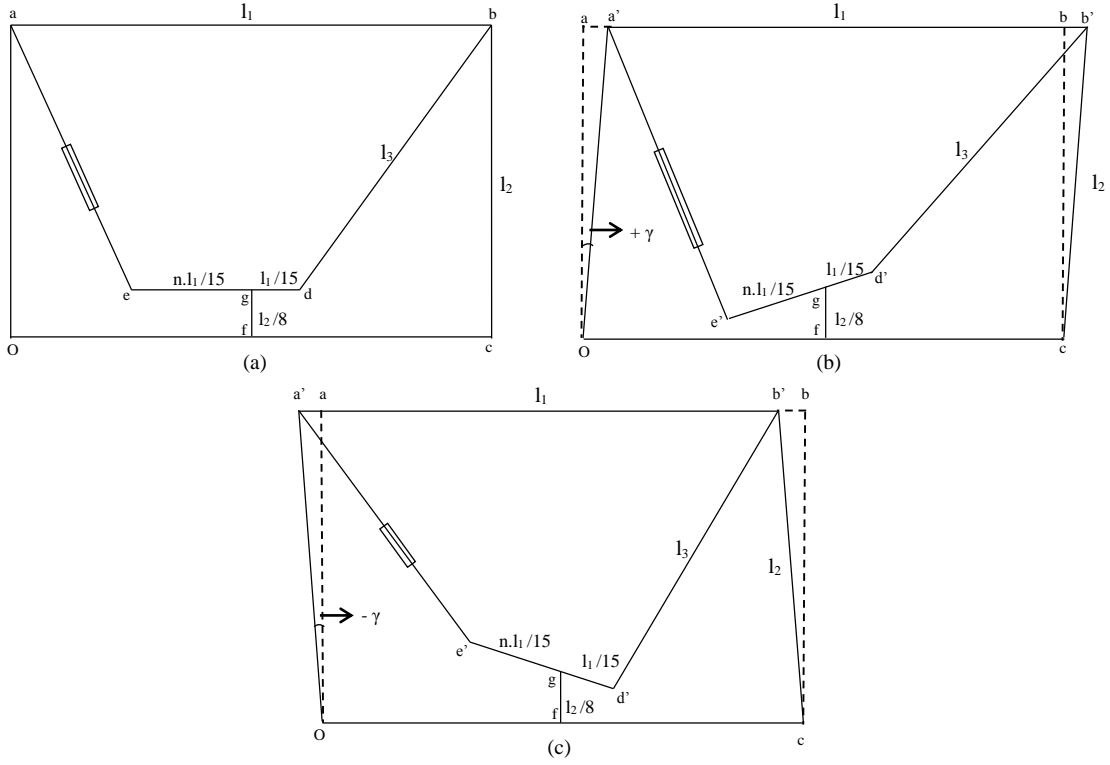
$$\xi_{\text{eff}} = \xi + \frac{T \sum C_j \cdot \alpha^2 \cdot (\phi_j - \phi_{j-1})^2}{4 \pi \sum m_i \phi_i^2} \quad (4.17)$$

Denklem 4.17'de  $\xi_{\text{eff}}$  efektif sönüm oranı,  $\xi$  sistem sönüm oranı, T birinci doğal titreşim periyodu,  $C_j$  sönüm elemanı sönüm katsayısı,  $m_i$  kat kütlesi,  $\phi_j$  j. kat 1. mod deplasman değerleri,  $\alpha$  sönümleyici tipine bağlı katsayıdır. Bu çalışmada bahsi geçen tüm uygulamalarda içsel sönüm oranı 0,03 olarak seçilmiştir. Buna göre uniform dağılımda (her kata bir sönümleyici gelecek şekilde tüm katlara) hedef sönüm oranını sağlayacak sönümleyici katsayısı hesap edilmiştir.

### 4.3. Yeni Bir Konfigürasyon Önerisi

#### 4.3.1. Önerilen bağlantı tipi ve büyütme katsayısının hesabı

Bilindiği üzere sönümleyici bağlantıları öncelikli olarak diyagonal ve Chevron tipinde olmuş, daha sonraları ise dirsek tipi bağlantılar kullanılmıştır. Bu kısımda geliştirilen yeni bir bağlantı konfigürasyonu üzerinde durulacaktır. Şekil 4.6'da önerilen bağlantının stabil ve dinamik etkiler altında zorlanmış durumları görülmektedir. Sistemde yatay bir hareket meydana geldiğinde  $\bar{d}b$  elemanı d noktasını harekete zorlayacak ve b ve d noktalarından mafsallı olan elemanlar sayesinde d noktası hareketin yönüne göre, merkezi g noktası olan hayali bir çember üzerinde hareket ederek d' konumuna gelecektir. Yine g noktasından mafsallı ve rijit  $\bar{e}d$  elemanı üzerinde bulunan e noktası, d' noktasının hareketine ve n katsayısına bağlı olarak e' konumuna gelecektir. Böylece sistemin stabil halde iken  $\bar{a}e$  uzunluğuna sahip olan sönüm elemanı da e' noktasına bağlı olarak uzayacak ya da kısılacaktır. Bu uzama ya da kısalma miktarının sistemin yatay hareketine oranı büyütme faktörü olarak tanımlanır.



Şekil 4.6. Önerilen bağlantı a) stabil durum b-c) dinamik etkiler altında zorlanmış durum

Önerilen bağlantı tipinde üç adet bağlantı elemanı olup ( $\overline{ed}$ ,  $\overline{db}$  ve  $\overline{fg}$ ), bunlar elemanlar g, d ve b noktalarında mafsallı olarak birbirine birleştirilmişlerdir. Dolayısıyla moment ya da kesme kuvveti taşımazlar. Sadece üstlerine gelen eksenel kuvveti diğer elemanlara iletirler. Dinamik zorlanmalar neticesinde, boylarında da herhangi bir uzama ya da kısalma meydana gelmeyecek şekilde tasarlanmışlardır.  $\overline{fg}$  uzunluğu  $l_2$  uzunluğuna,  $\overline{gd}$  uzunluğu ise  $l_1$  uzunluğuna belli oranlarda bağlıdır.  $\overline{eg}$  uzunluğu ise istenilen sönüm derecesine göre  $\overline{gd}$  uzunluğunun katları ( $n=1,2,3,4$ ) şeklinde seçilecektir. Seçilen  $l_1$  ve  $l_2$  uzunluklarına bağlı olarak  $l_3$  uzunluğu Denklem 4.18 ile hesaplanabilir.

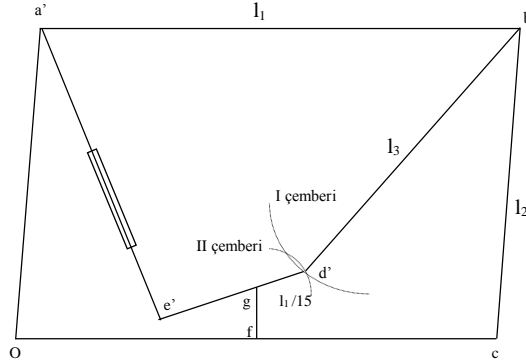
$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2} - \frac{l_1}{15}\right)^2 + \left(l_2 - \frac{l_2}{8}\right)^2} \quad (4.18)$$

Oabc dikdörtgeni o ve c noktaları etrafında x eksenini yönünde u birim ( $l_2 \sin \gamma$ ) kaydırılırsa meydana gelen paralelkenarın köşe noktaları ve bağlantı elemanlarının birleşim noktalarına ait koordinatlar,  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  olmak üzere Çizelge 4.2' deki gibi yazılabilir.

Çizelge 4.2 İlk ve son konumda noktaların koordinatları

İlk Konum	Son Konum
$O = (0,0)$	$O = (0,0)$
$a = (0, l_2)$	$a' = (l_2 \sin\gamma, l_2 \cos\gamma)$
$b = (l_1, l_2)$	$b' = (l_1 + l_2 \sin\gamma, l_2 \cos\gamma)$
$c = (l_1, 0)$	$c = (l_1, 0)$
$d = (\frac{l_1}{2} + \frac{l_1}{15}, \frac{l_2}{8})$	$d' = (d'_x, d'_y)$
$e = (\frac{l_1}{2} - n \frac{l_1}{15}, \frac{l_2}{8})$	$e' = (e'_x, e'_y)$
$f = (\frac{l_1}{2}, 0)$	$f = (\frac{l_1}{2}, 0)$
$g = (\frac{l_1}{2}, \frac{l_2}{8})$	$g = (\frac{l_1}{2}, \frac{l_2}{8})$

$d'$  ve  $e'$  noktalarının koordinatlarının hesaplanması için izlenen yöntem şöyledir; yatay hareket sonrasında  $b'$  noktasının merkez alındığı ve yarıçapı  $l_3$  olan I çemberi ele alınsın. Yine merkezi  $g$  noktası ve yarıçapı  $l_1/15$  olan II çemberi ile I çemberinin arakesiti bulunur ise  $d'$  noktasının koordinatları elde edilmiş olur (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Dinamik etkiler altında zorlanmış durum

I çemberinin denklemi 4.19'da verilmiştir.

$$(x-x_1)^2+(y-y_1)^2=r_1^2 \quad (4.19)$$

Bu denklemde yer alan  $x_1$ ,  $y_1$  ve  $r_1$  değerleri Denklemi 4.20'de verilmiştir.

$$x_1=l_1 + l_2 \sin\gamma \quad ; \quad y_1=l_2 \cos\gamma \quad ; \quad r_1=l_3 \quad (4.20)$$

II çemberinin denklemi 4.21'de verilmiştir.

$$(x-x_2)^2+(y-y_2)^2=r_2^2 \quad (4.21)$$

Bu denklemde yer alan  $x_2$ ,  $y_2$  ve  $r_2$  değerleri ise Denklemi 4.22'deki gibidir.

$$x_2=l_1/2 \quad ; \quad y_2=l_2/8 \quad ; \quad r_2=l_1/15 \quad (4.22)$$

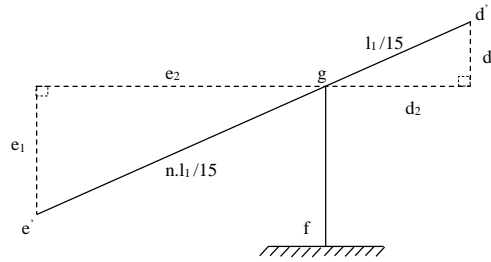
İki çemberi ara kesiti Denklem 4.24 ve 4.25'de verilmiştir.

$$d = (x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2 \quad (4.23)$$

$$X_{1,2} = \frac{x_1+x_2}{2} + \frac{(x_2-x_1)(r_1^2-r_2^2)}{2d^2} \pm \frac{(y_2-y_1)}{2d^2} \sqrt{((r_1+r_2)^2-d^2)(d^2-(r_2-r_1)^2)} \quad (4.24)$$

$$Y_{1,2} = \frac{y_1+y_2}{2} + \frac{(y_2-y_1)(r_1^2-r_2^2)}{2d^2} \mp \frac{(x_2-x_1)}{2d^2} \sqrt{((r_1+r_2)^2-d^2)(d^2-(r_2-r_1)^2)} \quad (4.25)$$

Burada  $X_{1,2}$  ve  $Y_{1,2}$  olarak bulunan ilgili kökler  $d'$  noktasının  $x$  ve  $y$  koordinatlarıdır ( $d'_x$ ,  $d'_y$ ).  $d'$  noktasının koordinatları bulunduktan sonra  $e'$  noktasının koordinatlarını da bulmak mümkün olur ( $e'_x$ ,  $e'_y$ ).



Şekil 4.8. e ve d noktaları hareket detayı

Şekil 4.8'de yer alan  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $e_1$  ve  $e_2$  değerleri Denklem 4.26'da görülmektedir.

$$d_1=d'_y-l_2/8 \quad ; \quad d_2=d'_x-l_1/2 \quad ; \quad e_1=l_2/8-e'_y \quad ; \quad e_2=l_1/2-e'_x \quad (4.26)$$

Burada üçgenlerin benzerliğinden faydalanılabilir.

$$\frac{d_1}{e_1} = \frac{d_2}{e_2} = \frac{1}{n} \quad (4.27)$$

$$e'_x = (n+1) \frac{l_1}{2} - n d'_x \quad ; \quad e'_y = (n+1) \frac{l_2}{8} - n d'_y \quad (4.28)$$

Bu durumda sistemin yatay hareketi sonucunda sönümleyicide oluşan aksel boy değişimi bulunabilir. Sönümleyicinin  $\bar{a}e$  olan ilk boyu  $\overline{a'e'}$  halini alır. Yatay yerdeğiştirmeye bağlı olarak değişen koordinatların hesap edilmesi ile sönümleyicinin ilk konumu ve ikinci konumu arasında meydana gelen aksel boy farkının, Oabc dikdörtgeninin yaptığı 'u' yer değiştirmesine oranı olarak ifade edilen büyütme faktörü bulunabilir. Sönümleyici ilk boyu Denklemi 4.29'da görülmektedir.

$$\bar{a}e = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2} - n \frac{l_1}{15} - 0\right)^2 + \left(l_2 - \frac{l_2}{8}\right)^2} \quad (4.29)$$

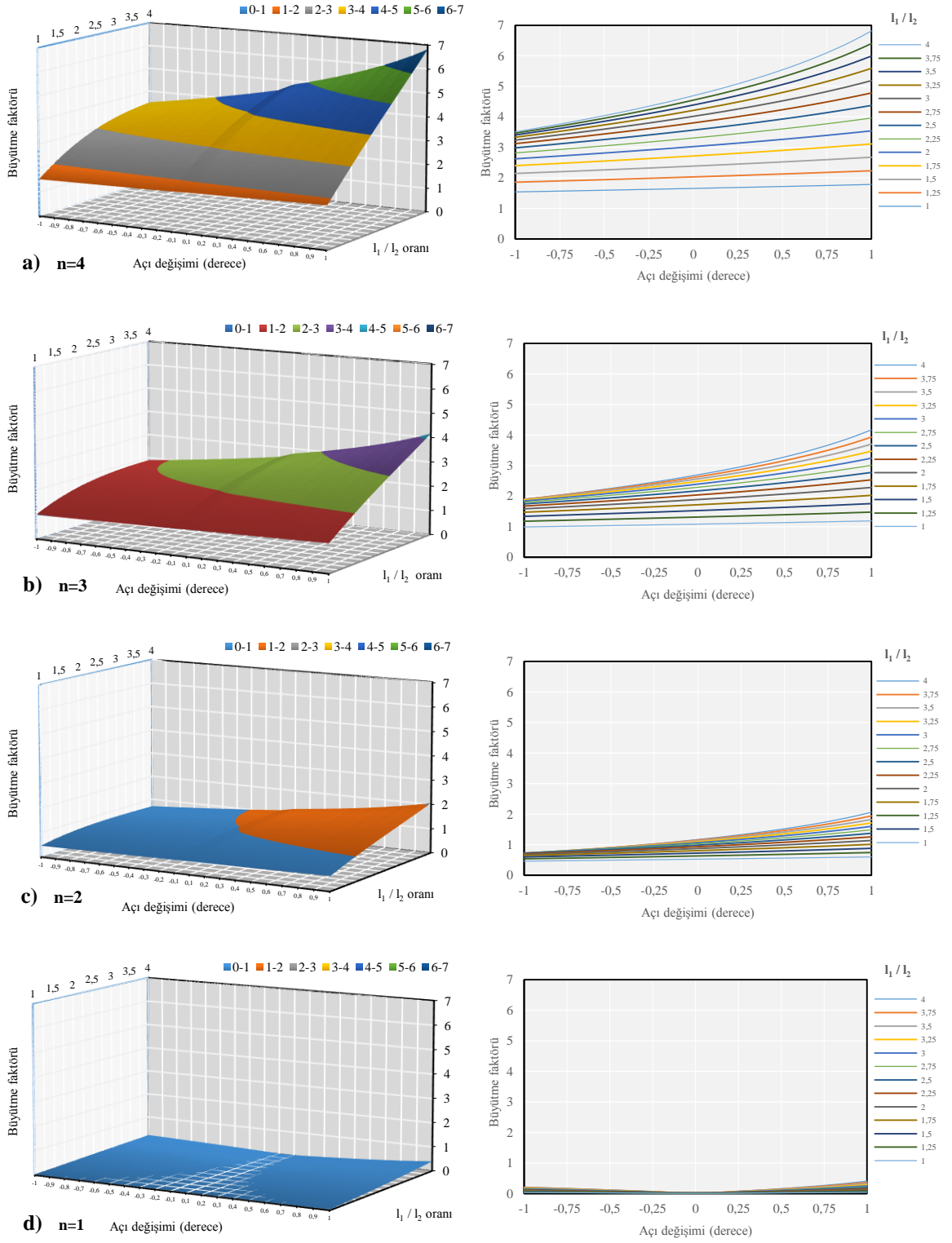
Sönümleyici son boyu ise Denklemi 4.30'da görülmektedir.

$$\overline{a'e'} = \sqrt{(l_2 \sin\gamma - e'_x)^2 + (l_2 \cos\gamma - e'_y)^2} \quad (4.30)$$

Artık büyütme faktörünü Denklemi 4.31 yardımıyla hesaplamak mümkündür.

$$Bf = \left| \frac{\overline{a'e'} - \bar{a}e}{u} \right| \quad (4.31)$$

Şekil 4.9'da tasarımda seçilmesi gereken büyütme faktörü katsayısı,  $l_1 / l_2$  oranına, sistemin yatay hareketine ve n katsayısına bağlı olarak ifade edilmiştir.

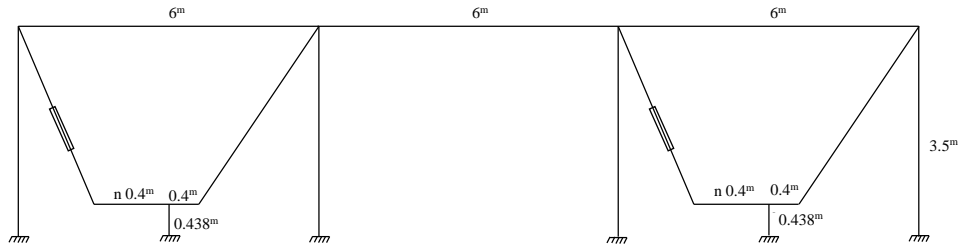


Şekil 4.9. Farklı  $n$  katsayıları için büyütme faktörü değerleri a)  $n=4$ , b)  $n=3$ , c)  $n=2$ , d)  $n=1$



### 4.3.2. Tek serbestlik dereceli sistem yeni konfigürasyon uygulaması

Bu uygulamada tek serbestlik dereceli çelik çerçeve kullanılmıştır. Çerçeveye ilave edilen viskoz sönümleyicilerin geometrisi yeni önerilen tiptedir.  $n$  katsayısı 1,2,3,4 olacak şekilde seçilerek sönümleyici ilavesinin ve farklı  $n$  katsayılarının verimi nasıl etkilediği incelenmiştir.



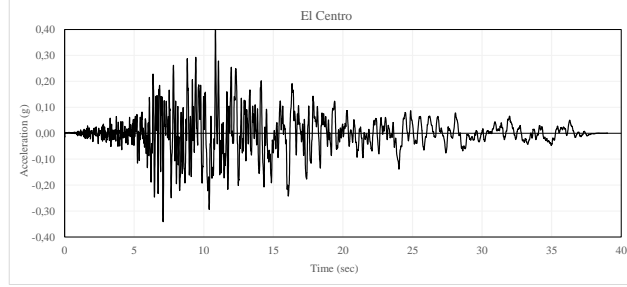
Şekil 4.10. Çerçeveye ait görünüm

Şekil 4.10' da görülen üç açıklıklı çelik çerçeveye iki adet sönümleyici ilave edilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmıştır. Analizler neticesinde kat kolonlarında oluşan en büyük eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ile katlar için yerdeğiştirme değerleri incelenmiş olup, viskoz sönümleyicilerin çerçevenin sismik performansına etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Bu uygulamada kullanılan çelik çerçevenin kolonları HE400A kirişleri ise HE300A profillerinden seçilmiştir. Çerçeveye etki eden yayılı yük  $60 \text{ kN/m}$ 'dir. Çerçeve Fe52 yapı çeliğinden imal edilmiştir. Kat kendi içinde rijit diyafram olarak tanımlanmıştır. Hareketli yük katılım katsayısı 0,3, etkin yer ivmesi katsayısı 0,4 (Birinci derece deprem bölgesi), bina önem katsayısı 1,0, taşıyıcı sistem davranış katsayısı 8 (Süneklik düzeyi yüksek sistem), yerel zemin sınıfı  $Z_2$  spektrum karakteristik periyotları ( $T_a=0,15$ ,  $T_b=0,40$ ) olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizler Sap2000 yapısal analiz programında yapılmıştır.

Yerel zemin sınıfına uygun bir adet yer ivmesi kullanılmıştır. P-delta etkileri dikkate alınmamış olup sönüm oranı her mod için sabit 0.03 alınmıştır. Fahjan'ın (2008) yaptığı bir çalışma neticesinde ölçeklendirilerek deprem yönetmeliğinde verilen tasarım spektrumuna uygun hale getirilmiş olan P0012 nolu, 10.15.79 tarihli El Centro Array#12 istasyonunda

kaydedilmiş olan HE12140 kayıtlı ve 7,01 ölçekli El Centro yer ivmesi kullanılmıştır. İlgili yer ivmesine ait ivme-zaman grafiği Şekil 4.11' de verilmiştir.



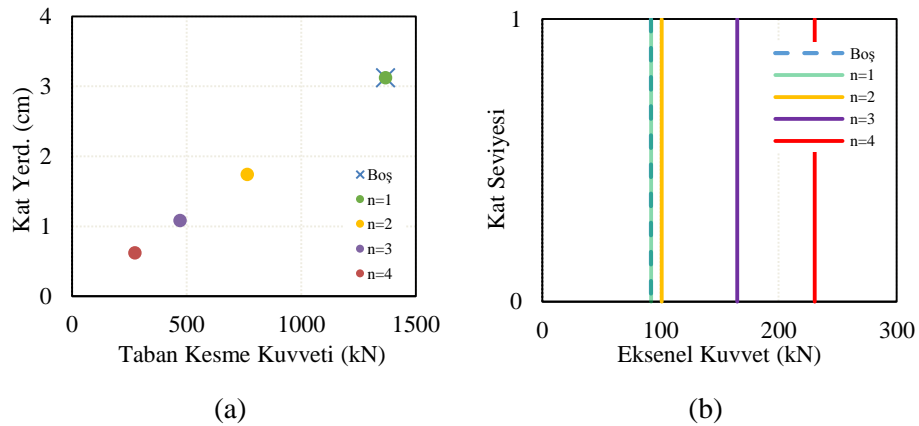
Şekil 4. 11. El Centro deprem kaydı

Sönümleyici katsayıları Denklem 4.17 yardımıyla hesaplanacaktır. Çerçeve de kiriş açıklıkları, kat yüksekliği ve n katsayısına bağlı olarak seçilecektir. Çerçeve de  $I_1/I_2$  oranı 1,71'dir. Açık değişiminin -0,25 ve +0,25 arasında değişeceği öngörülerek seçilen n değerleri Çizelge 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sönümleyici katsayısı hesabı

$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1$ (sn)	n	Büyütme Faktörü ( $\alpha$ )	C kN.sn/m	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$	$\xi_{eff}$ (%)
<b>0,092</b>	0,092	118,94	0,326	1	0,01	207,5	$8,464 \cdot 10^{-7}$	1,00670816	3,00
				2	0,83	207,5	$5,831 \cdot 10^{-3}$	1,00670816	6,12
				3	1,67	207,5	$2,361 \cdot 10^{-2}$	1,00670816	15,62
				4	2,66	207,5	$5,989 \cdot 10^{-2}$	1,00670816	35,02

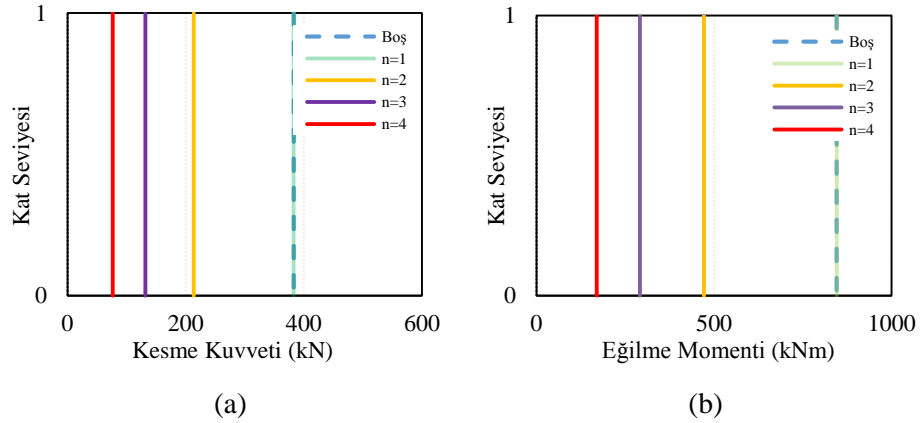
Şekil 4.12 (a)'da dinamik analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-tepe noktası yerdeğiştirme değerleri verilmiştir.



Şekil 4.12. En büyük a) taban kesme kuvveti b) eksenel kuvvet değerleri

Şekil 4.9'a bakıldığında  $n=1$  iken çerçevede sadece içsel sönüm olduğu, sönümleyiciden bir katkı sağlanmadığı görülmektedir.  $n$  katsayısının artmasına bağlı olarak hem taban kesme kuvvetlerinde hem de tepe noktası yerdeğiştirmelerinde düşüş gözlenmiştir. Şekil 4.12'de tüm grafiklerde  $n=1$  için elde edilen sonuçlar ve sönümsüz durum için elde edilen sonuçlar üst üste gelerek çakışmıştır. Taban kesme kuvveti-tepe noktası yerdeğiştirme değerleri,  $n=1$  için 1368kN ve 3,12 cm iken  $n=4$  için bu değerler her iki durumda da % 80'lik düşüş göstererek 274,3 kN ve 0,62 cm değerlerini almışlardır.

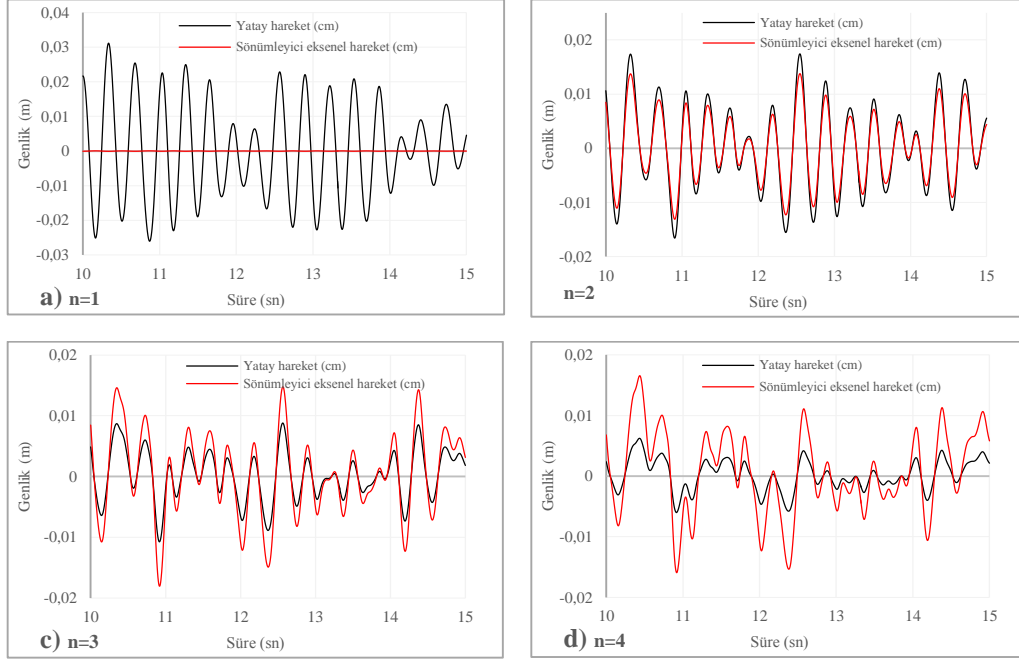
Şekil 4.12 (b)'de en büyük eksenel kuvvet değerleri görülmektedir. Diğer değerlerin aksine eksenel kuvvetlerde artış gözlenmiştir. sönümleyici eklenmesiyle ortaya çıkan bu artış değerlendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.



Şekil 4.13. En büyük a) taban kesme kuvveti b) eksenel kuvvet değerleri

Şekil 4.13 (a) ve (b)'de sırasıyla en büyük kat kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri görülmektedir. Her iki grafikte de sönümleyicisiz durum ile  $n=1$  durumunda elde edilen sonuçlar aynı olduğundan,  $n$  değerinin 1 seçilmesi sisteme bir iyileşme sağlamamaktadır.  $n=1$  ve  $n=4$  değerleri arasında her iki grafikte de taban kesme kuvveti ve tepe noktası yerdeğiştirme değerlerine benzer olarak % 80'lik düşüşler gözlenmiştir. Şekil 4.14'de  $n=1,2,3,4$  için çerçevenin dinamik etki altında tepe noktası yerdeğiştirmesi ve buna bağlı olarak sönümleyicinin yaptığı eksenel deplasman verilmiştir.  $n=1$  için grafikten görüldüğü üzere sönümleyici eksenel deplasman yapmamaktadır.  $n$  değeri arttıkça sönümleyici eksenel deplasmanının yatay değiştirmeye oranı (büyütme faktörü) artarak  $n=4$  için yaklaşık 2,66 değerine kadar yükselmiştir. Sönümleme kuvveti sönümleyicinin hızına bağlı olduğu Denklem 4.15'de verilmiştir. Sönümleyici eksenel deplasmanı arttıkça,  $t$

süresince kat edilen yol artmakta ve buna bağlı olarak hız da artmaktadır. Bu sebeple sönümleyici daha fazla eksenel yük alabilmektedir.



Şekil 4.14. Sistem yatay hareketi-sönümleyici eksenel hareketi ilişkisi a) n=1 b) n=2 c) n=3 d) n=4

1) Geliştirilen sönümleyici tipi  $n > 1$  için taban kesme kuvveti-tepe noktası yerdeğiştirmesi değerlerinde, kat kolonlarında görülen en büyük kesme kuvveti ve eğilme moment değerlerinde n katsayısına bağlı olarak artan iyileşmeler görülmüştür. Yalnız eksenel kuvvet değerleri elde edilen diğer verilerden farklı olarak bir miktar artış göstermiştir. Bu durum Bölüm 6.1'de incelenen alt dirsek ve üst dirsek tipi sönümleyicilerde de görülmüş olup yeni geliştirilen bağlantı tipine ait bir olumsuzluk değildir. Eksenel kuvvet değerlerindeki artış mutlaka göz önünde bulundurulmalı ve kontrol altında tutulmalıdır.

2) Bağlantı geometrisine ve farklı n katsayılarına bağlı olarak yapılan hesaplar ile Şekil 4.9'da  $l_1/l_2$  oranına ve kolonun yaptığı eksenel açı değişimine bağlı olarak bulunan büyütme faktörü değerleri bu uygulamada kullanılmış ve bu değerler ile bulunan sönüm oranlarının tutarlı olduğu görülmüştür.

3) Yatay hareket-sönümleyici aksel hareketi ilişkileri dört farklı  $n$  değerine bağlı olarak incelenmiş ve Şekil 4.9'dan alınan büyütme faktörü değerlerinin çok büyük yaklaşıklık ile bu ilişkiyi tanımladığı görülmüştür.

## 5. MATERİYAL VE YÖNTEM

### 5.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi

Burada DBYYHY (2007) 2.7 başlığı altında bahsi geçen eşdeğer deprem yüğü yönteminden bahsedilecektir. Bu yöntemde yapının ağırlığına, sünekliğine ve zemin durumuna bağılı olarak, kat seviyelerine etkiyen eşdeğer statik deprem yükleri bulunur. Bu yükler bulunurken yapının birinci doğal periyodu ve birinci mod şekli kullanılır. Bu yöntem, uygulama ve hesap bakımından oldukça kolay olmasına rağmen, bazı binalar için deprem yüklerini tarif etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu durumda mod birleştirme yöntemi ve/veya zaman-tanım alanında hesap yöntemi kullanılması gerekliliğı deprem yönetmeliğimizde ifade edilmiştir. Bu yöntemin uygulanabileceğı binalar ilgili yönetmelikte Tablo 2.6'da verilmiştir.

Eşdeğer deprem yüğü yöntemiyle hesap yapılabilmesi için, hareketli yük katılım katsayısı ( $n$ ), etkin yer ivmesi katsayısı ( $A_0$ ), bina önem katsayısı ( $I$ ), taşıyıcı sistem davranış katsayısı ( $R_a$ ) ve spektrum katsayısının ( $S(T)$ ) bilinmesi gerekir. Bu değerler DBYYHY'in (2007) ikinci bölümünde verilmiştir. Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan spektral ivme katsayısı ve 0,05 sönüm oranı için tanımlanan elastik ivme spektrumunun ordinatı olan elastik spektral ivme, yönetmeliğin Bölüm 2.4 kısmında verilmiştir.

Katlara etkiyen eşdeğer deprem yüklerinin belirlenmesi için, göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yüğü (taban kesme kuvveti) belirlenir (Denklem 5.1).

$$V_t = \frac{W A_s(T_i)}{R_a(T_i)} \geq 0.10 A_0 I W \quad (5.1)$$

Eşdeğer deprem yüğü yönteminin uygulanması durumunda, binanın deprem doğrultusundaki hakim doğal periyodu Denklem 5.2'de hesaplanan değerden daha büyük alınmayacaktır.

$$T_1 = 2\pi \left[ \frac{\sum_{i=1}^N m_i d_{fi}^2}{F_{fi} d_{fi}} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

Burada  $T_1$  birinci doğal titreşim periyodudur. Göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) Denklem 5.3 ile hesaplanır.

$$V_t = \Delta F_n + \sum_{i=1}^N F_i \quad (5.3)$$

Binanın N'inci katına (en üst kat seviyesi) etkiyen ek eşdeğer deprem yükü  $\Delta F_n = 0,0075 N V_t$  şeklinde bulunur. Toplam eşdeğer deprem yükünün  $\Delta F_n$  tepe kuvveti dışında geri kalan kısmı, N'inci kat dahil olmak üzere, binanın katlarına Denklem 5.4' deki gibi dağıtılacaktır.

$$F_i = (V_t - \Delta F_n) \frac{w_i H_i}{\sum_{j=1}^N w_j H_j} \quad (5.4)$$

## 5.2. Mod Birleştirme Yöntemi

Eşdeğer deprem yükü yönteminde, yapının birinci modu ele alınarak, katlara etkiyen kuvvetler ilgili katın kütlesi ve temelden yüksekliği nispetinde dağıtılır. Bu yöntemde sadece birinci mod göz önüne alındığından, yapının birden fazla modunun göz önünde bulundurulması gereken durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu noktada, mod birleştirme yönteminden bahsedilebilir. Bu yöntemin esası, çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışlarının her mod şekli için ayrı ayrı değerlendirilmesidir. Yapıda oluşan en büyük iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler, binada yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesi ile elde edilir. İstatistiksel olarak birleştirilme yapılmasının nedeni, bu maksimum katkıların farklı zamanlarda meydana gelmiş olmasıdır (DBYYHY, 2007).

$$u_{ix} = \frac{L_{xn}}{M_n} \frac{S_{aR}(T_i)}{\omega_i^2} \phi_i \quad u_{iy} = \frac{L_{yn}}{M_n} \frac{S_{aR}(T_i)}{\omega_i^2} \phi_i \quad (5.5)$$

Her bir mod için kat ötelenme değerleri Denklem 5.5 yardımıyla bulunabilir. Burada  $M_n$  modal etkin kütle,  $S_{aR}(T_i)$  azaltılmış spektral ivme katsayısı  $\phi_i$  ilgili moddaki kat yerdeğiştirme değeridir. Her bir mod için kat ötelenme değerleri bilinen sistemde kat ivme değerleri ve katlara etkiyen kuvvetler Denklem 5.6'da verilmiştir.

$$\ddot{u}_{ix} = -\omega_i^2 u_{ix} \quad \ddot{u}_{iy} = -\omega_i^2 u_{iy} \quad F_{ix} = m_i \ddot{u}_{ix} \quad F_{iy} = m_i \ddot{u}_{iy} \quad (5.6)$$

Herhangi bir n'inci titreşim modunda göz önüne alınacak azaltılmış ivme spektrumu ordinatı Denklem 5.7 ile belirlenecektir.

$$S_{aR}(T_i) = \frac{S_{ae}(T_i)}{R_a(T_i)} \quad (5.7)$$

Bu denklemde  $S_{aR}(T_i)$ , n'inci doğal titreşim modu için azaltılmış spektral ivme,  $S_{ae}(T_i)$  elastik spektral ivme ve  $R_a(T_i)$  ise i'inci doğal titreşim modu için hesaplanan deprem yükü azaltma katsayısıdır. Elastik ivme spektrumunun özel olarak belirlenmesi durumunda  $S_{ae}(T_i)$  yerine ilgili özel ivme spektrumu ordinatı göz önüne alınır. Hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısının, göz önüne alınan birbirine dik x ve y yatay deprem doğrultularının her birinde, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının hiçbir zaman bina toplam kütlelerinin %90'ından daha az olmaması kuralına göre belirleneceği belirtilmektedir. Yukarıdaki denklemlere ulaşmak için Denklem 5.8 ve 5.9'dan faydalanılabilir.

$$L_{xn} = \sum_{i=1}^N m_i \phi_{xi}, \quad L_{yn} = \sum_{i=1}^N m_i \phi_{yi} \quad M_n = \sum_{i=1}^N (m_i \phi_{xi}^2 + m_i \phi_{yi}^2 + m_{\theta i} \phi_{\theta i}^2) \quad (5.8)$$

$$\sum_{i=1}^Y M_{xn} = \sum_{i=1}^Y \frac{L_{xn}^2}{M_n} \geq 0,90 \sum_{i=1}^N m_i \quad \sum_{i=1}^Y M_{yn} = \sum_{i=1}^Y \frac{L_{yn}^2}{M_n} \geq 0,90 \sum_{i=1}^N m_i \quad (5.9)$$

Burada  $\phi_{xi}$  ve  $\phi_{yi}$  i'inci mod şeklinin n'inci katta x ve y eksenini doğrultusundaki yatay bileşeni,  $\phi_{\theta i}^2$  i'inci mod şeklinin n'inci katta düşey eksen etrafındaki dönme bileşenidir.  $m_{\theta i}$  binanın i'inci katının kaydırılmamış kütle merkezinden geçen düşey eksene göre kütle eylemsizlik momentidir.



### 5.2.1. Mod katkılarının birleştirilmesi

Binaya etkiyen toplam deprem yükü, kat kesme kuvveti, iç kuvvet bileşenleri, yerdeğiştirme ve görelî kat ötelemesi gibi büyüklüklerin her biri için ayrı ayrı uygulanmak üzere, her titreşim modu için hesaplanan ve eşzamanlı olmayan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesi için uygulanacak yöntemler aşağıda verilmiştir.

$T_m < T_n$  olmak üzere, göz önüne alınan herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima  $T_m / T_n < 0.80$  koşulunu sağlaması durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için karelerin toplamının karekökü yöntemi uygulanabilir. Bu koşulun sağlanamaması durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için tam karesel birleştirme yöntemi uygulanacaktır. Kullanılacak çapraz korelasyon katsayılarının hesabında, modal sönüm oranları bütün titreşim modları için %5 olarak alınacaktır.

### 5.2.2. Karelerin toplamının karekökü yöntemi

Bu yöntem deplasman veya kuvvetlerin değerlerini tahmin etmek için, maksimum mod değerleri kareleri toplamının karekökünü kullanır. Modal sönümlenme hesaba katılmaz ve tüm maksimum mod değerlerinin istatistiksel olarak bağımsız olduklarını kabul eder. Çok sayıda frekansın hemen hemen özdeş olduğu üç boyutlu yapılarda bu kabul doğrulanmaz. SRSS yöntemi, yükler doğrultusunda olan taban kesme kuvvetlerini, gerçek değere göre yaklaşık olarak % 30'a kadar eksik ve yüklere dik doğrultudaki taban kesme kuvvetlerini ise on misli kadar fazla hesaplamaktadır (Wilson,2000). Denklem 5.10' da sırasıyla yer değiştirme, kuvvet, kesme kuvveti ve moment değerlerinin hesabı için gerekli olan formüller görülmektedir.

$$\begin{aligned}
 u_{\max} &= \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} & f_{\max} &= \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_n^2} \\
 v_{\max} &= \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} & M_{\max} &= \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_n^2} \quad (5.10)
 \end{aligned}$$

### 5.2.3. Tam karesel birleştirme yöntemi

Modal sönümlemenin hesaba katıldığı bir yöntemdir. Rasgele titreşim teorilerine dayanır. Mod değerlerinden tipik bir kuvvetin azami değeri çift toplam denklemini uygulayarak, CQC yöntemi ile tahmin edilebilir. Mutlak değerlerin toplamı, çok kaba bir şekilde, bütün sonuçları gerçek değerinden fazla vermektedir. Buna karşılık CQC yöntemi, zaman tanım alanında kesin hesaba yakın ve çok gerçekçi değerler vermektedir (Wilson, 2000). Denklem 5.11’de sırasıyla yer değiştirme, kuvvet, kesme kuvveti ve moment değerlerinin hesabı için gerekli olan formüller görülmektedir.

$$\begin{aligned} u_{\max} &= \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} u_{ki} u_{kj} \right]^{0,5} & f_{\max} &= \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} f_{ki} f_{kj} \right]^{0,5} \\ v_{\max} &= \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} v_{ki} v_{kj} \right]^{0,5} & M_{\max} &= \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} M_{ki} M_{kj} \right]^{0,5} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Burada  $u_{ki}$ ,  $f_{ki}$ ,  $v_{ki}$ ,  $M_{ki}$  ve  $u_{kj}$ ,  $f_{kj}$ ,  $v_{kj}$ ,  $M_{kj}$  yapının belli bir noktasında i. ve j. modda oluşan modal tepkiler,  $\rho_{ij}$  ise çapraz korelasyon katsayısıdır.

$$\rho_{ij} = \frac{8 \xi^2 (1+r) r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4 \xi^2 r (1+r)^2} \quad (5.12)$$

Denklem 5.12’de  $r = \omega_i / \omega_j$  serbest titreşim frekanslarının oranı,  $\xi$  sönüm oranını göstermektedir.

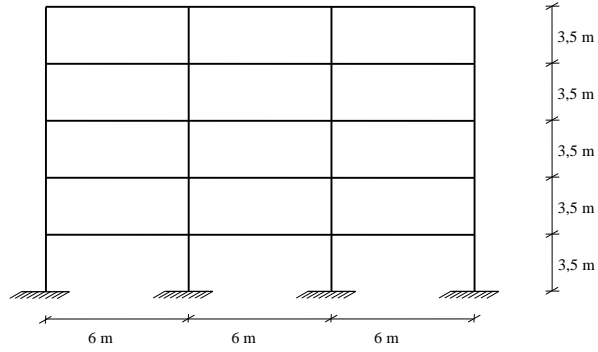
### 5.2.4. Mutlak değerlerin toplamı yöntemi

Tüm modlarda meydana gelen spektral değerlerin mutlak toplamının kullanılmasıdır. ABS yöntemi, diğer yöntemlere nazaran oldukça büyük değerler verdiği için güvenli yönde kalır fakat ekonomik olmadığından tercih edilmez.

$$\begin{aligned} u_{\max} &= |u_1| + |u_2| + \dots + |u_n| & f_{\max} &= |f_1| + |f_2| + \dots + |f_n| \\ v_{\max} &= |v_1| + |v_2| + \dots + |v_n| & M_{\max} &= |M_1| + |M_2| + \dots + |M_n| \end{aligned} \quad (5.13)$$

### 5.2.5. Mod katkılarının birleştirilmesi ile ilgili uygulama

Özellikleri verilen çerçevenin mod birleştirme yöntemi ile yatay deplasman değerlerinin ve deprem kuvvetlerinin hesabı ve mod katkılarının farklı yöntemlerle birleştirilmesine dair bir uygulama yapılmıştır.



Şekil 5.1. Beş katlı kayma çerçevesine ait görünüş

Kullanılan model 5 katlı çelik çerçevedir (Şekil 5.1). Hesap kolaylığı bakımından çerçeve kesme çerçevesi olarak alınmıştır ve her kat kendi içinde rijit diyafram olarak tanımlanmıştır. Etkin yer ivmesi katsayısı 0,4, bina önem katsayısı 1,0, taşıyıcı sistem davranış katsayısı 8,0, yerel zemin sınıfı  $Z_2$  spektrum karakteristik periyotları ( $T_a=0,15$ ,  $T_b=0,40$ ) olarak tanımlanmıştır. Çerçeveye ait rijitlik ( $k$ ) ve kütle ( $m$ ) matrisleri Çizelge 5.1'de, çerçeveye ait mod, periyot ve açısal hız değerleri Çizelge 5.2'de ve normal-normalize edilmiş modlar Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1. Çerçeveye ait rijitlik ve sönüm matrisleri

[k]					[m]				
201832	-100916	0	0	0	45,54	0	0	0	0
-100916	201832	-100916	0	0	0	45,54	0	0	0
0	-100916	201832	-100916	0	0	0	45,54	0	0
0	0	-100916	201832	-100916	0	0	0	45,54	0
0	0	0	-100916	100916	0	0	0	0	45,54

Çizelge 5. 2. Çerçeveye ait mod, periyot ve açısal hız değerleri

Mod	T	$\omega$
1	0,4689	13,399
2	0,1607	39,111
3	0,1019	61,654
4	0,0793	79,203
5	0,0696	90,335

Çizelge 5. 3. Normal ve normalize edilmiş modlar

Normal mod şekilleri					Normalize mod şekilleri				
0,0252	-0,0675	0,0884	0,0813	-0,0483	1	1	1	1	1
0,0483	-0,0884	0,0252	-0,0675	0,0813	1,919	1,3097	0,2846	-0,8308	-1,6825
0,0675	-0,0483	-0,0813	-0,0252	-0,0884	2,6825	0,7154	-0,919	-0,3097	1,8308
0,0813	0,0252	-0,0483	0,0884	0,0675	3,2287	-0,3728	-0,5462	1,0882	-1,3979
0,0884	0,0813	0,0675	-0,0483	-0,0252	3,5133	-1,2036	0,7635	-0,5944	0,5211

Birinci ve ikinci mod için periyot değerleri  $T_a = 0,40$  sn değerinden küçük olduğundan R katsayısı 8,0 alınır. Üçüncü mod için periyot değeri 0,1019 sn olduğundan deprem yükü azaltma katsayısı Denklem 5.14' deki gibi hesaplanır.

$$R_1 = 1,5 + (8 - 1,5) \frac{0,1019}{0,40} = 5,9161 \quad (5.14)$$

Spektrum katsayısı  $S(T)$ , yerel zemin koşullarına ve bina doğal periyodu  $T$ 'ye (sn) bağlı olarak ilk üç mod için Denklem 5.15' deki gibi hesaplanır.

$$S(T_1) = 2,5 \left( \frac{0,40}{0,4689} \right)^{0,8} = 2,2024 ; S(T_2) = 2,5 ; S(T_3) = 1 + 1,5 \frac{0,1019}{0,15} = 2,0191 \quad (5.15)$$

Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan spektral ivme katsayısı  $A(T)$  birinci mod için Denklem 5.16'daki gibi hesaplanır.

$$A(T_1) = A_0 I S(T_1) = 0,4 \cdot 1 \cdot 2,2024 = 0,8806 \quad (5.16)$$

0,05 sönüm oranı için tanımlanan elastik ivme spektrumunun ordinatı olan elastik spektral ivme,  $S_{ac}(T)$ , spektral ivme katsayısı ile yerçekimi ivmesi  $g$ ' nin çarpımının deprem yükü azaltma katsayısına bölünmesi ile elde edilir (Denklem 5.17). Doğal titreşim modları için ivme spektrumu ordinatları Çizelge 5.4'de verilmiştir.

$$S_{ac}(T) = A(T_1) g / R = 0,8806 \cdot 9,81 / 8 = 1,0798 \quad (5.17)$$

Çizelge 5. 4. Doğal titreşim modları için ivme spektrumu ordinatları

Mod	T	S(T <sub>i</sub> )	Ra	A(T <sub>i</sub> )	Sae(T)
1	0,4689	2,2014	8	0,8806	1,0798
2	0,1607	2,5	8	1	1,2263
3	0,1019	2,0191	5,9161	0,8076	1,3392
4	0,0793	1,7933	4,9376	0,7173	1,4252
5	0,0696	1,6955	4,514	0,6782	1,4739

Sisteme ait genelleştirilmiş kütle matrisi  $M_j = \{\phi_j\}^T [m] [\phi_j]$  yardımıyla hesaplanır. Birinci moda ait genelleştirilmiş kütle matrisi hesabı ve genelleştirilmiş kütle matrisi Çizelge 5.5’de, birinci mod için modal etkin kütle hesabı ise Çizelge 5.6’da görülmektedir.

Çizelge 5. 5. Genelleştirilmiş kütle matrisi

$\{\phi_j\}^T$	[m]	$[\phi_j]$
[1,000 1,919 2,6825 3,2287 3,5133]	$\begin{bmatrix} 45,54 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 45,54 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 45,54 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 45,54 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 45,54 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,000 \\ 1,919 \\ 2,6825 \\ 3,2287 \\ 3,5133 \end{bmatrix}$
$M_j = \{\phi_j\}^T [m] [\phi_j]$		
$M_j = \begin{bmatrix} 1577,8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 219,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 127,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 151,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 428,5 \end{bmatrix}$		

Çizelge 5. 6. Birinci mod için modal etkin kütle hesabı

[m]	$[\phi_j]$	$L_1 = \sum_{i=1}^5 m_i \phi_{1i}$	$M_1 = \sum_{i=1}^5 (m_i \phi_{1i}^2)$
$\begin{bmatrix} 45,54 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 45,54 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 45,54 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 45,54 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 45,54 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,000 \\ 1,919 \\ 2,6825 \\ 3,2287 \\ 3,5133 \end{bmatrix}$	562,12	1577,8

Birinci mod için birinci kata ait deplasman ve ivme değerleri Denklem 5.18 yardımıyla bulunabilir. İlk beş mod için deplasman ve ivme değerleri sırasıyla Çizelge 5.7 ve 5.8’de verilmiştir.

$$u_{11} = \frac{562,12}{1577,8} \frac{1,0798}{13,399^2} 1,0 = 0,002143 \text{ m} \quad \ddot{u}_{11} = 13,399^2 0,002143 = 0,3847 \quad (5.18)$$

Çizelge 5. 7. İlk beş mod için deplasman değerleri

U (m)	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod
U <sub>1</sub>	0,002143	0,000241	7,32E-05	2,41E-05	5,21E-06
U <sub>2</sub>	0,004112	0,000316	2,08E-05	-2E-05	-8,8E-06
U <sub>3</sub>	0,005748	0,000173	-6,7E-05	-7,5E-06	9,54E-06
U <sub>4</sub>	0,006919	-9E-05	-4E-05	2,63E-05	-7,3E-06
U <sub>5</sub>	0,007528	-0,00029	5,59E-05	-1,4E-05	2,72E-06

Çizelge 5. 8. İlk beş mod için ivme değerleri

U (m)	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod
$\dot{u}_1$	0,384694	0,368959	0,278147	0,151477	0,042542
$\dot{u}_2$	0,738222	0,483233	0,079169	-0,12585	-0,07158
$\dot{u}_3$	1,031944	0,263942	-0,25561	-0,04692	0,077887
$\dot{u}_4$	1,242063	-0,13754	-0,15192	0,164831	-0,05947
$\dot{u}_5$	1,351559	-0,44408	0,212371	-0,09003	0,022169

Birinci mod için birinci kata etkiyen yatay kuvvet değeri de Denklem 5.19 yardımıyla bulunabilir. İlk beş mod için yatay kuvvet değerleri ve serbest titreşim frekans oranları sırasıyla Çizelge 5.9 ve 5.10'da verilmiştir.

$$F_{11}=45,54 \cdot 0,384694 = 17,519 \text{ kN} \quad (5.19)$$

Çizelge 5. 9. İlk beş mod için yatay kuvvet değerleri

F (kN)	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod
F <sub>1</sub>	17,51895	16,80238	12,66681	6,898276	1,937352
F <sub>2</sub>	33,61862	22,00644	3,605351	-5,7313	-3,25961
F <sub>3</sub>	46,99471	12,01992	-11,6406	-2,13654	3,546963
F <sub>4</sub>	56,56357	-6,26369	-6,91862	7,5064	-2,70818
F <sub>5</sub>	61,54998	-20,2236	9,671378	-4,1000	1,009571

Çizelge 5. 10. Serbest titreşim frekans oranları (rij )

r <sub>ij</sub>	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
i=1	1	0,342589	0,217326	0,169173	0,148326
i=2	2,918949	1	0,634363	0,493807	0,432955
i=3	4,601388	1,576385	1	0,77843	0,682504
i=4	5,911113	2,025082	1,284637	1	0,87677
i=5	6,741921	2,309708	1,465193	1,14055	1

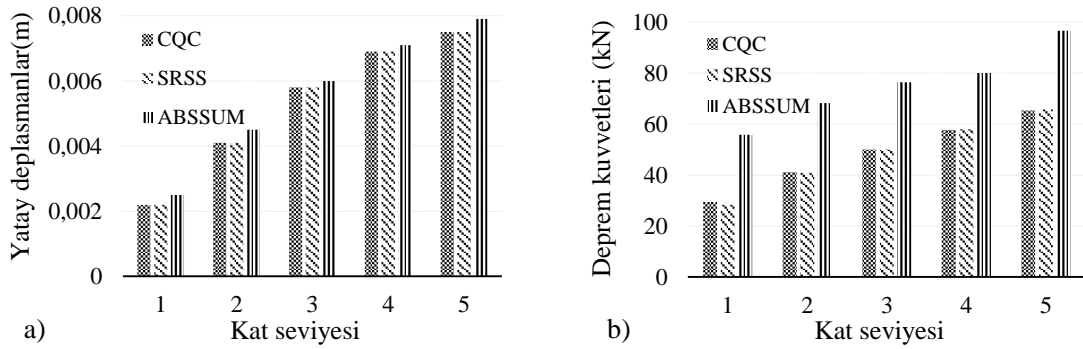
Tam karesel birleştirmeye göre hesap esasları yapılırken öncelikle çapraz korelasyon katsayıları hesaplanır. Bu katsayı Denklem 5.12 yardımıyla bulunabilir. 0,05 sönüm oranı için ( $\xi=0,05$ ),  $i=3$  ve  $j=2$ 'e ait örnek hesaplama Denklem 5.20'de, tüm modlara ait çapraz

korelasyon katsayıları ise Çizelge 5.11’de görülmektedir. Mod katkılarının birleştirilmesi ile bulunan deplasmanlar ve kuvvetler Şekil 5.2’ dedir.

$$\rho_{ij} = \frac{8 \cdot 0,05^2 (1+1,576385) 1,576385^{3/2}}{(1-1,576385^2)^2 + 4 \cdot 0,05^2 1,576385 (1+1,576385)^2} = 0,044152 \quad (5.20)$$

Çizelge 5. 11. Çapraz korelasyon katsayıları ( $\rho_{ij}$ )

$\rho_{ij}$	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
i=1	1	0,006857	0,002708	0,00172	0,001369
i=2	0,006857	1	0,044152	0,017789	0,012202
i=3	0,002708	0,044152	1	0,135794	0,062274
i=4	0,00172	0,017789	0,135794	1	0,365242
i=5	0,001369	0,012202	0,062274	0,365242	1



Şekil 5. 2. Mod katkılarının birleştirilmesi ile bulunan a) deplasmanlar b) kuvvetler

### 5.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

DBYYHY (2007)’de bina türü yapıların zaman tanım alanında doğrusal elastik ya da doğrusal elastik olmayan deprem hesabı için, kaydedilmiş depremlerin kullanılabilceği belirtilmektedir. Deprem hareketinin başlangıç ve son kısmı dışında kalan bölümü kararlı titreşim olarak düşünülebilir. Bu kayıtların kullanılması durumunda en az üç deprem yer hareketi dikkate alınacak ve bu kayıtlar aşağıda belirtilen şartları sağlamaları durumunda kullanılabilirlerdir; a) Kuvvetli yer hareketi kısmının süresi, binanın birinci doğal titreşim periyodunun 5 katından ve 15 saniyeden daha kısa olmayacaktır, b) Üretilen deprem yer hareketinin sıfır periyoda karşı gelen spektral ivme değerlerinin ortalaması  $A_{og}$ ’den daha küçük olmayacaktır, c) Yapay olarak üretilen her bir ivme kaydına göre 0,05 sönüm oranı

için yeniden bulunacak spektral ivme değerlerinin ortalaması, göz önüne alınan deprem doğrultusundaki birinci (hakim) periyod  $T_1$ 'e göre  $0,2T_1$  ile  $2T_1$  arasındaki periyodlar için,  $S_{ae}(T)$  elastik spektral ivmelerinin %90'ından daha az olmayacaktır.

İşlem zorluğu göz önüne alındığında, doğrusal elastik davranış gösteren yapılar, eşdeğer deprem yükü yöntemi ya da modların birleştirilmesi yöntemi ile çözümlenebilirler. Fakat doğrusal elastik davranış göstermeyen yapıların çözümlenmesinde zaman tanım alanında hesap yöntemlerinin kullanılması gerçeğe yakın davranışın elde edilebilmesi bakımından önem taşır. Bu yöntemde yönetmelikteki ana kuralların ötesine geçilerek deprem mühendisliği bilgileri ile gerçek veya üretilmiş deprem kayıtlarının kullanılması gerekir. Boyutlama sırasında gerçek deprem kaydının esas alınması, hesaba esas olan deprem büyüklüğü, merkez üssü ve odak uzaklığı ve zemin koşullarının gerçek durumla iyi bir şekilde uyuşturulması bakımından tercih edilir. Böylece pek çok belirsizlik önlenmiş olur (Celep ve Kumbasar, 2004).

Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sisteme ait genel hareket denklemi Denklem 3.31'de verilmişti. Bu sistem dinamik bir yer hareketine maruz kaldığında oluşacak yeni denklem şu şekilde olacaktır.

$$m [\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)] + c \dot{u}(t) + k u(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = -m \ddot{u}_g(t) \quad (5.21)$$

$$\ddot{u}(t) + 2\omega\xi \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (5.22)$$

Burada  $\omega$  sistemin doğal açısal frekansı,  $\xi$  ise sönüm oranıdır. Denklem 5.22 herhangi bir nümerik çözümleme yöntemiyle çözüldüğünde,  $\ddot{u}_g(t)$  yer ivmesi altında sabit bir sönüm oranı için yerdeğiştirme değerleri ve buna bağlı olarak da elemanlardaki iç kuvvetler ve taban kesme kuvveti gibi değerler zamana bağlı olarak bulunabilir. Bu tür çözüme zaman tanım alanında çözümleme denir (Uçar ve Merter, 2012).

#### 5.4. Modal Spektral Çözümleme Yöntemi

Zaman tanım alanında sayısal çözümleme, yerdeğiştirme vb. bir parametrenin zamana bağlı değişimini verir. Yapı tasarımında kullanılan değerler bu parametrelerin en



büyük olanlarıdır. Bu parametrelerin elde edilmesi için deprem spektrumlarının kullanılması hesaplar açısından büyük kolaylık sağlar. Bu spektrumların elde edilmesi tek serbestlik dereceli sistemler temel alınarak yapılırsa da, çok serbestlik dereceli sistemler için de belirli bir yaklaşımla gerçekleştirilebilir.

Çok serbestlik dereceli bir sistemin yer ivmesi etkisinde  $n$ . modda titreşimi sırasında oluşan herhangi bir büyüklük, bu modun periyoduna ve sönümüne bağlı olarak bulunacak spektral değerden hesaplanabilir. Bu hesap şekli, bu modda titreşimde bütün büyüklükler için geçerli olup, bunların hepsi aynı anda en büyük değerine erişir. Fakat diğer mod katkılarının bulunmasında aynı spektral değerinin kullanılması, bunların eş zamanlı olmamaları nedeniyle doğru olmaz. Spektral eğriler sadece en büyük değeri verecek şekilde hazırlandıkları için ve belirli bir andaki çeşitli mod katkılarının bulunmasında yeterli olmadığı için matematiksel bir yaklaşımlığın yapılması gerekli olur. Bütün modların en büyük katkılarının aynı zamanda olduğunu kabul ederek oluşacak herhangi bir büyüklüğün (yerdeğiştirme, hız, ivme, moment vb.) üst sınırı mutlak değerlerin toplamı kuralı ile abartılı olarak elde edilebilir. Bu değerler karelerin toplamının karekökü kuralı ile elde edilecek olursa, serbest titreşim frekansları ayrı olan sistemlerde zaman tanım alanında çözüm ile elde edilen değerlere oldukça yakın sonuçlar elde edilebildiği bilinmektedir (Celep ve Kumbasar, 2004).

### 5.5. Deprem Spektrumları

Yapıların deprem etkisine göre hesabında akla gelen çözüm yöntemi değişik deprem kayıtlarını ya da seçilen bir tanesini alıp hareket denklemlerini zaman veya frekans alanında analiz ederek yerdeğiştirme, hız, ivme ve elastik kuvvetlerin bulunmasıdır. Ancak pek çok durumda bu uzun hesapların yapılması hem yorucu hem de gereksiz olmaktadır. Daha elverişli bir çözüm yöntemi için deprem spektrumları kullanılmaktadır (Celep ve Kumbasar, 2004). Verilen bir depremin spektrumu, bu deprem etkisine maruz kalan tek serbestlik dereceli bir sistemin davranışının (deplasman, hız, ivme) maksimumunu, sistemin periyodunu temel alarak gösteren grafiklerdir. Yapılara zamana bağlı olarak etkiyen yüklerin mertebeleri değişik olabilir. Zamana bağlı bu değişimler, tasarımda etkili olmamaktadır.

Tasarıma esas olan, yapıya etkiyen yüklerin alabileceği en büyük değerlerdir. Davranış spektrumu, göz önüne alınan bir deprem yer hareketinin etkisi altında, doğal titreşim periyodu  $T$  olan lineer elastik tek serbestlik dereceli bir sistemde meydana gelen yapısal yer değiştirme veya toplam ivme büyüklüğünün titreşim periyoduna bağlı olarak ifade edildiği bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Davranış spektrumu yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli sistemlerin hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir (Doğan, 2015).

Dinamik zorlamaların farklı periyotlara sahip tek serbestlik dereceli yapı modellerinde oluşturacağı hareket genliklerinin gösterildiği grafiğe davranış spektrumu adı verilir. Benzer özelliklere sahip sistemlerin aynı dinamik etkiler altında benzer özellikleri gösterecekleri bilindiğinden, spektrumlar tasarımcıya hesap bakımından büyük kolaylık sağlarlar. Bu da bahsi geçen benzer özelliklerden kastedilen yapının periyodu, maruz kaldığı dinamik etki ve sönüm oranıdır. Spektrumlarda düşey eksen yerdeğiştirme, spektral hız veya spektral ivmeyi gösterirken, yatay eksen frekans ya da periyot değerini gösterir.

Yapıya etki eden yük fonksiyonu basit ve tanımlanabilir ise hareket denklemleri kurularak çözüm yapılabilir. Bu durumda davranış spektrumuna ihtiyaç duyulmaz. Fakat deprem gibi gelişigüzel dinamik etkiler altında yapının davranışını kestirmek ya da en azından fikir sahibi olabilmek için spektrumlara ihtiyaç duyulur (Yerlici ve Luş, 2014).

Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sisteme ait genel hareket denklemi sayısal integrasyon yöntemleri yardımıyla çözülecek olursa, zamana bağlı olarak değişen yer ivmesi altında sistem yer değiştirmesi ve buna bağlı olarak taban kesme kuvveti ve iç kuvvet değerleri hesap edilebilir. Bu hesaplar doğal titreşim periyodu farklı sistemler için tekrar edilir ise, farklı kütle ve rijitlik değerlerine sahip yapılar için de hesap yapılması mümkün kılınır. Çünkü periyot kütle ve rijitliğe bağlı olarak bulunan bir parametredir (Kırçıl ve Hancıoğlu, 2005).

### **5.5.1. Spektrum değerlerinin hesabında Duhamel integrali kullanılması**

Bölüm 3.1.5’de bahsedilmiş olan Duhamel integrali yardımıyla yerdeğiştirme, hız ve ivme spektrumlarının sayısal değerlerini elde etmek mümkündür. Tek serbestlik dereceli

sönümlü bir sistemine ait anlık yerdeğiştirme değerlerinin bulunduğu Duhamel integrali açışsal hız ve ivmeler cinsinden aşağıda belirtilen şekilde yazılabilir.

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_0} \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (5.23)$$

Denklem 5.23'den elde edilecek en büyük yerdeğiştirme değeri spektrumun ilgili periyoduna ait noktayı tarif eder.

$$u_{\max} = \max |u(t)| \quad (5.24)$$

Hız ve ivme spektrumlarının elde edilmesi Denklem 5.24'ün birinci ve ikinci türevlerinin alınması ile mümkündür. A(t) değişkeni Denklem 5.24'deki gibi tanımlanırsa Denklem 5.23 Denklem 5.26'ya dönüşür.

$$A(t) = e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (5.25)$$

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_0} \int_0^t \ddot{u}(\tau) A(t) \quad (5.26)$$

Denklem 5.25 ve 5.26'nın zamana göre birinci türevleri alınır.

$$\dot{u}(t) = -\frac{1}{\omega_0} \int_0^t \ddot{u}(\tau) \dot{A}(t) \quad \dot{A}(t) = -\xi \omega A(t) + \omega_0 e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (5.27)$$

Burada işlem kolaylığı bakımından ifadede yeni bir B(t) değişkeni tanımlanabilir.

$$B(t) = e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (5.28)$$

Bu durumda Denklem 5.27 Denklem 5.29'a dönüşür.

$$\dot{A}(t) = -\xi \omega A(t) + \omega_0 B(t) \quad \Rightarrow \quad \dot{u}(t) = -\xi \omega u(t) - \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (5.29)$$

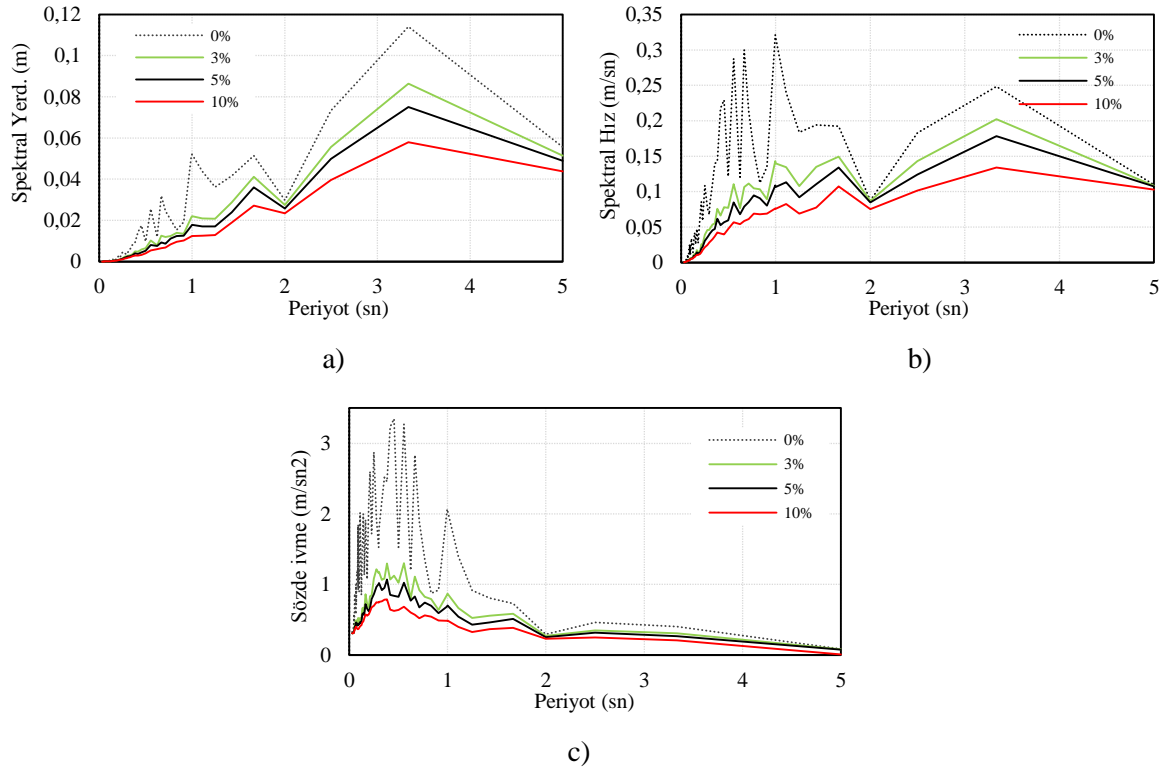
Aynı şekilde  $\dot{u}(t)$  hız ifadesinin zamana göre birinci türevi alındığında bulunan ivme fonksiyonu Denklem 5.30'da verilmiştir.

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 u(t) + 2\xi^2 \omega^2 u(t) + 2\xi \omega \int_0^t \ddot{u}(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_0(t-\tau) d\tau \quad (5.30)$$

Tek serbestlik dereceli ve farklı titreşim periyodlarına sahip sistemler belirli bir deprem ivmesine maruz kaldıklarında farklı yer değişimleri yaparlar. Bu yerdeğişirmelerin maksimumu alınarak bir grafiğe aktarılır ise ortaya yerdeğiştirme spektrum eğrisi çıkar. Spektral hız ve ivme grafiklerine duhamel integrali ile ulaşılabileceği gibi, daha kolay bir bakış açısı da şu şekildedir; yapının deprem esnasındaki hızı, yapının şekil değiştirme esnasındaki enerji denklemi yazılarak bulunabilir.

$$\frac{1}{2} k u(t)^2 = \frac{1}{2} m v(t)^2 \quad (5.31)$$

$$v(t) = \sqrt{\frac{k}{m}} u(t) = \omega u(t) = \frac{2\pi}{T} u(t) \quad (5.32)$$



Şekil 5. 3. Çeşitli davranış spektrum örnekleri a) Spektral yerdeğiştirme, b) spektral hız, c) sözde ivme ( $\xi = 0,0/0,03/0,05/0,10$ )

İvme tepki spektrumunu elde etmek için yapının maruz kaldığı en büyük yerdeğiştirme anındaki iç kuvvetlerini veren bağıntı Denklem 5.33'de verilmiştir. Şekil 5.3' de çeşitli davranış spektrum örnekleri görülmektedir.

$$f = m \ddot{u}(t) = k u_{\max}(t) \quad \Rightarrow \quad \ddot{u}(t) = \omega^2 u_{\max}(t) \quad (5.33)$$

İvme spektrumlarının, periyodu farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin, belirli bir yer hareketi altında, maruz kalacakları toplam ivmenin en büyük değerlerinin göstereceği düşünülebilir. Ancak, yapıda oluşan iç kuvvetlerin, eylemsizlik kuvveti cinsinden hesabında kullanılacak spektrum, toplam ivme yerine, yer değiştirmenin en büyük değerini aldığı andaki ivmeyi gösterir. Toplam ivmenin en büyük değeri yerine kullanılan bu ivmeye sözde ivme (pseudo acceleration), periyotları farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin sözde ivmeyi gösteren spektruma da sözde ivme davranış spektrumu (pseudo acceleration spectra) adı verilir. Sözde ivme davranış spektrumu elde edilebilmesi için, yerdeğiştirme spektrumunda bulunan değerlerin her bir periyot değeri için  $\omega^2 u_{\max}(t)$  değeri ile çarpılması gerekir. Böylece sözde spektral ivme (pseudo spectral acceleration – PSA) değerleri bulunmuş olur (Kırçıl ve Hancıoğlu, 2005).

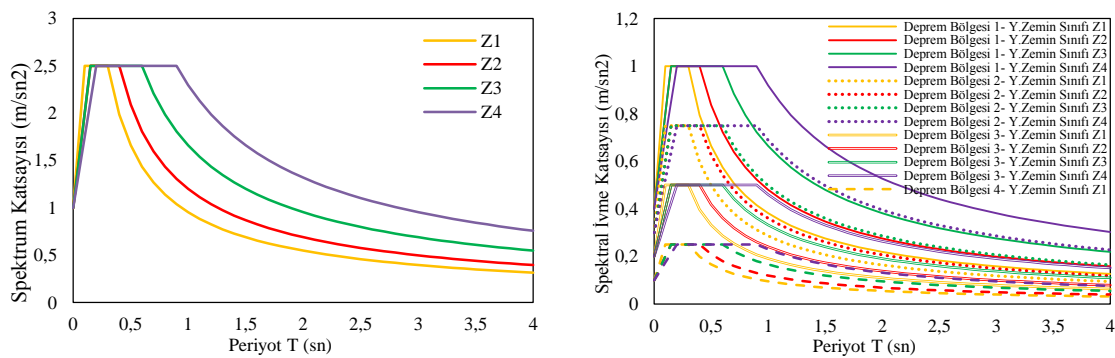
Sözde ivme davranış spektrumları sadece bir yer kaydı için geçerli olduklarından, farklı kayıtların birbirleri ile mukayese edilebilmesi için, bu spektrum değerleri, ait oldukları yer hareketinde oluşmuş olan en büyük yer ivmesi ile (peak ground acceleration) bölünerek normalize edilirler.

Davranış spektrumları, belirli bir deprem için çizilmektedir. Ancak, yapı hesabı açısından, göz önüne alınan bir bölgeyi veya yapı yerini etkilemiş bir deprem, bu bölgeyi etkilemiş diğer bütün depremleri temsil etmez. Bir yapının bulunduğu bölge için birden çok deprem göz önüne alınarak, her biri için spektral spektrumlar çizilip; sonra da bütün bu spektrum eğrilerini dikkate alarak bir zarf eğrisi geçirilirse, hesapta bu zarf eğrisinin göz önüne alınması isabetli olacaktır (Doğan, 2015).

Ortaya çıkan bu yeni spektruma tasarım spektrumu adı verilmektedir. Davranış spektrumları aynı bölgeden alınmış olmalarına rağmen her biri diğerinden farklı özellik gösterebilirler. Çünkü hiçbir yer hareketi bir diğerine benzemez ve özeldir. Geçmişte oluşan

hiçbir yer hareketi, gelecekte oluşacak bir yer hareketini, kendi başına temsil edemez. Kesin bir hatları olmamakla birlikte, kırıklı bir yapıya sahip olduklarından, taşıyıcı sistem projelendirilmesi açısından uygun olmamaktadırlar. Tasarım spektrumları farklı istatistiksel yöntemlere dayalı olarak elde edilebilirler. Bunlardan başlıcaları farklı spektrumların ortalaması ile elde edilen tasarım spektrumu, ortalamaya standart sapma eklenerek elde edilen tasarım spektrumu ve tüm spektrumları içine alacak şekilde elde edilen tasarım spektrumdur.

Deprem yönetmeliklerinde ise, spektrum eğrisinin biçimi genellikle standart hale getirilir ve spektral ivmeler birtakım deprem parametrelerine bağlanarak analitik olarak ifade edilir. Şekil 5.4’ de farklı zemin sınıfları için tasarım spektrum ve spektral ivme katsayıları bulunmaktadır.



Şekil 5. 4. Farklı zemin sınıfları için tasarım spektrum ve spektral ivme katsayıları

### 5.5.2. Yer hareketinin zaman tanım alanında ölçeklenmesi

Deprem ivme kayıtlarının ölçeklenmesi yöntemlerinden biri olan zaman tanım alanında ölçekleme yönteminde, ivme kaydı 1’den büyük ya da 1’den küçük bir katsayı ile çarpılarak belirlenen periyot aralığında hedef tasarım ivme spektrumuna uygun hale getirilmeye çalışılır. Katsayı ile orantılı olarak spektral ivme kaydı bir bütün olarak aşağı veya yukarı yönde ötelenir. Yapılan bu işlem kaydın frekansını değiştirmez, sadece genliğini değiştirir. Bu yöntem ölçeklenmiş hareketin spektrumu ile hedef spektrum arasındaki farkın küçültülmesi ilkesine dayanır. Farkın küçültülmesi ise en küçük kareler metodu vasıtasıyla yapılır. Ölçeklenmiş ve hedef spektrum arasındaki farkın karesi ‘Fark’ olarak adlandırılıp, istenilen periyodlar arasında bu farkın karesi alınacak olur ise Denklem 5.34 elde edilir.

$$|Fark| = \int_{T_A}^{T_B} [\alpha S_a^{\text{gerçek}}(t) - S_a^{\text{hedef}}(t)]^2 dt \quad (5.34)$$

Burada  $S_a^{\text{hedef}}$  hedef ivme davranış spektrumu,  $S_a^{\text{gerçek}}$  mevcut (gerçek) deprem kaydının ivme spektrumu,  $\alpha$  doğrusal ölçekleme katsayısı,  $t$  salınımın periyodu,  $T_A$  ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının alt sınırı,  $T_B$  ölçeklemenin yapılacağı periyot aralığının üst sınırıdır. Fark miktarının küçülmesi için “Fark” fonksiyonunun doğrusal ölçekleme katsayısına göre türevi sıfır olmalıdır. Bu fonksiyonunun  $d\alpha$ 'ya göre türevi alınarak sıfıra eşitlendiğinde Denklem 5.35 elde edilir.

$$\min|Fark| \Rightarrow \frac{d|Fark|}{d\alpha} = 0 \quad (5.35)$$

Denklem 5.34'deki integraller ayrık forma çevrilerek  $T_A$ 'dan  $\Delta t$  artımlarla  $T_B$ 'ye kadar devam eden toplam haline dönüştürülerek Denklem 5.36 elde edilir (Özdemir ve Fahjan, 2007).

$$\alpha = \frac{\sum_{T_A}^{T_B} S_a^{\text{gerçek}}(t) S_a^{\text{hedef}}(t)}{\sum_{T_A}^{T_B} (S_a^{\text{gerçek}}(t))^2} \quad (5.36)$$

## 5.6. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri

Modların birleştirilmesi yönteminde, her bir mod için değerlerin süperpozisyonu kullanıldığından, sistemlerin doğrusal olmayan hareketlerinin incelenmesinde bu yöntem yeterli hassasiyeti sağlamaz. Eğer davranış doğrusal elastik değilse, süperpozisyon ilkesi geçerliliğini yitirir. Ayrıca klasik olmayan sönüm ve ya da elastik ötesi davranış söz konusu ise, hareket denklemlerinin ayrıklaştırılması sonucu elde edilen modların birleştirilmesi yöntemi geçerli olmaz ve bu durumda hareket denklemlerinin sayısal çözümü gerekli olur (Yaylı, 2004).

Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde hareketin zaman-tanım alanında incelenmesi sayısal integrasyon yöntemleri ile yapılabilir. Bir yapının hareket denklemlerinin yazılabilmesi için gerekli olan kütle, rijitlik, sönüm özellikleri ile yapıya etki eden yükler bilindiği takdirde sayısal integrasyon yöntemleri kullanılarak yapının dinamik

hareketi bulunabilir. Bu yöntemler önceden bilinen çok küçük zaman dilimleri için (yapı doğal titreşim periyodunun onda birinden daha küçük) üretilen denklemleri, ardışık zaman dilimleri için tekrarlayıp hareketi tahmin etmeye çalışır (Yerlici ve Luş, 2014). Zaman dilimleri seçilirken dikkat edilecek husus yüklerdeki ani değişimler ile rijitlik ve sönüm fonksiyonlarındaki değerleri, harekete sağlıklı yansıtabilecek hassasiyette olmasıdır.

Sayısal integrasyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlar sürekli bir fonksiyon gibi değildir. Hareketin bilinen yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinden yola çıkılarak  $\Delta t$  adım sonrasındaki değerlere ulaşılması, sayısal integrasyon yöntemlerinin temel felsefesidir. Bu yöntemler günümüzde bilgisayar yardımı ile kolaylıkla uygulanabilmektedir. Aşağıda tek serbestlik dereceli sistemlerin çözümlenmesinde kullanılan bazı integrasyon yöntemlerine değinilecektir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde ise, tek serbestlik dereceli sistemlerden farklı olarak hesaplamalar sırasında kullanılan katsayıların yerini matrisler almaktadır.

### 5.6.1. Taylor seri açılımı

Taylor seri açılımında, bir fonksiyonun bir noktadaki değeri, fonksiyonun kendisi ve türevlerinin başka bir noktadaki değerlerine bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Herhangi bir  $t$  zamanında  $\Delta t$  kadar aralıklarla  $n$  adımda gelindi ise,  $t$  anında bilinen değerlerden fonksiyonun  $t-\Delta t$  ve  $t+\Delta t$  anları için alacağı değerler,  $t=n \Delta t$  olmak üzere Denklem 5.37 ve 5.38'de verilmiştir.

$$u_{n+1} = u_n + \dot{u}_n \Delta t + \ddot{u}_n \frac{\Delta t^2}{2!} + \ddot{\ddot{u}}_n \frac{\Delta t^3}{2!} + \dots + x \Delta t^z \quad (5.37)$$

$$u_{n-1} = u_n - \dot{u}_n \Delta t + \ddot{u}_n \frac{\Delta t^2}{2!} - \ddot{\ddot{u}}_n \frac{\Delta t^3}{2!} + \dots + x \Delta t^z \quad (5.38)$$

### 5.6.2. Merkezi farklar yöntemi

Taylor seri açılımı ile ifade edilen  $u_{n+1}$  ve  $u_{n-1}$  denklemleri sırasıyla alt alta toplanır ve çıkartılır.



$$u_{n+1} + u_{n-1} = 2 u_n + \ddot{u}_n \Delta t^2 + x \Delta t^4 \quad (5.39)$$

$$u_{n+1} - u_{n-1} = 2 \dot{u}_n \Delta t + x \Delta t^3 \quad (5.40)$$

Son terimler ihmal edilir ise Denklem 5.41 elde edilir.

$$\dot{u}_n = \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2 \Delta t} \quad \ddot{u}_n = \frac{u_{n+1} - 2 u_n + u_{n-1}}{\Delta t^2} \quad (5.41)$$

Bu ifadeler tek serbestlik dereceli sistemin hareket denkleminde yerine yazılır.

$$m \left[ \frac{u_{n+1} - 2 u_n + u_{n-1}}{\Delta t^2} \right] + c \left[ \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2 \Delta t} \right] + k u_n = F_n \quad (5.42)$$

Denklem 5.42'de tek bilinmeyen  $u_{n+1}$  değeridir. İşlem kolaylığı bakımından benzer terimler bir araya getirilir.

$$u_{n+1} = A_1 u_n + A_2 u_{n-1} + A_3 F_n \quad (5.43)$$

$A_1$ ,  $A_2$  ve  $A_3$  sırasıyla Denklem 5.44'deki gibi ifade edilebilir.

$$A_1 = A_3 \left( \frac{2m}{\Delta t^2} - k \right) \quad A_2 = A_3 \left( \frac{c}{2 \Delta t} - \frac{m}{\Delta t^2} \right) \quad A_3 = \frac{1}{\left[ \frac{m}{\Delta t^2} + \frac{c}{2 \Delta t} \right]} \quad (5.44)$$

Bu integrasyon yönteminde anlamlı sonuç elde edilebilmesi için  $\Delta t < T/\pi \approx 0,318 T$  şartı sağlanmalıdır (Yerlici ve Luş, 2014).

### 5.6.3. Newmark yöntemi

Newmark (1959) yılında yayınlanan çalışmasında ivmenin integrasyonuna dayanan yöntemler için aşağıdaki bağıntıları önermiştir.

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1-\gamma)\Delta t \ddot{u}_i + \gamma\Delta t \ddot{u}_{i+1} \quad (5.45)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + (0.5-\beta)\Delta t^2 \ddot{u}_i + \beta\Delta t^2 \ddot{u}_{i+1} \quad (5.46)$$

Denklem 5.45 ve Denklem 5.46' da  $\gamma$  ve  $\beta$  gibi iki değişkenden söz edilir.  $\gamma$  değişkeninin ek sönüme benzer bir etki yaratmasını engellemek için  $\gamma = 0,5$  olarak seçilir.  $\beta$  ise bu çalışmada 0,25 seçilerek ortalama ivme yöntemi denklemleri elde edilmiş olur. Yerdeğiştirme, hız, ivme ve kuvvet bileşenlerinin  $t = i$  ve  $t = i+1$  zaman dilimleri arasında alacağı değerlerin fark ifadeleri Denklem 5.47'de verilmiştir.

$$\Delta u_i = u_{i+1} - u_i \quad \Delta \dot{u}_i = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i \quad \Delta \ddot{u}_i = \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i \quad \Delta f_i = f_{i+1} - f_i \quad (5.47)$$

Bu ifadeler Newmark denklemlerinde yerlerine konursa Denklem 5.48 ve 5.49 elde edilir. Sistemin genel hareket denklemi Denklem 5.50'deki gibidir.

$$\Delta u_i = \Delta t \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_i \quad \Delta \dot{u}_i = \Delta t \ddot{u}_i + \gamma \Delta t \ddot{u}_i \quad (5.48)$$

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad \Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad (5.49)$$

$$m \Delta \ddot{u}_i + c \Delta \dot{u}_i + k \Delta u_i = \Delta f_i \quad (5.50)$$

$\Delta \ddot{u}_i$  ve  $\Delta \dot{u}_i$  ifadeleri hareket denkleminde yerine yazılarak, yerdeğiştirme artışının ( $\Delta u_i$ ) bulunması için gerekli olan ve Denklem 5.51'de verilen bağıllık bulunur.

$$\bar{k} \Delta u_i = \Delta \bar{f}_i \quad (5.51)$$

Burada etkili rijitlik ve etkili kuvvet artışı Denklem 5.52 ve Denklem 5.53'de verilmiştir.

$$\bar{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m \quad (5.52)$$

$$\Delta \bar{f}_i = \Delta f_i + \left( \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c \right) \dot{u}_i + \left[ \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] \ddot{u}_i \quad (5.53)$$

## 5.7. Çelik Yapılarda Plastikleşme ve Dizayn

Çelik yapılar ülkemizde daha çok endüstriyel alanda, geniş açıklıklı çatılarda ve bazı köprülerde ve sınırlı sayıda uygulama alanı bulmuşlardır. Çelik yapıların en büyük avantajı betonarme yapı sistemlerine nazaran hafif olmaları ve dolayısıyla düşük deprem yüklerine maruz kalmalarıdır. Bununla beraber yüksek süneklik özelliği sayesinde deplasman kabiliyetinin fazla olması, büyük açıklıkların kolonsuz olarak geçilebilmesi, mimari zenginlik ve yaratıcılığa açık olması, uygulama ve tadilat kolaylıkları ve sürdürülebilir bir malzeme olması üstün özellikleri arasındadır. Çelik yapılara süneklik özelliği sadece malzemenin düktil oluşundan ileri gelmez. Özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde (düğüm noktaları) sağlanacak elastik ötesi davranışlar (sınırlandırılabilir seviyede plastikleşme), dinamik etkiler sonucu ortaya çıkan enerjinin açığa çıkmasında ve yapısal elemanların hasar seviyelerinin düşük seviyede tutulmasında büyük rol oynar.

Bir eleman kesitinin ya da taşıyıcı bir sistemin üzerinde taşıdığı yükte belirgin bir değişiklik olmaksızın, elastik sınır ötesinde yaptığı şekil değiştirme yeteneğine süneklik denir. Sayısal olarak ifade edilmek istenirse, göçme (kopma) anındaki şekil değiştirme değerinin elastik sınır bittiği an ölçülen şekil değiştirme değerine oranı olarak tanımlamak mümkündür. Çelik malzemeler kopma öncesi büyük şekil değiştirme yapabildiğinden sünektirler. Bu sebeple, üzerlerine gelen dinamik etkileri elastik ötesi davranış ile sönmüleyebilirler. Bu sebeple sünek davranış gösteren yapıların maruz kalacakları dinamik etkinin şiddeti, sünek olmayan yapılara göre daha düşüktür.

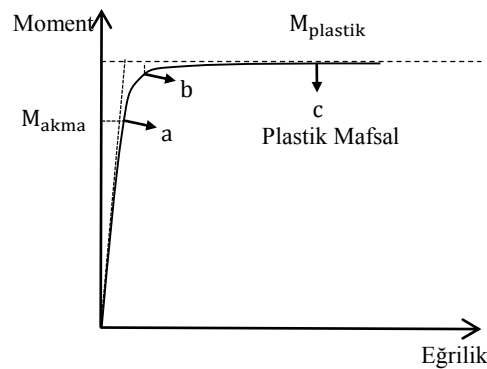
Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (TS 648, 1980) emniyet gerilmeleri yöntemini esas alır. Bu yöntemde yapı elemanlarının akma, kopma ve burkulmasına izin verilmez. DBYYHY (2007)' de yapıların deprem güvenliğinin sağlanabilmesi için doğrusal elastik olmayan davranışı esas alan yöntemlerden bahsedilir. Bu yöntemler yapı elemanlarının akma, kopma ve burkulmasına belirli sınırlar içinde izin vermektedir. Bu durumda sünek davranış gösterecek elemanların önceden belirlenmesi gerekir.

Yapıda oluşabilecek büyük hasar ya da toptan göçme riskinin önlenmesi için taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranış yapması beklenir. Bu davranış, malzemenin ve taşıyıcı sistem elemanlarının sünekliği ile mümkün olur. Deprem esnasında yapıya gelen enerjinin

büyük bir bölümü elastik sınırın ötesindeki titreşimlerle ve yapının dayanımını korunacak şekilde absorbe edilir. Plastik şekil değiştirmeye uğrayan kesitlerde enerji sönmülendirken diğer kesitler de yıkıcı etkiden korunmuş olurlar. Önceden belirlenen kesitlerde kontrollü bir plastik mafsall oluşumu ancak sistemin yüksek dereceden hiperstatik olması ile mümkündür. Bu tip sistemler üzerlerine gelen enerjiyi şekil ve yerdeğiştirme kabiliyeti ile sönmülendirler (Celep, 2007).

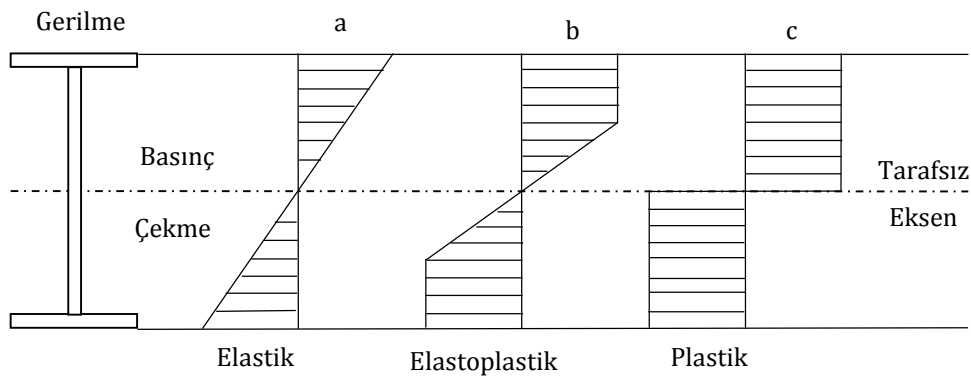
### 5.7.1. Yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışının nedenleri

Yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışın temelinde iki nedeni vardır. Birincisi malzemenin doğrusal-elastik olmamasından dolayı gerilme-şekildeğiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) bağıntılarının (bünye denklemleri) doğrusal olmaması, ikincisi de geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin (ve bazı hallerde geometrik süreklilik denklemlerinin) doğrusal olmamasıdır. Bu iki nedenin beraber bulunduğu yani hem malzeme hem de geometri bakımından doğrusal olmayan sistemler de mevcuttur. Malzemenin doğrusal olmayan davranışının dikkate alındığı teoriye elastoplastik teori, geometri değişimleri nedeniyle denge denklemlerinin doğrusal olmamasının dikkate alındığı teoriye ikinci mertebe teorisi ve her iki bakımdan doğrusal olmayan davranışının dikkate alındığı teoriye de ikinci mertebe elastoplastik teori denilmektedir. Bu teoride doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin sistem üzerinde sürekli bir dağılım gösterdiği yöntemler veya doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin plastik mafsall adı verilen (önceden belirlenmiş) bölgelerde toplandığı ve sistemin bu bölgeler dışında doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilen, plastik mafsall hipotezine dayanan yöntemler kullanılabilir (Coşgun, 2003).



Şekil 5. 5. Moment-egrilik ilişkisi

Şekil 5.5’ de bir I profiline ait moment-eğrilik ilişkisi verilmiştir. A noktasında  $\sigma_a$  akma sınır değerine ulaşılmıştır ( $M=M_{akma}$ ). Burada elastik davranış sona ermektedir. Moment b noktasına kadar arttırılacak olursa tüm başlığın ve gövdenin bir kısmının plastikleştiği görülebilir. C noktasında ise tüm kesitin plastikleştiği görülür ki bu noktada okunan moment değeri plastik moment olarak isimlendirilir. Plastikleşme momentine ulaşıldıktan sonra, sabit bir moment etkisi altında serbestçe dönebilen kesite plastik mafsal denilmektedir. Bu idealleştirme I kesitler söz konusu olduğunda malzemenin başlıklarda toplandığı anlamına gelir. Böylelikle kesit  $M_p$  plastikleşme momentine ulaşıncaya kadar elastik davranacaktır ve bu değere ulaşıldıktan sonra eğrilik sonsuza giderken moment sabit kalacaktır (Arda ve Uzgider, 1983).



Şekil 5. 6. Basit eğilme etkisi altındaki bir enkesitin gerilme-şekildeğiştirme davranışı

Plastik mafsal kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için ortasından P yükü ile yüklenmiş basit bir kiriş ele alınsın. P yükü en dış lifteki gerilme değerini  $\sigma_a$  sınır değerine ulaştırdığında bu yük daha da arttırılacak olursa taraflsız eksene doğru diğer liflerde de akma gerilmesine ulaşılır (Şekil 5.6). Tüm kesitin akma sınır değerine ulaşması ile bu değer daha fazla artmayacağından kesitte oluşan deformasyonlar artar ve büyük değerlere ulaşabilir. Kesitin sabit yük altında sabit bir momenti taşımaya devam ettiği noktaya plastik mafsal adı verilir.

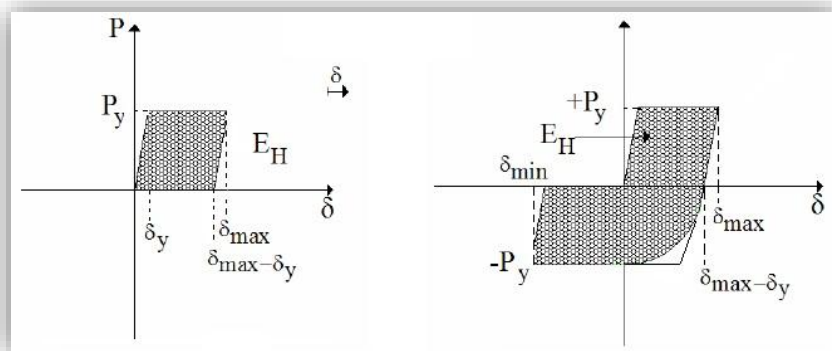
### 5.7.2. Plastik mafsal hipotezi

Toplam yerdeğiştirmenin doğrusal yerdeğiştirmeye oranı olarak tabir edilebilen süneklik oranının büyük olduğu sistemlerde, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin plastik mafsal adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin

doğrusal-elastik davrandığı kabul edilebilen bir varsayımdır. Bu varsayım plastik mafsallık hipotezi olarak isimlendirilmektedir. Bu hipoteze göre; bir kesitteki oluşan eğilme momenti değeri, plastik moment değerine eşit olunca ( $M_p$ ) o kesitte bir plastik mafsallık ortaya çıkar. Daha sonra, kesitteki eğilme momenti sabit kalır ve kesit serbestçe döner. Mafsaldaki plastik dönme artarak dönme kapasitesine erişince kesit göçer ve kullanılamaz hale gelir. Malzeme sünek olduğundan kopmadan ya da kırılmadan büyük şekil değişimi yapabilir ve plastik taşıma gücü kapasitesine kadar kesitte herhangi başka sebepten bir güç tükenmesi yaşanmaz. Pekleşme etkileri ise ihmal edilir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine olan etkisi ihmal edilebilir, yani taşıyıcı sistemin yerdeğiştirme yapmamış olduğu varsayılır. Birleşim noktalarının (düğüm noktaları) stabilitesini kaybetmediği ve üzerlerine gelen momenti güvenli bir şekilde aktardıkları da hipotezle ilgili bir başka varsayımdır. Yükler ve taşıyıcı sistem aynı düzlem içinde yer alır (Özer, 2009; Arda ve Uzgider, 1983).

### 5.7.3. Çeliğin enerji yutma özelliği

Çelik bir numune üzerine çekme kuvveti uygulandığında ilk olarak elastik bir davranış ve akma dayanımının ardından plastik davranış gözlenir. Plastik davranış gösteren numune üzerindeki yük kaldırılır ise numune üzerindeki gerilim azalacak ve bir miktar kalıcı deformasyon oluşacaktır. Aynı şekilde numune üzerine ilk başta basınç kuvveti uygulandığında, akma dayanımının negatif değerine kadar elastik ardından plastik davranış gözlenir. Bir miktar plastikleşen numune üzerine aksi yönde bir kuvvet uygulanacak olur ise hiç kuvvet uygulanmayan numuneye göre akma mutlak olarak daha düşük bir değerde başlar ki bu olaya Baushinger etkisi adı verilir (Şekil 5.7).



Şekil 5. 7. Baushinger etkisi (Deren vd., 2012 )

Bu etkiye sebep olan olay numune üzerinde gerilmeye bağılı olarak oluşan dislokasyondur (Deren vd., 2012 ). Bir çelik elemanın plastik uzaması ve kısılması için gerekli olan enerji, üzerine uygulanan kuvvet ve ortaya çıkan plastik deformasyonun çarpılması ile elde edilir (Denklem 5.54).

$$E_h = P_y(\delta_{\max} - \delta_y) \quad (5.54)$$

Tam bir çevrimde ortaya çıkan histeretik enerji kuvvet deformasyon eğrisinin çevrelediği alana tekabül eder (Denklem 5.55). Burada Bushinger etkisi ihmal edilmiştir.

$$E_h = P_y [(\delta_{\max} - \delta_y) + (\delta_{\max} - \delta_{\min} - 2\delta_y)] \quad (5.55)$$

### 5.8. Çelik Yapıların DBYYHY'e (2007) Uygun Olarak Boyutlandırılması

Çalışmada kullanılan çelik çerçevelerin ve üç boyutlu modellerin, DBYYHY (2007)'de verilen kurallar esas alınarak yapılan boyutlandırılma detayları verilecektir. Öncelikle sistemler tasarlanacak, gerekli analizler yapılarak eleman en kesit değerleri seçilecektir. Analiz ve boyutlandırma işlemleri yapılırken ek olarak TS 648 (1980) ve TS 498 (1997)'ye başvurulmuştur. Profil ve plan görünüşleri (üç boyutlu modeller için) verilmiş olan çelik sistemlere ait ön boyutlandırma ve tipik elemanların boyutlandırma hesapları yapılacaktır. İki ve üç boyutlu çerçevelerin yatay yük taşıyıcı sistemi DBYYHY (2007) Madde 4.2 ve 4.3'de belirtildiği üzere süneklik düzeyi normal ve ya süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçeveler olarak seçilmiştir. Kolonların temele ankastre oturduğu varsayımı yapılacaktır. Kiriş kolon birleşim noktalarının yeterli rijitliğe sahip olduğu varsayılacak, plastikleşmenin kolon ya da kirişte meydana geldiği düşünülecek ve bu sebeple düğüm noktaları için hesap yapılmayacaktır. Taşıyıcı sistem kolon ve kiriş elemanları Avrupa Norm Profilleri kullanılarak boyutlandırılacaklardır. Sistem tasarımında TS 648 (1980)'de belirtilen Fe37 ve ya Fe52 sınıfı yapı çeliği ve taşıyıcı sistem elemanları için IPE, HEA, HEB (Avrupa Norm) profilleri kullanılacaktır. Yapısal çelik sınıflarına ait mekanik özellikler Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5. 12. Yapısal çelik mekanik özellikleri (MPa)

Kısa Gösterim	$\sigma_c$	$\sigma_a$	$\sigma_{cem}$	$\tau_{em}$	E	G
Fe37	363-491	235	82	122	206182	794434
Fe52	510-608	352	141	212		

Üç boyutlu modellerde kat döşemeleri, çelik kirişlere mesnetlenerek trapez profilli saç levhalar üzerine dökülen betonarme kompozit döşeme sistemi olarak seçilmiştir. Betonarme döşeme ile çelik kirişlerin etkileşimi ihmal edilmiştir. Kolonlar kuvvetli eksenleri doğrultusunda rijit, zayıf eksenleri doğrultusunda mafsalı olacak şekilde teşkil edilmiştir. İkincil kirişler ana kiriş ile bağlantı noktalarında moment taşımayacaklardır.

Katlara etkiyen eşdeğer deprem yükleri ve birinci doğal titreşim periyodunun belirlenmesi; göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti)  $V_t$  Denklem 5.1 yardımıyla ve binanın deprem doğrultusundaki birinci doğal titreşim periyodu, Denklem 5.2 ile hesaplanacaktır. Toplam eşdeğer deprem yükünün  $\Delta F_n$  tepe kuvveti dışında geri kalan kısmı, N'inci kat dâhil olmak üzere, binanın katlarına Denklem 5.4'de belirtildiği gibi dağıtılacaktır.

Deprem yüklerinin etkime noktaları; DBYYHY (2007)'de, döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalıştığı binalarda, her katta iki yatay yerdeğiştirme bileşeni ile düşey eksen etrafındaki dönme, bağımsız yerdeğiştirme bileşenleri olarak göz önüne alınacağı belirtilmektedir. Ek dışmerkezlik etkilerinin hesaba katılabilmesi için, yatay yüklerin depremin etkidiği doğrultuya dik kenar boyunun  $\pm 5\%$ 'i ve  $-5\%$ 'i kadar kaydırılması neticesinde elde edilen yeni noktalara da etki ettirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bununla birlikte, binanın herhangi bir i'inci katında  $A_1$  türü düzensizliğin bulunması durumunda,  $1.2 < \eta_{bi} < 2$  olmak koşulu ile  $\pm 5\%$  ek dışmerkezlik, her iki deprem doğrultusu için aşağıda verilen  $D_i$  katsayısı ile çarpılarak büyütülecektir.

$$D_i = \left( \frac{\eta_{bi}}{1.2} \right)^2 \quad (5.56)$$

Rüzgâr yükü etkileri TS 498'de verilen şartları sağlayacak şekilde etkitilmelidir. Buna göre rüzgâr yükleri yapıya yatay esir ederler ve yapının geometrisine bağlı olarak



basınç, emme ve sürtünme etkileri birleştirilerek dikkate alınırlar. Yukarıda bahsi geçen yönetmeliğe göre, bir yapının bütününde rüzgâr yükü bileşkesinin büyüklüğü Denklem 5.57’de verilmiştir.

$$W_i = c_f q A_i \quad (5.57)$$

Burada  $c_f$  aerodinamik yük katsayısı,  $q$  bina yüksekliğine bağlı olarak nominal rüzgâr basıncı,  $A_i$  kat döşemesine rüzgâr yükü aktaran alanı göstermektedir ve rüzgâr doğrultusuna dik olan yüzeyin genişliği ile ardışık iki katın yüksekliklerinin ortalamasının çarpımı ile elde edilir. Düzlemsel yüzeyler ile sınırlandırılmış kapalı yapı elemanlarında rüzgâr yönüne dikey yüzeylerde aerodinamik yük katsayısı 1,2 olarak alınmaktadır. Rüzgâr basıncı ise Çizelge 5.13’den alınacaktır.

Çizelge 5. 13. Nominal rüzgâr basıncı

Zeminden yükseklik h (m)	Rüzgâr basıncı q (kN/m <sup>2</sup> )
0 < h ≤ 8.0	0,5
9.0 m < h ≤ 20.0	0,8
21.0 m < h ≤ 100.0	1,1

Çizelge 5. 14. Çalışmada kullanılan 41 adet yük birleşimi

Yük Birleşimi	Açıklama
G+Q	Düşey yük
G+Q±E <sub>x+</sub> ±0,3E <sub>y</sub>	Düşey yük ve deprem yükleri
G+Q±E <sub>x-</sub> ±0,3E <sub>y</sub>	
G+Q±0,3E <sub>x</sub> ±E <sub>y+</sub>	
G+Q±0,3E <sub>x</sub> ±E <sub>y-</sub>	
0,9 G±E <sub>x+</sub> ±0,3E <sub>y</sub>	
0,9 G±E <sub>x-</sub> ±0,3E <sub>y</sub>	
0,9 G±0,3 E <sub>x</sub> ±E <sub>y+</sub>	
0,9 G±0,3 E <sub>x</sub> ±E <sub>y-</sub>	
G+Q±W <sub>x</sub>	Düşey yük ve rüzgâr yükleri
G+Q±W <sub>y</sub>	
0,9 G±W <sub>x</sub>	
0,9 G±W <sub>y</sub>	

Eleman bazında oluşacak en büyük kesit tesirlerini belirlemek için, sabit yükler, deprem ve rüzgâr yüklerinin kombine edileceği yüklemeler kullanılacaktır. TS 500 (2000) madde 6.2.6, DBYYHY (2007) madde 2.7.5’e göre yapıya etkiyecek yük katsayıları ve yük

birleşimleri Çizelge 5.14’de verilmiştir. Burada G sabit düşey yükü, Q hareketli yükü  $E_{x+}$  ve  $E_{x-}$  kat ağırlık merkezinin y doğrultusundaki boyunun % 5’i kadar kaydırılmasıyla belirlenen noktalara etkilmesi ile oluşan eksantirik yükleri,  $W_x$  ve  $W_y$  rüzgâr yüklerini göstermektedir. Sabit düşey yükler normal kat döşemeleri için kaplama, trapez sac ve betonarme döşeme, asma tavan, bölme duvarları ve çelik taşıyıcı sistem olarak hesap edilmiştir. Çatı katlarda ise bölme duvarlar çıkartılmış, çatı kaplaması ve izolasyon malzemelerinin ağırlıkları hesaba dâhil edilmiştir. Boyutlandırma hesapları yapılırken göz önünde bulundurulacak olan deprem karakteristikleri; etkin yer ivmesi katsayısı ( $A_0$ ), bina önem katsayısı (I), spektrum karakteristik periyotları ( $T_a, T_b$ ), yerel zemin sınıfı, taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve hareketli yük katılım katsayısıdır (n).

Çizelge 5.14’de belirtilen yük kombinasyonları altında çelik sistemlerin analizleri Sap2000 V.16 (2014) yapısal analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiş ve kat ötelenmeleri ile eleman iç kuvvetleri bulunmuştur. Bulunan değerlere bağlı olarak görel kat ötelenmeleri ve ikinci mertebe etkileri kontrol edilmiş ve en büyük iç kuvvet değerlerine maruz kalan tali (ikincil) kirişler, ana kirişler ve kolonlara ait enkesit boyutlandırılması yapılmıştır. Birleşim noktalarının yeterli derecede rijit olduğu ve üzerlerine gelen yükü deformasyona uğramadan aktardığı kabul edilmiş ve birleşim noktası hesabı yapılmamıştır.

### 5.8.1. Görel kat ötelenmeleri ve ikinci mertebe etkileri

DBYYHY (2007) Madde 2.10 başlığı altında görel kat ötelenmelerinin sınırlandırılması ve ikinci mertebe etkileri ile ilgili sınırlandırmalar belirtilmiştir. Buna göre herhangi bir kolon veya perde için, ardışık iki kat arasındaki yerdeğiştirme farkını ifade eden azaltılmış görel kat öteleme Denklem 5.58’de görüldüğü gibidir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (5.58)$$

Bu denklemde  $d_i$  ve  $d_{i-1}$ , her bir deprem doğrultusu için binanın ardışık iki katında, herhangi bir kolonun uçlarında, azaltılmış deprem yüklerinden meydana gelen en büyük yerdeğiştirmeleri göstermektedir. Her bir deprem doğrultusunda, binanın i’inci katındaki kolonlar için etkin görel kat öteleme Denklem 5.59’dan elde edilecektir.

$$\delta_i = R \Delta_i \quad (5.59)$$

Her bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir i'inci katındaki kolon veya perdelerde hesaplanan  $\delta_i$  etkin görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri  $\delta_{imax}$  Denklem 5.60'da verilen değeri sağlamalıdır.

$$\frac{\delta_{imax}}{h_i} \leq 0,02 \quad (5.60)$$

Göz önüne alınan deprem doğrultusunda her bir katta, ikinci mertbe etkilerini temsil eden ikinci mertbe gösterge değeri,  $\theta_i$  hesaplanarak Denklem 5.61'de verilen koşul kontrol edilecektir. Burada  $(\Delta_i)_{ort}$  i'inci kattaki kolon ve perdelerde hesaplanan azaltılmış görelî kat ötelemelerinin kat içindeki ortalama değerini,  $V_i$  binanın i'inci katına etkiyen kat kesme kuvvetini,  $h_i$  kat yüksekliğini,  $W_j$  bina toplam ağırlığını ifade etmektedir.

$$\theta_i = \frac{(\Delta_i)_{ort} \cdot \sum_{j=i}^N W_j}{V_i h_i} \leq 0,12 \quad (5.61)$$

### 5.8.2. Boyutlandırma esasları

Analizler neticesinde elde edilen en elverişsiz durum için ilgili kolona ait gerilme kontrolleri ve hesap yapılacaktır.

Çizelge 5. 15. Enkesit koşulları (DBYYHY, 2007)

Eleman Tanımı	Narinlik Oranları	Sınır Değerler	
		Süneklik Düzeyi Yüksek Sistem	Süneklik Düzeyi Normal Sistem
Eğilme ve eksenel basınç etkisindeki I kesitlerinde	$\frac{b}{2t}$	$0,3 \sqrt{E_s/\sigma_a}$	$0,5 \sqrt{E_s/\sigma_a}$
Eğilme etkisindeki I Kesitleri	$\frac{h}{t_w}$	$3,2 \sqrt{E_s/\sigma_a}$	$5,0 \sqrt{E_s/\sigma_a}$
Eğilme ve eksenel basınç etkisindeki I Kesitleri	$\frac{h}{t_w}$	$ N_d/\sigma_a A  \leq 0,10$	$ N_d/\sigma_a A  \leq 0,10$
		$3,2 \sqrt{E_s/\sigma_a} \left(1 - 1,7 \frac{ N_d }{\sigma_a A}\right)$	$5,0 \sqrt{E_s/\sigma_a} \left(1 - 1,7 \frac{ N_d }{\sigma_a A}\right)$
		$ N_d/\sigma_a A  > 0,10$	$ N_d/\sigma_a A  > 0,10$
		$1,33 \sqrt{E_s/\sigma_a} \left(2,1 - \frac{ N_d }{\sigma_a A}\right)$	$2,08 \sqrt{E_s/\sigma_a} \left(2,1 - \frac{ N_d }{\sigma_a A}\right)$

Süneklik düzeyi normal ve yüksek çerçeveler için DBYYHY (2007) Madde 4.4.1’de verilen enkesit koşulları gereğince, kolon enkesitinin başlık genişliği/kalınlığı ve gövde yüksekliği/kalınlığı oranlarının Çizelge 5.15’de verilen koşulları sağlaması gerekmektedir. Bu koşullar kolon enkesitinde yerel burkulmanın önlenmesini amaçlar.

### 5.8.3. Kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulu

Çerçeve türü sistemlerde göz önüne alınan deprem doğrultusunda her bir kolon - kiriş düğüm noktasına birleşen kolonların eğilme momenti kapasitelerinin toplamı, o düğüm noktasına birleşen kirişlerin kolon yüzündeki eğilme momenti kapasiteleri toplamının 1,1 Da katından daha büyük olacaktır (Denklem 5.62).

$$M_{pa}+M_{pü} \geq 1,1 D_a(M_{pi}+M_{pj}) \quad (5.62)$$

Burada  $M_{pa}$  ve  $M_{pü}$  sırasıyla düğüm noktasına bağlanan kolonun altında ve üstünde oluşan moment değerleri  $M_{pi}$  ve  $M_{pj}$  ise sırasıyla düğüm noktasına bağlanan kirişin sağında ve solunda oluşan moment değerleridir.  $D_a$  yapı çeliği sınıfı ve eleman türüne bağlı olarak değişen arttırma katsayısı olup Fe37 yapı çeliğinden imal edilen hadde profilleri için 1,2 ve diğer yapı çeliğinden imal edilen hadde profilleri için 1,1 olarak alınacaktır. Bu denklemde plastik momentlerin kirişlerin kolon yüzündeki kesitlerinde oluştuğu kabul edilmiştir.

$$\sigma_{eb} = \frac{N_{max}}{A} \quad (5.63)$$

Denklem 5.63’de  $\sigma_{eb}$  yalnızca basınç altında dikkate alınacak emniyet gerilmesidir. Kesite gelen en büyük normal kuvvetin ( $N_{max}$ ), kesit alanına ( $A$ ) bölünmesi ile elde edilir.

$$\sigma_{bem} = \frac{\sigma_{em}}{\omega_{max}} \quad (5.64)$$

Denklem 5.64’de  $\sigma_{bem}$  incelenen yükler ve malzemeye bağlı olarak bulunan basınç emniyet gerilmesidir. Elemanın  $\lambda_x$  ve  $\lambda_y$  narinlik değerlerinden büyük olanına bağlı olarak TS 648 (1980) Çizelge 6-7 yardımıyla okunan burkulma katsayısına ( $\omega$ ) bağlı olarak bulunur.  $S_{kx}$

ve  $S_{ky}$  burkulma boyları ise kolonun eğilme rijitliği ile kolona bağlanan kirişlerin eğilme rijitliklerine ve mesnet koşullarına bağlı olarak hesaplanır.  $K_x$  ve  $K_y$  TS 648 (1980) Çizelge 5' den elde edilen katsayılar,  $h$  ise eleman uzunluğudur.

$$S_{kx}=K_x h \quad S_{ky}=K_y h \quad (5.65)$$

$$\lambda_x = \frac{S_{kx}}{i_x} \quad \lambda_y = \frac{S_{ky}}{i_y} \quad \lambda = \max(\lambda_x, \lambda_y) \quad (5.66)$$

$\sigma_{bx}$  ve  $\sigma_{by}$  yalnızca eğilme momenti altında hesaplanan gerilme değerleridir ve eleman üzerine etki eden en büyük eğilme momenti değerinin kesit mukavemet momentine bölünmesi ile elde edilirler (Denklem 5.67).

$$\sigma_{bx} = \frac{M_{x\max}}{W_x} \quad \sigma_{by} = \frac{M_{y\max}}{W_y} \quad (5.67)$$

#### 5.8.4. Başlık enkesit kontrolleri

TS 648 (1980) madde 3.3.4.2'ye göre, eksenel simetrisi olan ve gövde yönünde yüklenen kirişlerde Denklem 5.68, 5.69 ve 5.70'den elde edilen gerilmelerin büyük olanı emniyet gerilmesi olarak alınır.

$$\lambda_b = \frac{s}{i_b} \leq \sqrt{\frac{3 \cdot 10^5 C_b}{\sigma_a}} \quad \text{ise} \quad \sigma_b = \left[ \frac{2}{3} - \frac{\sigma_a \lambda_b^2}{9 \cdot 10^5 C_b} \right] \sigma_a < 0,6 \sigma_a \quad (5.68)$$

$$\lambda_b = \frac{s}{i_b} > \sqrt{\frac{3 \cdot 10^5 C_b}{\sigma_a}} \quad \text{ise} \quad \sigma_b = \frac{10^5 C_b}{\lambda_b^2} \quad (5.69)$$

$$\sigma_b = \frac{8400 C_b}{s h / F_b} \quad (5.70)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen kirişin basınç başlığında dönmeye ve yanal deplasmana karşı mesnetlendiği noktalar arası mesafe,  $i_b$  basınç başlığı ve gövde basınç bölgesinin  $1/3$ ' ünün gövde eksenine göre atalet yarıçapı,  $\sigma_a$  basınç başlığı akma gerilmesi,  $F_b$  basınç başlığı

ve gövde basınç bölgesinin  $1/3$ ' ünden oluşan kesitin alanı,  $C_b$  ise aşağıdaki Denklem 5.71 yardımıyla hesaplanan bir katsayıdır.

$$C_b = 1,75 + 1,05 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^2 \quad (5.71)$$

Denklem 5.71'de  $M_1$  kiriş yanal desteklerinin olduğu noktalardaki uç momentlerinin küçüğü,  $M_2$  ise bu momentlerin büyüğüdür. Eksantrik ve ya merkezi bir basınç kuvveti ile birlikte eğilme momentlerine ( $M_1$ ,  $M_2$ ) çalışan çubuklarda burkulma tahkiki ve burkulmasız gerilme tahkiki Denklem 5.72 ile yapılır.

$$\frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{bem}} + \frac{C_{mx} \sigma_{bx}}{\left( 1 - \frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{ex}} \right) \sigma_{Bx}} + \frac{C_{my} \sigma_{by}}{\left( 1 - \frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{ey}} \right) \sigma_{By}} \leq 1 \quad (5.72)$$

Denklem 5.72'de  $C_{mx}$  ve  $C_{my}$  uç momentlerini, açıklık momentlerini ve yanal destekleri göz önüne alan bir katsayı olup, yanal deplasmana izin verilen çerçevelerde Denklem 5.73'de verilen şartı sağlamalıdır.

$$C_{mi} = 0,6 - 0,4 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \geq 0,4 \quad (5.73)$$

Çubuğun iki ucundaki eğilme momentlerinin küçüğünün büyüğüne oranı, iki yönlü eğilme halinde pozitif tek yönlü eğilme halinde ise negatif alınacaktır.  $\sigma'_{ex}$  ve  $\sigma'_{ey}$  asal eksenler etrafındaki burkulma için hesaplanan ve Euler gerilmesinden türetilen değerler olup Denklem 5.74 ile hesap edilirler.

$$\sigma'_{ex} = \frac{829000}{\lambda_x^2} \quad \sigma'_{ey} = \frac{829000}{\lambda_y^2} \quad (5.74)$$

DBYYHY (2007) madde 4.3.6.2'da yatay yük taşıyıcı sistemin kirişlerinin üst ve alt başlıklarının yanal doğrultuda mesnetlenmesini ve mesnetlendiği noktalar arasındaki uzaklığın Denklem 5.75'de verilen koşulunu sağlaması şartı vardır.

$$l_b \leq 0.086 \frac{r_y E_s}{\sigma_a} \quad (5.75)$$

Burada  $l_b$  kirişlerin yanal doğrultuda mesnetlendiği noktalar arasındaki uzaklığı  $E_s$  malzeme elastisite modülü,  $\sigma_a$  akma gerilmesi değeri ve  $r_y$  kiriş başlığının ve gövdenin  $1/5$ 'inin yanal doğrultudaki atalet yarıçapıdır. Ayrıca, tekil yüklerin etkidiği noktalar, kiriş enkesitinin ani olarak değiştiği noktalar ve sistemin doğrusal olmayan şekildeğiştirmesi sırasında plastik mafsalları oluşabilecek noktalar da yanal doğrultuda mesnetlenecektir.

### 5.8.5. Kirişlerde kayma gerilmesi ve sehim tahkiki

Analiz sonuçlarına göre, mesnetler arasında meydana gelen rölatif düşey deplasman değeri için Denklem 5.76'da verilen şart sağlanmalıdır.

$$\frac{f_{\max}}{L} \leq \frac{1}{300} \quad (5.76)$$

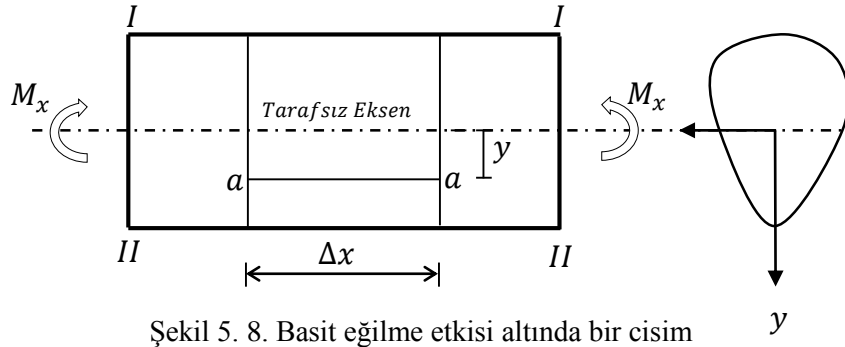
Bununla birlikte kirişte oluşacak en büyük kayma gerilmesi değeri Denklem 5.77'de verilen formülle elde edilebilir.

$$\tau = \frac{V_{\max} * S_x}{I_x t_w} \leq \tau_{em} \quad (5.77)$$

Burada  $V_{\max}$  analizler neticesi elde edilen ve kesitte oluşan en büyük kesme kuvveti,  $S_x$  kesitin yarısının statik momenti,  $I_x$  kesit atalet momenti ve  $t_w$  kesit gövde kalınlığıdır.

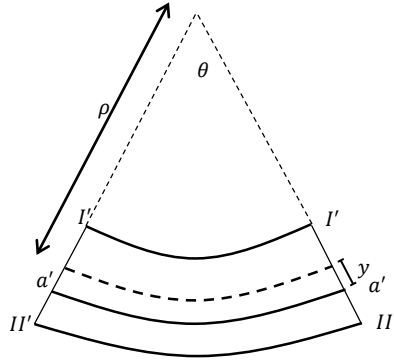
### 5.9. Basit Eğilme

Bir kiriş kesitinde oluşabilecek üç adet tesir vardır ve bunlar aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momentidir. Kirişin sadece eğilme moment altında dengede olduğu duruma basit eğilme adı verilir. Kirişte oluşan eğilme momenti ve gerilme arasında belirli bir ilişki söz konusudur. Bu ilişkinin ortaya çıkarılabilmesi için statikçe belirsiz sistemleri belirli hale getirebilecek bazı küçük deformasyon kabullerinin yapılması gerekir. Aşağıdaki şekilde bir çubuk elemana ait görünüm verilmiştir. Çubuğa sadece  $M_x$  momentinin etki ettiği düşünülür ise, kuvvetler düzlemi (yz) ve moment vektörü (x doğrultusu) birbirine diktir.



Şekil 5. 8. Basit eğilme etkisi altında bir cisim

Şekil 5.8' deki çubuk eleman birtakım hayali liflere ayrılınsın. Bu liflerin y eksenine yönünde uzandığı varsayılan kuvvetler çizgisine dik ve paralel olarak yerleştirildiği düşünülür ise, çubuğun basit eğilme tesiri altında şekil değiştirdiği durum görülmektedir. Çubuk ekseninin eğilmeden sonra aldığı şekle elastik eğri, bu eğrinin bulunduğu düzleme de eğilme düzlemi adı verilir. Eğilmeden önce y eksenine paralel olan lifler hafifçe dönerler, dik olanlar ise eğrisel bir hal alırlar.



Şekil 5. 9. Basit kiriş moment-eğrilik ilişkisi

Bernoulli-Navier hipotezine bağlı olarak, eğilmeden önce dik olan kesitlerin eğilmeden sonra düzlem kaldığı ve dik kesitlerin eğilmeden sonra da elastik eğriye dik kalacağı kabulü yapılır. Eğilmenin ardından bazı liflerin boyu uzar bazılarının ki ise kısalmır. Boyu değişmeyen liflere tarafsız lif, bunlardan oluşan eksene ise tarafsız eksen adı verilmektedir. Tarafsız eksen üzerinde gerilme bulunmamaktadır. Eğilmeden sonra a-a lifi a'-a' lifine dönüşür (Şekil 5.9). Birim boy değişimi  $\epsilon_x$ ,  $\rho$  eğrilik yarıçapı ve  $\theta$  eğrilik açısına bağlı olarak yazılabilir. İlk boy  $\Delta z$ , tarafsız eksende uzama ya da kısalma olmadığından  $\Delta z = \rho\theta$  şeklinde yazılırsa Denklem 5.78 elde edilir.

$$\epsilon_x = \frac{\theta(\rho+y) - \theta\rho}{\theta\rho} = \frac{y}{\rho} \quad (5.78)$$



Hooke kanununa göre,

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \Rightarrow \sigma_x = E \frac{y}{\rho} \quad (5.79)$$

olacaktır.  $M_x$  momenti etkisiyle kesitte sadece  $\sigma_x$  gerilmeleri oluşur ve denge denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$M_x = \int y \sigma_x dA \Rightarrow M_x = \int E \frac{y^2}{\rho} dA = \frac{E}{\rho} \int y^2 dA \quad (5.80)$$

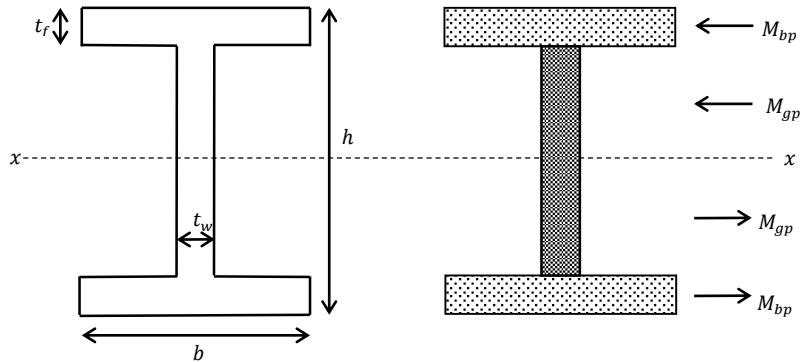
Denklem 5.80'deki integral çözümlenir ve bulunan  $1/\rho$  ifadesi Denklem 5.79'da yerine konulur ise Denklem 5.81 elde edilmiş olur.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{E I_x} \quad \sigma_x = \frac{M_x}{I_x} y \quad (5.81)$$

Kesit içindeki en büyük mutlak gerilmelerin ağırlık merkezinden en uzak noktada bulunan liflerde olduğu yukarıdaki denklemden anlaşılmaktadır. Burada yeni bir ifade olan mukavemet momenti kullanılacak olursa denklemler pozitif ve negatif gerilmeler için Denklem 5.82'deki durumu alır. Simetrik kesitlerde  $W_{x1} = W_{x2}$  olacağından ifade geliştirilebilir.

$$\sigma_{x(+)} = \frac{M_x}{W_{x1}} \quad \sigma_{x(-)} = \frac{M_x}{W_{x2}} \quad (5.82)$$

### 5.9.1. I profil için elastik - plastik moment hesabı ve şekil faktörü kavramı



Şekil 5.10. I profilde plastikleşme

Şekil 5.10' a bakılacak olursa tipik bir I profiline ait kesit verilmiştir. B'de ise başlık alanı ve gövde alanına etki eden plastik momentler görülmektedir. I profile ait atalet momenti, elastik moment ve plastik moment değerleri Denklem 5.83 ve 5.84'de verilmiştir.

$$I_x = \frac{t_w (h-2t_f)^3}{12} + \frac{2 b t_f^3}{12} + \frac{b t_f (h-t_f)^2}{2} \quad (5.83)$$

$$M_e = \sigma_a W_x \quad W_x = \frac{I_x}{h/2} \quad \Rightarrow \quad M_e = \sigma_a \left[ \frac{t_w (h-2t_f)^3}{6h} + \frac{2 b t_f^3}{6h} + \frac{b t_f (h-t_f)^2}{h} \right] \quad (5.84)$$

I profile ait başlık ve gövde alanları ve plastik moment değerleri Denklem 5.85 ve 5.86'da, kesitin toplam plastik moment değeri Denklem 5.87'de verilmiştir.

$$A_{\text{başlık}} = b t_f \quad A_{\text{gövde}} = t_w (h-2t_f) \quad (5.85)$$

$$M_{\text{bp}} = \sigma_a A_{\text{başlık}} \frac{h-t_f}{2} \quad M_{\text{gp}} = \sigma_a \frac{A_{\text{gövde}}}{2} \frac{h/2 - t_f}{2} \quad (5.86)$$

$$M_p = \sigma_a \left[ \frac{b t_f (h-t_f)}{2} + \frac{t_w (h-2t_f)^2}{8} \right] \quad (5.87)$$

Burada şekil faktöründen bahsetmek gerekir ise, bir kesitin taşıyabileceği en büyük plastik moment değerinin, taşıyabileceği en büyük elastik moment değerine bölünmesi ile elde edilen katsayı olarak ifade edilebilir (Denklem 5.88). Bu değer dikdörtgen kesitler için 1,5, dairesel kesitler için 1,70, I profiller için 1,15 ve geniş başlıklı I profiller için 1,14 olmaktadır (Keyder ve Wasti, 2010).

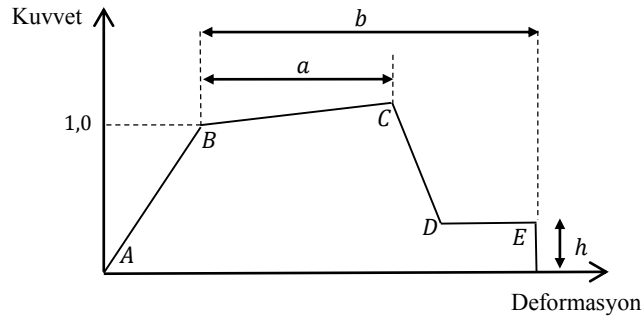
$$f = \frac{M_p}{M_e} \quad (5.88)$$

### 5.9.2. Çerçevesel için plastik mafsal tanımlanması

Çalışmada kullanılan farklı çelik çerçevelerin kiriş ve kolon uçlarında oluşacak plastik mafsal tanımlamaları FEMA 356 (2000) yönetmeliğine bağlı olarak Sap 2000 yapısal

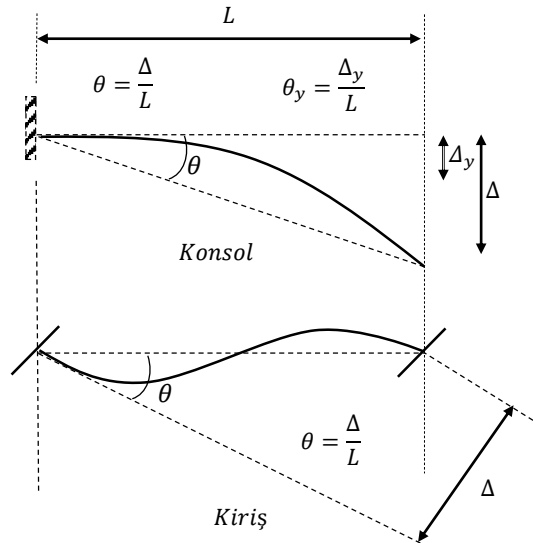
analiz programı tarafından yapılmıştır. Kirişlerde sadece eğilmeye bağlı olarak M mafsalı, kolonlarda ise normal kuvvet ve eğilme momenti etkileşim değerlerine bağlı olarak PM mafsal tanımlamaları yapılmıştır. Üç boyutlu modellerde kolonlarda PMM mafsal tanımlaması yapılmıştır.

FEMA 356'da çelik moment çerçeveler için genelleştirilmiş kuvvet deformasyon ilişkisi Şekil 5.11' de verilmiştir.



Şekil 5. 11. Kuvvet – deformasyon eğrisi (FEMA 356, 2000)

Q genelleştirilmiş yükü,  $\theta$  kiriş veya kolonda meydana gelen toplam elastik ve plastik dönme,  $\theta_y$  akma anındaki dönme,  $\Delta$  toplam elastik ve plastik yerdeğiştirmeyi,  $\Delta_y$  akma anındaki yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Panel bölgesi için  $\theta_y$  radyan cinsinden açısız kayma deformasyonunun karşılığıdır. Kiriş dönme değeri elastik dönme değerine plastik dönme değeri eklenerek bulunabileceği gibi kat ötelenme değerine eşit olarak da alınabilir.  $\theta_y$  akma anındaki dönme hesaplamak için Denklem 5.89 kullanılır.



Şekil 5. 12. Konsol ve çerçeve kirişlerde dönme tanımlaması (FEMA 356, 2000 )

$$\theta_{\text{ykiris}} = \frac{Z F_{ye} l_b}{6 E I_b} \quad ; \quad \theta_{\text{ykolon}} = \frac{Z F_{ye} l_c}{6 E I_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \quad (5.89)$$

$$Q_{ce} = M_{ce} = Z F_{ye} \quad ; \quad Q_{ce} = M_{ce} = 1,18 Z F_{ye} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \leq Z F_{ye} \quad (5.90)$$

Şekil 5.12' de konsol ve çerçeve kirişlerde dönme tanımlaması Eğilme etkisine maruz bulunan kiriş ve kolonlarda  $Q_{ce}$  plastik moment kapasitesidir ve sırasıyla kirişler için ve kolonlar için Denklem 5.90 ile hesap edilir.

Çizelge 5. 16. Yapısal çelik bileşenleri için doğrusal olmayan çözümlenelerde modelleme parametreleri ve uygunluk kriterleri (FEMA 356, 2000)

Bileşen	Modelleme Parametreleri			Uygunluk Kriteri				
	Plastik Dönme Açısı (Radyan)			Plastik Dönme Açısı (Radyan)				
	a	b	c	IO	Birincil		İkincil	
				LS	CP	LS	CP	
<b>Kiriş-Eğilme</b>								
$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0,6	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
$\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$								
$\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0,2	$0,25\theta_y$	$2\theta_y$	$3\theta_y$	$3\theta_y$	$4\theta_y$
$\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$								
<b>Kolon-Eğilme</b>								
<b><math>P/P_{cl} &lt; 0,20</math> için</b>								
$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0,6	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
$\frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{F_{ye}}}$								
$d \frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0,2	$0,25\theta_y$	$2\theta_y$	$3\theta_y$	$3\theta_y$	$4\theta_y$
$\frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{F_{ye}}}$								

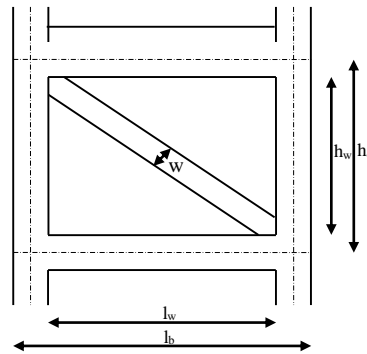
Yukarıda verilen denklemlerde E elastisite modülü,  $F_{ye}$  malzeme akma gerilmesi,  $I_b$  kiriş atalet momenti,  $l_b$  kiriş boyu,  $I_c$  kolon atalet momenti,  $l_c$  kolon boyu,  $M_{ce}$  beklenen eğilme dayanımı, P doğrusal olmayan statik analizde hedef deplasman anında eleman üzerine gelen eksenel kuvvet ve  $P_{ye}$  eksenel akma kuvveti, Z kesit mukavemet momentidir. Grafikte A-B arası elastik bölge, B-C arasındaki pekleşme bölgesi ve C noktası güç

tükenmesine ulaşılan noktadır. E noktası ise kopma uzamasının olduğu noktadır. Pekleşme bölgesinin eğimi kiriş ve kolonlar için %3 olarak alınabilir. Panel bölgesinde akma oluşmuş ise, aksi deneylerle kanıtlanmadıkça eğim %6 olarak alınacaktır. Şekil 5.12’de yer alan a, b, c değerleri de Çizelge 5.16’den alınabilir.

### 5.10. Dolgu Duvar Modeli

Deprem hesabında sadece düşey yük olarak dikkate alınan dolgu duvarlar, yapının yatay rijitliğini ve yatay yük kapasitesini arttırmakla birlikte yanlış kullanım sonucu ortaya çıkan kat düzensizlikleri sebebiyle (zemin katta veya ara katlarda tüm duvarların kaldırılması veya bant pencereler için çerçevenin bir kısmının boş bırakılması) depremde hasara neden olmaktadır.

Dolgu duvarların çerçeve sistem üzerindeki etkileri 1950’li yıllarda araştırılmaya başlanmıştır. Dolgu duvarlı çerçeve üzerinde ilk çalışma Polyakov (1956) tarafından yapılmıştır. Polyakov dolgu duvarların basınç çubukları ile temsil edilebileceğini ortaya atan ilk araştırmacıdır. Eşdeğer efektif basınç çubukları metodunu Stafford Smith (1962, 1967) yaptığı çalışmalarda ortaya koymuş ve geliştirmiştir. Bu çalışmalarda çerçevenin davranışının dolgu ve dolgu ile çerçeve temas yüzeyi ile doğrudan ilişkili olduğu kanıtlanmıştır. Smith ve Carter’in (1969), Mainstone’un (1974) yaptığı çalışmalar neticesinde, eşdeğer duvar kalınlığının belirlenmesinde kullanılan ve FEMA 306’ da yer alan denklemler kullanılarak eşdeğer basınç çubuğu efektif duvar genişliği hesaplanabilmektedir (Denklem 5.91).



Şekil 5. 13. Eşdeğer basınç çubuğu modeli

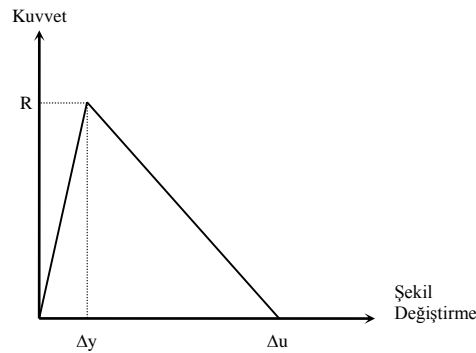
$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_w t_w \sin 2\theta}{4 E_c I_c h_w}} \quad w = 0.175 (\lambda h_c)^{-0.4} \sqrt{h_w^2 + l_w^2} \quad (5.91)$$

Şekil 5.13’de  $E_w$  dolgu duvar elastisite modülü,  $E_c$  çerçevenin elastisite modülü,  $t_w$  dolgu duvar kalınlığı,  $h_w$  dolgu duvar yüksekliği,  $h_c$  kolon yüksekliği,  $l_w$  dolgu duvar boyu,  $l_b$  kiriş boyu,  $I_c$  kolon atalet momenti,  $w$  eşdeğer basınç çubuğu efektif genişliği ve  $\theta$  çubuğun yatayla yaptığı açıdır. Dolgu duvar malzeme özellikleri, boşluklu fabrika tuğlası için  $E_w=1000$  MPa ve basınç dayanımı  $f_w=1$  MPa olarak alınmıştır. Eşdeğer basınç çubuğunun göçme durumunda taşıyacağı yük kapasitesi hesabında ise Paulay ve Priestley’den (1992) alınan formüller kullanılabilir.

$$z = \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4 E_c I_c h_w}{E_w t_w \sin 2\theta}} \quad (5.92)$$

$$R = \frac{2}{3} z t_w f_w \sec \theta \quad (5.93)$$

Denklem 5.93’de  $f_w$  dolgu duvar prizma basınç dayanımıdır. Plastik mafsal tanımlamaları eşdeğer çubuğun başlangıç ve bitiş noktalarına yapılmış ve eşdeğer çubuğun moment taşımadığı varsayılmıştır. Dolgu duvarın göçme şeklini tanımlamak için Öktem ve Pala’dan (2003) alınan eşdeğer sanal basınç yükü-şekil değiştirme ilişkisi modeli esas alınmıştır.



Şekil 5. 14. Eşdeğer basınç çubuğu kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi

Şekil 5.14’de  $R$  eşdeğer basınç çubuğu taşıma kapasitesi,  $L$  basınç çubuğu boyu,  $\Delta y$  taşıma kapasitesine karşı gelen şekil değiştirme ve  $\Delta u$  şekil değiştirme sınırıdır.  $\Delta u$  değeri Denklem 5.94 yardımıyla bulunabilir.

$$\Delta y = \frac{R.L}{A.E} \quad \Delta u = 0,01L \quad (5.94)$$

### 5.11. Basitleştirilmiş Sıralı Arama Algoritması (Simplified Sequential Search Algorithm)

Depreme dayanıklı yapı tasarımında sönümleyicilerin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, bu elemanların etkinliğini arttırmak için yapı üzerindeki yerleşim yerlerinin belirlenmesi konusu son yirmi yılda odaklanılan araştırmaların başında gelmektedir. Bu konuda günümüze kadar birçok metot geliştirilmiş olsa da, bunlar arasında en basit ve kolay uygulanabilir olanı SSSA'dır (Leu ve Chang, 2011). Bu metodun temeli viskoelastik sönümleyicilerin optimum yerleşimi üzerine çalışan ve sıralı arama algoritmasını (SSA) geliştiren Zhang ve Soong'un (1992) araştırmalarına dayanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada yalın (sönümleyici ilave edilmemiş) bir binanın sismik tepkileri transfer matris metodu ile bulunmuştur. Ortalama kat yerdeğiştirmelerinin kareleri optimum yerleşim indisi olarak kullanılmıştır. En büyük indis birinci sönümleyicinin yerini göstermektedir. İlave edilen sönümleyicinin rijitlik ve sönüm değerleri yapının matematik modeline dâhil edilmek suretiyle çözüm tekrarlanır ve yeni indisler bu işlem sonucuna göre belirlenir. Tüm gerekli sönüm elemanları yerleştirilene kadar prosedür devam ettirilir. Burada önemli olan ve bu metodu diğerlerinden basit ve uygulanabilir kılan şey sönümleyici katsayılarının üniform dağılımıdır (Garcia, 2001).

Basitleştirilmiş Sıralı Arama Algoritması metodunda da sönümleyici ilave edilmemiş yapının sismik tepkileri zaman-tanım alanında analiz ile hesap edilir. Analiz sırasında kullanılacak yer ivmeleri yapının yapılacağı bölge ile uyumlu olmalıdır. Bu metodun SSA'dan farkı optimum yerleşim indisinin hesap şeklidir. SSSA' da optimum yerleşim indisi Denklem 5.95 ile bulunmaktadır.

$$\gamma_i = \alpha_1 \delta_i + \alpha_2 \dot{\delta}_i \quad (5.95)$$

Bu denklemde  $\gamma_i$  optimum yerleşim indisini,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  sabit katsayıları,  $\delta_i$  i. kat en büyük yerdeğiştirme değerini,  $\dot{\delta}_i$  i. kat en büyük hız değerini göstermektedir.  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  sadece

deplasmana veya hıza bağılı olabileceği gibi, ikisine belirli oranlarda bağılı olacak şekilde de seçilebilir (Garcia ve Soong, 2002). Bu çalışmada sadece yer değiştirmeye ( $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=0$ ) bağılı analizler yapılmıştır.

## 5.12. Yapısal Düzensizlikler

Bu çalışmanın 6. bölümünde yer alan dört adet uygulamanın üçünde, yapısal ve konstrüktif (şekilsel) düzensizlikleri bulunan çelik çerçevelerin sismik performansının viskoz sönümleyiciler kullanılarak artırılması hedeflenmiştir. Çalışmada ele alınan düzensiz durumlar, planda asimetriden dolayı meydana gelen burulma düzensizliği, dolgu duvar varlığı ve süreksizliğinden oluşan konstrüktif hatalar, düşeyde geri çekilmeden dolayı katlar arasında meydana gelen ani rijitlik değişimleridir. Dolayısıyla bu bölümde DBYYHY (2007)'de yer alan ve planda ve düşeyde görülen düzensizliklerle ilgili kısa bir bilgi verilecek ve bahsi geçen durumlar daha detaylı incelenecektir. Düzensizlikler, yapılarda projelendirilme esnasında ön görülemeyen ilave gerilmelerin ortaya çıkmasına ve yapının kısmi ya da toptan hasar almasına hatta göçmesine sebebiyet verebilirler.

### 5.12.1. Planda düzensizlik durumları

#### 5.12.1.1. Burulma düzensizliği

Bir yapıda burulma düzensizliğinin ortaya çıkması için, yapının kütle merkezi ve rijitlik merkezi arasında bir eksantrisite bulunması gerekir. Bu tür yapılar x ve y doğrultularında ötelenme hareketine ek olarak, yapı düşey eksen etrafında dönme davranışı da gösterirler. Eksantrisitenin ve yapıya etkiyen dinamik yüklerin derecesine bağılı olarak bu dönme davranışı, yapının büyük hasar almasına, hatta yıkılmasına bile sebebiyet verebilir. Bu yüzden birçok çağdaş deprem yönetmeliğinde burulma davranışının göz önüne alınması için yaptırımlar vardır. DBYYHY (2007)'de A<sub>1</sub> burulma düzensizliği (Madde 2.3.2.1), birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük görel kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama görel ötelemeye oranını ifade eden burulma düzensizliği katsayı  $\eta_{bi} < 1,2$  olması durumu olarak belirtilir. Görel kat ötelemelerinin hesabı,  $\pm$  %5 ek dışmerkezlilik etkileri de göz önüne alınarak yapılır.



$$\eta_{bi} = \Delta_{imax} / \Delta_{iort} > 1,2 \quad (5.96)$$

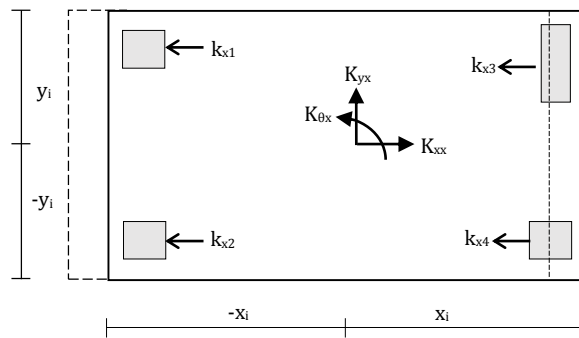
Burulma tesirlerini anlayabilmek için en az iki ötelenme ve bir dönmeden oluşan üç serbestlik dereceli bir model kullanılması gerekir. Hesap kolaylığı bakımından, x ile y düzlemlerindeki ötelenmeler ve z eksenini etrafındaki dönme haricindeki serbestlikler ihmal edilebilir. Kütle merkezinin x doğrultusunda ötelenmesi  $\Delta x$ , y doğrultusunda ötelenmesi  $\Delta y$ , ve kütle merkezinden geçen z eksenini etrafındaki dönmesi  $\Delta \theta$  olan modele ait kütle ve rijitlik matrisleri en genel halde sırasıyla Denklem 5.97’de verilmiştir.

$$M = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{x\theta} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{y\theta} \\ M_{\theta x} & M_{\theta y} & M_{\theta\theta} \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (5.97)$$

Kabul edilen üç serbestlik derecesi için kütle matrisi aşağıdaki gibidir.

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_0 \end{bmatrix} \quad (5.98)$$

Burada  $I_0$  kat diyaframının kütle merkezinden geçen dikey eksene göre kütle eylemsizlik momentidir ve kenarları a ve b birim, kütlesi m olan bir diyafram için Denklem 5.99’da verilmiştir (Yerlici ve Luş, 2014). Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17’ de sırasıyla x yönünde ötelenme, y yönünde ötelenme ve düşey eksen etrafında dönme durumları verilmiştir.



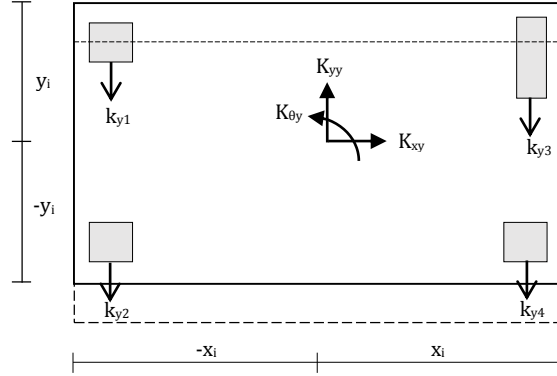
Şekil 5. 15. X yönünde ötelenme

$$I_0 = m \frac{a^2 + b^2}{12} \quad (5.99)$$

$$K_{xx} - k_{x1} - k_{x2} - k_{x3} - k_{x4} = 0 \rightarrow K_{xx} = \sum k_{xi} \quad (5.100)$$

$$K_{yx} = 0 \quad (5.101)$$

$$K_{\theta x} + y_1 k_{x1} + y_2 k_{x2} + y_3 k_{x3} + y_4 k_{x4} = 0 \rightarrow K_{\theta x} = -\sum y_i k_{xi} \quad (5.102)$$

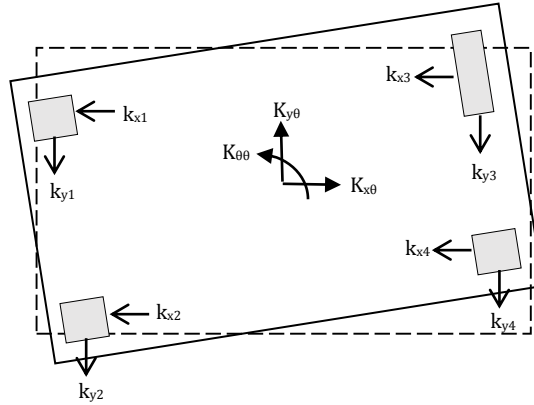


Şekil 5. 16. Y yönünde ötelenme

$$K_{xy} = 0 \quad (5.103)$$

$$K_{yy} - k_{y1} - k_{y2} - k_{y3} - k_{y4} = 0 \rightarrow K_{yy} = \sum k_{yi} \quad (5.104)$$

$$K_{\theta y} - x_1 k_{y1} - x_2 k_{y2} - x_3 k_{y3} - x_4 k_{y4} = 0 \rightarrow K_{\theta y} = \sum x_i k_{yi} \quad (5.105)$$



Şekil 5. 17. Düşey eksen etrafında dönme

$$K_{x\theta} + y_1 k_{x1} + y_2 k_{x2} + y_3 k_{x3} + y_4 k_{x4} = 0 \rightarrow K_{x\theta} = -\sum y_i k_{xi} \quad (5.106)$$

$$K_{y\theta} - x_1 k_{y1} - x_2 k_{y2} - x_3 k_{y3} - x_4 k_{y4} = 0 \rightarrow K_{y\theta} = \sum x_i k_{yi} \quad (5.107)$$

$$K_{\theta\theta} - x_1^2 k_{y1} - x_2^2 k_{y2} - x_3^2 k_{y3} - x_4^2 k_{y4} - y_1^2 k_{x1} - y_2^2 k_{x2} - y_3^2 k_{x3} - y_4^2 k_{x4} = 0 \quad (5.108)$$

$$K_{\theta\theta} = \sum x_i^2 k_{y_i} + y_i^2 k_{x_i} \quad (5.109)$$

Kabul edilen üç serbestlik derecesi için rijitlik matrisi Denklem 5.110'da görülmektedir.

$$k = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N k_{x_i} & 0 & -\sum_{i=1}^N y_i k_{x_i} \\ 0 & \sum_{i=1}^N k_{y_i} & \sum_{i=1}^N x_i k_{y_i} \\ -\sum_{i=1}^N y_i k_{x_i} & \sum_{i=1}^N x_i k_{y_i} & \sum_{i=1}^N x_i^2 k_{y_i} + y_i^2 k_{x_i} \end{bmatrix} \quad (5.110)$$

Rijitlik merkezi ile benzer şekilde, yapıya ilave edilen viskoz sönümleyicilerin bileşke kuvvetlerinin etkidiği varsayılan noktaya sönümleyici merkezi (center of supplemental damping) denir. Kütle merkezinden x yönünde  $e_{sdx}$  ve y yönünde  $e_{sdy}$  kadar uzakta olan bu noktaların koordinatları Denklem 5.111 ile bulunabilir.

$$e_{sdx} = \frac{1}{C_y} \sum C_{y_i} x_i \quad e_{sdy} = \frac{1}{C_x} \sum C_{x_i} y_i \quad (5.111)$$

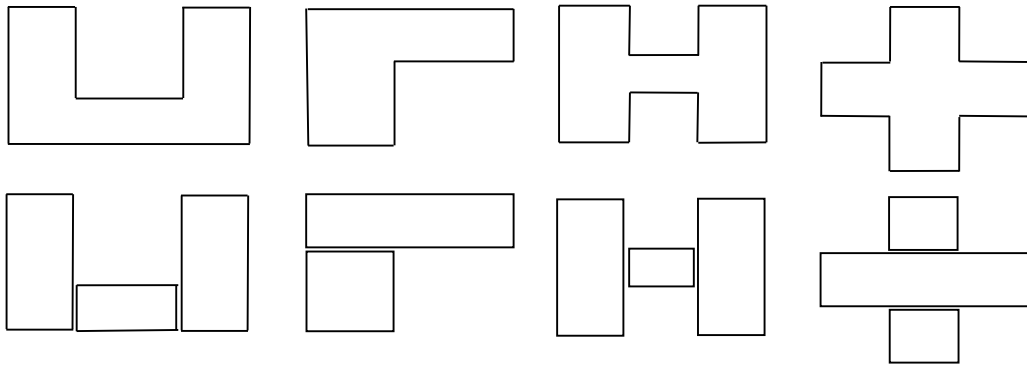
### **5.12.1.2. Döşeme süreksizlikleri**

DBYYHY (2007) madde 2.3.2.2.'de A2 düzensizliği olarak bahsi geçen, herhangi bir kattaki döşemede boşluk alanları toplamının kat brüt alanının  $1/3$ 'ünden fazla olması, deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarılabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması ve döşemenin düzlem içi rijitlik ve dayanımında ani azalmaların olması durumdur.

### **5.12.1.3. Planda çıkıntılar bulunması**

DBYYHY (2007) madde 2.3.2.2'e göre, bina kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de, binanın o katının aynı doğrultudaki toplam plan boyutlarının %20'inden daha büyük olması durumudur. Kütle merkezi bir yapıda kiriş, kolon döşeme, duvarlar vb. sabit yüklerin ağırlıklarının plan

üzerindeki merkezi olarak tarif edilebilir. Rijitlik merkezi ise düşey taşıyıcı sistem elemanlarının (kolonlar, perdeler vs.) atalet momentlerine ve plan üzerindeki konumlarına bağlı olarak hesaplanan, x ve y eksenlerine belirli bir mesafede yer alan odak noktasıdır. Yapıya etki eden dinamik yüklerin etkidiği varsayılan nokta kütle merkezi ve yapının bu kuvvetlere tepki verdiği noktanın da rijitlik merkezi olduğu varsayılırsa, bu iki noktanın birbirine çok yakın ya da eğer mimari açıdan mümkün ise üst üste olması, yapıda meydana gelecek burulma etkilerinin önüne geçecektir.



Şekil 5.18. Planda düzensiz yapıların dilatasyon derzi ile ayrılması

Yapının kütle merkezinin değiştirilebilmesi pek mümkün olmadığı için, rijitlik merkezi dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. Planda düzensizliklerin önüne geçilemediği durumlarda ise yapılar birbirinden deprem derzleri (dilatasyon) ile ayrılmalıdırlar. Şekil 5.18’ de planda asimetrik binaların dilatasyonlar ile nasıl ayrılacağına ilişkin bir örnek görülmektedir.

## 5.12.2. Düşey doğrultuda düzensizlik durumları

### **5.12.2.1. Komşu katlar arası dayanım düzensizliği (Zayıf kat, B1)**

DBYYHY (2007) madde 2.3.2.3’e göre, betonarme binalarda birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi birinde, herhangi bir kattaki etkili kesme alanının, bir üst kattaki etkili kesme alanına oranı olarak tanımlanan dayanım düzensizliği katsayısının  $\eta_{ci} < 0,80$  olması durumudur (Denklem 5.112).

$$\eta_{ci} = (\sum Ae)_i / (\sum Ae)_{i+1} < 0,80 \quad (5.112)$$

Herhangi bir katta etkili kesme alanının tanımı aşağıdaki Denklem 5.113’de verilmiştir.

$$\sum A_e = \sum A_w + \sum A_g + 0,15 \sum A_k \quad (5.113)$$

Burada  $A_w$  kolon enkesiti etkin gövde alanı,  $A_g$  herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel doğrultuda perde olarak çalışan taşıyıcı sistem elemanlarının enkesit alanlarının toplamı,  $A_k$  ise herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel kâgir dolgu duvar alanlarının toplamıdır.

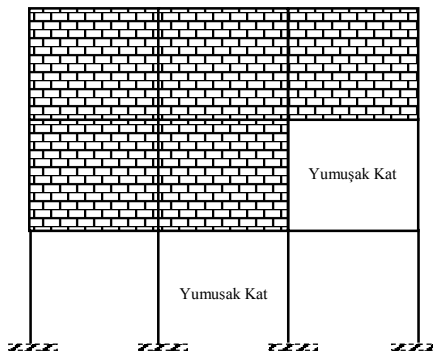
### **5.12.2.2. Komşu katlar arası rijitlik düzensizliği (Yumuşak kat, B2)**

Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir  $i$ 'inci kattaki ortalama görelî kat öteleme oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama görelî kat öteleme oranına bölünmesi ile tanımlanan rijitlik düzensizliği katsayısının  $\eta_{ki} > 2,0$  olması durumudur.

$$\eta_{ki} = (\Delta_i / h_i)_{\text{ort}} / (\Delta_{i+1} / h_{i+1})_{\text{ort}} > 2,0 \quad (5.114)$$

$$\eta_{ki} = (\Delta_i / h_i)_{\text{ort}} / (\Delta_{i-1} / h_{i-1})_{\text{ort}} > 2,0 \quad (5.115)$$

Yumuşak kat oluşumu farklı şekillerde gerçekleşebilir. Bunlardan en belirgin olan ikisi, yumuşak kat oluşan kat yüksekliğinin diğer katlardan fazla olması, bir diğer sebep de ilgili katta mevcut olan dolgu duvar süreksizliğidir.



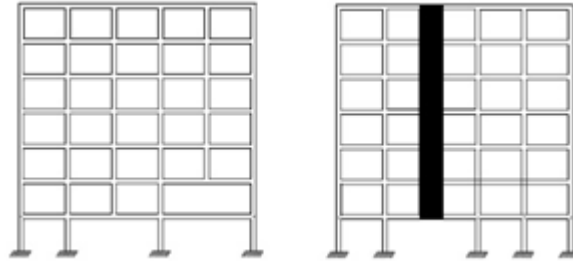
Şekil 5. 19. Yumuşak kat düzensizliği

Mimari ya da ticari sebeplerden dolayı yukarıda bahsi geçen şekilde düzensiz yapılan katların rijitlikleri, diğer katlara oranla zayıf kalmakta, görelî kat yerdeğiştirme oranları fazla olmakta ve deprem esnasında istenmeyen sonuçlar oluşmaktadır. Yumuşak kat düzensizliği binaların depremde yıkılmasının temel sebeplerinden bir tanesidir. Şekil 5.19’ da basit bir çerçevede oluşabilecek yumuşak kat düzensizliği görölmektedir.

Dolgu duvar süreksizliği olan katlarda hem dayanım hem de ötelenme açısından sakıncalı bir durum ortaya çıkacaktır. Duvarların yapıya getirdiği ilave rijitlikten yararlanılamaması ve kat yerdeğiştirmelerinin artması ile yapının stabilitesi bozulur ve kolonlarda plastik mafsall oluşumu görölr. İlgili katlardaki yerdeğiştirmeler 2. mertebe momentlerine yol açar (Mertol, 2002).

### **5.12.2.3. Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının süreksizliği (B3)**

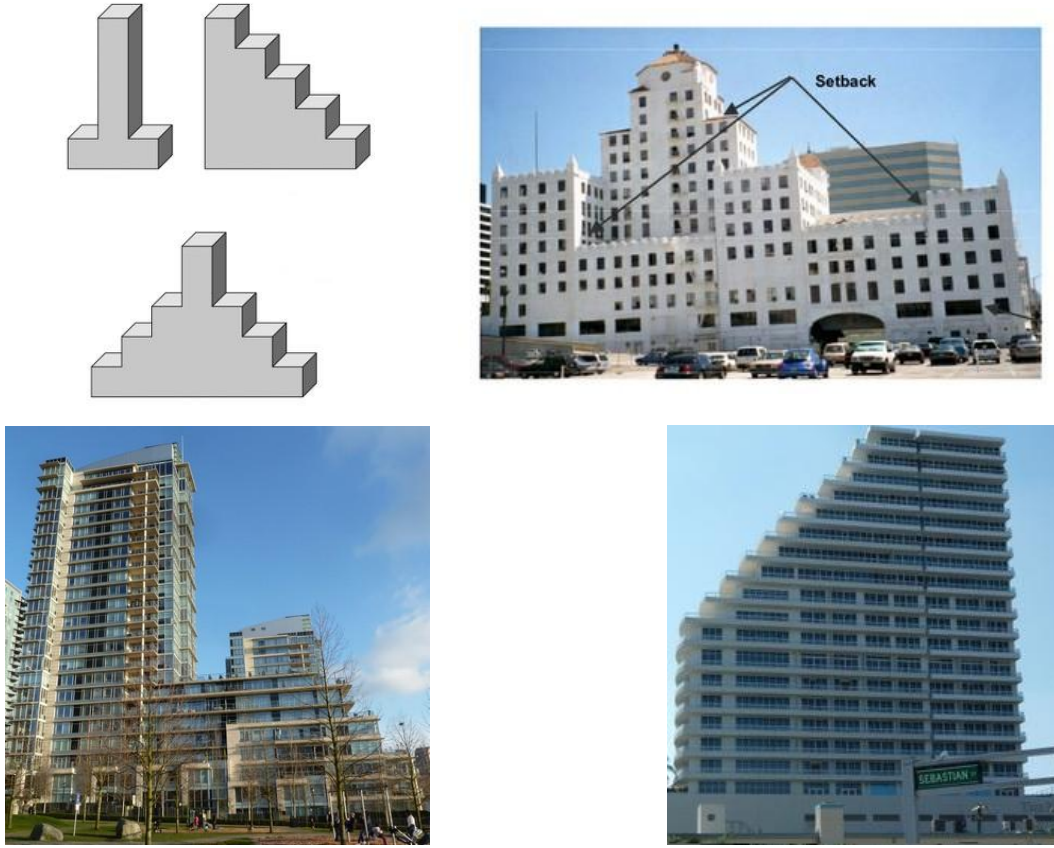
Taşıyıcı sistemin düşey elemanlarının (kolon veya perdelerin) bazı katlarda kaldırılarak kirişlerin veya guseli kolonların üstüne veya ucuna oturtulması, ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumudur (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. B3 düzensizliği durumu (DBYYHY, 2007)

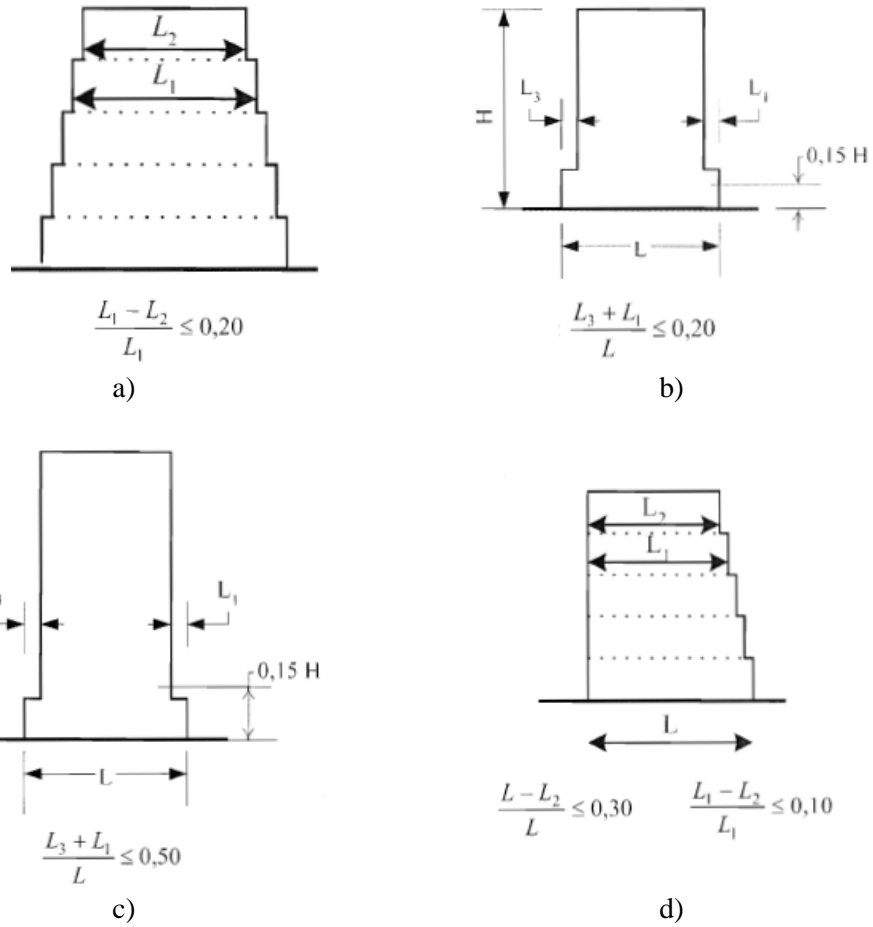
### **5.12.2.4 Düşeyde kütle ve rijitlik değişimleri**

Yapılarda yükseklik boyunca kütle değişimle bulunması, deprem yüklerinin her kata farklı dağılımına ve dolayısıyla yapının sismik performansında azalmaya sebebiyet verir. Rijitlik değişimi, taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlarının değişmesi ile ya da geri çekme düzensizliği adı verilen ve binanın belirli bir kattan itibaren yukarıya doğru ani veya orantılı bir şekilde daralması şeklinde görölen bir düzensizliktir. Şekil 5.21’ de geri çekme düzensizliğine sahip binalar görölmektedir.



Şekil 5. 21. Geri çekme düzensizliği görülen binalar (Anonim, 2016)

Geri çekmenin olduğu katlarda aşırı yanal deplasman, aşırı zorlanmalar ve gerilme yığılmaları görülmektedir. Özmen vd. (1997) çok katlı yapılarda geri çekme düzensizliğinin deprem hesabına etkisini araştırmışlardır. Önceki çalışmalar geri çekme düzensizliği, yapının geometrik boyutlarına göre tarif edilmesine rağmen, düzensizliğin yapının geometrisinden çok düşeyde rijitlik dağılımı dengesizliği sonucu ortaya çıktığı sonucuna varmışlardır. Geri çekmenin başladığı katta rölatif kat yerdeğiştirmeleri oranında büyük bir sıçrama yaşanmaktadır. Eurocode 8'de (2004) düşey düzenlilik kriterleri başlığı altında (Bölüm 4.2.3.3) geri çekme düzensizliklerine ilişkin kurallar verilmiştir. Buna göre düşeyde eksenel simetrisinin korunduğu kademeli geri çekmeli yapılarda, birbirini takip eden iki kat arasında planda % 20'den fazla fark olmamalıdır (Şekil 5.22 a-b). Bina yüksekliğinin %15'inden düşük bir seviyede basit geri çekme düzensizliği görülüyor ise, planda geri çekme miktarı taban boyutlarının %50'sinden küçük ya da eşit olmalıdır (Şekil 5.22 c). Simetrik olmayan geri çekmeli yapılarda birbirini takip eden katlar arasında plan boyutundaki fark en fazla %10 olmalıdır. Bununla beraber yine bu yapılarda en üst kat ile taban boyutları arasındaki fark %30 değerinin aşmamalıdır (Şekil 5.22 d).



Şekil 5. 22 Geri çekme düzensizliğine ilişkin kurallar (Eurocode 8, 2004)

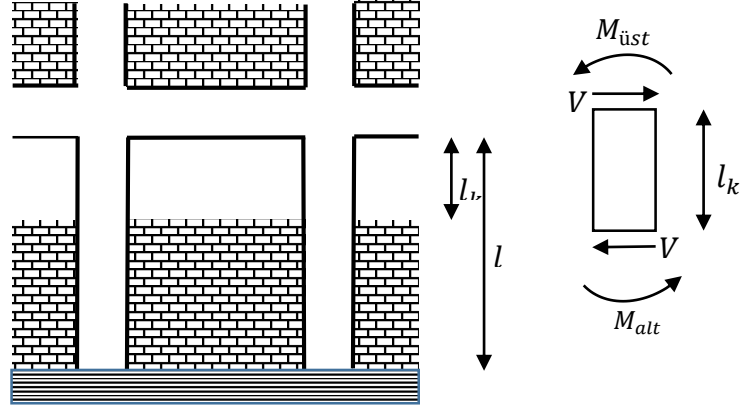
### **5.12.2.5. Kısa kolon oluşumu**

Taşıyıcı sistem düşey elemanı olan kolonların çeşitli sebeplerle boylarının kısa olmasıdır. En büyük sebebi katlarda bırakılan bant pencereler, ara kat kirişleri, asma katlar, merdiven sahanlıkları ve farklı seviyede yapılan temelerdir. Kısa kolonlar diğer normal boylu kolonlara göre çok rijit davranırlar ve büyük kesme kuvvetinin etkisinde kalırlar. Gevrek olan kesme kırılması sonucu kolon taşıma gücünü yitirir, yapı ağır hasar alır veya toptan göçmeye uğrar (Topçu, 2016). Kısa kolonda oluşan kesme kuvveti ( $V$ ), Şekil 5.22’ de görüldüğü gibi kısa kolonun alt ve üst kısmında meydana gelen momentlerin toplamının kısa kolon yüksekliğine bölünmesi ile elde edilir.

$$V = \frac{M_{alt} + M_{üst}}{l_k} \quad (5.116)$$



Denklem 5.116' da  $l_k$  kısa kolon boyu  $M_a$  ve  $M_u$  ise kısa kolonun alt ve üst kısmında oluşan moment değerleridir. Kolonun boyu azaldıkça üzerine gelen kesme kuvveti de doğru orantılı olarak artar.



Şekil 5. 23. Yapılarda kısa kolon davranışı

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

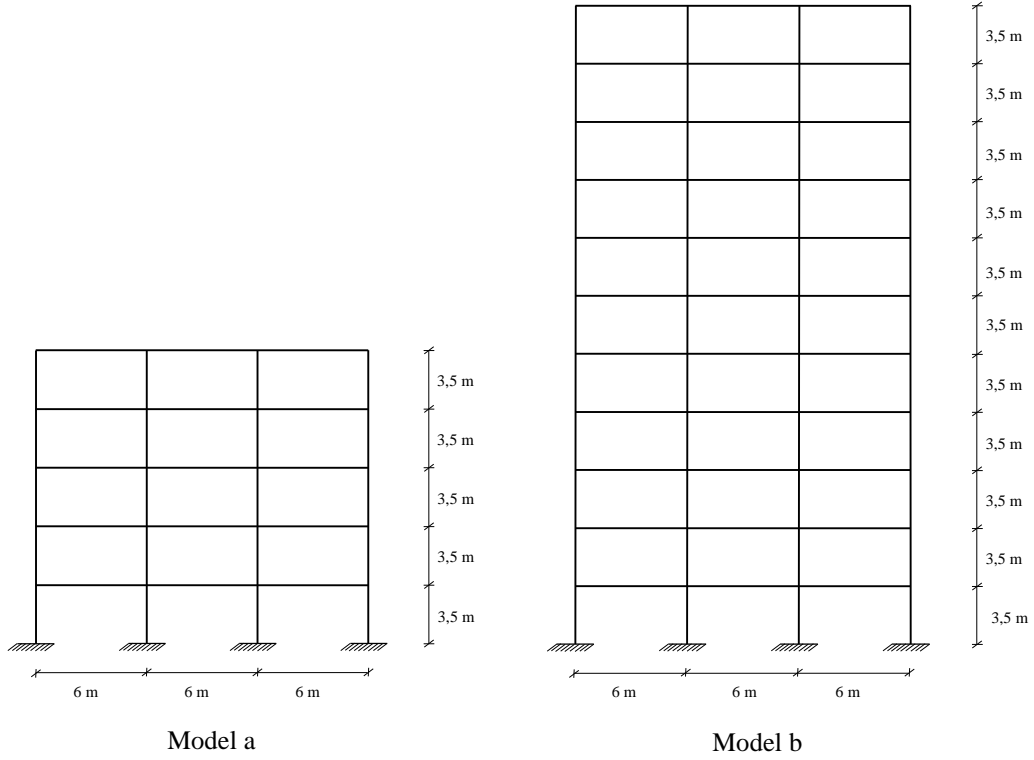
### 6.1. Uygulama I. Farklı Konfigürasyona Sahip Viskoz Sönümleyicilerin İncelenmesi ve Yeni Bir Konfigürasyon Önerisi

#### 6.1.1. Uygulamanın amacı

Bu uygulamada DBYYHY ve TS 648'e uygun olarak projelendirilen süneklik düzeyi yüksek 5 katlı ve 11 katlı iki tip çelik çerçeve kullanılmıştır. Çerçevelere ilave edilen viskoz sönümleyiciler, dört farklı konfigürasyonda bağlanarak, farklı bağlantı geometrilerinin sönümleyicinin verimini ne şekilde etkilediği incelenmiştir. 5 ve 11 katlı üç açıklıklı çelik çerçevelere diyagonal, alt dirsek, üst dirsek ve yeni geliştirilen konfigürasyonda sönümleyiciler ilave edilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Analizler neticesinde kat kolonlarında oluşan en büyük aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ile katlar için yerdeğiştirme değerleri incelenmiş olup, viskoz sönümleyicilerin çerçevenin sismik performansına etkileri incelenmiştir. Bununla beraber yeni geliştirilen konfigürasyon ile diğerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

#### 6.1.2. Kullanılan çelik çerçeveler

Bu uygulamada kullanılan ve detayları aşağıda verilmiş olan iki adet çerçevenin (Şekil 6.1) tasarımı detayları Bölüm 5.1'de verilmiş olan eşdeğer deprem yükü yönteminden faydalanılarak yapılmıştır. 5 katlı çerçeve (Model a) ve 11 katlı çerçeve (Model b) her ikisi de üç açıklıklıdır. Çerçevelere etki eden g sabit yükü normal katlar ve çatı katı için 20 kN/m, q hareketli yükü ise 10 kN/m kabul edilmiş ve katlara düzgün yayılı yük olarak etki ettirilmiştir. Çerçeve Fe52 yapı çeliğinden imal edilmiş olup elastisite modülü 210000 MPa, poisson oranı 0,3, çekme gerilmesi ( $\sigma_c$ ) 235 MPa, akma gerilmesi ( $\sigma_a$ ) 360 Mpa ve kesme gerilmesi  $\tau_{em}$  122 MPa olarak alınmıştır. Her kat kendi içinde rijit diyafram olarak tanımlanmıştır. Hareketli yük katılım katsayısı 0,3 etkin yer ivmesi katsayısı 0,3 (İkinci derece deprem bölgesi), bina önem katsayısı 1,0, taşıyıcı sistem davranış katsayısı 8 (Süneklik düzeyi yüksek sistem), yerel zemin sınıfı  $Z_3$  spektrum karakteristik periyotları ( $T_a=0,15$ ,  $T_b=0,60$ ) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6. 1. Çerçevelere ait görünümüler

Analizler Sap2000 yapısal analiz programında yapılmıştır. Çizelge 5.14’de belirtilen 41 adet yükleme kombinasyonuna bağlı olarak elde edilen iç kuvvetler neticesinde Model a ve Model b kiriş ve kolonlarında kullanılması uygun görülen enkesitler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6. 1. Analizler neticesinde seçilen kesitler

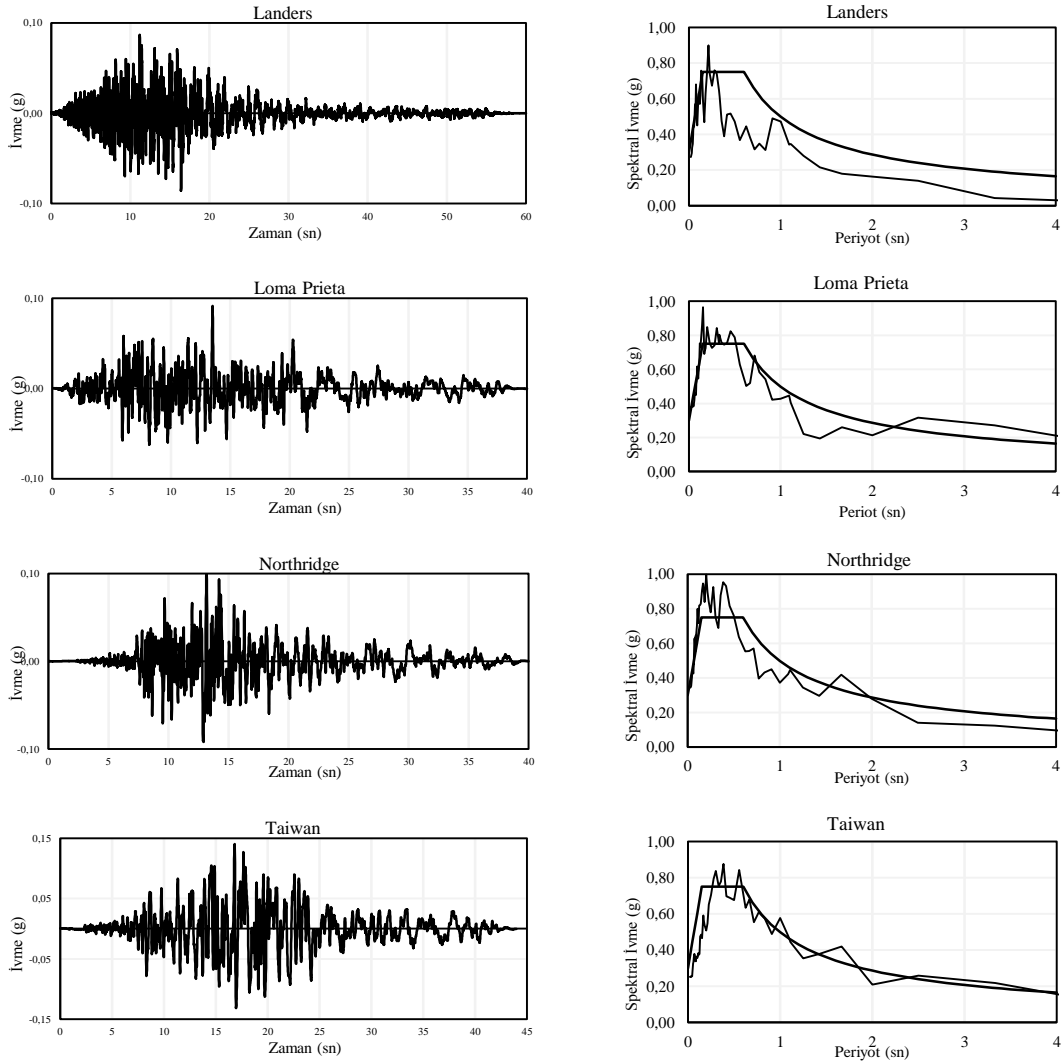
	Kirişler	Kolonlar
Model a	HE300A	HE400A
Model b	HE450A	HE700A (0-14 <sup>m</sup> )
		HE600A (14-28 <sup>m</sup> )
		HE500A (28-38.5 <sup>m</sup> )

### 6.1.3. Zaman tanım alanında analiz

İki modele ait sismik tepkilerin belirlenebilmesi için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Yerel zemin sınıfına uygun dört adet yer ivmesi kullanılmıştır. Grafiklerde dört adet yer ivmesinden elde edilen zarf eğrileri (en olumsuz durumlar) gösterilmiştir. Rayleigh (kütle ve rijitliğe bağlı) sönüm oranı kullanılmıştır.

### 6.1.4. Yer ivmeleri

Bu çalışmada Fahjan'ın (2008) yaptığı bir çalışma neticesinde ölçeklendirilerek deprem yönetmeliğinde verilen tasarım spektrumuna uygun hale getirilmiş olan dört adet deprem kaydı kullanılmıştır. Pasifik Dep. Müh. Arş. Merkezi'nden (PEER, 2006) alınan kayıtlar Çizelge 6.2'de verilmiştir. Deprem ivmeleri programa girilirken kullanılan ölçek, ölçek katsayısı ile etkin yer ivme katsayısı ve yer ivmesinin çarpılması ile elde edilmiştir. Şekil 6.2' de kullanılan deprem kayıtları ve spektral ivme-zaman grafikleri görülmektedir.



Şekil 6. 2. Ölçeklendirilmiş spektral ivme-zaman grafikleri

Çizelge 6. 2. Yer ivmesi kayıtları

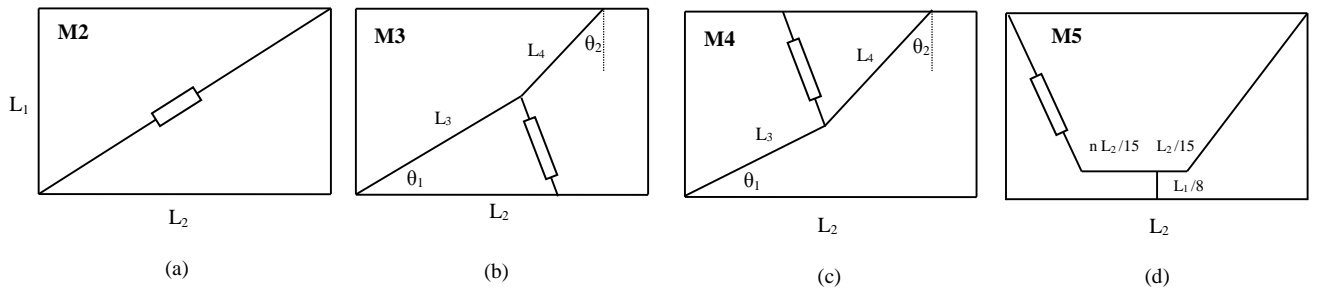
Kayıt ismi	No	Tarih	İstasyon	Kayıt	Ölçek Katsayısı	Ölçek
Landers	P0876	28/06/92	San Bernardino	HOS180	9,85	28,99
Loma Prieta	P0778	18/10/89	Salinas	SJV160	13,72	40,38
Northridge	P0967	17/01/94	La-Pica Sentous	PIC090	11,16	32,84
Taiwan	P0105	14/11/86	Smart I01	45I01NS	5,97	17,57

### 6.1.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı

Çerçevelerde içsel sönümün hesabı için Rayleigh yaklaşımı kullanılmıştır. Çerçeveye ait sönüm matrisi ile  $\alpha$  ve  $\beta$  sabitleri Denklem 4.13 yardımıyla hesaplanmış olup, ilk iki moda ait sönüm oranları birbirine eşit ve  $\xi_1=\xi_2=0,03$  olarak alınmıştır. Model a'ya ait ilk iki mod açısıl frekans değerleri  $\omega_1=5,7601$ ,  $\omega_2=19,082$  olduğundan  $\alpha=0,265$  ve  $\beta=0,00242$  ve Model b'ye ait ilk iki mod açısıl frekans değerleri  $\omega_1=4,5193$ ,  $\omega_2=14,249$  olduğundan  $\alpha=0,206$  ve  $\beta=0,0032$  olarak hesaplanmıştır.

### 6.1.6. Sönümleyici katsayısı hesabı

Sönümleyici katsayıları Denklem 4.17 yardımıyla hesaplanacaktır. İki çerçevede de kiriş açıklıkları ve kat yükseklikleri aynı olduğundan, sönümleyici katsayısı ve büyütme faktörünü hesaplamak için gerekli ölçüler Şekil 6.3' de verilmiştir.



Şekil 6. 3. Farklı konfigürasyonlar için ölçüler a) Diyagonal, b) Alt dirsek, c) Üst dirsek, d) Yeni konfigürasyon ( $L_1=3,5\text{m}$ ,  $L_2=6,0\text{m}$ ,  $L_3=3,5\text{m}$ ,  $L_4=2,28\text{m}$ ,  $\theta_1=30^\circ$ ,  $\theta_2=40^\circ$ )

Diyagonal tip konfigürasyon için sönümleyici katsayısı hesabı detayları Model a için Çizelge 6.3' de, Model b için Çizelge 6.4' de verilmiştir.

Çizelge 6. 3. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model a, Diyagonal Tip, 0,08 sönüm oranı)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1$ (sn)	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
5	0,095448	0,011887	45,54	1,09	0,864	0,000141301	0,414884005
4	0,083561	0,018882	45,54			0,00035653	0,31798035
3	0,064679	0,024387	45,54			0,000594726	0,190510808
2	0,040292	0,025336	45,54			0,000641913	0,073931697
1	0,014956	0,014956	45,54			0,000223682	0,010186475
						$\Sigma=0,001958$	$\Sigma=1,00749$

$$C_{0,08} = \frac{(0,08-0,03) 4 \pi 1,00749}{1,09 0,001958} = 397 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.1)$$

Çizelge 6. 4. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model b, Diyagonal Tip, 0,08 sönüm oranı)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1$ (sn)	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
11	0,042035	0,001899	46,89	1,41	0,864	2,69201E-06	0,082851874
10	0,040136	0,002735	46,89			5,58396E-06	0,07553503
9	0,037401	0,003508	46,89			9,18643E-06	0,065591364
8	0,033893	0,003801	47,20			1,07851E-05	0,054220313
7	0,030092	0,004279	47,20			1,36682E-05	0,042740944
6	0,025813	0,004693	47,20			1,6441E-05	0,031449878
5	0,02112	0,005006	47,20			1,87072E-05	0,021053768
4	0,016114	0,004855	47,57			1,75957E-05	0,012352074
3	0,011259	0,004781	47,57			1,70634E-05	0,006030215
2	0,006478	0,004213	47,57			1,32498E-05	0,001996251
1	0,002265	0,002265	47,57			3,82969E-06	0,000244045
						$\Sigma=0,000128803$	$\Sigma=0,394066$

$$C_{0,08} = \frac{(0,08-0,03) 4 \pi 0,394066}{1,41 0,000128803} = 1363 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.2)$$

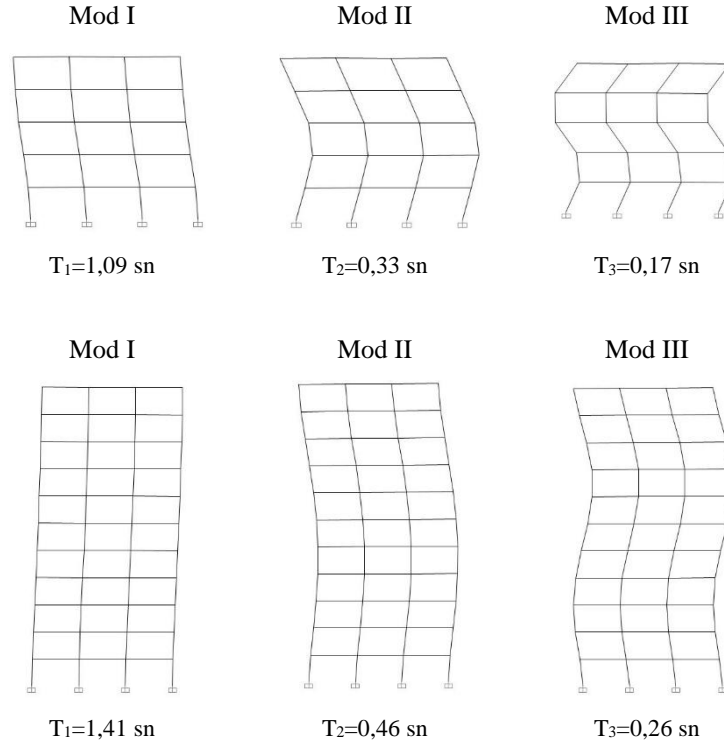
Beş katlı ve on bir katlı çerçeveler için konfigürasyona bağlı büyütme faktörü ve beklenen sönüm oranları Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6. 5. Viskoz sönümleyici parametreleri

Konfigürasyon Tipi	Model a	Model b	Her iki Model için	
	C kN.sn/m	C kN.sn/m	Büyütme Faktörü ( $\alpha$ )	$\xi_{\text{eff}}$ (%)
Diyagonal (M2)	397	1363	0,864	8,0
Alt Dirsek(M3)			1,879	26,64
Üst Dirsek (M4)			2,379	40,91
Yeni konfigürasyon (M5)			1,680	21,90

### 6.1.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

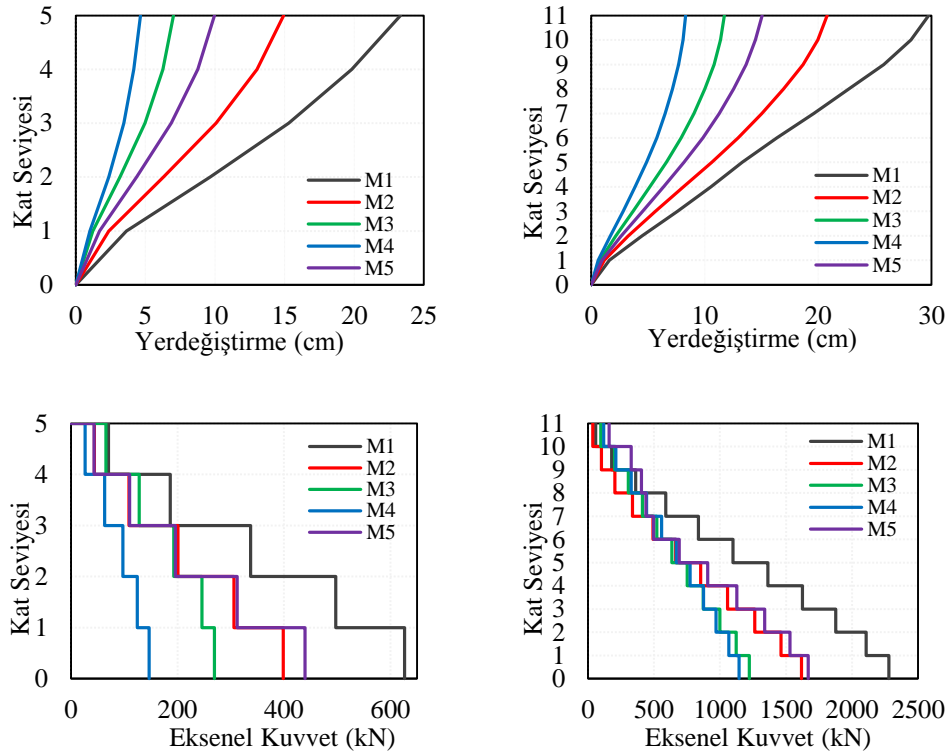
Çelik çerçeveler üzerinde, dört adet deprem kaydı kullanılmak suretiyle zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bu analizler neticesinde çerçevelerin ilk üç mod şekli ve doğal titreşim periyotları ve bulunan sonuçlar Şekil 6.4’de görülmektedir.



Şekil 6. 4.Modellere ait doğal titreşim periyotları ve mod şekilleri

Şekil 6.5 ve 6.6’da iki çerçeveye ait kat yerdeğiştirmesi, en büyük eksenel kuvvet değerleri, kat kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri görülmektedir. Grafiklerin sol tarafında Model a’ya, sağ tarafında ise Model b’ye ait sonuçlar bulunmaktadır. Grafiklerde aynı sönümleyici katsayısı ile dört farklı konfigürasyonda teşkil edilen viskoz sönümleyiciler için elde edilen değerler verilmiştir. Böylelikle, sönümlemede konfigürasyonun ne derece etkili olduğu anlaşılmaya çalışılmıştır. Şekil 6.5’e bakılacak olursa her iki model için en büyük yerdeğiştirme değerlerinin sönümsüz durumda meydana geldiği görülmektedir. Bu değer en üst kat için Model a’da 23,32 cm ve Model b’de 29,76 cm’dir. Daha sonra 0,08 sönüm oranı sağlayan diyagonal tip ve 0,2190 sönüm oranı sağlayan yeni konfigürasyon yer almaktadır. 0,4091 sönüm oranı sağlayan üst dirsek tipi konfigürasyon için yer değiştirme değerleri Model a’da 4,65 cm ve Model b’de 8,33 cm’ye

kadar düşmüştür. Her iki çerçeve için, en verimli durum büyükten küçüğe doğru üst dirsek, alt dirsek, yeni konfigürasyon ve diyagonal tip şeklinde çıkmıştır. Tepe noktası yerdeğişimlerinden açıkça görülmektedir ki, farklı konfigürasyonlar aynı sönümleyici katsayısı kullanılmasına rağmen oldukça farklı sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, viskoz sönümleyicilerin kat yerdeğıştirmelerini önemli ölçüde azalttığı ve kat yerdeğıştirmeleri bakımından üst dirsek tipi konfigürasyondan en iyi sonucun alındığı söylenebilir.



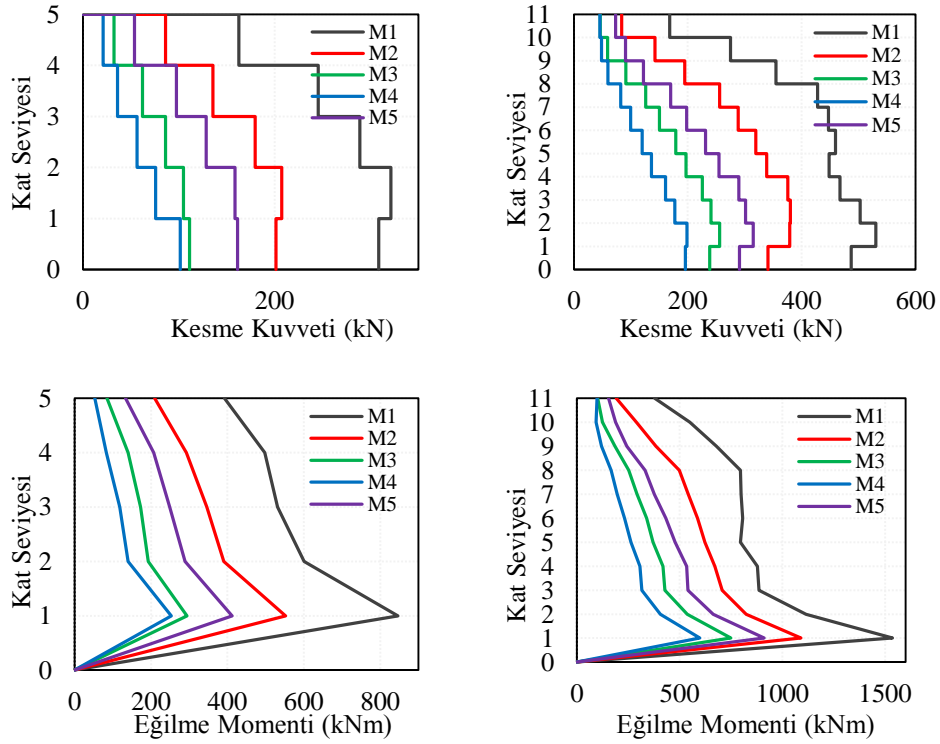
Şekil 6.5. Farklı sönümleyici konfigürasyonları için kat yerdeğıştirmeleri ve eksenel kuvvet değerleri (Model a-Model b)

Yine Şekil 6.5'de çerçevelerin kat kolonlarında oluşan en büyük eksenel kuvvet değerleri görülmektedir. Her iki model için, sönümleyicisiz duruma göre sönümleyici kullanılmasının eksenel kuvvetler üzerinde olumlu etkisi olmuştur. Yerdeğıştirme değerlerinde olduğu gibi, dirsek tipi konfigürasyonlar diyagonal ve yeni tip konfigürasyonlara göre daha verimli olmuşlardır.

Şekil 6.6'da en büyük kat kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerine ilişkin sonuçlar görülmektedir. Viskoz sönümleyici ilavesi kat kesme kuvvetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Dirsek tipi sönümleyiciler birbirine yakın sonuçlar vermişlerdir. Yeni

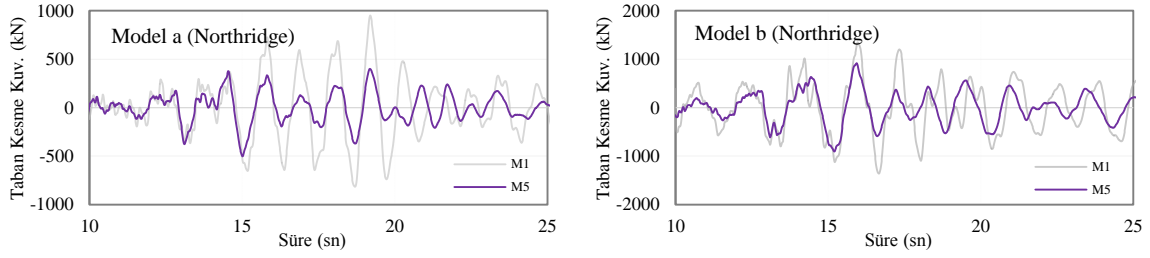


konfigürasyon ise beklenildiği üzere, alt dirsek ve diyagonal tip konfigürasyonun arasında yer almıştır. Sönümleyicisiz durum ile karşılaştırılacak olursa, yeni tip konfigürasyon, zemin kat en büyük kesme kuvvetlerinde Model a için % 48, Model b için yaklaşık % 40 oranında düşüş sağlamıştır. Sonuçlara bakıldığında, en büyük kat kesme kuvvetleri bakımından üst dirsek tipi sönümleyicilerden en iyi sonuç alınmış ise de bu uygulama için yeni tip konfigürasyonda n katsayısının 3 alındığı unutulmamalıdır.



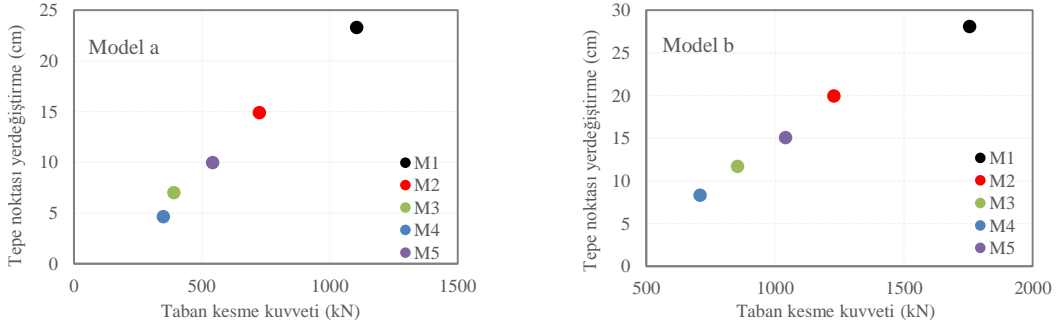
Şekil 6. 6. Farklı sönümleyici konfigürasyonları için kat kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri (Model a-Model b)

Yine Şekil 6.6'da kat kolonlarında deprem tahriki sonucu oluşan en büyük eğilme momenti değerleri görülmektedir. Eğilme momenti değerlerine bakıldığında sönümleyicilerin etkisi açıkça görülebilir. En düşük verim diyagonal tip sönümleyicide elde edilmiş bile olsa, sönümleyicisiz duruma göre Model a için % 35, Model b için % 29'luk bir eğilme momenti düşüşü sağlanmıştır. Yeni konfigürasyonda ise sönümleyicisiz duruma göre Model a için % 51, Model b için % 41'lik bir eğilme momenti düşüşü sağlanmıştır. Eğilme momenti değerlerinde de en iyi verim yine üst dirsek konfigürasyonundan alınmıştır. Üst dirsek tipinde, sönümleyicisiz duruma göre Model a için % 70, Model b için % 61'lik bir eğilme momenti düşüşü sağlanmıştır.



Şekil 6. 7. Sönümsüz durum ve yeni tip konfigürasyon için taban kesme kuvveti değerleri

Şekil 6.7' de Northridge yer ivmesi için modellerde meydana gelen taban kesme kuvveti değerleri verilmiştir. Yine Şekil 6.8' de tüm konfigürasyonlar için modellerde görülen en büyük tepe noktası deplasmanı ve taban kesme kuvveti değerleri görülmektedir. Yeni konfigürasyonun, taban kesme kuvveti değerlerinde sürekli bir düşüş sağladığı yukarıdaki şekilde görülmektedir. En büyük taban kesme kuvveti değerlerinde sönümsüz duruma göre Model a'da % 51, Model b'de ise % 41 düşüş sağlanmıştır. Tepe noktası yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvetleri aynı grafiğe işlendiğinde Çizelge 6.5'de verilmiş olan beklenen sönüm oranlarına uygun bir dağılım çıktığı görülebilir.



Şekil 6. 8. Tepe noktası yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvetleri

### 6.1.8. Uygulama I için sonuçlar

Analizler neticesinde viskoz sönümleyici ilavesinin, çalışmada kullanılan iki çerçeve için de performans artışı sağladığı görülmüştür. Çerçevelerde sismik tepkiler sonucu oluşan iç kuvvet, kat yerdeğişimi ve taban kesme kuvveti değerlerinde, beklenen sönüm oranlarına paralel olarak düşüşler gözlenmiştir. Farklı konfigürasyonlara sahip viskoz sönümleyicilerin sismik tepkileri ve enerji sönümlenme kapasiteleri de farklı olmaktadır. Diyagonal konfigürasyona alternatif olarak geliştirilen dirsek tipi konfigürasyonlar, hem 5 katlı hem de 11 katlı çerçevelerde tüm analizler için daha olumlu sonuç vermişlerdir. Bununla beraber

yeni konfigürasyon kendinden beklenen performans seviyesine ulaşarak aynı sönüm katsayısının kullanıldığı diyagonal konfigürasyona göre daha olumlu sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Yeni konfigürasyonun sağlayacağı sönüm oranı değerinin  $n$  katsayısına bağlı olduğu bilindiğinden, dirsek tipi sönümleyicilere daha yakın sonuçlar elde etmek için bu katsayının büyütülmesi mümkündür.

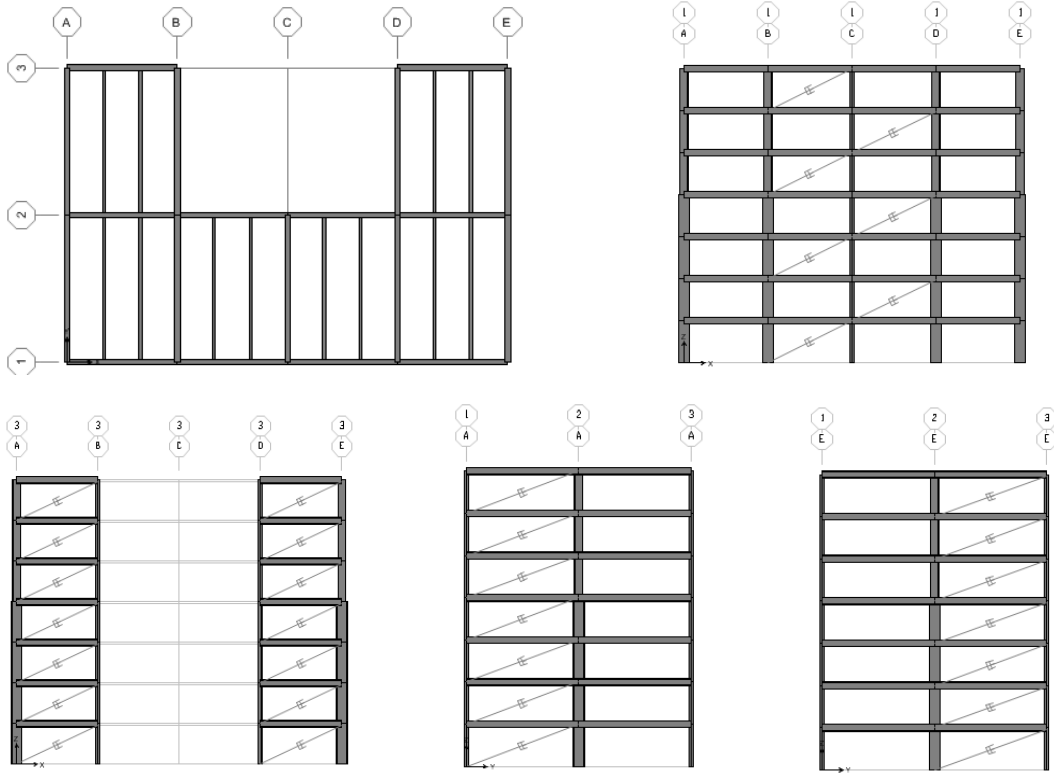
## **6.2. Uygulama II. Burulma Düzensizliği Bulunan Çelik Yapılara Viskoz Sönümleyici Uygulanması**

### **6.2.1. Uygulamanın amacı**

Bir yapıyı burulma etkilerinden koruyabilmenin en iyi yolu, plan üzerinde yapının kütle ve rijitlik merkezlerinin üst üste gelmesini sağlamaktır. Fakat çeşitli sebeplerden dolayı bu her zaman mümkün olmaz. Deprem vb. dinamik yüklerin yapının ağırlık merkezine etkidiği ve bu yüklere tepki olarak ortaya çıkan atalet kuvvetlerinin de rijitlik merkezine etkidiği varsayımı ile iki merkez arasındaki kaçıklıktan dolayı yapıda burulma momenti ve dolayısıyla taşıyıcı sistem elemanlarında ek kuvvetler ortaya çıkacaktır. Bu uygulamada pasif kontrol sistemlerinden viskoz sönümleyicilerin, burulma düzensizliği bulunan çelik yapılar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla planda düzensiz (asimetrik) U ve L şeklinde iki adet 7 katlı çelik yapı modeli tasarlanmıştır. Bu modeller üç farklı deprem ivmesi altında zaman tanım alanında çözümlenmiştir. Sonuçlar, sönümleyicisiz ve sönümleyici ilave edilmiş durumlar için karşılaştırılmıştır. Taşıyıcı sistem rijitliği arttırılmaksızın, viskoz sönümleyici ilavesinin, modellerdeki burulma davranışını önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir.

### **6.2.2. Kullanılan çelik binalar**

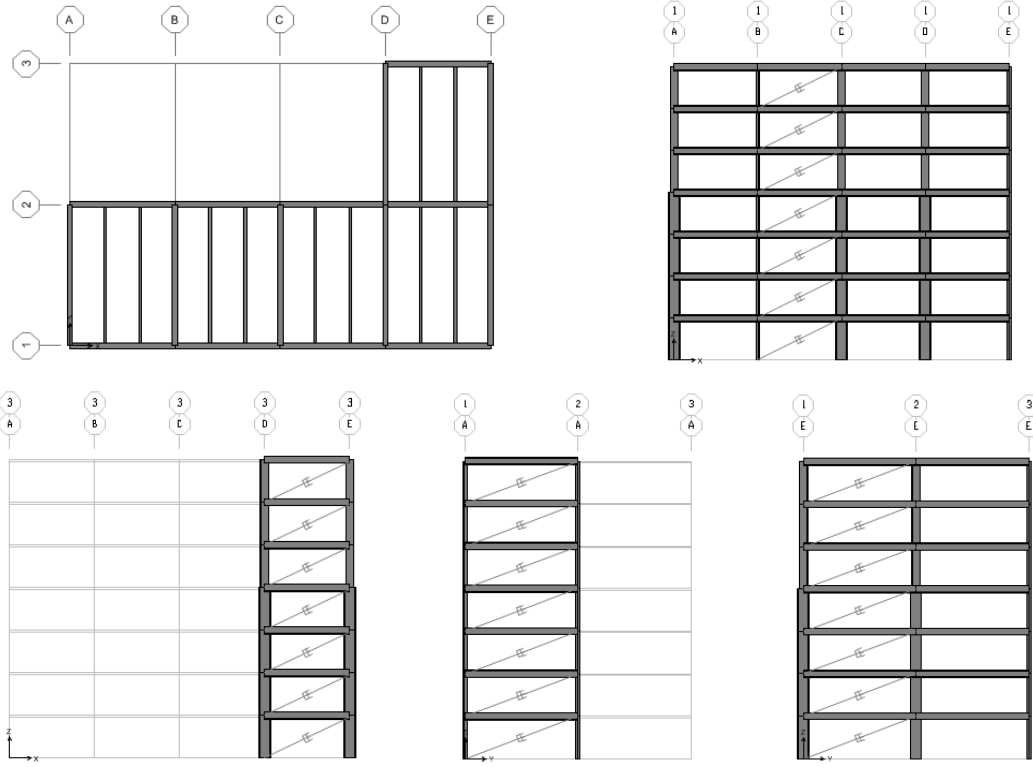
Bu uygulamada kullanılan ve detayları aşağıda verilmiş olan çelik yapıların tasarımı, detayları Bölüm 5.8’de verilen boyutlandırma kurallarına uygun bir şekilde ve 5.1 başlığı altında verilmiş olan eşdeğer deprem yükü yönteminden faydalanılarak yapılmıştır. Analizlerde iki adet yedi katlı çelik yapı modeli kullanılmıştır (Şekil 6.9 - 6.10).



Şekil 6. 9. Model U'ya ait görünüşler

Her iki modele etkiyen yayılı yükler, en üst katta  $3,8 \text{ kN/m}^2$  sabit ve  $1,0 \text{ kN/m}^2$  hareketli, diğer katlarda ise  $4,1 \text{ kN/m}^2$  sabit ve  $2,0 \text{ kN/m}^2$  hareketli yük şeklindedir. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10' da Model U ve Model L ye ait görünüşler ve diyagonal sönümleyici dağılımları görülmektedir. A-E aksları arası  $6 \cdot 4 = 24 \text{ m}$ , 1-3 aksları arası  $8 \cdot 2 = 16 \text{ m}$  ve kat yüksekliği  $3 \cdot 7 = 21 \text{ m}$ 'dir.

Taşıyıcı sistemler Fe52 yapı çeliğinden imal edilmiş olup elastisite modülü  $210000 \text{ MPa}$  poisson oranı  $0,3$  çekme gerilmesi ( $\sigma_c$ )  $235 \text{ MPa}$ , akma gerilmesi ( $\sigma_a$ )  $360 \text{ MPa}$  ve kesme gerilmesi ( $\tau_{em}$ )  $122 \text{ MPa}$  olarak alınmıştır. Her kat kendi içinde rijit diyafram olarak tanımlanmıştır. Hareketli yük katılım katsayısı  $0,3$ , etkin yer ivmesi katsayısı  $0,3$  (ikinci derece deprem bölgesi), bina önem katsayısı  $1,0$ , taşıyıcı sistem davranış katsayısı  $8$  (Süneklik düzeyi yüksek sistem), yerel zemin sınıfı  $Z_4$  spektrum karakteristik periyotları ( $T_a=0,20$ ,  $T_b=0,90$ ) olarak tanımlanmıştır. Analizler Sap2000 yapısal analiz programında yapılmıştır.



Şekil 6. 10. Model L'ye ait görüntüler

Çizelge 5.14'de belirtilen 41 adet yükleme kombinasyonuna bağlı olarak elde edilen iç kuvvetler neticesinde Model U ve Model L kolon ve kirişlerinde kullanılması uygun görülen enkesitler Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6. 6. Analizler neticesinde seçilen kesitler

Kat Seviyesi	Kolonlar	Ana kirişler	İkincil kirişler
7			
6	HE600B		
5		HE500B	IPE330
4			
3	HE800B		
2			
1			

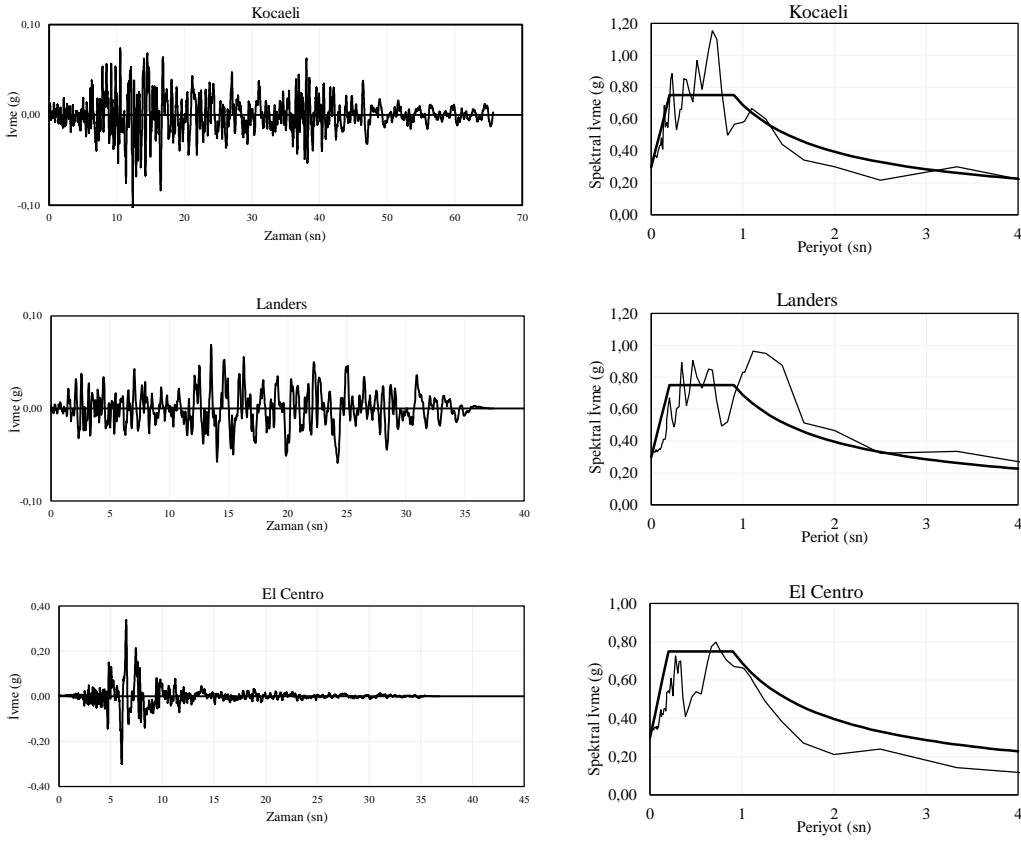
### 6.2.3. Zaman tanım alanında analiz

Yapıların yer ivmesi altındaki davranışının belirlenmesi için zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizler yapılmıştır. Toplam üç adet deprem verisi kullanılmıştır. Analizlerde P-delta etkileri dikkate alınmıştır ve Newmark sayısal integrasyon yöntemi

kullanılmıştır (Bölüm 5.6.3). İntegrasyon parametreleri  $\beta=0,25$  ve  $\gamma=0,50$  (sabit ortalama ivme) olarak seçilmiştir. Kullanılan sönüm oranı Rayleigh orantılı sönümdür.

#### 6.2.4. Yer ivmeleri

Bu uygulamada Fahjan'ın (2008) yaptığı bir çalışma neticesinde ölçeklendirilerek deprem yönetmeliğinde verilen tasarım spektrumuna uygun hale getirilmiş olan üç adet deprem kaydı kullanılmıştır. Pasifik Dep. Müh. Arş. Merkezi'nden (PEER, 2006) alınan kayıtlar Çizelge 6.7'de, kullanılan deprem kayıtları ve spektral ivme-zaman grafikleri ise Şekil 6.11' de görülmektedir.



Şekil 6. 11. Ölçeklendirilmiş spektral ivme-zaman grafikleri

Çizelge 6. 7. Yer ivmesi kayıtları

Kayıt ismi	No	Tarih	İstasyon	Kayıt	Süre (sn)	Ölçek
<b>Kocaeli</b>	P1093	17/08/99	Bursa Tofas	BUR000	57,2	11,63
<b>Landers</b>	P0832	28/06/92	Fountain Valley	EUC292	38,5	16,16
<b>El Centro</b>	P0175	15/10/79	5028 EcArray#7	H-E07230	36,8	2,69

### 6.2.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı

Çelik modellerin içsel sönümün hesabı için Rayleigh yaklaşımı kullanılmıştır. Modellere ait sönüm matrisi ile  $\alpha$  ve  $\beta$  sabitleri Denklem 4.13 vasıtasıyla hesaplanmış olup, ilk iki moda ait sönüm oranları birbirine eşit ve  $\xi_i = \xi_j = 0,03$  olarak alınmıştır. Model U'ya ait ilk iki mod açısıl frekans değerleri  $\omega_1 = 5,736$ ,  $\omega_2 = 6,15$  olduğundan  $\alpha = 0,178$  ve  $\beta = 0,00505$ , Model L'ye ait ilk iki mod açısıl frekans değerleri  $\omega_1 = 5,840$ ,  $\omega_2 = 6,427$  olduğundan  $\alpha = 0,184$  ve  $\beta = 0,00489$  olur.

### 6.2.6. Sönümleyici katsayısı hesabı

Sönümleyici katsayıları Denklem 4.17 yardımıyla hesaplanacaktır. Sönümleyiciler her kata birer adet olacak şekilde (üniform), orta açıklığa ve diyagonal olarak yerleştirilmiştir. Tüm modeller için birinci mod içsel sönüm oranı 0,03, toplam efektif sönüm oranı ise 0,08 ve 0,20 olarak seçilmiştir. Buna göre üniform dağılımda hedef sönüm oranlarını sağlayacak sönümleyici katsayıları Çizelge 6.8'de görülmektedir.

Çizelge 6. 8. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model U-X Yönü)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1$ (sn)	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
7	0,036488	0,002942	158	1,09	0,894	0,0000069	0,211334
6	0,033546	0,004615	205			0,0000170	0,231488
5	0,028931	0,00629	205			0,0000316	0,172177
4	0,022641	0,006786	207			0,0000368	0,106529
3	0,015855	0,0069	207			0,0000381	0,052241
2	0,008955	0,005955	207			0,0000283	0,016665
1	0,003	0,003	207			0,0000072	0,00187
						$\Sigma = 0,00016595$	$\Sigma = 0,7923052$

$$C_{0,08} = \frac{(0,08-0,03) 4 \pi 0,7923052}{1,09 0,00016595} = 2742 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.3)$$

$$C_{0,20} = \frac{(0,20-0,03) 4 \pi 0,7923052}{1,09 0,00016595} = 9321 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.4)$$

Çizelge 6. 9. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model L-Y Yönü)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1$ (sn)	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
7	0,045657	0,003644	132	1,08	0,936	0,0000116	0,276184232
6	0,042013	0,00575	171			0,0000290	0,302949912
5	0,036263	0,007866	171			0,0000542	0,225699659
4	0,028397	0,008513	173			0,0000635	0,139861332
3	0,019884	0,008661	173			0,0000657	0,06857412
2	0,011223	0,007471	173			0,0000489	0,021845936
1	0,003752	0,003752	173			0,0000123	0,002441622
						$\Sigma=0,00028525$	$\Sigma=1,037557$

$$C_{0,08} = \frac{(0,08-0,03) 4 \pi 1,037557}{1,08 0,00028525} = 2116 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.5)$$

$$C_{0,20} = \frac{(0,20-0,03) 4 \pi 1,037557}{1,08 0,00028525} = 7195 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.6)$$

Çizelge 6. 10. Tüm durumlar için hesaplanan sönümleyici katsayıları (kN sn/m)

	$\xi_{\text{eff}}$ (%)	X yönü	Y yönü
Model U	8	2742	2970
	20	9321	10094
Model L	8	2606	2116
	20	8860	7195

### 6.2.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Çelik çerçeveler üzerinde, üç adet deprem kaydı kullanılmak suretiyle zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır. Bu analizler neticesinde çerçevelerde ilk yedi moda ait veriler Çizelge 6.11'de verilmiştir.

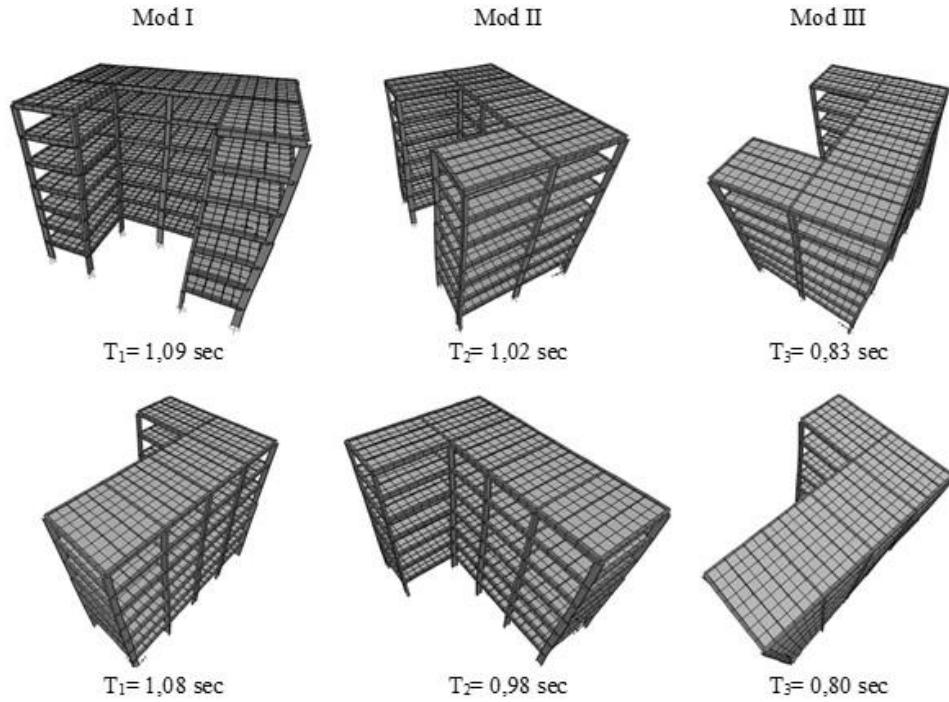
U ve L planlı çelik yapılar üzerinde, x ve y yönlerinde, sönümleyicisiz ve sönümleyicili durumlar için zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler neticesinde, sönümleyici ilavesinin ve sönüm oranının, yapıların davranışlarında ne gibi iyileşmeler sağladığı anlaşılmaya çalışılmıştır.



Çizelge 6. 11. İlk yedi mod için modellere ait veriler

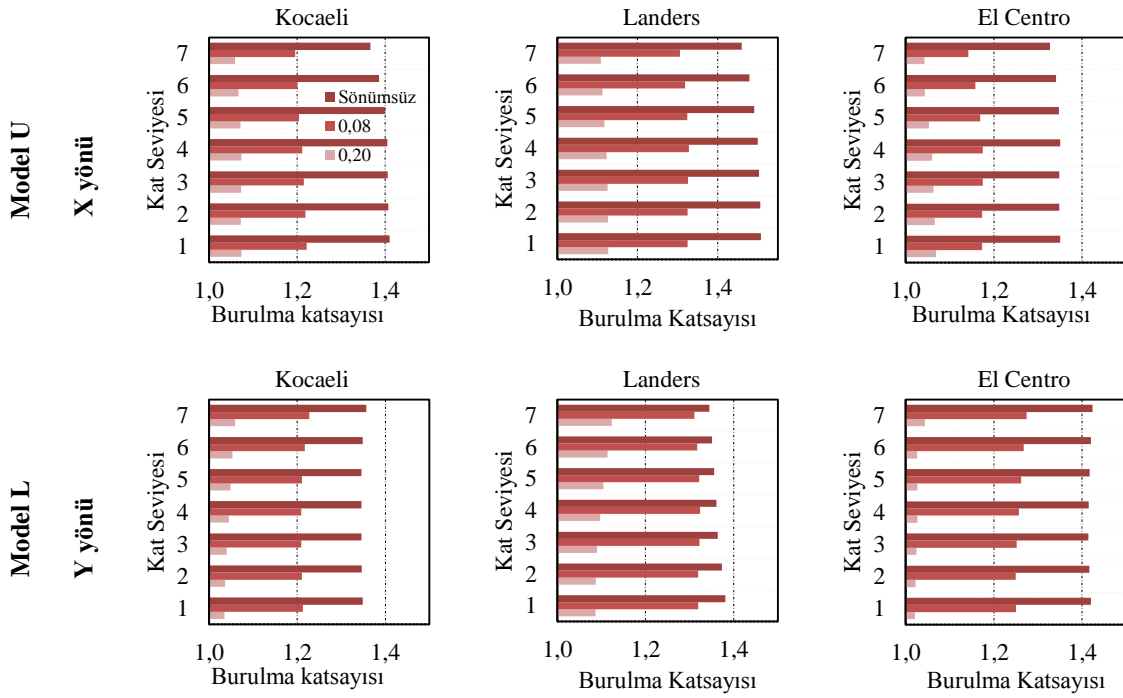
	Mod	Periyot (sn)	Açısal hız (rad/sn)	Eklenik modal kütle oranı	
				X yönü	Y yönü
Model U	1	1,095371	5,7361	0,50887	0,0001
	2	1,021294	6,1522	0,50887	0,76717
	3	0,831817	7,5536	0,76814	0,76717
	4	0,331997	18,925	0,84946	0,76717
	5	0,315156	19,937	0,84946	0,88158
	6	0,260727	24,099	0,88626	0,88158
	7	0,17869	35,163	0,9084	0,88158
Model L	1	1,075808	5,8404	0,0007	0,69321
	2	0,977577	6,4273	0,76683	0,69447
	3	0,796222	7,8912	0,76818	0,76371
	4	0,326927	19,219	0,76908	0,87016
	5	0,302236	20,789	0,8849	0,87178
	6	0,245948	25,547	0,88637	0,87989
	7	0,175079	35,888	0,88697	0,91907

Şekil 6.12’ de ilk üç mod için her iki modele ait mod şekilleri görülmektedir.



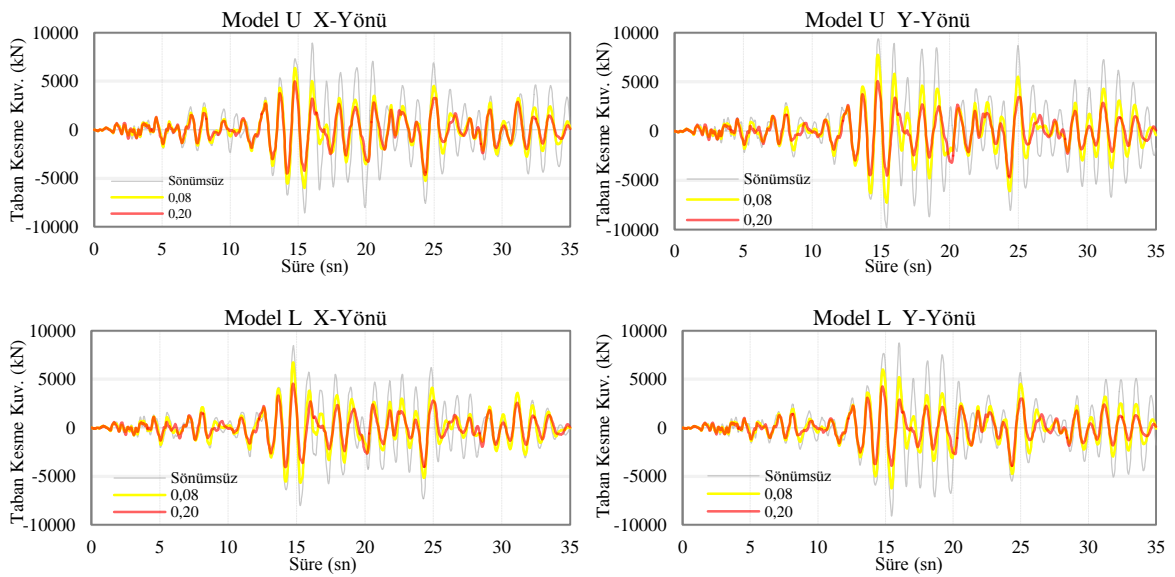
Şekil 6. 12. Her iki modele ait ilk üç mod şekli

Şekil 6.13’de çalışmada kullanılan üç adet deprem kaydı için burulma düzensizliği katsayıları ( $\eta_{bi}$ ) verilmiştir. Model U’da X yönünde, Model L’de ise Y yönünde burulma etkileri gözlemlendiğinden, sadece ilgili yönlerdeki veriler sunulmuştur.



Şekil 6. 13. Her iki modele ait burulma katsayıları ( $\eta_{bi}$ )

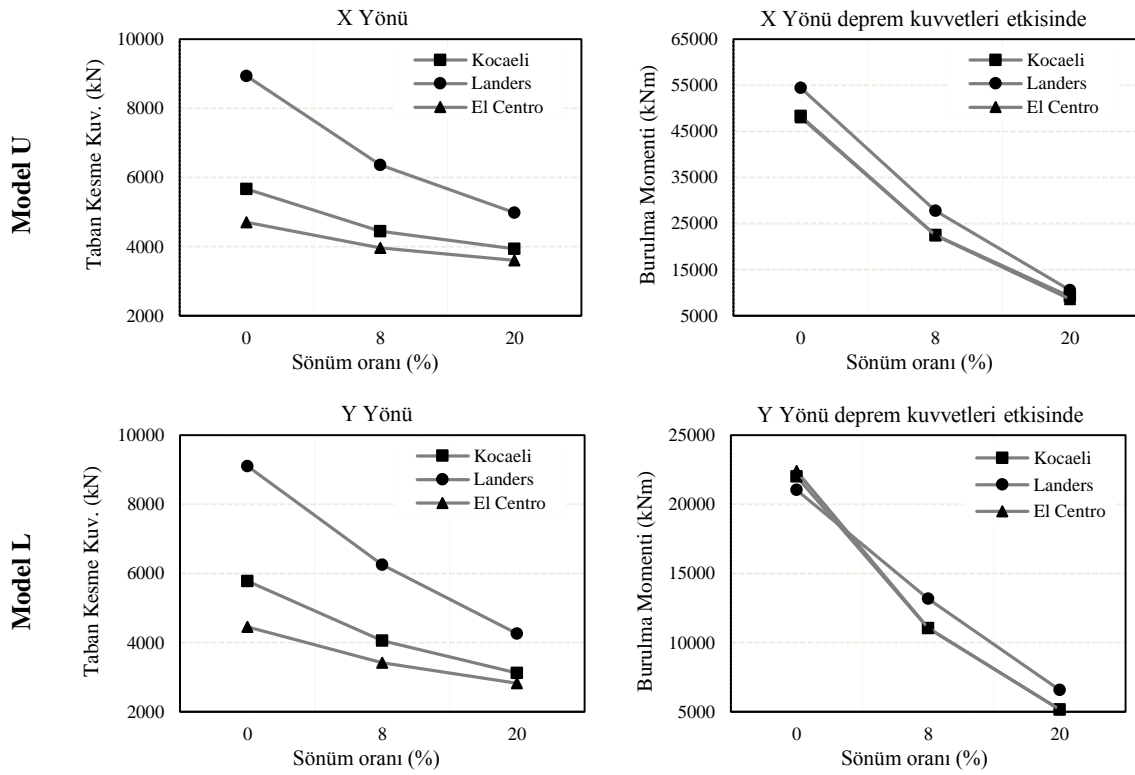
Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere, planda düzensiz taşıyıcı sisteme sahip yapılarda, burulma etkilerinin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Her iki modelde de sönümleyicisiz durumda burulma katsayıları 1.2 üst limit değerini aşmıştır. 0.08 sönüm oranında, Model U sadece El Centro kaydı için limit değeri aşmamıştır. 0.20 sönüm oranı için tüm değerler üst limit değerinin altında kalmış olup burulma etkileri sönümlenmiştir.



Şekil 6. 14. Modeller için taban kesme kuvveti-sönüm oranı ilişkisi

Şekil 6.14’de modeller için taban kesme kuvveti-süre ilişkileri verilmiştir. Viskoz sönümleyicilerin modellere ilave edilmesi ile her iki modelin her iki yönü için taban kesme kuvvetlerinde azalma gözlenmiştir.

Şekil 6.15’de modellerde oluşan en büyük taban kesme kuvveti ve burulma momenti (yapı ağırlık merkezi etrafında) değerleri verilmiştir. Taban kesme kuvvetlerindeki düşüş oranı ile ilgili olarak, ne aynı modelin x ve y yönlerinde, ne de iki model arasında anlamlı bir bağımlılık görülmemiştir.

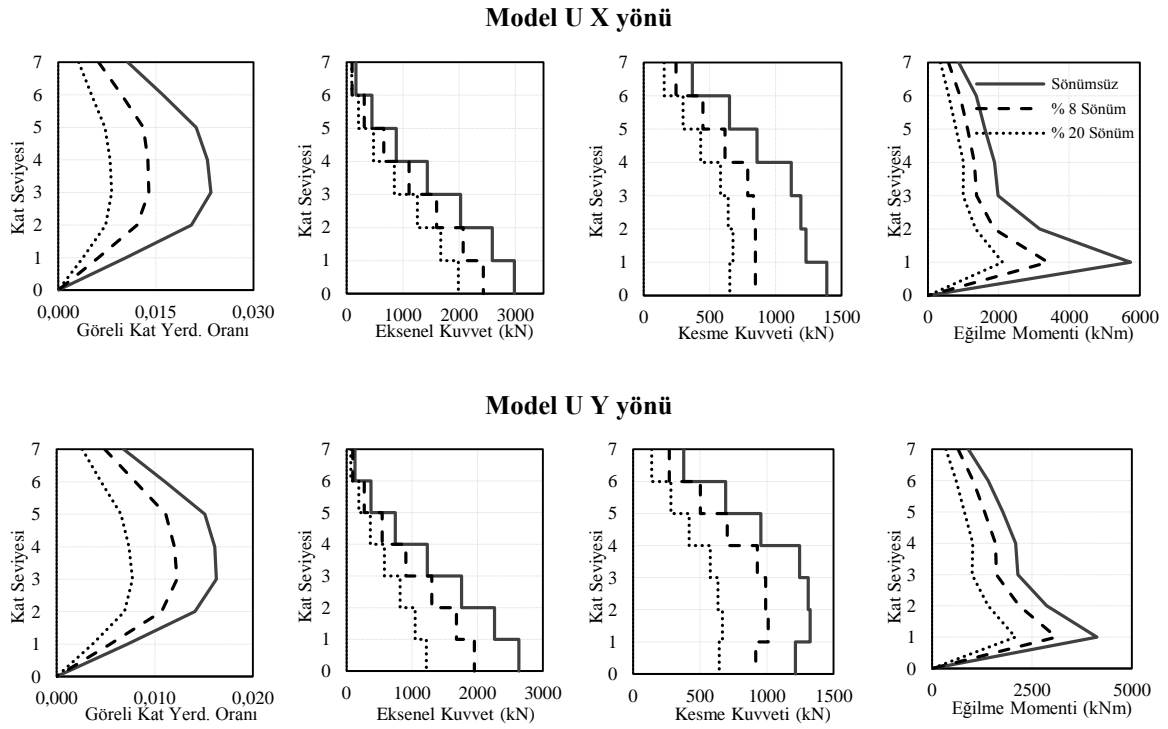


Şekil 6. 15. Taban kesme kuvveti ve burulma momenti değerleri

Örnek vermek gerekirse, Landers yer ivmesi altında Model U’da x yönünde oluşan taban kesme kuvvetlerindeki azalma yüzdesi, sönümsüz duruma göre, 0,08 ve 0,20’lik sönüm oranları için sırasıyla %28,8 ve %44,2 iken, El Centro yer ivmesi altında bu değerler %15,7 ve %23,4 olarak bulunmuştur. Oysa Model L’de bu değerler Landers yer ivmesi altında %31,3 ve %53,2’ye kadar yükselmiştir.

Analizlerden elde edilen diğer bir sonuç da modellerde z etrafında oluşan burulma momenti değerleridir. Model U için x yönünde, Model Y için ise y yönünde burulma etkileri

gözleendiğinden sadece bu yönlere ait sonuçlar değerlendirilmiştir. Model U ele alınacak olursa, her üç yer ivmesi için elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Aynı sonuç Model L için de söylenebilir. Bununla beraber, taban kesme kuvveti değerlerinde elde edilenlerden farklı olarak, burulma momentinde sönümleyici ilavesiyle elde edilen azalma oranı, 0,08 ve 0,20 sönüm oranları için her iki modelde de sırasıyla %50 ve %80 civarında olmuştur.

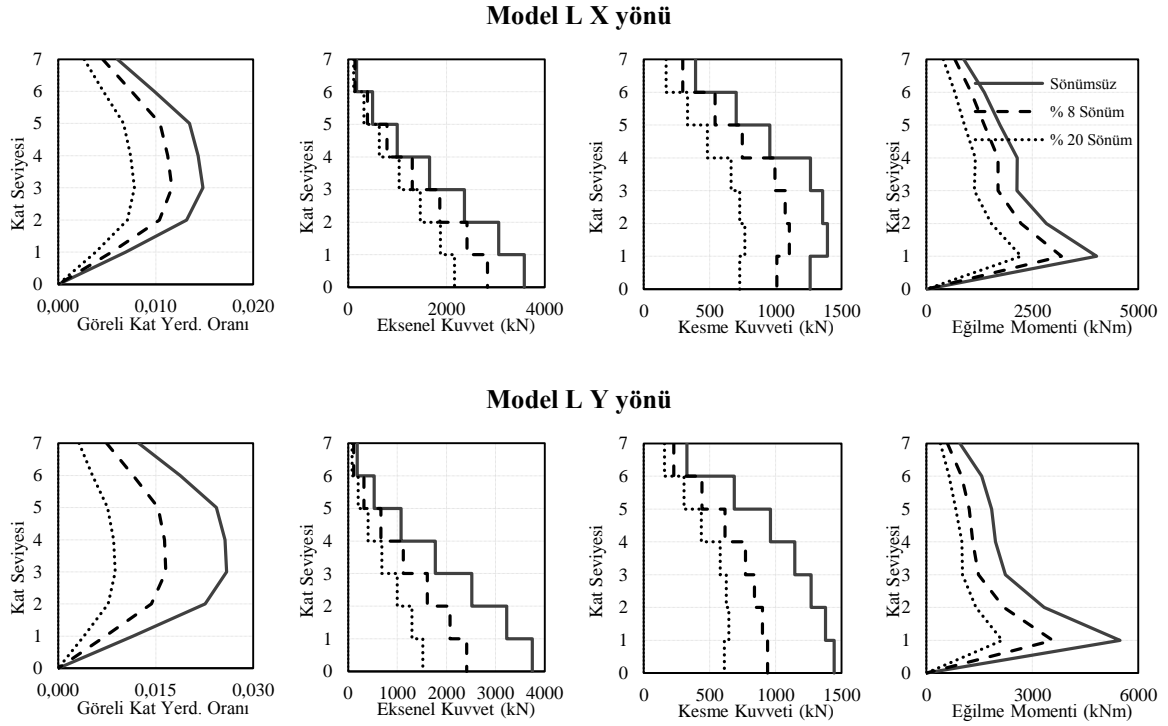


Şekil 6. 16. Kolonlarda oluşan en büyük iç kuvvet değerleri (Model U)

Şekil 6.16’da Model U’nun kolonlarında üç adet yer ivmesi altında oluşan en büyük görel kat ötelenme oranı, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin ortalama değerleri görülmektedir. X yönünde 0,08 ve 0,20 sönüm oranları için görel kat ötelenme oranı sırasıyla ortalama olarak yaklaşık %41 ve %65’lik bir azalma göstermiştir.

Kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri için ise bu değerler birbirine yakın olarak yaklaşık %40 ve %55 olmuştur. Eksenel kuvvetlerde ise ortalama olarak yaklaşık %19 ve %33 olmuştur. Y yönünde ise tüm değerler, 0,08 sönüm oranı için ortalama olarak yaklaşık % 25, 0,20 sönüm oranı için ise %52 oranında bir azalma göstermişlerdir. Y yönünde tüm değerlerin aynı oranda düşme eğilimi göstermesinin sebebinin, binanın bu yönde simetrik oluşundan ileri geldiği düşünülmektedir.

Model L'ye bakılacak olursa yine tüm iç kuvvet değerleri artan sönüm oranları ile bir azalma göstermişlerdir. X yönünde ise tüm değerler, 0,08 sönüm oranı için ortalama olarak yaklaşık %20, 0,20 sönüm oranı için ise %44 oranında bir azalma göstermişlerdir.



Şekil 6. 17. Kolonlarda oluşan en büyük iç kuvvet değerleri (Model L)

Bu sonuç Model U'da y yönünde elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermektedir zira Model L'de de x yönünde burulma etkileri görülmemektedir. Y yönünde ise 0,08 ve 0,20 sönüm oranları için tüm iç kuvvet değerlerinde sırasıyla yaklaşık %36 ve %66'lık bir azalma gözlenmiştir. Böylelikle incelenen iç kuvvet değerlerinde sönümleyici ilavesine bağlı olarak belli oranda iyileşmeler sağlandığı söylenebilir.

### 6.2.8. Uygulama II için sonuçlar

Bu uygulamada burulma düzensizliği bulunan iki adet çelik yapı modeli tasarlanmış ve viskoz sönümleyici ilavesi ile bu düzensizliklerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. İki farklı sönüm oranı için iki modelde de en büyük görel kat ötelenme oranı, kat aksel kuvveti, kesme kuvveti, eğilme momenti değerleri ile taban kesme kuvveti ve burulma momenti değerlerinde, sönümleyicisiz duruma göre önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu veriler ışığında, planda burulma etkilerini önleyecek şekilde konumlandırılan viskoz

sönümleyicilerin, öncelikli olarak kat deplasman değerlerini ve buna bağlı olarak kat kolonlarında oluşan iç kuvvet değerleri ve yapıda ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi kaçıklığından kaynaklanan burulma momentlerini belli oranlarda azaltarak, yapıların sismik performansını artırıcı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Yapıya ilave edilen sönümleyici ebatları seçilirken, ortadan kaldırılması istenilen sismik olumsuzluğun derecesine bağlı olarak hesap yapmak gerekir. Zira bu çalışmada öncelikle seçilen 0,08 sönüm oranı, tüm burulma etkilerini ortadan kaldırmakta başarı sağlayamamıştır.

### **6.3. Uygulama III. Geri Çekme Düzensizliği Olan Çelik Çerçeve Sistemlerde Optimum Sönümleyici Dağılımının İncelenmesi**

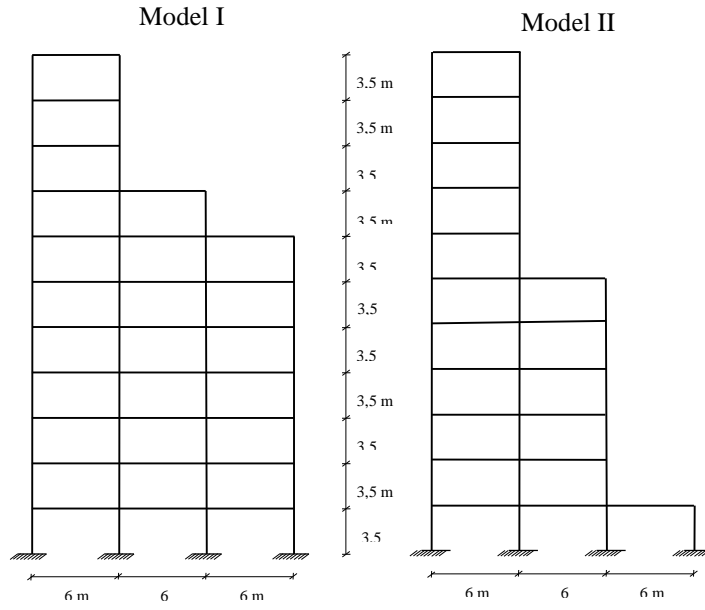
#### **6.3.1. Uygulamanın amacı**

Bu uygulamada DBYYHY ve TS 648'e uygun olarak projelendirilen süneklik düzeyi yüksek on bir katlı ve üç açıklıklı iki tip çelik çerçeve kullanılmıştır. Çerçevelerin analizleri öncelikle sönümleyicisiz olarak, daha sonra düşeyde üniform sönümleyici dağılımında ve en son olarak da Bölüm 5.11'de detayları verilen basitleştirilmiş sıralı arama algoritması kullanılarak optimum sönümleyici dağılımında yapılmıştır. Üniform dağılım ve optimum dağılımında kullanılan toplam sönümleyici büyüklüğü değiştirilmemiş fakat üniform dağılımında 11 adet sönümleyici kullanılırken, optimum dağılımında 15 adet sönümleyici kullanılmıştır. Analizler neticesinde 1.kat kolonlarında oluşan en büyük aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri, katlar için görelî kat yerdeğiştirme oranları ve taban kesme kuvvetleri-tepe noktası yerdeğiştirmeleri incelenmiş olup, optimum dağılımın üniform dağılıma göre ne gibi farklılıklar yarattığı ortaya konulmaya çalışılmıştır.

#### **6.3.2. Kullanılan çelik çerçeveler**

Bu uygulamada kullanılan ve detayları aşağıda verilmiş olan iki adet çerçevenin tasarımı detayları 5.1 başlığı altında verilmiş olan eşdeğer deprem yükü yönteminden faydalanılarak yapılmıştır. Model I ve Model II her ikisi de 11 katlı ve üç açıklıklıdır (Şekil 6.18). Çerçevelere etki eden  $g$  sabit yükü normal katlar ve çatı katı için 20 kN/m,  $q$  hareketli yükü ise 10 kN/m kabul edilmiş ve katlara düzgün yayılı yük olarak etki etkilmişlerdir. Çerçeve Fe52 yapı çeliğinden imal edilmiştir. Her kat kendi içinde rijit diyafram olarak

tanımlanmıştır. Hareketli yük katılım katsayısı 0,3, etkin yer ivmesi katsayısı 0,4 (Birinci derece deprem bölgesi), bina önem katsayısı 1,0, taşıyıcı sistem davranış katsayısı 8 (Süneklik düzeyi yüksek sistem), yerel zemin sınıfı  $Z_3$  spektrum karakteristik periyotları ( $T_a=0,15$ ,  $T_b=0,60$ ) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6. 18. Çerçevelere ait görünüm

Çizelge 5.14'de belirtilen 41 adet yükleme kombinasyonu kullanılarak Sap2000 yapısal analiz programında yapılan analizler neticesinde Model I -II kiriş ve kolonlarında kullanılması uygun görülen enkesitler Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6. 12. Analizler neticesinde seçilen kesitler

Kat Seviyesi	Kolonlar	Kirişler
0-14 m	HE700A	HE450A
14-28 m	HE600A	HE400A
28-38.5 m	HE500A	HE340A

### 6.3.3. Zaman tanım alanında analiz

İki modele ait sismik tepkilerin belirlenebilmesi için zaman tanım alanında doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir. Yerel zemin sınıfına uygun beş adet yer ivmesi kullanılmıştır. P-delta etkileri ihmal edilmiş ve Rayleigh (kütle ve rijitliğe bağlı) sönüm oranı kullanılmıştır.

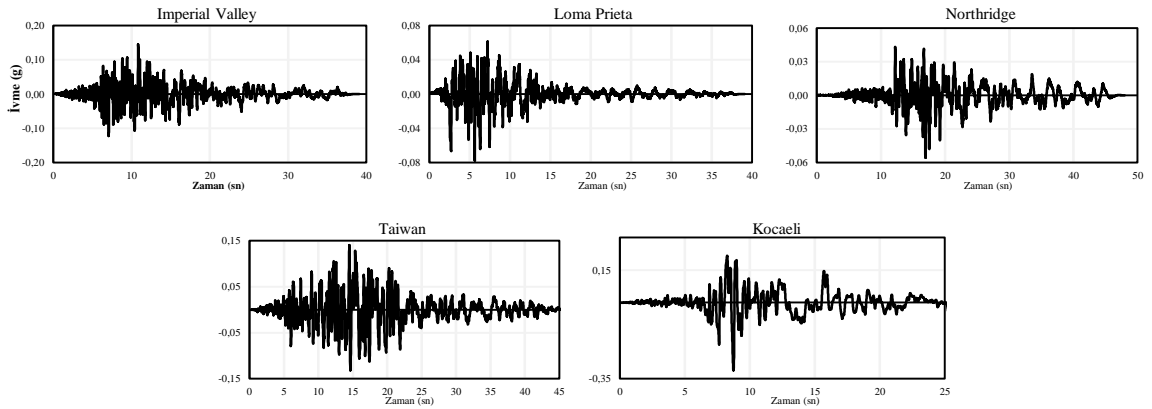
### 6.3.4. Yer ivmeleri

Bu çalışmada Fahjan'ın (2008) yaptığı bir çalışma neticesinde ölçeklendirilerek deprem yönetmeliğinde verilen tasarım spektrumuna uygun hale getirilmiş olan beş adet deprem kaydı kullanılmıştır. Pasifik Dep. Müh. Arş. Merkezi'nden (PEER, 2006) alınan kayıtlar Çizelge 6.13'de verilmiştir.

Çizelge 6. 13. Yer ivmesi kayıtları

Kayıt ismi	Tarih	İstasyon	Kayıt	Maks. İvme (g)	Ölçek
Imperial Valley	10/15/79	El Centro Array#12	HE12140	0,1449	8,46
Loma Prieta	10/18/89	Anderson Dam	ADL340	0,0781	14,82
Northridge	1/17/94	Neenach - Sacatara Ck	NEE090	0,0558	16,92
Taiwan	11/14/86	Smart1	45I01NS	0,1401	5,97
Kocaeli	8/17/99	Duzce	DZC180	0,3119	3,53

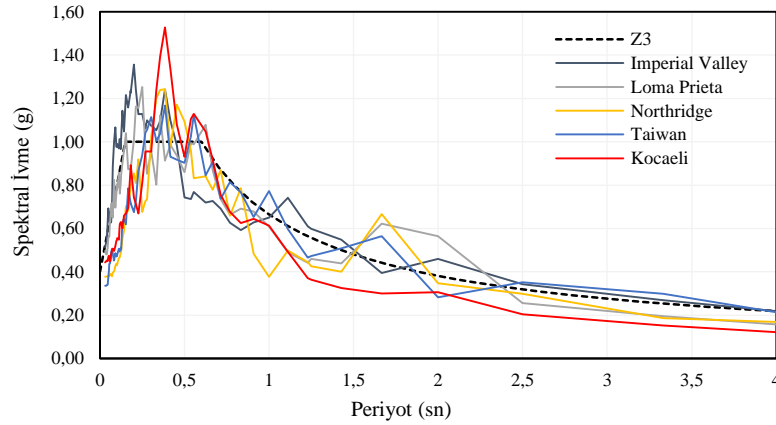
Yukarıdaki çizelgede detayları verilen deprem kayıtları, programa girilirken yatay yer ivme katsayısı ve yer ivmesi ile çarpılmıştır. Şekil 6.19' da, kullanılan deprem kayıtları ve spektral ivme-zaman grafikleri görülmektedir.



Şekil 6. 19. Ölçeklendirilmiş spektral ivme-zaman grafikleri

Bilindiği üzere, yapısal tasarımlar yapılırken, bölgedeki sismik aktiviteler tepki spektrumları ile tanımlanırlar. Tepki spektrumları, bölgede daha önceden meydana gelmiş bir çok sismik aktiviteyi içine alan bir zarf eğrisi olarak tanımlanabilir. Yukarıdaki şekilde görülen 5 adet ivme kaydının Sap2000 analiz programı yardımıyla, birinci derece deprem bölgesi ve  $Z_3$  zemin şartları için elde edilen spektral ivme grafikleri Şekil 6.20' de görülmektedir.





Şekil 6. 20. Ölçeklendirilmiş spektral ivme grafikleri

### 6.3.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı

Çerçeve için içsel sönümün hesabı için Rayleigh yaklaşımı kullanılmıştır. Çerçevelere ait sönüm matrisleri ile  $\alpha$  ve  $\beta$  sabitleri Denklem 4.13 vasıtasıyla hesaplanmış olup, ilk iki moda ait sönüm oranları birbirine eşit ve  $\xi_1 = \xi_2 = 0,03$  olarak alınmıştır. Model I'e ait ilk iki mod açısıl frekans değerleri  $\omega_1 = 5,3597$ ,  $\omega_2 = 12,003$  olduğundan  $\alpha = 0,222$  ve  $\beta = 0,00346$  ve Model II'ye ait ilk iki mod açısıl frekans değerleri  $\omega_1 = 5,1154$ ,  $\omega_2 = 11,701$  olduğundan  $\alpha = 0,214$  ve  $\beta = 0,00357$  olur.

### 6.3.6. Sönümleyici katsayısı hesabı

Çizelge 6. 14. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model I, diyagonal tip, 0,15 sönüm oranı)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1$ (sn)	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
11	-0,09816	-0,00798	15,42	1,17	0,864	0,0000475	0,148559
10	-0,09018	-0,01036	15,42			0,0000801	0,125384
9	-0,07982	-0,01034	15,42			0,0000798	0,098227
8	-0,06948	-0,00817	31,71			0,0000498	0,153066
7	-0,06131	-0,00869	47,57			0,0000564	0,178824
6	-0,05262	-0,00996	47,57			0,0000741	0,13173
5	-0,04266	-0,01037	47,57			0,0000802	0,086579
4	-0,0323	-0,00967	47,57			0,0000698	0,049619
3	-0,02263	-0,00956	47,57			0,0000683	0,024352
2	-0,01306	-0,00848	47,57			0,0000537	0,008115
1	-0,00458	-0,00458	47,57			0,0000156	0,000997
						$\Sigma = 0,0006754$	$\Sigma = 1,00545$

$$C_{0,15} = \frac{(0,15-0,03) 4 \pi 1,00545}{1,17 0,0006754} = 1902 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.7)$$

Sönümleyici katsayıları Denklem 4.17 yardımıyla hesaplanacaktır. Toplam sönüm oranı diyagonal bağlantıda 0,15 olacak şekilde seçilmiştir. Çerçevenin içsel sönüm oranı 0,03 kabul edilmiştir. Sönümleyici konfigürasyonu olarak diyagonal tip seçilmiştir. Bu durumda on bir katlı çerçeveler için sönümleyici katsayısı hesabı Çizelge 6.14 ve Çizelge 6.15’de sunulmuştur.

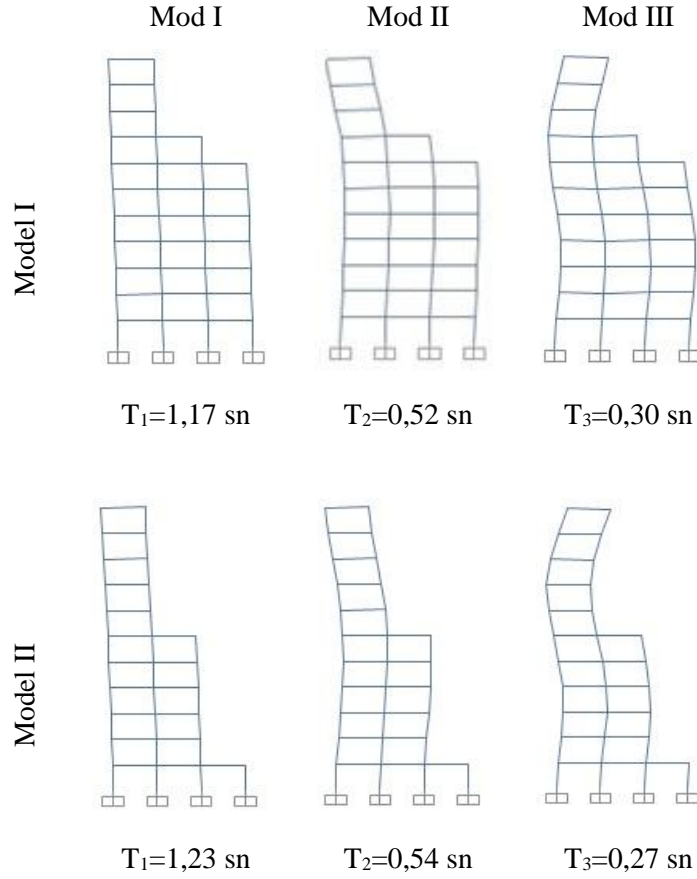
Çizelge 6. 15. Sönümleyici katsayısı hesabı (Model II, diyagonal tip, 0,15 sönüm oranı)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	$T_1(\text{sn})$	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
11	-0,12556	-0,01068	15,87	1,23	0,864	8,52E-05	0,250211
10	-0,11488	-0,01414	15,87			0,000149	0,20945
9	-0,10074	-0,01606	15,87			0,000193	0,161061
8	-0,08468	-0,01562	15,87			0,000182	0,113799
7	-0,06906	-0,01448	15,87			0,000157	0,075691
6	-0,05458	-0,01197	31,71			0,000107	0,094467
5	-0,04261	-0,0115	31,71			9,87E-05	0,057578
4	-0,03111	-0,01031	31,71			7,93E-05	0,030696
3	-0,02081	-0,00971	31,71			7,03E-05	0,01373
2	-0,0111	-0,00779	31,71			4,53E-05	0,003908
1	-0,00331	-0,00331	47,57			8,2E-06	0,000522
						$\Sigma=0,001174$	$\Sigma=1,011113$

$$C_{0,15} = \frac{(0,15-0,03) 4 \pi 1,011113}{1,17 0,001174} = 1057 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.8)$$

### 6.3.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

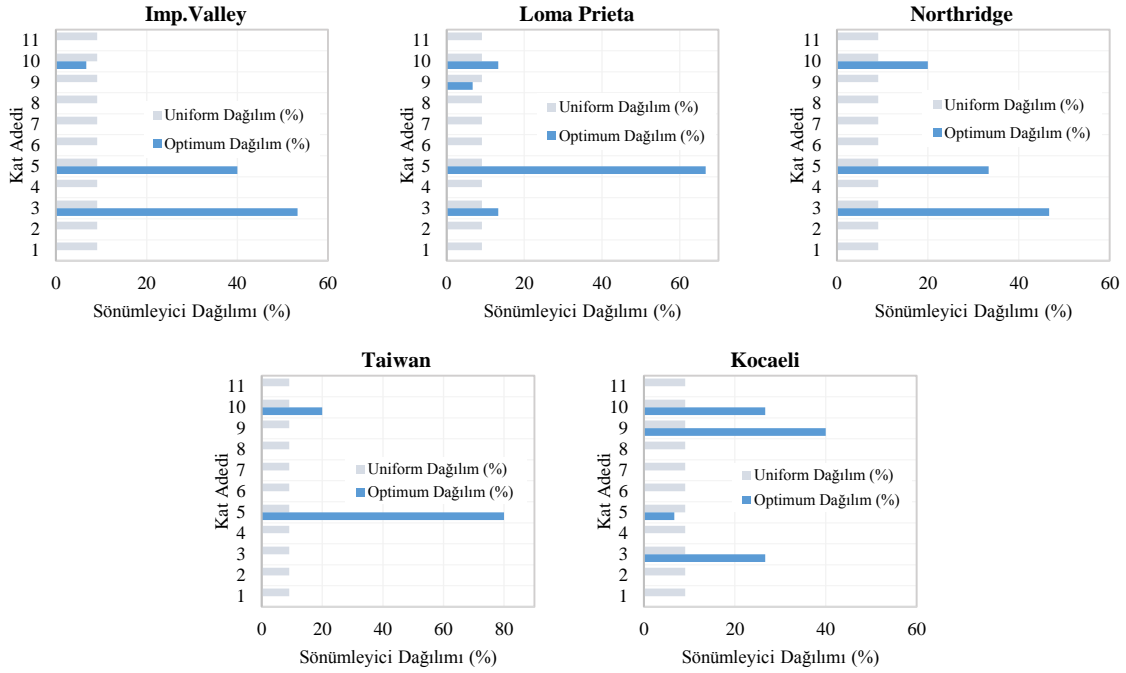
Çelik çerçeveler üzerinde, beş adet deprem kaydı kullanılmak suretiyle zaman tanım alanında doğrusal analizler yapılmıştır. Bu analizler neticesinde çerçevelerin ilk üç mod şekli ve doğal titreşim periyodları ve bulunan sonuçlar Şekil 6.21’de dir.



Şekil 6. 21. İlk üç mod için modellere ait doğal titreşim periyotları ve şekilleri

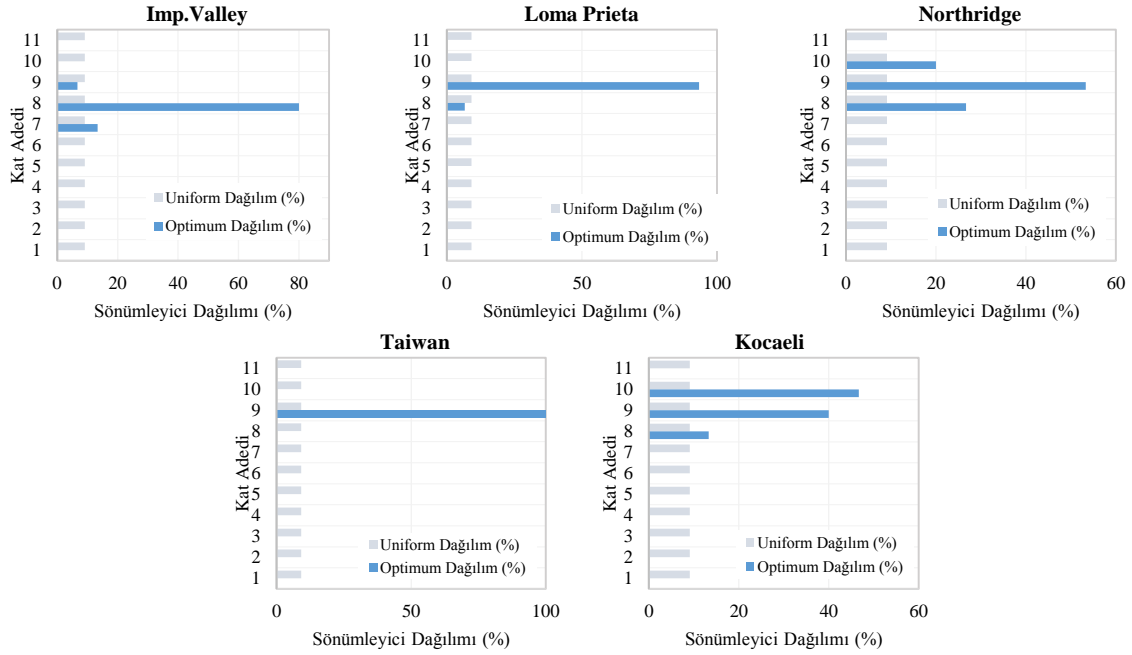
### 6.3.8. Sönümleyici dağılımının 5 farklı ivme kaydı için belirlenmesi

Bu çalışmada çerçevelerin inşa edileceği varsayılan bölge koşullarına uygun olarak ölçeklendirilmiş 5 farklı yer ivmesi kaydı kullanılmıştır. Düşünülen aksine, yer ivmesinin sahip olduğu en büyük ivme değerinin etkisi ile beraber, yer hareketi sırasında ortaya çıkan enerji, yapının deprem odağına olan uzaklığı ve yer hareketinin süresi gibi diğer etkenlerde yapıların sismik tepkilerinde önemli pay almaktadırlar. Bu sebeple özellikleri birbirinden farklı yer hareketlerinin kullanılması, analizlerin güvenilirliği bakımından önem taşımaktadır. Her bir analiz kendi başına bir fikir verse de, tasarımcının hepsini bir arada değerlendirerek genel bir yargıya ulaşması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Şekil 6.22’de Model I’e ait sönümleyici dağılım yüzdeleri verilmiştir. Üniorm dağılımda her kata bir adet sönümleyici yerleştirilirken, optimum dağılımda ise sönümleyici dağılımı SSSA yöntemine göre belirlenmiştir. İstenilen sönüm oranını sağlayan toplam sönümleyici büyüklüğü sabit tutularak, uniform dağılımda 11 adet sönümleyici kullanılırken, optimum dağılımda ise 15 adet sönümleyici kullanılmıştır.



Şekil 6. 22. Model I'e ait sönümleyici dağılım yüzdeleri

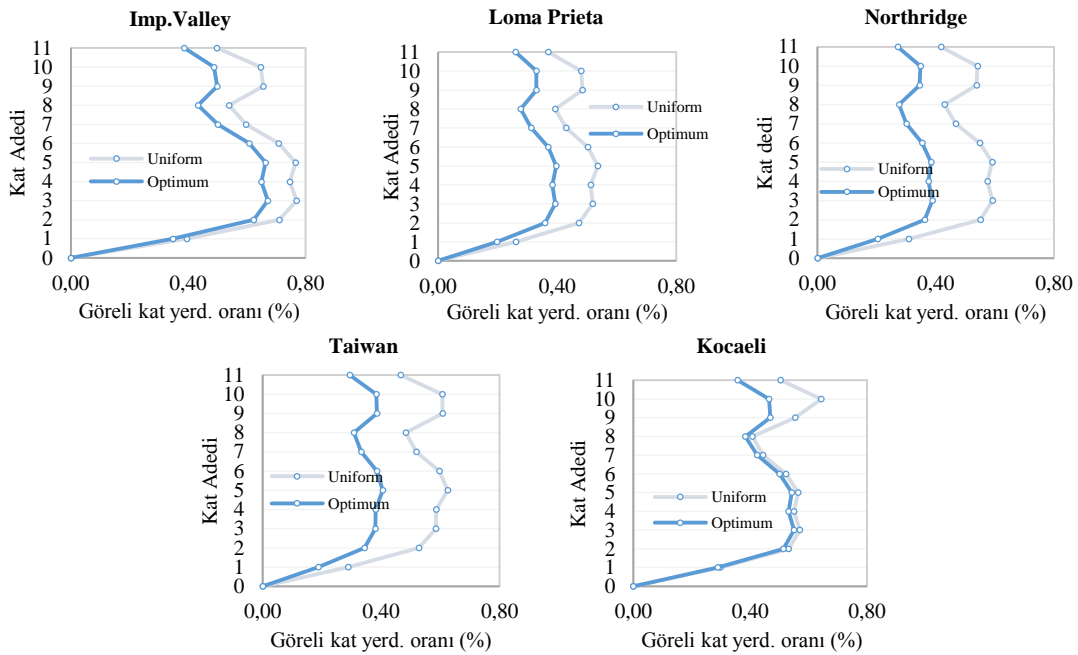
Örneğin Model I için uniform dağılımda 11 adet  $c=1057$  kNs/m sönümleyici kullanılır iken, optimum dağılımda ise 15 adet  $c=775$  kNs/m kullanılmış ve toplam sönümleyici büyüklüğü  $C=11625$  kNs/m olmak üzere sabit tutulmuştur.



Şekil 6. 23. Model II'e ait sönümleyici dağılım yüzdeleri

Garcia ve Soong (2002) yaptıkları çalışmalar neticesinde orta yükseklikteki binalarda bina kat adedinin yaklaşık bir buçuk katı kadar sönümleyici kullanılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Bu sebeple optimum dağılımdaki sönümleyici adedi 15 olarak belirlenmiştir.

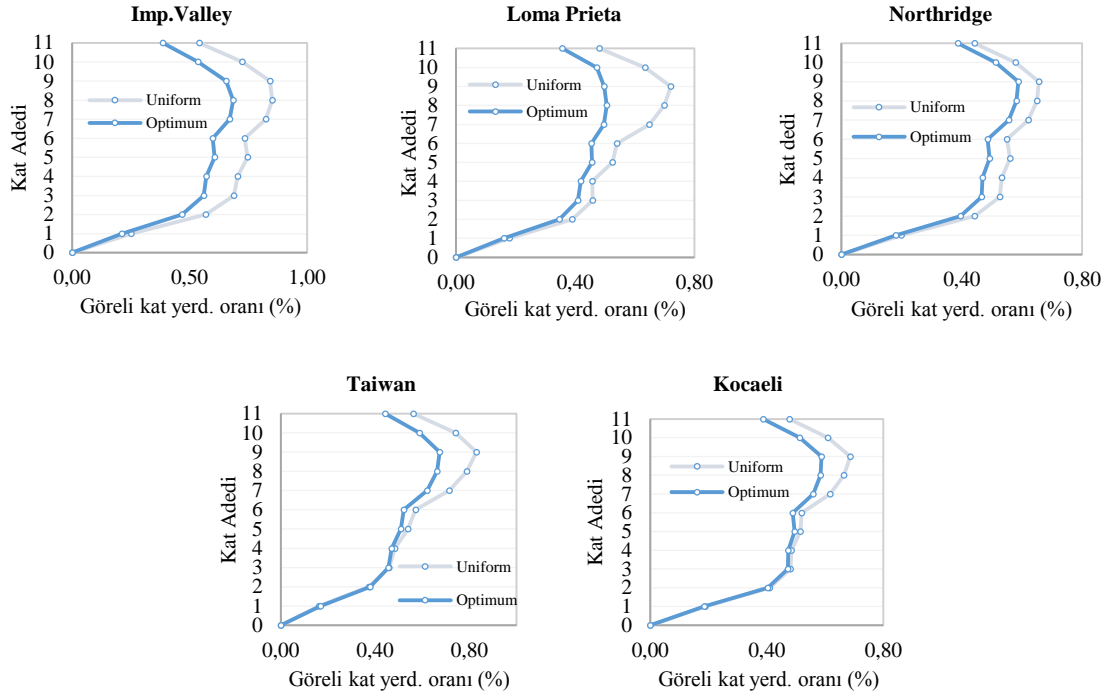
Şekil 6.23’de Model II’e ait sönümleyici dağılım yüzdeleri verilmiştir. Model I’de optimum sönümleyici dağılımı genel anlamda alt ve orta katlarda yoğunlaşmış olmasına rağmen, Model II için dağılım üst katlarda yoğunlaşmıştır. Bunun iki sebebi olduğu düşünülmektedir. Birincisi geri çekme düzensizliği, ikincisi ise düşeyde seçilen kiriş ve kolon kesitlerinin 5. ve 9. katlarda küçülmesidir. Model I’de üst katlarda görülen geri çekme düzensizliğinin, çerçevedeki sönümleyici dağılımına etkisi fazla olmazken, özellikle 1. ve 6. katta geri çekme düzensizliğine sahip Model II’de durum farklı gelişmiştir. Özellikle 6. kattaki geri çekme neticesinde, üst katlardaki görel kat ötelenmelerinin artması, SSSA ile yerleştirilen sönümleyicilerin üst katlarda yoğun olarak yer almasına sebebiyet vermiştir. Model I’de sönümleyiciler çoğunlukla 3, 4 ve 5. katlarda, Model II’de ise 8, 9 ve 10. katlara dağılım göstermişlerdir.



Şekil 6. 24. Model I için görel kat yerdeğiştirme oranları (%)

Şekil 6.24’de Model I’e ait Şekil 6.25’de ise Model II’ye ait görel kat yerdeğiştirme oranları verilmiştir. Her iki model için tüm yer ivme kayıtlarında görel kat ötelenme oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Model I için görel kat ötelenmeleri genel olarak

birinci kattan başladığı halde, Model II için bu azalmanın üçüncü kattan itibaren başladığı söylenebilir. Her ne kadar Model II’de sönümleyiciler yoğun olarak üst katlarda bulunsalar da, alt katlardaki ötelenme oranlarını da uniform dağılımdaki kadar düşürmüşlerdir.

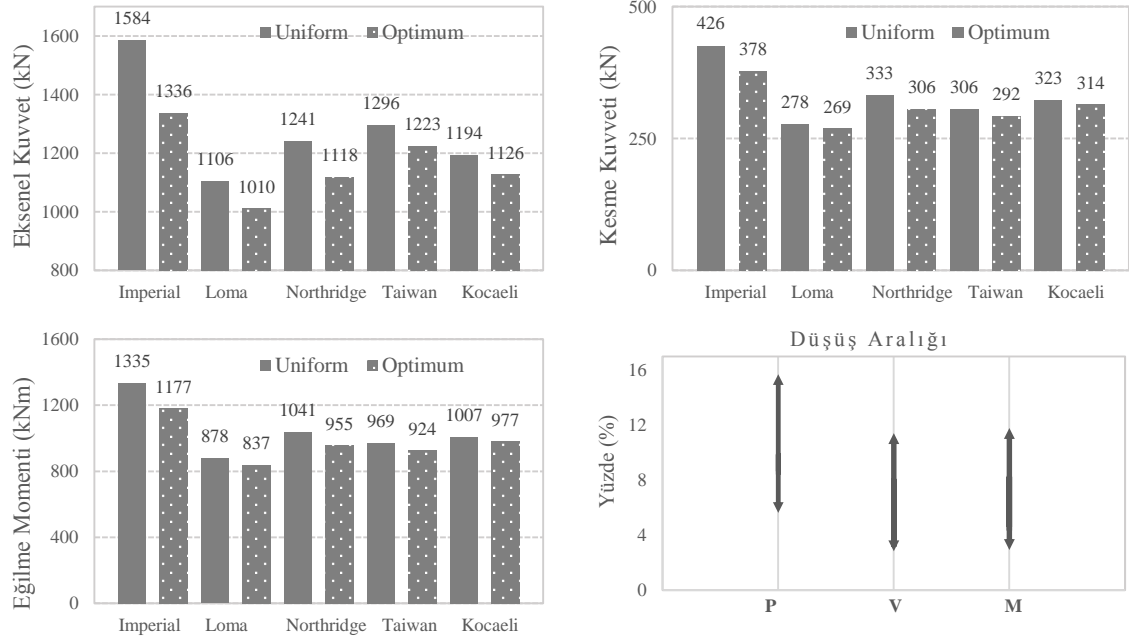


Şekil 6. 25. Model II için görel kat yerdeğiştirme oranları (%)

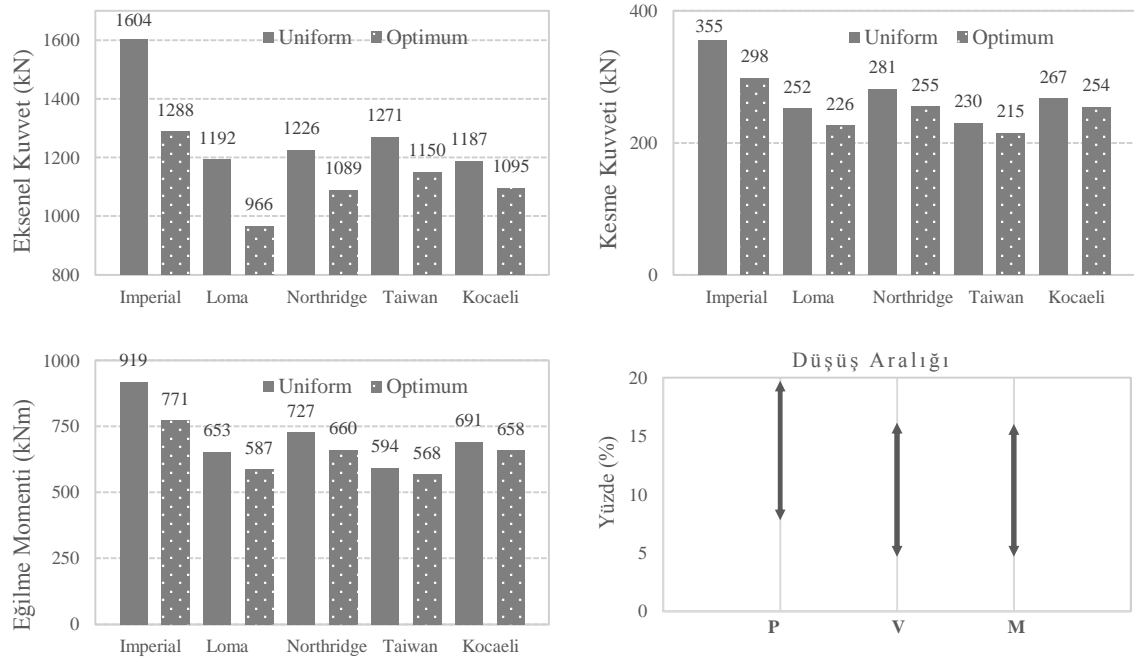
Yer ivmeleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, kat seviyelerindeki görel kat ötelenme oranlarının azalma yüzdeleri Model I için alt ve üst katlarda birbirine oldukça yakınken, Model II’de ise sönümleyici yoğunluğunun üst katlarda olmasına bağlı olarak azalma yüzdeleri üst katlarda daha yüksektir. Geri çekme düzensizliğine bağlı olarak, Model I’de dokuzuncu katta, Model II’de ise yedinci kattaki görel kat ötelenmelerinin altlarındaki katlara göre arttığı görülmektedir.

Şekil 6.26 ve Şekil 6.27 sırasıyla Model I ve Model II için, birinci kat kolonlarında dinamik etkiler sonucu oluşan en büyük iç kuvvet değerlerini (eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti) ve bu iç kuvvet değerlerinin optimum dağılımda uniform dağılıma oranla yüzde olarak düşüş aralığını göstermektedir. Her iki modelde de tüm yer ivmeleri için optimum dağılımda daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Model I için Imperial yer ivmesinde uniform dağılımda birinci kat kolonlarında elde edilen en büyük eksenel kuvvet değeri 1584kN iken bu değer optimum dağılımda yaklaşık %15,7’lik bir düşüşle 1336 kN’a

düşmüştür. Aynı şekilde Model II için Loma yer ivmesinde uniform dağılımda birinci kat kolonlarında elde edilen en büyük kesme kuvveti 252 kN iken bu değer optimum dağılımda yaklaşık %10,12'lik bir düşüşle 226 kN'a düşmüştür.

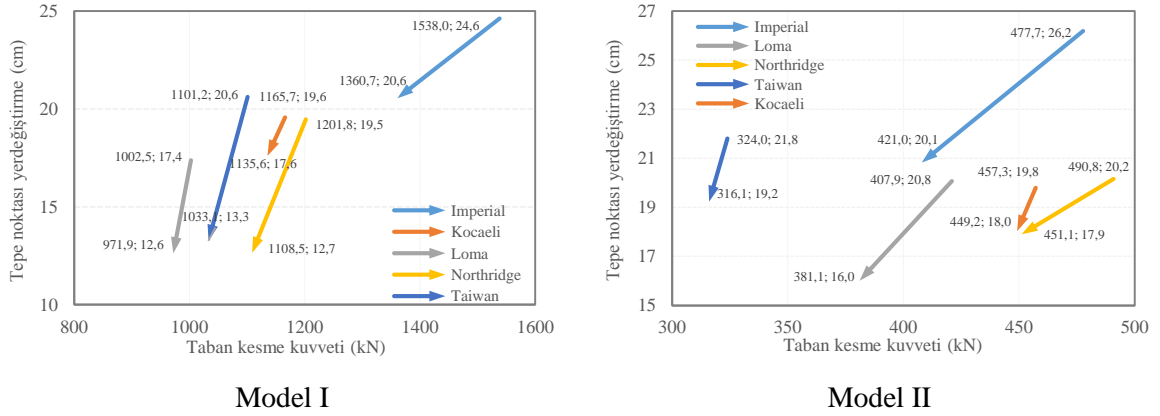


Şekil 6. 26. Model I için 1.kat en büyük iç kuvvet değerleri ve düşüş aralıkları

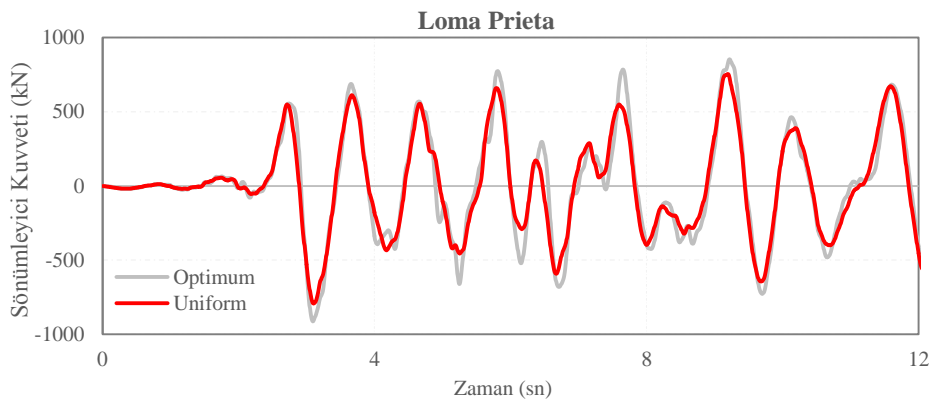


Şekil 6. 27. Model II için 1.kat en büyük iç kuvvet değerleri ve düşüş aralıkları

Şekil 6.28’de Model I ve Model II için taban kesme kuvveti-tepe noktası yerdeğiştirme değerleri görülmektedir. Uniform dağılımda elde edilmiş olan değerler, optimum dağılım sonucu ok yönünde düşüş göstermektedir. Her iki modelde de optimum dağılım sonucu hem tepe noktalarında hem de taban kesme kuvvetlerinde eş zamanlı bir düşüş gözlenmiştir. Örneğin Model II için Taiwan yer ivmesi incelenecek olursa, uniform dağılımda elde edilen en büyük taban kesme kuvveti 477,7 kN ve en büyük tepe noktası yerdeğiştirmesi 26,2 cm iken, bu değerler optimum dağılımla birlikte sırasıyla 421,0 kN ve 20,1 cm mertebelerine gerilemiştir. Böylelikle SSSA sonucu elde edilen optimum dağılımın, taban kesme kuvvetleri ve tepe noktası yerdeğiştirmeleri bakımından uniform dağılımdan daha verimli olduğu söylenebilir.



Şekil 6. 28. Model I ve II için taban kesme kuvveti-tepe noktası yerdeğiştirme değerleri



Şekil 6. 29. Model II için optimum ve uniform sönüm kuvvetleri

Şekil 6.29’da Model II için optimum ve uniform sönüm kuvvetleri zamana bağlı olarak verilmiştir. Grafikte görülen uniform sönümleyici kuvvetleri, uniform dağılımda tüm sönümleyicilere gelen kuvvetlerin toplamını, optimum sönümleyici kuvvetleri ise optimum



dağılımda tüm sönümleyicilere gelen kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. Grafikten açıkça görüldüğü üzere optimum dağılımda sönümleyicilerin daha fazla kuvvet aldıkları görülmektedir. Grafiğin farklı noktalarında verilen değerlere bakılacak olur ise, örneğin 6,1. saniyede uniform sönümleyici kuvvetleri 790,53 kN iken optimum dağılımda bu değer %15,5'lik bir artış ile 912,93 kN'a yükselmiştir. Benzer şekilde 7,7. saniyede uniform sönümleyici kuvvetleri 525,21 kN iken optimum dağılımda bu değer %45'lik bir artış ile 763,62 kN'a yükselmiştir. Diğer yer ivmeleri için de aynı durum geçerlidir. Toplam sönümleyici büyüklüğü değişmediği halde SSSA ile yerleştirilen optimum sönümleyici dağılımında, sönümleyicilerin daha fazla yer değiştirmeye maruz kaldığı ve bu sebeple daha fazla yük aldıkları söylenebilir.

### **6.3.9. Uygulama III için sonuç ve öneriler**

Bu çalışmada farklı kademelerde geri çekilmeli iki adet model üzerinde uniform ve optimum sönümleyici dağılımının, çerçevelerin sismik tepkilerine etkisi araştırılmıştır. Beş adet yer ivmesi kullanılmış ve genel bir yargıya ulaşılmaya çalışılmıştır. Model I ve Model II için SSSA metodu ile yapılan optimum sönümleyici dağılımı, modellerin kendi içlerinde tutarlıdır. Her iki model için tüm yer ivme kayıtlarında görelî kat ötelenme oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Rölâtif olarak optimum dağılımda uniform dağılıma oranla Model I için eksenel kuvvet değerlerinde %6-16, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde %3-12 aralığında, Model II için de eksenel kuvvet değerlerinde %8-19, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde %5-16 aralığında düşüş yüzdeleri gözlenmiştir. Özellikle kat yerdeğiştirmelerinde meydana gelen düşüşler eksenel kuvvetlerde de düşüşe olanak sağlamıştır. Her iki modelde de optimum dağılım sonucu hem tepe noktası yerdeğiştirmelerinde hem de taban kesme kuvvetlerinde uniform dağılıma oranla düşüş gözlenmiştir. SSSA sonucu elde edilen optimum dağılımın, taban kesme kuvvetleri ve tepe noktası yerdeğiştirmeleri bakımından uniform dağılımdan daha verimli olduğu söylenebilir. Sonuç olarak geri çekilmeli bu iki çerçevede SSSA ile yapılan optimum sönümleyici dağılım, toplam sönümleyici büyüklüğü değişmediği halde, üniform dağılıma göre daha olumlu sonuç vermiştir.

## 6.4. Uygulama IV. Viskoz Sönümleyici İlave Edilmiş Kısmi Dolgu Duvarlı Çelik Çerçevelerin Sismik Performans Analizi

### 6.4.1. Uygulamanın amacı

Bu uygulamada, DBYBHY (2007)'ye uygun olarak projelendirilen süneklik düzeyi yüksek yedi katlı çelik bir çerçeve ( $M_1$ ) ve dolgu duvarlı alt modelleri ( $M_2$ - $M_5$ ), sönümleyicisiz ve sönümleyici ilave edilmiş durumlar için ayrı ayrı analiz edilerek, sönümleyicilerin çerçevelerin sismik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda dolgu duvar varlığının ve süreksizliğinin etkileri de araştırılmıştır. Dolgu duvar dağılımları tam dolu  $M_2$ , düşeyde süreksizlik içeren  $M_3$ -  $M_4$  ile zemin katta kısa kolon oluşumuna sebebiyet veren  $M_5$  şeklinde tasarlanmış olup, duvarlar eşdeğer diyagonal basınç çubuğu olarak modellenmiştir.

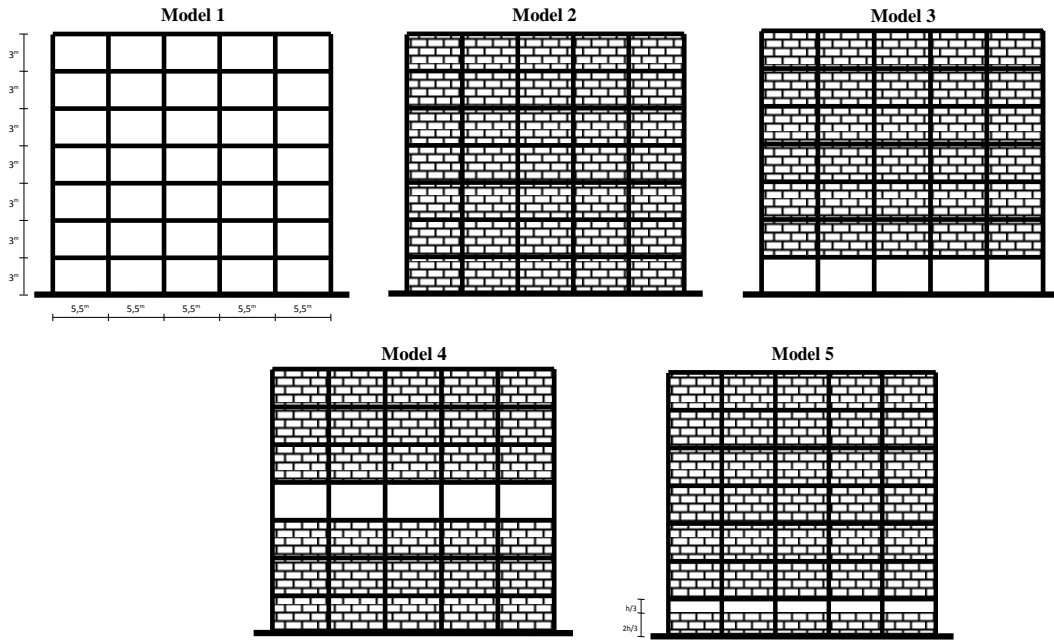
Tüm çerçeveler, statik artımsal itme analizi (Pushover Analiz) ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerine göre Sap2000 yapısal analiz programı ile çözümlenmiştir. Yapının performans noktası bulunurken ATC-40 metodundan faydalanılmıştır. Dinamik analizlerde üç adet ivme kaydı kullanılmış olup, bu kayıtlar çerçevenin projelendirilmesi esnasında dikkate alınmış olan deprem bölgesi ( $A_0=0,4$ ) ve zemin sınıfına ( $Z_3$ ) göre ölçeklidir.

Daha sonra çözümlenmeler, 0,18 efektif sönüm oranı sağlayan ve düşeyde üniform olarak dağıtılmış viskoz sönümleyici ilavesi ile tekrarlanmıştır. Yapılan tüm analizler neticesinde çerçevelerde elde edilen tepe deplasmanı, taban kesme kuvveti değerleri ve en büyük görelî kat yerdeğiştirme oranları ile eleman bazında elde edilen en büyük eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde anlamlı bir azalma olduğu gözlemlenmiş ve viskoz sönümleyicilerin çerçevelerin sismik performansında gözle görülür bir artış sağladığı sonucuna varılmıştır.

### 6.4.2. Kullanılan çelik çerçeveler

Bu çalışmada temel model olarak kullanılan çelik çerçeve, yedi katlı ve beş açıklıklı olarak seçilmiştir. Kat yüksekliği ve giriş açıklıkları her katta sabit ve sırayla 3 m ve 5,5

m'dir. Çerçeveye etkiyen sabit düşey yükler normal katlarda 24 kN/m üst katta 22 kN/m, hareketli yükler ise normal katlarda 12 kN/m ve üst katta 6 kN/m'dir. Bunlar sisteme sabit düzlem yayılı yük olarak etkitilmiştir. Çerçeve sistem malzemesi olarak Fe37 (TS 648, 1980) yapı çeliği kullanılmıştır. Her kat kendi içerisinde rijit diyafram olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer deprem yükü yöntemi ile çözüm yöntemi için hareketli yük katılım katsayısı 0,3, etkin yer ivme katsayısı 0,4 (1. Derece deprem bölgesi), bina önem katsayısı 1, taşıyıcı sistem davranış katsayısı 8 ve zemin sınıfı  $Z_3$  seçilmiştir. SAP2000 yapısal analiz programında yapılan analizler neticesinde kolonlarda HEA600, kirişlerde HEA340 geniş başlıklı hafif profillerin kullanılması uygun bulunmuştur. Binanın 1. doğal titreşim periyodu 0,99 sn'dir. Daha sonra projelendirilmiş olan bu çerçeveye dolgu duvar ilave edilmek suretiyle toplam beş adet çerçeve modeli türetilmiştir (Şekil 6.30).



Şekil 6.30. Çalışmada kullanılan modeller

### 6.4.3. Doğrusal olmayan analizler

Çerçevelerin doğrusal olmayan elastik davranışının belirlenmesi için “artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi” (DBYBHY, 2007) ile itme analizi yapılmıştır. Statik yatay yük dağılımı, doğrusal elastik davranış için birinci doğal titreşim periyoduna bağlı olarak hesaplanmıştır. Performans noktası belirlenirken kapasite spektrum yönteminden (ATC-40, 1996) yararlanılmıştır. Buna göre  $Z=0,4$ ,  $N_A=1$ ,  $N_V=1$ ,  $C_A=0,44$  ve  $C_V=0,64$  olarak

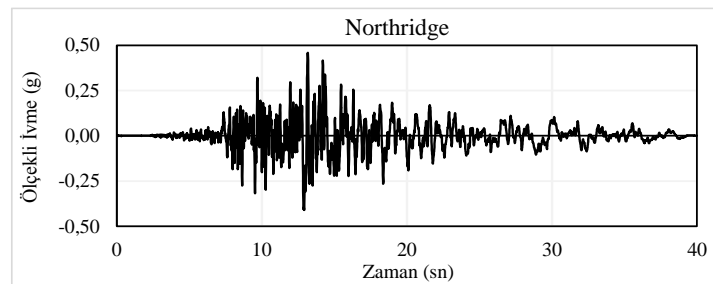
alınmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerde üç adet deprem verisi kullanılmıştır. Analizlerde P-Delta etkileri dikkate alınmıştır ve Newmark sayısal integrasyon yöntemi (1959) kullanılmıştır. İntegrasyon parametreleri  $\beta=0,25$  ve  $\gamma=0,50$  (sabit ortalama ivme) olarak seçilmiştir. Kullanılan sönüm oranı Rayleigh orantılı sönümdür. Analizler düşey statik itme analizinin bittiği noktadan başlatılmıştır.

#### 6.4.4. Yer ivmeleri

Bu çalışmada Fahjan'ın (2008) yaptığı bir çalışma neticesinde, ölçeklendirilerek Türk Deprem uygun hale getirilmiş olan üç adet deprem kaydı kullanılmıştır. Pasifik Dep. Müh. Arş. Merkezi'nden (PEER, 2006) alınan kayıtlar Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6. 16. Yer ivmeleri

Kayıt ismi	No	Tarih	İstasyon	Kayıt	Ölçek
Kocaeli	P1096	17.08.99	Düzce	DZC180	3,53
Northridge	P0967	17.01.94	Pico&Sentous	PIC090	11,16
Taiwan	P0105	14.11.86	62 SMART1 I01	45I 01 NS	5,97



Şekil 6. 31. Northridge depremine ait ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafiği

#### 6.4.5. Rayleigh sönümü yaklaşımı

Çerçeve için içsel sönümün hesabı için Rayleigh yaklaşımı kullanılmıştır. Çerçevelere ait sönüm matrisleri ile  $\alpha$  ve  $\beta$  sabitleri Denklem 4.13 vasıtasıyla hesaplanmış olup, ilk iki moda ait sönüm oranları birbirine eşit ve  $\xi_1=\xi_2=0,03$  olarak alınmıştır. Tüm modeller için ilk iki mod açılmal frekans değerleri  $\omega_1=6,317$ ,  $\omega_2=20,965$  olduğundan  $\alpha=0,291$  ve  $\beta=0,0022$  olur.

#### 6.4.6. Sönümleyici katsayısı hesabı

Tüm modeller için birinci mod içsel sönüm oranı 0,03, toplam efektif sönüm oranı ise 0,18 olarak seçilmiştir. Sönümleyici katsayısı Denklem 4.17 yardımıyla hesaplanacaktır. Buna göre üniform dağılımda hedef sönüm oranını sağlayacak sönümleyici katsayısı  $C_{0,18}$  hesap edilecektir. Tüm çerçeveler için bu sönüm katsayısı kullanılarak mukayese imkânı yaratılmıştır. Sönümleyici konfigürasyonu olarak diyagonal tip seçilmiştir. Bu durumda yedi katlı çerçeveler için sönümleyici katsayısı hesabı Çizelge 6.17’de verilmiştir.

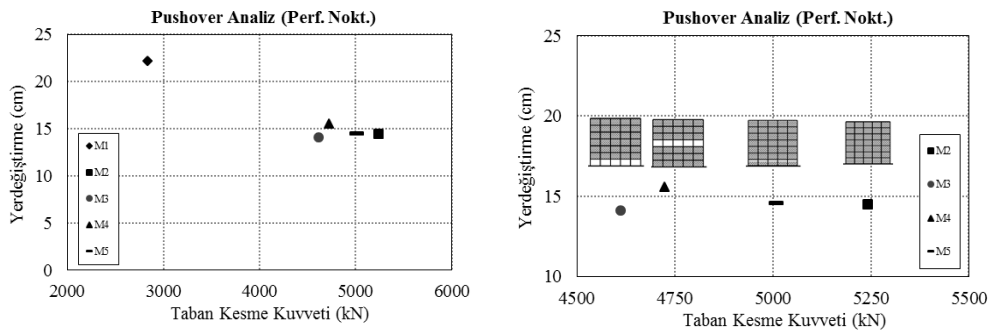
Çizelge 6. 17. Sönümleyici katsayısı hesabı (Tüm modeller, diyagonal tip, 0,18 sönüm oranı)

Kat	$\Theta_1$	$\Delta\Theta_1$	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /m)	T1(sn)	$\alpha$	$\alpha^2(\Delta\Theta_1)^2$	$m_i (\Theta_1)^2$
7	-0,062066	-0,004693	72,78			1,70E-05	2,80E-01
6	-0,057373	-0,00707	83,43			3,85E-05	2,75E-01
5	-0,050303	-0,009529	83,43			7,00E-05	2,11E-01
4	-0,040774	-0,011455	83,43	0,994	0,878	1,01E-04	1,39E-01
3	-0,029319	-0,012297	83,43			1,17E-04	7,17E-02
2	-0,017022	-0,011143	83,43			9,57E-05	2,42E-02
1	-0,005879	-0,005879	83,43			2,66E-05	2,88E-03
						$\Sigma=0,000465593$	$\Sigma=1,003574131$

$$C_{0,18} = \frac{(0,18-0,03) 4 \pi 1,003574131}{0,994 0,000465593} = 4086 \frac{\text{kNsn}}{\text{m}} \quad (6.9)$$

#### 6.4.7. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 6.32’de statik artımsal itme analizi sonucunda, tüm modeller için, performans noktasında elde edilen en büyük tepe yerdeğiştirmesi-taban kesme kuvveti değerleri yer almaktadır.

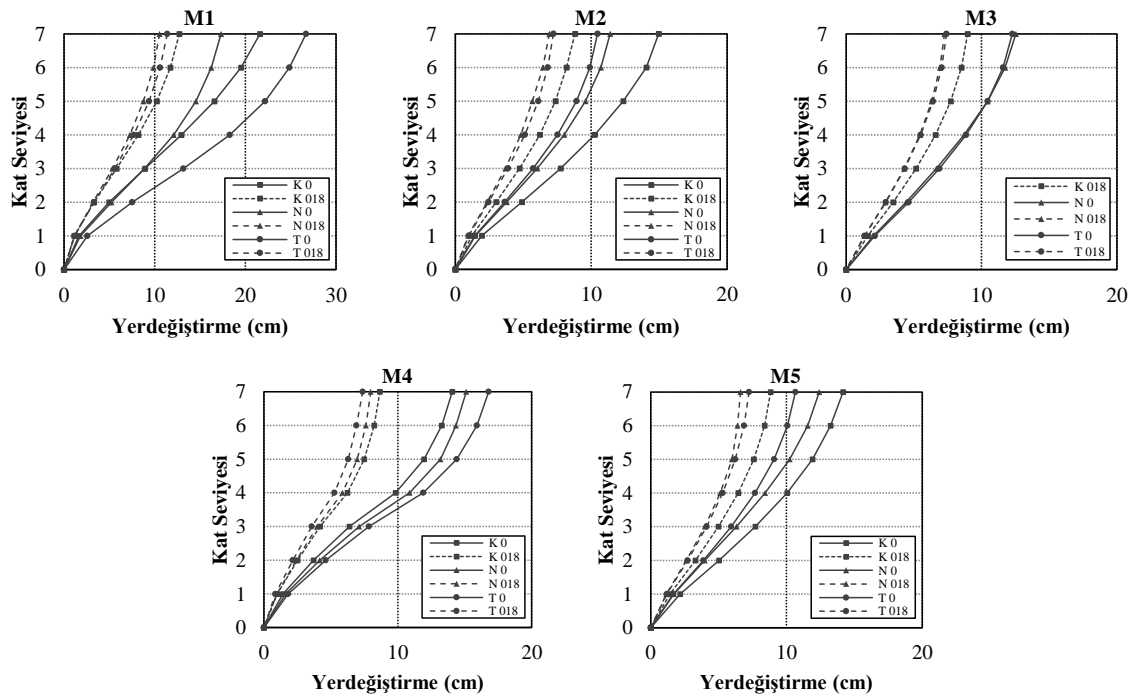


Şekil 6. 32. Kapasite spektrum yöntemine göre performans noktaları



Çizelge 6.18’de Pushover analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler sonucu (sönümsüz hal), çerçevelerde oluşan plastik mafsalları dağılımları verilmiştir. Sönümleyicilerin ilavesi ile birlikte, tüm modellerde her üç kayıt için de mafsallaşmalar ortadan kalkmıştır.

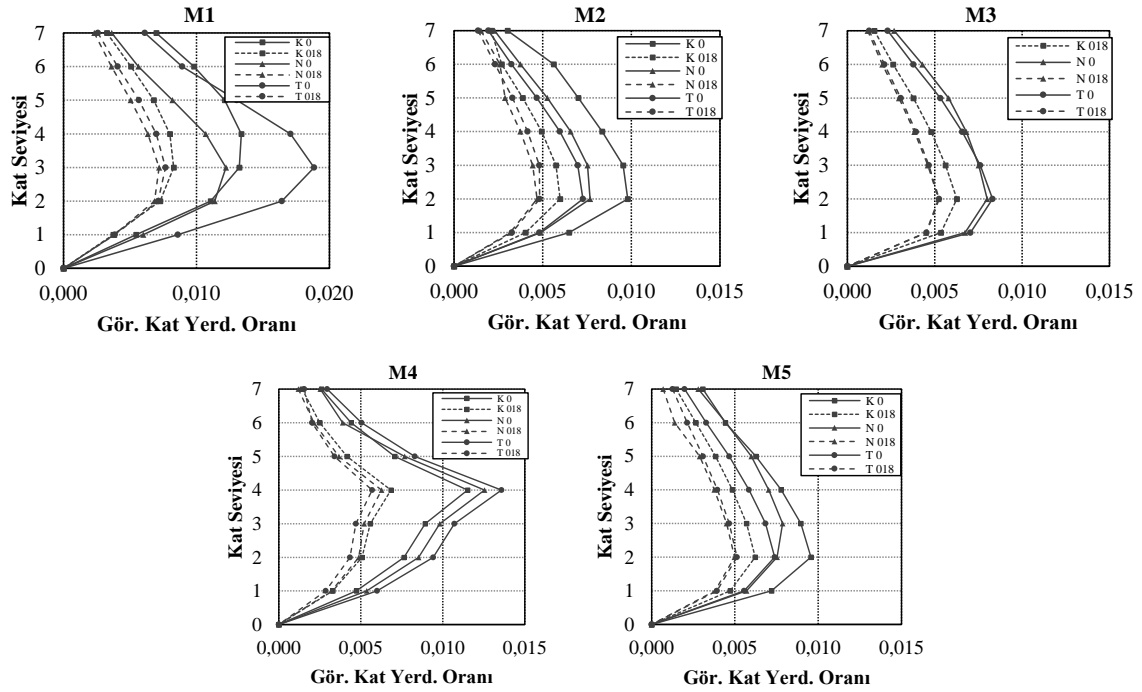
Şekil 6.34’de tüm modeller için sönümleyicili ve sönümleyicisiz durumlarda üç farklı deprem tesiriyle oluşan kat yerdeğiştirme değerleri görülmektedir. Model 1’de genel olarak diğer dört modele göre daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu sebeple, çerçevede dolgu duvar varlığının, kat yerdeğiştirmelerini belli bir miktarda azalttığı söylenebilir. Model 2-3 ve 5 için tepe noktası deplasmanları birbirine çok yakın iken, ara kat dolgu duvar süreksizliği bulunan Model 4’te değerler nispeten daha fazla çıkmıştır. Sönümleyici kullanımı ile tüm modellerin yerdeğiştirmeleri azalmış ve Model 2-3-4-5 için 10 cm’nin altına düşmüştür.



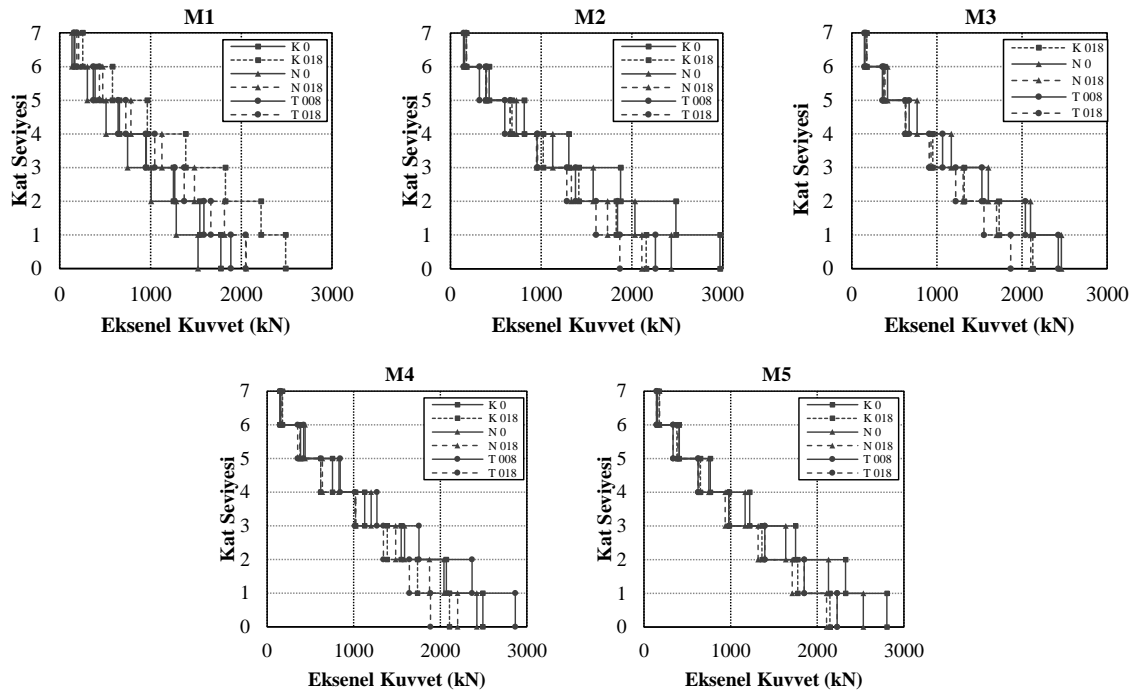
Şekil 6. 34. Tüm modeller için tepe noktası yerdeğiştirmesi

Şekil 6.35’ de görelî kat yerdeğiştirme oranları görülmektedir. Dolgu duvar bulunmayan Model 1’de diğer modellere oranla daha düzensiz ve daha büyük yerdeğiştirme oranları elde edilmiştir. Dolgu duvar süreksizliğine sahip Model 3 ve 4’ de ilgili katlardaki yerdeğiştirme oranlarında bir artış gözlenmiş olup, ara kat dolgu duvar süreksizliğinin

çerçevede yarattığı etkinin, zemin kata göre daha belirgin olduğu söylenebilir. Kısa kolon ihtiva eden Model 5, tam dolu durumla (Model 2) karşılaştırıldığında, anlamlı bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 6. 35. Tüm modeller için görel kat yerdeğiştirme oranları

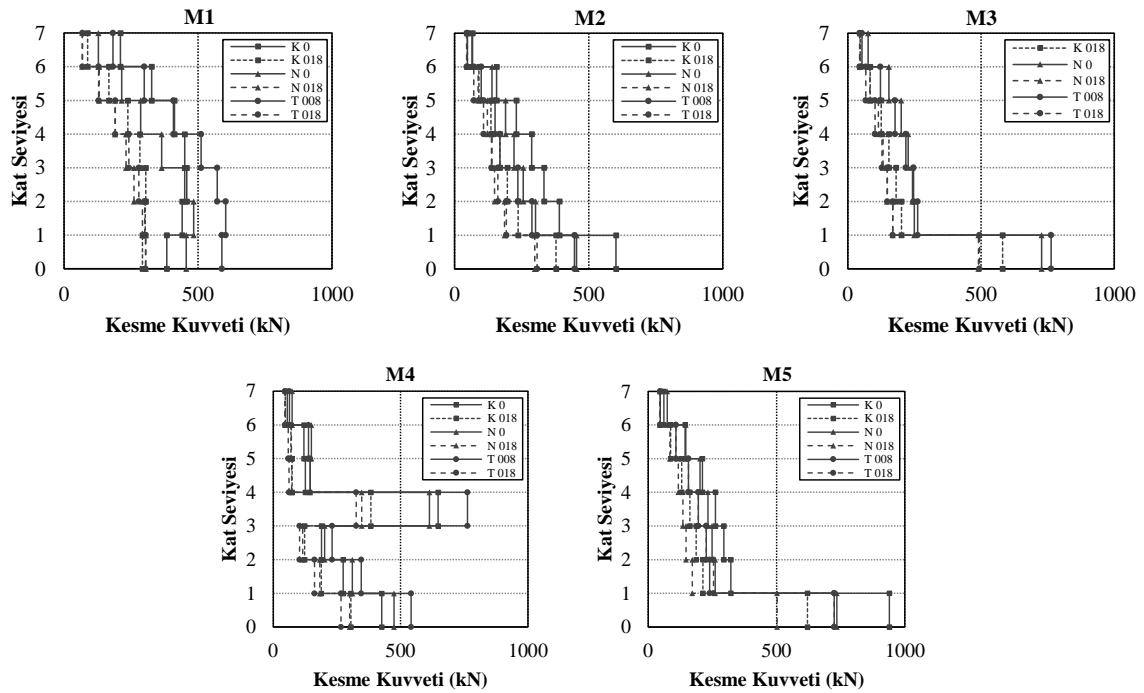


Şekil 6. 36. Tüm modeller için kolon eksenel kuvvetleri



Şekil 6.36'da katlarda görülen en büyük eksenel kuvvet değerleri yer almaktadır. Dolgu duvarsız ve sönümleyicisiz durumda, Model 1'de elde edilen zemin kat eksenel kuvvet değerleri 2000 kN'un altında olmasına rağmen, diğer dört modelde zemin kat eksenel kuvvetleri bu değerlerden büyüktür. Bu sebeple, çerçevede dolgu duvar varlığının kolonlara gelen eksenel kuvvetleri artırdığı söylenebilir. Dolgu duvar süreksizliğinin, katlara gelen eksenel kuvvetler üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığı tablodan görülmektedir. Sönümleyici ilavesi ile Model 1'de eksenel kuvvetlerde artış gözlenirken (Kocaeli depremi için 2500 kN civarı), diğer tüm modeller için sönümleyicisiz duruma göre azalma söz konusudur.

Şekil 6.37'de katlarda elde edilen en büyük kesme kuvveti değerleri görülmektedir. Model 1 ve Model 2 birbirleri ile karşılaştırılacak olursa, dolgu duvar varlığının, zemin kat hariç tüm katlarda elde edilen en büyük kolon kesme kuvveti değerlerinde, gözle görülür bir azalma sağladığı sonucuna varılır.

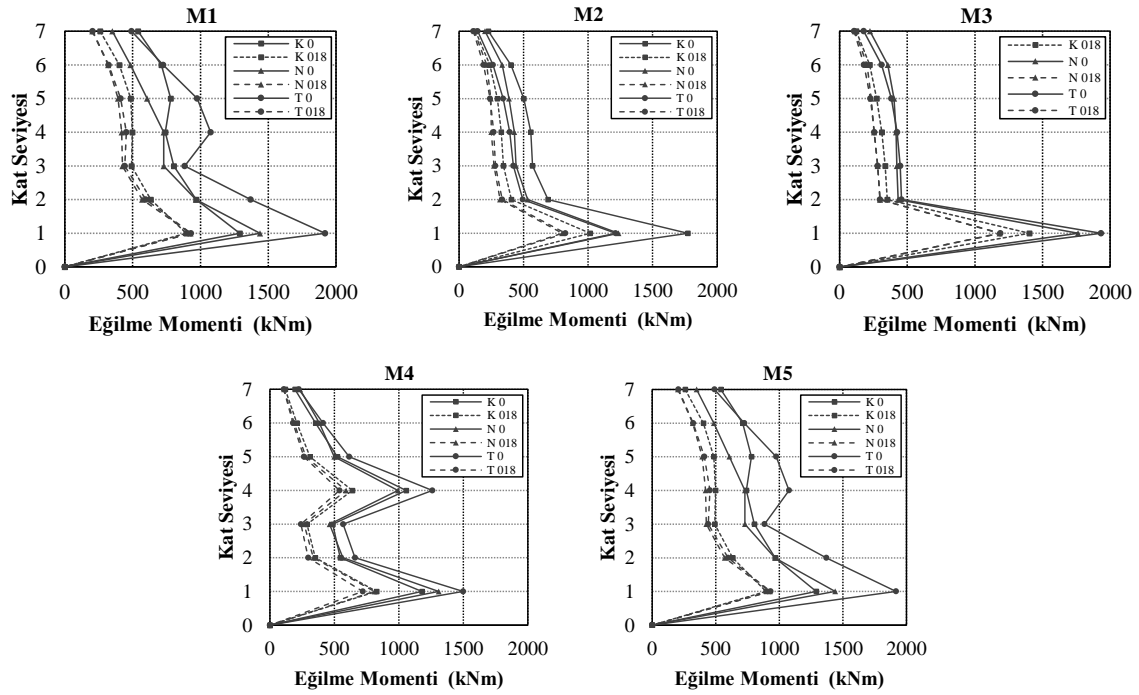


Şekil 6. 37. Tüm modeller için kolon kesme kuvvetleri

Bununla beraber, sönümleyicili ve sönümleyicisiz durumların her ikisi için de, dolgu duvar süreksizliği ve kısa kolon varlığı etkileri açıkça görülebilmektedir. Model 3 ve 5'te zemin kat, Model 4'te ise dördüncü katta elde edilen kolon kesme kuvvet değerleri diğer

katlardan oldukça yüksektir. Sönümleyiciler ile bu değerler önemli ölçüde düşürülebilmektedir.

Şekil 6.38’de, tüm modeller için kat kolonlarında oluşan en büyük eğilme momenti değerleri görülmektedir. Eğilme momenti grafikleri de kesme kuvveti grafiklerine benzer şekildedir. Tüm modeller için en büyük eğilme momenti değerleri zemin kattadır. Dolgu duvar varlığının zemin kat haricinde, katlarda elde edilen eğilme momenti değerlerinde bir azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Dolgu duvar süreksizlikleri ve kısa kolon varlığı, ilgili katta oluşan eğilme momenti değerlerini arttırırken, sönümleyici ilavesi ile eğilme momenti değerlerinde büyük ölçüde düşüş sağlanmıştır.



Şekil 6. 38. Tüm modeller için kolon eğilme momentleri

#### 6.4.8. Uygulama IV için sonuç ve öneriler

Bu çalışmada kullanılan çelik çerçevelerde, sürekli dolgu duvar varlığının, en büyük kat yerdeğiştirme değeri, görelî kat ötelenme oranı, kolonlarda oluşan en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde düşüş sağladığı görülmüştür. Bunun sebebi dolgu duvarların yatay yükler altında binaya ilave bir dayanım ve rijitlik kazandırmasıdır. Dolgu duvarların çerçeve ile bağlantı şekilleri ve boyutlarının da, dayanım da fark yaratması

olağandır. Kolon aksenal kuvvet değerlerinde tam tersi bir durum görülmüş olup, değerler artmıştır. Bununla beraber dolgu duvar süreksizliği bulunan 3, 4 ve 5 nolu modellerde, ilgili katlarda oluşan yerdeğiştirme, görelî kat yerdeğiştirme oranı, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde gözle görülür bir artış olmuştur. Dolgu duvar süreksizlikleri bulunan bu katlar, çerçeve sistemde adeta zayıf bir halka gibi davranmakta ve yine dinamik analizler neticesinde elde edilen hız ve ivme değerlerindeki artış sebebiyle yukarıda belirtilen değerlerde artış görülmektedir. Çerçevelere ilave edilen viskoz sönümleyiciler, tepe deplasmanı, taban kesme kuvveti değerleri ve en büyük görelî kat yerdeğiştirme oranları ile eleman bazında elde edilen en büyük aksenal kuvvet (Model 1 haricinde tüm çerçevelerde), kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde anlamlı bir azalma sağlamış olup, çerçevelerin sismik performansında gözle görülür bir artış sağlamıştır. Viskoz sönümleyiciler dinamik yüklerin belli bir kısmını kendi üzerlerine alarak, taşıyıcı sistemin zarar görmesine engel olmakta ve enerji tüketilmesine yardımcı olmaktadır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pasif kontrol sistemlerinden viskoz akışkanlı sönümleyicilerin, yapıların sismik performansını arttırdığı ve son yirmi yıl içinde bu alanda önemli gelişmeler olduğu daha önce yapılmış çalışmalardan açıkça görülmektedir. Yapılarda viskoz sönümleyici kullanılmasının temel olarak iki sebebi vardır. Bunlardan birincisi mevcut yapılara sönümleyici ilavesi ile sismik performansın artırılarak kullanım ömrünün uzatılması, ikincisi ise yeni yapılacak yapılarda sönümleyici kullanılmak suretiyle daha güvenli ve ekonomik tasarımlar elde edilmesidir. Viskoz sönümleyiciler, yapının doğal titreşim periyodunu değiştirmediklerinden yapıya ilave dinamik yükler getirmezler. Yapıya giren enerjinin büyük bir kısmını ya da hepsini sönümleyerek taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan sistem elemanların hasar görmesini engellerler.

Bu çalışmada, çeşitli yapısal düzensizliklere sahip çelik taşıyıcı sistemli çerçeveler ve üç boyutlu modellere viskoz sönümleyici ilave edilmek suretiyle, sistemlerin sismik performansının iyileştirilmesi ve düzensizliklerin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Bununla birlikte yeni bir konfigürasyon önerisi yapılmıştır. Önerilen konfigürasyon, tek serbestlik dereceli çelik bir çerçeveye ilave edilerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamada önerilen konfigürasyonun  $n$  katsayısındaki değişimin sönümleyici verimini nasıl etkilediği incelenmiştir. Sönümleyicisiz durum ile  $n=1$  durumunda elde edilen sonuçlar aynı olduğundan,  $n$  değerinin 1 seçilmesi sisteme bir iyileşme sağlamamaktadır.  $n$  katsayısı arttıkça iç kuvvet, yatay ötelenme ve taban kesme kuvveti değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Bağlantı geometrisine ve farklı  $n$  katsayılarına bağlı olarak yapılan hesaplar ile  $I_1/I_2$  oranına ve kolonun yaptığı eksenel açı değişimine bağlı olarak bulunan büyütme faktörü değerlerinin analiz sonuçları ile tutarlı olduğu görülmektedir.

Çalışmanın 6. bölümünde dört farklı uygulama yapılmıştır. Birinci uygulamada 5 katlı ve 11 katlı çerçevelere dört farklı konfigürasyonda viskoz sönümleyici ilave edilmiştir. Bunlardan ilk üçü geleneksel konfigürasyonlardır (Diyagonal ve dirsek tipi). Bununla birlikte geometrik hareketi ve büyütme faktörü hesap detayları Bölüm 4.3' de verilmiş olan ve yeni geliştirilen konfigürasyon da çerçevelere ilave edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bilindiği üzere büyütme faktörü değerinin artması ile sönümleyicilerin sönüm kabiliyeti artmaktadır. Bu değerler küçükten büyüğe doğru diyagonal (0,864), yeni konfigürasyon (1,680), alt dirsek (1,879) ve üst dirsek (2,379) olarak sıralanmıştır. Sönümsüz durum ile karşılaştırılır ise tüm konfigürasyonlar iç kuvvet ve görelî kat ötelenme değerlerinde önemli

sayılabilecek ölçüde düşüş sağlayarak çerçevelerin sismik performansını arttırmışlardır. Çerçevelerde sismik tepkiler sonucu oluşan iç kuvvetler, kat yerdeğişimi ve taban kesme kuvveti değerlerinde, beklenen sönüm oranları ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Aynı sönümleyici büyüklüğünün farklı konfigürasyonlarda farklı sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Özellikle görelî kat ötelenmeleri düşük olan ve yüksek bir sönüm oranına gereksinim duyulan sistemlerde, büyütme faktörü büyük olan konfigürasyonların kullanılması uygundur. Yeni konfigürasyon ilavesi, diyagonal konfigürasyondan daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Geliştirilen konfigürasyonda sönüm oranı değeri  $n$  katsayısına bağılı olduğundan, dirsek tipi sönümleyicilere daha yakın sonuçlar elde etmek için bu katsayının büyütülmesi mümkündür.

İkinci uygulamada planda düzensiz (asimetrik) U ve L şeklinde iki adet 7 katlı çelik yapı modeli tasarlanmıştır. Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizler neticesinde bu modellerin her ikisinde de başlangıçta burulma etkileri görülmüştür. Yapının ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki kaçıklıktan dolayı yapıda oluşan burulma momenti etkilerinin viskoz sönümleyicilerle ortadan kaldırılabilmesi için, yapıda 0,08 ve 0,20' lik sönüm oranı sağlayacak sönümleyici katsayıları hesap edilmiş ve sönümleyiciler sisteme ilave edilerek analizler tekrarlanmıştır. İki farklı sönüm oranı için iki modelde de en büyük görelî kat ötelenme oranı, kat aksenal kuvveti, kesme kuvveti, eğilme momenti değerleri ile taban kesme kuvveti ve burulma momenti değerlerinde, sönümleyicisiz duruma göre önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Yapıların rijitlik merkezleri etrafında oluşan burulma tesirleri, Model U için  $x$  yönü deprem kuvvetleri etkisinde Model Y için ise  $y$  yönü deprem kuvvetleri etkisinde ortaya çıkmaktadır. Bu değerlerde görülen azalma oranı, iki farklı sönüm oranı için ve her iki modelde sırasıyla % 50 ve % 80 civarında olmuştur. Viskoz sönümleyicilerin planda nasıl konumlandırılacağı önemli bir konudur. Zira sönümleyicilerin rijitlik merkezi etrafında yoğunlaştırılması burulma etkilerini daha da arttıracaktır. Planda sönümleyici yerleşimine karar verirken yeterli sayıda deneme yaparak en yüksek verimin elde edilebileceği konum elde edilmelidir.

Üçüncü uygulamada geri çekme düzensizliğine sahip on bir katlı ve üç açıklıklı iki tip çelik çerçeve kullanılmıştır. Çerçevelerin içsel sönüm oranı 0,03 olarak alınmıştır ve sönümleyici konfigürasyonu olarak diyagonal tip tercih edilmiştir. Toplam sönüm oranı diyagonal bağlantıda 0,15 olacak şekilde sönümleyici katsayıları hesaplanmıştır. Çerçeveler

üzerinde öncelikle sönümleyicisiz olarak sonra üniform sönümleyici dağılımında (her kata bir adet sönümleyici gelecek şekilde) ve en son basitleştirilmiş sıralı arama algoritması kullanılarak bulunan optimum dağılımında analizler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle farklı kademelerde geri çekilmeli iki adet model üzerine ilave edilen uniform ve optimum dağılımdaki sönümleyicilerin çerçevelerin sismik tepkilerine olan etkileri araştırılmıştır. Her iki model için sönümleyici ilavesi ile görel kat ötelenme oranlarında sönümleyicisiz duruma göre azalma olduğu görülmektedir. Her iki modelde de iç kuvvet değerlerinde optimum dağılımda daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Beş adet yer ivmesi ayrı ayrı değerlendirildiğinde bu sonuçlar, eksenel kuvvet değerleri için ortalama % 6-19, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri için % 3-16 düşüş eğilimi göstermişlerdir.

Dördüncü uygulamada ise, yedi katlı çelik bir çerçeve ve dolgu duvarlı alt modelleri, sönümleyicisiz ve sönümleyici ilave edilmiş durumlar için ayrı ayrı analiz edilerek, dolgu duvar varlığının ve süreksizliğinin etkileri araştırılmıştır. Duvarlar eşdeğer diyagonal basınç çubuğu olarak modellenmiştir. Çerçevelere statik artımsal itme analizi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmıştır. Bu analizler neticesinde;

- 1) Her katta ve açıklıkta dolgu duvar bulunduğunda, hiç dolgu duvar bulunmaması durumuna göre, kat yerdeğiştirmeleri ile kat kolonlarında oluşan en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde düşüş görülmüştür.
- 2) Çerçevelerde dolgu duvar süreksizliği bulunan katlarda görel kat yerdeğiştirmesi, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde önemli derecede bir artış görülmüştür. Bu katlarda oluşan ani rijitlik kayıpları dikkate alınması gereken bir husustur.
- 3) Viskoz sönümleyici ilavesi ile çerçevelerde elde edilen tepe noktası deplasmanı, taban kesme kuvveti değerleri ile eleman bazında elde edilen en büyük eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinde düşüş görülmüştür.
- 4) Kısa kolon varlığının kat kolon kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerini önemli bir ölçüde arttırdığı, bununla beraber viskoz sönümleyici ilavesi ile bu olumsuz etkilerin ortadan kaldırıldığı görülmüştür.

Yapılan sayısal uygulamalardan açıkça görüldüğü üzere viskoz sönümleyiciler ilave edildikleri sistemlerde bulunan yapısal düzensizlikleri ve süreksizlikleri ortadan kaldırmak suretiyle yapıların sismik performansını arttırmaktadırlar. Geleneksel güçlendirme yöntemlerinden hesap ve uygulama kolaylığı bakımından avantajlı olan bu sistemlerin farklı ülkelerde olduğu gibi, önemli bir kısmı birinci derece deprem bölgesi üzerinde yer alan ülkemizde de kullanılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anonim, 2016, Buildings with setback irregularity, <https://www.nexus.globalquakemodel.org/gembuildingtaxonomy/overview/glossary/setback—set>, erişim tarihi: 15.08.2016
- Arda, T., S., Uzgider, E., 1983, Çelik Yapıların Boyutlandırılmasında Taşıma Gücü Yöntemleri, I. Çelik Yapılar Seminer Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, 26 Eylül-1 Ekim, İstanbul
- ATC-40, 1996, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California.
- Bo, L., Xingwen, L., 2008, Seismic Design of Structure with Improved Toggle Brace Damper System, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, p. 11-0071
- BOCA, 1996, Massachusetts State Building Code
- Celep Z., Kumbasar N., 2004, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Üçüncü baskı, İstanbul, Beta Dağıtım, 700 s.
- Celep, Z., 2007, Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul, Türkiye
- Chopra, A., K., (1995), “Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 762 p.
- Constantinou, M., C., Symans, M., D., 1992, Experimental And Analytical Investigation Of Seismic Response Of Structures With Supplemental Fluid Viscous Dampers, National Center For Earthquake Engineering Research, Buffalo, Tech. Rep., NCEER-92-0032
- Constantinou, M., C., Soong, T., T., Dargush, G., F., 1998, Passive Energy Dissipation Systems For Structural Design And Retrofit, Multidisciplinary Center For Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y.
- Constantinou, M., C., Taylor, P., D., 1997, Development And Testing Of An Improved Fluid Damper Configuration For Structures Having High Rigidity”, Technical Report Submitted To The Center For Industrial Effectiveness And Taylor Devices, Inc.
- Constantinou, M., C., Tsopelas, P., Hammel, W., Sigaher, A., N., 2001, Toggle Brace Damper Seismic Energy Dissipation Systems, Journal of Structural Engineering, 127 (2), Feb., p. 105-112.
- Çoşgun, T., 2003, Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Çözümlemesi İçin Bir Bilgisayar Programı, Pamukkale Üniversitesi Müh. Fak. Müh. Bil. Dergisi, c. 9, s. 2, s. 215-222



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- DBYBHY, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 26454 Sayılı Resmi Gazete, Ankara.
- Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu F., 2012, Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi, 984 s.
- Doğan M., 2015, Depreme Dayanıklı Tasarım Ders Notları, <http://mizan.ogu.edu.tr>, erişim tarihi: 15.04.2015
- Eurocode 8., 2004, Design Of Structures For Earthquake Resistance
- Fahjan, Y., M., 2008, Selecting and Scaling of Real Earthquake Records Appropriate the Acceleration Design Spectrum in Turkish Earthquake Code”, IMO Technical Journal, 4423-4444, Article 292.
- FEMA 273, 1997, Federal Emergency Management Agency Publication, NHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C.
- FEMA 306, 1998, Evaluation Of Earthquake Damaged Concrete And Masonry Wall Buildings, Washington, D.C.
- FEMA 356, 2000, Federal Emergency Management Agency Publication, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. Frames, Building Research Station, UK, Current Paper 13/74.
- Garcia D.,L., 2001, A Simple Method For The Design Of Optimal Damper Configurations In MDOF Structures, Earthquake Spectra 17(3), p. 387–398.
- Garcia D.,L., Soong, T., T., 2002, Efficiency Of A Simple Approach To Damper Allocation In MDOF Structures, Journal Of Structural Control 9, DOI: 10.1002/Stc.3., p. 19–30.
- Goel, R., K., 1998, Effects Of Supplemental Viscous Damping On Seismic Response Of Asymmetric-Plan Systems, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, v. 27, p. 125-141
- Güler, M., D., Piroğlu, F., 2015, Çelik Yapılarda Doğrusal Olmayan Performans Analizleri ve Viskoz Sönümleyiciler İle Güçlendirme Uygulamaları”, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, Eskişehir
- Hibino, H., Kawamura, S., Hisano, M., Yamada, M., Kawamura, H., vd., 1989, A Study on Response Control System on Structures Utilizing Damping Amplifier, Taisei Technical Research Journal, , Vol. 22, pp. 155-162.
- Hwang, J., S., Seismic Design of Structures with Viscous Dampers, International Training Programs for Seismic Design of uilding Structures, p.124-137

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Keyder, E., Wasti, S., T., 2013, Çelik Yapı Elemanları Analiz ve Tasarım, Seçkin Yayıncılık ve Dağıtım, 389 s.
- Kırçıl, M., S., Hancıoğlu, B., 2005, Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Temel İlkeler, <http://www.yildiz.edu.tr/~caydemir/betprj/ddyt.pdf>, erişim tarihi: 10.07.2015
- Külekçi, A., K., 2010, Çelik Taşıyıcı Sistemlerin İtme Analizi Yöntemi Kullanılarak Deprem Performanslarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 117 s.
- Landi, L., Diotallevi, P., P., Castellari, G., 2013, On the Design of Viscous Dampers for the Rehabilitation of Plan-Asymmetric Buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, v.17 p. 1141–1161
- Lee, D., Taylor, D., P., 2001, Viscous Damper Development And Future Trends, *Structural Design Of Tall Buildings*, v.10, p. 311–320.
- Leu, L., J., Chang, J., T., 2011, Optimal Allocation of Non-Linear Viscous Dampers for Three-Dimensional Building Structures, *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering*, p. 2489–2497
- Lin, W., H., Chopra, A., K., 2001, Understanding And Predicting Effects Of Supplemental Viscous Damping On Seismic Response Of Asymmetric One-Storey Systems, *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, V.30 P.1475–1494
- Mainstone, R., J., (1974), “Supplementary Note on the Stiffness and Strengths of Infilled Frames”, Building Research Station, UK, Current Paper 13/74.
- Mansoori, M., R., Moghadam, A., S., 2009, Using Viscous Damper Distribution To Reduce Multiple Seismic Responses Of Asymmetric Structures, *Journal Of Constructional Steel Research*, v. 65 p. 2176-2185
- McNamara, R., J., Taylor, D., P., 2003, The Structural Design Of Tall And Special Buildings, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 12, 145–154, Doi:10.1002/Tal.218
- Mertol., A., Mertol, H., C., 2002, Deprem Mühendisliği Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Isbn: 978-1111120344
- Mociran, H., A., Pantel, E., 2009, A Configuration Of Seismic Energy Dissipation System For Stiff Structures, *Article No.4, Intersections/Intersectii*, v.6, p. 56-64
- Newmark, N., M., Hall, W., J., 1982, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Newmark, N., M., 1959, A Method Of Computation For Structural Dynamics, ASCE Journal Of The Engineering Mechanics, V. 85(3), P. 67-94.
- Öktem, O., Pala, S., (2003), Dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemlerin lineer olmayan hesabı, Gaziantep XIII. Ulusal Mekanik Kongresi. 605-614.
- Özcan, S., 2009, Viskoz Akışkanlı Sönümlenme ve Sismik Taban Yalıtım Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E. İstanbul
- Özdemir, Z., Fahjan, Y., 2007, Gerçek Deprem Kayıtlarının Tasarım Spektrumlarına Uygun Olarak Zaman ve Frekans Tanım Alanlarında Ölçekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul
- Özer, E., 2009, Erkan Özer Ders Notları, Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Analizi, <http://docplayer.biz.tr/4568622-Yapi-sdstemlerdndn-dogrusal-olmayan-analzd.html>, Erişim Tarihi: 03.01.2015
- Özhendekci, N, Özhendekci, D., 2011, TS 648'e Göre Tasarlanmış 10 Katlı Rijit Çelik Çerçevesel Bir Yapının Sismik Performansının Değerlendirilmesi, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul
- Özmen, G., Pala, S., Yalçın, K., 1997, Çok Katlı Yapılarda Geri Çekme Düzensizliğinin Deprem Hesabına Etkisi, 4. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ankara
- Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2006), PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat>
- Park, C., Jung, H. , Jang, J., Park, K., Lee, I., 2005, Scissor Jack Damper System for Reduction of Cable Vibration , The 8th KCCNN Symposium on Civil Engineering, 18-20 December, Taiwan.
- Paulay, T., Priestley, N., (1992), Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons Inc.
- Paz, M., Leight, W., 2006, Structural Dynamics: Theory and Computation Fifth Edition Updated with Sap2000, p. 813
- Polat, Z., 2005, Deprem Yükleri Altında Çözümleme Modal Spektral Hesap, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Mesleki Eğitim Seminerleri, 8-22 Ocak İMO İstanbul Şubesi
- Polyakov, S., V., (1956), Masonry in framed buildings, GodsudarstvenoeIsdatel'stvo Literatry Po Stroidal stvui Architecture. Moscow.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sap2000, 2014, Versiyon 16.1.1, Yapısal Analiz Programı, Computers and Structures Inc., Berkeley-California.
- Smith, B., Carter, C., (1969), A Method of Analysis for Infilled Frames, Proc. I. C. E., pp:31-41.
- Smith, B., S., (1962), Lateral Stifness of Infilled Frames, ASCE Structural Division Journal, pp.183- 199.
- Smith, B., S., (1967), Composite Behavior of Infilled Frames, Conference of Tall Buildings, S. 481-482, London.
- Symans, M., D., Constantinou, M., C., 1998, Passive Viscous Fluid Damping Systems for Seismic Energy Dissipation, ISET Journal of Earthquake Technology Paper, Buffalo New York, p. 185-206.
- Symans, M., D., Yang, S., M., Karns, J., Lee, D., 2015, A New, Low-Cost Approach To Increasing Seismic Resistance Of Wood-Frame Structures, Structural Engineers Association Of California Convention Bellevue, Washington, Usa 9 - 12 September
- Topçu, A., 2016, Betonarme I-II Ders Notları, [http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index\\_dosyalar/Dersler/Betonarme2/Sunular/Betonarme\\_2\\_2.pdf](http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme2/Sunular/Betonarme_2_2.pdf), erişim tarihi: 01.03.2016
- TS 498, 1997, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 24 s.
- TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 83 s.
- TS 648, 1980, Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 48 s.
- Uang, C., M., Bertero, V., 1988, Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake Resistant Design, University of California, Berkeley.Report No. UCB/EERC-88/18
- Uçar, T., Merter, O., 2012, Binaların Deprem Hesabında Kullanılan Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleri İle İlgili Bir İrdeleme, Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg., C.2, S. 2, S. 15-31
- Wilson, E., L., 2000, Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures , Third Edition, Berkeley California
- Yaylı, M., Ö., 2004, Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Deprem Etkisinde İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 125 S.
- Yerlici, V., Luş, H., 2014, Yapı Dinamiğine Giriş, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 491 s.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Zhang, R. H., and Soong, T. T. [1992] “Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications,”*Journal of Structural Engineering ASCE* 118(5), 1375–1392.

Zhao, Z., Chan, W., K., 2015, Geometric Design Steps of the Upper Toggle-Brace-Damper System, *International Journal of Scientific Engineering and Technology* (ISSN : 2277-1581), v. 4; i. 2, p. 94-98

## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Afyonkarahisar'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Afyonkarahisar'da tamamladı. 2002 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2004 yılı Aralık ayında Afyon Kocatepe Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı. “Çerçeve Sistemlerde Moment Dağılımı-Atalet Momenti İlişkisinin Yapay Sinir Ağları ile İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans Tezini 2006 yılında AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde tamamladı. 2011 yılına kadar Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında İnşaat Mühendisi olarak görev yaptıktan sonra İnşaat Mühendisliği Bölümüne geçiş yaptı. Halen Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çalışmakta olup, yabancı dili İngilizcedir.