İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSENEL DOĞRULTUDA KAYICI BULONLU DÜĞÜM NOKTALARI İÇEREN ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Baykal DÖNMEZ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

EKİM 2004

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSENEL DOĞRULTUDA KAYICI BULONLU DÜĞÜM NOKTALARI İÇEREN ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Baykal DÖNMEZ
(501001117)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Eylül 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Eylül 2004

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Erkan ÖZER
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Engin ORAKDÖĞEN (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İ.T.Ü.)

EKİM 2004

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesinde, 1996 yılında başladığım öğrenim hayatımın sonuna gelmiş bulunmaktayım. Öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum Üniversitemin bana kazandırdığı bilgi ve becerileri gerek lisans eğitimim gerekse yüksek lisans eğitimim süresince yaşayarak öğrendim.

Dört yıllık lisans eğitimim sonunda aldığım temel bilgileri, başladığım yüksek lisans programı ile birlikte hem pekiştirme hem de daha ileriye götürme şansını buldum. Yüksek lisans eğitimimde geçen dört yılın sonunda hayata ve onun en önemli uğraşılarından biri olan mühendisliğe bakış açım olumlu yönde gelişti.

Sekiz yıllık uzun yolun sonunda, benden yardımlarını esirgemeyen, verdiği akademik ve mesleki bilgileri ile hayatıma katkısı çok büyük olan sevgili ve saygıdeğer öğretmenim Prof. Dr. Erkan ÖZER başta olmak üzere bütün öğretmenlerime, her zaman maddi ve manevi olarak yanımda olan aileme ve mühendislik bilgilerini benimle paylaşan çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Eylül 2004 Baykal DÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **vi**
TABLO LİSTESİ **vii**
ŞEKİL LİSTESİ **ix**
SEMBOL LİSTESİ **xii**
ÖZET **xvi**
SUMMARY **xvii**

1.GİRİŞ **1**
1.1 Konu 1
1.2 Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar 2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 3

2.YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN TEORİYE GÖRE HESABI **5**
2.1 Giriş 5
2.2 Doğrusal Davranış Gösteren Sistemler 9
2.3 Doğrusal Olmayan Davranış Gösteren Sistemler 9
2.3.1 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler 10
2.3.2 Geometri Değişimleri Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler 10
2.3.3 Geometrik Süreksizlikler Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler 11
2.4 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözüm Yöntemleri 12
2.4.1 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Sayısal Çözüm Yöntemleri 13
2.4.2 Limit Yüklerin Belirlenmesi 13
2.4.3 Sistem Analiz Türleri ve Özellikleri 14
2.5 Yapı Sistemlerinde Yapılan Varsayımlar ve Limit Yükün Hesabı 16
2.5.1 Yapı Sistemlerinde Yapılan Varsayımlar 16
2.5.1.1 Doğrusal Olmayan Şekil Değiştirmelerin Yayılı Olması Hali 17
2.5.1.2 Doğrusal Olmayan Şekil Değiştirmelerin Yayılı Olmaması Hali 17
2.5.2 Plastik Mafsal Varsayımı 17
2.5.3 Yük Artım Yöntemi Kullanılarak, Düzlem Çubuk Sistemlerin Plastik Mafsal Varsayımına Göre Hesabı 22
2.5.4 Sistemdeki Yer Değiştirmelerin ve Plastikleşen Kesitlerdeki Plastik Şekil Değiştirmelerin Bulunması 24

3. YAPISAL SİSMİK KONTROL SİSTEMLERİ **27**
3.1 Giriş 27
3.2 Pasif Yapısal Kontrol Sistemleri 29

3.2.1 Sismik Taban Yalıtımı 29
3.2.2 Enerji Yutucu Aygıtlar 31
3.2.2.1 Metalik Sönümleyiciler 32
3.2.2.2 Sürtünmeli Enerji Yutucular 33
3.2.2.3 Viskoz ve Visko-Elastik Sönümleyiciler 34
3.2.3 Kütle Sönümleyiciler 34
3.3 Aktif ve Yarı Aktif Yapısal Kontrol Sistemleri 37
3.4 Karma (Hibrid) Yapısal Kontrol Sistemleri 39
3.5 Sürtünmeli Enerji Yutucu Pasif Yapısal Kontrol Sistemleri 40
3.5.1 Eksenel ve Yatay Doğrultuda Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktaları 41
3.5.2 Dönel Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktaları 46
3.5.3 Hasar Sınırlaması ve Onarım 47

4. PERFORMANSA DAYALI TASARIM VE DEĞERLENDİRME 48
4.1 Giriş 48
4.2 ATC 40 Uygulaması 49
4.2.1 Performans Seviyeleri 49
4.2.1.1 Yapısal Performans Seviye ve Aralıkları 49
4.2.1.2 Yapısal Olmayan Performans Seviyeleri 51
4.2.1.3 Bina Performans Seviyeleri 52
4.2.2 Deprem Risk Seviyeleri 54
4.2.3 Deprem Bölgesi Sismik Karakteristikleri 56
4.2.3.1 Elastik İvme-Periyot Spektrum Eğrisi 57
4.2.3.2 Elastik İvme-Yer Değiştirme Spektrum Eğrisi 59
4.2.4 Güçlendirme Stratejileri 60
4.2.4.1 Genel 60
4.2.4.2 Tanımlar 61
4.2.4.3 Alternatif Güçlendirme Stratejileri 62
4.2.5 Doğrusal Olmayan Çözümleme ve Kapasite Spektrum Yöntemi 68
4.2.5.1 Genel 68
4.2.5.2 Kapasite Spektrum Yöntemi 69
4.2.6 Performans Noktasının Kabul Kriterleri 87
4.2.6.1 Bina İçin Öngörülen Kabul Kriterleri 87
4.2.6.2 Yapı Elemanları ve Bileşenler İçin Öngörülen Kabul Kriterleri 89
4.3 FEMA 356 Uygulaması 89
4.3.1 Performans Seviyeleri 90
4.3.2 Doğrusal Olmayan Çözümleme ve Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi 91
4.4 Modelleme Parametreleri (FEMA 356) 96
4.5 Bölümün Özeti 105

5. SAYISAL ÖRNEKLER 106
5.1 Mevcut Sistemin Kapasitesinin Belirlenmesi 109
5.1.1 Malzeme ve Kesit Özellikleri 109
5.1.1.1 Malzeme Özellikleri 109
5.1.1.2 Kesit Özellikleri 110
5.1.2 Mevcut Sistemin Çözümü 119
5.2 Güçlendirilmiş Sistemin Kapasitesinin Belirlenmesi 122

5.2.1 Güçlendirilmiş Sistemin Çözümü 123
5.3 Performans Analizi 134
5.3.1 Deprem Karakteristiklerinin Belirlenmesi 134
5.3.2 Kapasite Eğrisinin Kapasite Spektrum Eğrisine Dönüştürülmesi 137
5.3.3 Mevcut Sistemin Performans Analizi 140
5.3.4 Güçlendirilmiş Sistemin Performans Analizi 144
5.3.5 Performans Seviyesi ve Hasar Tespiti 146
5.3.5.1 Performans Noktasının Bina İçin Öngörülen Kabul Kriterleri 147
5.3.5.2 Performans Noktasının Elemanlar İçin Öngörülen Kabul Kriterleri 148
5.4 Alternatif Güçlendirme Sistemlerinin Değerlendirilmesi 150
5.4.1 Analiz Verileri 151
5.4.2 Analiz Sonuçları 152
5.4.2.1 A_0 Sistemi 152
5.4.2.2 A_1 Sistemi 154
5.4.2.3 A_2 Sistemi 156

6. SONUÇLAR 159

KAYNAKLAR 162

EK A. MATRİS YER DEĞİŞTİRME YÖNTEMİ 164

EK B. İDEAL SİSTEMİN DOĞRUSAL STATİK HESABI 174

ÖZGEÇMİŞ 190

KISALTMALAR

ATC	: Applied Technology Council
ASCE	: American Society of Civil Engineers
AISC	: American Institute of Steel Constructions
BSSC	: Building Seismic Safety Council
CBSC	: California Building Safety Code
COLA	: City of Los Angeles
EERC-UCB	: Earthquake Engineering Research Center of University of California at Berkeley
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
UBC	: Uniform Building Code
LRFD	: Load and Resistance Factor Design (Taşıma Gücü Tasarımı)
ADAS	: Added Damping And Stiffness (Sönüm ve Rijitlik Sağlayıcı Aygıt
ADRS	: Acceleration-Displacement Response Spectra (İvme-Yer Değiştirme Tepki Spektrumu)
CSM	: Capacity Spectrum Method (Kapasite Spektrum Yöntemi)
NP	: Nonstructural Performance (Yapısal Olmayan Performans)
SP	: Structural Performance (Yapısal Performans)
SBJ	: Sliding Slotted Bolted Joint (Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktası)
RBJ	: Rotating Slotted Bolted Joint (Dönel Bulonlu Düğüm Noktası)
PM	: Plastik Mafsal
TGD	: Temel Güvenlik Depremi
TMD	: Tuned Mass Dampers (Uyumlu Kütle Sönümleyici)
IO	: Immediate Occupancy (Hemen Kullanım)
LS	: Life Safety (Can Güvenliği)
CP	: Collapse Prevention (Göçmenin Önlenmesi)
DN	: Düğüm Noktası
PN	: Performans Noktası
H	: Düşey Yükleme Durumu
HD	: Düşey + Yatay Yükleme Durumu

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. : Yapı Sistemlerinin Davranışları..... 8
Tablo 2.2. : Virtüel İş Teoremi Tanım Tablosu..... 25
Tablo 3.1. : Pasif Kontrol Sistemi Kullanılan Yapılardan İstenen Özellikler..... 36
Tablo 4.1. : Yapısal Performans Seviyeleri ve Aralıkları..... 50
Tablo 4.2. : Yapısal Olmayan Performans Seviyeleri 51
Tablo 4.3. : Bina Performans Seviyeleri..... 52
Tablo 4.4. : Binalar İçin Önemli Performans Seviyeleri..... 53
Tablo 4.5. : Deprem Etki Seviyeleri..... 56
Tablo 4.6. : Kaynağa Uzaklık Katsayıları..... 56
Tablo 4.7. : Deprem Kaynağı Türü..... 57
Tablo 4.8. : Deprem Bölge Katsayısı..... 57
Tablo 4.9. : Deprem Katsayısı, C_A..... 58
Tablo 4.10. : Deprem Katsayısı, C_V..... 58
Tablo 4.11. : Zemin Sınıflarının Tanımı..... 59
Tablo 4.12. : Yapı Davranış Tipinin Belirlenmesi..... 82
Tablo 4.13. : κ-Faktör Değerleri..... 82
Tablo 4.14. : İzin Verilen En Küçük Spektral Azaltma Faktörleri..... 83
Tablo 4.15. : Efektif Sönüme ve Yapı Davranış Tipine Bağlı Spektral Azaltma Faktörleri..... 84
Tablo 4.16. : Katlar Arası Yerdeğiştirmenin Kat Yüksekliğine Oranı..... 88
Tablo 4.17. : C_2 Katsayı Değerleri..... 93
Tablo 4.18. : S_S Kısa Periyodu ve Zemin Sınıfına Bağlı F_a Değerleri..... 95
Tablo 4.19. : S_1 Bir Saniye Periyodu ve Zemin Sınıfına Bağlı F_y Değerleri..... 95
Tablo 4.20. : Etkili Sönüm Oranına Bağlı Olarak B_S ve B_1 Değerleri..... 95
Tablo 4.21. : Modelleme Parametreleri ve Kabul Edilen Plastik Şekil Değiştirme Kapasiteleri..... 104
Tablo 5.1. : Kesitlerin Dayanım Sınır Değerleri..... 118
Tablo 5.2. : Kesitlerin Akma ve Burkulma Durumu Sınır Şekil Değiştirme Değerleri..... 118
Tablo 5.3. : İlk Doğrusal Olmayan Çözümleme Adımı İçin Akma Koşulları..... 119
Tablo 5.4. : Son Doğrusal Olmayan Çözümleme Adımı İçin Akma Koşulları..... 119
Tablo 5.5. : ADRS Formundaki Talep Spektrum Eğrisinin İvme ve Yer Değiştirme Değerleri..... 136
Tablo 5.6. : Her İki Sistem İçin Mod Periyotları ve Kütle Katılım Oranları..... 137
Tablo 5.7. : Birinci Hakim Mod Şekli İçin Düğüm Noktası Yer Değiştirmeleri. 137

Tablo 5.8. : Mevcut Sistemin Kapasite Spektrum Değerleri..... 139
Tablo 5.9. : Güçlendirilmiş Sistemin Kapasite Spektrum Değerleri..... 139
Tablo 5.10. : Elemanların Plastik Şekil Değiştirme Miktarları ve Performans Seviyeleri..... 150
Tablo 5.11. : A_0 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Analiz Sonuçları..... 153
Tablo 5.12. : A_1 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Analiz Sonuçları..... 154
Tablo 5.13. : A_2 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Analiz Sonuçları..... 156
Tablo 5.14. : Alternatif Güçlendirme Sistemlerinin, Performans Noktaları İçin Öngörülen Kabul Kriterlerine Uygunluğu ve Performans Seviyeleri ve Aralıkları..... 158
Tablo A.1. : Sistem Rijitlik Matrisinin Kurulumu..... 172
Tablo B.1. : [S] Sistem Rijitlik Matrisinin Kurulması..... 178
Tablo B.2. : Ön Boyutlandırma I. Adım G, W ve WE Düğüm Noktası Dış Yük Matrisleri..... 179
Tablo B.3. : Ön Boyutlandırma I. Adım [d] Uç Yer Değiştirme Matrisleri..... 180
Tablo B.4. : Ön Boyutlandırma I. Adım Uç Kuvvetleri Değerleri..... 181
Tablo B.5. : Ön Boyutlandırma II. Adım G, W ve WE Düğüm Noktası Dış Yük Matrisleri..... 186
Tablo B.6. : Ön Boyutlandırma II. Adım [d] Uç Yer Değiştirme Matrisleri..... 186
Tablo B.7. : Ön Boyutlandırma II. Adım Uç Kuvvetleri Değerleri..... 187

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. : Dış Kuvvetler Etkisindeki Bir Katı Cisim ve Şematik Yük Parametresi-Şekil Değiştirme Bağıntısı..... 6
Şekil 2.2. : İdeal Malzemeler ve Yük Parametresi-Şekil Değiştirme Bağıntıları..... 6
Şekil 2.3. : Çeşitli Teorilere Ait Yük Parametresi-Yerdeğiştirme Bağıntıları... 8
Şekil 2.4. : Geometrik Süreksizlik İçeren Elemanın Davranışı..... 11
Şekil 2.5. : Kuvvet ve Yer Değiştirme Kontrollü Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması..... 16
Şekil 2.6. : Eğilme Momenti-Eğrilik Bağıntısı..... 18
Şekil 2.7. : Plastik Mafsal Bölgesi..... 19
Şekil 2.8. : İdealleştirilmiş (M-χ) Bağıntısı..... 20
Şekil 2.9. : Plastik Mafsal Boyu..... 21
Şekil 2.10. : Yerdeğiştirmelerin Hesabı..... 24
Şekil 2.11. : Plastik Mafsal Dönmelerinin Hesabı..... 25
Şekil 2.12. : Çubuk Uç Momentleri ve Uç Yer Değiştirmeleri..... 26
Şekil 3.1. : Sismik Yapısal Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması..... 28
Şekil 3.2. : Sismik Yalıtım Sistemli Bir Yapının Temel Bileşenleri..... 30
Şekil 3.3. : Çeşitli Taban Yalıtım Sistemleri..... 30
Şekil 3.4. : Enerji Yutucu Aygıtlar ile Donatılmış Bir Yapı Sistemi..... 31
Şekil 3.5. : Yedi Elemanlı ADAS Aygıtı..... 32
Şekil 3.6. : Üç Katlı Çerçevede ADAS Aygıtının Uygulama Biçimi..... 32
Şekil 3.7. : Sumitomo Sürtünmeli Sönümleyicisi ve Uygulama Biçimi..... 33
Şekil 3.8. : X – Çaprazlı Sürtünmeli Sönümleyici ve Uygulama Biçimi..... 33
Şekil 3.9. : Visko-Elastik Sönümleyici 34
Şekil 3.10. : Uyumlu Kütle Sönümleyici..... 35
Şekil 3.11. : Farklı Tiplerdeki Kütle Sönümleyiciler..... 36
Şekil 3.12. : Aktif Kontrol Sistem Şeması ve Temel Döngüsü..... 38
Şekil 3.13. : Aktif ve Yarı Aktif Yapısal Kontrol Sistemi..... 38
Şekil 3.14. : Taban Yalıtımlı Karma Kontrol Sistemi..... 39
Şekil 3.15. : İki Akslı Kütle Sönümleyicili Karma Kontrol Sistemi..... 40
Şekil 3.16. : Simetrik Doğrusal Kayıcı Düğüm Noktasının Bileşenleri..... 42
Şekil 3.17. : Simetrik Olmayan Doğrusal Kayıcı Düğüm Noktası Bileşenleri.... 42
Şekil 3.18. : Düğüm Noktasının İdealleştirilmiş Çevrimsel Davranışı..... 43
Şekil 3.19. : Eksenel Kayıcı SBJ'nin Çaprazlı Sistemlerdeki Kullanımı..... 44
Şekil 3.20. : Yatay Kayıcı SBJ'nin Çaprazlı Sistemlerdeki Kullanımı..... 45

Şekil 3.21. : Yatay Kayıcı SBJ Birleşim Detayları..... 45
Şekil 3.22. : Dönel Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktası (RBJ)..... 46
Şekil 3.23. : Dönel Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktasının Davranışı ve Modeli.... 47
Şekil 4.1. : Bina Performans Seviyeleri..... 55
Şekil 4.2. : (Sa – T) Spektrum Eğrisi..... 58
Şekil 4.3. : İvme Spektrumundan Talep Spektrumunun Elde Edilmesi..... 60
Şekil 4.4. : Tipik Bir Kapasite Eğrisi..... 63
Şekil 4.5. : Tipik Bir Kapasite Spektrum Eğrisi..... 64
Şekil 4.6. : Performans Noktasının Yeri..... 65
Şekil 4.7. : Kapasite Eğrisi..... 71
Şekil 4.8. : Adımlara Ait Kapasite Eğrileri..... 72
Şekil 4.9. : Hesap Sonucunda Elde Edilen Gerçek Kapasite Eğrisi..... 72
Şekil 4.10. : İvme Spektrumundan Talep Spektrumunun Elde Edilmesi..... 75
Şekil 4.11. : Kapasite Spektrum Eğrisinin, (Sa-T) ve (Sa-Sd) Tepki Spektrum Eğrileri Üzerindeki Gösterimi..... 76
Şekil 4.12. : Çift Doğru ile Temsil Edilen Kapasite Spektrum Eğrisi..... 77
Şekil 4.13. : Spektral İndirgeme İçin Sönüm Miktarının Tespiti..... 78
Şekil 4.14. : Çevrimsel Sönüm Nedeniyle Yutulan Enerjinin Hesabı..... 79
Şekil 4.15. : İndirgenmiş Tepki Spektrumu..... 80
Şekil 4.16. : Eşdeğer Viskoz Sönüm Miktarına Bağlı Sönüm Düzeltme Faktörü – κ..... 82
Şekil 4.17. : Kapasite Spektrum Eğrisinde İdealleştirme Yapılmadan Performans Noktasının Tespiti..... 85
Şekil 4.18. : Sünek Olmayan Yapılarda Kapasite Eğrisi ve Performans Seviyeleri..... 90
Şekil 4.19. : Gerçek ve İdealleştirilmiş Kapasite Eğrileri..... 92
Şekil 4.20. : Elastik İvme-Periyot Spektrum Eğrisi..... 94
Şekil 4.21. : Genelleştirilmiş Yük-Şekil Değiştirme Eğrisi..... 97
Şekil 4.22. : Başlık Dönmesinin Tanımlanması..... 98
Şekil 5.1. : İdeal Bir Biçimde Tasarlanan Yapı..... 106
Şekil 5.2. : Kapasitesi Zayıf Olan Mevcut Yapı..... 107
Şekil 5.3. : Yapıya Ait Bilgiler..... 107
Şekil 5.4. : "0" Numaralı Sistem..... 108
Şekil 5.5. : İdeal Elastoplastik Malzemeye Ait Gerilme-Şekil Değiştirme Bağıntıları..... 109
Şekil 5.6. : Genelleştirilmiş İç Kuvvet-Şekil Değiştirme Bağıntısı..... 111
Şekil 5.7. : Kolonlara ve Kirişlere Ait İç Kuvvet–Şekil Değiştirme Bağıntısı.. 114
Şekil 5.8. : Çapraz Elemanlara Ait İç Kuvvet – Şekil Değiştirme Bağıntısı..... 118
Şekil 5.9. : Birinci Plastik Kesitin Bulunması..... 120
Şekil 5.10. : İkinci Plastik Kesitin Bulunması..... 120
Şekil 5.11. : Üçüncü Plastik Kesitin Bulunması..... 121
Şekil 5.12. : Basınç Alan Çapraz Elemandaki Yük-Şekil Değiştirme Bağıntıları..... 123
Şekil 5.13. : Çekme Alan Çapraz Elemandaki Yük-Şekil Değiştirme Bağıntıları 123
Şekil 5.14. : Birinci Plastik Kesitin Bulunması..... 124

Şekil 5.15. : Kayma Eşiği Sınır Durumu..... 125
Şekil 5.16. : İkinci Plastik Kesitin Bulunması..... 126
Şekil 5.17. : Üçüncü Plastik Kesitin Bulunması..... 127
Şekil 5.18. : Dördüncü Plastik Kesitin Bulunması ve (k) Kesitinde Göçme Durumu..... 130
Şekil 5.19. : Mevcut ve Güçlendirilmiş Sistemlere Ait Kapasite Eğrileri..... 133
Şekil 5.20. : (S_a-T) Spektrum Eğrisi..... 135
Şekil 5.21. : Talep Spektrum Eğrilerinin Dönüştürülmüş Halleri..... 136
Şekil 5.22. : Göreli Ara Kat Ötelemelerine Bağlı Olarak Alınan α_1 ve $PF_1\Phi_{1,roof}$ Değerleri..... 138
Şekil 5.23. : Mevcut Sisteme Ait Gerçek ve İdealleştirilmiş Kapasite Spektrum Eğrileri..... 140
Şekil 5.24. : İndirgenmiş Tepki Spektrumu..... 142
Şekil 5.25. : Güçlendirilmiş Sisteme Ait Gerçek ve İdealleştirilmiş Kapasite Spektrum Eğrileri..... 144
Şekil 5.26. : Güçlendirilmiş Sistem Ait Kapasite ve Talep Spektrum Eğrileri.... 146
Şekil 5.27. : A_0 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Performans Analizi..... 153
Şekil 5.28. : A_1 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Performans Analizi..... 154
Şekil 5.29. : A_2 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Performans Analizi..... 156
Şekil A.1. : Çubuk Eksen Takımının Pozitif Yönleri..... 165
Şekil A.2. : Çubuk Uç Kuvvetleri..... 166
Şekil A.3. : Çubuk Uç Yer Değiştirmeleri..... 166
Şekil A.4. : Çubuk Birim Yer Değiştirme Sabiti..... 168
Şekil A.5. : Dış Yüklü Çubuk ve Yükleme Sabitleri..... 169
Şekil B.1 : Sistem Geometrisi ve Tasarıma Esas Olan Yükler..... 175
Şekil B.2. : Ön Boyutlandırma I. Adım Sonuçları..... 184
Şekil B.3. : Sistemin Kesin Boyutları..... 189

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A_c, A_b}$	: Sırasıyla kolon ve çapraz elemanların en kesit alanları
$\mathbf{A_g}$	: Brüt en kesit alanı
$\mathbf{a_y}$	: İdealleştirilmiş kapasite spektrum eğrisinin akma anındaki spektral ivme değeri
$\mathbf{a_{pi}}$	: i. ardışık yaklaşım için seçilen spektral ivme değeri
$\mathbf{b_f}$	: Kesit başlık genişliği
$\mathbf{B_S}$	: Kısa periyot spektral ivme değeri için etkili sönüm oranına bağlı olarak bulunan bir değer
$\mathbf{B_1}$	: Bir saniye periyodu spektral ivmesi için etkili sönüm oranına bağlı olarak bulunan bir değer
$\mathbf{C_A}$	: Sabit ivme bölgesinde sismik çarpan
$\mathbf{C_V}$	: Sabit hız bölgesinde sismik çarpan
$\mathbf{C_0}$	: Tek serbestlik dereceli sistemden elde edilen spektral yer değiştirmeyi, çok serbestlik dereceli sistemin hedef yer değiştirmesi ile ilişkilendiren bir katsayı
$\mathbf{C_1}$	: Beklenen en büyük elastik ötesi yer değiştirmeyi, doğrusal elastik varsayımı ile hesaplanan yer değiştirme ile ilişkilendiren bir katsayı
$\mathbf{C_2}$	: Deprem etkisi ile oluşan çevrimsel davranış şeklinin en büyük yer değiştirmeye olan etkisini temsil eden bir katsayı
$\mathbf{C_3}$	: Dinamik P-Δ etkisiyle yer değiştirmelerdeki artışı göz önüne alan bir katsayı
d, h	: Yer değiştirme, eleman en kesit boyutları, Bulon çapı
$\mathbf{d_G}$	: Göçme yüküne ait yer değiştirme değeri
$\mathbf{d_y}$	: İdealleştirilmiş kapasite spektrum eğrisinin akma anındaki spektral yer değiştirme değeri
$\mathbf{d_{pi}}$	: i. ardışık yaklaşım için seçilen spektral yer değiştirme değeri
$\mathbf{d_p}$	: i. ardışık yaklaşım sonucu bulunan spektral yer değiştirme değeri
$\mathbf{d_c}$	: Kolon en kesit yüksekliği
e	: Güvenlik katsayısı, Kayma uzunluğu
E	: Deprem etki türü katsayısı
$\mathbf{E_s}$	: Çelik için elastisite modülü
EI	: Eğilme rijitliği
EF	: Uzama rijitliği
$\mathbf{E_{S0}}$	: En büyük yer değiştirme enerjisi
$\mathbf{E_D}$	: Çevrimsel sönüm ile yutulan enerji miktarı
$\mathbf{F_a}$	: Kısa periyot spektral parametresine ve zemin sınıfına bağlı olarak bulunan bir değer
$\mathbf{F_v}$	: Bir saniye periyodu spektral parametresine ve zemin sınıfına bağlı olarak bulunan bir değer
$\mathbf{F_{ye}}$	: Malzeme akma gerilmesi (σ_a)

$\mathbf{F_{CR}}$: Azaltılmış kritik burkulma gerilmesi
$\mathbf{g}$: Yerçekimi ivmesi
$\mathbf{G}$: Kayma modülü
$\mathbf{H}$: Kat yüksekliği
$\mathbf{I_{c,b}}$: Sırasıyla kolon ve kiriş kesitlerine ait atalet momentleri
$\mathbf{i}$: Atalet yarıçapı
$\mathbf{K}$: Burkulma boyu katsayısı
$\mathbf{K_i}$: İlk rijitlik
$\mathbf{K_{eff}}$ **:** d yer değiştirmesindeki efektif rijitilik
$\mathbf{K_s}$: Pekleşme bölgesi rjitliği
$\mathbf{K_e}$: Hesap yapılan doğrultudaki elastik rijitlik
$\mathbf{l_c, l_b}$: Sırasıyla kolon ve kiriş elemanlarının boyu
$\mathbf{l_p}$: Plastik mafsal uzunluğu
$\mathbf{l'_p}$: Plastikleşme bölgesi uzunluğu
$\mathbf{L_d}$: Oval delik toplam genişliği
$\mathbf{M}$: Eğilme momenti
$\mathbf{M_e}$: Elastik eğilme momenti
$\mathbf{M_p, M_{CE}}$: Plastik (akma) eğilme momenti
$\mathbf{M'_p}$: İndirgenmiş plastik eğilme momenti
$\mathbf{n}$: Düğüm noktası sayısı
$\mathbf{N}$: Normal kuvvet, Kat sayısı
$\mathbf{N_p, N_y, P_{ye}}$ **:** Plastik normal kuvvet, Akma normal kuvveti
$\mathbf{N_s}$: Eleman ekseni boyunca verilen sürtünme kuvveti
$\mathbf{N_{kayma}}$: Eksenel yönde kayma hareketini başlatan eşik kuvveti (sürtünme kuvveti)
$\mathbf{N_b}$: Bulonlara verilen toplam öngerme kuvveti
$\mathbf{N_A}$: Sabit ivme bölgesi kaynağa uzaklık katsayısı
$\mathbf{N_V}$: Sabit hız bölgesi kaynağa uzaklık katsayısı
$\mathbf{N^H}$: Düşey yükler altında elemandaki eksenel kuvvet
$\mathbf{P}$: Yük parametresi, Mekanizma veya hedef yer değiştirme için sistemin elemanları üzerindeki normal kuvvet değeri
$\mathbf{P_y}$ **:** Elemandaki akma kuvveti parametresi
$\mathbf{P_s}$: Elemandaki sürtünme kuvveti parametresi
$\mathbf{P_{Limit}}$ **:** Limit yük parametresi
$\mathbf{P_{L1}}$: Birinci mertebe limit yük parametresi
$\mathbf{P_{L2}}$: İkinci mertebe limit yük parametresi
$\mathbf{P_G}$: Göçme yükü parametresi
$\mathbf{P_B}$: Burkulma yükü parametresi
$\mathbf{P_i}$: İşletme yükü, i. kata gelen toplam düşey yük
$\mathbf{\Sigma P_i}$: i. adım sonunda bulunan toplam yatay yük parametresi
$\mathbf{P_{CR}}$: Kritik burkulma dayanım değeri (N_{CR})
$\mathbf{PF_1}$: Birinci doğal moda ait modal katılım çarpanı
$\mathbf{Q}$: Eleman üzerindeki genelleştirilmiş zorlar
$\mathbf{Q_{CE}, Q_y}$: Elemana ait akma (plastikleşme) dayanımı
$\mathbf{R}$: Gerekli olan elastik dayanımın akma dayanımına oranı
$\mathbf{S_e}$ **:** Etkili T_e periyoduna karşı gelen spektral ivme
$\mathbf{S_a}$: İvme spektrumu
$\mathbf{S_d}$ **:** Yer değiştirme spektrumu

$\mathbf{SR}$: Deprem hareketinin mm/yıl biriminde yarattığı kayma oranı
$\mathbf{SR_A}$: Sabit ivme bölgesinde spektral indirgeme katsayısı
$\mathbf{SR_V}$: Sabit hız bölgesinde spektral indirgeme katsayısı
$\mathbf{S_1}$: Bir saniye periyodu spektral parametresi
$\mathbf{S_{X1}}$: Bir saniye periyodu ivme parametresi
$\mathbf{S_S}$: Kısa periyot spektral parametresi
$\mathbf{S_{XS}}$: Kısa periyot ivme parametresi
$\mathbf{S_k}$: Burkulma boyu
$\mathbf{t_p}$: Berkitme levhaları ile birlikte panel bölgesinin toplam kalınlığı
$\mathbf{t_f}$: Eleman başlık kalınlığı
$\mathbf{t_w}$: Eleman gövde kalınlığı
$\mathbf{T}$: Yapının birinci doğal titreşim periyodu, Kesme kuvveti
$\mathbf{T_A=T_0}$, $\mathbf{T_S}$: Spektrum karakteristik periyotları
$\mathbf{T_e}$: Etkin doğal periyot
$\mathbf{T_i}$: Hesap yapılan doğrultudaki elastik periyot
$\mathbf{T_{CE}}$: Kolonlarda ve çaprazlarda beklenen çekme dayanımı
$\mathbf{V}$: Toplam yatay kuvvet, Taban kesme kuvveti
$\mathbf{V_t}$: Hedef yer değiştirme için taban kesme kuvveti
$\mathbf{V_y}$: İdealleştirilmiş kapasite eğrisinin akma dayanımı
$\mathbf{V_i}$: i. kata etkiyen kat kesme kuvveti
$\mathbf{V_{CE}}$: Akma kesme kuvveti
$\mathbf{W}$: Yapının toplam ağırlığı, Yatay deprem kuvveti, Elastik mukavemet momenti
$\mathbf{w}$: Narinlik oranı ve malzemeye bağlı normal kuvvet büyütme çarpanı
$\mathbf{w_i}$: i. kata ait ağırlık
$\mathbf{Z}$: Deprem bölge katsayısı, Plastik mukavemet momenti
$\boldsymbol{\alpha}$: Kapasite eğrisinde negatif eğimli davranış için bir çarpan
$\boldsymbol{\alpha_1}$: Birinci doğal moda ait modal kütle katsayısı
$\boldsymbol{\alpha_i}$: i. kata ait yatay yük dağıtma çarpanı
$\boldsymbol{\beta}$: Sönüm oranı
$\boldsymbol{\beta_0}$: Çevrimsel (eşdeğer viskoz) sönüm oranı
$\boldsymbol{\beta_{eq}}$: Efektif sönüm oranı
$\boldsymbol{\Delta}$: Kat ötelemesi, Kesitin toplam (elastik+plastik) uzama miktarı
$\boldsymbol{\Delta_y}$: Kesitin akma anındaki uzaması
$\boldsymbol{\Delta l}$: Boy değişmesi
$\boldsymbol{\Delta l_e}$: Elastik boy değişmesi
$\boldsymbol{\Delta l_p}$: Plastik boy değişmesi
$\boldsymbol{\Delta_{roof}}$: En üst katın yatay ötelemesi
$\boldsymbol{\Delta_{C,\,T}}$: Sırasıyla basınç ve çekme kuvvetleri etkisindeki boy değişmesi
$\boldsymbol{\Delta_{iPM}^{(k-l)}}$: (k-l) çubuğunda, i. plastik mafsal oluşumundan sonra hesaplanan boy değişmesi
$\boldsymbol{\delta}$: Yer değiştirme (d)
$\boldsymbol{\delta_t}$: Hedef yer değiştirme
$\boldsymbol{\delta_{elastik}}$: Sistemin elastik sınırdaki yer değiştirmesi
$\boldsymbol{\delta_{toplam}}$: Mekanizma durumundaki sistemin toplam yer değiştirmesi
$\boldsymbol{\delta_{maks}}$: Sistemin en büyük yer değiştirmesi
$\boldsymbol{\delta_s}$: Kayma eşiği sınır durumunda elemandaki boy değişmesi
$\boldsymbol{\delta_{ce}}$: Akma anında elemandaki boy değişmesi (Δl_p)
$\boldsymbol{\delta_{cr}}$: Burkulma anında elemandaki kritik uzama değeri

δ_{iPM}^{k} : k numaralı düğüm noktasının i. plastik mafsal oluşumu sonrasında yaptığı yer değiştirme

κ : Yapının davranışına ve deprem süresine bağlı, sönüm oranı düzeltme çarpanı

λ : Narinlik oranı

λ_c : Kritik narinlik oranı

χ : Eğrilik

χ_e : Elastik eğrilik

χ_p : Plastik eğrilik

χ_{pmaks} : En büyük plastik eğrilik

χ_{maks} : En büyük eğrilik

φ : Dönme

φ_p : Plastik mafsal dönmesi

$maks\varphi_p$: En büyük plastik mafsal dönmesi

$\Phi_{1,roof}$: En üst katta birinci modun genliği

θ : Kesitin toplam (elastik+plastik) dönme miktarı ($\Sigma\theta_{(k)\ iPM}$)

θ_y : Kesitin akma anındaki dönmesi, Panel bölgesinde açısal kayma miktarı

$\theta_{(k)\ iPM}$: k kesitinde, i. plastik mafsal oluşumundan sonra hesaplanan dönme miktarı

$\Sigma\theta_{(k)\ iPM}$: k kesitinde, i. plastik mafsal oluşumundan sonra hesaplanan toplam dönme miktarı (elastik + plastik)

ϕ : Gerilme azaltma faktörü

μ : Sürtünme yüzeyindeki sürtünme katsayısı, Süneklik oranı

σ_{emn} : Malzeme emniyet gerilmesi

σ_u : Malzeme kopma gerilmesi

υ : Poisson oranı

υ_R : Düşey ve yatay işletme yükler için emniyet katsayısı

$[p]$: Denklem sisteminin sabitler matrisi

$[P_0]$: Yükleme matrisi

$[q]$: Düğüm noktası dış yük matrisi

$[k]$: Eleman rijitlik matrisi

$[S]$: Sistem rijitlik matrisi

$[d]$: Bilinmeyenler matrisi (düğüm noktaları yer değiştirmeleri matrisi)

EKSENEL DOĞRULTUDA KAYICI BULONLU DÜĞÜM NOKTALARI İÇEREN ÇELİK YAPI SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Deprem ve rüzgar gibi etkileri temsil eden yatay kuvvetler binaların tasarımındaki en belirleyici unsurlardır. Yatay kuvvetler altında zorlanan yapılarda yapısal hasarlar oluşabilmekte ve bu durum insan hayatını tehdit etmektedir. Ülkemizde meydana gelen depremlerden dolayı, özellikle tasarım ve uygulanmasında yeterli dikkat ve özenin gösterilmediği yapılarda büyük hasarlar oluşmuş ve birçok can kaybı yaşanmıştır. Deprem tehlikesiyle karşı karşıya kalan mevcut yapı stokunun büyüklüğü göz önünde tutulduğunda, zaman kaybı olmaksızın, bu yapıların etkili bir biçimde güvenilir hale getirilmesi zorunlu olmaktadır. Bilimin ve teknolojinin büyük ilerlemeler kaydettiği son yıllarda, bu konuya yönelik olarak yoğun kuramsal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, yapıların dinamik davranışlarını kontrol altına almak için sismik kontrol sistemlerinin uygulanması ve bu tür yapıların performanslarının belirlenmesidir. Yapıların davranışlarını kontrol etmek için, sürtünmeli enerji yutucu pasif yapısal kontrol sistemi özelliği sağlayan, eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktalarından yararlanılabilmektedir. Bu çalışmada, çaprazlı düzlem çelik çerçeveler üzerinde sayısal uygulamalar ve incelemeler yapılmıştır. Uygulamaların ilk adımında, mevcut deprem yönetmeliğine göre yeterli güvenliğe sahip olmayan bir çaprazlı çelik çerçevenin malzeme bakımından doğrusal olmayan kurama göre hesabı yapılmış ve kapasite eğrisi elde edilmiştir. Sabit düşey yükler ve monoton olarak artan yatay yükler altında sistem itme analizine maruz bırakılmış ve plastik mafsal hipotezi uyarınca, akma koşullarının aşıldığı kesitlere plastik mafsallar yerleştirilerek, sistem mekanizma durumuna gelinceye kadar zorlanmıştır. İkinci adımda, mevcut sistemdeki çapraz elemanlara eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktaları ilave edilmiştir. Bu şekilde güçlendirilen sistemin, malzeme bakımından doğrusal olmayan kurama göre hesabı yapılmış ve güçlendirilmiş sisteme ait yeni bir kapasite eğrisi elde edilmiştir. Hesap sonucunda, yatay yüklere karşı davranışı iyileştirilen yapı sisteminin kapasite eğrisi yardımıyla performansı ve bu performans seviyesindeki hasar düzeyi belirlenmiştir. Sonuçlar, doğrusal olmayan statik analiz ve performans analizi yapabilen SAP2000 Nonlinear V8.2.3 bilgisayar yazılımı ile elde edilmiştir. Sonuçların irdelenmesi ile , çaprazlı düzlem çelik çerçeveye ilave edilen pasif yapısal kontrol sisteminin yapının yatay yük taşıma kapasitesini arttırdığı, performansını arttırdığı ve hasar miktarını azalttığı gözlenmiştir.

EXAMINATION OF PERFORMANCE OF STEEL STRUCTURES HAVING SLIDING SLOTTED BOLTED JOINTS IN AXIAL DIRECTION OF ELEMENTS

SUMMARY

Wind and earthquake forces are the most dominant factors that affect the structural design. On buildings subjected to lateral loads, structural damages appear and this case may threaten the human life. Especially in our country, due to recent seismic activities, extensive structural damages and casualty of lives have been observed on structures that were designed and constructed without sufficient care. Considering the large amount of existing buildings that will meet the next probable strong seismic hazard, these buildings have to be retrofitted effectively as soon as possible. In the last decades, along with the developments in science and technology, intensive theoretical and experimental research studies have been done on this area. The main objective of this study is to control the dynamic behavior of structures through the use of seismic control systems and to define the performance of retrofitted buildings. In order to control the structural behavior under seismic effects, sliding slotted bolted joints (SBJ) in axial direction of elements, which demonstrate frictional energy dissipation characteristics are used. Numerical illustrations and investigations have been carried out for plane steel braced frames. In the first step of the numerical illustrations, materially nonlinear analysis of an existing braced steel frame that does not have sufficient safety as required by the seismic specifications has been done and lateral load capacity curve has been obtained. The structural system was exposed to pushover analysis under constant vertical loads and monotonically increasing lateral loads and loaded until the collapse mechanism is developed, by placing plastic hinges to cross-sections at which yield conditions were exceeded in accordance with the plastic hinge hypothesis. Secondly, SBJ were added on braces of the building structure. The retrofitted structural system was analyzed again and the new capacity curve was obtained. At the end of the analysis, performance and structural damage corresponding to this performance level have been determined. Numerical computations have been carried out by means of computer software, SAP 2000 Nonlinear V8.2.3. Based on the examination of the numerical results, it has been concluded that the added SBJ enhance the lateral load capacity and performance level and also decreases the structural damage, considerably.

1. GİRİŞ

1.1 Konu

Günümüzde, diğer mühendislik dallarında olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da, bilimsel gelişmelere paralel olarak yoğun kuramsal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Özellikle malzeme bilimindeki ilerlemeler, yapı sistemlerini oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin daha iyi tanınmasına ve bu özelliklerin hesaplamalarda dikkate alınmasına paralel olarak, sistemlerin doğrusal olmayan statik çözümlemelerinin yapılmasına katkı sağlamaktadır. Böylece, statik ve dinamik dış etkiler altında zorlanan yapıların kapasitelerinin en etkin bir biçimde kullanılabilmesi, yapıların gerçek davranışlarının yakından izlenebilmesi ve göçme güvenliklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Yapıların deprem etkilerine karşı yeterli bir dayanıma sahip olmalarının sağlanabilmesi amacıyla çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan ilki, depremden dolayı oluşan eşdeğer yatay kuvvetlerin, çeşitli etkenlere bağlı olarak, yapının kendi ağırlığının %5'i ile %10'u arasında değiştiği varsayımıdır. Bu varsayımda, deprem istemi ve bina kapasitesi hakkında kesin bir bilgi olmadığı için, yüksek bir güvenlik faktörü kullanılarak ve genellikle doğrusal davranış sınırları içinde kalınacak biçimde yapının tasarımı yapılmaktadır. İkinci yaklaşımda, yapının elastik ötesi davranışını temsil eden bir yapı davranış katsayısı aracılığı ile, elastik deprem yüklerinin doğrusal tasarım için azaltılması öngörülmektedir. Bu yaklaşım, ilk yaklaşıma oranla gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve yapının deprem etkileri altında daha doğru tasarlanmasını sağlamaktadır. Üçüncü ve en güncel yaklaşımda ise, yapının elastik ötesi kapasitesinin varlığına dayanarak, elastik ötesi deprem isteminin kullanılmasını öngören performansa dayalı tasarım kavramı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, doğrusal olmayan çözümleme yöntemleri kullanılarak yapıya ait kapasite eğrisi belirlenmekte, bu kapasite eğrisine bağlı olarak

elastik deprem spektrumunun indirgenmesi sağlanmakta ve deprem istemi ile bina kapasitesinin eşitlendiği performans noktası elde edilmektedir. Yöntemin ana amacı, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin etkisi ile deprem enerjisinin sönümlenmesini sağlayan yapının, performans noktasındaki hasar durumunun tespiti veya diğer bir deyişle deprem güvenliğinin irdelenmesidir. Böylece, mevcut yapıların güçlendirilmesi ve yeni yapılacak olan yapıların daha ekonomik ve gerçekci bir biçimde tasarlanması sağlanabilmektedir.

Ülkemiz, çok hareketli bir deprem kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Ülkemizde yaşanan büyük depremlerin sonuçları incelendiğinde, yapılardaki hasar miktarının ve buna bağlı olarak can kaybının ne kadar fazla olduğu açıkça görülmektedir. Bütün bu yaşananlardan sonra deprem mühendisliğinin birinci hedefi, depremlerin yapılarda can kaybına neden olabilecek büyük hasarlara yol açmadan atlatılabilmesidir. Bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmaların başında, mevcut yapıların deprem güvenliklerinin performans analizi ile belirlenmesi ve yapıların ne şekilde güçlendirilmesi gerektiğinin saptanması gelmektedir. Bu tezin kapsamında sunulacak olan güçlendirme stratejisi, yapıların dinamik davranışlarını kontrol altına almaya yönelik olarak kullanılan, kayıcı bulonlu sürtünmeli enerji yutucu pasif yapısal kontrol sistemlerini içermektedir.

1.2 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Aktif bir deprem kuşağında bulunan ülkemizde, yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak nasıl bir güçlendirme stratejisinin uygulanacağı, yapı ve deprem mühendisliği alanındaki gelişmelerin yardımı ile daha gerçekçi ve pratik olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu değerlendirmelerin yapılabilmesi amacıyla son yirmi yıl içinde bazı araştırmalar gerçekleştirilmiş ve bu araştırmaların sonuçlarına dayanan yönetmelikler geliştirilmiştir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde, betonarme binaların deprem güvenliklerini belirlemek için, Applied Technology Council (ATC) tarafından *Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings* – ATC 40 [1] isimli bir proje hazırlanmıştır. Daha sonra, her tip yapı malzemesinin kullanıldığı binaların (betonarme, çelik, ahşap ve yığma yapılar) deprem güvenliklerinin belirlenmesi için,

Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından *NEHRP Guidlines for Seismic Rehabilitation of Buildings* – FEMA 273, 356 [2,3] projeleri geliştirilmiştir. Bu çalışmaların yanında , Building Seismic Safety Council (BSSC), American Society of Civil Engineers (ASCE) ve Earthquake Engineering Research Center of University of California at Berkeley (EERC-UCB) tarafından yürütülen diğer projeler de bu alandaki araştırmalara katkı sağlamaktadırlar.

Yapı sistemlerinin malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan kurama göre hesabını amaçlayan yöntemler uzun bir geçmişe dayanmaktadır, [4-6]. Buna karşılık, doğrusal olmayan kurama dayanan etkin bilgisayar yazılımlarının gelişimi oldukça yenidir, [7,8].

Deprem güvenlikleri bakımından yetersiz olan yapıların güçlendirilmesi amacıyla çeşitli güçlendirme stratejileri geliştirilmiştir. Bu stratejilere genel olarak Bölüm 4 de değinilmektedir. Güçlendirme stratejilerinden en önemlisi ve son zamanlarda üzerinde en çok çalışılanı sismik talebi (istemi) azaltmaya yönelik olan yapısal kontrol sistemleridir. Bu alanda yapılan çalışmalar arasında, M.C. Constantinou, T.T. Soong, G.F. Dargush tarafından hazırlanan ve pasif enerji yutucu sistemlerin genel olarak değerlendirildiği [9] numaralı kaynak gösterilebilir. Bu kaynakta, pasif enerji yutucu yapısal kontrol sistemlerinin yapılara etkisi teorik bir biçimde açıklanmaktadır. Daha özele inen diğer bir çalışma ise E.G. Popov ve T-S. Yang ikilisi tarafından oluşturulan [10] numaralı yayındır. Bu çalışmada, doğrusal ve dönel kayıcı bulonlu, sürtünmeli enerji yutucu pasif yapısal kontrol sistemlerinin çelik birleşim detayları yardımıyla yapılara uygulanması ve söz konusu yapıların performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Yine, bu çalışmanın geliştirilmesinde önemli bir yeri olan [11] ve [12] numaralı kaynaklar referans olarak gösterilebilir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yeterli derecede iyi tasarlanmamış yapılarda, olası bir deprem etkisi altında meydana gelen elastik ötesi davranışlar bölgesel hasarların oluşmasına neden olabilir. Bu hasarlar, yapının kullanımını etkileyebileceği gibi yapının toptan göçmesine de sebep olabilir. Bu nedenle, öncelikle mevcut yapıların deprem etkileri altındaki yatay yük

taşıma kapasitelerinin belirlenmesi ve buna dayanarak yapıların deprem güvenliklerinin ve performans düzeylerinin tespit edilmesi gerekir.

Bu çalışmada, eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu sürtünmeli enerji yutucu düğüm noktalarının uygulandığı çaprazlı düzlem çelik çerçeve sistemler ile bu tür düğüm noktaları içermeyen çaprazlı düzlem çelik çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan statik çözümlemeleri yapılarak kapasitelerinin belirlenmesi ve performansa dayalı tasarım kavramı kullanılarak, her iki tür sistemin hasar seviyelerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Böylece, eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu sürtünmeli enerji yutucu pasif yapısal kontrol sistemlerinin uygulandığı yapıların deprem güvenliklerine katkısının belirlenmesi ve gerek mevcut yapıların güçlendirilmesinde gerekse yeni yapılacak yapıların tasarımında bu sistemlerin ekonomik olarak uygulanması hedeflenmektedir.

Çalışmada izlenen yol aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

a) Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi ve doğrusal olmayan sistemlerin hesap yöntemlerinin gözden geçirilmesi.

b) Yapıların dinamik davranışlarını kontrol altına almak amacıyla uygulanan yapısal kontrol sistemleri hakkında gerekli bilgilerin verilmesi.

c) Mevcut yapıların ve yeni inşa edilecek olan yapıların deprem etkileri altındaki performanslarının belirlenmesi için, performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramının ATC 40 [1] ve FEMA 356 [3] dokümanlarındaki uygulamaları ile çelik sistemler için FEMA 356 [3] da verilen modelleme parametreleri ve plastik şekil değiştirme kapasiteleri hakkında bilgi verilmesi.

d) Sayısal örnek olarak seçilen çelik yapı sisteminin mevcut durumunun ve eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu sürtünmeli enerji yutucu pasif yapısal kontrol sistemlerinin ilave edildiği güçlendirilmiş halinin performanslarının incelenmesi ve karşılaştırılması.

e) Çalışmada varılan sonuçların değerlendirilmesi.

2. YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN TEORİYE GÖRE HESABI

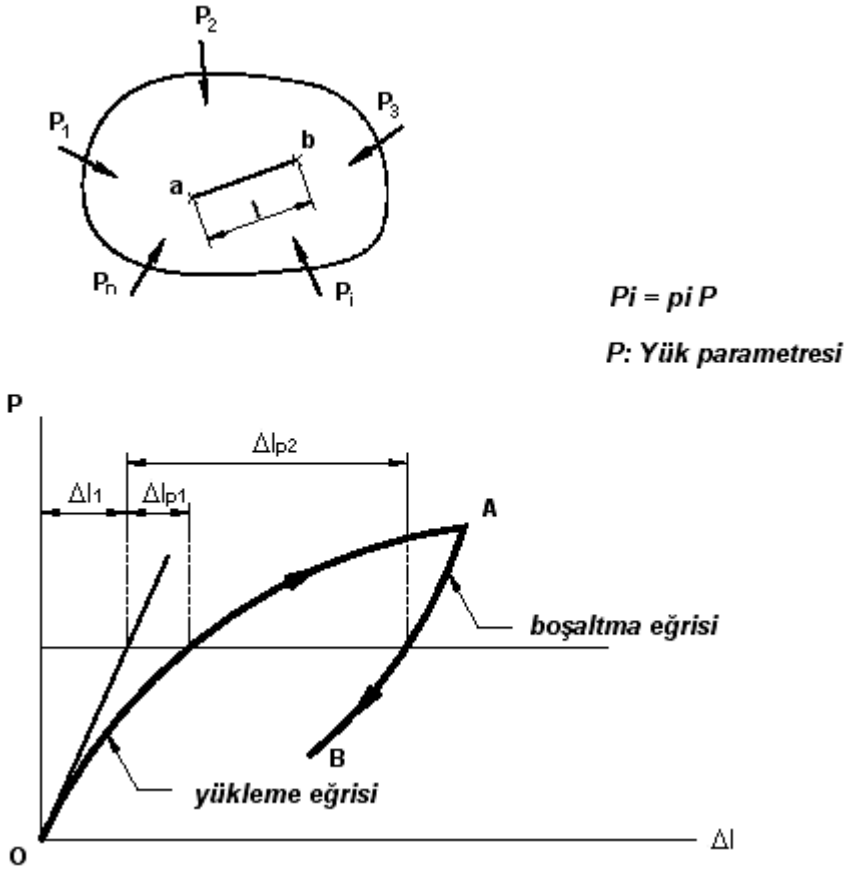
2.1 Giriş

Dış etkiler altında zorlanan yapı sistemlerinde oluşan iç kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin aşağıda sıralanan üç koşulu sağlamaları gerekmektedir. Bu koşullar,

1. bünye denklemleri (gerilme – şekil değiştirme bağıntıları)
2. denge denklemleri
   a – düğüm noktalarının denge denklemleri
   b – çubukların denge denklemleri
3. geometrik uygunluk koşullarıdır.

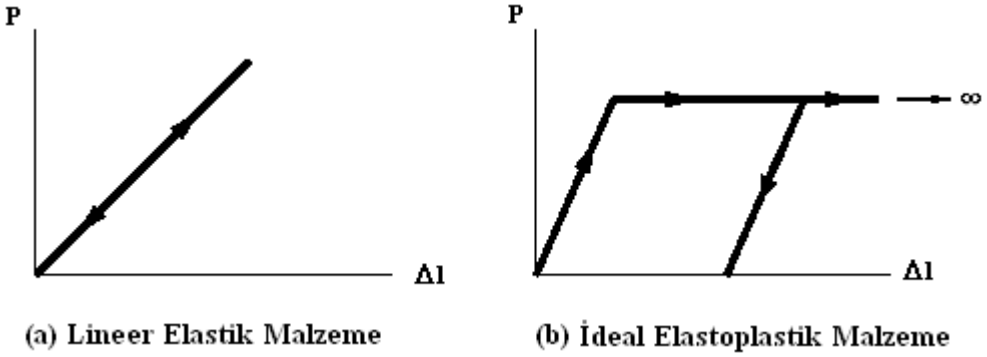
Çözümün sağlaması gereken koşullardan ilki, sistemi oluşturan elemanların malzeme özelliklerine ait bünye denklemleridir. Malzemelerin dış kuvvetler altındaki davranışlarını belirlemek için yapılan deneylerden yararlanarak, bu malzemelerin gerilme-şekil değiştirme bağıntıları elde edilebilmektedir, Şekil 2.1. Ayrıca, bu bağıntılar idealleştirilerek çeşitli ideal malzemeler tanımlanmıştır.

İdeal malzemeler arasında yer alan doğrusal-elastik malzemede, gerilme – şekil değiştirme bağıntısının doğrusal olarak değiştiği ve yükleme ve boşaltma eğrilerinin aynı doğru üzerinde olduğu varsayılmaktadır, Şekil 2.2a. Doğrusal elastik malzemeden oluşturulan sistemlere malzeme bakımından doğrusal sistemler denir. Yapı sistemlerinin dış etkiler altında doğrusal-elastik sınırlar içinde kalacak şekilde tasarlanmalarındaki temel mantık, yapısal hasarların önlenmesidir.



Şekil 2.1 Dış Kuvvetler Etkisindeki Bir Katı Cisim ve Şematik Yük Parametresi-Şekil Değiştirme Bağıntısı

Diğer taraftan, ideal malzemeler içinde yer alan ideal elastoplastik malzemede gerilme-şekil değiştirme bağıntısı doğrusal değildir ve yükleme eğrisinin iki doğru parçasından meydana geldiği varsayılmaktadır, Şekil 2.2b. Bu tür ideal malzeme varsayımı ile oluşturulan sistemler, malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlere örnek teşkil etmektedir. Yapı sistemlerinin dış etkiler altındaki doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesindeki temel amaç, sistemin artan dış yükler altındaki gerçek davranışının ve yük taşıma kapasitesinin belirlenmesidir.



Şekil 2.2 İdeal Malzemeler ve Yük Parametresi-Şekil Değiştirme Bağıntıları

Çözümün sağlaması gereken ikinci koşul denge denklemleridir. Denge denklemleri, sistemi oluşturan elemanlarda ve bu elemanların birleştiği düğüm noktalarında, dış yüklerin ve bu yüklerden meydana gelen iç kuvvetlerin dengede olduğunu ifade eden denklemlerdir. Yer değiştirmelerin çok küçük olduğu sistemlerde, denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş eksen üzerinde yazılması yeterlidir. Ancak, özellikle narin sistemlerde, yer değiştirmeler ihmal edilebilecek kadar küçük olmadıkları için denge denklemleri şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılır. Bu tür sistemlere, geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemler denir ve bu sistemlerde *ikinci mertebe teorisi* geçerlidir.

Çözümün sağlaması gereken son koşul, geometrik süreklilik denklemleridir. Geometrik süreklilik denklemleri

a). her rijit düğüm noktasında birleşen çubukların bu noktadaki dönmelerinin birbirine eşit olduğunu

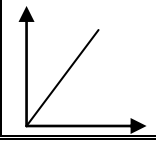
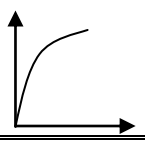
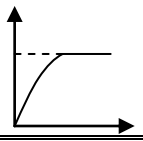
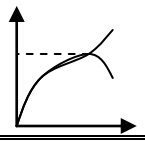
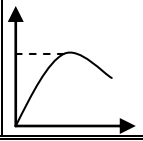
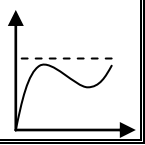
b). sistemde bulunan çerçevelerin kapalı olduğunu veya bir ucunun diğerine göre belirli bir öteleme (mesnet çökmesi) yaptığını ifade etmektedir.

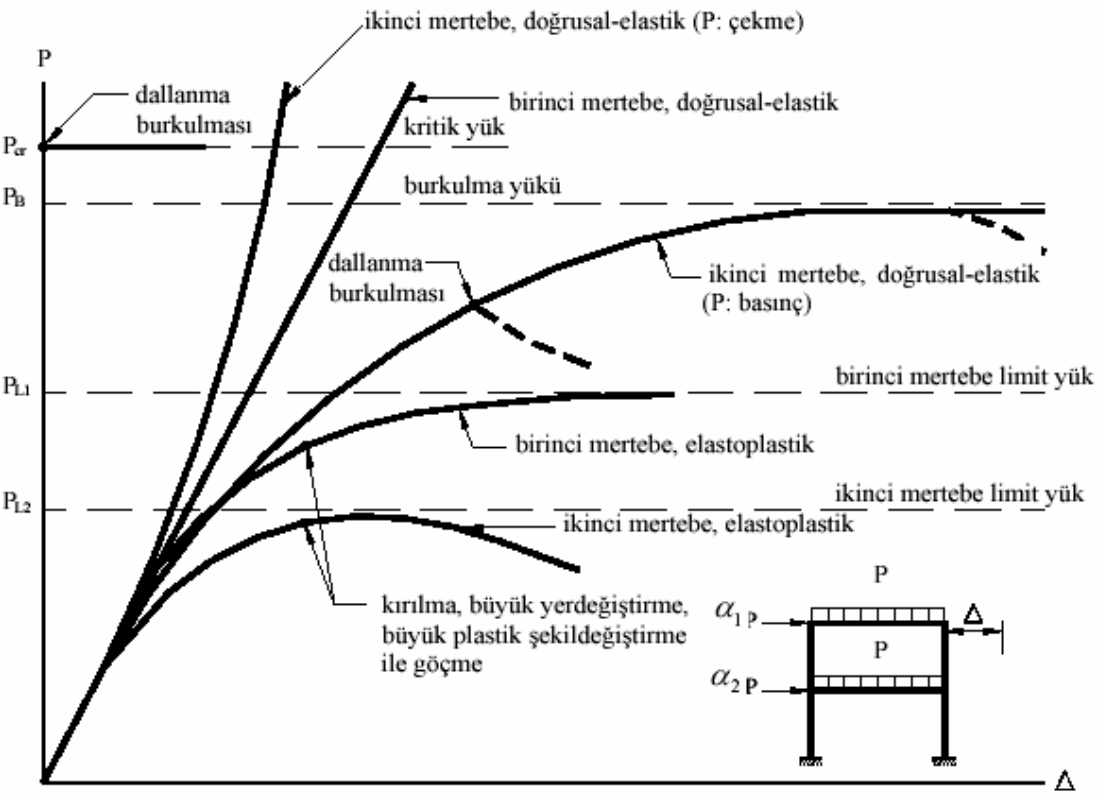
Bazı özel hallerde, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin yanında, geometrik süreklilik denklemlerine etkisi de önemli olabilir. Bu tür sistemlerde *sonlu deplasman teorisi* uygulanır.

Bazı yapı sistemlerinde, sistemin özelliklerinden kaynaklanan nedenlerle, geometrik süreklilik koşulları sağlanmayabilir. Bu durumda, sistemde geometrik süreksizlikler meydana gelir. Özellikle, sistemi oluşturan elemanların sınır koşullarındaki bu süreksizlikler nedeniyle, sistemin davranışı doğrusal olmaz. Bu tür sistemlere, geometrik süreksizlikler bakımından doğrusal olmayan sistemler denir ve bu sistemler malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemler gibi incelenebilir.

Yapı sistemlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarını esas alan teorilere ilişkin bilgiler Tablo 2.1 de topluca özetlenmiştir. Tablonun en alt satırında her duruma ait şematik (P-δ) bağıntıları gösterilmiştir. Şekil 2.3 de ise, bu bağıntılara ait açıklayıcı grafikler ayrıntılı bir biçimde sunulmaktadır.

Tablo 2.1 Yapı Sistemlerinin Davranışları

Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar	Doğrusal Sistemler	Doğrusal Olmayan Sistemler				
		Malzeme Bakımından (1)	Geometri Değişimleri Bakımından (2)		Her İki Bakımdan (1+2)	
			İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi	İkinci Mertebe Teorisi	Sonlu Deplasman Teorisi
Bünye Denklemleri (Gerilme-Şekil Değiştirme Bağıntıları)	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik **Değil**	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik **Değil**	Doğrusal Elastik **Değil**
Denge Denklemlerinde Yer Değiştirmeler	Küçük	Küçük	Küçük **Değil**	Küçük **Değil**	Küçük **Değil**	Küçük **Değil**
Geometrik Uygunluk Koşullarında Yer Değiştirmeler	Küçük	Küçük	Küçük	Küçük **Değil**	Küçük	Küçük **Değil**
P-δ Bağıntıları						



Şekil 2.3 Çeşitli Teorilere Ait Yük Parametresi-Yerdeğiştirme Bağıntıları

2.2 Doğrusal Davranış Gösteren Sistemler

Doğrusal-elastik davranış gösteren sistemler, malzemeye ait bünye denklemlerinin (gerilme-şekil değiştirme bağıntıları) doğrusal varsayıldığı ve yerdeğiştirmelerin çok küçük olduğu sistemlerdir.

Günümüz yapı mühendisliğinde kullanılan en yaygın tasarım yaklaşımı (güvenlik gerilmeleri esasına göre tasarım), yapı sistemlerinin doğrusal-elastik olarak davrandığı varsayımına dayanır. Ancak bu yaklaşımda, yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışları ve bunun yapı üzerindeki etkileri çeşitli şekillerde göz önüne alınır. Örneğin, yatay deprem yükleri altında, R yapı davranış katsayısı tanımlanmakta ve bu katsayı aracılığı ile elastik deprem yükleri indirgenerek yapının doğrusal olmayan davranışı elastik sınırlar içerisinde temsil edilmektedir. Diğer taraftan, ikinci mertebe etkilerinin göz önüne alınması ve elemanların burkulmaya karşı güvenlikli sınırlar içerisinde kalması için, moment büyütme çarpanlarından ve burkulma katsayılarından yararlanılmaktadır.

Doğrusal-elastik davranış esas alınarak tasarımı yapılan sistemlerde, sistemi oluşturan elemanlar üzerindeki gerilmeler orantı sınır gerilmesini aşamayacağı için, elastik ötesi şekil değiştirmeler meydana gelmez. Bunun sonucunda, elastik teoriye göre uygun olarak boyutlandırılan yapılarda, yerdeğiştirmeler küçük kalır ve ikinci mertebe etkileri ile olası bir depremde meydana gelecek hasar sınırlanmış olur.

2.3 Doğrusal Olmayan Davranış Gösteren Sistemler

Doğrusal olmayan davranış gösteren sistemler üç gruba ayrılır. Bu sistemler aşağıda sıralanmıştır.

1. Malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemler.
2. Geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemler.
3. Geometrik süreksizlikler bakımından doğrusal olmayan sistemler.

2.3.1 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler

Bu tür sistemler, malzemeye ait bünye denklemlerinin doğrusal olmadığı sistemlerdir. Malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerde, bünye denklemlerinin doğrusal olmaması nedeniyle, eleman rijitliklerinin sistemin şekil değiştirmelerine bağlı olarak ifade edilmesi gerekir.

Bir yapı sisteminde, artan dış yükler ile birlikte elemanlardaki iç kuvvetlerde de artış meydana gelir. Doğrusal olmayan malzemeden yapılan sistemlerde, artan iç kuvvetler altında sistemin bazı kesitlerinde ve bu kesitler dolaylarında elastik ötesi şekil değiştirmeler oluşur. Elastik ötesi şekil değiştirmeler genel olarak sistem üzerinde yayılıdır. Ancak, sistemin belirli bölgelerinde yoğunlaşmış olan iç kuvvetlere paralel olarak, elastik ötesi eğilme şekil değiştirmelerinin de belirli bölgelerde toplandığı ve bu bölgelerde plastik mafsallar oluştuğu varsayılabilir. Bu varsayıma plastik mafsal hipotezi adı verilir.

2.3.2 Geometri Değişimleri Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler

Yer değiştirmelerin yeter derecede küçük olmadığı sistemlere geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemler denilmektedir. Bu tür sistemlere ait iki farklı teoriden bahsetmek mümkündür.

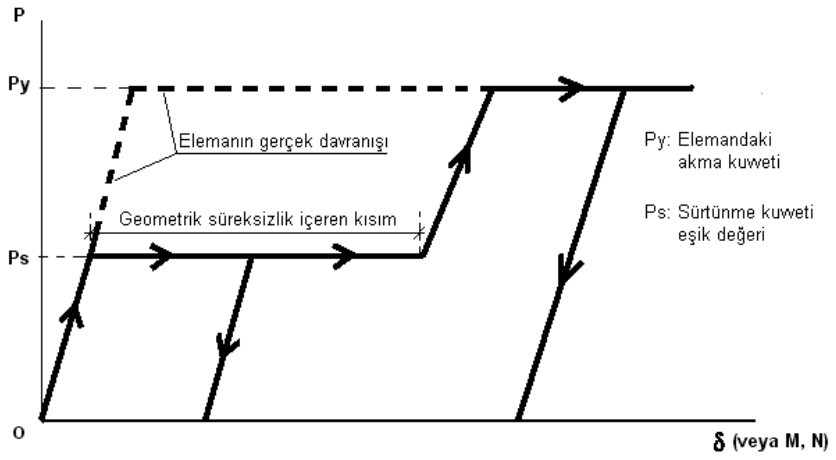
1. İkinci Mertebe Teorisi: Geometri değişimlerinin yeter derecede küçük olmadığı sistemlerde, denge denklemlerinin şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerekmektedir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı bu teoriye ikinci mertebe teorisi adı verilir. İkinci mertebe teorisinde yer değiştirmelerin geometrik süreklilik denklemlerine etkisi terk edilmektedir.

2. Sonlu Deplasman Teorisi: Geometri değişimlerinin büyük değerler aldığı bazı özel sistemlerde, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin yanında geometrik süreklilik denklemlerine etkisinin de göz önüne alınması gerekebilir. Bu etkinin dikkate alındığı teoriye sonlu deplasman teorisi adı verilir.

2.3.3 Geometrik Süreksizlikler Bakımından Doğrusal Olmayan Sistemler

Geometrik süreksizlikler bakımından doğrusal olmayan sistemler, yapı sistemini oluşturan elemanlara ait sınır koşullarının geometrik süreksizliğe neden olduğu sistemlerdir. Bu süreksizliğin oluşumundan ortadan kalkmasına değin geçen süre içerisinde, sürekli artan dış etkiler altında, sisteme ait yük parametresi-yer değiştirme arasındaki bağıntının doğrusallıktan saptığı ve sonuçta, sistemin genelinde doğrusal olmayan bir davranışa neden olduğu söylenebilir. Aslında, geometrik süreksizlikler bakımından doğrusal olmayan sistemler, malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlere benzeştirilebilir. Bu benzeşimde, geometrik süreksizliğe neden olan sınır koşulu, sistemi oluşturan bir eleman gibi düşünülebilir ve elemana ait bünye denkleminde bu süreksizlik kolayca tanımlanabilir. Böylece, geometrik süreksizlikler bakımından doğrusal olmayan sistemler, malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlere dönüştürülmüş olur.

Günümüzde bu tür sistemlere örnek olarak, bu tez çalışmasının konusunu oluşturan, oval delikli ve sürtünmeyle yük aktaran bulonlu çelik birleşimler (*sliding slotted bolted joints, SBJ*) verilebilir. Bu tür birleşimlerde oval delik boyu, yükün aktarıldığı yöne doğru olmak üzere, birleşimde kullanılan bulon çapından daha büyük seçilir. Sürekli olarak artan dış etkilere paralel olarak kesit zorlarında da bir artış meydana gelir. Bulonlara verilen sürtünme kuvvetine ulaşılmasıyla birlikte, çelik birleşimin uygulandığı eleman artan dış etkilere karşın sabit iç kuvvet altında hareketine devam eder. Böylece, tüm sistemin (P-δ) bağıntısı izlendiğinde, doğrusal olmayan bir davranışın oluştuğu gözlenir, Şekil 2.4.



Şekil 2.4 Geometrik Süreksizlik İçeren Elemanın Davranışı

2.4 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Çözüm Yöntemleri

Bir problemin çözümünü veren denklem takımının katsayıları ve/veya sabitleri problemin çözümüne bağlı ise, yani problemin bilinmeyenlerini de içeriyorsa, bu tür problemlere doğrusal olmayan problemler denir.

Bir yapı sisteminin hesabında, yerdeğiştirme bileşenleri bilinmeyenler olarak seçiliyorsa, bilinmeyenleri veren denklemin matris formundaki genel ifadesi

$$[S][d] = [p] \tag{2.1}$$

şeklinde yazılabilir. Burada,
[S] = denklem sisteminin katsayılar matrisini (rijitlik matrisi),
[d] = bilinmeyenler matrisini (yer değiştirme matrisi),
[p] = denklem sisteminin sabitler matrisini (yükleme matrisi) göstermektedir.

Doğrusal olmayan yapı mekaniği problemlerinde, problemin türüne ve çözümde uygulanan yönteme bağlı olarak, [S] katsayılar matrisi ve bazı hallerde [p] sabitler matrisi bilinmeyen yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeler cinsinden yazılır.

Örneğin, geometri değişimlerinin büyük olduğu sistemlerde, denge denklemlerinin şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerekir. Bu tür sistemler geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemlerdir ve sistemin katsayılar matrisi, sisteme ait yer değiştirmelere bağlı olarak ifade edilir. Bazı durumlarda, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisi fiktif dış yüklerle temsil edilmektedir. Bu durumda, denklem takımının sabitler matrisi [p], yer değiştirmeler cinsinden ifade edilmiş olur.

Malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerde ise bünye denklemlerinin doğrusal olmaması nedeniyle, eleman rijitliklerinin sistemi oluşturan elemanların şekil değiştirmelerine bağlı olarak ifade edilmesi gerekir. Bu durumda, malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerin denklem takımı katsayılar matrisi problemin çözümüne bağlı olur.

Görüldüğü gibi, bilinmeyen sayısının çok fazla olduğu yapı sistemlerinin doğrusal olmayan teoriye göre hesabında, denklem takımlarının oluşturulması ve bunların çözümünün yapılması çok uzun hesapları gerektirmektedir. Bu nedenle, söz konusu sistemlerin en etkili biçimde çözülebilmesi için, her adımda problemin doğrusal çözümünü esas alan sayısal hesap yöntemleri geliştirilmiştir.

2.4.1 Doğrusal Olmayan Sistemlerin Sayısal Çözüm Yöntemleri

Malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemlerin sayısal çözüm yöntemleri iki ana başlık altında toplanabilir. Bu bölümde, sayısal çözüm yöntemlerinin sadece ana başlıkları verilecektir. Bu yöntemlere ilişkin ayrıntılı bilgiye [14] numaralı kaynaktan ulaşılabilir.

1. Ardışık yaklaşım yöntemleri

a). Başlangıç kirişi yöntemi
b). Başlangıç teğeti yöntemi
c). Teğet yöntemi
d). Kiriş yöntemi

2. Yük artımı yöntemleri

a). Basit yük artımı yöntemi
b). Düzeltilmiş yük artımı yöntemi

2.4.2 Limit Yüklerin Belirlenmesi

Doğrusal olmayan sistemlerin taşıma kapasitesi olarak tanımlanan limit yüke, pratikte iki şekilde ulaşılabilir.

a). Yer değiştirmelerin sonsuza erişmesi (P-d bağıntısının bir asimptota ulaşması).
b). Yük parametresi – yer değiştirme eğrisinin bir maksimumdan geçmesi.

Bu tanımlara uygun olarak, limit yük iki farklı şekilde hesaplanabilir.

a). Uygulamada, doğrusal elastik burkulma yükünün veya birinci mertebe limit yükün hesabı sonucunda elde edilen yük parametresi - yer değiştirme bağıntısı genel olarak

$P = P_{Limit}$ için $d \rightarrow \infty$ $(P/d = 0)$

şeklindedir. Asimptota ulaşan (P-d) diyagramlarına karşı gelen P-P/d bağıntısı genelde doğrusal formda olduğu için limit yük kolayca hesaplanabilir.

b). Yük parametresi - yer değiştirme diyagramının bir maksimumdan geçmesi halinde, limit yük iki şekilde belirlenebilir.

i. (P-d) diyagramının pozitif ve negatif bölgeleri üzerinde noktalar elde edilmesi halinde, bu noktalardan en az üçü arasında interpolasyon yapılarak diyagramın maksimum ordinatı belirlenir ve bu değer sistemin limit yükü olarak alınır. İleride açıklanacak olan kuvvet kontrollü analizde, yük parametresinin seçilen değerleri için diyagramın negatif bölgesi üzerinde değer elde edilemediğinden bu yolun uygulanması mümkün değildir.

ii. (P-d) diyagramının bir maksimumdan geçmesi halinde, limit yükün bulunabilmesi için uygulanan yöntemlerden biri de yük artım yöntemidir. Bu yöntemde, herhangi bir yük artımı sonunda artan yük parametresi için azalan yer değiştirmelerin elde edilmesi, (P-d) diyagramının bir maksimumdan geçtiğini göstermektedir. Böylece, sisteme ait taşıma gücü değeri, yani limit yük bulunmuş olur.

2.4.3 Sistem Analiz Türleri ve Özellikleri

Malzeme ve/veya geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistemlerin (P-d) diyagramlarının belirlenmesi ve taşıma gücünün hesabı için iki tip analiz yöntemi kullanılır. Bunlar sırasıyla, kuvvet kontrollü analiz ve yer değiştirme kontrollü analiz yöntemleri olarak isimlendirilirler.

Kuvvet Kontrollü Analiz: Hesabın başlangıcında yük parametresinin değeri seçilir ve ardışık yaklaşımın her adımında bu yük parametresi esas alınarak hesaba devam edilir. Bu durumda elde edilecek olan çözüm, seçilen yük parametresi için çözümdür.

Yerdeğiştirme Kontrollü Analiz: Hesabın başlangıcında, sisteme ait bir büyüklük seçilir. Bu büyüklük yer değiştirme (örneğin hedeflenen yer değiştirme değeri), şekil

değiştirme (örneğin bir elemana ait sınır şekil değiştirme) veya bir elemandaki iç kuvvet (örneğin plastikleşme dayanımı) olabilir. Ardışık yaklaşımın her adımında, seçilen değere karşı gelen yük parametresi hesaplanır. Böylece, seçilen büyüklüğe ait yük parametresi elde edilmiş olur.

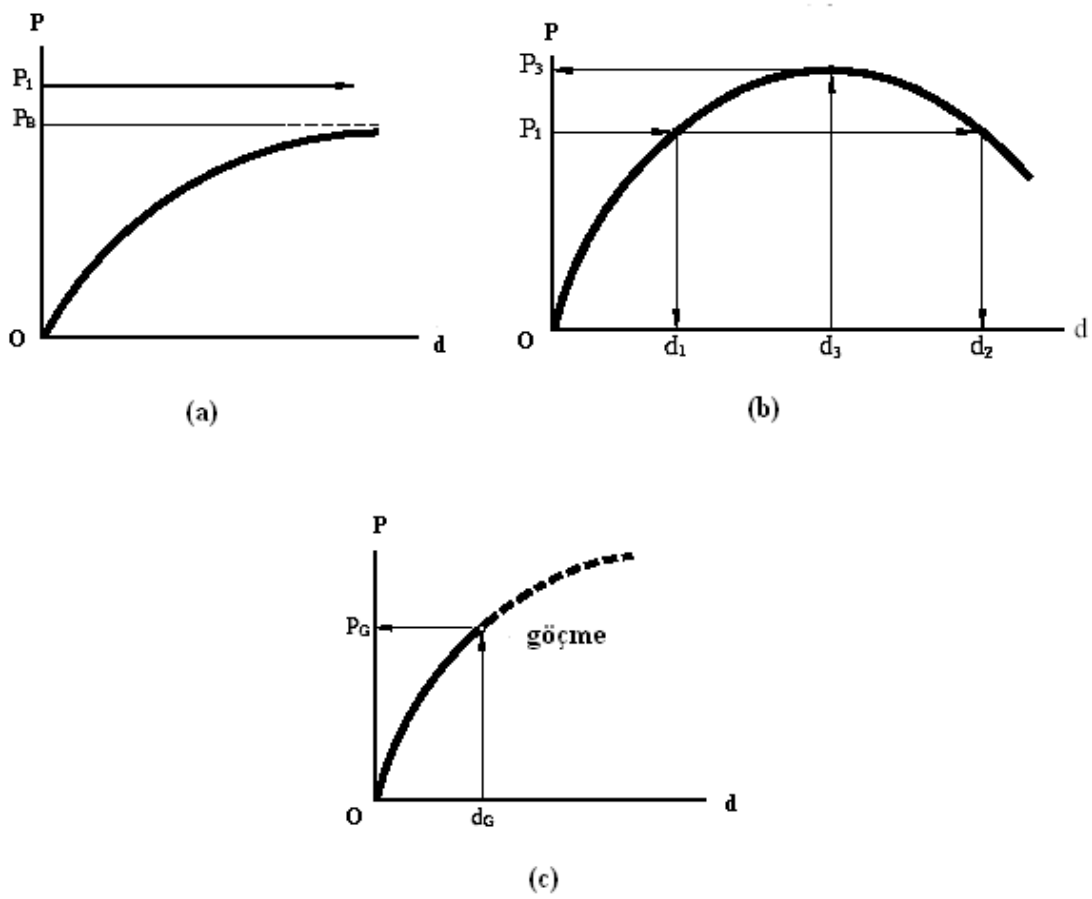
İki analiz türü arasındaki farklılıklar, onlara ait özellikler belirtilerek aşağıda açıklanmıştır.

1. Tek serbestlik dereceli sistemlerde, seçilen herhangi bir büyüklük sistemin iç kuvvet, şekil değiştirme ve yerdeğiştirme durumunu tanımlamak için yeterli olduğundan, yerdeğiştirme kontrollü analiz sonucu kesindir, yani tek adımda sonuca ulaşılmış olur. Çok serbestlik dereceli sistemlerde ise, ardışık yaklaşımın birinci adımında elde edilen çözüm artan yükler altında sistemdeki büyüklüklerin aralarındaki oran sabit kalacak şekilde değişeceği varsayımı ile problemin yaklaşık çözümünü vermektedir. Diğer adımlarda bu varsayımın etkisinin ortadan kaldırılacağı düşünülürse, kesin çözüme kolaylıkla ulaşılacağı söylenebilir.

2. Sistemin taşıma gücünü aşan yük parametreleri için, kuvvet kontrollü analiz sonuç vermemektedir. Buna karşın, yerdeğiştirme kontrollü analizde seçilen her yer değiştirme değeri için aranan çözüm bulunabilmektedir, Şekil 2.5a.

3. (P-d) eğrisi bir maksimum değerden geçen sistemlerde, seçilen tek yük parametresine için birden fazla yer değiştirme karşı geldiği halde, her yerdeğiştirme değeri için tek bir yük parametresi elde edilmektedir. Bu özellik dikkate alınacak olursa, yer değiştirme kontrollü analiz ile elde edilen çözümlerin, limit yükün bulunması için daha kesin niteliğe sahip olduğu görülmektedir, Şekil 2.5b.

4. Göçmenin kırılma (bir kesitteki iç kuvvetin bir sınır değere ulaşması), büyük yer değiştirmeler veya büyük plastik şekil değiştirmeler nedeniyle meydana gelmesi halinde, söz konusu kritik büyüklüğün seçilen sınır değeri için hesap yapmak suretiyle, göçme yükü doğrudan doğruya elde edilebilmektedir, Şekil 2.5c.



Şekil 2.5 Kuvvet ve Yer Değiştirme Kontrollu Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması

2.5 Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Çözümünde Yapılan Varsayımlar ve Bu Varsayımlar Altında Limit Yükün Hesabı

2.5.1 Yapı Sistemlerinde Yapılan Varsayımlar

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analizinde, dış etkiler altında zorlanan sistemi oluşturan elemanlarda, elastik ötesi şekil değiştirmelerin meydana geldiği, geometri değişimlerinin sistemin denge denklemlerine ve bazı durumlarda geometrik uygunluk koşullarına etkilerinin terk edilemediği bilinmektedir. Ayrıca, malzeme bakımından lineer olmayan sistemlerde, elastik ötesi şekil değiştirmelerin sistemde ne şekilde var olduğunun belirlenmesi de önemlidir. Elastik ötesi şekil değiştirmelerin sistem üzerinde yayılı olması veya belirli noktalarda toplanması gibi iki varsayım yapılmaktadır.

2.5.1.1 Doğrusal Olmayan Şekil Değiştirmelerin Yayılı Olması Hali

Bu varsayımda, doğrusal olmayan (elastik ötesi) şekil değiştirmelerin sistemin üzerinde yayılı olduğu varsayılır. Yapı sistemleri için yapılan bu genel varsayım, doğrusal olmayan bünye denklemlerinin elemanın tümü için geçerli olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, daha önce Bölüm 2.4 de açıklanan sayısal çözüm yöntemlerinin (ardışık yaklaşım ve yük artım yöntemleri) biri kullanılarak sistemin hesaplanması gerekir. Ancak, bu durumda bilinmeyen sayısının çok ve kurulan denklem takımının çözümünün çok zahmetli olması, hesapların uzamasına neden olmakta ve bu nedenle, daha pratik bir varsayımın geliştirilmesine gerek duyulmaktadır.

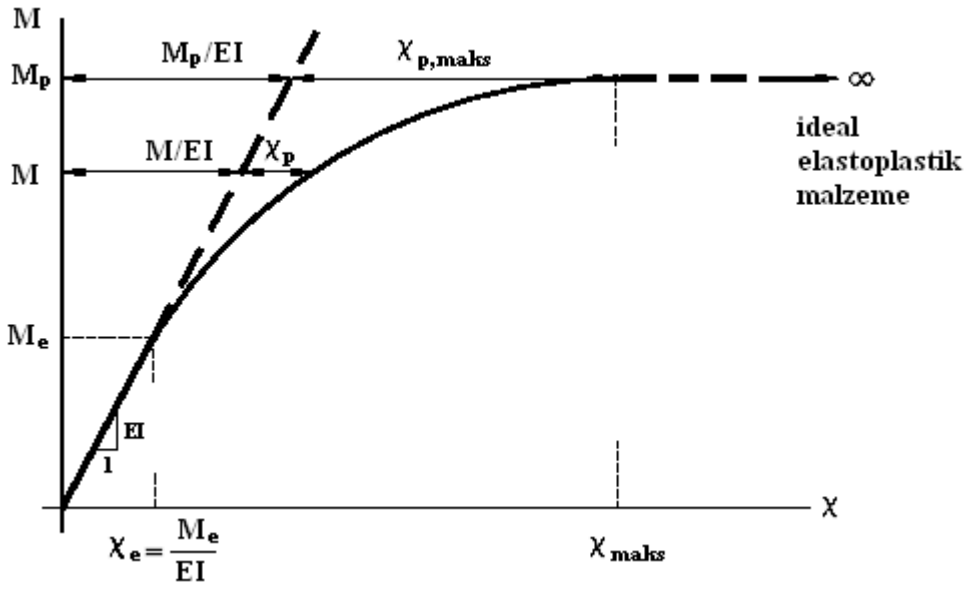
2.5.1.2 Doğrusal Olmayan Şekil Değiştirmelerin Yayılı Olmaması Hali

Malzeme bakımından doğrusal olmayan sünek yapı sistemlerinde, elastik ötesi şekil değiştirmelerin plastik mafsal (plastik kesit) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı kabul edilir. Böylece, doğrusal olmayan bünye denklemlerinin tüm sistem için kullanılması zorunluluğu ortadan kaldırılmış ve çözümün elde edilmesi daha pratik ve hızlı bir biçimde sağlanmış olur.

2.5.2 Plastik Mafsal Varsayımı

Yeterli düzeyde sünek davranış gösteren sistemlerde (çelik veya betonarme), plastik mafsal varsayımı yapılarak sistem hesapları önemli ölçüde kısaltılabilir. Toplam şekil değiştirmelerin doğrusal şekil değiştirmelere oranı olarak bilinen süneklik oranının büyük olduğu ve elastik ötesi şekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan eğilme şekil değiştirmelerinin plastik mafsal adı verilen kesitlerde toplandığı, bunun dışında kalan bölgelerin ise doğrusal-elastik davrandığı kabul edilebilir. Bu varsayıma, *Plastik Mafsal Varsayımı* adı verilir.

Gerçek eğilme momenti-eğrilik bağıntısı Şekil 2.6 da verilen bir düzlem çubuk elemanın bir bölgesine ait eğilme momenti diyagramı, toplam eğilme şekil değiştirmeleri ve doğrusal olmayan şekil değiştirmeler Şekil 2.7 de gösterilmiştir.

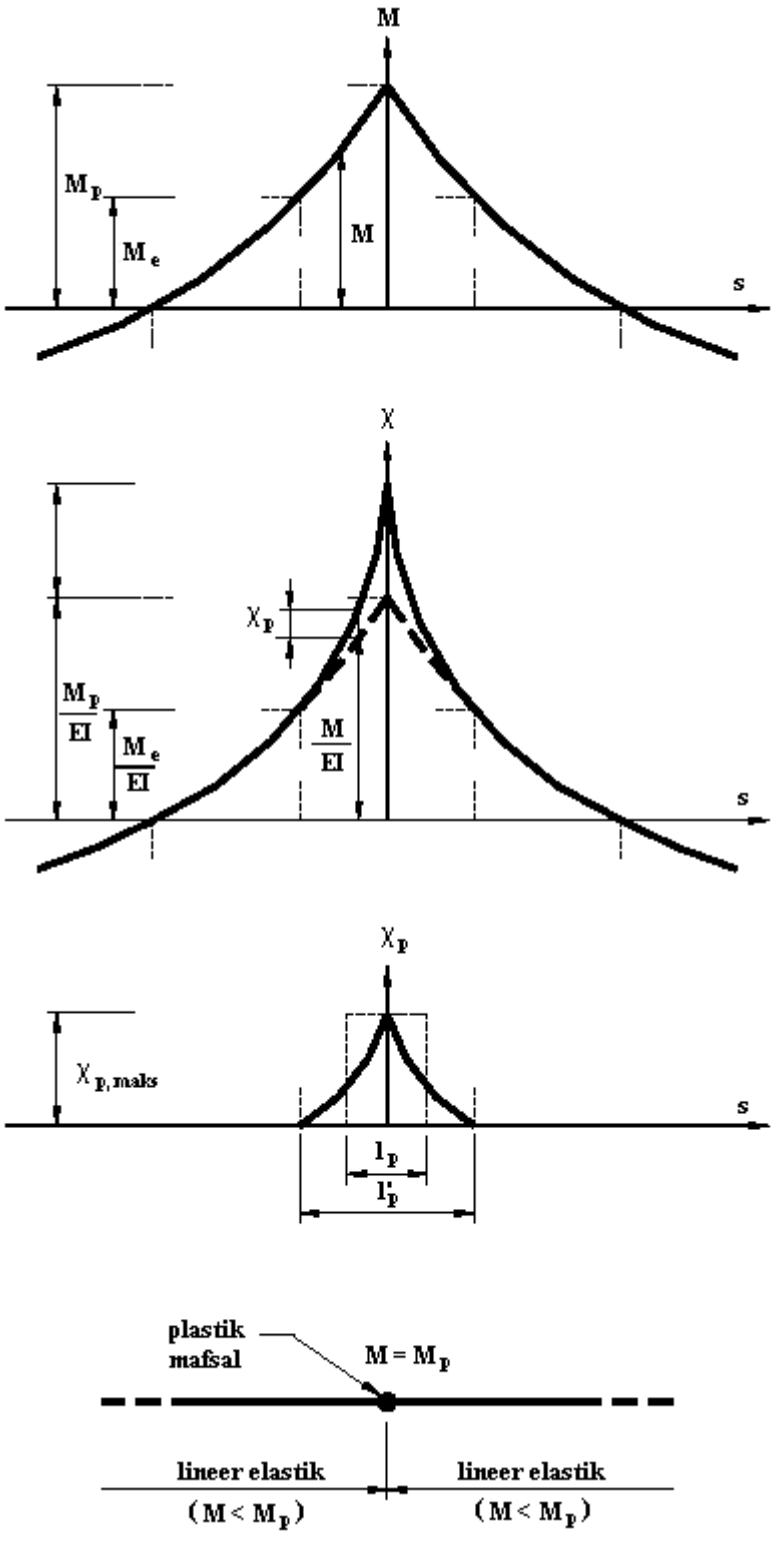


Şekil 2.6 Eğilme Moment-Eğrilik Bağıntısı

Plastik mafsal varsayımında, çubuk üzerindeki (l_p') uzunluğundaki bir bölgede sürekli olarak yayılmış olan elastik ötesi (plastik) şekil değiştirmelerin Denklem (2.2) uyarınca

$$\varphi_p = \int_{l_p'} \chi_p ds \tag{2.2}$$

şeklinde, plastik mafsal olarak tanımlanan bir noktada toplandığı varsayılmaktadır. Burada φ_p, plastik mafsalın dönme miktarını temsil etmektedir.



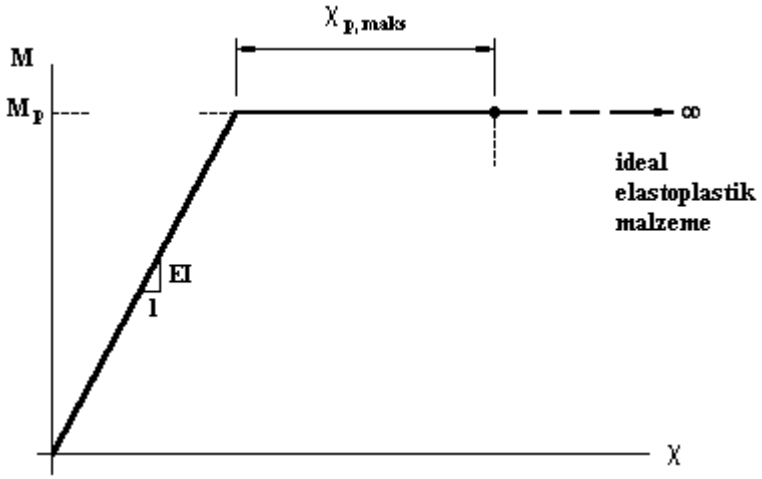
Şekil 2.7 Plastik Mafsal Bölgesi

Plastik mafsal varsayımın uygulanması, Şekil 2.8 de gösterildiği gibi, gerçek eğilme momenti-eğrilik bağıntısının iki doğru parçasından oluşacak şekilde idealleştirilmesi

anlamına gelir. Bu durum ile ilgili olarak Denklem (2.3) ve (2.4) te verilen bağıntılar geçerlidir.

$$M \leq M_p \text{ için } \chi = \frac{M}{EI} \tag{2.3}$$

$$M = M_p \text{ için } \chi \rightarrow \chi_{p,maks} \tag{2.4}$$



Şekil 2.8 İdealleştirilmiş (M-χ) Bağıntısı

Artan dış yükler altında, plastik mafsalın dönmesi artarak dönme kapasitesi adı verilen bir sınır değere ulaşınca, meydana gelen büyük plastik şekil değiştirmeler nedeniyle kesit kullanılmaz hale gelir. Yapının belirli sayıdaki kesitindeki plastik mafsal dönmelerinin dönme kapasitelerine ulaşmasıyla da yapı işletme dışı olur, yani yapıda göçme meydana gelir.

Bir kesitteki plastik mafsalın dönme kapasitesi

$$\text{maks}\varphi_p = \int_{l_p'} \chi_p ds \qquad (\chi \rightarrow \chi_{p,maks}) \tag{2.5}$$

şeklinde, eğilme momenti diyagramının şekline ve (M-χ) bağıntısına bağlı olarak belirlenir.

Denklem (2.5) den yola çıkarak, plastik dönme kapasitesinin yaklaşık değeri

$$\text{maks}\varphi_p = l_p \, \chi_{p,maks} \quad (2.6)$$

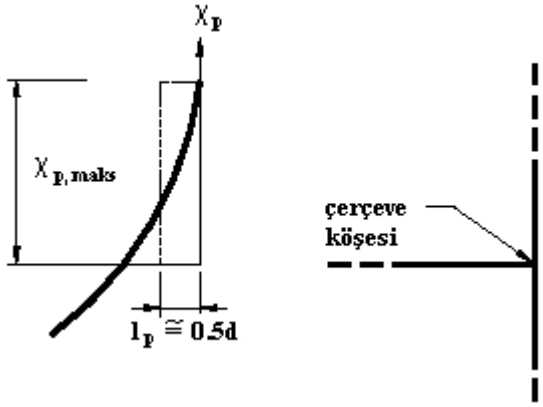
$$l_p \cong 0.5d \quad (2.7)$$

formülü ile hesaplanır. Burada

d = kesit yüksekliği

l_p = plastik mafsal bölgesinin boyu

olarak tanımlanır, Şekil 2.9.



Şekil 2.9 Plastik Mafsal Boyu

Plastik mafsal varsayımının esasları aşağıda sıralanmıştır.

1. Bir kesitteki eğilme momenti değeri, M_p plastik moment değerine eşit olunca, o kesitte bir plastik mafsal oluşur. Daha sonra kesitteki eğilme momenti ($M=M_p$) sabit olarak kalır ve plastik mafsal dönmeye devam eder. Kesitteki plastik dönme miktarı φ_p, dönme kapasitesine ($\text{maks}\varphi_p$) eriştiği anda kesit kullanılmaz hale gelir, yani göçer.

2. Plastik kesitler arasında kalan diğer kesitler doğrusal elastik olarak davranırlar.

3. Kesite eğilme momenti ile birlikte normal kuvvet de etkirse, M_p plastik momenti yerine kesitteki akma koşulunu dikkate alan indirgenmiş plastik moment değeri (M_p') kullanılır. Akma koşulu, bir kesitin taşıma gücü sınır durumunu ifade eder. Buna göre, kesitteki iç kuvvetler artarak belirli bir sınır duruma erişince kesitte akma meydana gelir. Örneğin, güçlü ekseni etrafında eğilen I profilleri için

verilen idealleştirilmiş akma koşulu bağıntısı Denklem (2.8a) ve (2.8b) da gösterilmiştir.

$$|M| - |Mp| = 0 \text{ ..... eğer } |N| < 0.15\ N_p \qquad (2.8a)$$

$$|M| + \frac{M_p}{0.85\ N_p} N_p - \frac{M_p}{0,85} = 0 \text{..... eğer } |N| > 0.15\ N_p \qquad (2.8b)$$

2.5.3 Yük Artım Yöntemi Kullanılarak, Düzlem Çubuk Sistemlerin Plastik Mafsal Varsayımına Göre Hesabı

Artan yükler altında bir plastik mafsalın oluşumundan sonra, o noktaya bir adi mafsal koymak ve M_p plastik momentini dış yük olarak etkitmek suretiyle elde edilen sistem, her adımda doğrusal elastik kurama göre çözülür. Her adımda doğrusal hesap yapılan sistemin çözümü için Kuvvet veya Yer Değiştirme yöntemlerinden biri kullanılabilir. Ancak, aynı sistemin hem malzeme hem de geometri değişimleri bakımından doğrusal olmaması durumunda, her adımda ikinci mertebe etkilerinden dolayı doğrusal olmayan hesap yapılması gerekir.

Sistemde belirli sayıda plastik mafsalın oluşumu ile birlikte bölgesel veya toptan mekanizma durumu meydana gelir ve yapı sisteminin taşıma kapasitesi sona erer. Sistemi yük taşıyamaz duruma getiren yük parametresine birinci mertebe limit yükü (P_{L1}) adı verilir. Limit yük değeri, malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerde dış yük parametresinin en büyük değeri iken, her iki bakımdan doğrusal olmayan sistemlerde durum farklıdır. Bu tür sistemlerde, plastik mafsal oluşumları ile birlikte sistemin rijitliğinde belirgin bir azalma meydana gelir ve bunun sonucunda, sistemin burkulma yükü dış yük parametresinin altına düşer. Diğer bir değişle, (P-d) bağıntısında artan yer değiştirmelere azalan yük parametresi karşı gelir. Sistemin stabilite yetersizliği nedeniyle taşıma gücünü yitirdiği bu duruma burkulma, burkulmaya karşı gelen yük parametresine de ikinci mertebe limit yükü (P_{L2}) adı verilir.

Bazı hallerde, plastik mafsal oluşan kesitlerde dönme kapasitelerinin aşılması, büyük yer değiştirmelerin oluşması veya betonarme yapılarda büyük çatlakların meydana gelmesi nedeniyle sistem yük taşıyamaz hale gelir ve göçer. Birinci ve/veya ikinci

mertebe limit yükten önce ulaşılan bu yüke göçme yükü (P_G) adı verilir. Limit yüklerin veya göçme yükünün bulunmasının ardından sistemin güvenle taşıyabileceği yük (işletme yükü) değeri

$$P_i = \frac{P_G}{e} \text{ veya } \frac{P_{L1}}{e} \text{ veya } \frac{P_{L2}}{e} \tag{2.9}$$

olarak bulunur. Burada e, güvenlik katsayısıdır. İşletme yükleri altında yapıda doğrusal-elastik sınırın aşılmaması, zararlı yer değiştirmelerin önlenmesi ve çatlak v.b. gibi olumsuz etkilerin oluşmaması istenir.

Bir yapı sisteminin artan yükler altındaki hesabı iki şekilde yapılabilir.

1. Yapıya etkiyen düşey ve yatay dış yükler, aralarındaki oran sabit kalacak biçimde arttırılır ve bu yükler için ortak bir göçme yükü belirlenir.

2. Yapıdaki düşey yükler, sistem için öngörülen belirli bir güvenlik katsayısı ile arttırılır ve bu arttırılmış düşey yükler sabit kalacak şekilde, yapıdaki yatay yükler arttırılarak sistemin yatay yük taşıma kapasitesi belirlenir.

Yapı sistemlerini zorlayan yükler, büyük oranda sabit öz ağırlık yükleridir. Yatay yükler ise, rüzgar ve deprem gibi, sürekli değişkenlik gösteren yüklerdir. Bu durum göz önüne alındığında, ikinci yolun daha doğru ve gerçekçi sonuçlar vereceği söylenebilir.

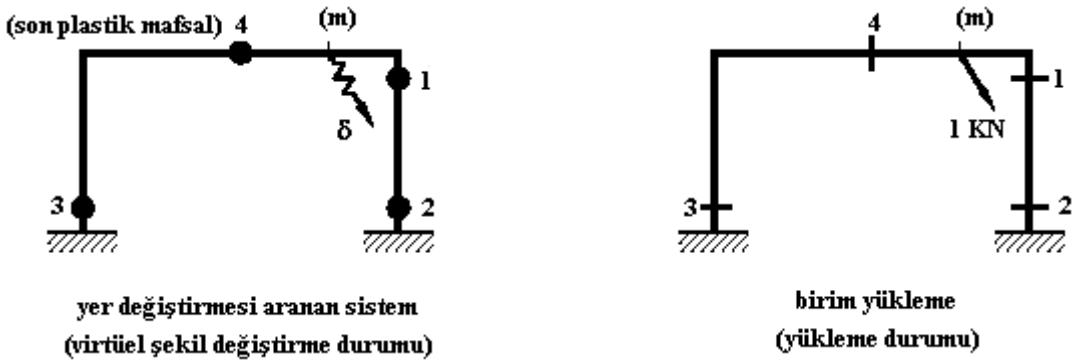
Bazı kesitlerde eğilme momentinin yanında normal kuvvet de bulunabilir. Bu kesitlerde, plastik eğilme momentinin akma koşulları uyarınca indirgenmiş (M_p') değeri dikkate alınmalıdır. Yapı sisteminin göçme yükünün bulunması için yapılan hesaplamaların başlangıcında, elemanlardaki normal kuvvetin bilinmemesi halinde, bir ardışık yaklaşım yolu uygulanmalıdır.

2.5.4 Sistemdeki Yer Değiştirmelerin ve Plastikleşen Kesitlerdeki Plastik Şekil Değiştirmelerin Bulunması

Sistemdeki yer değiştirmelerin ve plastik mafsallardaki dönme miktarlarının bulunması için virtüel iş teoreminden yararlanılır. Virtüel iş teoremi uyarınca, denge

konumundaki sistemde, dış kuvvetlerin yaptığı işin iç kuvvetlerin yaptığı işe eşit olması gerekir. Bu teorem, enerjinin korunumu ilkesine dayanmaktadır.

Virtüel iş teoremi ile yer değiştirme hesabında, yer değiştirmesi aranan sistem virtüel şekil değiştirme durumu, yer değiştirmesi aranan noktaya aranan yer değiştirme doğrultusunda yapılan yükleme ise birim yükleme durumu olarak alınır. Şekil 2.17 de bu iki durum gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Yerdeğiştirmelerin Hesabı

Tablo 2.2 de virtüel şekil değiştirme ve yükleme durumlarına ait kesit zorları ve şekil değiştirmeler verilmiştir. Buna göre, virtüel iş teoremi uygulanırsa

$$\sum 1.\delta = \int \frac{MiMds}{EI} + \int \frac{NiNds}{EF} + \int \frac{TiTds}{GF'} + \int Mi\,\varphi i \qquad (2.10)$$

eşitliği elde edilir. Burada, eşitliğin sağındaki terimler iç kuvvetlerin, solundaki terimler ise dış kuvvetlerin yaptığı işi göstermektedir. Kısaltma teoremi uyarınca, son plastik mafsalın dışındaki plastik mafsallara adi mafsallar konularak elde edilen sisteme, yer değiştirmesi aranan doğrultuda birim yükleme yapılırsa

$$M_1\varphi_1 = M_2\varphi_2 = M_3\varphi_3 = ... = 0, (M_1 = M_2 = M_3 = ... = 0) \qquad (2.11)$$

olacağından, δ yerdeğiştirmesinin değeri Denklem (2.10a) ile bulunur.

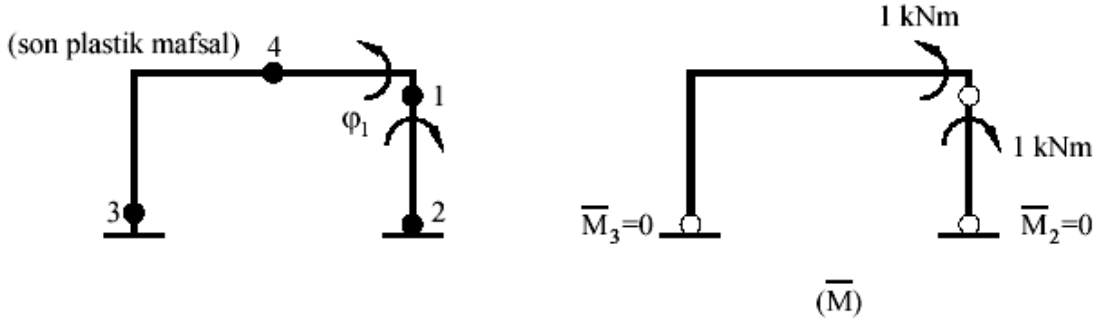
$$\delta = \int \frac{MiMds}{EI} + \int \frac{NiNds}{EF} + \int \frac{TiTds}{GF'} \qquad (2.10a)$$

Denklem (2.10a) ya göre, δ yer değiştirmesinin değeri kısaltma teoremi aracılığı ile plastik mafsal dönmelerinden bağımsız olarak hesaplanabilir.

Tablo 2.2 Virtüel İş Teoremi Tanım Tablosu

	Virtüel Şekil Değiştirme Durumu (Hiperstatik sistem)	Yükleme Durumu (İzostatik Esas Sistem)
Kesit Zorları	M, N, T	M_i , N_i , T_i
Şekil Değiştirmeler	$\frac{\Delta\varphi}{\Delta s} = \frac{M}{EI} + \frac{\varepsilon\Delta t}{d}$	
	$\frac{\Delta ds}{ds} = \frac{N}{EF} + \varepsilon t$	
	$\frac{\Delta V}{ds} = \frac{T}{GF'}$	

Plastik mafsallara ait dönme değerleri de aynı şekilde bulunabilir. Bu durumda, plastik dönme miktarı, dönmesi aranan plastik mafsala birim moment çifti etkitilip virtüel iş teoremi uygulanarak elde edilebilir, Şekil 2.11. Yük artımı yönteminin önceki adımlarında da, plastik dönme ve yer değiştirme miktarları hesaplanarak kontrol edilebilir. Ancak, bu adımlardaki sistemler hiperstatik olacağından dolayı ek kesimler yapılarak izostatik hale getirilir ve birim yükleme izostatik sisteme yapılır.



Şekil 2.11 Plastik Mafsal Dönmelerinin Hesabı

Plastikleşen kesitlerdeki plastik şekil değiştirme miktarlarının bulunması için kullanılan bir diğer yöntem ise çubuk denge denklemlerinin yazılmasına dayanır, Şekil 2.12. Deplasman yöntemlerinden bilindiği gibi, i ve j düğüm noktalarını birleştiren bir çubuğun uzama şekil değiştirmeleri terk edilerek elde edilen genel haldeki moment denge denklemi Denklem (2.12a) ve (2.12b) de verilmektedir.

$$M_{ij} = \mu_{ij} + \theta_i \, m_{i\theta i}^{ij} + \theta_j \, m_{i\theta j}^{ij} + \delta_{ij} \, m_{i\delta ij}^{ij} + \theta_k \, m_{i\theta k}^{ij} + \theta_l \, m_{i\theta l}^{ij} \quad (2.12a)$$

$$M_{ji} = \mu_{ji} + \theta_j \, m_{j\theta j}^{ji} + \theta_i \, m_{j\theta i}^{ji} + \delta_{ji} \, m_{j\delta ji}^{ji} + \theta_l \, m_{j\theta l}^{ji} + \theta_k \, m_{j\theta k}^{ji} \quad (2.12b)$$

Burada

M_{ij}, M_{ji} = sırasıyla, çubuğun i ve j ucunda pozitif yön varsayımı ile elde edilen uç momentleri

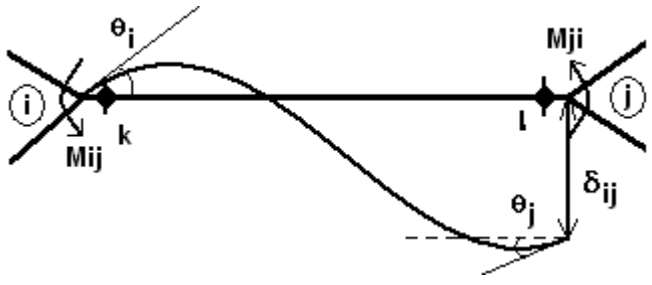
μ_{ij}, μ_{ji} = sırasıyla, çubuğun i ve j ucunda dış yükten dolayı oluşan ankastrelik momentleri

θ_i, ϑ_j = sırasıyla, çubuğun i ve j uçlarındaki dönme miktarları

θ_k, ϑ_l = sırasıyla, k ve l kesitlerindeki plastik dönme miktarları

δ_{ij}, δ_{ji} = bir ucun diğerine göre yaptığı, çubuk eksenine dik doğrultudaki yer değiştirme

olarak bilinmektedir. Denklem takımının son iki terimi, plastik kesitlerdeki plastik mafsal dönmelerini temsil etmektedir. Doğrusal olmayan statik hesabı yapılan bir sistemin i-j çubuğuna ait uç momentleri ve uç yer değiştirmeleri her adım sonunda bilinmektedir. (2.12) denklemlerinin bilinmeyenleri ise θ_k ve θ_l plastik mafsal dönmeleridir. İki bilinmeyenli iki denklemin çözümü ile birlikte bilinmeyenler elde edilir. k veya l kesitlerinden herhangi birinde, ilk plastik mafsal oluşumundan önce ve hemen sonra plastik mafsal dönmelerinin değeri sıfır olarak bulunur. Kesitin plastikleşip dönmeye başlaması ile birlikte bu kesitler serbestçe döner ve en büyük dönme kapasitesi değerine kadar hareketine devam eder.



Şekil 2.12 Çubuk Uç Momentleri ve Uç Yer Değiştirmeleri

3. YAPISAL SİSMİK KONTROL SİSTEMLERİ

3.1 Giriş

Binalar ve diğer inşaat mühendisliği yapıları yer çekimi kuvvetlerinden oluşan düşey yüklerin etkisindedirler. Bu yükler, yapının kendi ağırlığının ve taşımakla görevli olduğu hareketli yüklerin bir birleşimidir ve yapı sistemleri, ömürleri boyunca düşey yüklere karşı yeterli bir dayanıma sahip olacak şekilde boyutlandırılırlar. Düşey yüklerin zamana bağlı olan değişimleri genellikle terk edilerek yapı sisteminin analizinde statik idealleştirmeler yapılır. Böylece, düşey yükler altındaki çözümde önemli kolaylıklar sağlanmış olur.

Düşey yüklerin yanında, atalet kuvvetlerinden ve rüzgar gibi etkilerden oluşan yatay kuvvetler de yapının tasarımında hesaba katılmaktadır. Düşey yükler için öngörülen statik idealleştirmeler çok kere yatay yüklere de benzer şekilde uygulanarak, bu yükler için de analizin basitleştirilmesi amaçlanır. Bu yaklaşım ile hem düşey yükler hem de yatay yükler altında yapı sistemlerinin çözümü basit ve hızlı olarak gerçekleştirilebilir.

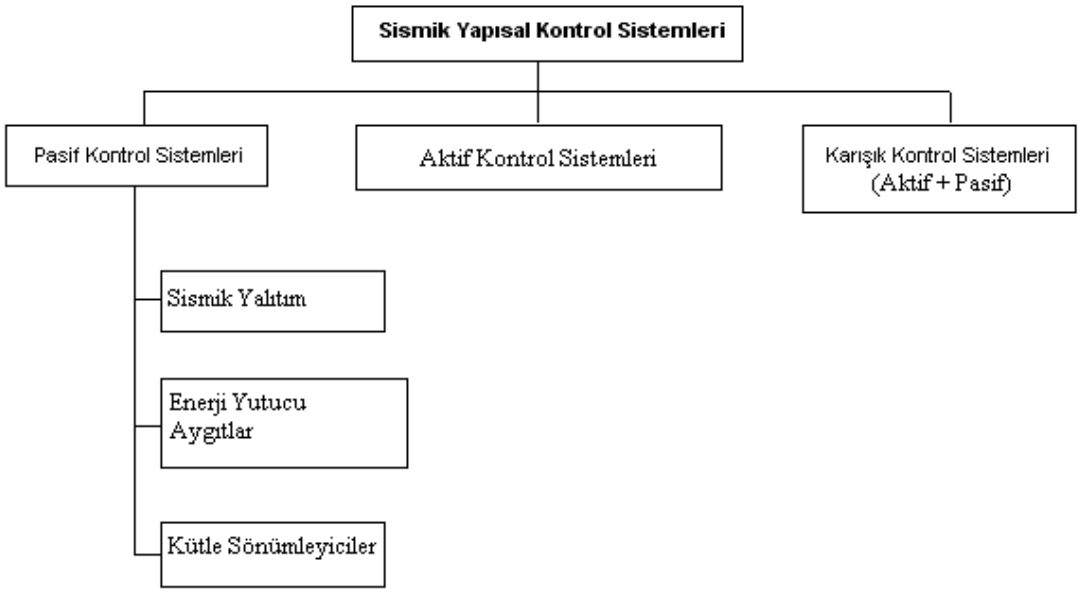
Bununla beraber, yatay yüklerin ve özellikle deprem etkilerinin dinamik karakterlerinin de incelenmesi gerekir. Uzun zamanlar, binaların deprem gibi dinamik etkilere karşı korunması için eşdeğer yatay yüklerin esas alındığı geleneksel tasarım yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, deprem etkilerinin karşılanması için rijit sistemlere gerek duyulmuş, sistemlerin rijitleştirilmesi nedeniyle doğal titreşim periyotları kısalmıştır. Bunun sonucu olarak, yapı sistemleri daha büyük dinamik kuvvetler altında zorlanmıştır.

Bu hususlar göz önünde tutularak, artan dinamik etkilerden yapıların korunması amacıyla, birçok yenilikçi yaklaşım ileri sürülmüştür. Bu yaklaşımların temelinde, yapının dinamik etkilere olan tepkisini kontrol etmek amacıyla yapı sistemine dahil

edilen dış unsurlar yatmaktadır. Bu tür kavramlardan yararlanarak yapıların davranışının kontrol edilmesini ve dinamik kuvvetlerin azaltılmasını hedefleyen yapı mühendisliği dalına *yapısal kontrol* adı verilir.

Şekil 3.1 de, yapısal kontrol amacıyla geliştirilen koruyucu sistemler sınıflandırılmıştır. Bu sistemler üç ana başlık altında toplanabilirler.

1. Pasif kontrol sistemleri
2. Aktif kontrol sistemleri
3. Karışık (hibrid) kontrol sistemleri



Şekil 3.1 Sismik Yapısal Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması

3.2 Pasif Kontrol Sistemleri

Bu yaklaşım, pasif araçların, hareketi kontrol edilen yapının sönüm ve rijitlik gibi dinamik parametrelerinin değiştirilmesi ve dinamik hareketlere karşı olan tepkisinin azaltılması için yapıya dahil edilmesini içerir.

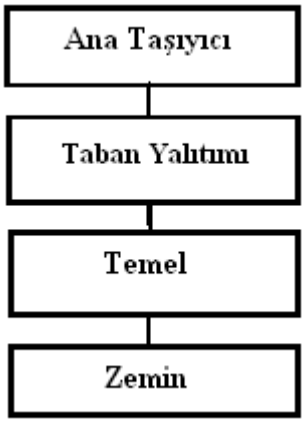
Pasif kontrol sistemleri yüzeysel olarak üç alt gruba ayrılırlar.

1. Sismik taban yalıtımı (*base isolation*).
2. Enerji yutucu aygıtlar (e*nergy dissipation devices*).
3. Kütle sönümleyiciler (m*ass dampers*).

3.2.1 Sismik Taban Yalıtımı

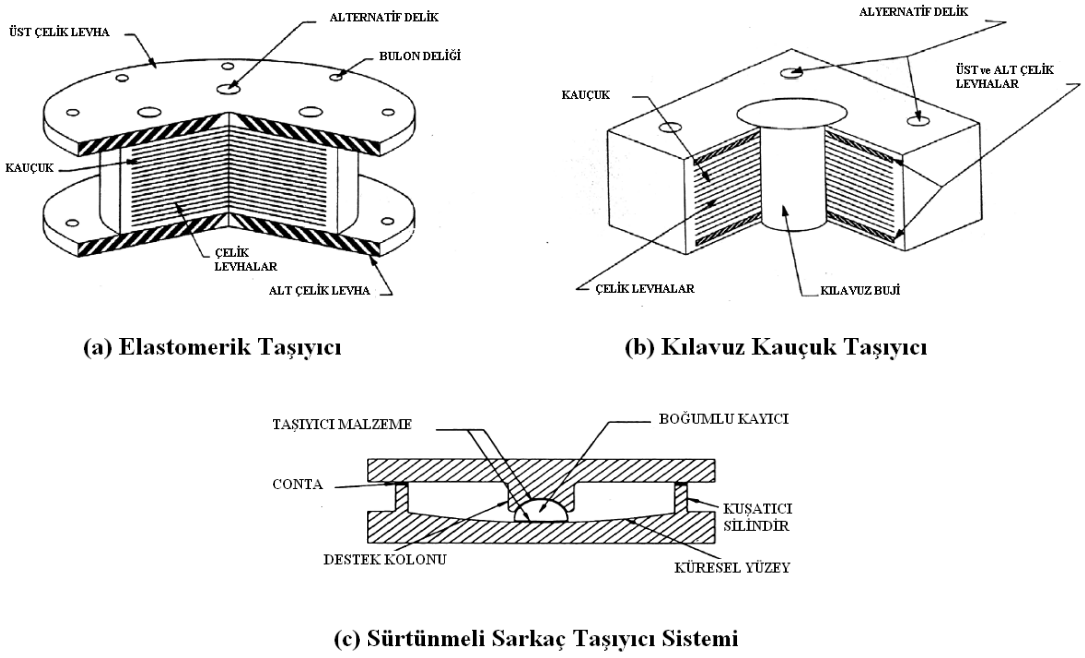
Sismik taban yalıtımı, genel olarak binalar ve köprüler için düşünülen, düşeyde çok rijit olan ve yatayda süneklik sağlayan araçlardan oluşmaktadır. Yalıtım sistemi, genel olarak binalarda, ana taşıyıcılar ile bina temeli arasına veya köprülerde, köprü ayakları ile köprü tabliyesi arasına yerleştirilir. Yalıtım sistemleri, yatayda göreceli olarak elastik davranırlar ve uygulandığı yapıda sünekliği ve yatay stabiliteyi (dengeyi) arttırırlar. Bu şekilde donatılmış bir yapıda, yalıtımı sağlayan araçlar yapıya yeni titreşim modları ekler, yapının birinci titreşim periyodunu uzatır ve bu periyodu ana periyottan ayırır. Bu yeni mod, önemli ara kat ötelemelerini temsil eden modları içermez ve modal katılım çarpanı çok yüksektir.

Sismik yalıtımın ana amacı, yatayda göreceli olarak elastik olan temelleri kullanarak, zeminin ivmelenme etkisinden yapıyı ayırmak ve onun hareketini üst yapıdan bağımsız kılmaktır. Yalıtım sistemleri, girdi enerjisinin bir kısmını yapıya iletilmeden önce yutarlar. Böylece, üst yapının enerji yutma istemi azalır ve yapı elastik sınırlar içerisinde kalarak yapısal hasarlar minimuma indirgenir. Şekil 3.2 de sismik yalıtım sistemli bir yapının temel bileşenleri olan ana taşıyıcı (üst yapı), yalıtım sistemi, temeller (alt yapı) ve zemin gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Sismik Yalıtım Sistemli Bir Yapının Temel Bileşenleri

Şekil 3.3 de, yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bazı taban yalıtım sistemleri gösterilmektedir. Bunlar sırasıyla, Şekil 4.3a da elastomerik mesnet (*elastomeric bearing*), Şekil 4.3b de kurşun kılavuzlu kauçuk mesnet (*lead - rubber bearing*) ve Şekil 4.3c de sürtünmeli sarkaç (*friction pendulum*) yalıtım sistemleridir.



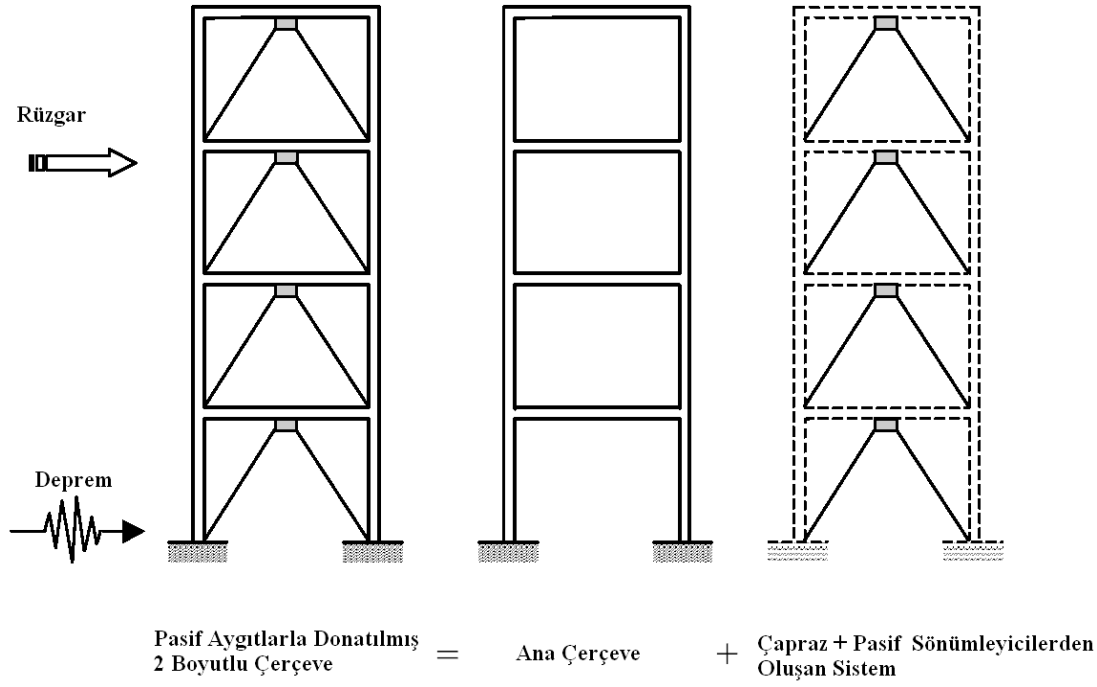
Şekil 3.3 Çeşitli Taban Yalıtım Sistemleri

3.2.2 Enerji Yutucu Aygıtlar

Bu elemanlar, binalara etkiyen girdi enerjisini yutması için ana taşıyıcı çerçeve ile çapraz sistemi arasına yerleştirilen göreceli olarak küçük aygıtları içerirler. Şekil 3.4 de iki adet birbirinden bağımsız alt sistem içeren bir yapı sistemi görülmektedir. Alt sistemler, ana çerçeveden ve yatay yük dayanım (çapraz ve enerji yutucular) sistemlerinden oluşmaktadır. Enerji yutucu aygıtların temel fonksiyonu, girdi enerjisinin büyük bir kısmını söndürmektir. Böylece, ana taşıyıcının enerji yutma istemi azalır ve yapısal hasarlar en aza iner.

Yapı sistemlerinde kullanılan başlıca üç tip enerji yutucu sistem bulunmaktadır.

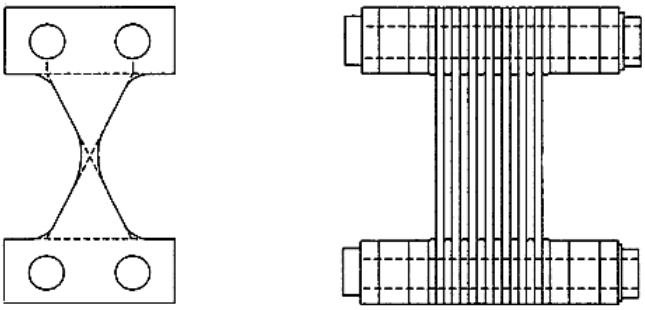
1. Metalik sönümleyiciler (metallic dampers).
2. Sürtünmeli sönümleyiciler (*friction dampers*).
3. Viskoz veya visko-elastik sönümleyiciler (*viscous or visco-elastic dampers*).



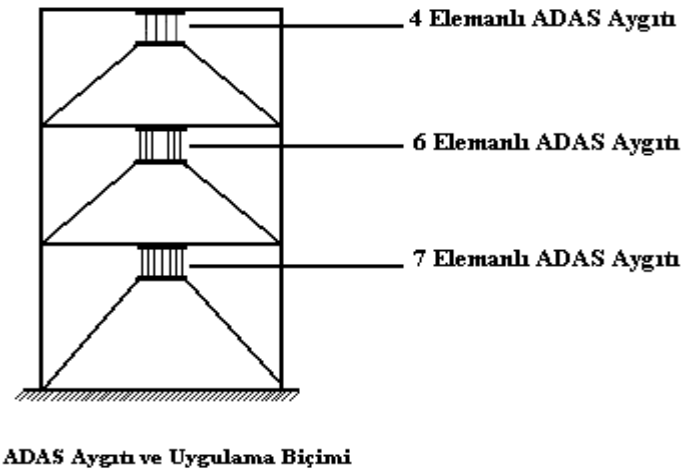
Şekil 3.4 Enerji Yutucu Aygıtlar ile Donatılmış Bir Yapı Sistemi

3.2.2.1 Metalik Sönümleyiciler

Bu aygıtlarda, girdi enerjisini söndürmek için, çevrimsel döngüyü güçlendiren yumuşak metal veya diğer metaller kullanılmaktadır. Plastik sınırlar içerisinde eğilmeye, kesmeye veya eksenel boy değişmesine çalışan farklı aygıtlar geliştirilmiştir. Örneğin, "Added Damping And Stiffness, (ADAS)" olarak bilinen aygıt, çapraz sistemi ile çerçeve arasına yerleştirilen çelik levhalardan oluşmaktadır, Şekil 3.5. Bu sistem, Şekil 3.6 da görüldüğü gibi üç katlı bir çerçevenin sarsma tablası deneyinde test edilmiş ve yapının rijitliğini, direncini ve enerji söndürme yeteneğini (sönümünü) arttırdığı görülmüştür.



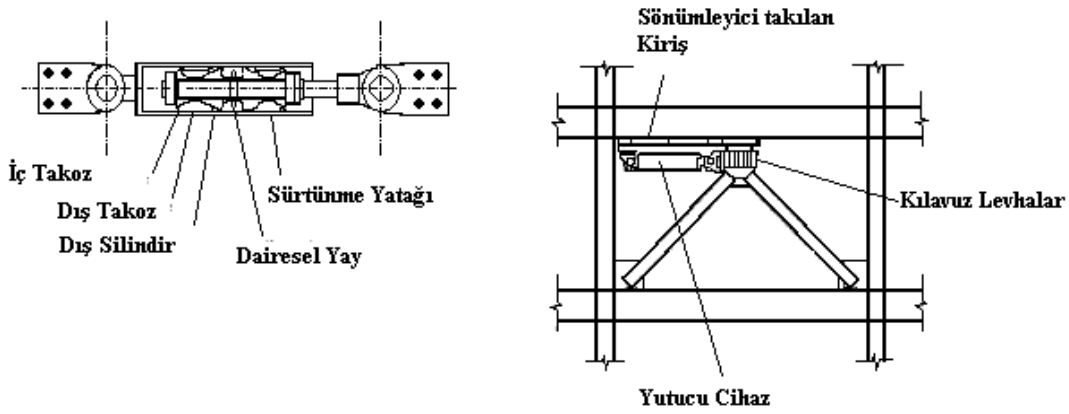
Şekil 3.5 Yedi Elemanlı ADAS Aygıtı



Şekil 3.6 Üç Katlı Çerçevede ADAS Aygıtının Uygulama Biçimi

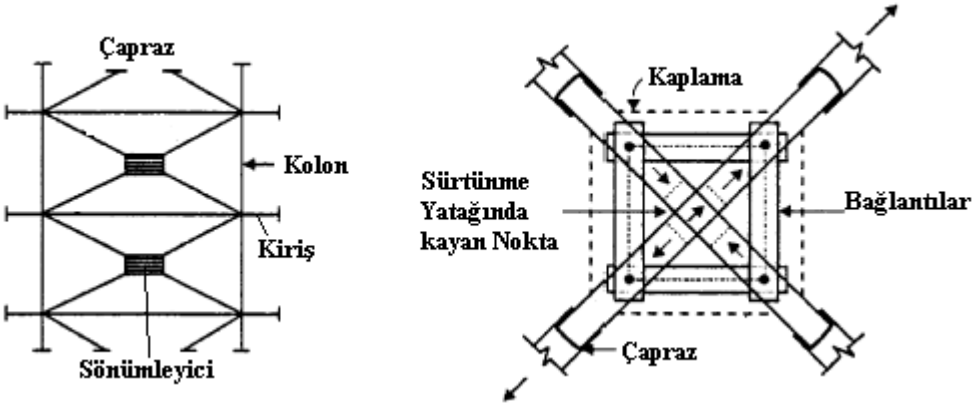
3.2.2.2 Sürtünmeli Enerji Yutucular

Bu aygıtlar, enerji sönümlenmesi için sürtünme kuvvetinden yararlanırlar. Şekil 3.7 de, Sumitomo sürtünmeli sönümleyiciye ilişkin bir örnek görülmektedir. Aygıt, silindirik çelik koruyucu kaplamanın iç yüzü boyunca kayan grafit emdirilmiş bakır alaşımlı sürtünme yataklarına sahiptir. Grafitin amacı, gürültüsüz bir hareket sağlamak, düzgün bir sürtünme katsayısı elde etmek ve temas yüzeyini yağlayarak sistemi kolay işler hale getirmektir. Bu şekilde oluşturulan bir mekanizmaya sahip olan sürtünmeli sönümleyici aygıt, çapraz ve çerçeve arasına yerleştirerek yatay yüklere karşı yapının enerji yutabilme yeteneğini sürtünme kuvveti aracılığı ile arttırmış olur.



Şekil 3.7 Sumitomo Sürtünmeli Sönümleyicisi ve Uygulama Biçimi

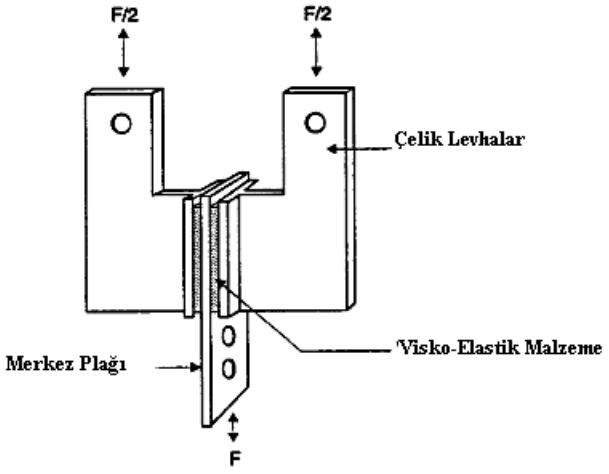
Şekil 3.8 de ise, X-Çaprazlı taşıyıcı sistemlere uygulanan bir sürtünmeli sönümleyici görülmektedir.



Şekil 3.8 X – Çaprazlı Sürtünmeli Sönümleyici ve Uygulama Biçimi

3.2.2.3 Viskoz veya Visko-Elastik Sönümleyiciler

Bu tür sönümleyiciler temel olarak, kayma şekil değiştirmelerine bağlı biçimde enerji sönümleyen camsı, kopolimer veya viskoz akışkan malzemelerden yapılmaktadırlar. Tipik bir visko-elastik sönümleyici Şekil 3.9 da gösterilmiştir. Bu sistemde, çelik levhalara bağlanan visko-elastik bir tabaka bulunmaktadır. Yapı sistemi dış kuvvetlere maruz kaldığında, merkez levhadaki eksenel kuvvet, visko-elastik malzemeler aracılığı ile dıştaki çelik levhalara aktarılır. Bu süreçte bir kısım girdi enerjisi yutularak sistemin efektif sönümü artar ve yer değiştirme istemi azalır. Böylece, sistemde meydana gelmesi muhtemel plastik şekil değiştirmeler önlenmiş olur.

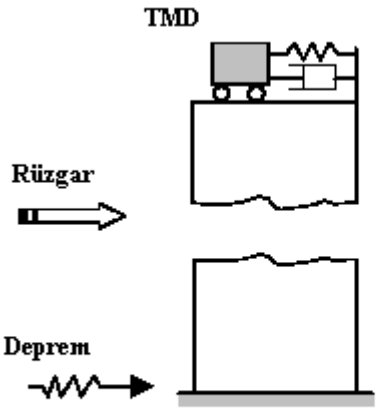


Şekil 3.9 Visko-Elastik Sönümleyici

3.2.3 Kütle Sönümleyiciler

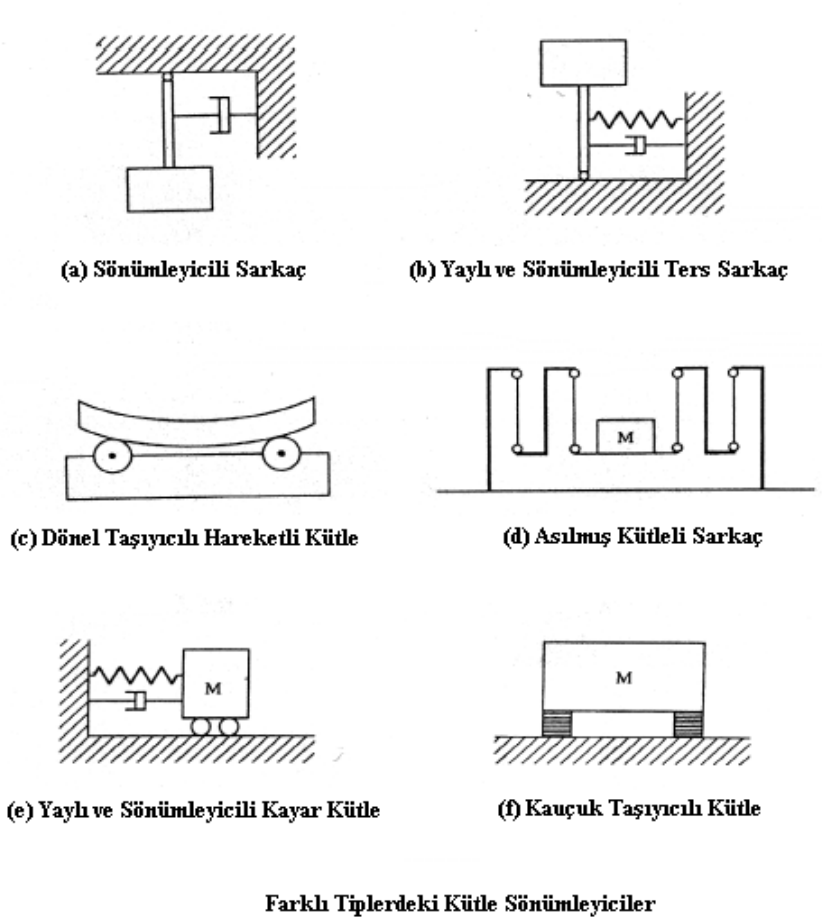
Kütle sönümleyiciler, ana taşıyıcıya elastik olarak bağlanan büyük elemanları içerirler. Bu bağlantı, yapı ve kütle sönümleyici arasındaki göreli harekete izin vermelidir. Böylece, büyük eylemsizlik kuvvetleri içeren yapıdaki dış kuvvetler kısmen iptal olur. Sistemin etkin çalışması için, eklenen kütlenin doğal periyodunun yapının temel periyoduna yakın olması gerekir. Bu özellik, uyumlu kütle sönümleyicilerin (*tuned mass dampers, TMD*) prensibidir. Bu elemanlar, yüksek ve narin yapıların yatay titreşimlerini azaltırlar.

Kütle sönümleyiciler daha çok, yapının birinci doğal periyodunu kontrol altına almak için, binaların en üst katına yerleştirilir. Çok katlı yapılarda birden fazla titreşim modunu kontrol altına almak için yapının belirli kat seviyelerine kütle sönümleyiciler yerleştirilebilir. Şekil 3.10 da, bina en üst katına yerleştirilerek yapının birinci doğal periyodunu kontrol etmeyi sağlayan uyumlu kütle sönümleyicili bir sistem gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, uyumlu kütle sönümleyicinin (TMD) serbest (çok büyük yatay ötelenmeler yaparak) hareket etmesini önlemek için bir yay sistemine ve gerekli sönümü sağlamak için bir sönümleyiciye gerek vardır.



Şekil 3.10 Uyumlu Kütle Sönümleyici

Şekil 3.11 de farklı tipteki kütle sönümleyiciler verilmiştir. Böylece, binanın gereksimine ve olanaklara bağlı olarak, uygun bir kütle sönümleyici kullanılabilmektedir.



Şekil 3.11 Farklı Tiplerdeki Kütle Sönümleyiciler

Yapılarda çeşitli pasif yapısal kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Ancak, pasif yapısal kontrol sistemlerinin olumlu ve olumsuz yanlarını göz ardı etmemek gerekir. Tablo 3.1 de, bu tür sistemler arasında, yapının ömrü boyunca istenen özelliklerine bağlı olarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Tablodaki koyu hücreler, istenen özelliğin sağlandığını göstermektedir.

Tablo 3.1 Pasif Kontrol Sistemleri Kullanılan Yapılardan İstenen Özellikler

İstenen Özellikler	Sismik İzolasyon Sistemi	Enerji Yutucular	Kütle Sönümleyiciler
Düşük İlk Maliyet			
Rüzgar Yüklerine Karşı Etkin Direnç			
Güvenilirlik			
Uzun Süreli Dayanım			
Düşük Bakım Maliyeti			
Düşük Yenileme Maliyeti			
Ciddi Depreme Karşı Etkin Olma			
Sünek Yapı ve Zeminle Kullanımda Etkinlik			

3.3 Aktif ve Yarı Aktif Yapısal Kontrol Sistemleri

Aktif ve yarı aktif yapısal kontrol sistemlerini değerlendirmek için bu sistemlerin pasif kontrol sistemleri ile arasındaki farkları belirlemek gerekir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

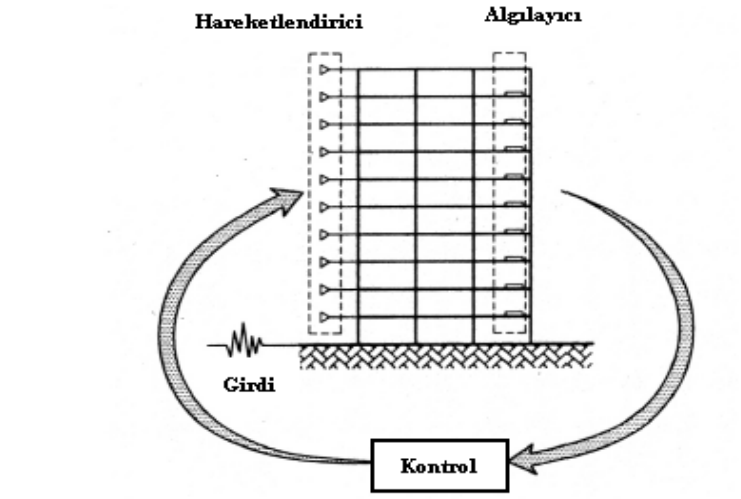
1. Pasif kontrol sistemlerindeki ölü aygıtların (taban yalıtımı, enerji yutucular veya kütle sönümleyiciler) aksine, aktif sistemler enerji kaynakları tarafından güçlendirilmiş hareketlendiriciler içerirler. Bu nedenle, girdi kuvvetlerine karşı yapıyı ters yönde hareketlendirebilirler.

2. Gerçek zaman diliminde yapının durumunu öğrenmek amacıyla, aktif sistemlere algılayıcılar (sensör) yerleştirilir.

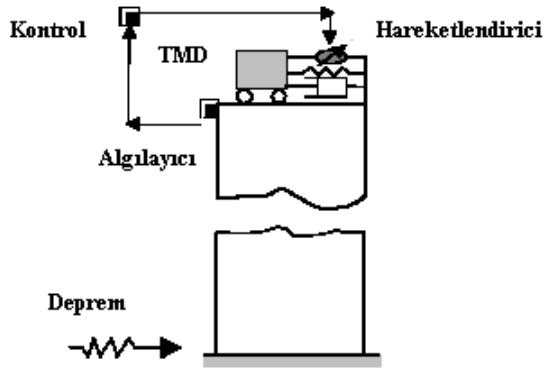
3. Algılayıcıların gönderdiği bilgileri bir kontrol mekanizması (bilgisayar vs) işleme sokar. Böylece, binanın tepkisini azaltarak, bina üzerinde düzgün bir etki yaratır.

Sonuçta görülebilmektedir ki, pasif ve aktif (veya yarı aktif) kontrol sistemleri arasında teknolojik bakımdan büyük farklar bulunmaktadır. Pasif kontrol sistemlerine nazaran aktif kontrol sistemleri daha fazla kontrol altındadır ve daha hassas aygıtları içermektedir. Şekil 3.12 de, aktif kontrol sistemlerinin temel mantığı ve işleyiş şeması gösterilmektedir. Şekil 3.13 de ise, kütle sönümleyicilerin aktif kontrol sistemlerindeki karşıtı sunulmaktadır. Buradaki aygıt temel olarak kütle sönümleyicidir, ancak tüm sisteme hareketlendiricinin eklenmesi ile beraber otomatik bir biçimde çalışır ve yapı ile kütle arasındaki göreli hareketi yönetir.

Yarı aktif sistemler, aktif sistem gibi davranırlar. Ancak ikisi arasındaki en temel fark, yarı aktif kontrol sistemlerinin sadece küçük oranlarda enerji elde etmesidir. Bu nedenle, binayı itmek için gerekli olan kapasite eksikliği ortaya çıkar. Daha doğrusu, yarı aktif kontrol sistemleri sadece yapının hareketini durdurmaya eğilimlidirler, diğer bir değişle, yarı aktif kontrol sistemleri enerji soğurabilirler ama enerji üretemezler. Bu sistemler, aktif kontrol sistemlerine kıyasla daha basit, daha sağlam, daha güvenilir ve daha ekonomiktirler. Şekil 3.13 de verilen sistem, yarı aktif kontrol sistemlerini de temsil etmektedir.



Şekil 3.12 Aktif Kontrol Sistem Şeması ve Temel Döngüsü

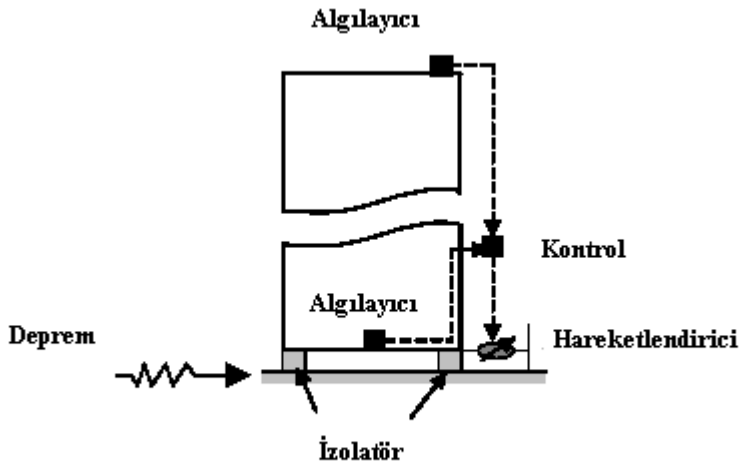


Şekil 3.13 Aktif ve Yarı Aktif Yapısal Kontrol Sistemi

3.4 Karma (Hibrid) Yapısal Kontrol Sistemleri

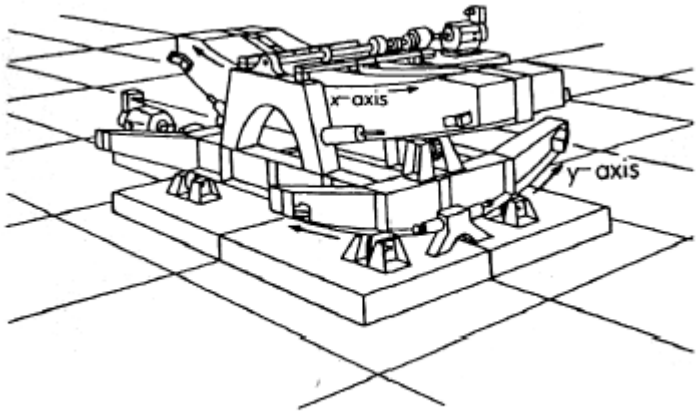
Karma kontrol sistemleri, bir pasif kontrol sistemi ile birlikte aktif veya yarı aktif kontrol sistemlerinin seri veya paralel kombinasyonunu içerirler. Her iki kontrol sisteminin avantajları değerlendirildiğinde, aktif aygıtlar yapının son durumunu kontrol ederken, pasif aygıtlar da deprem etkilerinden dolayı yapıdaki tepkinin esas büyüklüğünün azalmasında etkin olurlar. Diğer bir değişle, yapıya etkiyen yatay yükün doğuracağı tepki ilk aşamada pasif kontrol sistemleri tarafından büyük ölçüde azaltılır ve bundan sonraki kontrol işlemini aktif kontrol sistemleri üstlenir. Böylece, karma sistemler, yapının ivmelenmesini ve yer değiştirmelerini minimuma indirmeye eğilimli olurlar. Şekil 3.14 de, böyle bir kontrol sisteminin uygulandığı taban yalıtımlı ve aktif kontrol sistemli bir yapı görülmektedir (aktif kontrol sistemi, ana taşıyıcıdaki yüksek frekanslı ve düşük büyüklükteki titreşimleri azaltmak için kullanılabilir). Şekil 3.15, iki akslı karma tipteki kütle sönümleyiciyi gösterir. Bu sistem yüksek köprü kulelerindeki ve yüksek binalardaki titreşimi azaltmak için geliştirilmiştir. Yay dilimi şeklindeki yörüngede kayan bir kütle, AC motor mekanizması tarafından kontrol edilen bir aktif kontrol sistemi ile birleştirilmiştir.

Yapılarda büyük kontrol kuvvetleri gerekmediği sürece, yani yapı çok fazla zorlanmadığı sürece, karma sistemler aktif sistemlere göre daha güvenilir ve daha ekonomik olurlar.



Aktif yada Yarı Aktif Kontrol Sistemleri ile Taban İzolatörlerinin Beraber Kullanımı

Şekil 3.14 Taban Yalıtımlı Karma Kontrol Sistemi



İki Akslı Karma Tipteki Kütle Sönümleyici

Şekil 3.15 İki Akslı Kütle Sönümleyicili Karma Kontrol Sistemi

3.5 Sürtünmeli Enerji Yutucu Pasif Yapısal Kontrol Sistemleri

Sürtünmeli enerji yutucu sistemler, Bölüm 3.2.2 de anlatıldığı gibi, sürtünme kuvvetini kullanarak enerji yutan pasif yapısal kontrol sistemleri içine girmektedir. Sürtünmeli enerji yutucu sistemler, ana taşıyıcı çerçeve ile yatay etkilere karşı yapının dayanımını arttıran çapraz sistemi arasına yerleştirilir. Bu tür sistemler içinde geleneksel anlamda en yaygın olarak kullanılan aygıt, Sumitomo enerji yutucularıdır. Ancak, bu aygıt hem karmaşık hem de maliyeti yüksek olduğu için kullanım alanı sınırlı olmaktadır.

Son zamanlarda, uygulaması kolay olan ve düşük maliyet gerektiren, sürtünmeli enerji yutucu sistem türündeki kayıcı bulonlu düğüm noktaları (*sliding slotted bolted joints, SBJ*) geliştirilmiştir. Dinamik etkilere karşı yüksek dayanım gerektiren sistemlerde, enerji yutucu olarak tatmin edici performans gösteren bir kayıcı bulonlu düğüm noktasının, yapıda dayanım, stabilite veya enerji yutabilme kaybı olmaksızın tekrarlı çevrimsel yer değiştirmelere elverişli olması gerekir.

Kayıcı bulonlu sürtünmeli enerji yutucu sistemlerin yeterli performansı göstermesi aşağıdaki koşulların sağlanmasına bağlıdır.

1. Kayma yüzeyleri arasındaki temas.
2. Kayma ara yüzündeki sabit sürtünme katsayısı.
3. Kayma kuvveti sınırına varan düğüm noktasının gevrek kırılmasının önlenmesi.
4. Düğüm noktasının basit, düşük maliyetli ve uygulanabilirliğinin ve bakımının kolay olması.

Çeşitli kayıcı bulonlu düğüm noktası türleri bulunmaktadır. Bunlardan bir grubu, doğrudan doğruya çelik elemanlar arasında temas sağlayan sistemlerdir. Bu tür sistemlerde tatmin edici sonuçlara ulaşılmasına karşın, zaman içinde, temas yüzeyleri arasında istenmeyen sürtünme kuvvetlerinin meydana gelmesi sorun yaratmaktadır. Bu nedenle, temas yüzeyinde iyileştirmelere gidilmesi zorunlu olmaktadır. Daha sağlıklı temas yüzeyi sağlayan çelik/pirinç yüzeyler, sürtünme katsayısının düzenli değerler alması ile birlikte çok iyi sonuçlar vermekte ve daha fazla kullanım alanı bulmaktadır

Temel olarak üç tip kayıcı bulonlu düğüm noktası vardır. Bunlar

1. eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktaları (çapraz üzerinde),
2. yatay doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktaları (çapraz ile kiriş arasında),
3. dönel kayıcı düğüm noktalarıdır, (kolon-kiriş birleşim noktasında kiriş üzerinde).

3.5.1 Eksenel ve Yatay Doğrultuda Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktaları

Doğrusal kayıcı bulonlu düğüm noktaları, normal kuvvet altında zorlanan elemanlarda yani çaprazlar üzerinde, elemanın eksenine paralel doğrultuda kayma sağlayacak biçimde yerleştirilir. Şekil 3.16 ve 3.17 de sırasıyla, simetrik doğrusal kayıcı bulonlu bir düğüm noktasının [10] ve simetrik olmayan kayıcı bulonlu bir düğüm noktasının [12] temel bileşenleri ve çalışma biçimleri gösterilmiştir. Şekil 3.16 ya göre, üç veya daha fazla sayıda levha bir araya getirilerek, öngerme verilmiş yüksek mukavemetli bir bulon aracılığı ile birbirlerine sıkıştırılır. Levhaların her birinde bulon deliği mevcuttur; ancak bunlardan sadece birinde göreceli olarak kayma hareketini sağlamak amacıyla oval delik bırakılır. Levhalar arasındaki temas

ara yüzeylerine pirinç şimler yerleştirilerek düzgün bir temas yüzeyi ve sabit sürtünme katsayısı elde edilir. Çekme kuvvetinin uygulandığı levhadaki kuvvet bir sınır değere eriştiği anda kayma hareketi başlar. Kayma hareketini başlatan kuvvet, Denklem (3.1) uyarınca

$$N_{kayma} = 2N_b \mu \tag{3.1}$$

şeklinde hesaplanır. Burada

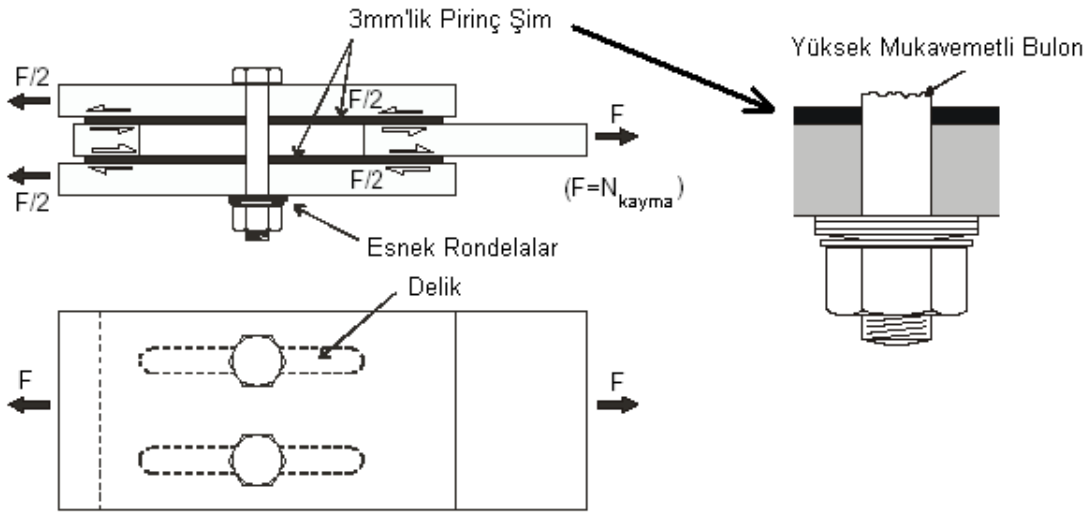
N_{kayma} = kayma hareketini başlatan eşik kuvveti (sürtünme kuvveti)

N_b = bulon üzerindeki öngerme kuvveti

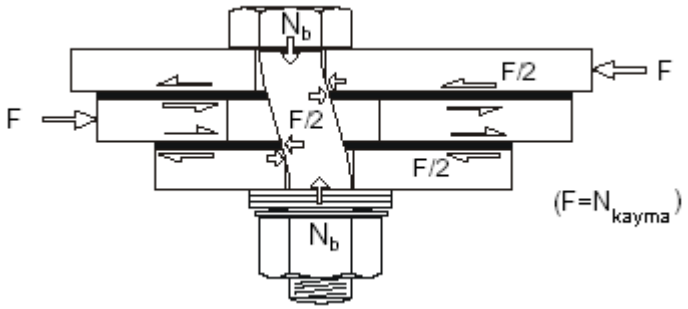
μ = sürtünme katsayısı

olarak tanımlanır.

Denklemdeki (2) çarpanı ise, sürtünme ara yüzeylerinin sayısını temsil etmektedir



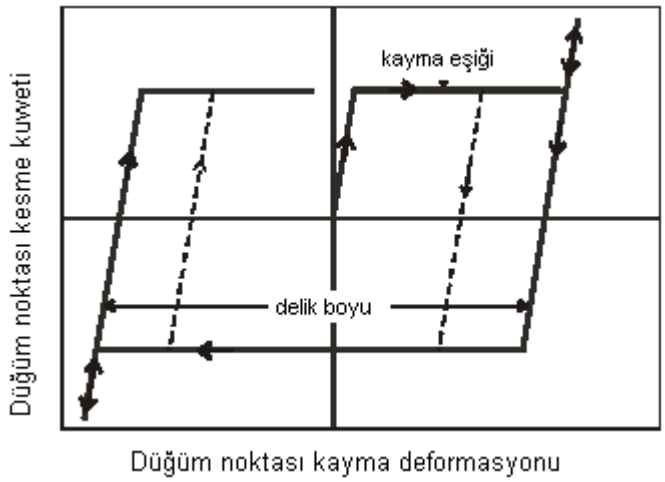
Şekil 3.16 Simetrik Doğrusal Kayıcı Düğüm Noktasının Bileşenleri



Şekil 3.17 Simetrik Olmayan Doğrusal Kayıcı Düğüm Noktasının Bileşenleri

Her iki sistem üzerinde yapılan testlerde, (UNS-260) kalitesindeki pirinç şimler düğüm noktasının şekil değiştirme aralığı boyunca levhalar arasına yerleştirilir. Bu sistemlere, düğüm noktasının kayma hareketi olmaksızın taşıma kapasitesi seviyesinin anlaşılması için, gerçek sismik hareketi temsil eden ve sürekli artan büyüklükteki hızlarda çevrimsel yer değiştirmeler uygulanır. Bulondaki ilk gerilme kayıplarından sonra düğüm noktası, sürtünme katsayısının 0.27 ile 0.31 arasında değişen bir değeri altında, kararlı bir kayma hareketi sergiler ve kimi durumlarda bulon oval delik sonuna dayanır.

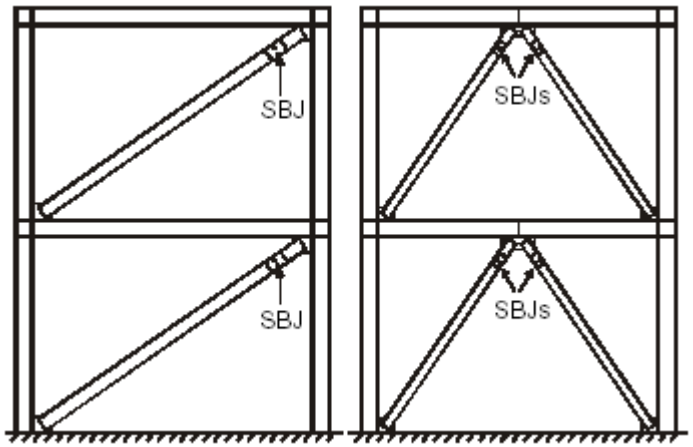
Bolunun yükleme sonucunda oval delik sonuna dayanması ile birlikte, oval delik açılmış olan levhada elastik ötesi şekil değiştirmeler meydana gelebilir. Ayrıca, böyle bir durumda çok sünek ve kararlı bir enerji yutma mekanizmasının sağlanması için, bulonlardaki kesme kuvvetinin sebep olduğu güç tükenmesinin, levhalardaki akma olayı görülmeden önce oluşması istenmez. Böylece, sıra dışı koşullar altında levhanın elastik ötesi şekil değiştirme yapmasıyla birlikte fazladan enerji yutulması sağlanmış olur. Şekil 3.18 de, düğüm noktasının idealleştirilmiş çevrimsel davranışı gösterilmektedir. Şekilde, kaymayı sağlayan kuvvet aşıldığı anda kayma hareketi başlamakta ve bu hareket boyunca düğüm noktası ve dolayısıyla düğüm noktasının uygulandığı eleman üzerindeki kuvvet sabit olmaktadır. Bulonun oval delik sonuna dayanması ile birlikte düğüm noktası ve eleman tekrar yük almaya devam eder. Ancak, kayma hareketinden önce yapı sistemindeki yüklerin tersinir olması veya azalması (boşaltma) sonucunda, düğüm noktasında kalıcı şekil değiştirmeler oluşur. Bu durum, sistem üzerinde iç gerilmeler meydana gelmesine neden olur.



Şekil 3.18 Düğüm Noktasının İdealleştirilmiş Çevrimsel Davranışı

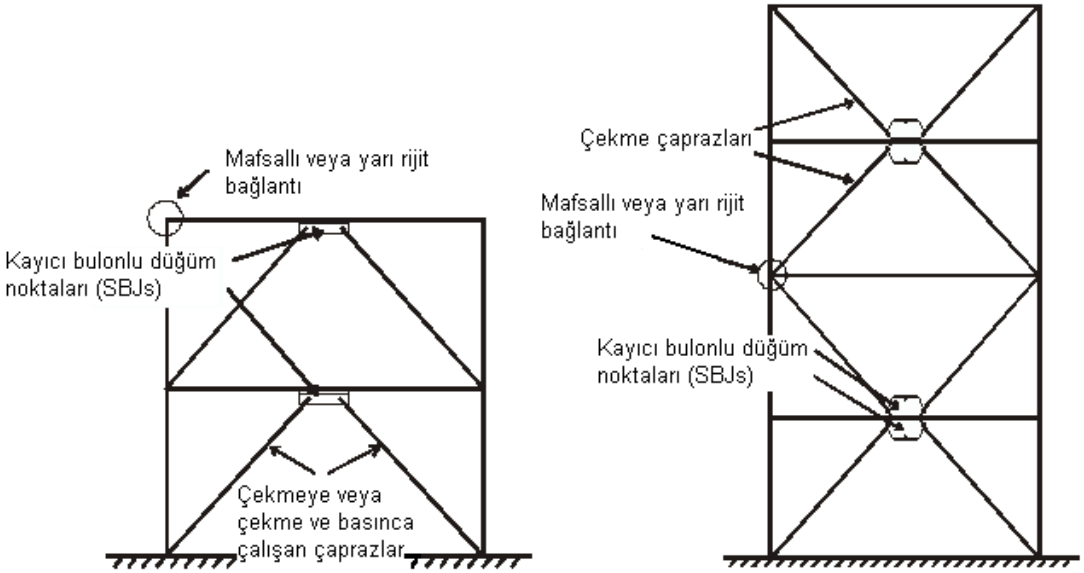
Diğer taraftan, bu tür düğüm noktalarının sağladığı önemli yararlardan biri de uygulandığı çapraz elemanında meydana gelebilen burkulma etkilerinin ortadan kaldırılmasıdır. Belirli bir normal kuvvet değerinde burkulan bir çaprazda, kayma hareketine sebep olan kuvvetin elemanın burkulma yükünden daha az olması sağlanarak burkulma önlenir veya geciktirilir. Bu durumda, oval delik boyunun da uygun bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Çünkü oval delik boyunun gerekenden az olması burkulmayı sadece geciktirmektedir. Oval delik boyunun çok fazla olması ise, bazı hallerde yapının kararsız olmasına ve rijit cisim hareketi yapmasına neden olabilir. Bu durumda, yapıdaki yer değiştirmelerin artmasıyla birlikte ikinci mertebe etkileri de ihmal edilemeyecek seviyeye gelebilir.

Yatay doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktalarının çalışma prensipleri eksenel kayıcı sistemlerle aynıdır. Aradaki en önemli fark, eksenel kayıcı sistemin çapraz üzerinde olmasına karşın yatay kayıcı sistemin çaprazın bağlandığı elemanın üzerinde olmasıdır. Böylece, çapraz elemandan gelen normal kuvvet değeri düşey ve yatay bileşenlerine ayrılır ve bunlardan yatay olanı kayma hareketini başlatır. Gerçekte, kayma hareketini başlatan kuvvet bileşeni çaprazın merkezi olarak bağlandığı elemanın türüne göre değişir. Örneğin, eleman kiriş ise yatay bileşen, kolon ise düşey bileşen önem kazanır. Şekil 3.19 da, diyagonal ve K çaprazlı çerçevelerde, eksenel kayıcı düğüm noktası detayının uygulaması görülmektedir.

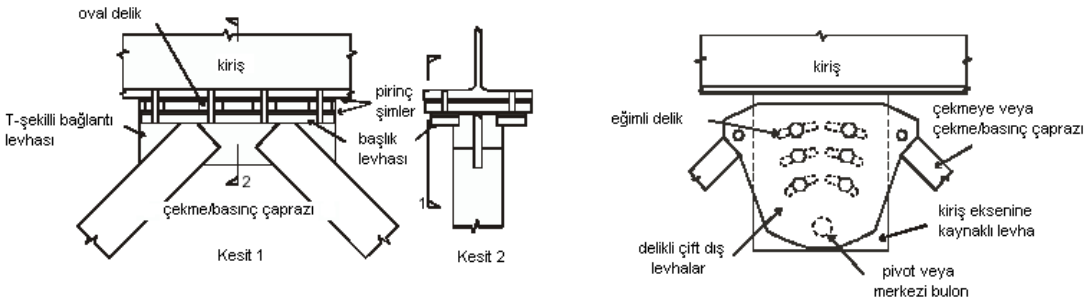


Şekil 3.19 Eksenel Kayıcı SBJ'nin Çaprazlı Sistemlerdeki Kullanımı

Şekil 3.20 de ise, yatay kayıcı olarak çalışan düğüm noktasının çaprazlı sistemlere uygulaması gösterilmektedir. Şekil 3.21 de, yatay kayıcı düğüm noktalarına ilişkin uygulanan farklı çelik birleşim detayları verilmiştir.



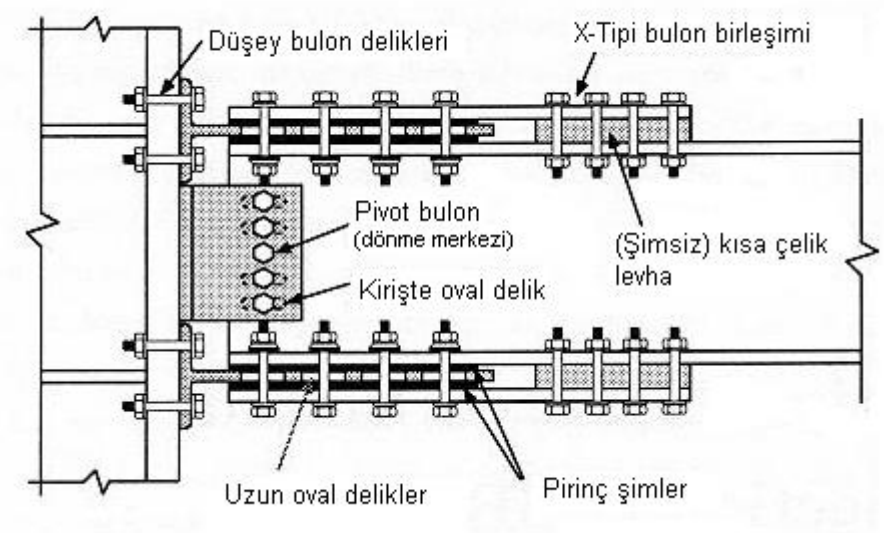
Şekil 3.20 Yatay Kayıcı SBJ'nin Çaprazlı Sistemlerdeki Kullanımı



Şekil 3.21 Yatay Kayıcı SBJ Birleşim Detayları

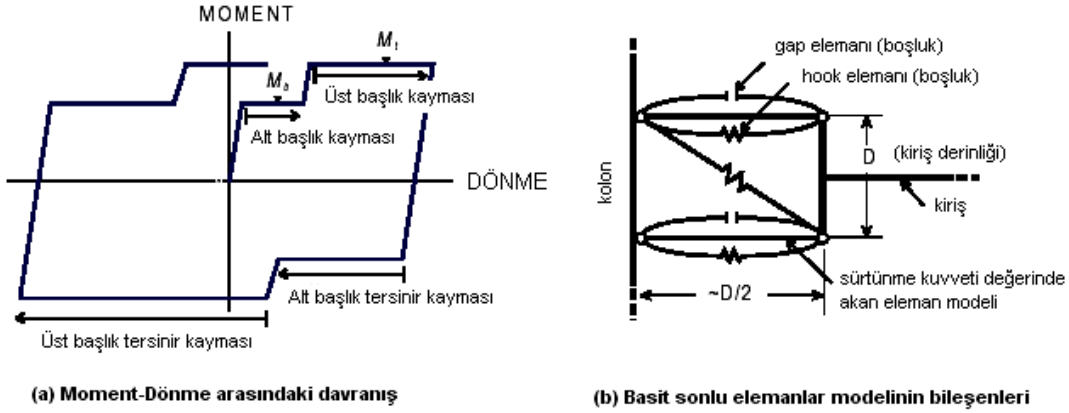
3.5.2 Dönel Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktaları

Sürtünmeli enerji yutucuların, çaprazlı çerçeve sistemlerde uygulanması ile elde edilen sonuçların daha tatmin edici olmasına karşın, moment aktaran rijit çerçeve sistemlerde eğilme etkilerini karşılayarak yatay yüklere karşı dayanım sağlamak amacıyla da kullanım alanı bulduğu söylenebilir. Kolon-kiriş birleşim bölgesine uygulanan bu sistemden yararlanarak, sıra dışı etkiler altında plastik şekil değiştirmesi beklenen kesitlerde mümkün olduğu kadar elastik sınırlar içinde kalınması sağlanabilir. Böylece enerji sönümlenmesi, elastik ötesi şekil değiştirmeler yerine sürtünme kuvveti ile sağlanmış olur. Şekil 3.22 de, uygulamada en çok rastlanan dönel kayıcı bulonlu düğüm noktası (*rotating slotted bolted joint, RBJ*) birleşimi gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, oval deliklerin açıldığı yerler hem başlık bağlantıları hem de gövde bağlantılarıdır. Sürtünme kuvveti aşıldığı anda hareket başlar ve başlıkların dönmesiyle eş zamanlı olarak gövde de dönmeye başlar. Bir katı cismin bir merkezden dönmesini sağlamak için tek bir noktasından tutulması yeterli olduğundan, gövde bağlantısındaki bulonlardan merkezde olanı pivot bulon (dönme merkezi) olarak seçilir. Düzgün bir temas yüzeyi ve sabit sürtünme katsayısı elde etmek için temas ara yüzeyleri arasında 3mm'lik pirinç şimleri kullanılır.



Şekil 3.22 Dönel Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktası (RBJ)

Şekil 3.23 de, dönel kayıcı bulonlu düğüm noktasının moment – dönme davranışı, basit sonlu elemanlar ile bu düğüm noktasının modellenmesi ve modelin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.23 Dönel Kayıcı Bulonlu Düğüm Noktasının Davranışı ve Modeli

3.5.3 Hasar Sınırlaması ve Onarım

Uygun değerlerde kayma eşiği kuvveti sağlanırken, ana yapısal sistemde dinamik etkilerden dolayı oluşacak olan hasardan mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Enerji yutucunun uygulandığı düğüm noktasındaki hasar, bulonların kolayca gevşetilip tekrar sıkılması ile giderilebilmelidir. Böylece, dinamik etki sonrasında yapıdaki kalıcı şekil değiştirmeler nedeniyle oluşan iç gerilmeler yok edilir ve yapı eski koordinatlarına geri döndürülmüş olur. Özellikle, bu sistemin çaprazlarda uygulanması onarım için büyük kolaylıklar sağlar. Zira dönel kayıcı bulonlu düğüm noktaları kolon-kirişi birleşim bölgelerinde uygulandığı için onarımı bir hayli zordur. Çünkü, mimari nedenlerden ötürü bu bölge saklanmıştır. Eğer yetersiz bir kayma mesafesi seçilmiş ise, bulon oval delik sonuna vararak çarpma (darbe) etkisi yaratır ve bu durum yapının çeşitli noktalarında akmalara neden olabilir. Ancak, kayma mesafesi yeterli olarak hesaplanmış ve optimum çözüm bulunmuş ise yetersiz kayma mesafesinin yaratacağı sorunlar aşılmış olur.

4. PERFORMANSA DAYALI TASARIM VE DEĞERLENDİRME

4.1 Giriş

Performans kavramı, günümüz inşaat mühendisliğinin en yeni kavramları arasındadır. Performans kavramının ilk geliştirilme nedeni, mevcut yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarının ve buna bağlı olarak gerçek güvenliklerinin belirlenmesidir. Daha sonraları ise, bu kavramın yeni yapılacak binalarda da uygulanması düşünülmüştür. Bu nedenle, yakın bir gelecekte bu kavrama ilişkin bilgililerin yeni inşa edilecek yapılara ait yönetmeliklerde de yer alması beklenmektedir.

Deprem mühendisliğinde performansa dayalı tasarım ve değerlendirme, deprem etkisi altında, yapıdan beklenen performans seviyelerinin tespitine dayanır. Aslında bütün mühendislik tasarımlarının performansa dayalı olduğu söylenebilir. Bunlar, kullanım sınır durumu ve taşıma gücü sınır durumu performanslarıdır. Kullanım sınır durumunda, işletme yükleri altında yapıda hasar meydana gelmemesi amaçlanır. Taşıma gücü sınır durumunda ise yük güvenlik katsayıları ile arttırılmış yükler altında, taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların güç tükenmesi durumuna erişmemesi sağlanır. Deprem yönetmeliklerinde, genellikle belirli bir sınır durum için boyutlamaya izin verilir. Ancak, performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramında, performans seviyelerinin birden fazla olması öngörülür ve böylece taşıyıcı sistemin gerçek hasar riskleri hakkında daha açık bilgilere ulaşılır.

Performansa dayalı tasarım ilkesinin alt yapısının günümüzden yaklaşık 20-30 yıl önceleri ortaya atıldığı bilinmektedir. Bununla beraber, eski deprem yönetmeliklerinde de, birden fazla performans seviyesinden söz edilmektedir. Mevcut yapının küçük depremleri hasarsız atlatması, orta büyüklükteki depremleri can güvenliği sağlayacak biçimde küçük hasarla atlatması ve büyük depremlerde ise

toptan göçme olmaması, sözü edilen performans seviyeleridir. Performansa dayalı tasarım kavramı ile birlikte bu performans seviyeleri daha belirgin hale getirilmiştir. Günümüzde, performansa dayalı tasarım ilkeleri için ATC 40 [1] ve FEMA 273, 356 [2, 3] yaklaşımları olmak üzere birbirine benzer iki yaklaşım ileri sürülmüştür.

ATC 40 [1] projesi sadece betonarme binalar için hazırlanmış olan bir çalışmadır. Ancak, bu çalışmanın mantığından yola çıkarak diğer türdeki binalar için de gerekli bilgiler hazırlanarak uygulama alanları bulunmuştur. Örneğin, çelik binalar için çelik malzemenin davranışı ve seçilen kesitlerin geometrisi göz önünde tutularak, FEMA 356 [3] raporunda elemanların plastik şekil değiştirme sınır durumlarına ait tablolar oluşturulmuştur. Bu tablolardaki modelleme parametreleri kullanılarak performansa dayalı tasarım kavramı çelik binalara da uygulanmıştır. Bölüm 4.4 de, modelleme parametrelerine ilişkin gerekli bilgiler verilecektir. Performansa dayalı tasarımın amacına yönelik olarak, önceki satırlarda gerekli bilgiler verilmişti. Bu bilgiler ışığında, performans analizi sonrasında binada nasıl bir hasar seviyesi oluşacağı ve buna bağlı olarak nasıl bir performans seviyesinin ortaya çıkacağı ve bunların belirlenmesinde hangi depremin esas alınacağı gibi sorulara yanıt bulmak mümkündür.

4.2 ATC 40 Uygulaması

4.2.1 Performans Seviyeleri

Bir yapının performans seviyesi, depremden sonra oluşması muhtemel hasar durumuna, can güvenliğinin korunmasına ve depremden sonra binanın kullanımına devam edilmesine bağlı olarak belirlenir.

4.2.1.1 Yapısal Performans Seviye ve Aralıkları

Yapısal elemanlar, binanın taşıyıcı sistemini oluşturan kolon, kiriş, perde, çelik çaprazlı perde gibi birincil (*primary*) elemanlar ile ana taşıyıcı sistem dışındaki ikincil (*secondary*) elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanlarda, deprem sonrasında meydana gelebilecek hasar miktarına göre çeşitli performans durumları öngörülmektedir. Tablo 4.1 de bu performans seviye ve aralıklarına ilişkin tanımlar verilmiştir.

Tablo 4.1 Yapısal Performans Seviye ve Aralıkları

Performans Seviyesi	Performans Aralığı	Tanım
SP-1		Hemen Kullanım Performans Seviyesi
	SP-2	Hasar Kontrolü Performans Aralığı
SP-3		Can Güvenliği Performans Seviyesi
	SP-4	Sınırlı Güvenlik Performans Aralığı
SP-5		Yapısal Stabilite Performans Seviyesi
SP-6		Yapısal Performansın Göz önüne Alınmadığı Durum

SP-1 (Hemen Kullanım): Depremden sonra çok sınırlı hasar meydana gelmiştir. Binanın depremden önceki taşıyıcılık özellikleri ve kapasitesi hemen hemen aynen devam etmektedir. Yapısal hasarlardan kaynaklanan bir yaralanma olmamıştır. Bina deprem sonrasında sınırsız olarak kullanıma açıktır.

SP-2 (Hasar Kontrolü): Bu durum SP-1 ve SP-3 seviyeleri arasındaki bir aralığa karşı gelmektedir. Hasarın belirli ölçüde sınırlandırılması yanında can güvenliği sağlanmaktadır. Deprem yönetmeliklerinde, 50 yıllık bir süre içerisinde aşılma olasılığı %10 olarak tanımlanan deprem etkisinde öngörülen performans seviyesi bu aralığa girer.

SP-3 (Can Güvenliği): Deprem sonrasında taşıyıcı sistemde önemli ölçüde hasar olmasına karşın, binanın yerel olarak veya toptan göçmesi söz konusu değildir. Binanın toptan göçmeye karşı belirli bir miktar kapasitesi hala bulunmaktadır. Yaralanma olasılığına karşın can güvenliği tehlikesi yoktur.

SP-4 (Sınırlı Güvenlik): Bu durum SP-3 ve SP-5 seviyeleri arasında kalan bir bölgedir. Bir binanın güçlendirilmesinde can güvenliğinin tam olarak sağlanması durumunda göz önüne alınabilir.

SP-5 (Toptan Göçmenin Önlenmesi): Bu seviye, taşıyıcı sistemin güç tükenmesi sınırında olduğunu gösterir. Deprem sonrası sistemde önemli hasar meydana gelmiş olup binanın taşıyıcı elemanlarında kapasitenin yitirilmesi söz konusudur. Can güvenliği sınırı aşılmış olduğu için artçı deprem şokları ile birlikte, güç tükenmesi sınırındaki yapı toptan göçme tehlikesi ile karşı karşıyadır. Hasarın çok fazla olması

nedeniyle binanın mutlaka güçlendirilmesi gerekir. Ancak hasarın fazla olması güçlendirme maliyetlerini arttıracağından binanın kontrollü yıkımı da söz konusu olabilir.

4.2.1.2 Yapısal Olmayan Performans Seviyeleri

Yapısal olmayan elemanlar, binanın içinde bulunan makine veya buna benzer teçhizatlar yanında mimarı elemanları da kapsamaktadır. Bu elemanlarda deprem sonrasında meydana gelmesi muhtemel hasar miktarına göre çeşitli performans durumları öngörülmektedir. Tablo 4.2 de yapısal olmayan performans seviyelerine ilişkin tanımlar yer almaktadır.

Tablo 4.2 Yapısal Olmayan Performans Seviyeleri

Performans Seviyesi	Tanım
NP-A	Kullanıma Devam Performans Seviyesi
NP-B	Hemen Kullanım Performans Seviyesi
NP-C	Can Güvenliği Performans Seviyesi
NP-D	Azaltılmış Hasar Performans Seviyesi
NP-E	Yapısal Olmayan Performansın Göz önüne Alınmadığı Durum

NP-A (Kullanıma Devam): Depremden sonra taşıyıcı olmayan (yapısal olmayan) elemanlarda kullanımı engelleyecek bir durum söz konusu değildir.

NP-B (Hemen Kullanım): Yapısal olmayan elemanlarda önemli bir hasar meydana gelmez. Kullanımı engelleyen ancak kolayca giderilebilen küçük hasarlar beklenmektedir.

NP-C (Can Güvenliği): Deprem sonrasında yapıda önemli sayılabilecek hasar olmasına karşın binanın yerel veya toptan göçmesi söz konusu değildir. Yaralanmaların muhtemel olmasına karşılık can güvenliği açısında tehlike görülmemektedir. Binada taşıyıcı olmayan, yani yapısal olmayan makine ve teçhizat gibi elemanlar onarılmalarına gerek olmadan çalışmalarına devam edebilirler.

NP-D (Azaltılmış Hasar): Taşıyıcı olmayan elemanlarda, binanın genelinde yapısal olmayan hasar beklenmektedir. Ancak parapet, yığma duvar, cephe kaplaması veya ağır tavan gibi büyük parça düşmesi sonucu bir yaralanma söz konusu değildir.

4.2.1.3 Bina Performans Seviyeleri

Bina performans seviyeleri, binadaki taşıyıcı elemanların performans seviyeleri ile taşıyıcı olmayan elemanların performans seviyelerinin bir birleşimi olarak tanımlanır. Binadaki çeşitli performans seviyelerine ilişkin bilgiler Tablo 4.3 te topluca verilmiştir.

Tablo 4.3 Bina Performans Seviyeleri

Yapısal Olmayan Performans Seviyeleri	Yapısal Performans Seviyeleri					
	SP-1 Hemen Kullanım	SP-2 Hasar Kontrolü (aralık)	SP-3 Can Güvenliği	SP-4 Sınırlı Güvenlik (aralık)	SP-5 Yapısal Stabilite	SP-6 Göz önüne Alınmadı
NP-A Kullanıma Devam	1-A Kullanıma Devam	2-A				
NP-B Hemen Kullanım	1-B Hemen Kullanım	2-B	3-B			
NP-C Can Güvenliği	1-C	2-C	3-C Can Güvenliği	4-C	5-C	6-C
NP-D Azaltılmış Hasar		2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E Göz önüne Alınmadı			3-E	4-E	5-E Yapısal Stabilite	

1-A (Kullanıma Devam Performans Seviyesi): Binanın yapısal olan ve olmayan elemanlarındaki hasar miktarı kullanımı engelleyecek seviyede değildir.

1-B (Hemen Kullanım Performans Seviyesi): Bu seviye, önemli olan binalar için uygun görülür. Binanın kullanım alanı ve sistemleri işleyebilecek durumdadır. Bina içindeki eşyalarda hasar görülmesi muhtemeldir.

3-C (Can Güvenliği Performans Seviyesi): Yapısal olan ve olmayan elemanlarda hasar meydana gelebilir. Ancak bu hasar sonrasında yaralanma söz konusu olsa da

can güvenliği tehlikesi yoktur. Bu seviye, günümüzde yönetmeliklerin yeni binalar için öngördüğü performans seviyesinden biraz daha düşük olarak tanımlanmıştır.

5-E (Yapısal Stabilite Performans Seviyesi): Deprem sonrasında binanın yatay yük taşıma kapasitesi tamamen tükenmiştir. Sistem sadece düşey yük etkisi altında taşıyıcılığını sürdürebilir. Artçı şoklar ile birlikte yapıda güç tükenmesi meydana gelebilir. Binada, taşıyıcı olan ve olmayan elemanlardan dolayı can güvenliği tehlikesi mevcuttur. Taşıyıcı olmayan elemanlardaki hasarlar ve bina rölatif kat ötelemeleri kontrol edilemez düzeydedir.

3-D (Bina Performans Seviyesi): Taşıyıcı elemanlarda can güvenliği ve taşıyıcı olmayan elemanlarda azaltılmış hasar seviyelerinin birleşimidir. Yönetmeliklerde esas alınan ve 50 yıllık süre içerisinde aşılma olasılığı %10 olan deprem için verilen deprem kuvvetlerinin %75 ini alarak yapılan güçlendirme müdahalesinin böyle bir performans seviyesini sağlaması öngörülür.

3-B (Bina Performans Seviyesi): Bu seviyede, taşıyıcı sistemdeki hasar binanın kullanımına engel olmamaktadır. Bu tür bir performans seviyesinin, bir binanın önemli bölgeleri için sağlanması daha uygun olmaktadır.

Binalar için önemli sayılabilecek bazı performans seviyeleri Tablo 4.4 de özetlenmektedir.

Tablo 4.4 Binalar İçin Önemli Performans Seviyeleri

Bina Performans Seviyesi	Yapısal Olan ve Olmayan Performans Seviyesi	Tanım
1-A	SP-1 NP-A	Kullanıma devam performans seviyesi : Yedek sistemlerin devreye girmesi ile kullanıma devam ediliyor, çok az hasar
1-B	SP-1 NP-B	Hemen kullanım performans seviyesi : İnceleme sonucu binanın kullanılabilir olduğuna karar veriliyor, küçük onarım
3-C	SP-3 NP-C	Can güvenliği performans seviyesi : Taşıyıcı sistemin kapasitesi hala yeterli, taşıyıcı olmayan sistemde hasar kontrol altında
5-E	SP-5 NP-E	Yapısal Stabilite : Bina ancak ayakta durabiliyor. Bunun dışındaki her türlü hasar kabul ediliyor

4.2.2 Deprem Risk Seviyeleri

Deprem hareketini tanımlamak için üç adet deprem risk seviyesi geliştirilmiştir. Bunlar sırasıyla, kullanım depremi, tasarım depremi ve en büyük deprem olarak isimlendirilirler. Performansa dayalı tasarımda, bir binanın performans seviyesi belirlenirken, bu binanın hangi deprem riski seviyesinde bulunacağının tanımlanması gerekir. Deprem etki(risk) seviyesinin belirlenmesi ise spektrum eğrisinin tanımlanması ile olabilir. Deprem risk seviyesinin tanımında, 50 yıllık bir oluşum periyoduna dayanarak aşılma olasılığı miktarları ile çeşitli büyüklükteki deprem etkileri tanımlanır. Bu tanımlara göre 50 yıllık oluşum periyoduna bağlı kalınarak sırasıyla aşılma olasılıkları %50, %20, %10 ve %2 olacak biçimde belirlenen deprem risk seviyeleri üretilir. Risk seviyeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Kullanım Depremi

%50/50 yıl deprem risk etkileri göz önüne alınır ve bu deprem tasarım depreminin yarısı olarak kabul edilir. Ortalama dönüş periyodu 75 yıl olan bu depremin binanın ömrü boyunca bir veya iki kere ortaya çıkması olası gözükmektedir.

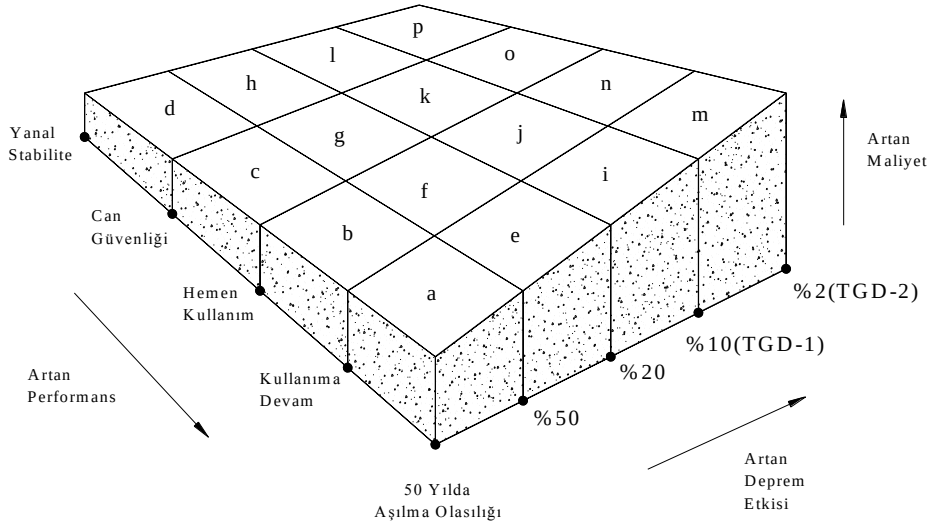
Tasarım Depremi

%10/50 yıl deprem risk etkileri göz önüne alınır. Bu deprem risk seviyesi, başlıca deprem yönetmeliklerinde (TDY, UBC ve CBC) yeni binaların tasarımında kullanılmak üzere sunulmuştur. Ortalama dönüş periyodu 500 yıl olan bu deprem riskinin yapının ömrü boyunca ortaya çıkması pek olası değildir.

En Büyük Deprem

1000 veya 2500 yıllık dönüş zaman aralığı bulunan bu deprem riskinin, bölgenin jeolojik bilgileri göz önüne alınarak, en büyük deprem riski olduğu kabul edilir. En büyük deprem riskinin veya etki seviyesinin tasarım depreminin 1.25 ile 1.50 katı arasında etkisi olduğu söylenebilir. Yeni binaların tasarımında, tasarım depreminin bina önem katsayısı ile çarpımı sonucunda en büyük deprem riski seviyesi elde edilmeye çalışılır.

Tablo 4.5 de, yukarıda adı geçen deprem risk seviyeleri, performans amaçları sınıflandırması başlığı altında çeşitli harfler ile sembolize edilmişlerdir. Şekil 4.1 de ise, seçilen deprem risk seviyesine göre performans amacı belirlenen bir yapıdaki maliyet artışı ve azalışı gösterilmektedir. Özellikle, binaların güçlendirilmesi işleminde, Temel Güvenlik Depremi 1 ve 2 (TGD-1 ve TGD-2) olarak iki adet risk veya etki seviyesi mevcuttur. Kabul edilecek deprem etki seviyesi ile birlikte binadaki performans seviyesi ve güçlendirme sonrası oluşan maliyetler ortaya çıkar. Bunun yanı sıra, seçilen performans seviyesine bağlı olarak, deprem sonrasında binanın kullanıma devam durumu da belirlenebilir. Sadece bir performans seviyesi seçilebileceği gibi birden fazla performans seviyesi de seçilebilir. Tablo 4.5 de, a-f-k-p ile sembolize edilen amaçlar ana binalara yöneliktir. Diğer taraftan, e-j-o amaçları önemli binalar için ve i-n amaçları çok özel binalar için önerilen seviyelerdir



Şekil 4.1 Bina Performans Seviyeleri

Tablo 4.5 Deprem Etki Seviyeleri

	Bina Performans Seviyesi			
Deprem Etki Seviyesi	Kullanıma devam performans seviyesi 1-A	Hemen kullanım performans seviyesi 1-B	Can güvenliği performans seviyesi 3-C	Yapısal stabilite performans seviyesi 5-E
%50/50yıl Kullanım Depremi	a	b	c	d
%20/50 yıl	e	f	g	h
TGD-1 %10/50yıl Tasarım Depremi	i	j	k	l
TGD-2 ~%2/50yıl En Büyük Deprem	m	n	o	p

4.2.3 Deprem Bölgesi Sismik Karakteristikleri

Bir bölgenin sismik karakteri, bölgenin bulunduğu zemin koşullarına ve deprem kaynağına göre konumuna bağlı olarak belirlenir. Zemin koşulları, sismik bölge katsayısı olan (Z) yi belirler. Bu değer belirlenirken CBSC 1995 (*California Building Code*) referans olarak verilir. Aynı şekilde, bölgenin deprem kaynağına olan uzaklığı deprem spektrumu eğrisinin büyüklüğünü etkiler. Hem bölge faktörü (Z) hem de yapının deprem kaynağına göre konumu ve uzaklığı, sismik çarpanlar olan C_A ve C_V nin belirlenmesine yardımcı olurlar, Tablo 4.6, Tablo 4.7, Tablo 4.8.

Tablo 4.6 Kaynağa Uzaklık Katsayıları

Deprem Kaynağı Türü	DEPREM KAYNAĞINA UZAKLIK							
	≤ 2 km		5 km		10 km		≥ 15 km	
	N_A	N_V	N_A	N_V	N_A	N_V	N_A	N_V
A:Büyük Deprem Oluşturan Kaynak	1,5	2,0	1,2	1,6	1,0	1,2	1,0	1,0
B:Orta Deprem Oluşturan Kaynak	1,3	1,6	1,0	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
C:Küçük Deprem Oluşturan Kaynak	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tablo 4.7 Deprem Kaynağı Türü

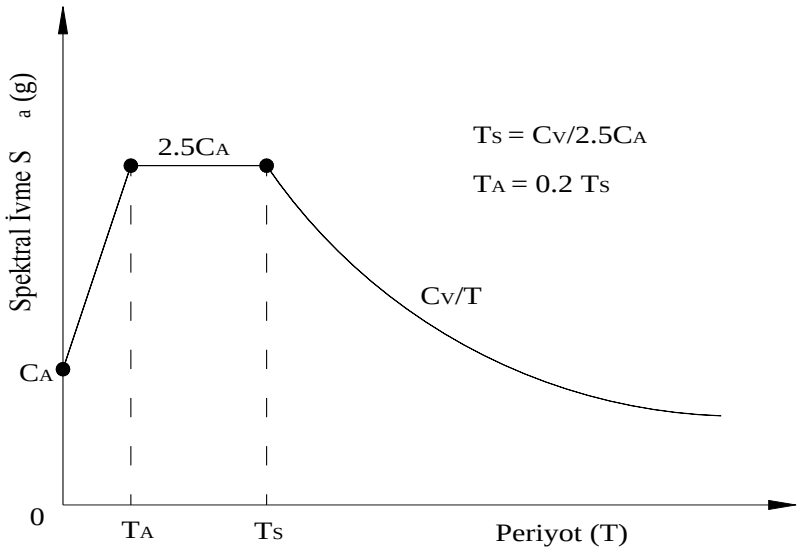
	Sismik Kaynak Tanımı	
Sismik Kaynak Tipi	En büyük Moment Büyüklüğü, M	Kayma oranı(*Slip Rate*), SR (mm/yıl)
A	M > 7,0	SR > 5
B	N/A	N/A
C	M < 6,5	SR < 2

Tablo 4.8 Deprem Bölge Katsayısı

Bölge	1	2A	2B	3	4
Z	0,075	0,15	0,20	0,30	0,40

4.2.3.1 Elastik İvme – Periyot Spektrum Eğrisi (Sa-T)

Deprem etkisini temsil eden elastik spektrum eğrisi, C_A ve C_V parametrelerine bağlı olarak tanımlanır. Bu parametreler, binanın bulunduğu sismik bölgeye ve deprem kaynağına olan uzaklığa göre belirlenir. Buna göre, deprem bölgesi katsayısı Z, deprem etki türü katsayısı E, ve bilinen deprem kaynağı uzaklığı katsayısı N çarpımından oluşan ZEN parametresine ve zemin sınıfına bağlı olarak C_A ve C_V parametreleri belirlenmiş olur. Deprem Katsayıları C_A ve C_V değerlerine ait sayısal değerler Tablo 4.9 ve 4.10 da sunulmaktadır. Tablo 4.11 de ise zemin sınıfları ve tanımları gösterilmektedir. C_A, zeminin etkili maksimum ivme katsayısını temsil eder. Spektrum eğrisi C_A değeri ile başlar ve artarak zemin sınıfına bağlı olan spektrum karakteristik periyot değeri T_A olunca $2.5C_A$ değerini alır. C_A değerinin 2.5 katı, %5 lik sönüm oranına karşı gelen spektrum eğrisinin maksimum değerini verir. C_V ise, periyodu 1 sn olan %5 sönümlü sistemin spektrum değerini verir. Şekil 4.2 de, tipik bir (Sa–T) spektrum diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.2 (Sa – T) Spektrum Eğrisi

Tablo 4.9 Deprem Katsayısı, C_A

CA	Deprem Katsayısı : ZEN					
Zemin Sınıfı	=0,075	=0,15	=0,20	=0,30	=0,40	> 0,40
SA	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40	1,0*ZEN
SB	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40	1,0*ZEN
SC	0,09	0,18	0,24	0,33	0,40	1,0*ZEN
SD	0,12	0,22	0,28	0,36	0,44	1,1*ZEN
SE	0,19	0,3	0,34	0,36	0,36	0,90*ZEN
SF	Yerel Zemin İncelemesi Gerekli					

(E=0.5 kullanma depremi, E=1.0 tasarım depremi, E=1.25 veya 1.5 en büyük deprem)

Tablo 4.10 Deprem Katsayısı, C_V

CV	Deprem Katsayısı : ZEN					
Zemin Sınıfı	=0,075	=0,15	=0,20	=0,30	=0,40	> 0,40
SA	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40	1,0*ZEN
SB	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40	1,0*ZEN
SC	0,13	0,25	0,32	0,45	0,56	1,4*ZEN
SD	0,18	0,32	0,4	0,54	0,64	1,6*ZEN
SE	0,26	0,5	0,64	0,84	0,96	2,4*ZEN
SF	Yerel Zemin İncelemesi Gerekli					

(E=0.5 kullanma depremi, E=1.0 tasarım depremi, E=1.25 veya 1.5 en büyük deprem)

Tablo 4.11 Zemin Sınıflarının Tanımı

Zemin Sınıfı ve Tanımı	SA	SB	SC	SD	SE	SF
	Sert Kaya	Kaya	Sıkı zemin, yumuşak kaya	Sert Zemin	Yumuşak Zemin	Yerel Zemin İncelemesi gerekli

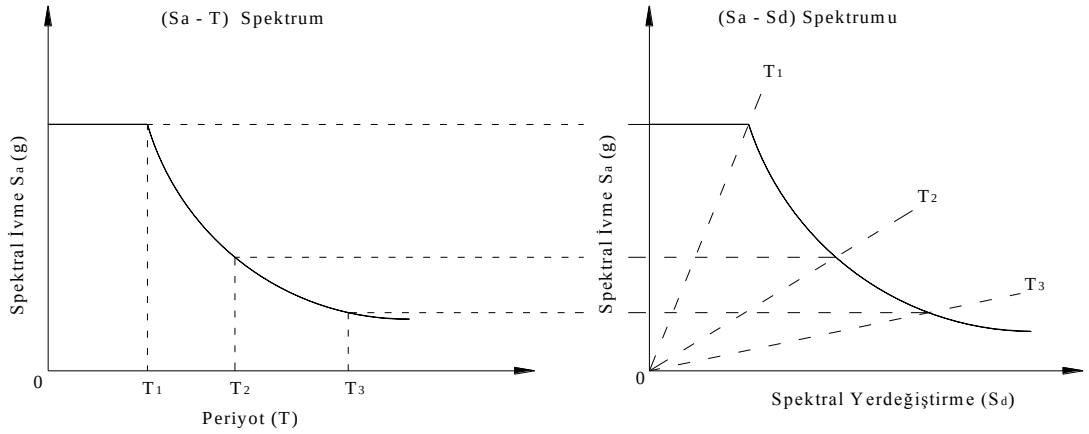
4.2.3.2 Elastik İvme – Yer Değiştirme Spektrum Eğrisi

Performansa dayalı tasarımda, yapının performans seviyesi ancak performans noktası bulunduktan sonra yorumlanabilir. Bir yapı sisteminin performans noktasının bulunması için ise, iki temel bileşenin çok iyi belirlenmesi gerekir. Bunlar, kapasite spektrum eğrisi ve istem (talep) spektrum eğrisidir. Performans noktası, yapının yatay yüklere karşı gösterdiği dayanımın, yani kapasitesinin yapının enerji sönümleyebilme özelliğine bağlı olarak indirgenen deprem istemine eşit olması durumudur. Bu nedenle, kapasite ve talep spektrum eğrilerinin mutlaka bilinmesi gerekir. Kapasite spektrum eğrisi ile ilgili bilgiler kapasite spektrum yöntemi incelenirken verileceği için, bu bölümde sadece kavramsal olarak değinilecektir. Talep veya istem spektrum eğrisi ise, elastik ivme spektrum eğrisinden elde edilebilmektedir.

Genel halde, Sa(T) ivme spektrum eğrilerinin yatay ekseninde tek serbestlik dereceli sistemin periyodu, düşey ekseninde ise sistemde meydana geldiği kabul edilen mutlak ivmenin en büyük değeri bulunur. Bilindiği gibi, yerdeğiştirme spektrumu ile ivme spektrumu arasında

$$S_d(T) = \frac{1}{w^2} g\, S_a(T) \approx \frac{T^2}{4\pi} g\, S_a(T) \qquad (4.1)$$

yaklaşık bağıntısı bulunmaktadır. Bu bağıntı aracılığı ile, Bölüm 4.2.3.1 de tanımlanan ivme spektrum değerinden yerdeğiştirme spektrum değerine geçilebilir. Elde edilen yerdeğiştirme spektrum eğrisine talep (istem) spektrum eğrisi adı verilir. Böylece, yönetmeliklerde öngörülen deprem etkisi, performans analizi için elverişli hale getirilmiş olur. Şekil 4.3 de ivme spektrumundan talep spektrumuna geçiş ile ilgili bir grafik anlatım sunulmaktadır.



Şekil 4.3 İvme Spektrumundan Talep Spektrumunun Elde Edilmesi

4.2.4 Güçlendirme Stratejileri

4.2.4.1 Genel

Bu bölümde, bir güçlendirme stratejisi geliştirmek için kullanılan yollar açıklanacak ve bir bina için düşünülen ön güçlendirme tasarımının hangi koşullar altında, ne şekilde yapılacağına yönelik olarak bilgi verilecektir. Bu bilgiler, alternatif güçlendirme stratejilerinin tartışılmasını, bu stratejilerin tanımlanmış sismik eksiklikler ve tasarım kısıtlamaları altında uygulanabilirliğinin değerlendirilmesini, tasarım kısıtlamalarının ışığında ve seçilen stratejinin genelinde en uygun stratejinin seçimini, bu stratejiye uygun bir güçlendirme sisteminin belirlenmesini ve ön güçlendirme tasarımının gelişimini içerecektir.

Birçok yapı ve bu yapıların performans hedefleri doğrultusunda belirlenen birçok alternatif güçlendirme stratejisi ve sistemi, kabul edilebilir tasarım çözümleri içinde sonuçlandırılabilir. Öncelikli olarak mühendis, fizibilite ve uygulanabilirlik açısından birçok alternatifi değerlendirmeli ve bina sahibi ile birlikte, en uygun çözümü sağlayan stratejileri belirlemelidir. Ancak, bina sahibinin performans hedefleri belirli olmadan bu işlemlerin yapılabilmesi olası değildir.

Tasarım sonuçlanmadan önce, çözümün öne sürülen kriterlere göre yeterliliğinin kontrol edilmesi gerekir. Eğer yeterlilik sağlanmamış ise, yeni tercihler veya gerekli değişiklikler esas alınarak ön tasarım tekrar edilmelidir. Yeni çözümün yeterliliği sağlandıktan sonra, tasarım çalışmalarına devam edilebilir.

4.2.4.2 Tanımlar

Güçlendirme Stratejileri

Güçlendirme stratejisi, yapının muhtemel sismik performansını geliştirmeyi veya diğer bir deyişle, sismik riski kabul edilebilir bir düzeye indirmeyi amaçlayan temel bir yaklaşımdır. Teknik ve idari olmak üzere iki tip strateji tipi vardır. Teknik ve idari anlamdaki strateji tiplerinin her ikisi de sismik riskin azalmasını sağlamak için kullanılırlar. Teknik stratejiler, binanın direncinin arttırılması, kritik eksikliklerin giderilmesi, rijitliğin değiştirilmesi ve talebin azaltılması gibi bir takım yaklaşımlar içerir. İdari stratejiler ise kullanımın değişmesi ve aşamalı inşa gibi yaklaşımları içerir.

Güçlendirme Sistemi

Güçlendirme sistemi, seçilen stratejiye ulaşmak için kullanılan özel bir yöntemdir. Örneğin, eğer temel strateji yapının dayanımını arttırmak ise, o zaman bu stratejiyi başarıya ulaştırmak için kullanılan sistemler yapıya yeni bir perdenin eklenmesi, varolan perdenin kalınlaştırılması veya çaprazlı çerçeveler oluşturulması olmalıdır. Seçilen sistem benimsenen stratejiye yeter derecede uygun bulunursa, yeni bir güçlendirme sistemi seçmeye gerek kalmaz. Ancak, böyle olmayan durumlarda tasarımın tamamlanması için yeni bir güçlendirme sistemi seçilir.

Tasarım Kısıtlamaları

Tasarım kısıtlamaları, binanın yapısal karakterlerine bağlı olan, güçlendirme stratejisi veya sistemi haricindeki etmenlerin tümüdür. Verilen bir güçlendirme stratejisinin uygulanabilirliğine etki edebilen tasarım kısıtlamaları, tasarlanan performans hedefi, tasarım ve inşa yapım maliyetleri, proje programı, tarihsel dokuyu koruma gerekleri, bina görünüm ve yerleşiminin etkileri ve proje inşası sırasında ve sonrasında binanın kullanımı gibi etmenleri içerir.

4.2.4.3 Alternatif Güçlendirme Stratejileri

Teknik ve idari stratejilerin büyük bir kısmı mevcut bir yapının doğal sismik riskinin azaltılmasını amaçlar. Teknik stratejiler, tasarım depremi için yapının temel talep ve tepkisinin değiştirilmesi biçimindeki yaklaşımlardır. Bu stratejiler sistemin dayanımının arttırılmasını, sistemi rijitleştirmeyi, deformasyon kapasitesini arttırmayı, enerji yutma kapasitesini geliştirmeyi ve deprem talebini azaltmayı içerir.

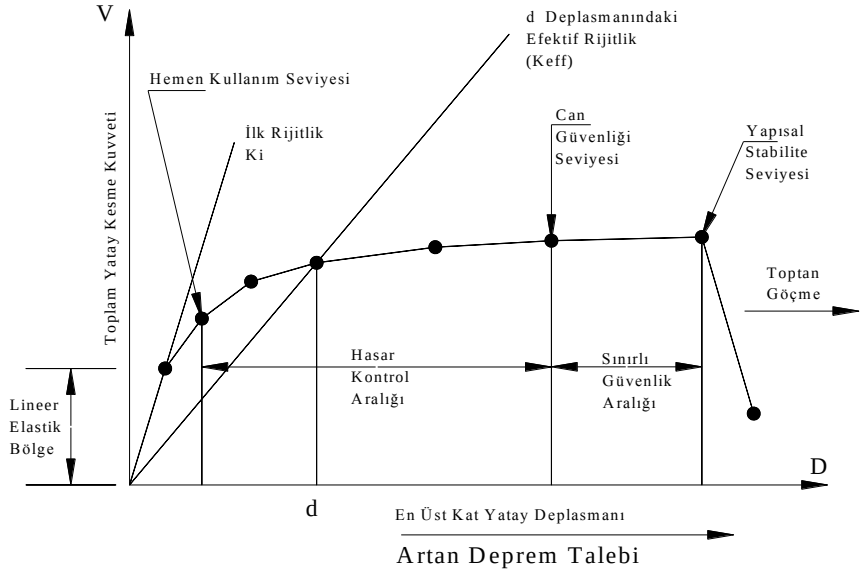
Teknik Stratejiler

Deprem yer hareketi etkisindeki bir yapıda yatay ötelemeler meydana gelir ve buna bağlı olarak yapıyı oluşturan elemanlar şekil değiştirirler. Tepkinin az olduğu seviyelerde, elemanlardaki şekil değiştirmeler elastik sınırlar içerisinde kalır ve yapıda hasar meydana gelmez. Tepkinin yüksek olduğu seviyelerde ise, elemanlardaki şekil değiştirmeler elastik sınırları aşar ve plastik şekil değiştirmeler meydana gelerek yapıda bir takım hasarlar oluşur. Bir yapı sisteminin güvenilir bir sismik performansa sahip olması için, öngörülen performans hedefine karşı gelen yatay yer değiştirmeye neden olan sınır deprem etkilerine karşı yeterli bir dayanım sağlanmalıdır. Sistemin yatay yük dayanım yeteneğini etkileyen temel faktörler binanın kütlesi, rijitliği, sönümü ve bu sönümün şekli, elemanlarının deformasyon kapasiteleri ve yer hareketinin karakteridir.

Mevcut yapıları değerlendirmek için sismik talep ve kapasiteyi karşılaştıran birçok yöntem bulunmaktadır. Ayrıca bu yöntemler, teknik güçlendirme stratejilerinin etkinliklerini kontrol etmek için de kullanılabilirler. Bu yöntemlerden biri kapasite spektrum yöntemidir.

Kapasite spektrumu doğrusal olmayan statik analiz ile elde edilir. Doğrusal olmayan statik analiz sonucunda, ele alınan yapı için bir kapasite eğrisi bulunur. Kapasite eğrisinin ordinatları toplam yatay sismik taban kesme kuvveti “V” den, apsisleri ise bu kesme kuvvetine karşı gelen, yapının en üst kat yatay yer değiştirme değerlerinden oluşur. Eğer yapı, sınırsız doğrusal-elastik kapasiteye sahip ise bu eğri, yapının ilk rijitliğini temsil eden tek eğimli doğrusal bir çizgiden ibaret olur. Gerçekte, yapıyı oluşturan elemanlar sınırsız doğrusal-elastik kapasiteye sahip olmadıkları için, kapasite eğrisi gittikçe azalan bir eğimle devam eden ve birçok

doğru parçasının birleşiminden meydana gelen bir eğri formunu alır. Eğrinin azalan eğimli olmasının nedeni, yatay sismik kuvvetlerin artması sonucunda plastik şekil değiştirmelerin oluşması ve bunlara bağlı olarak yapının rijitliğinde meydana gelen yumuşama ve hasar oluşumudur. Herhangi bir yatay yük değeri ile bu yüke karşı gelen yer değiştirme değerinin eğri üzerinde bulunduğu nokta ile orijin noktasını birleştiren doğrunun eğimi, yapının bulunduğu yer değiştirme konumundaki efektif rijitliğini verir. Her yük artımında, sisteme ait kapasite eğrisinin eğriliğinin azalması, yani sistemin rijitlik kaybına maruz kalması son derece doğaldır. Şekil 4.4 de tipik bir kapasite eğrisi görülmektedir.



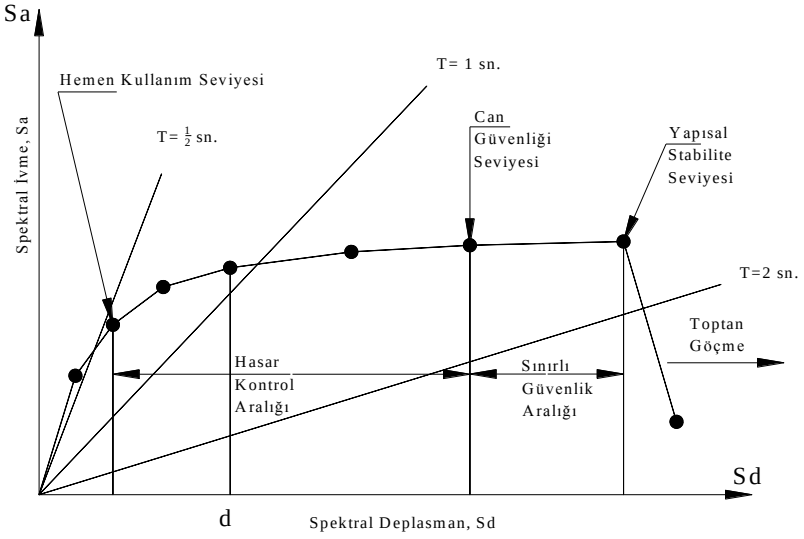
Şekil 4.4 Tipik Bir Kapasite Eğrisi

Şekil 4.4 deki siyah noktalar, analiz sırasında yapıda bazı önemli gelişmelerin olduğunu göstermektedir. Bu gelişmeler, yapıda herhangi bir elemanın akmaya başladığına, basınç alan bir elemanda burkulma meydana geldiğine veya yapısal bir kusurun ortaya çıktığına işaret eder.

Bir yapıda kapasite spektrum eğrisinin elde edilmesi için, taban kesme kuvveti (V) ve tepe noktası yatay yerdeğiştirme (d) değerlerinden oluşan kapasite eğrisinin, yapıya ait modal şekil vektörlerini ve modal kütle katılım katsayılarını kullanarak spektral ivme (S_a) ve spektral yer değiştirme (S_d) değerlerine dönüştürülmesi gerekir.

Böylece, kapasite eğrisinden kapasite spektrum eğrisine geçiş sağlanmış olur ve bu forma ADRS (*Acceleration-Displacement Response Spectra*) adı verilir.

Kapasite spektrum eğrisi üzerindeki herhangi bir noktayı orijine birleştiren doğru parçasının eğimi o noktada yapının efektif rijitliğine bağlı olan periyodunu verir. Kapasite eğrisine benzer şekilde, yatay yük etkisinin artması ile birlikte yumuşayan yapının açısal frekansı da azalır ve buna bağlı olarak yapının periyodu artar. Şekil 4.5 de tipik bir kapasite spektrum eğrisi gösterilmiştir.

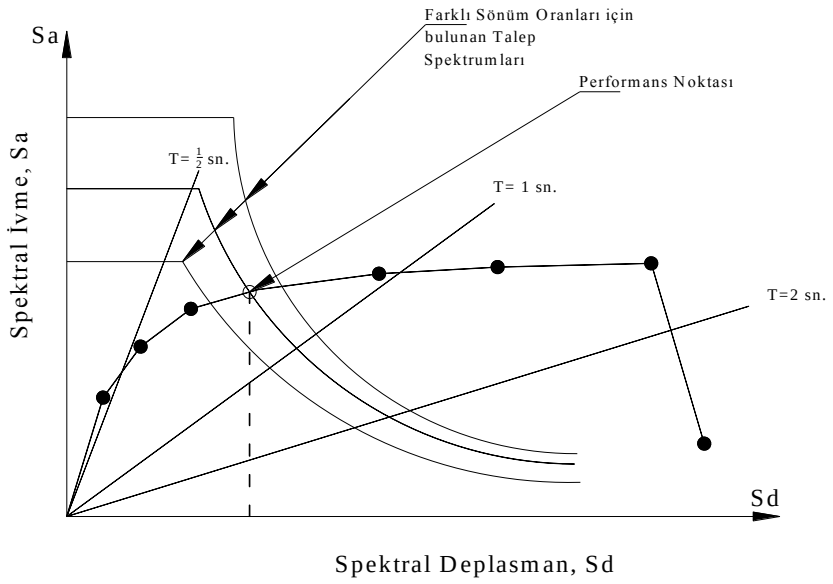


Şekil 4.5 Tipik Bir Kapasite Spektrum Eğrisi

Bir yapının kapasitesi ile, yapıya etkimesi olası deprem hareketine ait istem birbirinden bağımsız değildir. Bu ilişkinin en önemli belirtisi, kapasite eğrisinin kendisidir. İstem arttığında, yapıyı oluşturan elemanlar akar, yapının rijitliği azalır ve buna bağlı olarak periyodu artar. Kapasite eğrisinin kapasite spektrum eğrisine (ADRS) dönüştürülmesi bu ilişkiyi açık bir şekilde göstermektedir. Yumuşayan yapının periyodu arttığı için istemde azalma meydana gelir.

Bir diğer ilişki ise yapıya ait etkin sönümün değişimidir. Çok büyük ve düzgün bir çevrimsel eğriye sahip yapı daha fazla enerji yutacağından, yapıdaki sönüm miktarı artar ve istem spektrumu aşağıya indirgenir. Böylece, yapının yer değiştirme istemi de azalmış olur.

Kapasite spektrum metodu, elastik tepki spektrumunu kullanarak sismik talebi belirler. Talep ve kapasite spektrum eğrilerinin kesişme noktası bulunarak yapının performans noktası elde edilir. Kapasite ve talep miktarlarının eşit olduğu bu noktayı bulmak için kapasite spektrum eğrisi üzerinde tanımlı bir nokta ilk yaklaşım olarak alınır. Seçilen noktanın altında kalan çevrimsel enerjinin en büyük şekil değiştirme enerjisine oranlanması sonucunda yapıya ait çevrimsel sönüm miktarı elde edilmiş olur. Her yapının başlangıçtaki sönüm miktarı, %5 sönüme sahip elastik deprem spektrumuna karşı gelir ve bu değer çevrimsel sönüm miktarı ile toplanarak efektif sönüm oranı elde edilir. Efektif sönüm oranına bağlı olarak indirgenen talep spektrum eğrisi ile kapasite spektrum eğrisinin kesişim noktası başlangıçta seçilen noktaya yeter derecede yakın ise veya onunla çakışıyorsa, bu nokta yapının performans noktası olarak alınır. Bu koşul sağlanamamış ise, ardışık yaklaşıma devam edilerek aranan sonuçlar elde edilmeye çalışılır. Şekil 4.6 da, etkin sönüm miktarlarına bağlı olarak elde edilen talep spektrum eğrileri, kapasite spektrum eğrisi ve yapıya ait performans noktası görülmektedir.



Şekil 4.6 Performans Noktasının Yeri

Performans noktası bulunduğu anda bu noktanın öngörülen performans hedefini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Eğer performans hedefi, hasar kontrol aralığı olarak belirlenmiş ise yapı için belirlenen performans noktasının bu aralığa düşmüş

olması gerekir. Buna benzer çeşitli hedefler ortaya konulabilir ve uygulanacak olan güçlendirme sisteminin bu performans hedefini sağlaması gerekir.

Aşağıda, teknik strateji tipleri ana başlıkları ile sunulmaktadır.

1. Sistemi güçlendirmek ve rijitleştirmek
    a). Perdeler
    b). Çaprazlı çerçeveler
    c). Payandalar
    d). Moment aktaran rijit çerçeveler
    e). Diyaframların güçlendirilmesi

2. Deformasyon kapasitesini arttırmak
    a). Mantolama
    b). Kolonları kirişlerden daha güçlü yapmak
    c). Yerel rijitliği azaltma
    d). Ek mesnetlendirme

3. Sismik talebi azaltmak
    a). Taban yalıtımı
    b). Enerji yutucu sistemler
    c). Kütle azaltma

Görüldüğü gibi, birçok teknik strateji tipleri mevcuttur. Mühendis ve bina sahibi, belirlenen performans hedefi doğrultusunda bu stratejilerden birini veya bir kaçını seçebilir ve bununla ilgili güçlendirme sistemini analiz edebilir.

İdari Stratejiler

İdari strateji tipleri, tamamıyla bina sahibine bağlı stratejiler içerir. İki tip idari strateji tipi mevcuttur. Bunlardan ilki, binanın muhtemel performansının kabul edilebilirliği ile ilgili kriterleri sağlarken diğeri, yerine getirilen teknik stratejinin düzenlenmesini kapsar.

Belli başlı idari strateji tiplerine ilişkin başlıklar ve açıklamaları aşağıda sunulmaktadır.

1. Kullanım Değişimi: Bina kullanımına bağlı olarak belirlenen yapı önem faktörünün değiştirilmesi bu stratejinin kapsamını oluşturur. Böylece sismik risk azalımı üzerinde olumlu yönde oynama yapılabilir.

2. Yıkma: Bazı hallerde yapının sismik etkilere karşı güçlendirilme maliyeti bu iş için ayrılan bütçeyi aşabilir. Bu durumda bina sahibi için en uygun çözüm binanın yıkılması olabilir.

3. Geçici Güçlendirme: Binanın kısa süreli hizmeti için belirlenen güçlendirme stratejisidir. Bu tür strateji ile çok nadir karşılaşılır.

4. Aşamalı Güçlendirme: Bina sahibinin uzun vadedeki ekonomik kısıtlamaları nedeniyle binanın aşamalı bir biçimde zamana yayılarak güçlendirilmesi ile ilgili bir stratejidir.

5. Kullanım Süresince Güçlendirme: Bina sahibinin güçlendirme süresince ekonomik kaybının mümkün olduğunca az tutulması amacıyla güçlendirme süresi boyunca binadaki kullanımın devam etmesini sağlayan bir stratejidir.

6. Boş Binanın Güçlendirilmesi: Güçlendirme işleminin en hızlı biçimde tamamlanmasını sağlayan bir stratejidir.

7. Dış Güçlendirme: Bina içi fonksiyonların engellenmemesi amacıyla güçlendirme işleminin bina dış kısmında yapılmasını sağlayan stratejidir.

8. İç Güçlendirme: Bina dış görünümünün bozulması istenmeyen önemli veya tarihi anlamdaki binalarda güçlendirme işleminin bina içinde yapılmasını sağlayan stratejidir.

4.2.5 Doğrusal Olmayan Çözümleme ve Kapasite Spektrum Yöntemi

4.2.5.1 Genel

Bu bölümde, mevcut ve yeni yapılacak binaların performanslarının değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen analitik işlemlere yer verilecektir.

Bölüm 2 de değinildiği gibi, doğrusal (elastik) ve doğrusal olmayan (elastik olmayan) olmak üzere iki tür hesap yöntemi mevcuttur ve her ikisi de binaların performansının saptanması için kullanılabilir. Doğrusal analiz yöntemleri statik yatay kuvvet, dinamik yatay kuvvet ve talep - kapasite oranını kullanan elastik hesaplamaları içerir. En yaygın şekilde uygulanan doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ise, çok fazla karmaşık olan ve bu nedenle yeterince pratik olmayan zaman tanım aralığındaki (*Time History*) çözümlemedir. Basitleştirilmiş doğrusal olmayan analiz yöntemleri ise sırasıyla, en büyük yer değiştirmeyi tahmin etmek için kapasite eğrisi (*pushover curve*) ve indirgenmiş tepki spektrum eğrisinin kesişimini kullanan kapasite spektrum yöntemini (*CSM*), en büyük yer değiştirmeyi tahmin etmek için itme (*pushover*) analizini ve geliştirilmiş eşit yer değiştirme yaklaşımını kullanan yer değiştirme katsayısı yöntemini [FEMA 273 (ATC 1996a)] ve temsili yapı ve ikincil (*secan*t) rijitliği kullanan ikincil (*Secant*) yöntemini [*City of Los Angeles, Division 1995 (COLA 1995*)] içerir.

Elastik analiz, yapının elastik kapasitesini iyi bir biçimde verir. Ancak, ilk akma olayının nerede ortaya çıkacağını belirtmesine rağmen, yapıya ait göçme mekanizmasının ve yeni iç kuvvet dağılımının nasıl olacağına dair bilgi vermez. Elastoplastik (doğrusal olmayan) analiz ise yapının gerçekte nasıl davranacağı ve göçmenin nasıl meydana geleceği hakkında kesin bir hüküm ortaya koyar. Böylece, yönetmeliklerdeki ve elastik davranış varsayımındaki belirsizlikler aşılmış olur.

Kapasite spektrum yöntemi, yeni ve mevcut binalar için, yapı sisteminin kapasite eğrisi ile deprem talebinin tepki spektrumunu grafik ortamda karşılaştıran çok kullanışlı ve yararlı bir araçtır. Yöntemin grafiksel sunumu, binanın deprem hareketine karşı oluşturduğu tepkiyi en iyi şekilde görmeyi sağlamaktadır.

4.2.5.2 Kapasite Spektrum Yöntemi

Kapasite ve talep (istem), performans analizinin iki anahtar terimidir. Talep, sismik yer hareketini temsil eder. Kapasite ise sismik talebe karşı yapının gösterdiği dayanımdır. Performans, talebi kontrol edebilen kapasiteye bağlıdır. Diğer bir değişle yapı, deprem talebine karşı mutlaka yeterli bir kapasiteye sahip olmalıdır. Yani yapının performansı tasarım hedefi ile uyuşmalıdır.

İtme analizini kullanan basitleştirilmiş doğrusal olmayan analizde (kapasite spektrum yöntemi, yer değiştirme katsayısı yöntemi) üç temel öğenin belirtilmesi gereklidir. Bunlar sırasıyla kapasite, talep (istem) ve performanstır.

Kapasite: Bir yapının kapasitesi, onu oluşturan bileşenlerinin her birinin şekil değiştirme kapasitelerine ve dayanımlarına bağlıdır. Elastik ötesi kapasiteyi belirlemek için itme analizine ihtiyaç duyulur. Bu yöntem, sabit düşey yükler ve sürekli artan yatay yükler altında ardışık elastik hesap adımlardan oluşan ve tüm sistemin elastik ötesi davranışını açığa çıkaran bir yöntemdir. İtme analizi, yapının stabilitesi bozulana kadar devam ettirilir ve yapının göçme mekanizması elde edilir. Yöntem ile ilgili geniş bilgi Bölüm 2 de verilmiştir.

Talep (İstem): Yer hareketi, yapıda karmaşık yer değiştirmelerin meydana gelmesine neden olur. Her bir zaman aralığında bu hareketin izini sürmek ve tasarım için bu hareketi kullanmak çok kere pratik olmayan bir durum doğurabilir. Geleneksel doğrusal hesap yöntemleri, tasarım koşullarını temsil eden bir yatay yük değerini kullanırlar. Doğrusal olmayan hesap yöntemlerinde ise, tasarım koşullarını sağlayan bir dizi yatay yer değiştirme değerlerini kullanmak daha düz ve kolay bir mantıktır. Verilen bir bina ve yer hareketi için, yer değiştirme talebi, yer hareketi süresince binanın beklenen en büyük tepkisinin bir değeridir.

Performans: Kapasite eğrisi ve yer değiştirme talebi belirlenen bir yapının performans noktası elde edilebilir. Performans noktasının kontrolü, yer değiştirme talebine karşı gelen yükler altında yapıyı oluşturan elemanların kabul edilebilir plastik şekil değiştirme limitlerinin ötesinde hasar görüp görmediğinin tespit edilmesini sağlar.

Kapasiteyi Belirlemek İçin Hesapta İzlenen Yol

Yapının kapasitesi, kapasite eğrisi adı verilen kuvvet-yer değiştirme bağıntısı ile temsil edilir. Bu eğriyi elde etmek için kullanılan en uygun yöntemler, taban kesme kuvveti ile en üst katın yatay yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi veren ardışık yaklaşım ve yük artımı yöntemleridir. Aşağıda, kapasitenin belirlenmesi için uygulanan hesapta izlenen yol sunulmaktadır.

1. Yapıyı oluşturan eleman ve bunların bileşenleri ile ilgili bünye denklemlerine ve diğer varsayımlara uyularak yapının bilgisayar hesap modeli oluşturulur, Bölüm 4.4.

2. Yapıyı oluşturan her bir eleman, birincil ve ikincil elemanlar olarak tanımlanmak üzere sınıflandırılır ve bunlar, bir numaralı maddede belirtilen özellikleri ile modellenirler.

3. Yatay kuvvetler, yapının kütle dağılımına ve temel mod şekline bağlı olarak katlara dağıtılır. Bu analizde ayrıca düşey yükler de tanımlanmalıdır.

4. Düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler altında zorlanan sistemin elemanları üzerindeki iç kuvvetler saptanır.

5. Taban kesme kuvveti ve bu kuvvetten dolayı oluşan, yapının en üst kat yerdeğiştirmesi hesaplanır.

6. Model, akma koşulunun sağlandığı ilk eleman çok küçük rijitliğe sahip olacak biçimde yeniden tanımlanır.

7. Arttırılmış yeni yatay yük değeri yapıya uygulanarak diğer elemanlarda da akma koşulları sağlatılır.

8. Artan yatay yükler ile birlikte taban kesme kuvveti ve en üst katın yatay yer değiştirmesi gözden geçirilir.

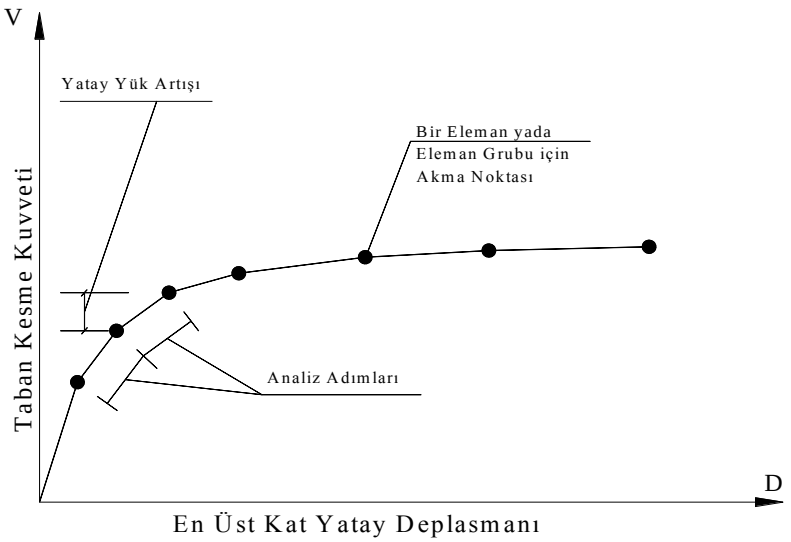
9. Yedinci ve sekizinci adımlar yeter sayıda tekrar edilerek yapı göçme sınır durumuna getirilir. Sınır durum halleri, P-Δ etkisi nedeniyle sistemin

stabilitesinin bozulması, yer değiştirmelerin hedeflenen performans seviyesini aşması veya sistemin toptan göçmesi ile tanımlanabilir.

10. Modelin genelinde veya bir bölümünde belirgin bir dayanım azalması meydana gelmesi, yapı sisteminin daha fazla yatay yük taşıyamayacağını ifade eder. Bu noktada, yeni kapasite eğrisi üçüncü adımdan itibaren tekrar oluşturulmaya başlanır. Bu işlem yapılırken, daha önce dayanımlarını yitiren elemanlar sistemden çıkarılmalıdır.

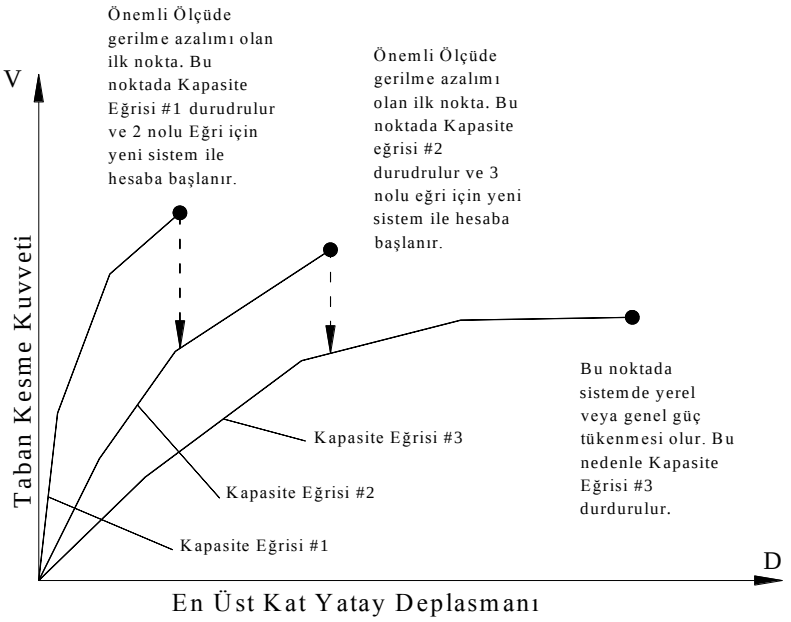
Sistem için çok sayıda ek kapasite eğrisi yaratılır ve bunların birleştirilmesi ile sistemin geneline ait bir kapasite eğrisi elde edilir. Bir eğrinin diğerine birleştirilmesi işleminde, önceki eğrinin uç noktasından, yapının o anda yaptığı yer değiştirme sabit kalacak biçimde, düşey bir doğru parçası diğer adımla elde edilen eğriye iz düşürülür.

Yukarıda açıklanan adımlara uygun olarak çizilen bir kapasite eğrisi Şekil 4.7 de gösterilmiştir.

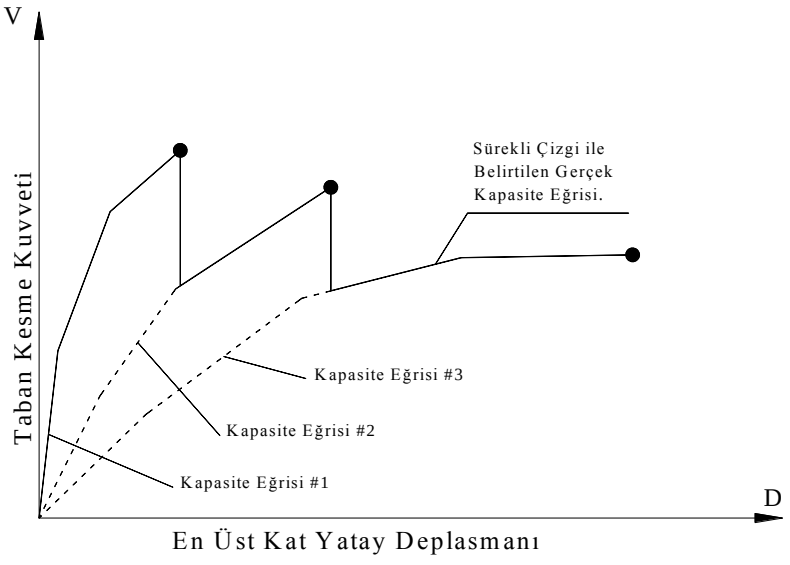


Şekil 4.7 Kapasite Eğrisi

Şekil 4.8 ve 4.9 da, adım adım yatay yükün artırılması ile elde edilen, düzgün olmayan bir kapasite eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.8 Adımlara Ait Kapasite Eğrileri



Şekil 4.9 Hesap Sonucunda Elde Edilen Gerçek Kapasite Eğrisi

Kapasite Spektrum Yöntemini Kullanarak Performansın Belirlenmesi

Performans noktasının sağlaması gereken iki koşul vardır.

1. Nokta, verilen yer değiştirme değeri için, sistemin doğrusal olmayan davranışını temsil eden kapasite eğrisi üzerinde bulunmalıdır.

2. Nokta, aynı yer değiştirme değerinde, yapıda doğrusal olmayan talebi temsil eden ve %5 lik elastik tasarım spektrumundan indirgenen talep spektrum eğrisi üzerinde bulunmalıdır.

Bu yöntem için, spektral indirgeme katsayıları efektif sönüme bağlı olarak verilir. Efektif sönüm miktarı, kapasite eğrisinin, tahmin edilen talep spektrumunun ve ortaya çıkan çevrimsel döngünün şekline bağlıdır. Yapıda görülen olası kusurlar, teorik olarak hesaplanan eşdeğer viskoz sönüm değerinin azaltılması şeklinde göz önüne alınır.

Genel halde, performans noktasının tespiti, yukarda belirtilen iki hususu sağlayacak biçimde deneme yanılma yoluyla yapılabilir. Ancak bu bölümde, deneme yanılma yöntemini standart hale getiren ve ardışık yaklaşımı basitleştiren üç adet yaklaşım verilecektir. Bu alternatif yaklaşımlar, kapsam ve mantık bakımından aynı olmakla beraber, işlem tarzları ve uygulanan grafik teknikler bakımından kendi içlerinde farklılık gösterirler. Bu yaklaşımlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Yaklaşım A: Bu yaklaşımda daha çok analitik bir işlem uygulanır. Yaklaşımlar içinde en basit olanı olduğu için performansa dayalı tasarım kavramını yeni kullananların genellikle başvurduğu bir yaklaşımdır.

Yaklaşım B: Kapasite eğrisi üzerinde iki adet idealleştirme doğrusu ile basitleştirilen bir yaklaşım olup, Yaklaşım A da olduğu gibi analitik yönü grafiksel yönünden daha ağır basmaktadır.

Yaklaşım C: Performans noktasının bulunması için kullanılan tamamen grafiksel bir yoldur. Yaklaşımlar arasında, kapasite spektrum yönteminin genel kavramına ve matematik modeline en uygun olanıdır.

Kapasite Spektrum Yönteminin Kuramsal Gelişimi

Kapasite spektrum yöntemini kullanmak için yapıya ait kapasite eğrisinin, kapasite spektrum (ivme–yer değiştirme tepki spektrumu) eğrisine dönüştürülmesi gerekir. Bilindiği gibi, kapasite spektrum eğrisinin düşey ekseni spektral ivmeyi, yatay ekseni ise spektral yer değiştirmeyi göstermektedir. Dönüştürme işlemi için bazı hesaplamalar yapılması gerekir.

$$S_{ai} = (V / W) / \alpha_1 \tag{4.2}$$

$$S_{di} = \Delta_{roof} / (PF_1 \Phi_{1,roof}) \tag{4.3}$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1 / g)\right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{N} (wi / g)\right]\left[\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1^2 / g)\right]} \tag{4.4}$$

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1 / g)}{\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1^2 / g)}\right] \tag{4.5}$$

Burada

S_{ai} = spektral ivme

S_{di} = spektral yer değiştirme

W = yapının toplam ağırlığı

V = taban kesme kuvveti

α_1 = birinci doğal moda ait modal kütle katsayısı

Δ_{roof} = en üst kat yer değiştirmesi

PF_1 = birinci doğal moda ait modal katılım çarpanı

$\Phi_{1,roof}$ = en üst katta birinci modun genliği

wi/g = (i) sayılı kata ait kütle

N = kat sayısı

olarak tanımlanmaktadır.

Kapasite eğrisinin kapasite spektrum eğrisine dönüştürülmesi sırasında ilk olarak, Denklem (4.4) ve (4.5) ile verilen PF_1 modal katılım faktörü ve α_1 modal kütle katsayısı değerlerinin elde edilmesi gerekir. Bu değerler bulunduktan sonra Denklem (4.2) ve (4.3) ile verilen S_a ve S_d değerleri hesaplanır.

Birçok mühendisin yakından bildiği tepki spektrumu formu (S_a–T) spektrum eğrisidir. Buna karşılık, çok az sayıda mühendis tepki spektrumunun (S_a–S_d) ADRS formu hakkında bilgi sahibidir. Şekil 4.10 da, aynı spektrumun her iki formdaki durumları gösterilmektedir. ADRS formunda, orijinden çıkan radyal doğrular sabit periyotları göstermektedir. ADRS formu üzerinde herhangi bir noktadaki periyot

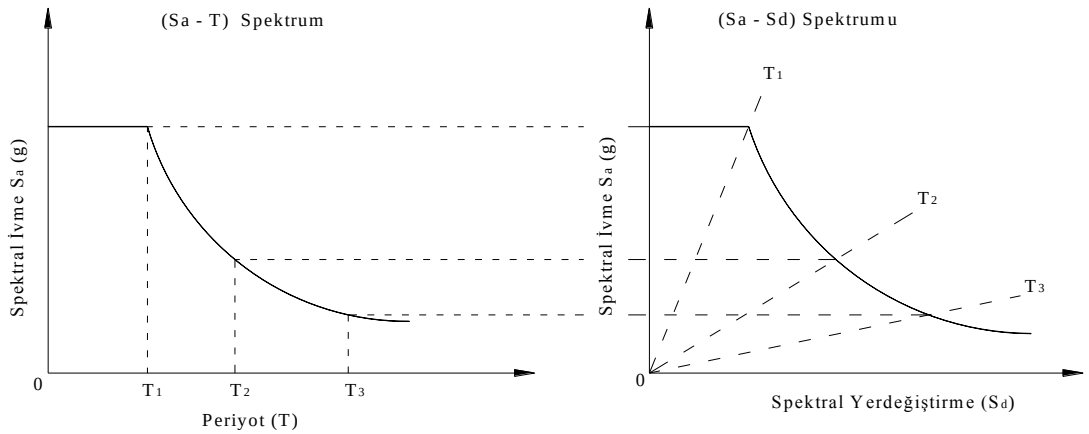
$$T = 2\pi \, (S_d / S_a)^{1/2} \tag{4.6}$$

denklemi ile hesaplanır.

Benzer şekilde, geleneksel spektrum eğrisi üzerinde spektral deplasman değerinin belirlenmesi için

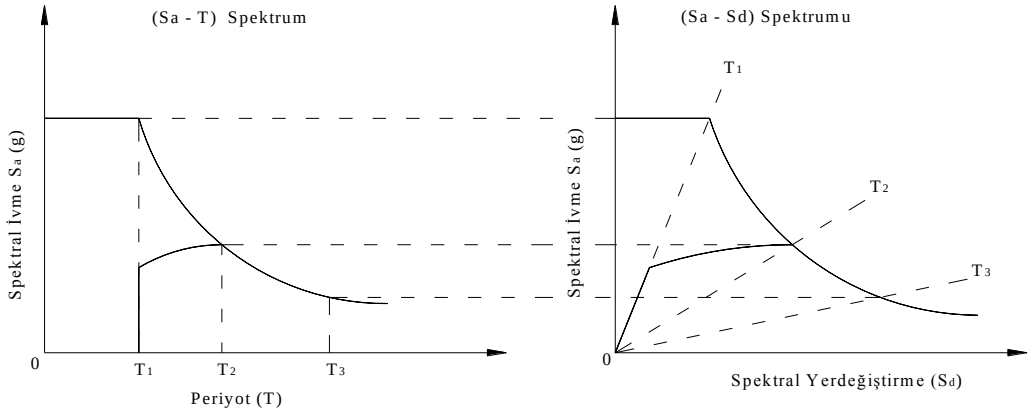
$$S_d = (S_a T^2) / (4\pi^2) \tag{4.7}$$

denklemi kullanılır.



Şekil 4.10 İvme Spektrumundan Talep Spektrumunun Elde Edilmesi

Şekil 4.11 de, aynı kapasite spektrum eğrisinin her iki tepki spektrum formundaki grafik gösterimi verilmektedir. Bu şekle göre, (S_a-T) formundaki kapasite spektrum eğrisinin tepki spektrum eğrisini kestiği noktalara ait periyot değerlerinin T_1 ve T_2 olduğu görülmektedir. Aynı kapasite spektrum eğrisinin ADRS formundaki spektrum eğrisini kestiği noktaları orijine birleştiren doğru parçalarının, T_1 ve T_2 periyotlarına ait olan radyal doğrular olması gerekir.



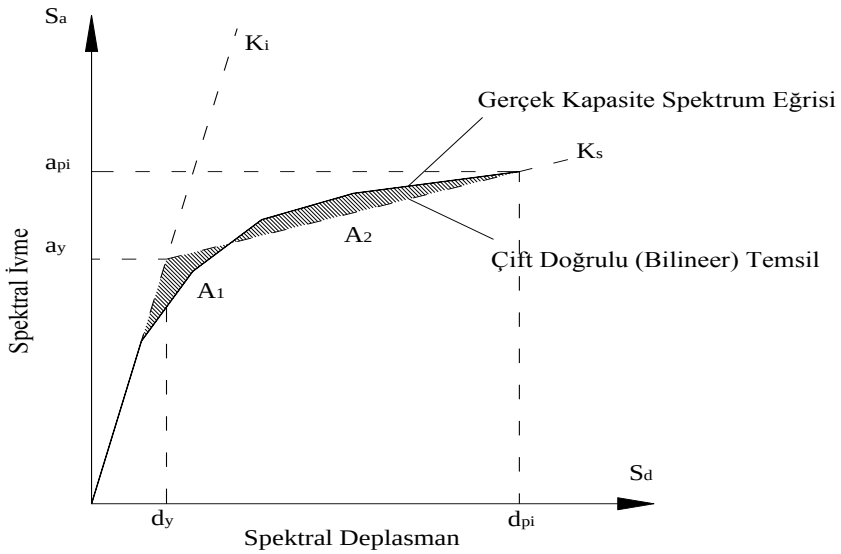
Şekil 4.11 Kapasite Spektrum Eğrisinin, (Sa-T) ve (Sa-Sd) Tepki Spektrum Eğrileri Üzerindeki Gösterimi

Kapasite Spektrum Eğrisinin Çift Doğru ile Temsil Edilmesi

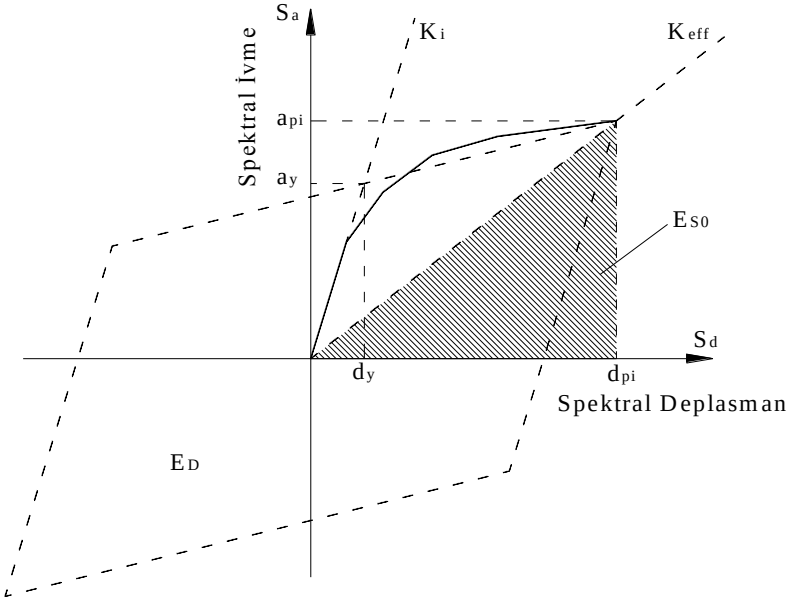
Kapasite spektrum eğrisinin çift doğru ile temsil edilmesi suretiyle yapılan yaklaşımın amacı, efektif sönüm miktarının ve azaltılmış talep spektrum eğrisinin daha basit bir biçimde elde edilmesini sağlamaktır. Kapasite spektrum eğrisinin çift doğru ile temsil edilebilmesi için öncelikle, kapasite spektrum eğrisi üzerinde a_{pi} ve d_{pi} spektral ivme ve yer değiştirme değerlerinin seçilmesi gerekir. Bu noktalar aracılığı ile yapıya ait çevrimsel enerji değeri ve en büyük şekil değiştirme enerjisi elde edilir. Buradan, yapıya ait eşdeğer ve efektif sönüm miktarı saptanır ve bu değerlere bağlı olarak talep spektrum eğrisi indirgenir. Elde edilen talep spektrum eğrisindeki a_{pi} spektral ivme değeri ve buna karşı gelen d_{pi} spektral yer değiştirme değeri ikilisinin kapasite spektrum eğrisi üzerinde seçilen a_{pi} ve d_{pi} değerleri ile birebir örtüşmesi gerekir. Eğer bu noktalar örtüşüyor ise yapının performans noktası saptanmış olur. Aksi halde, ardışık yaklaşımın ikinci adımı için yeni a_{pi} ve d_{pi}

değerlerinin belirlenmesi ve yukarıda açıklanan işlemlerin benzer şekilde tekrarlanması gerekir.

Şekil 4.12 de, kapasite spektrum eğrisinin çift doğru ile temsil edilmiş hali görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, kapasite spektrum eğrisinin temsil edildiği doğruların eğimleri K_i ve K_s ile gösterilmektedir. K_i, ilk veya başlangıç rijitliği olarak bilinir. Sistemin elastik sınırlar içerisindeki rijitliği olan bu değer, yapıda meydana gelebilecek herhangi bir rijitlik kaybına kadar varlığını sürdürür. Bilindiği gibi rijitlik kaybı herhangi bir kesitin akması, yerel yapı kusurlarının ortaya çıkması veya basınç elemanlarının burkulması ile kendini gösterir. K_s, sekant rijitliği veya ikincil rijitlik olarak isimlendirilir. K_s rijitliğinin değeri, kapasite spektrumu eğrisi altında kalan alan ile çift doğru ile temsil edilen kapasite spektrum eğrisi altında kalan alanın birbirine yeter derecede yakın olması sağlanacak şekilde elde edilir. Şekil 4.12 de görüleceği gibi, bunun için A_1 ve A_2 alanlarının birbirine eşit olması yeterli olacaktır. Eğrilerin altındaki alan, yapıda söndürülen enerjiyi verir. K_i ve K_s doğrularının kesiştiği noktadaki spektral ivme ve spektral yer değiştirme değerleri sırasıyla a_y ve d_y ile tanımlanır. Buradaki y indisi, akmayı temsil etmektedir ve bu nokta, çift doğru ile idealleştirilen edilen kapasite spektrum eğrisinin pekleşerek akmaya başladığını göstermektedir.



Şekil 4.12 Çift Doğru ile Temsil Edilen Kapasite Spektrum Eğrisi



Şekil 4.13 Spektral İndirgeme İçin Sönüm Miktarının Tespiti

Efektif Sönümün Belirlenmesi ve %5 Sönümlü Tepki Spektrumunun İndirgenmesi

β_{eq} efektif sönümü, Denklem (4.8) de gösterildiği gibi, yapının doğasında bulunan viskoz sönüm ile çevrimsel sönümün bir kombinasyonudur.

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 0.05 \tag{4.8}$$

Burada, β_0 eşdeğer viskoz sönüm olarak temsil edilen çevrimsel sönümü, denklemdeki ikinci terim ise yapının doğasında varolan %5 lik viskoz sönüm oranını göstermektedir.

Çevrimsel sönüm (eşdeğer viskoz sönüm), yapının elastik ötesi şekil değiştirmesi sonucu ortaya çıkar ve Denklem (4.9) ile hesaplanır.

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi}\frac{E_D}{E_{S0}} \tag{4.9}$$

Bu bağıntıda

E_D = çevrimsel sönüm ile yutulan enerji miktarı

E_{S0} = en büyük şekil değiştirme enerjisidir.

Şekil 4.14 referans olarak alınırsa E_D değeri

$E_D = 4*$(Şekil 4.14 deki taralı alan)

$= 4*(a_{pi}d_{pi} - 2*A_1 - 2*A_2 - 2*A_3)$

$= 4*[\ a_{pi}d_{pi} - a_y d_y - (d_{pi} - d_y)(a_{pi} - a_y) - 2d_y(a_{pi} - a_y)]$

$= 4*(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})$ (4.10)

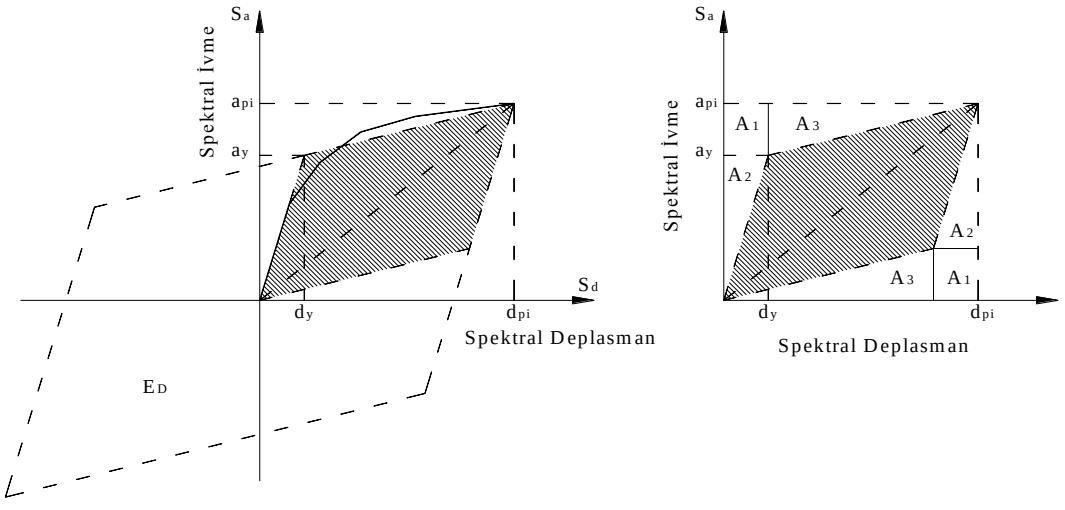
şeklinde hesaplanır.

Yine, Şekil 4.13 ve 4.14 uyarınca, en büyük şekil değiştirme enerjisinin değeri

$E_{S0} = a_{pi}d_{pi} / 2$ (4.11a)

$E_{S0} = k_{efektif}\ d_{pi}^2$ (4.11b)

denklemleri ve grafik yardımı ile elde edilir, (Şekil 4.13 deki taralı alan).



Şekil 4.14 Çevrimsel Sönüm Nedeniyle Yutulan Enerjinin Hesabı

Denklem (4.10) ve (4.11), Denklem (4.9) da yerine konularak

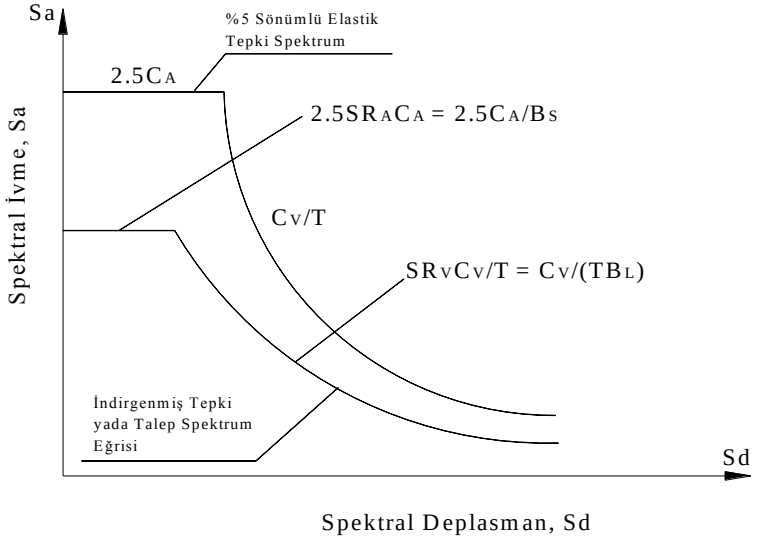
$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi}\,\frac{4(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}/2} = \frac{2}{\pi}\,\frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi} d_{pi}} = 0.637 * \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi} d_{pi}} \qquad (4.12)$$

eşitliği elde edilir.

Sönüm oranı yüzde olarak ifade edildiği için, Denklem (4.8) ve (4.12) düzenlenerek bir arada yazılırsa Denklem (4.13) elde edilir.

$$\beta_{eq} = \beta_0 + 5 = 63.7 * \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \qquad (4.13)$$

Denklem (4.13) ile ifade edilen eşdeğer viskoz sönüm miktarı, Newmark ve Hall [18] tarafından geliştirilen eşitlikler aracılığı ile spektral azaltma katsayılarının tahmininde kullanılır. Şekil 4.15 de görüldüğü gibi, spektral azaltma katsayıları, kritik sönüm miktarı olan %5 lik elastik sönüm miktarına ait talep spektrum eğrisinin daha büyük bir sönüm miktarına ait olan talep spektrum eğrisine dönüştürülmesini veya ona indirgenmesini sağlar. Sönüm oranının %25 den küçük olduğu değerler için Denklem (4.13) ve Newmark ve Hall eşitlikleri kullanılarak hesaplanan spektral azaltma faktörü, FEMA Rehberi ve Taban Yalıtım yönetmeliklerindeki benzer faktörlerle uyuşur.



Şekil 4.15 İndirgenmiş Tepki Spektrumu

Şekil 4.13 de gösterilen idealleştirilmiş çevrimsel döngü, göreli olarak kısa zamanlı yer sarsıntısı etkisinde olan (belirgin bir biçimde elemanlarda dayanım kaybı oluşturmaya yetersiz döngü) ve eşdeğer viskoz sönüm oranı %30 dan az olacak şekilde detaylandırılmış binalar için mantıklı bir yaklaşımdır. Bu durumun dışında kalan diğer hallerde, idealleştirilmiş çevrimsel döngü, eşdeğer viskoz sönüm miktarının doğru bir biçimde elde edilememesine neden olur. Çünkü çevrimsel döngü mükemmelden uzak kalır ve sonuçlarda sapma meydana gelir.

ATC 40 [1] dokümanında incelenen yapı türleri, mevcut ve eski yapılar olduğu için sünek bir detaylandırmadan söz edilemez. Bu durumda, çevrimsel döngüleri idealin dışında kalır ve sonuçlarda sapmalar meydana gelir. Bu nedenle, Denklem (4.13) ile elde edilen eşdeğer viskoz sönüm miktarında düzeltme çarpanı kullanılarak ideal hale getirilmeye çalışılır. Sonuç olarak, Denklem (4.13) ün yeni hali

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 = \kappa * 63.7 * \frac{(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \qquad (4.14)$$

şeklinde düzenlenir.

Bu denklemdeki κ - faktörü, yapının davranışına bağlıdır. Yapı davranışı ise sismik hareketin süresine ve yapının sismik etkilere karşı kaliteli olarak üretilip üretilmediğine bağlıdır. Kolaylık sağlamak amacıyla, ATC 40 [1] dokümanında yapı davranış tipleri üçe ayrılmıştır.

1. Yapı davranış tipi A: Stabil bir yapıyı temsil eder. A tipi yapı davranışına sahip olan bir binadaki çevrimsel döngü, idealleştirilmiş haline en yakın çevrimsel döngüye sahiptir ve düşük sönüm miktarlarında κ – faktörü 1.0 iken daha büyük sönüm miktarlarında 0.77 alt sınır değerine kadar geriler.

2. Yapı davranış tipi B: Sismik yer hareketi süresi fazla olan yeni binalara ve sismik yer hareketi süresi kısa olan orta kalitedeki mevcut binalara uygun bir davranış tipidir. Düşük sönüm miktarlarında κ – faktörü en büyük 0.67 değerini alırken, büyük sönüm miktarlarında 0.53 alt sınır değerine kadar geriler.

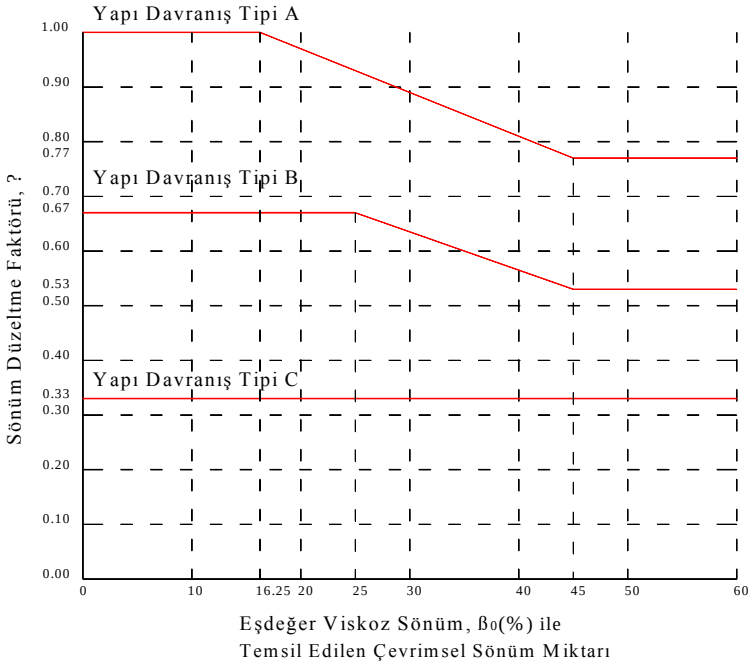
3. Yapı davranış tipi C: Sismik hareket süresi uzun olan orta kalitedeki mevcut binalara ve sismik yer hareketi süresinden bağımsız olarak, zayıf kalitedeki mevcut binalara uygun bir davranış tipidir. Düşük ve yüksek sönüm miktarlarında κ – faktörü 0.33 sabit alt sınır değerini alır.

Tablo 4.12 Yapı Davranış Tipinin Belirlenmesi

Deprem Süresi	Genel Olarak Yeni Bina	Ortalama Mevcut Bina	Zayıf Mevcut Bina
Kısa	Tip A	Tip B	Tip C
Uzun	Tip B	Tip C	Tip C

Tablo 4.13 κ – Faktör Değerleri

Yapısal Davranış Tipi	B_0 (yüzde)	κ
Tip A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 * \frac{0.51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Tip B	≤ 25	0.67
	> 25	$0.845 * \frac{0.446\ (a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Tip C	Herhangi bir Değer	0.33



Şekil 4.16 Eşdeğer Viskoz Sönüm Miktarına Bağlı Sönüm Düzeltme Faktörü, κ

Spektral Azaltma Faktörlerinin (SR_A ve SR_V) Sayısal Hesabı

Spektral azaltma faktörleri SR_A(= 1 / Bs) ve SR_V(= 1 / B_L) nin hesabı için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır.

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \tag{4.15}$$

$$= \frac{3.21 - 0.68 \ln\left(\frac{63.7\kappa(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5\right)}{2.12}$$

≥ Tablo 4.13 deki değerler.

$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \tag{4.16}$$

$$= \frac{2.31 - 0.41 \ln\left(\frac{63.7\kappa(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5\right)}{1.65}$$

≥ Tablo 4.13 deki değerler.

SR_A ve SR_V, Tablo 4.14 deki değerlerden daha az olamaz.

Tablo 4.14 İzin Verilen En Küçük Spektral Azaltma Faktörleri

	Yapı Davranış Türü : A	Yapı Davranış Türü : B	Yapı Davranış Türü : C
SR_A	0,33	0,44	0,56
SR_V	0,50	0,56	0,67

Denklem (4.15) ve (4.16) incelendiğinde, spektral azaltma faktörlerinin yapının efektif sönüm miktarına bağlı oldukları görülebilir. Bu nedenle, her farklı yapı davranış tipi için efektif sönüm oranına bağlı olarak bulunan spektral sönüm miktarları tablo halinde listelenmektedir. Tablo 4.15 te, spektral azaltma faktörlerinin efektif sönüm miktarına göre değişimi, farklı yapı davranış tiplerine bağlı olarak verilmiştir.

Tablo 4.15 Efektif Sönüme ve Yapı Davranış Tipine Bağlı Spektral Azaltma Faktörleri

	Yapı Davranış Türü : A			Yapı Davranış Türü : B			Yapı Davranış Türü : C		
βo	β_{eff}	SR_A	SR_V	β_{eff}	SR_A	SR_V	β_{eff}	SR_A	SR_V
0,00	0,05	1,00	1,00	0,05	1,00	1,00	0,05	1,00	1,00
0,05	0,10	0,78	0,83	0,08	0,83	0,87	0,07	0,91	0,93
0,15	0,20	0,55	0,66	0,15	0,64	0,73	0,10	0,78	0,83
0,25	0,28	0,44	0,57	0,22	0,53	0,63	0,13	0,69	0,76
0,35	0,35	0,38	0,52	0,26	0,47	0,59	0,17	0,61	0,70
$\geq$ 0,45	0,40	0,33	0,50	0,29	0,44	0,56	0,20	0,56	0,67

Kapasite ve Talep Spektrumlarının Kesişimi

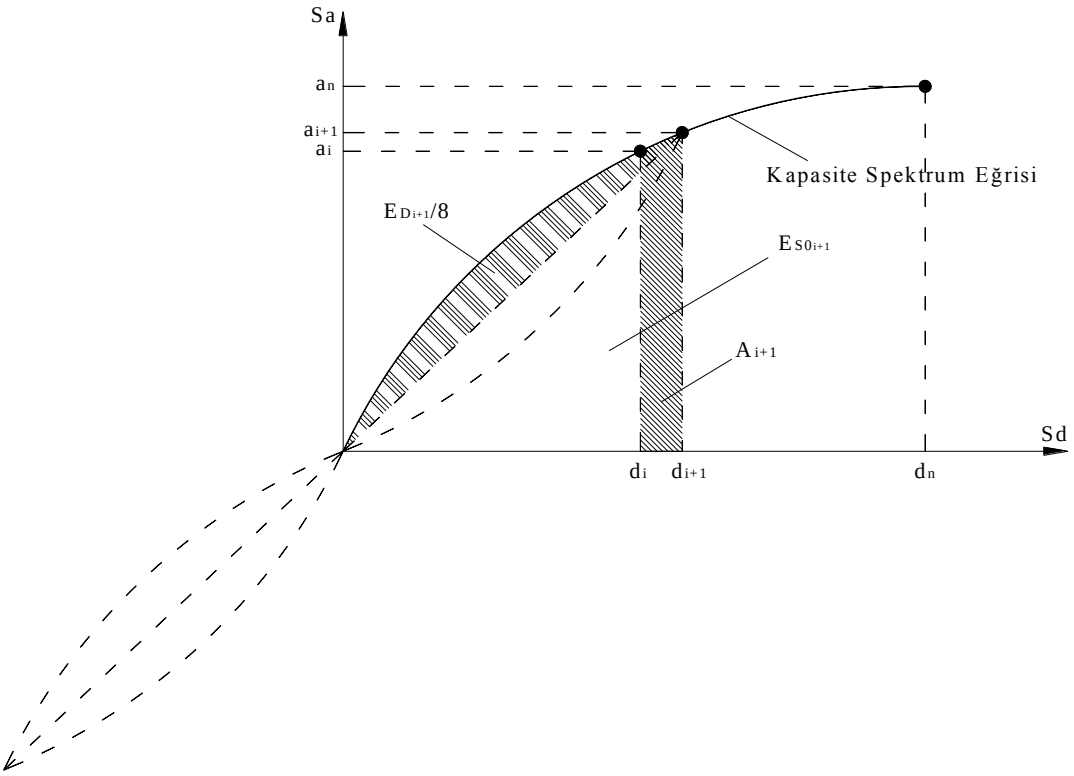
Kapasite ve talep spektrumlarının kesiştiği noktadaki yer değiştirme değeri d_i nin, ardışık yaklaşım için seçilen d_{pi} yer değiştirme değerine %5 den daha az bir hata payı ile yakın olması gerekir. Yani, iki değer arasındaki ilişki ($0.95\ d_{pi} \leq d_i \leq 1.05\ d_{pi}$) biçiminde olmalıdır. Eğer ardışık yaklaşım için seçilen yer değiştirme değeri bu kıstası sağlamaz ise, ardışık yaklaşıma başka bir nokta ile başlanır ve işlemler tekrarlanarak yukarıda verilen kriterlere uyulup uyulmadığı kontrol edilir. Kesişim noktası, performans noktası olarak bilinir. Performans noktası, kabul edilen sismik yer hareketi talebi için yapıdan beklenen en büyük yapısal yer değiştirmeyi temsil eder.

Eğer kapasite spektrum eğrisi Şekil 4.9 deki gibi "testere dişi" biçimli bir eğri olursa, sonuç kapasite spektrumu, yapıyı oluşturan elemanların direnç kaybına bağlı olan birçok kapasite spektrum eğrisinin oluşumuna zemin hazırlar ve bu durumda performans noktasının tespiti için özel çaba sarf edilmesi gerekir. Çift doğru ile temsil edilen kapasite spektrumunda ise kapasite spektrum eğrisi karmaşık değil tek bir eğri ile temsil edilir.

Kapasite Spektrum Eğrisinin Kendisi ile Temsil Edilmesi

Bilgisayar ile yapılan performansa dayalı tasarım ve değerlendirmede, elde edilen kapasite spektrum eğrisinde herhangi bir idealleştirme yapılmadan da sonuca gidilebilir. Buradaki esas, kapasite spektrum eğrisi altında kalan alanın toplanmasına

dayanır. Böylelikle, çevrimsel enerji ve en büyük şekil değiştirme enerjisi bulunarak yapıya ait efektif sönüm miktarı elde edilebilir. Kapasite spektrum eğrisi üzerindeki her noktaya ait spektral ivme ve yer değiştirme değerleri bilinmektedir. Bu noktaların her biri baz alınarak yapılan hesaplamalarda, her noktaya ait efektif sönüm miktarı elde edilebilir. Bulunan efektif sönüm miktarlarına karşı gelen spektral azaltma faktörlerinin tespiti ile birlikte indirgenmiş talep spektrum eğrisi elde edilebilir. Kapasite spektrum eğrisi üzerindeki spektral ivme değerlerine karşı gelen spektral yer değiştirme değerleri ile indirgenmiş talep spektrumunda aynı spektral ivmeye karşı gelen spektral yer değiştirme değerleri karşılaştırılır ve %5 lik hata yaklaşımına sahip olan nokta, performans noktası olarak belirlenir. Şekil 4.17 de, kapasite spektrum eğrisinde idealleştirme yapılmadan performans noktasının tespitine dayanan bir grafik anlatım gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Kapasite Spektrum Eğrisinde İdealleştirme Yapılmadan Performans Noktasının Tespiti

Performans noktasının, kapasite spektrum eğrisinde hiçbir idealleştirme yapılmadan belirlenebilmesi için aşağıdaki işlem sırası izlenir.

Öncelikle doğrusal olmayan analiz yapan programlar yardımı ile yapı hedeflenen yer değiştirme değerine kadar itmeye tabi tutulur (bakınız: Deformasyon Kontrollü Analiz, Bölüm 2). Bu yapılırken, hedeflenen yer değiştirmeye kaç adımda yaklaşılacağına dair sayısal bir bilgi programa girilir. Eğer adım sayısı az seçilirse doğru sonucu yeter yaklaşıklıkla bulmak zorlaşır. Buna karşılık, adım sayısı ne kadar fazla seçilirse sonuca da o kadar doğru bir biçimde ulaşılır. Şekil 4.17 de, (i+1) sayılı adımdaki durum gösterilmektedir. (i+1) sayılı adımda, Denklem (4.11) kullanılarak en büyük şekil değiştirme enerjisi bulunur.

$$E_{S0(i+1)} = \frac{a_{(i+1)} * d_{(i+1)}}{2} \tag{4.11}$$

Kapasite Spektrum eğrisinde (i) ve (i+1) numaralı adımlar arasındaki alan, diğer bir deyişle, enerji miktarı Denklem (4.17) yardımı ile hesaplanır. Bu durumda, (i+1) numaralı adıma kadar, kapasite spektrum eğrisi altında kalan toplam alanı bulmak çok kolaylaşır. Denklem (4.18) ile kapasite spektrum eğrisi altında kalan toplam alan elde edilir.

$$A_{(i+1)} = \left(\frac{a_i + a_{(i+1)}}{2}\right) * (d_{(i+1)} - d_i) \tag{4.17}$$

$$\Sigma A_{(i+1)} = \sum_{i=0}^{N} A_{(i+1)} \tag{4.18}$$

Denklem (4.18) de bulunan alan miktarından (i+1) sayılı adımdaki en büyük şekil değiştirme enerjisini temsil eden alan değeri çıkartılır ise çevrimsel sönüm ile söndürülen enerji miktarının sekizde biri elde edilir. Bu durumda Denklem (4.19), çevrimsel sönümle yutulan toplam enerji miktarını verir.

$$E_{D(i+1)} = 8 * (\Sigma A_{(i+1)} - E_{S0(i+1)}) \tag{4.19}$$

Böylece, (i+1) sayılı adımda, yapıdaki eşdeğer viskoz sönüm oranı, Denklem (4.9) aracılığı tespit edilmiş olur. Bu işlem, kapasite spektrum eğrisinin başından sonuna kadar yapılır ve her adıma ait eşdeğer sönüm oranları ve buna bağlı olarak bulunan

efektif sönüm oranları tespit edilir. Efektif sönüm oranına ve yapı davranış tipine göre belirlenen sönüm düzeltme faktörü κ, otomatik olarak işlemlere katılır ve gerekli düzeltmeler yapılarak gerçek eşdeğer sönüm miktarı bulunmuş olur.

$$\beta_{0(i+1)} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{D(i+1)}}{E_{S0(i+1)}} \tag{4.9}$$

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 \tag{4.14}$$

Eşdeğer sönüm miktarı belirlenen yapının performans noktasının bulunması için, hesaplanan eşdeğer sönüm miktarına bağlı olarak elastik deprem spektrumunun indirgenmesi gerekir. Bunu için, Denklem (4.15) ve (4.16) kullanılır. Böylece, spektral azaltma katsayıları, SR_A ve SR_V tayin edilir. Her adım için yapılan bu işlemlerin ardından kapasite ve talep spektrumlarındaki spektral yer değiştirme değerleri birbirine oranlanarak yeter derecede yakın olup olmadıkları araştırılır. Sonuçta, geçerli hata oranını sağlayan tek bir kesişim noktası bulunmuş olur.

4.2.6 Performans Noktasının Kabul Kriterleri

Performans noktasının bulunmasının ardından, Denklem (4.2) ve (4.3) kullanılarak a_{pi} spektral ivme ve d_{pi} spektral yer değiştirme değerlerine karşı gelen V taban kesme kuvveti ve Δ_{roof} en üst kat yatay yer değiştirme değerleri elde edilir. Bu değerlerin, bina için öngörülen performans seviyesini sağlayıp sağlamadığı, ilgili seviye için öngörülen sınırların kontrol edilmesi ile tespit edilir. Bu sınırların sağlanmaması durumunda performans seviyesinin değiştirilmesi veya taşıyıcı elemanların dayanımlarının ve rijitliklerinin arttırılması gerekir. Bu sınırlar iki ana grupta toplanmaktadır.

1. Bina için öngörülen kabul kriterleri
2. Elemanlar veya bileşenler için öngörülen kabul kriterleri

4.2.6.1 Bina İçin Öngörülen Kabul Kriterleri

Bina için öngörülen kabul kriterleri veya tepki sınırları, binanın düşey yük taşıma kapasitesi gereksinimi, yatay yüklere karşı dayanım ve yatay yer değiştirme ile ilgili sınırları içerir.

Düşey Yük Taşıma Kapasitesi

Bina taşıyıcı sisteminin düşey yük taşıma kapasitesi, kabul edilen herhangi bir performans seviyesinde bozulmadan kalmalıdır. Binayı oluşturan bir eleman veya bileşenin düşey yük taşıma kapasitesini kaybettiği yerde, mevcut veya güçlendirilmiş yapıdaki diğer eleman veya bileşenlerin yeniden dağılan bu yükü taşımaya elverişli olması gerekir.

Yatay Yüklere Karşı Dayanım

Binanın performans noktasındaki toplam yatay yük taşıma kapasitesinin, ilerleyen yükleme adımlarında oluşan plastik mafsallarla beraber, %20 den daha fazla azalmaması gerekir. Böylece, deprem etkisindeki yükleme çevrimleri sonucu oluşan dayanım azalması sınırlandırılmış olur. Eğer bu oran beklenenden daha büyük çıkarsa, yapının güçlendirilerek istenen sınırlar içerisinde kalması sağlanır.

Yatay Yer Değiştirmeler

Hasarın, performans seviyelerine bağlı olarak sınırlandırılması için binada katlar arası rölatif ötelemelerin Tablo 4.16 daki sınırlar içerisinde kalması öngörülmektedir. Böylece, hasar sınırlanması yanında, aşırı yer değiştirmelerden kaynaklanan ikinci mertebe etkileri de sınırlandırılmış olur. Tabloda, yapısal stabilite durumuna karşı gelen öteleme sınırlamasındaki V_i ifadesi (i) numaralı kata ait kat kesme kuvvetini temsil etmekte iken P_i ifadesi de (i) numaralı kattaki toplam düşey yükü göstermektedir.

Tablo 4.16 Katlar Arası Yerdeğiştirmenin Kat Yüksekliğine Oranı

	Performans Seviyesi			
Katlar Arası Yerdeğiştirme / Kat Yüksekliği Sınırı	Hemen Kullanım	Hasar Kontrolü	Can Güvenliği	Yapısal Stabilite
En Büyük Toplam Oran	0.01	0.01-0.02	0.02	0.33Vi/Pi
En Büyük Elastik Ötesi Yerdeğiştirme Oranı	0.005	0.005-0.015	sınır yok	sınır yok

4.2.6.2 Yapı Elemanları ve Bileşenleri İçin Öngörülen Kabul Kriterleri

Binaların elemanları taşıyıcı olan ve olmayan elemanlar şeklinde ikiye ayrılır. Yine taşıyıcı elemanlar da kendi aralarında birincil ve ikincil olarak sınıflandırılırlar. Kapasite eğrisi üzerinde elde edilen performans noktasında her eleman üzerindeki gerilmeler ve şekil değiştirmeler hesaplanarak, kabul edilen performans noktasının koşullarını sağlayıp sağlamadıkları ve gerekli sınırlar altında kalıp kalmadıkları kontrol edilir. Eleman ve bileşenler için uygulanan kabul kriterleri, eleman veya bileşenin türüne ve bunlardaki güç tükenmesini meydana getiren etkinin şekline bağlı olarak saptanır. Kiriş veya kolonlarda oluşan plastik mafsal dönmelerinin, çaprazlarda oluşan plastik uzamaların ve kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesme kuvvetinden dolayı oluşan kayma açılarının kabul sınırları göz önüne alınarak kontrol edilmesi gerekir. ATC 40 [1] projesi ilk olarak betonarme binaların güçlendirilmesi amacıyla oluşturulduğu için, içeriğinde yalnız betonarme kesitler ve bileşenleri ile ilgili kabul sınırları bulunmaktadır. Daha sonraları, performans analizinin çelik binalara uygulanmasıyla beraber FEMA 356 [3], Bölüm 5 de çelik yapıda kullanılan eleman ve bileşenlere ilişkin gerekli kabul sınırları da tablolar halinde sunularak geliştirilmiştir.

4.3 FEMA 356 Uygulaması

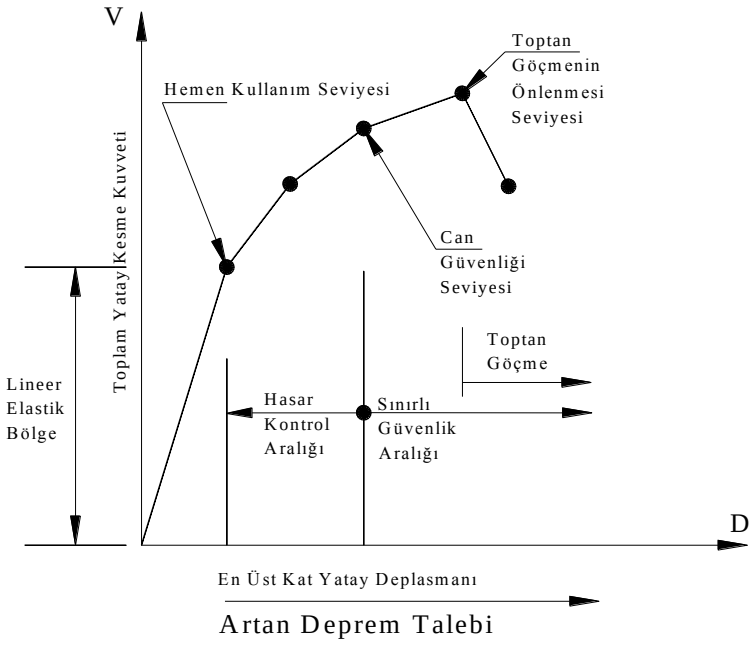
FEMA 356 önceleri FEMA 273 [2] olarak binaların deprem güçlendirmesinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. ATC 40 uygulamasının aksine FEMA 356 dokümanı sadece betonarme yapılar için değil, diğer yapı türleri için de geliştirilmiş, ayrıca doğrusal ve doğrusal olmayan çözümlemeleri de kapsamıştır.

ATC 40 dokümanı kapsamında, kullanılan basitleştirilmiş doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin hepsi hakkında bilgi verilmektedir. Bu yöntemler kapasite spektrum yöntemi ile yerdeğiştirme katsayısı ve ikincil (secant) rijitlik yöntemleridir. FEMA 356 dokümanı ise bu yöntemlerden sadece yerdeğiştirme katsayısı yöntemini esas almaktadır.

4.3.1 Performans Seviyeleri

FEMA 356 da öngörülen performans seviyeleri ATC 40 ile aynıdır ancak, yapısal stabilite performans seviyesi tanımı yerine toptan göçmenin önlenmesi performans seviyesi tanımı getirilmiştir. Sünek yapılarda, can güvenliği performans seviyesinde yapı sistemi, rijitliğini önemli ölçüde kaybeder ancak göçme meydana gelmeden önce oluşacak olan ek yanal yerdeğiştirme kapasitesi bulunur. Genel olarak, can güvenliği seviyesine gelen yapının toptan göçmesi için en az %33 daha büyük yanal yerdeğiştirme yapabileceği kabul edilir. Şekil 4.4 deki kapasite eğrisi sünek yapılarda rastlanılan bir eğriselliğe sahiptir. Sünek olmayan yapılarda ise performans seviyesi aralıkları daha küçük tutulur. Şekil 4.18 de sünek olmayan yapılarda görülen kapasite eğrisi ve bu eğri üzerinde tanımlanan performans seviyeleri gösterilmektedir.

Her bir performans amacı, hem deprem hasar seviyesi hem de bina performans seviyesi öngörülerek tanımlanır. Analiz sırasında yapıdaki elemanlar birincil ve ikincil olmak üzere sınıflandırılır. Birincil (ana) elemanlar taşıyıcı sistemin deprem sırasında doğrudan göçmesini engelleyen elemanlardır, (kolon, kiriş, betonarme perde, çelik çaprazlı perde vs.). Yapıda taşıyıcı olan ve olmayan elemanlara ilişkin performans seviyeleri ve tanımları daha önce Bölüm 4.2.1.3 ve Tablo 4.3 de verilmiştir.



Şekil 4.18 Sünek Olmayan Yapılarda Kapasite Eğrisi ve Performans Seviyeleri

4.3.2 Doğrusal Olmayan Çözümleme ve Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi

Bu yöntem, kapasite spektrum yöntemine benzer olarak, kapasite ve talebin birbirine bağlı olduğu esasına dayanmaktadır. Ancak bu yöntemde, yer değiştirme talebi grafik olarak değil sayısal bir biçimde belirlenmektedir. Bu durumda kapasite eğrisinin kapasite spektrum eğrisine dönüştürülmesine gerek olmamaktadır.

Yer değiştirme katsayısı yönteminde ilk olarak, yapıya ait taban kesme kuvveti, V ve en üst kat yerdeğiştirmesi δ_{maks} arasındaki ilişkiyi açığa çıkaran kapasite eğrisi belirlenir. Kapasite eğrisinin çizilmesinde, yapının birinci doğal periyoduna ve etkin modlara bağlı olarak uygun bir yatay yük dağılımı seçilir. Sabit düşey yükler ve sürekli artan yatay yükler altında yapının doğrusal olmayan analizi yapılarak kapasite eğrisi elde edilir. Daha sonra bu eğri, birincisinin eğimi elastik rijitliği (K_e), ikincisinin eğimi elastoplastik rijitliği (K_s) temsil eden iki doğru parçası ile idealleştirilir. İdealleştirme yapılırken, gerçek ve idealleştirilmiş kapasite eğrilerinin altında kalan alanların eşit olması ve K_e eğimli doğrunun kapasite eğrisini kestiği noktanın ordinatının, K_e ve K_s doğrularının kesiştiği noktanın ordinatının 0.60 katı olması esas alınır. Ancak iki doğrunun kesişim noktası başlangıçta bilinmediğinden dolayı bir deneme-yanılma yöntemi uygulanması gerekir. Şekil 4.19 da yöntemin yukarda anlatılan mantığına paralel bir uygulaması gösterilmektedir.

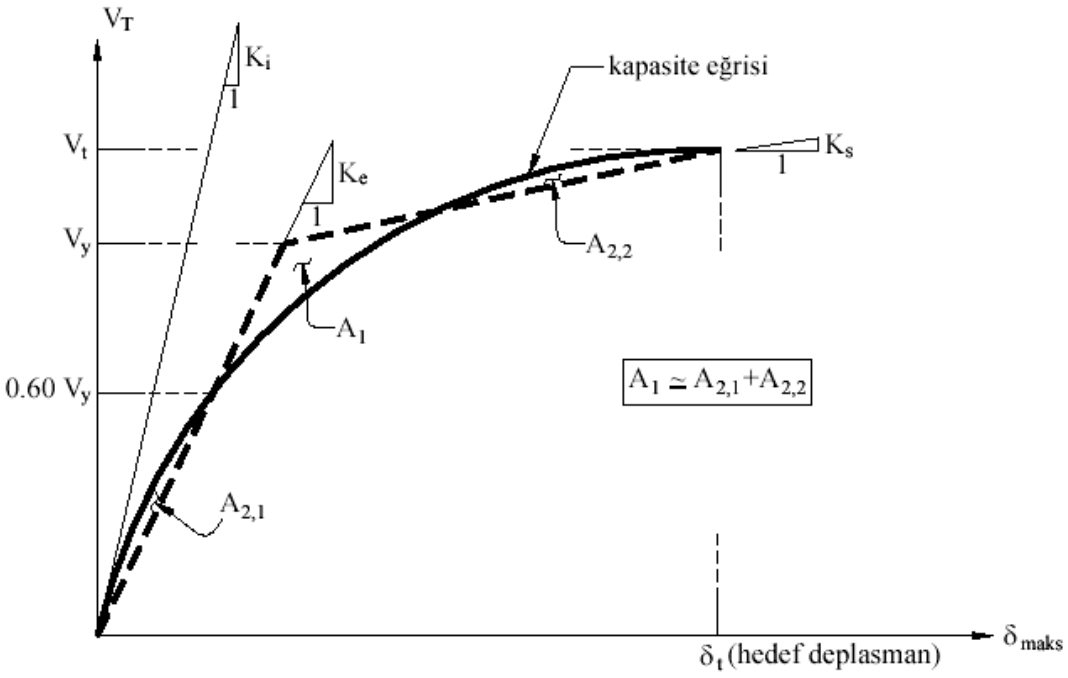
İdealleştirilen kapasite eğrisinde, sistemin T_e etkin doğal periyodu, T_i hesap yapılan doğrultudaki elastik doğal periyodu göstermek üzere;

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \tag{4.20}$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Yerdeğiştirme katsayısı yönteminde kullanmak üzere öngörülen hedef yerdeğiştirme değeri Denklem (4.21) dikkate alınarak hesaplanır.

$$\delta_t = C_0\, C_1\, C_2\, C_3\, S_a\, \frac{T_e^{\,2}}{4\pi^{\,2}}\, g \tag{4.21}$$



Şekil 4.19 Gerçek ve İdealleştirilmiş Kapasite Eğrileri

Denklem (4.21) deki değerler aşağıda tanımlanmıştır.

C_0 = Tek serbestlik dereceli sistemden elde edilen spektral yer değiştirmeyi çok serbestlik dereceli sistemin hedef yer değiştirmesi ile ilişkilendiren bir katsayıdır. Bina kat sayısının 1, 3,5, 10 ve daha fazla olması halinde bu katsayı C_0 = 1.0, 1.3, 1.4, 1.5 değerlerini almaktadır.

C_1 = Beklenen en büyük elastik ötesi yer değiştirmeyi, doğrusal elastik davranış varsayımı ile hesaplanan yer değiştirme ile ilişkilendiren katsayıdır.

$$C_1 = 1.0 \qquad T_e \geq T_S \quad \text{için}$$
$$C_1 = [1.0 + (R-1)T_S / T_e] / R \qquad T_e < T_S \quad \text{için} \qquad (4.22)$$

C_2 = Deprem etkisiyle oluşan çevrimsel davranış şeklinin en büyük yer değiştirmeye olan etkisini temsil eden katsayıdır. Bu katsayının değerleri çerçeve sistemine bağlı olarak Tablo 4.17 ile verilmektedir.

Tablo 4.17 C_2 Katsayı Değerleri

Performans Seviyesi	T < 0.1 sn		T ≥ T_S	
	Çerçeve Türü 1	Çerçeve Türü 2	Çerçeve Türü 1	Çerçeve Türü 2
Hemen Kullanım	1,0	1,0	1,0	1,0
Can Güvenliği	1,3	1,0	1,1	1,0
Toptan Göçmenin Önlenmesi	1,5	1,0	1,2	1,0

(Çerçeve Türü 1 yapılar rijit birleşimli çerçeveler, elastik birleşimli çerçeveler, merkezi çaprazlı çerçeveler, çekmeye çalışan çaprazlı çerçeveler, yığma yapılar ve sayılanların kombinasyonlarıdır. Çerçeve türü 2 tipi yapılar ise bunların dışında kalan bütün yapılardır.)

C_3 = Dinamik P-Δ etkisiyle yer değiştirmelerdeki artışı göz önüne alan katsayı olup, akmadan sonra pozitif eğimli davranış için C_3 = 1.00 değerini alır ve negatif eğimli davranış için bir α katsayısına göre belirlenir. Negatif eğimli davranış için C_3 katsayısının hesabı Denklem (4.23) ve (4.24) de verilmektedir.

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|}{T_e}(R-1)^{3/2} \tag{4.23}$$

$$R = \frac{S_a}{V_y / W}\frac{1}{C_0} \tag{4.24}$$

Burada

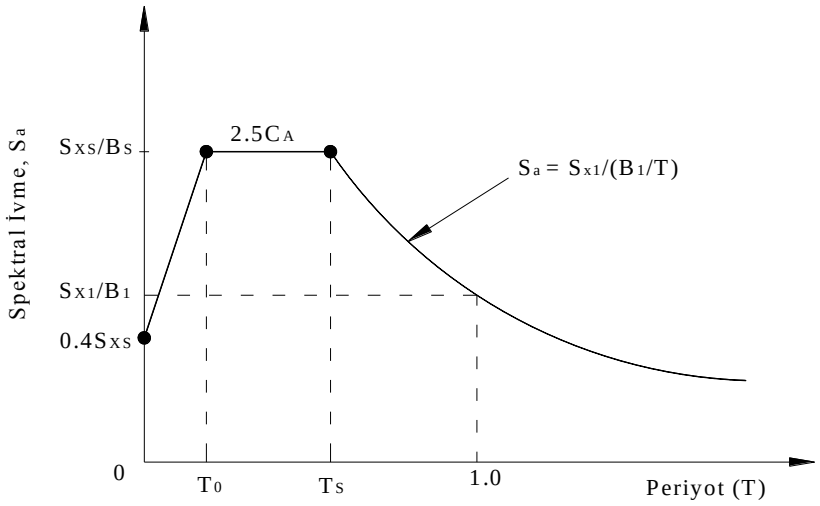
R = Gerekli olan elastik dayanımın akma dayanımına oranı

S_a = Etkili T_e periyoduna karşı gelen spektral ivme

V_y = Akma dayanımı

olarak tanımlanır.

Etkili T_e periyoduna karşı gelen S_a spektral ivme değeri, binanın performans amacının belirlenmesinde etkili olan deprem davranış spektrumu veya elastik ivme-periyot spektrum eğrisi (Şekil 4.20) dikkate alınarak belirlenir.



Şekil 4.20 Elastik İvme-Periyot Spektrum Eğrisi

Spektrum karakteristik periyotları olarak tanımlanan T_0 ve T_S değerleri Denklem (4.25) ile elde edilirler.

$$T_S = \frac{S_{X1} B_S}{S_{XS} B_1} \text{ ve } T_0 = 0.20\ T_S \tag{4.25}$$

$$S_{XS} = F_a\ S_S \tag{4.26}$$

$$S_{X1} = F_y\ S_1 \tag{4.27}$$

Burada

S_S = Kısa periyot spektral parametresi (binanın bulunduğu bölgeye bağlı)

S_1 = Bir saniye periyodu spektral parametresi (S_S gibi)

F_a = Zemin sınıfına ve kısa periyot ivme parametresine bağlı değer, Tablo 4.18.

F_y = Zemin sınıfı ve bir saniye periyot ivme parametresine bağlı değer, Tablo 4.19.

B_S = Etkili sönüm oranına bağlı olarak bulunan değer, Tablo 4.20.

B_1 = Etkili sönüm oranına bağlı olarak bulunan değer, Tablo 4.20.

olmak üzere, S_a spektral ivme değeri, spektrum karakteristik periyotlarına bağlı olarak aşağıdaki biçimde bulunur.

$$S_a = S_{XS}\left[\left(\frac{5}{B_S} - 2\right)\frac{T}{T_S} + 0.4\right] \qquad \text{eğer } 0 < T < T_0 \text{ ise} \qquad (4.28a)$$

$$S_a = \frac{S_{XS}}{B_S} \qquad \text{eğer } T_0 < T < T_S \text{ ise} \qquad (4.28b)$$

$$S_a = \frac{S_{X1}}{B_1 T} \qquad \text{eğer } T_S < T \text{ ise} \qquad (4.28c)$$

Tablo 4.18 S_S Kısa Periyodu ve Zemin Sınıfına Bağlı F_a Değerleri

Zemin Sınıfı	S_S<0.25	S_S=0.50	S_S=0.75	S_S=1.00	S_S>1.25
S_A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
S_B	1	1	1	1	1
S_C	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
S_D	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
S_E	2,5	1,7	1,2	0,9	*
S_F	*	*	*	*	*

Tablo 4.19 S_1 Bir Saniye Periyodu ve Zemin Sınıfına Bağlı F_y Değerleri

Zemin Sınıfı	$S_1 \leq 0.1$	S_2=0.2	S_1=0.3	S_1=0.4	$S_1 \geq 0.50$
S_A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
S_B	1	1	1	1	1
S_C	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
S_D	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
S_E	3,5	3,2	2,8	2,4	*
S_F	*	*	*	*	*

Tablo 4.20 Etkili Sönüm Oranına Bağlı Olarak B_S ve B_1 Değerleri

Etkili Sönüm Oranı, β(%)	< 2	5	10	20	30	40	> 50
B_S	0,8	1	1,3	1,8	2,3	2,7	3
B_1	0,8	1	1,2	1,5	1,7	1,9	2

Yukarıdaki işlemlerden de görüldüğü gibi, yer değiştirme katsayısı yönteminde, hedef yer değiştirmenin bulunması için bir ardışık yaklaşım yolunun izlenmesi gerekir. Başlangıçta seçilen ve T_e etkin doğal periyodunun hesabına esas olan δ_t yer değiştirmesi ile hesap sonunda bulunan değerlerin eşit veya birbirine yeterince yakın olması durumunda hedef yer değiştirme bulunmuş olur ve ardışık yaklaşıma son verilir. Öngörülen deprem etkisi altındaki hedef yer değiştirme bulunduktan sonra performans hedefinin gerçekleştirilip gerçekleştirilmediği kontrol edilir. Bunun için

sisteme ait büyüklüklerin değerleri (yer değiştirmeler, plastik şekil değiştirmeler vs.) kendilerine ait sınır değerler ile karşılaştırılır.

4.4 Modelleme Parametreleri (FEMA 356)

Modelleme parametreleri, performansı belirlenecek olan yapı sisteminin malzemesine bağlı olarak tespit edilirler. Betonarme taşıyıcı sistemlerde kolon, kiriş ve perde duvarların kesme dayanımlarına ve donatı oranlarına bağlı olarak plastik şekil değiştirme değerleri ve bu elemanların oluşturduğu bileşenlerin plastik şekil değiştirme kapasiteleri, kabul edilebilir kriterler altında ATC 40 projesi, Bölüm 9 da verilmektedir. Ancak, bu bölümde anlatılmış olduğu gibi, ATC 40 projesi, sadece betonarme yapıların performans analizleri üzerine kurulduğu için diğer yapı malzemelerinin kullanıldığı sistemlere uyarlanamamaktadır. FEMA 273 ve 356 raporları ise bütün yapı malzemelerini kapsayan çalışmalardır. Bu raporlarda, betonarme sistemlerin yanında çelik, ahşap ve yığma yapılar için modelleme parametreleri geliştirilmiştir.

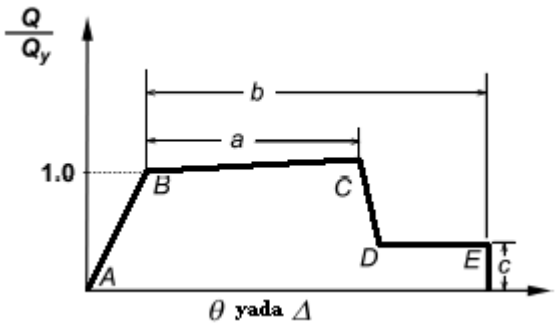
Bu tezin kapsamında incelenen yapı sistemi çelik malzemeden teşkil edileceği için çelik sistemlere ait kolon, kiriş ve çapraz elemanlarının ve bunların bileşenlerinin (kolon-kiriş birleşim noktaları) plastik şekil değiştirme kapasiteleri hakkında bilgi verilecektir.

Çelik taşıyıcı sistemlerde, kolon ve kirişlere ait modelleme parametreleri (plastik şekil değiştirme kapasiteleri) elemanların sahip oldukları kesit geometrisine ve mekanizma durumunda bu elemanlara etkiyen eksenel yüke göre belirlenir. Yatay yüklere karşı yapının dayanımını arttıran çapraz elemanlarda, iç kuvvetin çekme ve basınç olması durumuna göre plastik şekil değiştirme kapasiteleri ve bunun yanında elemandaki dayanım değerleri farklılıklar gösterir.

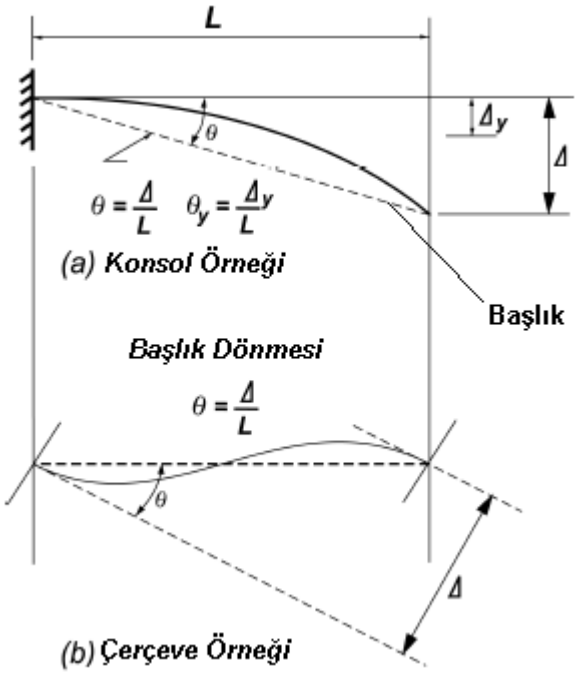
Analitik veya deneysel olarak elde edilen genelleştirilmiş yük - şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.21 de gösterilmektedir. Bu eğrideki a, b, c parametreleri, çelik çerçeveleri oluşturan elemanlar için FEMA 356, Tablo 5.6 (bu bölümde Tablo 4.21) de tanımlanan koşullar ile belirlenir. Yetersiz test bilgilerinin olduğu durumlarda, yük - şekil değiştirme eğrisinin pekleşme kısmına ait eğim, kolon ve kirişlerde elastik bölgedeki eğimin %3 ü olarak alınır. Yine aynı şekilde, eldeki verilerin yetersiz

olması durumunda, panel bölgeleri için pekleşme bölgesine ait eğim elastik bölgeye ait eğimin %6 sı olarak modellenmelidir. Bu şekilde, her eleman tipi için yük - şekil değiştirme eğrisinde gerekli idealleştirmeler yapılabilir. Ancak, malzemenin ideal elastoplastik olduğu varsayımından yola çıkarak yük- şekil değiştirme eğrilerinin pekleşme kısmına ait eğim sıfır olarak kabul edilebilir.

Şekil 4.21 de gösterilen Q ve Q_{CE} parametreleri sırasıyla, elemanlar üzerindeki genelleştirilmiş zorları ve elemana ait akma veya plastikleşme dayanımını temsil etmektedir. Kolon ve kirişlerde θ, kesitin toplam elastik ve plastik dönme miktarını, θ_y, akma anındaki dönmeyi, Δ, kesitteki toplam elastik ve plastik uzamayı, Δ_y, akma anındaki uzamayı ifade etmektedirler. Panel bölgelerinde, θ_y, radyan cinsinden açısal kayma şekil değiştirmesini göstermektedir. Şekil 4.22, bir kiriş elemanı için kiriş başlığının dönmesini tanımlamaktadır. Kiriş ve kolonlardaki akma dönmesini (θ_y) hesaplamak için Denklem (4.29) ve (4.30) da verilen eşitlikler kullanılır. Burada, akma dönmesinin yeri, kiriş ve kolonların orta noktaları olarak alınmıştır.



Şekil 4.21 Genelleştirilmiş Yük-Şekil Değiştirme Eğrisi



Şekil 4.22 Başlık Dönmesinin Tanımlanması

Kirişlerde Akma Dönmesi :

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}lb}{6EIb} \tag{4.29}$$

Kolonlarda Akma Dönmesi :

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}lc}{6EIc}\left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \tag{4.30}$$

Q ve Q_{CE}, daha önce açıklandığı gibi, sırasıyla eleman üzerindeki zoru ve ondan beklenen akma dayanımını temsil etmektedir. Kolon ve kirişlerdeki eğilme durumu için Q_{CE}, plastik dönme kapasitesini temsil eder ve bu değer Denklem (4.31) ve (4.32) kullanılarak elde edilir.

Kirişlerde Plastikleşme (Akma) Momenti :

$$Q_{CE} = M_{CE} = ZF_{ye} \tag{4.31}$$

Kolonlarda Plastikleşme (Akma) Momenti :

$$Q_{CE} = M_{CE} = 1.18\ ZF_{ye}\left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \leq ZF_{ye} \tag{4.32}$$

Panel bölgelerinde ise Q_{CE}, plastik kesme kuvveti kapasitesini temsil eder ve Denklem (4.33) ile elde edilir. Ancak, panel bölgesinin dayanımının yapıyı oluşturan elemanların dayanımlarından yeter derecede büyük olduğu varsayımı ile panel bölgelerinin modellenmesine gerek kalmamaktadır.

$$Q_{CE} = V_{CE} = 0.55F_{ye}\, d_c\, t_p \tag{4.33}$$

Burada

dc = Kolon derinliği

E = Elastisite modülü

Fye = Malzemede beklenen akma gerilmesi

I = Atalet momenti

lb = Kiriş boyu

lc = Kolon boyu

M_{CE} = Akma eğilme momenti

P = Doğrusal olmayan analizde, hedeflenen deplasman değerindeki veya mekanizma durumundaki sistemde, eleman üzerindeki normak kuvvet

Pye = Eleman üzerindeki akma normal kuvveti = Ag Fye

Q = Eleman üzerinde bulunan genelleştirilmiş zorlar

Q_{CE} = Elemenlardaki akma dayanımı

tp = Panel bölgesi toplam kalınlığı (berkitme levhaları dahil)

θ = Başlık dönmesi

θy = Akma dönmesi miktarı

V_{CE} = Akma kesme kuvveti

Z = Plastik mukavemet momenti

şeklinde tanımlanır.

Doğrusal olmayan statik çözümleme yapılan çelik sistemlerde, kiriş ve kolonlara ait dayanımlar aşağıdaki gibi belirlenir.

Kirişler

Eksenel kuvvetin sıfır veya çok küçük olduğu, salt eğilme etkisi altındaki yapısal çelik elemanlardaki dayanım değerleri, şekil değiştirme kontrollü davranış biçimi düşünülerek elde edilir. Şekil değiştirme kontrollü davranış biçimi, elemandaki eksenel yükün elemana ait alt sınır dayanım değerine oranının %50 den az olduğu durumlar için geçerlidir. Yani bu yolla, yeni tasarlanan yapılarda, elemanların sünek olma koşulu sağlanmaktadır.

Kiriş gibi çalışan elemanlarda beklenen eğilme dayanımı Q_{CE}, AISC(1997) [17] de M_p için verilen bağıntılar kullanılarak belirlenir. Kirişler ve diğer şekil değiştirme kontrollü elemanlarda beklenen eğilme zoru Q_{CE}, limit akma durumu, burulmalı yanal burkulma, yerel başlık burkulması veya gövdede kayma akması durumları için elde edilen en düşük değer olarak alınır.

Betonarme donatısı ile tamamen beton içinde tutulan kompozit kirişlerde, deprem süresince kirişin beton içinde kalması sağlanır. Her iki eksenine göre simetrik ve güçlü ekseni etrafında eğilen narin olmayan kesitlerin gereklerini sağlayan ve $L_b < L_p$ koşuluna uyan yalın çelik kirişlerde eğilme dayanımı Q_{CE}, Denklem (4.34) e göre hesaplanır.

$$Q_{CE} = M_{CE} = M_{pCE} = ZF_{ye} \tag{4.34}$$

Burada

b_f = Basınç başlığının genişliği

L_b = Kirişin boyu

L_p = AISC(1993) LRFD [16] ya göre düzgün yayılı eğilme etkisindeki kiriş elemanının plastik eğilme kapasitesi için verilen tutulu olmayan sınırlı boyu

M_{pCE} = Beklenen plastik moment kapasitesi

F_{ye} = Beklenen akma dayanımı

olarak tanımlanır.

Kolonlar

Kirişlerin aksine, kolonlar gibi önemli sayılabilecek derecede eksenel yüke maruz yapısal çelik elemanların eğilme ve eksenel uzama dayanımları dikkate alınmak zorundadır.

Eksenel basınç altındaki çelik elemanların alt sınır dayanımı Q_{CL}, kolon burkulması, yerel başlık burkulması veya gövde buruşması sınır durumları için elde edilen en düşük dayanım değeri olarak alınır. Etkin tasarım dayanımı (alt sınır eksenel basınç dayanımı) P_{CL}, gerilme azaltma faktörü $\phi = 1.00$ alınarak, AISC(1997) Sismik koşullarına göre hesaplanır.

Eksenel kuvvetin çekme olması durumunda, kolonlar için beklenen eksenel dayanım değeri Denklem (4.35) kullanılarak tayin edilir.

$$Q_{CE} = T_{CE} = A_c F_{ye} \tag{4.35}$$

Burada;

A_c = Kolon kesit alanı
F_{ye} = Kolonda beklenen akma gerilmesi
T_{CE} = Kolonda beklenen çekme dayanımı

Çaprazlar

Çelik yapılarda, yatay harekete karşı rijitlik sağlamak amacıyla kullanılan çapraz elemanlar, üzerlerinde sadece eksenel yük olduğu varsayımı ile modellenirler. Eksenel yük değerinin basınç veya çekme olması durumuna göre iki farklı dayanım değeri ve bunlara paralel olarak iki farklı plastik şekil değiştirme kapasitesinin varlığından söz edilebilir.

Çapraz elemanlar üzerindeki eksenel kuvvetin çekme olması durumunda elemana ait akma dayanımı ve akma uzaması Denklem (4.36) ve (4.37) dikkate alınarak hesaplanır.

$$Q_{CE} = T_{CE} = A_b F_{ye} \tag{4.36}$$

$$\Delta_T = \frac{T_{CE} L}{E A_b} \tag{4.37}$$

Burada

A_b = Çapraz kesit alanı

F_{ye} = Çaprazda beklenen akma gerilmesi

T_{CE} = Çaprazda beklenen çekme dayanımı

Basınç kuvveti etkisi altındaki çapraz elemanlarda, burkulma anındaki uzama değeri, elemanın burkulmaya veya yerel burkulmaya kritik tasarım dayanımı, P_{CR}, AISC(1993) LRFD yönetmeliği dikkate alınarak hesaplanır. Yönetmeliğe göre, kritik tasarım dayanımı P_{CR}, elemanın narinlik oranı $\frac{KL}{i}$ değerine ve bu oranın kritik λc değerine bağlıdır.

$$\frac{KL}{i} = \text{maks} \left\{ \frac{K_{major} L_{major}}{i_{major}}, \frac{K_{minor} L_{minor}}{i_{minor}} \right\} \tag{4.38}$$

Burada

K = Burkulma boyu katsayısı

i = Elemanın atalet yarıçapı

$$\lambda c = \frac{KL}{i\pi} \sqrt{\frac{F_{ye}}{E}} \tag{4.39}$$

P_{CR} kritik burkulma dayanımı kesitin kompakt olup olmamasına ve narinliğine bağlıdır. Bu nedenle, çapraz elemanlarda kullanılacak olan kesitin bu özelliğinin belirlenmesi gerekir. AISC(1993) LRFD yönetmeliği uyarınca

$$\frac{b_f}{2t_f} = 10 \leq \frac{545\,(65)}{\sqrt{F_{ye}}}$$

koşulunun sağlaması durumunda, seçilen kesit kompakt bir kesit olarak nitelendirilir. O halde kompakt kesitler için P_{CR}, kritik dayanım değeri Denklem (4.40) ile hesap edilir.

$$P_{CR} = A_b F_{CR} \tag{4.40}$$

Burada F_{CR}, azaltılmış kritik burkulma gerilmesidir. Kritik burkulma gerilmesi, λc değerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{CR} = (0.658^{\lambda c^2}) F_{ye} \quad \text{eğer} \quad \lambda c \leq 1.5 \tag{4.41a}$$

$$F_{CR} = \left[\frac{0.877}{\lambda c^2}\right] F_{ye} \quad \text{eğer} \quad \lambda c > 1.5 \tag{4.41b}$$

Böylece, Denklem (4.41a) ve (4.41b) deki kiritik burkulma gerilmesi Denklem (4.40) da yerine yazılarak elemandaki burkulma tasarım dayanımı elde edilmiş olur. Buradan, burkulma anında elemandaki uzama miktarı tespit edilir.

$$\Delta_C = \frac{P_{CR} L}{EA} \tag{4.42}$$

Böylece, çelik sistemi oluşturan elemanlarda, burkulma ve akma anındaki sınır şekil değiştirme değerleri ve bu sınırlara ait dayanımlar belirlenmiş olur. Tablo 4.21 de, elemanlara ait plastik şekil değiştirme kapasiteleri verilmektedir. Bu değerler kullanılarak güçlendirilmesi düşünülen veya yeni tasarlanan çelik yapılar için modellemeye haiz parametreler ve elemanlardaki hasar seviyeleri için kabul edilen plastik şekil değiştirme miktarları elde edilmiş olur.

Tablo 4.21 Modelleme Parametreleri ve Kabul Edilen Plastik Şekil Değiştirme Kapasiteleri

Doğrusal Olmayan Statik Analiz İçin Modelleme Parametreleri ve Kabul Edilen Kriterler								
Elemanlar	**Modelleme Parametreleri**			**Kabul Edilen Kriterler**				
	Plastik Dönme Açısı (Radyan)		**Artık Gerilme Oranı**	**Plastik Dönme Açısı (Radyan)**				
				IO	**Birincil Elemanlar**		**İkincil Elemanlar**	
					LS	**CP**	**LS**	**CP**
	a	**b**	**c**					
Sünek Kirişler (Deformasyon Kontrollü Çalışma Biçimi)								
$\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{438}{\sqrt{F_{ye}}}$ **ve** $\frac{h}{t_w} \le \frac{3507}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	**0,6**	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
Sünek Kolonlar (Deformasyon Kontrollü Çalışma Biçimi)								
P / P_{CL} < 0.20								
$\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{438}{\sqrt{F_{ye}}}$ **ve** $\frac{h}{t_w} \le \frac{2412}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	**0,6**	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
Sünek Kolonlar (Deformasyon Kontrollü Çalışma Biçimi)								
0.20 < P / P_{CL} < 0.50								
$\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{438}{\sqrt{F_{ye}}}$ **ve** $\frac{h}{t_w} \le \frac{2090}{\sqrt{F_{ye}}}$	**__3**	**__4**	**0,2**	$0,25\theta_y$	**__5**	**__3**	**__6**	**__4**
Basınç Kuvveti Altındaki Çaprazlar								
W ve I şekilli	$0,5\Delta_C$	$8\Delta_C$	**0,2**	$0,25\Delta_C$	$5\Delta_C$	$7\Delta_C$	$7\Delta_C$	$8\Delta_C$
Çekme Kuvveti Altındaki Çaprazlar								
Tüm profillerde	$11\Delta_T$	$14\Delta_T$	**0,8**	$0,25\Delta_T$	$7\Delta_T$	$9\Delta_T$	$11\Delta_T$	$13\Delta_T$

__3; Plastik Dönme = $11(1 - 1.7\ P/P_{CL})\theta_y$

__4; Plastik Dönme = $17(1–1.7\ P/P_{CL})\theta_y$

__5; Plastik Dönme = $8(1–1.7\ P/P_{CL})\theta_y$

__6; Plastik Dönme = $14(1–1.7\ P/P_{CL})\theta_y$

Birim: F_{ye} (kg/cm^2)

4.5 Bölümün Özeti

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kavramı başlangıçta mevcut binaların incelenmesinde ve gerekli görüldüğü taktirde güçlendirilmesinde kullanılmakta iken, daha sonra yeni yapılacak binaların projelendirilmesinde gerçekçi çözümler elde etmek amacıyla kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde, mevcut deprem yönetmeliklerinde verilen tek bir çözüme karşılık, performansa dayalı tasarımda, binanın fonksiyonuna ve göz önüne alınacak deprem etkilerine göre birden fazla çözüm sunulabilmektedir.

Bu kavram, incelenen yapıya ilişkin doğru matematik modeller yardımı ile gerçekçi çözümler sunarken zayıf olduğu yanlarını da beraberinde getirmektedir. Aşağıda, bu zayıflıklara maddeler halinde değinilmektedir.

1. Kontrollarda kullanılan tüm sayısal sınır değerler sınırlı sayıdaki çözümlerden elde edilmiştir. Yeni yapılacak çözümlerden kazanılacak deneyimler ile birlikte bu değerlerde değişiklik yapılması ve daha gerçekçi değerlerin elde edilmesi beklenmektedir.

2. Yöntem, birinci modun etkin olduğu düşünülerek geliştirilmiştir. Çözümde kapasite eğrisinin elde edilmesinde birinci mod değişimine uygun bir yükleme alınmaktadır, (itme analizi için uygulanan yatay yük). Ancak, plastik şekil değiştirmelerin oluşması ile birlikte rijitlik ve birinci mod olarak kabul edilen titreşim şekli değişir. Ayrıca, periyodu büyük olan binalarda, diğer modların katkısı nedeniyle yöntemin yaklaşıklığı azalır.

3. Çözüm genel olarak düzlem çerçeve sistemler için geliştirilmiştir. Üç boyutlu taşıyıcı sistemlere yapılacak genelleştirme için yeni varsayımlara gerek vardır.

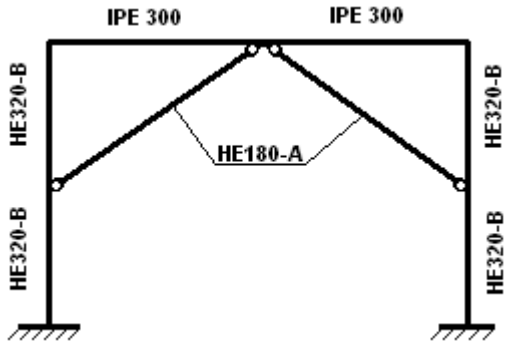
4. Depremde oluşan plastik mafsallarda çevrimsel şekil değiştirmelerden dolayı önemli miktarlarda enerji tüketilir. Kapasite eğrisi tek bir yönde yapılan yükleme sonucu elde edildiği için, çevrimsel davranışın içinde kalan alanla ilgili olan bu enerji tüketimini yöntemin uygulanmasında belirlemek mümkün değildir. Bu enerji tüketimi sadece bir sönüm katsayısı ile hesaba katılmaktadır.

5. SAYISAL ÖRNEKLER

Bu bölümde, yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesine yönelik olarak, iki farklı yapı sistemi üzerinde sayısal incelemeler yapılmıştır. Yapılardan ilki, mevcut deprem yönetmeliğindeki güvenlik koşullarını sağlamayan bir dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve sistem, diğeri ise aynı çelik çerçeve sistemin eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu sürtünmeli düğüm noktası eklenmiş şeklidir.

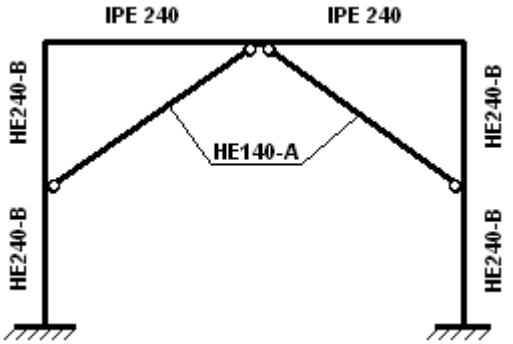
Sayısal incelemelerin amacı, yeterli kapasiteye sahip olmayan sistemin yatay yük taşıma kapasitesini doğrusal olmayan statik çözümleme yardımı ile belirlemek ve aynı sisteme enerji yutucu düğüm noktası uygulayarak taşıma kapasitesindeki artışı gözlemektir. Böylece, enerji yutucu düğüm noktasının uygulanmasıyla, gerek deprem kuvvetlerine karşı yeterli dayanıma sahip olmayan yapıların güçlendirilmesine, gerekse yeni tasarlanacak yapıların ekonomik çözümlerine katkı sağlanabilmektedir.

Türk Deprem Yönetmeliğine (TDY'98) [19] uygun olarak boyutlandırılan bir dışmerkez çaprazlı düzlem çelik çerçeve sistemin en kesitleri Şekil 5.1 de görülmektedir, (şekildeki yapı sistemi ile ilgili çözümlemeler EK B de yer almaktadır).



Şekil 5.1 İdeal Bir Şekilde Tasarlanan Yapı Sistemi

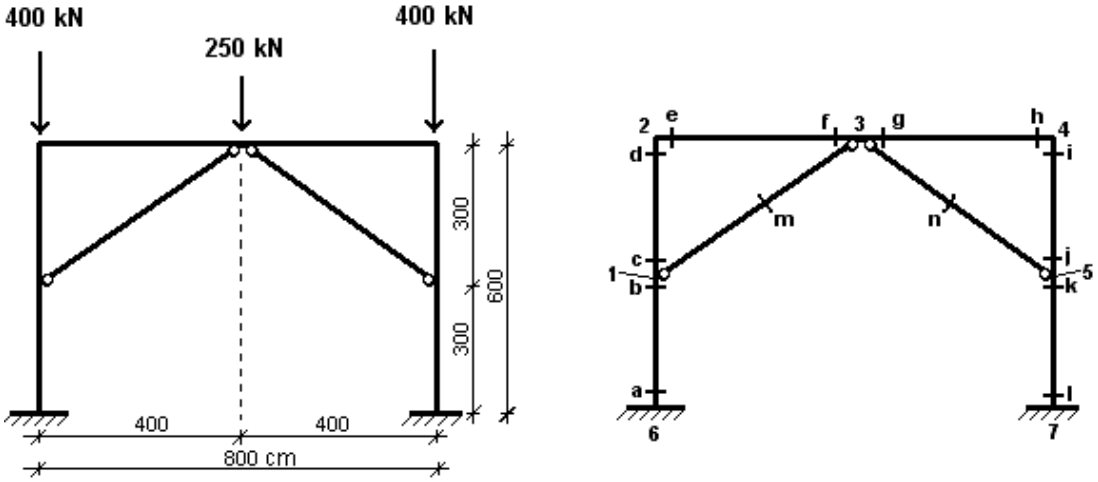
Sayısal incelemelerde esas alınacak olan yapı sistemi ise, Şekil 5.1 de tanımlanan sistemden farklı olarak, herhangi bir nedenden dolayı yeterli kapasiteye sahip olmayan mevcut bir yapı sistemidir. Bu sistemin en kesit profilleri ise Şekil 5.2 de verilmiştir.



Şekil 5.2 İncelemeye Esas Olan Mevcut Yapı Sistemi

En kesit profilleri Şekil 5.1 de verilen ideal yapı sistemi, eşdeğer deprem kuvvetinin W = 82.5 kN değeri için boyutlandırılmıştır. Eşdeğer deprem kuvvetlerinin belirlenmesi için gerekli olan deprem karakteristiklerine ilişkin geniş bilgi EK B de sunulmuştur.

En kesitleri Şekil 5.2 de verilen mevcut yapı sisteminin kapasitesinin yetersiz olmasının nedenlerinden bazıları, eski deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış olması veya yeterli mühendislik hizmeti görmemiş olması şeklinde sıralanabilir. Sistemin düşey işletme yükleri, geometrisi, düğüm noktası numaraları ve kesit isimleri Şekil 5.3 de görülmektedir.



Şekil 5.3 İncelenen Yapı Sisteminin Geometrisi ve Düşey İşletme Yükleri

Yapının rijitlik ve kütle dağılımı dikkate alınarak yapılan dinamik çözümleme sonucunda, birinci doğal titreşim moduna ait özel periyot değeri T = 0.670 sn olarak bulunmuştur. Bu doğal periyot ve deprem yükü azaltma katsayısının R = 7 değeri için, TDY'98 deprem yönetmeliği uyarınca hesaplanan eşdeğer deprem kuvveti W = 58.6 kN değerini almaktadır.

Hesapta İzlenen Yol

Sayısal incelemelerde izlenecek yol aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

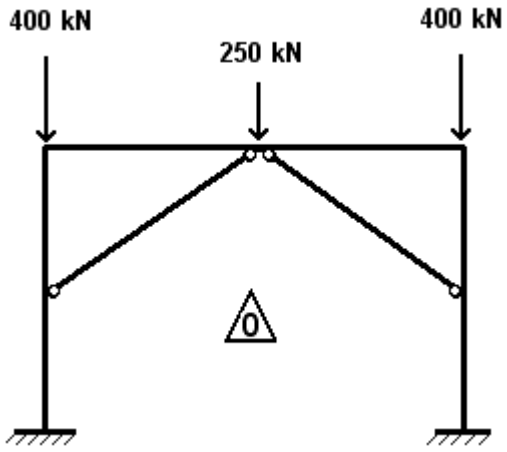
1. Mevcut yapı sisteminin doğrusal olmayan analizi yapılarak yatay yük taşıma kapasitesi belirlenecektir.

2. Çapraz elemanlar üzerinde oluşturulan enerji yutucu düğüm noktası mevcut yapıya eklenerek doğrusal olmayan analiz tekrarlanacak ve sistemin yatay yük taşıma kapasitesi yeniden belirlenecektir.

3. Her iki sisteme ait performans analizleri yapılarak sonuçlar irdelenecektir.

Çözümlemelere Yönelik Açıklamalar

a). Sisteme sadece düşey yüklerin etkitildiği durum üçgen sembolü içindeki "0" sayısı ile belirtilecektir. Hesabın her adımı sonunda sisteme verilen numara, plastik mafsal oluşan kesitin ismi ile özdeştir. Bu durumda, "0" numaralı sistemde hiçbir plastik kesit oluşumu bulunmamaktadır, Şekil 5.4.



Şekil 5.4 "0" Numaralı Sistem

b). Plastikleşen kesitlere ait numaralar, her plastik mafsalın oluşum sırasına göre düzenli olarak artmaktadır. Örneğin birinci plastik mafsalın oluştuğu kesitin plastik mafsal ismi (1) olarak verilmektedir.

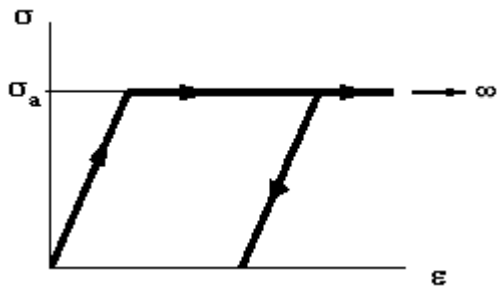
c). Bazı sistemlerin numaraları ve plastik mafsalın oluştuğu kesit isimleri üslü ifadeyle temsil edilmektedir. Numaralardaki üs işareti, iki plastik mafsal oluşumu arasında sisteme ait bazı özelliklerin değiştiğini belirtir. Değişen bu özellikler, herhangi bir plastik kesitte plastik şekil değiştirme kapasitesinin aşılması veya güçlendirilmiş sistemde görüleceği üzere, düğüm noktasında kayma hareketinin başlaması veya bitmesi olarak ifade edilebilir.

5.1 Mevcut Sistemin Kapasitesinin Belirlenmesi

5.1.1 Malzeme ve Kesit Özellikleri

5.1.1.1 Malzeme Özellikleri

Sayısal örnekte, ideal elastoplastik malzeme varsayımı yapılmış ve yapı çeliği kalitesi Fe 37 olarak alınmıştır. İdeal elastoplastik malzeme, akma sınır gerilmesine kadar gerilme-şekil değiştirme bağıntısının doğrusal olduğu, akma sınırından sonra sabit gerilme altında şekil değiştirmelerin sonsuza gittiği ideal malzeme olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemeye ilişkin gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Şekil 5.5 de görülmektedir.



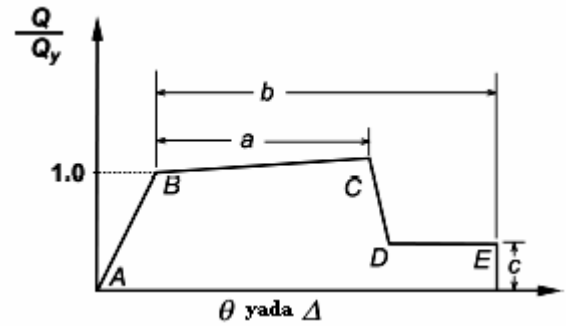
Şekil 5.5 İdeal Elastoplastik Malzemeye Ait Gerilme-Şekil Değiştirme Bağıntısı

5.1.1.2 Kesit Özellikleri

Kesitlere ait plastik dönme ve uzama sınır değerleri ve kabul edilen plastik şekil değiştirme kapasiteleri FEMA 356 [3], Bölüm 5, Tablo 5.6 ve 5.7 dikkate alınarak hesap modelinde kullanılacaktır. Tablolardaki değerler, bu çalışma kapsamında Bölüm 4, Tablo 4.21 de özetlenmiştir. Şekil 5.6 da, en kesitlere ilişkin genelleştirilmiş iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntısı görülmektedir. Şekildeki değerler, Tablo 4.21 den alınacak ve her eleman için özel olarak modelleme parametreleri geliştirilecektir.

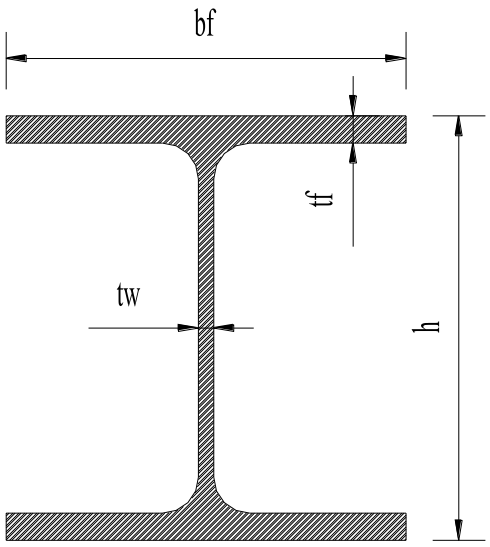
Tablo 4.21 Modelleme Parametreleri ve Kabul Edilen Plastik Deformasyon Kapasiteleri

Doğrusal Olmayan Statik Analiz İçin Modelleme Parametreleri ve Kabul Edilen Kriterler								
Elemanlar	**Modelleme Parametreleri**			**Kabul Edilen Kriterler**				
	Plastik Dönme Açısı (Radyan)		**Artık Gerilme Oranı**	**Plastik Dönme Açısı (Radyan)**				
				IO	**Birincil Elemanlar**		**İkincil Elemanlar**	
					LS	**CP**	**LS**	**CP**
	a	**b**	**c**					
Sünek Kirişler (Deformasyon Kontrollü Çalışma Biçimi)								
$\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{438}{\sqrt{F_{ye}}}$ **ve** $\frac{h}{t_w} \le \frac{3507}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0,6	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
Sünek Kolonlar (Deformasyon Kontrollü Çalışma Biçimi)								
$P / P_{CL} < 0.20$								
$\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{438}{\sqrt{F_{ye}}}$ **ve** $\frac{h}{t_w} \le \frac{2412}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0,6	$1\theta_y$	$6\theta_y$	$8\theta_y$	$9\theta_y$	$11\theta_y$
Sünek Kolonlar (Deformasyon Kontrollü Çalışma Biçimi)								
$0.20 < P / P_{CL} < 0.50$								
$\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{438}{\sqrt{F_{ye}}}$ **ve** $\frac{h}{t_w} \le \frac{2090}{\sqrt{F_{ye}}}$	**__3**	**__4**	0,2	$0,25\theta_y$	**__5**	**__3**	**__6**	**__4**
Basınç Kuvveti Altındaki Çaprazlar								
W ve I şekilli	$0,5\Delta_C$	$8\Delta_C$	0,2	$0,25\Delta_C$	$5\Delta_C$	$7\Delta_C$	$7\Delta_C$	$8\Delta_C$
Çekme Kuvveti Altındaki Çaprazlar								
Tüm profillerde	$11\Delta_T$	$14\Delta_T$	0,8	$0,25\Delta_T$	$7\Delta_T$	$9\Delta_T$	$11\Delta_T$	$13\Delta_T$



Şekil 5.6 Genelleştirilmiş İç Kuvvet-Şekil Değiştirme Bağıntısı

1. Kolonlar (HE240-B)



Kesit Geometrisi :

b_f = 240 mm

h = 240 mm

t_f = 17 mm

t_w = 10 mm

Enkesit Karakteristikleri :

A = 106 cm^2

I_{major} = 11260 cm^4

Z = 1053 cm^3

i_{major} = 10.31 cm

i_{minor} = 6.08 cm

Denklem (4.30) uyarınca kolonlardaki akma dönmesi,

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}lc}{6EIc}\left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) = 5.34 \times 10^{-3} \text{ radyan}$$

şeklinde hesaplanır.

Bu bağıntıda

$F_{ye} = \sigma_a$ = 2.400 t/cm^2 = σ_a = 240000 kN/m^2

l_c = 300 cm = 3 metre

$I_c = I_{major}$ = 11260 x 10^{-8} m^4

$Z = 1053 \times 10^{-6}\ m^3$

$E = 2{,}1 \times 10^{8}\ kN/m^2$

$P_{ye} = P_a = \sigma_a A = 240000 * 0.0106 = 2544\ kN$

$P/P_{ye} = P/P_{CL} = 0$ (Hesabın başlangıcında P=0, $P_{CL} = \phi P_{ye} = 1.0\ P_{ye}$ ve $P/P_{CL} < 0.20$) olarak alınmıştır.

Denklem (4.32) uyarınca kolonlardaki plastikleşme momenti

$$Q_{CE} = M_{CE} = 1.18\ ZF_{ye}\left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \leq ZF_{ye} = ZF_{ye} = 252.72\ kNm$$

Tablo 4.21 dikkate alınarak, plastik dönmelere ait modelleme parametreleri ve plastik dönmeler için kabul edilen performans seviyeleri belirlenecektir.

$P/P_{CL} < 0.20$ için

a1. $\frac{b_f}{2t_f} = 7.06 \leq \frac{438\ (52)}{\sqrt{F_{ye}}} = 8.94$..... koşul sağlanmıştır.

a2. $\frac{h}{t_w} = 24.00 \leq \frac{2412\ (286)}{\sqrt{F_{ye}}} = 49.23$..... koşul sağlanmıştır.

Diğer koşullara bakılmaksızın, Plastik dönme miktarları:

$a = 9\theta_y$

$b = 11\theta_y$

$c = 0.6$ ($= Q/Q_{CE}$)

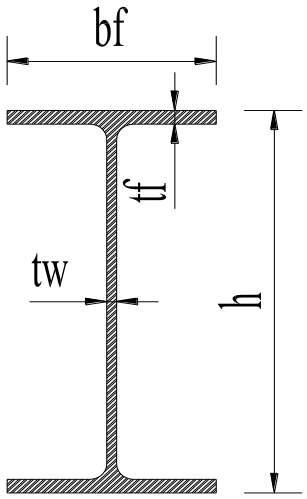
Elemandaki plastik dönmelere ait kabul edilen performans seviyeleri:

$IO = 1\theta_y$ (Hemen kullanım seviyesi)

$LS = 6\theta_y$ (Can güvenliği seviyesi)

$CP = 8\theta_y$ (Toptan göçmenin önlenmesi seviyesi)

2. Kirişler (IPE 240)



Kesit Geometrisi :

b_f = 120 mm

h = 240 mm

t_f = 9.8 mm

t_w = 6.2 mm

Enkesit Karakteristikleri :

A = 39.1 cm^2

I_{major} = 3892 cm^4

Z = 367 cm^3

i_{major} = 9.98 cm

i_{minor} = 2.7 cm

Denklem (4.29) uyarınca kirişlerdeki akma dönmesi,

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}lc}{6EIc} = 7.18 \times 10^{-3} \text{ radyan}$$

Burada

$F_{ye} = \sigma_a$ = 2.400 t/cm^2 = σ_a = 240000 kN/m^2

l_c = 400 cm = 4 metre

$I_c = I_{major} = 3892 \times 10^{-8}$ m^4

Z = 367 x 10^{-6} m^3

E = 2,1x10^8 kN/m^2

$P_{ye} = P_a = \sigma_a$ A = 240000*0.00391 = 938.4 kN

P/P_{ye} = 0 (Hesabın başlangıcında P=0, $P_{CL} = \phi P_{ye} = 1.0\ P_{ye}$ ve $P/P_{CL} < 0.20$) olarak alınmıştır.

Denklem (4.31) uyarınca kirişlerdeki plastikleşme (beklenen) momenti,

$Q_{CE} = M_{CE} = ZF_{ye}$ = 88.08 kNm

Tablo 4.21 dikkate alınarak, plastik dönmelere ait modelleme parametreleri ve plastik dönmeler için kabul edilen performans seviyeleri belirlenecektir.

$P/P_{CL} < 0.20$ için

a1. $\frac{b_f}{2t_f} = 6.12 \leq \frac{438\,(52)}{\sqrt{F_{ye}}} = 8.94$..... koşul sağlanmıştır.

a2. $\frac{h}{t_w} = 38.71 \leq \frac{3507\,(418)}{\sqrt{F_{ye}}} = 71.59$..... koşul sağlanmıştır.

b numaralı koşullara bakılmaksızın, Plastik dönme miktarları:

a = $9\theta_y$

b = $11\theta_y$

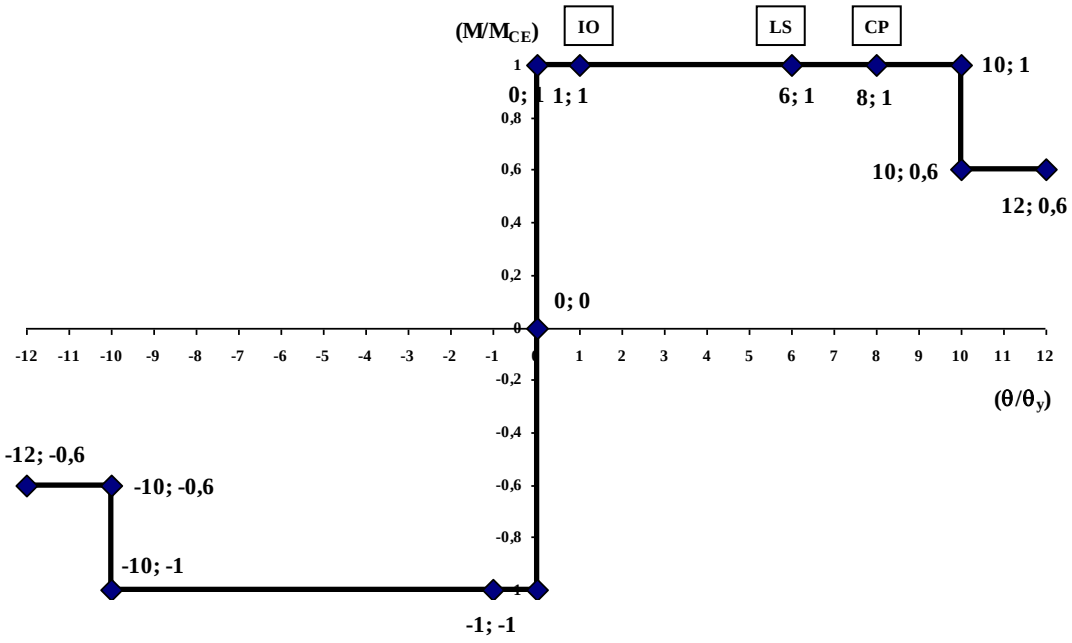
c = 0.6 (= Q/Q_{CE})

Elemandaki plastik dönmelere ait kabul edilen performans seviyeleri :

IO = $1\theta_y$ (Hemen kullanım seviyesi)

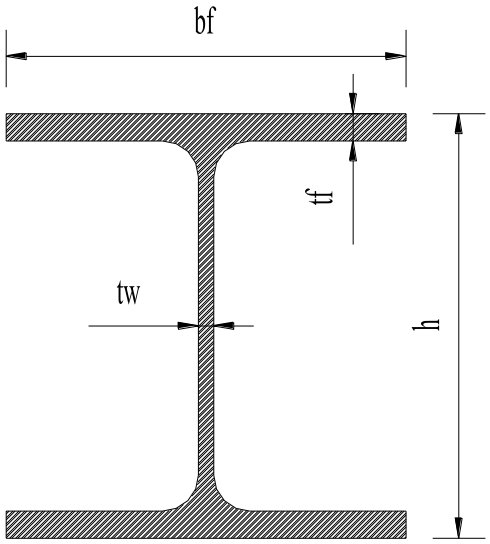
LS = $6\theta_y$ (Can güvenliği seviyesi)

CP = $8\theta_y$ (Toptan göçmenin önlenmesi seviyesi)



Şekil 5.7 Kolonlara ve Kirişlere Ait İç Kuvvet–Şekil Değiştirme Bağıntısı

3. Çaprazlar (HE140-A)



Kesit Geometrisi :

b_f = 140 mm

h = 133 mm

t_f = 8.5 mm

t_w = 5.5 mm

Enkesit Karakteristikleri :

A = 31.4 cm^2

I_{major} = 1033 cm^4

Z = 173 cm^3

i_{major} = 5.74 cm

i_{minor} = 3.52 cm

Çekme kuvveti etkisi altındaki çapraz elemanlarda, akma uzaması değeri, beklenen tasarım dayanımı (akma gerilmesi), $P_{ye} = P_{CE}$ dikkate alınarak Denklem (5.1) ile hesaplanır.

$$\Delta_T = \frac{P_{ye} L}{EA} = 5.714 \times 10^{-3} \qquad (5.1)$$

$P_{ye} = P_{CE} = A\ F_{ye} = 753.6$ kN

Basınç kuvveti etkisi altındaki çapraz elemanlarda, burkulma anında uzama değeri, elemanın burkulmaya veya yerel burkulmaya ait burkulma tasarım dayanımı, P_{CR} (AISC(1993) LRFD [16]) dikkate alınarak hesaplanır. Şartnameye göre, burkulma tasarım dayanımı, P_{CR} elemanın $\frac{KL}{i}$ narinlik oranına ve bu oranın kritik λc değerine bağlıdır.

$$\frac{KL}{i} = \text{maks}\left\{\frac{K_{major} L_{major}}{i_{major}}, \frac{K_{minor} L_{minor}}{i_{minor}}\right\} = \frac{1.00 * 500}{3.52} = 142.045 \qquad (5.2)$$

Burada

K = Burkulma boyu katsayısı

i = Elemanın atalet yarıçapı

olarak tanımlanır.

$$\lambda c = \frac{KL}{i\pi}\sqrt{\frac{F_{ye}}{E}} = 1.529 \qquad (5.3)$$

P_{CR} tasarım dayanımı, kesitin kompakt olup olmamasına veya narin olmasına bağlıdır. Bu nedenle, HE140-A kesitinin bu özelliğinin belirlenmesi gerekir. AISC-LRFD yönetmeliği uyarınca

$$\frac{b_f}{2t_f} = 8.235 \leq \frac{545\,(65)}{\sqrt{F_{ye}}} = 11.12$$

koşulunun sağlanması durumunda, seçilen kesit kompakt kesit olarak nitelendirilir. O halde kompakt kesitler için, P_{CR} burkulma dayanım değeri Denklem (5.4) ile hesaplanır.

$$P_{CR} = A\,F_{CR} \qquad (5.4)$$

Burada, F_{CR} azaltılmış kritik burkulma gerilmesidir. Kritik burkulma gerilmesi, λc değerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{CR} = (0.658^{\lambda c^2})\,F_{ye} \qquad \lambda c \leq 1.5 \quad \text{için} \qquad (5.5a)$$

$$F_{CR} = \left[\frac{0.877}{\lambda c^2}\right] F_{ye} \qquad \lambda c > 1.5 \quad \text{için} \qquad (5.5b)$$

Burkulma tasarım dayanımı

$\lambda c = 1.529 \geq 1.50$ ise $F_{CR} = 90031.786$ kN/m^2

$P_{CR} = 0.00314*90031.786 = 282.7$ kN

olarak elde edilir. Buradan, burkulma anında elemandaki uzama miktarı tespit edilir.

$$\Delta_C = \frac{P_{CR}L}{EA} = 2.140 \text{ x } 10^{-3} \text{ (Basınç kuvveti etkisi altındaki elemanlarda)} \qquad (5.6)$$

Tablo 4.21 dikkate alınarak, **I** kesitleri için basınç ve çekme durumunda elemandaki plastik uzamalara ait modelleme parametreleri ve bu uzamalar için kabul edilen performans seviyeleri belirlenecektir.

Basınç etkisi altında plastik uzama miktarları **:**

$a = 0.5\Delta_C$

$b = 8\Delta_C$

$c = 0.2$ ($= Q/Q_{CR}$)

Basınç etkisi altında elemandaki plastik uzamalara ait kabul edilen performans seviyeleri :

$IO = 0.25\Delta_C$ (Hemen kullanım seviyesi)

$LS = 5\Delta_C$ (Can güvenliği seviyesi)

$CP = 7\Delta_C$ (Toptan göçmenin önlenmesi seviyesi)

Çekme etkisi altında plastik uzama miktarları **:**

$a = 11\Delta_T$

$b = 14\Delta_T$

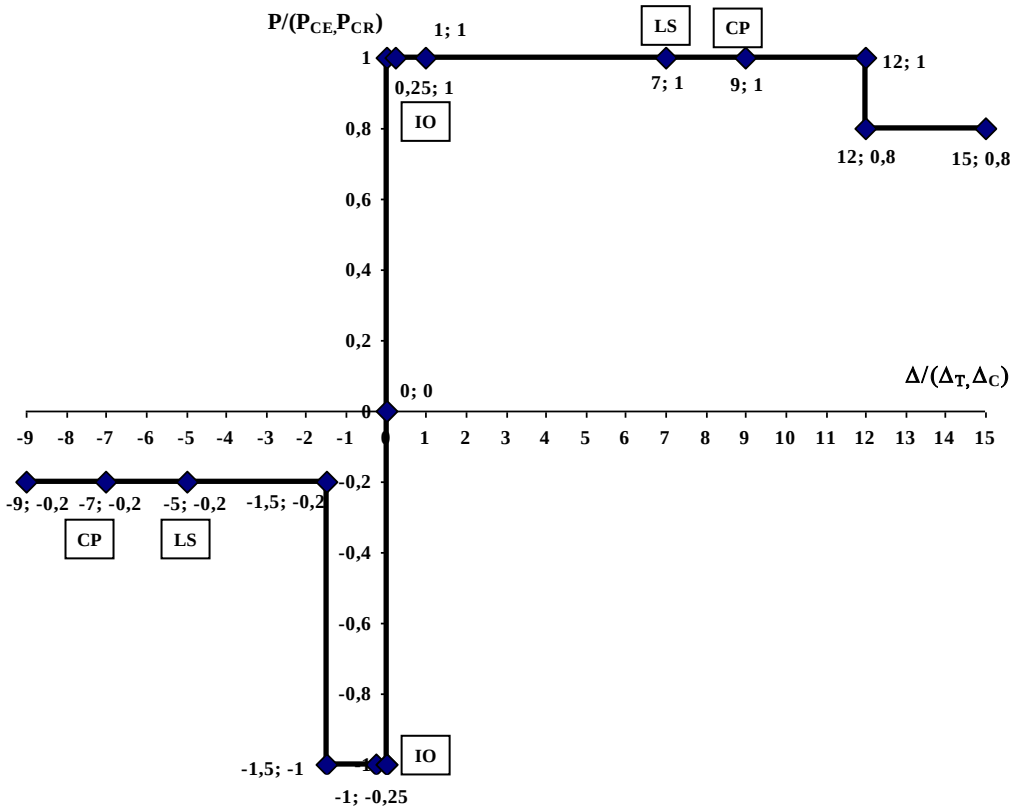
$c = 0.8$ ($= Q/Q_{CE}$)

Çekme etkisi altında elemandaki plastik uzamalara ait kabul edilen performans seviyeleri :

$IO = 0.25\Delta_T$ (Hemen kullanım seviyesi)

$LS = 7\Delta_T$ (Can güvenliği seviyesi)

$CP = 9\Delta_T$ (Toptan göçmenin önlenmesi seviyesi)



Şekil 5.8 Çapraz Elemanlara Ait İç Kuvvet – Şekil Değiştirme Bağıntısı

Kesitlerin mukavemet özelliklerine ve modelleme parametrelerine ilişkin özet bilgiler Tablo 5.1 ve 5.2 de verilmiştir.

Tablo 5.1 Kesitlerin Dayanım Sınır Değerleri

Kesit	**F (cm^2)**	**I (cm^4)**	**Z (cm^3)**	**Mp (kNm)**	**Np (kN)**	**N_{CR} (kN)**
HE240-B	106	11260	1053	252.72	2544	-
HE140-A	31.40	1033	-	-	753.6	282.7
IPE 240	39.1	3892	367	88.08	938.4	-

Tablo 5.2 Kesitlerin Akma ve Burkulma Durumu Sınır Şekil Değiştirme Değerleri

Kesit	**θ_y (rad)**	**Δ_T (m)**	**Δ_C (m)**
HE240-B	0.00534	-	-
HE140-A	-	0.00571	0.00214
IPE 240	0.00718	-	-

5.1.2 Mevcut Sistemin Çözümü

Birinci plastik mafsalın bulunmasından önce, akma koşulları uyarınca, elemanlardaki indirgenmiş plastik momentler ve bunlara karşı gelen normal kuvvet değerleri Tablo 5.4 de görülmektedir. Tablodaki değerler, sistemin ilk doğrusal olmayan analizi sonucu elde edilen normal kuvvet değerleri baz alınarak bulunmuşlardır. Doğrusal olmayan analizin başlangıcında kabul edilen normal kuvvet değerleri, düşey yüklerden dolayı oluşan normal kuvvetlerdir, Tablo 5.3.

Tablo 5.3 İlk Doğrusal Olmayan Çözümleme Adımı İçin Akma Koşulları

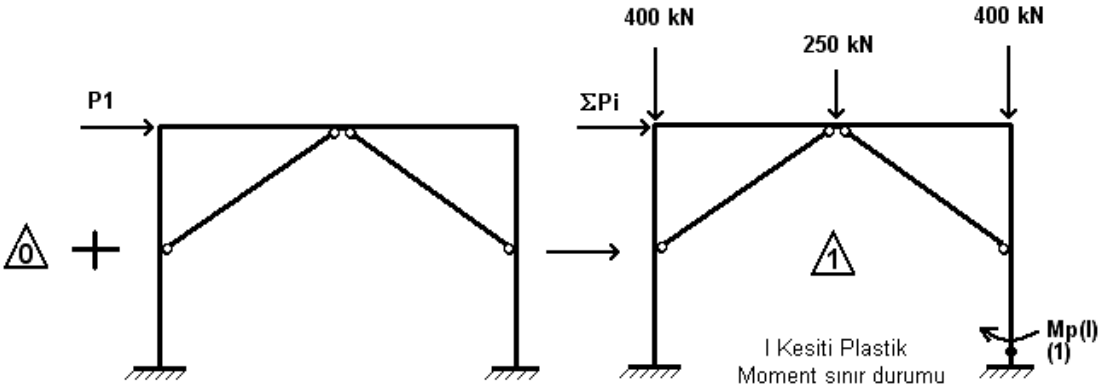
Eleman No.	**N (kN)**	**N/Np**	**Mp' (kNm)**
6-1 ve 5-7	-525	0.206	235.691
1-2 ve 4-5	-407.18	0.160	249.730
2-3 ve 3-4	-	-	88.080

Tablo 5.4 Son Doğrusal Olmayan Çözümleme Adımı İçin Akma Koşulları

Eleman No.	**N (kN)**	**N/Np**	**Mp' (kNm)**
6-1	-471.943	0.1855	242.162
1-2	-410.202	0.1612	249.377
2-3	-69.762	0.0743	88.08
3-4	> 0	-	88.08
4-5	-408.437	0.1605	249.584
5-7	-578.057	0.227	229.76

Birinci Plastik Kesitin Bulunması

Şekil 5.9 da, birinci plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim sunulmaktadır. Düşey yükler ("0" numaralı sistem) ile P_1 = 1 kN'luk birim yüklemenin süperpozisyonu sonucunda elde edilen kesit tesirleri, plastik kesit oluşturan akma dayanımı sınır değerlerini sağlayacak biçimde gerekli katsayılarla arttırılır. Bu katsayıların en küçüğü, birinci plastik kesiti veren yatay yük parametresi olur.



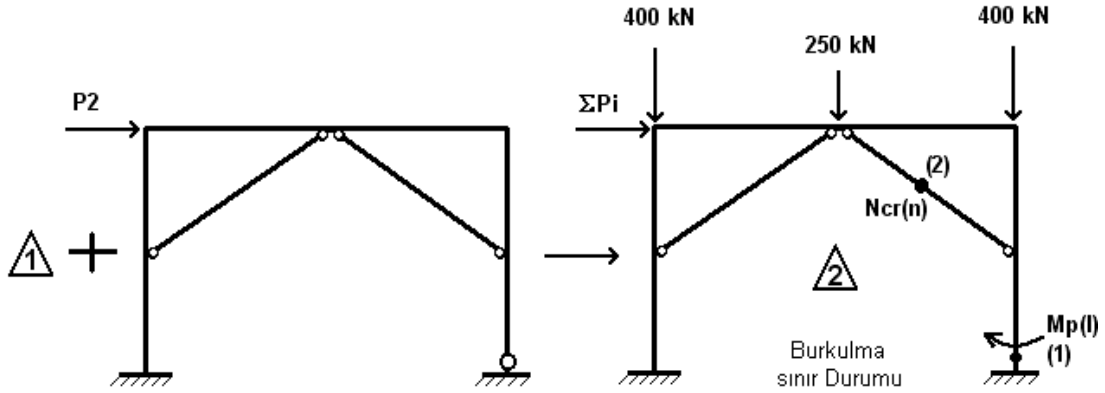
Şekil 5.9 Birinci Plastik Kesitin Bulunması

P_1 = 55.525 kN, $\Sigma Pi = P_1$ = 55.525 kN

$\delta_{1PM}{}^2$ = 0.00538 m = 0.539 cm (2 nolu düğüm noktası yatay ötelemesi)

İkinci Plastik Kesitin Bulunması

Birinci plastik kesitin hesabının ardından "1" numaralı sistem oluşur. "1" numaralı sistem ve bu sisteme ait kesit tesirleri ile P_2 =1 kN'luk birim yükleme sonucunda elde edilen kesit tesirleri süperpoze edilerek ikinci plastik kesit elde edilir. Şekil 5.10 da, ikinci plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim sunulmaktadır.



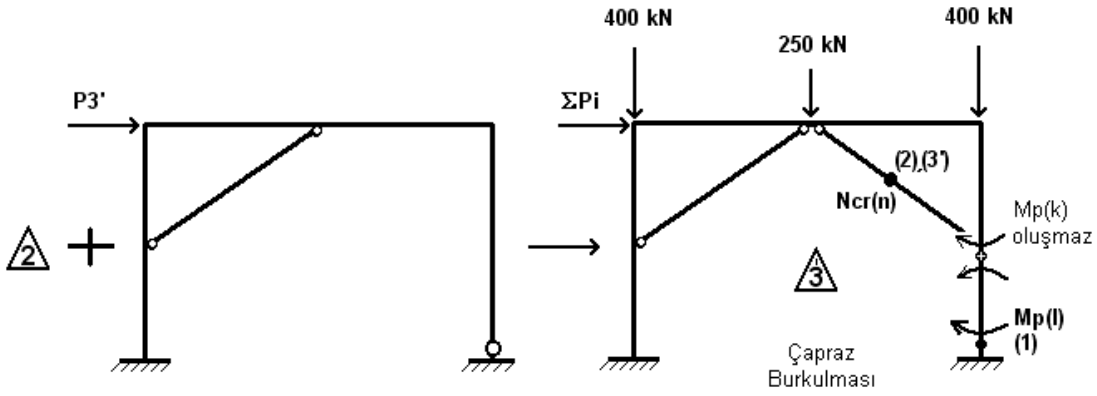
Şekil 5.10 İkinci Plastik Kesitin Bulunması

P_2 = 39.956 kN, $\Sigma Pi = P_1 + P_2$ = 95.484 kN

$\delta_{2PM}{}^2$ = 0.01336 m = 1.336 cm (2 numaralı düğüm noktası yatay ötelemesi)

Üçüncü Plastik Kesitin Bulunması

Şekil 5.11 de, üçüncü plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim verilmiştir. Ancak, sistemde üçüncü plastik mafsal oluşmadan önce, burkulma sınır durumuna gelen n kesitinin burkulma anındaki uzama şekil değiştirmesi kapasitesinin aşılmasıyla birlikte bölgesel mekanizma durumu oluşur. Bunun sonucunda, sistem yatay yük taşıma kapasitesini yitirir ve göçer.



Şekil 5.11 Üçüncü Plastik Kesitin Bulunması

$P_2 = 2.914$ kN, $\Sigma Pi = P_1 + P_2 + P_2' = 98.398$ kN

$\delta_{2'PM}^2 = 0.01493$ m = 1.493 cm (2 numaralı düğüm noktası yatay ötelemesi)

Mevcut sistemin doğrusal olmayan analizi sonucunda, yatay yük taşıma kapasitesi P = 98.398 kN, sistem süneklik oranı $\mu = (\delta_{1PM}^2 / \delta_{2'PM}^2) = 2.77$ olarak elde edilir. Bu durum, mevcut sistemin tasarım deprem kuvveti için seçilen yapı davranış katsayısının (R = 7) hiçbir şekilde sağlanmadığını ve sistemin öngörüldüğü düzeyde sünek bir davranış göstermediğini açıkça ortaya koyar. O halde, mevcut sistemin eşdeğer deprem kuvvetinin, tasarıma esas olarak alınan değerin çok üstünde olması gerekir ki bu da yapının yeteri derecede yatay yük taşıma kapasitesinin olmadığını ve güçlendirilmesi gerektiğini gösterir.

5.2 Güçlendirilmiş Sistemin Kapasitesinin Belirlenmesi

Yatay yük taşıma kapasitesinin yetersiz olduğu bilinen mevcut yapının güçlendirilmesi gerekmektedir. Güçlendirme işlemi için sisteme sürtünmeli enerji yutucu pasif yapısal kontrol sistemi eklenecektir. Bu sistem, yapının çapraz elemanları üzerinde teşkil edilen bir düğüm noktasından ibarettir. Düğüm noktasının çalışma prensibi, öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile sağlanan sürtünme kuvvetinin aşılması ve bulonların oval delik boyunca kayma hareketinin başlamasına dayanır. Bu tür düğüm noktalarına, eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktası ismi verilir. Düğüm noktasının kaymaya başlaması ile birlikte yapıda sürtünme kuvvetinin yaptığı işe paralel olarak enerji yutulması söz konusu olur. Böylece, yapının elastik ötesi şekil değiştirme istemi azalır ve çerçeve, elastik sınırlar içerisinde kalarak yapısal hasarlar önlenir.

Diğer taraftan, düğüm noktasının etkin çalışması için aşağıdaki koşulları sağlaması gerekir.

a). Çapraz elemanda burkulma olmaması için, sürtünme kuvvetinin çaprazın burkulma kuvvetinden küçük olması sağlanmalıdır.

$N_{kayma} = N_S = 270$ kN $< N_{CR} = 282.7$ kN

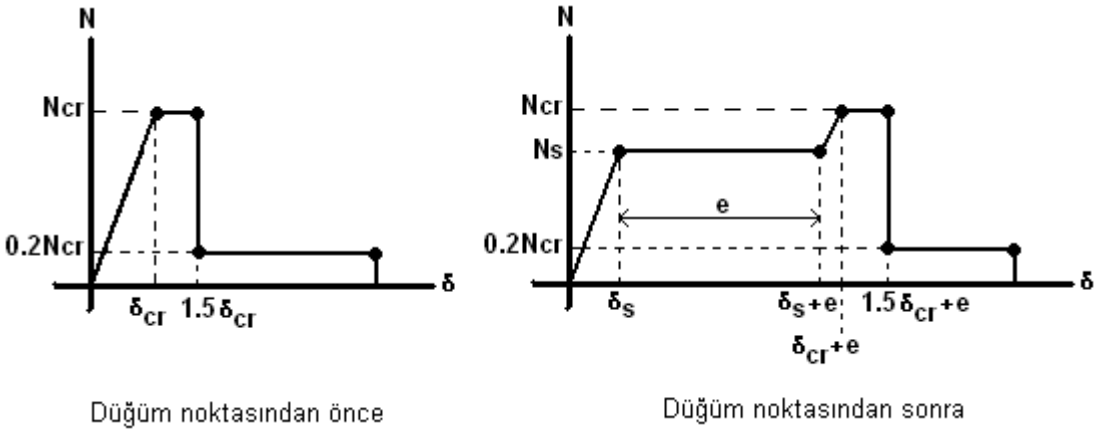
b). Seçilen delik uzunluğu öyle ayarlanmalıdır ki, kayma hareketi esnasında bulon delik ucuna dayanmamalıdır. Böylece çapraz eleman, kayma hareketi boyunca yük almaz ve sabit N_S kuvveti altında burkulmadan emniyetle kalabilir. Bu özelliği sağlayan delik uzunluğu, bir tarafa doğru, e = 20 mm olarak seçilmiştir. Toplam delik boyu ise, $L_d = (2e+d)$ olur. Burada d, bulon çapını göstermektedir.

c). Sürtünme kuvvetinin, bulonların toplam ezilme ve makaslama dayanımlarından küçük olması gerekir.

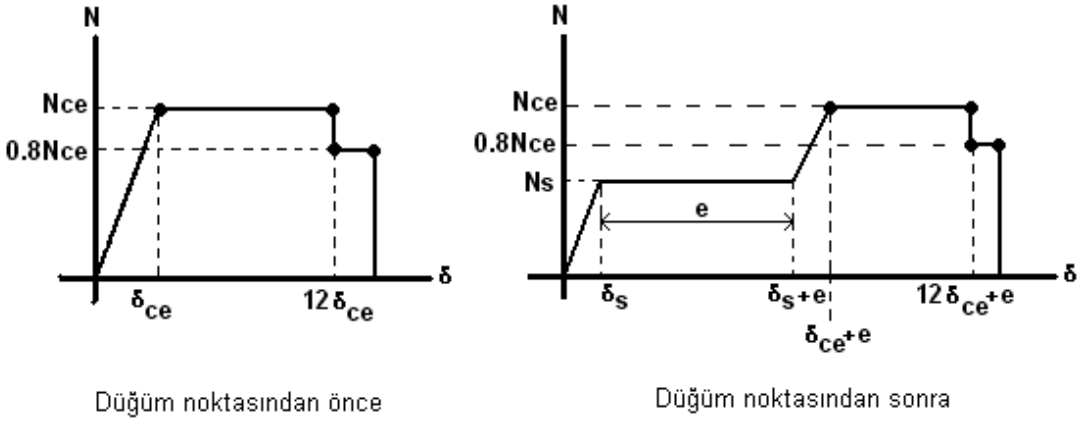
d). Bulonların delik ucuna dayanması durumunda, düğüm noktasının çalışmasını sağlayan birleşim levhalarının yeter derecede dayanımlı olması sağlanarak daha sünek bir davranış elde edilir.

Düğüm noktasının etkin çalışması için gerekli diğer koşullara Bölüm 3.5 te değinilmiştir.

Çaprazlarda, düğüm noktasının teşkil edilmesinden öncesine ve sonrasına ait yük-şekil değiştirme bağıntıları Şekil 5.12 ve 5.13 te görülmektedir.



Şekil 5.12 Basınç Alan Çapraz Elemandaki Yük-Şekil Değiştirme Bağıntıları



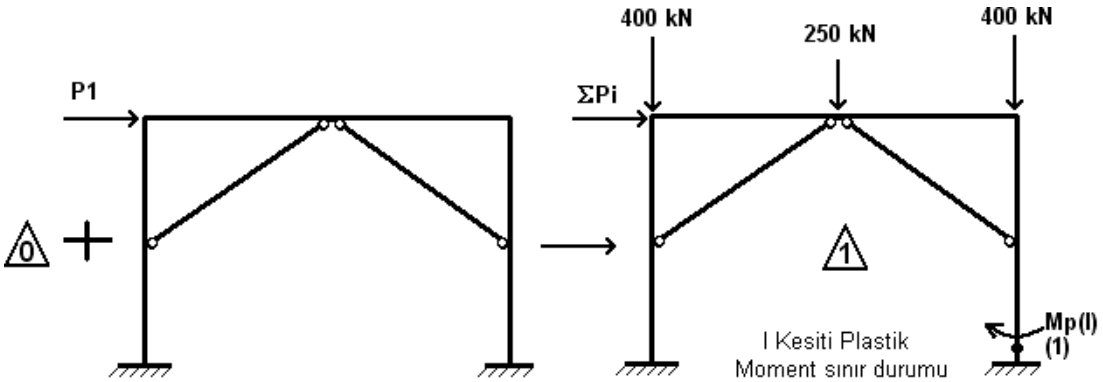
Şekil 5.13 Çekme Alan Çapraz Elemandaki Yük- Şekil Değiştirme Bağıntıları

5.2.1 Güçlendirilmiş Sistemin Çözümü

Çözüm yapılırken (3-5) çubuğuna ait boy değişmesi her adımda kontrol edilir. Ayrıca, plastik mafsallara ait plastik mafsal dönmeleri de her adım sonunda kontrol edilmelidir. Böylece, gerek kayma mesafesi gerekse plastik Şekil Değiştirme kapasiteleri okunabilir.

Birinci Plastik Kesitin Bulunması

Şekil 5.14 de, birinci plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim sunulmaktadır. Düşey yükler ile P_1 = 1 kN'luk birim yatay yüklemenin süperpozisyonu sonucunda elde edilen kesit tesirleri, herhangi bir kesitte plastik mafsal oluşumunu sağlayan kesit tesirlerine eşit olacak şekilde gerekli katsayılarla arttırılır. Bu katsayıların en küçüğü, birinci plastik mafsalın oluşumuna neden olan yatay yük parametresidir. Bu adımda, (l) kesitinde plastik mafsal oluşmaktadır.



Şekil 5.14 Birinci Plastik Kesitin Bulunması

P_1 = 55.525 kN, $\Sigma P_i = P_1$ = 55.525 kN

$\delta_{1PM}{}^2$ = 0.00538 m = 0.539 cm (2 numaralı düğüm noktasının yatay ötelemesi)

δ_{57} = 0.017905 m , θ_5 = -0.0033305 radyan, θ_7 = 0 (ankastre uç)

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerinin plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(1). $M_{57} = \mu_{57} + \theta_5\, m_{5\theta5}{}^{57} + \theta_7\, m_{5\theta7}{}^{57} + \delta_{57}\, m_{5\delta57}{}^{57} + \theta_k\, m_{5\theta k}{}^{57} + \theta_l\, m_{5\theta l}{}^{57}$

(2). $M_{75} = \mu_{75} + \theta_7\, m_{7\theta7}{}^{75} + \theta_5\, m_{7\theta5}{}^{75} + \delta_{75}\, m_{7\delta75}{}^{75} + \theta_l\, m_{7\theta l}{}^{75} + \theta_k\, m_{7\theta k}{}^{75}$

Burada,

$m_{5\theta5}{}^{57} = m_{5\theta k}{}^{57} = m_{7\theta7}{}^{75} = m_{7\theta l}{}^{75} = (4EI/L) = 31528$ kNm = 2A

$m_{5\theta7}{}^{57} = m_{5\theta l}{}^{57} = m_{7\theta5}{}^{75} = m_{7\theta k}{}^{75} = (2EI/L) = 15764$ kNm = A

$m_{5\delta57}{}^{57} = m_{7\delta75}{}^{75} = [(m_{5\theta5}{}^{57} + m_{5\theta7}{}^{57})/L] = (6EI/L^2) = 15764$ kN

$\mu_{57} = \mu_{75} = 0$

(1). $177.258 = 31528 * -0.0033305 + 15764 * 0.017905 + 2A\theta_k + A\theta_l$

(2). $229.760 = 15764 * -0.0033305 + 15764 * 0.017905 + A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse,

$$\left.\begin{aligned} 2A\theta_k + A\theta_l = 0 \\ A\theta_k + 2A\theta_l = 0 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(k)\,1PM} = 0 \\ \theta_{(l)\,1PM} = 0 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(l)\,1PM} = 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$ (plastikleşen kesitte plastik dönmenin sınır değeri)

$\Sigma\theta_{(k)\,1PM} < 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

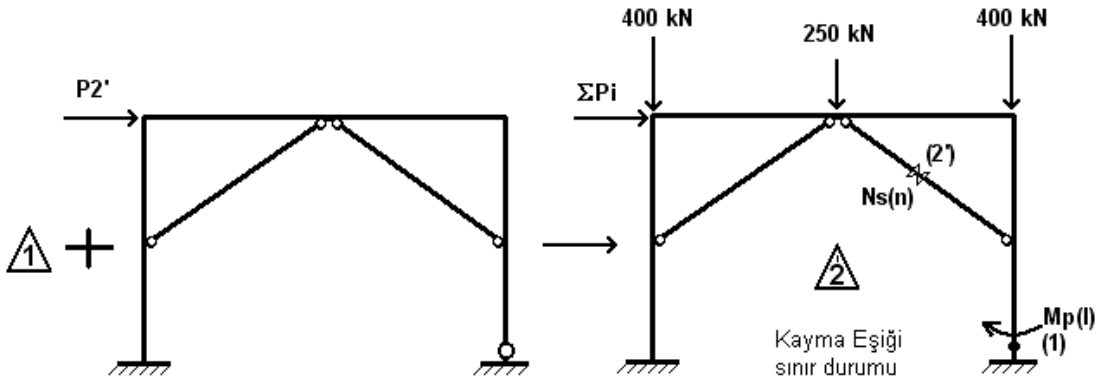
olarak elde edilir.

- (3-5) çubuğunun boy değişmesi

$\Delta_{1PM}^{(3-5)} = [(PL) / (EA)] = -0.0018$ m $= -0.18$ cm

İkinci Plastik Kesitin Bulunması

Şekil 5.15 de, ikinci plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim sunulmaktadır. Bu adımda, herhangi bir plastik kesit oluşmadan önce, (3-5) numaralı çaprazdaki normal kuvvet değeri, sürtünme kuvvetine eşit olur ve kayma hareketinin eşik değerine ulaşır.



Şekil 5.15 Kayma Eşiği Sınır Durumu

$P_{2'} = 26.590$ kN, $\Sigma P_i = P_1 + P_{2'} = 82.425$ kN

$\delta_{2',PM}^{2} = 0.01069$ m $= 1.069$ cm (2 nolu düğüm noktasının yatay ötelemesi)

$\delta_{57} = 0.02422$ m , $\theta_5 = -0.004182$ radyan, $\theta_7 = 0$ (ankastre uç)

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerinin plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(1). 206.920 = 31528*-0.004182 + 15764*0.02422 + $2A\theta_k + A\theta_l$

(2). 229.760 = 15764*-0.004182 + 15764*0.02422 + $A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse,

$2A\theta_k + A\theta_l = -174.884$
$A\theta_k + 2A\theta_l = -152.044$

$\theta_{(k)\,2'PM} = 0$
$\theta_{(l)\,2'PM} = -0.00273$

$\Sigma\theta_{(l)\,2'PM} = 1\ \theta_y + 0.511\ \theta_y = 1.511\ \theta_y < 10\ \theta_y$

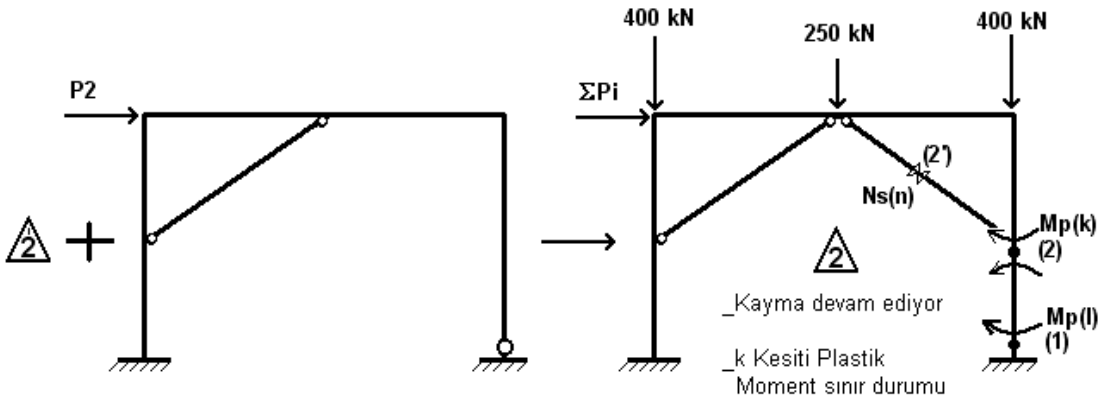
$\Sigma\theta_{(k)\,2'PM} < 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

- (3-5) çubuğunun boy değişmesi (kayma eşiğindeki değer, kayma mesafesinin kontrolunda kullanılacaktır)

$\Delta_{2'PM}^{(3-5)} = -0.00198$ m = -0.198 cm

Kayma miktarı: $e_{2'PM} = 0$ (kayma eşiği sınır durumu)

Şekil 5.16 da, ikinci plastik kesitin bulunmasına ilişkin ikinci adıma ait şematik gösterim sunulmaktadır. Bu adımda, kolon üzerindeki (k) kesitinde plastik mafsal oluşmaktadır.



Şekil 5.16 İkinci Plastik Kesitin Bulunması

$P_2 = 44.217$ kN, $\Sigma P_i = P_1 + P_{2'} + P_2 = 126.642$ kN

$\delta_{2PM}^{2} = 0.0345$ m = 3.45 cm (2 numaralı düğüm noktasının yatay ötelemesi)

$\delta_{57} = 0.04032$ m , $\theta_5 = -0.008582$ radyan, $\theta_7 = 0$ (ankastre uç)

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerinin plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(1). $229.760 = 31528*-0.008582 + 15764*0.04032 + 2A\theta_k + A\theta_l$

(2). $229.760 = 15764*-0.008582 + 15764*0.04032 + A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse,

$$\left.\begin{aligned} 2A\theta_k + A\theta_l &= -135.270 \\ A\theta_k + 2A\theta_l &= -270.558 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(k)\,2PM} &= 0 \\ \theta_{(l)\,2PM} &= -0.008582 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(l)\,2PM} = 1\ \theta_y + 1.607\ \theta_y = 2.607\ \theta_y < 10\ \theta_y$

$\Sigma\theta_{(k)\,2PM} = 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

- (3-5) çubuğunun boy değişmesi

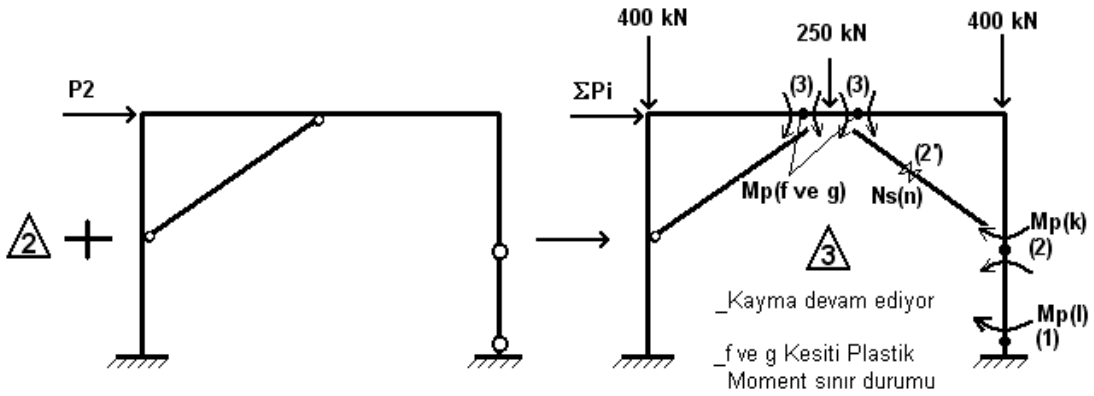
$\Delta_{2PM}^{(3-5)} = -0.0177\ m = -1.77\ cm$

Kayma miktarı: $e_{2PM} = \Delta_{2PM}^{(3-5)} - \Delta_{2'PM}^{(3-5)} = \left|-1.572\right|\ cm < e = 2.00\ cm$

Kayma hareketinin devam ettiği görülmektedir.

Üçüncü Plastik Kesitin Bulunması

Şekil 5.17 de, üçüncü plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim verilmiştir. Bu adımda, kiriş üzerindeki (f) ve (g) kesitlerinde plastik mafsal oluşmaktadır.



Şekil 5.17 Üçüncü Plastik Kesitin Bulunması

$P_3 = 10.546$ kN, $\Sigma P_i = P_1 + P_{2'} + P_2 + P_3 = 137.096$ kN

$\delta_{3PM}^{2} = 0.04563$ m = 4.563 cm (2 numaralı düğüm noktasının yatay ötelemesi)

$\delta_{57} = 0.0618$ m , $\theta_5 = -0.005112$ radyan, $\theta_7 = 0$ (ankastre uç)

$\delta_{23} = 0.04672$ m , $\theta_2 = -0.01474$ radyan, $\theta_3 = 0.00063$ radyan

$\delta_{34} = -0.04652$ m , $\theta_3 = 0.00063$ radyan, $\theta_4 = 0.01208$ radyan

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerindeki plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(1). $229.760 = 31528*-0.005112 + 15764*0.0618 + 2A\theta_k + A\theta_l$

(2). $229.760 = 15764*-0.005112 + 15764*0.0618 + A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse,

$2A\theta_k + A\theta_l = -583.284$

$A\theta_k + 2A\theta_l = -663.870$

$\theta_{(k)\,3PM} = -0.01063$

$\theta_{(l)\,3PM} = -0.01574$

$\Sigma\theta_{(l)\,3PM} = 1\ \theta_y + 2.948\ \theta_y = 3.948\ \theta_y < 10\ \theta_y$

$\Sigma\theta_{(k)\,3PM} = 1\ \theta_y + 1.991\ \theta_y = 2.991\ \theta_y < 10\ \theta_y$

- (2-3) çubuğu, (e) ve (f) kesitlerindeki plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(3). $M_{23} = \mu_{23} + \theta_2\, m_{2\theta 2}^{23} + \theta_3\, m_{2\theta 3}^{23} + \delta_{23}\, m_{2\delta 23}^{23} + \theta_e\, m_{2\theta e}^{23} + \theta_f\, m_{2\theta f}^{23}$

(4). $M_{32} = \mu_{32} + \theta_3\, m_{3\theta 3}^{32} + \theta_2\, m_{3\theta 2}^{32} + \delta_{32}\, m_{3\delta 32}^{32} + \theta_f\, m_{3\theta f}^{32} + \theta_e\, m_{3\theta e}^{32}$

Burada,

$m_{2\theta 2}^{23} = m_{2\theta e}^{23} = m_{3\theta 3}^{32} = m_{3\theta f}^{32} = (4EI/L) = 8173.2$ kNm = 2B

$m_{2\theta 3}^{23} = m_{2\theta f}^{23} = m_{3\theta 2}^{32} = m_{3\theta e}^{32} = (2EI/L) = 4086.6$ kNm = B

$m_{2\delta 23}^{23} = m_{3\delta 32}^{32} = [(m_{2\theta 2}^{23} + m_{2\theta 3}^{23})/L] = (6EI/L^2) = 3064.95$ kN

$\mu_{23} = \mu_{32} = 0$

(3). $25.255 = 8173.2*-0.01474 + 4086.6*0.00063 + 3064.95*0.04672 + 2B\theta_e + B\theta_f$

(4). $88.080 = 4086.6*-0.01474 + 8173.2*0.00063 + 3064.95*0.04672 + B\theta_e + 2B\theta_f$

(3) ve (4) denklemleri bir arada çözülürse,

$2B\theta_e + B\theta_f = 0$

$B\theta_e + 2B\theta_f = 0$

$\theta_{(e)\,3PM} = 0$

$\theta_{(f)\,3PM} = 0$

$\Sigma\theta_{(e)\,3PM} < 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

$\Sigma\theta_{(f)\,3PM} = 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$ (Plastikleşen kesitte plastik dönmenin sınır değeri)

- (3-4) çubuğu, (g) ve (h) kesitlerindeki plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(5). $M_{34} = \mu_{34} + \theta_3\, m_{3\theta3}^{34} + \theta_4\, m_{3\theta4}^{34} + \delta_{34}\, m_{3\delta34}^{34} + \theta_g\, m_{3\theta g}^{34} + \theta_h\, m_{3\theta h}^{34}$

(6). $M_{43} = \mu_{43} + \theta_4\, m_{4\theta4}^{43} + \theta_3\, m_{4\theta3}^{43} + \delta_{43}\, m_{4\delta43}^{43} + \theta_h\, m_{4\theta h}^{43} + \theta_g\, m_{4\theta g}^{43}$

Burada,

$m_{3\theta3}^{34} = m_{3\theta g}^{34} = m_{4\theta4}^{43} = m_{4\theta h}^{43} = (4EI/L) = 8173.2$ kNm = 2B

$m_{3\theta4}^{34} = m_{3\theta h}^{34} = m_{4\theta3}^{43} = m_{4\theta g}^{43} = (2EI/L) = 4086.6$ kNm = B

$m_{3\delta34}^{34} = m_{4\delta43}^{43} = [(m_{3\theta3}^{34} + m_{3\theta4}^{34})/L] = (6EI/L^2) = 3064.95$ kN

$\mu_{34} = \mu_{43} = 0$

(5). -88.080 = 8173.2*0.00063 + 4086.6*0.01208 + 3064.95*-0.04652 + $2B\theta_g$ + $B\theta_h$

(6). -41.280 = 4086.6*0.00063 + 8173.2*0.01208 + 3064.95*-0.04652 + $B\theta_g$ + $2B\theta_h$

(5) ve (6) denklemleri bir arada çözülürse,

$$\left.\begin{aligned} 2B\theta_g + B\theta_h = 0 \\ B\theta_g + 2B\theta_h = 0 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(g)\,3PM} = 0 \\ \theta_{(h)\,3PM} = 0 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(g)\,3PM} = 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$ (Plastikleşen kesitte plastik dönmenin sınır değeri)

$\Sigma\theta_{(h)\,3PM} < 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

- (3-5) çubuğunun boy değişmesi

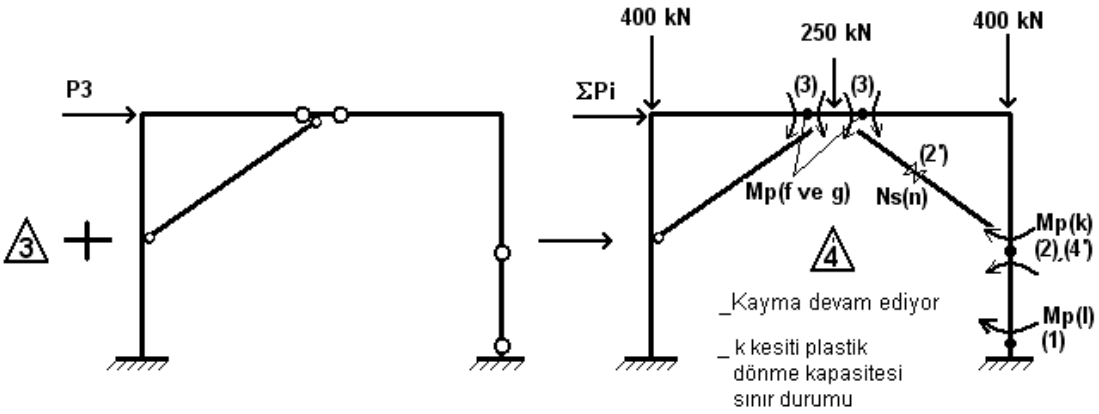
$\Delta_{3PM}^{(3-5)} = -0.01465$ m = $\left|-1.465\right|$ cm < $\left|\Delta_{2PM}^{(3-5)}\right|$

Kayma tersinir yönde devam etmekte ve bulon oval delik ucuna dayanmamaktadır. Hareketin tersinir yönde ilerlemesi sonucunda, kayma mesafesi için verilebilecek en büyük değerin $e_{maks} = e_{2PM} = 1.572$ cm olduğu görülmektedir.

Dördüncü Plastik Kesitin Bulunması

Şekil 5.18 de, dördüncü plastik kesitin bulunmasına ilişkin şematik gösterim sunulmuştur. Sistemde dördüncü plastik mafsal oluşmadan önce, (k) kesitinde plastik dönme kapasitesinin aşıldığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak, sistemin yatay yük yaşıma kapasitesinde düşme meydana gelir ve sistem göçer. Bu arada, kayma

hareketi tersinir yönde devam etmektedir. Böylece, düğüm noktasında istenen çevrimsel döngü sağlanarak enerji yutulması gerçekleşmiş olur ve çaprazın burkulması önlenir.



Şekil 5.18 Dördüncü Plastik Kesitin Bulunması ve (k) Kesitinde Göçme Durumu

P_4 = 34.310 (a kesitinde plastik mafsal oluşumu için gerekli yatay yük parametresi)

$\delta_{4PM}{}^2$ = 0.1494 m = 14.94 cm (2 numaralı düğüm noktasının yatay ötelemesi)

δ_{57} = 0.23684 m , θ_5 = 0.01863 radyan, θ_7 = 0 (ankastre uç)

δ_{23} = 0.14168 m , θ_2 = -0.0402 radyan, θ_3 = 0.00063 radyan

δ_{34} = -0.14148 m , θ_3 = 0.00063 radyan, θ_4 = 0.03582 radyan

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerindeki plastik mafsal (PM) dönmelerinin hesabı

(1). $229.760 = 31528*0.01863 + 15764*0.23684 + 2A\theta_k + A\theta_l$

(2). $229.760 = 15764*0.01863 + 15764*0.23684 + A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse,

$$\left.\begin{array}{l} 2A\theta_k + A\theta_l = -4091.152 \\ A\theta_k + 2A\theta_l = -3797.469 \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} \theta_{(k)\,4PM} = -0.09272 \\ \theta_{(l)\,4PM} = -0.07409 \end{array}$$

$\Sigma\theta_{(l)\,4PM} = 1\ \theta_y + 13.874\ \theta_y = 14.874\ \theta_y > 10\ \theta_y$ (PM dönme kapasitesi aşılmıştır)

$\Sigma\theta_{(k)\,4PM} = 1\ \theta_y + 17.363\ \theta_y = 18.363\ \theta_y > 10\ \theta_y$ (PM dönme kapasitesi aşılmıştır)

(k) ve (l) kesitlerinde dönme kapasitelerinin aşılmaması için, dördüncü plastik kesitin oluşumuna neden olan yük parametresinin bir (β) çarpanı yardımı ile indirgenmesi gerekir.

(k) kesiti için $\beta_{(k)}$ çarpanı,

a) Son adımda PM dönme miktarı = $\theta_{(k)\,4PM} - \theta_{(k)\,3PM} = 15.372\ \theta_y$
b) PM dönme kapasitesi için gerekli dönme = $10\ \theta_y - \Sigma\theta_{(k)\,3PM} = 7.009\ \theta_y$
$\beta_{(k)} = b / a = 0.456$

(l) kesiti için $\beta_{(l)}$ çarpanı,

a) Son adımda PM dönme miktarı = $\theta_{(l)\,4PM} - \theta_{(l)\,3PM} = 10.926\ \theta_y$
b) PM dönme kapasitesi için gerekli dönme = $10\ \theta_y - \Sigma\theta_{(l)\,3PM} = 6.052\ \theta_y$
$\beta_{(l)} = b / a = 0.554$

Görüldüğü gibi, (k) kesiti (l) kesitine oranla daha önce plastik mafsal dönme kapasitesine erişmektedir, ($\beta_{(k)} < \beta_{(l)}$). Bu durumda, dördüncü plastik kesitin oluşumuna neden olan P_4 yük parametresinin, (k) kesitinin dönme kapasitesinin aşılmamasını sağlayan $\beta_{(k)}$ çarpanı ile indirgenmesi gerekir. İndirgeme sonuçları aşağıda verilmiştir.

$P_{4'} = \beta_{(k)} * P_4 = 15.645$ kN, $\Sigma P_i = P_1 + P_{2'} + P_2 + P_3 + P_{4'} = 152.741$ kN $= P_G$
$\delta_{4'PM}{}^2 = 0.0930$ m $= 9.30$ cm (2 numaralı düğüm noktasının yatay ötelemesi)
$\delta_{57} = 0.14162$ m , $\theta_5 = 0.00571$ radyan, $\theta_7 = 0$ (ankastre uç)
$\delta_{23} = 0.09002$ m , $\theta_2 = -0.02635$ radyan, $\theta_3 = 0.00063$ radyan
$\delta_{34} = -0.0898$ m , $\theta_3 = 0.00063$ radyan, $\theta_4 = 0.0229$ radyan

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerindeki plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(1). $229.760 = 31528 * 0.00571 + 15764 * 0.14162 + 2A\theta_k + A\theta_l$
(2). $229.760 = 15764 * 0.00571 + 15764 * 0.14162 + A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse,

$2A\theta_k + A\theta_l = -2182.763$
$A\theta_k + 2A\theta_l = -2092.750$

$\theta_{(k)\,4'PM} = -0.04806$
$\theta_{(l)\,4'PM} = -0.04235$

$\Sigma\theta_{(l)\,4'PM} = 1\ \theta_y + 7.930\ \theta_y = 8.930\ \theta_y < 10\ \theta_y$
$\Sigma\theta_{(k)\,4'PM} = 1\ \theta_y + 9\ \theta_y = 10\ \theta_y$ (plastik mafsal dönme kapasitesinin sınır değeri)

(2-3) çubuğu, (e) ve (f) kesitlerindeki plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(3). $20.469 = 8173.2*-0.02635 + 4086.6*0.00063 + 3064.95*0.09002 + 2B\theta_e + B\theta_f$

(4). $88.080 = 4086.6*-0.02635 + 8173.2*0.00063 + 3064.95*0.09002 + B\theta_e + 2B\theta_f$

(3) ve (4) denklemleri bir arada çözülürse,

$$\left.\begin{aligned} 2B\theta_e + B\theta_f &= -42.649 \\ B\theta_e + 2B\theta_f &= -85.294 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(e)\,4'PM} &= 0 \\ \theta_{(f)\,4'PM} &= 0.010436 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(e)\,4'PM} < 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

$\Sigma\theta_{(f)\,4'PM} = 1\ \theta_y + 1.454\ \theta_y = 2.454\ \theta_y < 10\ \theta_y$

- (3-4) çubuğu, (g) ve (h) kesitlerindeki plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(5). $-88.080 = 8173.2*0.00063 + 4086.6*0.0229 + 3064.95*-0.0898 + 2B\theta_g + B\theta_h$

(6). $-41.280 = 4086.6*0.00063 + 8173.2*0.0229 + 3064.95*-0.0898 + B\theta_g + 2B\theta_h$

(5) ve (6) denklemleri bir arada çözülürse,

$$\left.\begin{aligned} 2B\theta_g + B\theta_h &= 88.420 \\ B\theta_g + 2B\theta_h &= 44.212 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(g)\,4'PM} &= 0.01803 \\ \theta_{(h)\,4'PM} &= 0 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(g)\,4'PM} = 1\ \theta_y + 2.511\ \theta_y = 3.511\ \theta_y < 10\ \theta_y$

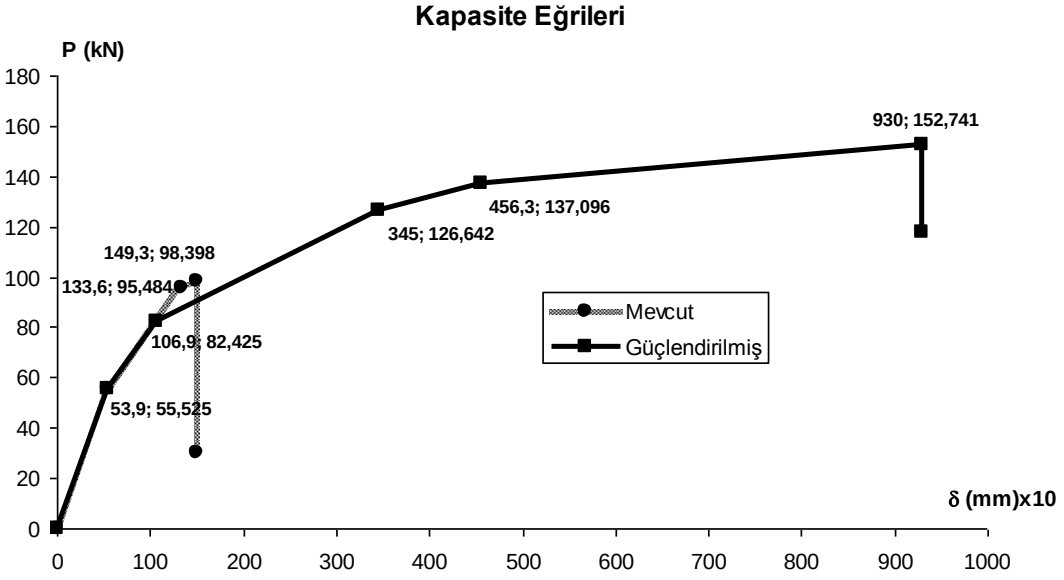
$\Sigma\theta_{(h)\,4'PM} < 1\ \theta_y < 10\ \theta_y$

- (3-5) çubuğunun boy değişmesi

$\Delta_{4'PM}^{(3-5)} = -0.0138\ m = |-1.38|\ cm < |\Delta_{3PM}^{(3-5)}|$

Kayma tersinir yönde devam etmektedir.

Şekil 5.19 da, doğrusal olmayan statik çözümleme sonucunda bulunan, mevcut ve güçlendirilmiş sistemlere ait kapasite eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.19 Mevcut ve Güçlendirilmiş Sistemlere Ait Kapasite Eğrileri

Her iki sisteme ait kapasite eğrileri değerlendirildiğinde, doğrusal kayıcı bulonlu düğüm noktası ile güçlendirilmiş sistemin elastik ötesi şekil değiştirebilme yeteneğinin, mevcut sistemin çok üzerine çıktığı açıkça görülmektedir. Her iki sistem için elastik sınır yatay yük parametresi, P_1 = 55.525 kN'dur. Buna göre, her iki sistemin elastik ötesi şekil değiştirebilme yetenekleri olarak tanımlanan süneklik oranları kontrol edilirse aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

$$\mu(\text{mevcut}) = \frac{\delta_{toplam}}{\delta_{elastik}} = \frac{0.01493}{0.00539} = 2.77$$

$$\mu(\text{güçlendirilmiş}) = \frac{\delta_{toplam}}{\delta_{elastik}} = \frac{0.0930}{0.00539} = 17.254$$

Görüldüğü gibi, doğrusal kayıcı bulonlu düğüm noktası ile güçlendirilen yapı sisteminin süneklik oranı çok fazla artmaktadır. Ancak bu sonuç, sistemin performansının da aynı oranda artacağı anlamına gelmeyebilir. Bu konuda kesin bir yargıya ulaşmak için, her iki sisteme performansa dayalı değerlendirme uygulanması gerekir.

5.3 Performans Analizi

Her iki yapının performans analizinin yapılabilmesi için, hesabın başında yapının bulunduğu bölgenin deprem karakteristiklerinin, yani sismik talebinin belirlenmesi gerekir. Bunun için [1] numaralı kaynakta belirtilen deprem karakteristikleri, EK B de belirtilen deprem karakteristiklerine mümkün olduğunca yakın seçilecektir. Yani burada yapılan işlem, Amerikan ve Türk deprem yönetmeliklerinde verilen koşulların her iki sistem için birbirine yakın sonuçlar içermesini sağlamaktır.

EK B'de, Kaynak [19] uyarınca, ideal sistemin çözümü için seçilen deprem karakteristikleri aşağıda özetlenmektedir.

- Deprem Bölgesi : II. Derece Deprem Bölgesi ($A_0 = 0.30$)

Zemin Koşulları : Zemin Sınıfı Z1

Z1 Zemin sınıfına ait spektrum karakteristik periyotları

$T_A = 0.10$ sn , $T_B = 0.30$ sn

5.3.1 Deprem Karakteristiklerinin Belirlenmesi

a). Deprem Risk (Etki) Seviyesi: Yapı için seçilen deprem risk seviyesi, tasarım depremi baz alınarak belirlenmiştir. Bu risk seviyesi, %10/50 yıl deprem risk etkilerini göz önüne alır ve ortalama dönüş periyodu 500 yıl olan bu deprem riskinin yapının ömrü boyunca ortaya çıkması pek olası değildir. Tasarım depremi için deprem etki türü katsayısı aşağıdaki değer olarak alınmaktadır.

E = 1.0 (Bu değer Tablo 4.9 ve 4.10 da dip notu olarak verilmektedir.)

b). Deprem Bölge Katsayısı: Deprem bölge katsayısı, yapının bulunduğu deprem bölgesine göre, Tablo 4.8 aracılığı ile belirlenir. Yapı, dört numaralı deprem bölgesinde yer almaktadır ve bu durumda, deprem bölge katsayısı

Z = 0.40

c). Deprem Kaynağı türü: Yapının bulunduğu bölge, büyük depremleri oluşturma potansiyeline sahip bir kaynağa yakındır. Tablo 4.7 de, A türü büyük deprem oluşturan kaynak için $M>7$ olarak tespit edilmektedir.

d). Deprem Kaynağına Mesafe: Yapının bulunduğu yer, büyük deprem kaynağına 15 km den daha fazla bir uzaklıkta bulunmaktadır. Bu durumda, Tablo 4.6 dan, kaynağa olan uzaklıklara göre belirlenen katsayılar elde edilebilir.

$N_A = 1.0$

$N_V = 1.0$

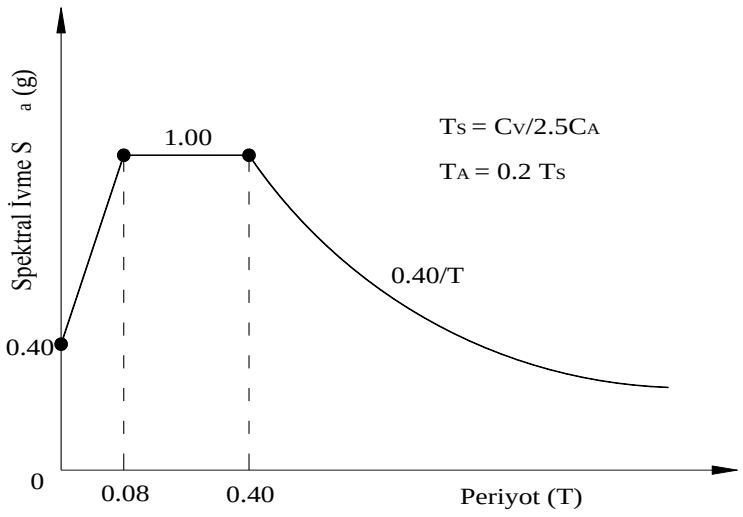
e). Zemin Sınıfı: Yapının inşa edileceği bölgeye ait geoteknik araştırmalar sonucunda belirlenen zemin cinsinin kaya olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda, Tablo 4.11 uyarınca, zemin sınıfı S_B olarak seçilmiştir.

f). Elastik Tepki Spektrum Eğrisi: Elastik tepki spektrum eğrisi, yapıyı zorlayan deprem etkilerini temsil eder. Elastik spektrum eğrisi, C_A ve C_V parametrelerinin tespiti ile belirlenir. Tablo 4.9 ve 4.10 dan, yukarıda belirlenen tüm karakteristiklere bağlı olarak C_A ve C_V parametrelerinin değerleri alınmıştır. Buna göre

$C_A = 0.40$

$C_V = 0.40$

değerleri elde edilir. Bu değerlere bağlı elastik ivme-periyot spektrum eğrisi, (S_a-T) Şekil 5.20 de gösterilmiştir.



Şekil 5.20 (S_a-T) Spektrum Eğrisi

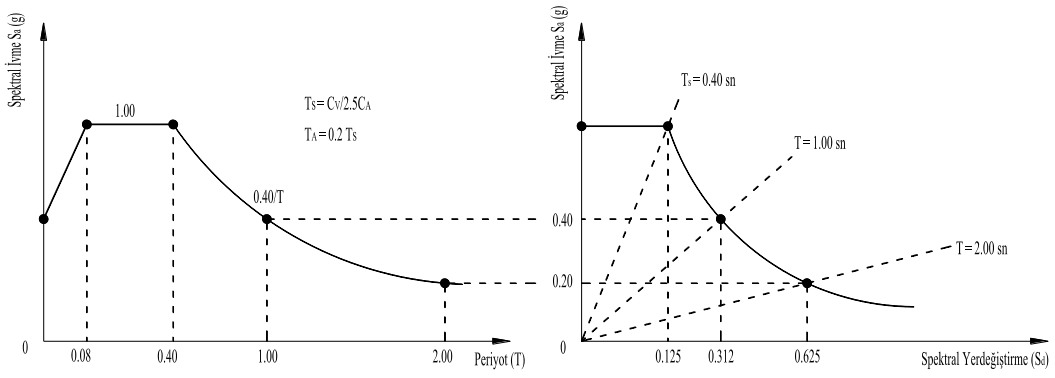
Seçilen deprem karakteristiklerine bağlı olarak elde edilen (S_a-T) elastik ivme-periyot spektrum eğrisinin, (S_a-S_d) elastik ivme-yer değiştirme spektrum eğrisi formuna (ADRS) dönüştürülmesi gerekir. Dönüştürme işlemi için Denklem (4.1) kullanılır. Sonuçlar Tablo 5.5 te görülmektedir.

$$S_d(T) = \frac{T^2}{4\pi} g S_a(T) \quad (4.1)$$

Tablo 5.5 ADRS Formundaki Talep Spektrum Eğrisinin İvme ve Yer Değiştirme Değerleri (D: Talep-Demand)

S_a(D) / g	T(sn)	S_d(D) / g
0.40	0	0
1.00	0.08	0.005
1.00	0.40	0.125
0.40	1	0.312
0.20	2	0.625

Şekil 5.21 de, (S_a-T) elastik ivme-periyot spektrum eğrisinin (S_a-S_d) elastik ivme-yer değiştirme spektrum eğrisine dönüştürülmüş hali gösterilmiştir.



Şekil 5.21 Talep Spektrum Eğrilerinin Dönüştürülmüş Halleri

5.3.2 Kapasite Eğrisinin Kapasite Spektrum Eğrisine Dönüştürülmesi

Mevcut ve güçlendirilmiş sistemlerin performans analizlerinin yapılması ve performans noktalarının belirlenmesi için, kapasite eğrilerinin kapasite spektrum eğrilerine dönüştürülmesi gerekir. Böylece, talebin ve kapasitenin aynı eksen

takımında değerlendirilmesi sağlanmış olur. Bu işlem için, Bölüm 4 te verilen eşitlikler kullanılacaktır.

Kapasite spektrum eğrisi, yapıların dinamik karakterlerine bağlı olarak tespit edilir. Deprem etkisi altında, yapıda önemli etkiyi genellikle birinci modun meydana getirdiği bilindiği için, sadece bu mod göz önüne alınır. Ele alınan yapılar tek katlı çaprazlı bir çelik çerçeve taşıyıcı sisteme sahip olduğu için, doğal olarak, birinci titreşim modu ve bu modun genliği hesaplarda etkili olacaktır. Mevcut yapının güçlendirilmesi için kullanılan yapısal kontrol sisteminin yapının rijitliğine hiçbir etkisinin bulunmadığı düşünüldüğünde, her iki sistemin dinamik karakterlerinin aynı olduğu sonucu ortaya çıkar. Bu durumda, mevcut ve güçlendirilmiş sistemlerin kapasite spektrum eğrilerinin elde edilmesinde kullanılacak olan modal çözümleme sonuçları değişmemektedir. Yapı analizi için, bilgisayar ortamında geliştirilen yazılım programı SAP 2000 [15] yardımı ile yapılan modal analiz sonuçları, her iki sistem için Tablo 5.6 ve 5.7 da verilmiştir.

Tablo 5.6 Her İki Sistem İçin Mod Periyotları ve Kütle Katılım Oranları

Modal Kütle Katılımı									
Durum	**Adım Tipi**	**Adım No**	**Periyot**	**UX**	**UY**	**UZ**	**TopUX**	**TopUY**	**TopUZ**
Yazı	Yazı	Birimsiz	sn.	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz	Birimsiz
MODAL	Mode	1	0,670824	0,999844	0	0	0,999844	0	0
MODAL	Mode	2	0,296596	0	0	0,251374	0,999844	0	0,251374
MODAL	Mode	3	0,088082	0	0	0,000206	0,999844	0	0,25158
MODAL	Mode	4	0,065764	0,00003	0	0	0,999874	0	0,25158
MODAL	Mode	5	0,065701	0	0	0,74842	0,999874	0	1
MODAL	Mode	6	0,042423	0,000126	0	0	1	0	1

Tablo 5.7 Birinci Hakim Mod Şekli İçin Düğüm Noktası Yer Değiştirmeleri

Düğüm Noktası Deplasmanları				
DN	**Kot**	**Adım Tipi**	**Mod No**	**Ux**
Yazı	m	Yazı	Birimsiz	m
2	6	Mod	1	-0,307
1	3	Mod	1	-0,275
6	0	Mod	1	0

Tablo 5.6 dan görüldüğü gibi, her iki yapı sistemi için hakim mod, birinci moddur. Birinci modun x doğrultusundaki kütle katılım oranı %100 e yakındır. Tablo 5.7 de ise, birinci hakim moda için, düğüm noktalarının modal yer değiştirmeleri gösterilmektedir. Modal yer değiştirmeler aynı zamanda yapının o moda ait mod

şeklini ve genliğini verir. Bu durumda, (2) numaralı düğüm noktasının birinci moda ait normalleştirilmiş genliği

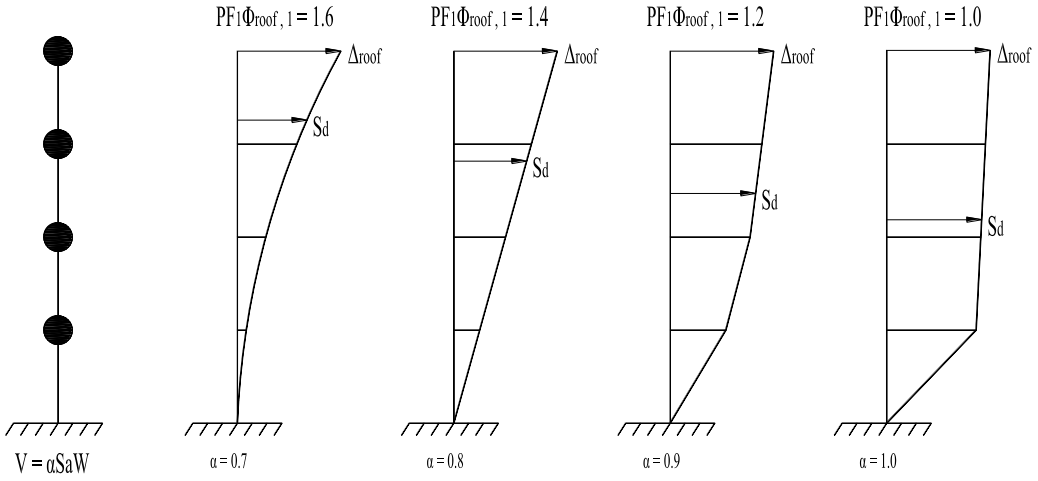
$\Phi_{1,2} = \Phi_{1,roof} = 1.00$

olarak elde edilir. Birinci moda ait genlik elde edildiğine göre, birinci doğal moda ait modal kütle katsayısı, α_1 ve modal katılım çarpanı, PF_1 değerleri hesaplanabilir.

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1 / g)\right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{N} (wi / g)\right]\left[\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1^2 / g)\right]} = 1.00 \qquad (4.4)$$

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1 / g)}{\sum_{i=1}^{N} (wi\,\phi i1^2 / g)}\right] = 1.00 \qquad (4.5)$$

[1] numaraları kaynakta, katılım çarpanı ve modal kütle katsayısı için, çeşitli göreli ara kat ötelemelerine bağlı olarak alınan değerler verilmektedir. Bu değerlere ilişkin bilgi, Şekil 5.22 de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi, düzgün bir dinamik davranışa sahip olan yapılarda, yukarda bulunan değerler doğrudan doğruya belirlenebilmektedir.



Şekil 5.22 Göreli Ara Kat Ötelemelerine Bağlı Olarak Alınan α_1 ve $PF_1\Phi_{1,roof}$ Değerleri

Her iki sistemin ortak modal kütle katsayısı ve modal katılım çarpanı bulunduktan sonra, kapasite spektrum eğrisini belirleyen spektral ivme ve yer değiştirme değerlerinin kapasite eğrisinin her adımı için elde edilmesi kolaylaşır. Bunun için Bölüm 4 de verilen Denklem (4.2) ve (4.3) kullanılacaktır.

$$Sa_i = (V / W) / \alpha_1 \quad (4.2)$$

$$Sd_i = \Delta_{roof} / (PF_1\Phi_{1,roof}) \quad (4.3)$$

Mevcut ve güçlendirilmiş sistemlerin kapasite spektrum eğrilerine ait değerleri, Tablo 5.8 ve 5.9 da topluca sunulmaktadır.

Tablo 5.8 Mevcut Sistemin Kapasite Spektrum Değerleri (C : Kapasite)

Adım	V (kN)	W (kN)	V/W	Δ_{roof} (m)	S_{ai} (C)	S_{di} (C)
1	55.525	1050	0.0529	0.00539	0.0529	0.00539
2	95.484	1050	0.0909	0.01336	0.0909	0.01336
3’	98.398	1050	0.0937	0.01493	0.0937	0.01493

Tablo 5.9 Güçlendirilmiş Sistemin Kapasite Spektrum Değerleri

Adım	V (kN)	W (kN)	V/W	Δ_{roof} (m)	S_{ai} (C)	S_{di} (C)
1	55.525	1050	0.0529	0.00539	0.0529	0.00539
2’	82.425	1050	0.0785	0.01069	0.0785	0.01069
2	126.642	1050	0.1206	0.03450	0.1206	0.03450
3	137.096	1050	0.1306	0.04563	0.1306	0.04563
4’	152.741	1050	0.1455	0.09300	0.1455	0.09300

5.3.3 Mevcut Sistemin Performans Analizi

Bu aşamada, elastik talep ve kapasite spektrum eğrileri belirlenen mevcut sistemin performans analizi yapılarak performans noktası belirlenecek ve bu performans noktasındaki hasar seviyesi tespit edilecektir. Mevcut sistemin performans noktası bulunurken, Bölüm 4.2.5.2 de belirtilen bir ardışık yaklaşım yöntemi uygulanacaktır. Ardışık yaklaşımın ilk adımında, kapasite spektrum eğrisi üzerinde a_{pi} ve buna karşı gelen d_{pi} koordinatlarına sahip bir nokta seçilecektir. Hesaplamalar sırasında, kapasite spektrum eğrisi çift doğru ile idealleştirilecektir. Bu idealleştirme yapılırken, idealleştirilen eğri ve gerçek eğri altında kalan alanların birbirine eşit olması

sağlanmalıdır. Koşulun sağlanmasının ardından, efektif sönüm oranı ve bu orana bağlı olarak spektral indirgeme faktörleri elde edilecektir. %5 sönümlü elastik spektrum eğrisi indirgenerek a_{pi} ivme değerine karşı gelen d_p yerdeğiştirme miktarı belirlenecektir. Spektral yer değiştirme değerleri d_{pi} ve d_p arasındaki ($0.95d_{pi} < d_p < 1.05d_{pi}$) koşulu sağlanır ise ardışık yaklaşımın ilk adımında sonuca ulaşılmış olacaktır. Aksi taktirde, ikinci bir nokta seçilerek işleme aynen devam edilecektir.

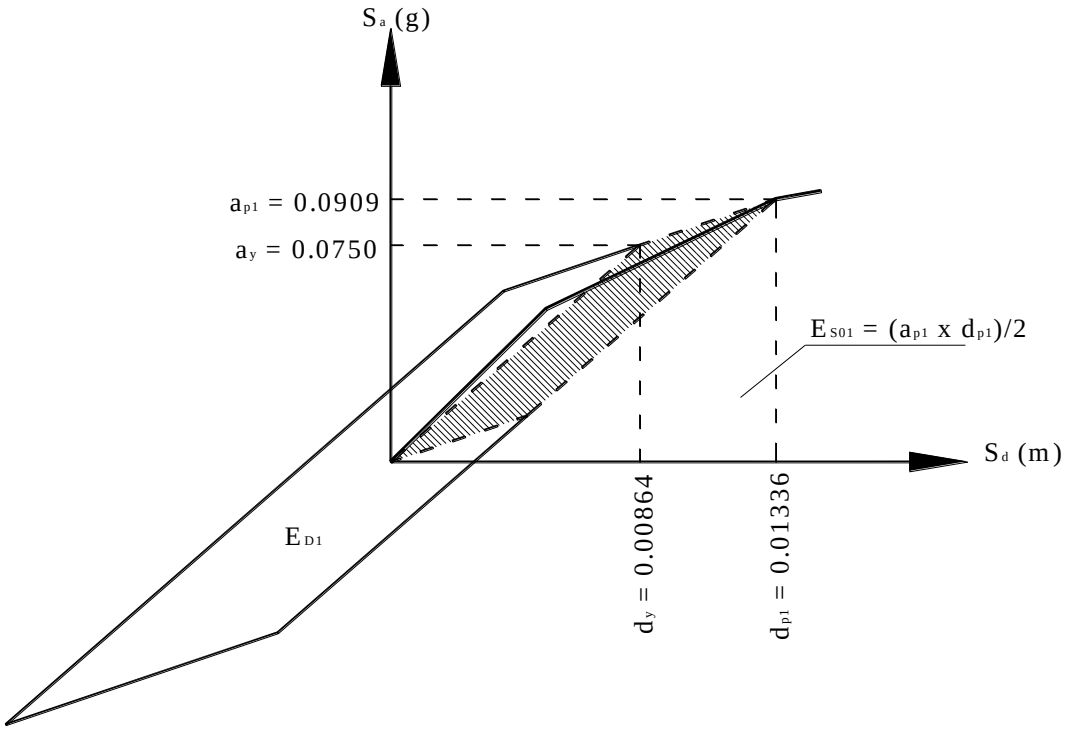
Ardışık yaklaşımın başında seçilen, ilk noktanın koordinatları

$a_{p1} = 0.0909g$

$d_{p1} = 0.01336$ m

dir.

Şekil 5.23 de, gerçek ve idealleştirilmiş kapasite spektrum eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 5.23 Mevcut Sisteme Ait Gerçek ve İdealleştirilmiş Kapasite Spektrum Eğrileri

Seçilen noktadaki en büyük şekil değiştirme enerjisi

$E_{S01} = a_{p1} * d_{p1} / 2 = 607.2x10^{-6}$

Seçilen noktadaki çevrimsel enerji

$E_{D1} = 4*(ay*dp_i – dy*ap_i) = 866.5x10^{-6}$

Seçilen noktadaki eşdeğer viskoz (çevrimsel) sönüm oranı

$\beta_0 = \frac{1}{4\pi}\frac{E_{D1}}{E_{S01}} *100 = 11.356$

Efektif sönüm oranı

$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5$

Bu bağıntıdaki κ – faktörü, yapının taşıyıcı sisteminin davranışına ve deprem süresine bağlı olarak saptanan bir düzeltme çarpanıdır. Seçilen yapı tipi A'dır. A tipi yapı davranışı (Bölüm 4, Tablo 4.12), sismik hareket süresi kısa olan yeni binalara uygun bir davranış tipidir. Bu tür yapılara ait gerçek çevrimsel döngü, idealleştirilmiş haline en yakın şekle sahiptir.

A tipi yapılarda κ – faktörü, aşağıdaki koşullara bağlı olarak tespit edilir, Tablo 4.13 ve Şekil 4.16.

_ $\beta_0 < 16.25$ ise, $\kappa = 1.00$

_ $16.25 < \beta_0 < 45$ ise, $0.77 < \kappa < 1.00$
ve bu aralıkta κ – faktörünün kesin değeri
$\kappa = 1.00 - 0.008 * (\beta_0 – 16.25)$

_ $\beta_0 > 45$ ise, $\kappa = 0.77$

Yukarıdaki koşullar dikkate alındığında, efektif sönüm oranı aşağıdaki gibi elde edilir.

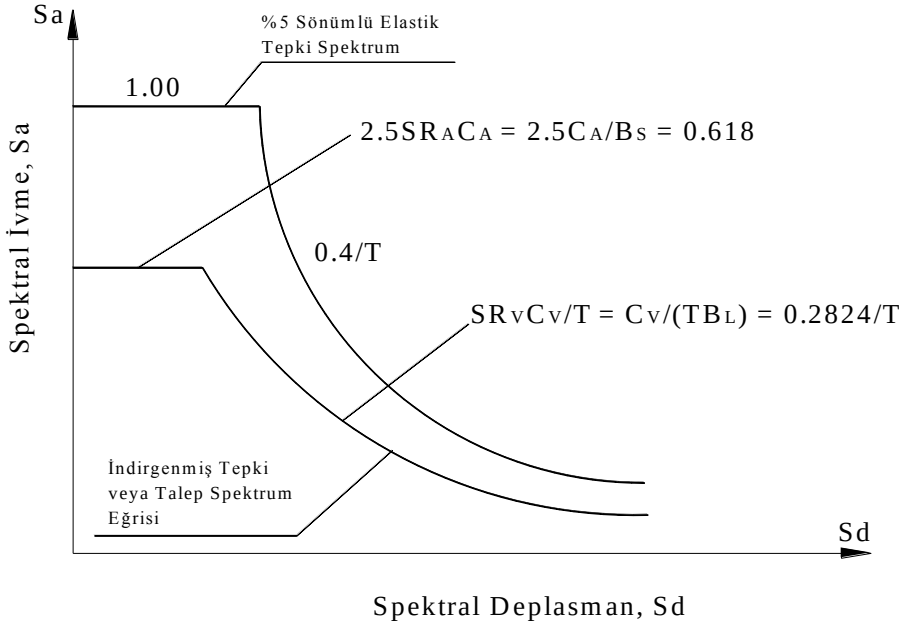
$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 = 1.00*11.356 + 5 = 16.356$

İndirgenmiş talep spektrum eğrisini elde etmek için, spektral indirgeme faktörleri olan SR_A ve SR_V değerlerinin tayin edilmesi gerekir. Bunun için Bölüm 4 de verilen Denklem (4.15) ve (4.16) dan yararlanılır. Tablo 4.14 de ise indirgeme faktörleri için verilen minimum değerler sunulmaktadır.

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} = 0.618 > 0.33$$

$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} = 0.706 > 0.50$$

Şekil 5.24 de, %5 sönümlü elastik tepki spektrum eğrisi ile bu eğrinin indirgenmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 5.24 İndirgenmiş Tepki Spektrumu

Şekil 5.24 de gösterilen, mevcut yapıya ilişkin indirgenmiş tepki veya talep spektrum eğrisinin ordinatı sabit olan bölümündeki spektral ivme değeri, ardışık yaklaşımın birinci adımı için seçilen a_{p1} spektral ivme değerinden büyük olduğu için bu ivme değerine karşı gelen spektral yerdeğiştirmenin eğrinin azalan kısmında bulunacağı söylenebilir. Bu durumda, indirgenmiş talep spektrumunda a_{p1} spektral ivme değerine karşı gelen yer değiştirme

$a_{p1} = 0.0909 = SR_V C_V / T$

$T = SR_V C_V / a_{p1} = 3.107$ sn

$d_p = Sd = \frac{1}{4\pi^2} * Sa * T^2 * g = 0.218$ m $= 16.32\ d_{p1} >>> 1.05\ d_{p1}$

Ardışık yaklaşımın ilk adımı için seçilen nokta gerekli koşulu sağlamamaktadır. Seçilen ve bulunan iki yer değiştirme arasında çok büyük bir değer farkı söz konusudur. Mevcut yapının kapasite eğrisinin çok yetersiz olduğu düşünüldüğünde, aranan performans noktasının bulunması ardışık yaklaşımın ıraksayacağı göz önüne alındığında imkansız gözükmektedir. Sonuç olarak, seçilen deprem karakteristikleri için bu yapıya ait herhangi bir performans noktasından bahsetmek mümkün değildir.

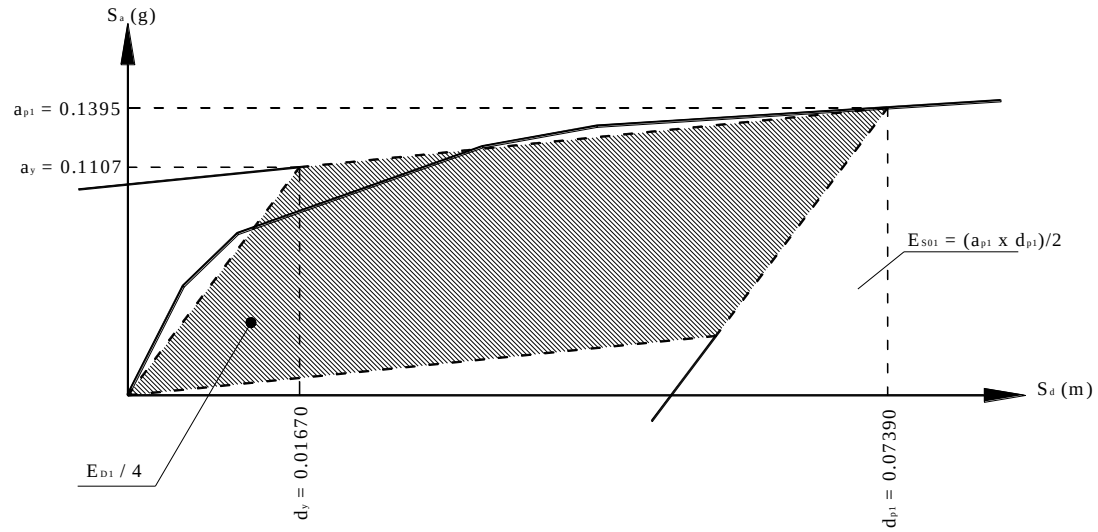
5.3.4 Güçlendirilmiş Sistemin Performans Analizi

Ardışık yaklaşımın başında seçilen ilk nokta

$a_{p1} = 0.1395g$

$d_{p1} = 0.07390$ m

Şekil 5.25 de, güçlendirilmiş sisteme ait olan gerçek ve idealleştirilmiş kapasite spektrum eğrileri gösterilmektedir. Şekilden, mevcut sisteme ait kapasite spektrumunun altındaki alanın güçlendirilmiş sisteminkine nazaran daha az olduğu görülmektedir, Şekil 5.23. Bunun anlamı, güçlendirilen sistemin daha fazla enerji yutabilmesi demektir. Böyle bir durumda, güçlendirilmiş sistemin efektif sönüm oranının mevcut sistemin efektif sönüm oranından daha büyük olması beklenir. Efektif sönüm oranı büyüdükçe, talep spektrum eğrisi aşağı çekilir ve yapı yatay yükler altında fazla hasar görmez.



Şekil 5.25 Güçlendirilmiş Sisteme Ait Gerçek ve İdealleştirilmiş Kapasite Spektrum Eğrileri

Seçilen noktadaki en büyük şekil değiştirme enerjisi

$E_{S01} = a_{p1} * d_{p1} / 2 = 515.4x10^{-5}$

Seçilen noktadaki çevrimsel enerji

$E_{D1} = 4*(ay*dp_i – dy*ap_i) = 2340.1x10^{-5}$

Seçilen noktadaki eşdeğer viskoz (çevrimsel) sönüm oranı

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi}\frac{E_{D1}}{E_{S01}} *100 = 36.13$$

Efektif sönüm oranı

$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5$

A tipi yapılarda κ – faktörü, aşağıda belirlenmektedir, Tablo 4.13 ve Şekil 4.16.

$16.25 < \beta_0 = 36.13 < 45$

$\kappa = 1.00 - 0.008 * (\beta_0 – 16.25) = 0.84096$

$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 = 35.383$

Efektif sönüm oranı aracılığı ile tepki spektrumunun indirgenmesi için gerekli olan indirgeme faktörleri belirlenir.

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} = 0.370 > 0.33$$

$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} = 0.514 > 0.50$$

İndirgenmiş tepki veya talep spektrum eğrisinin sabit bölgesinin değeri

$$S_{a\ maks} = 2.5 * SR_A * C_A = 0.370g > a_{p1} = 0.1395g$$

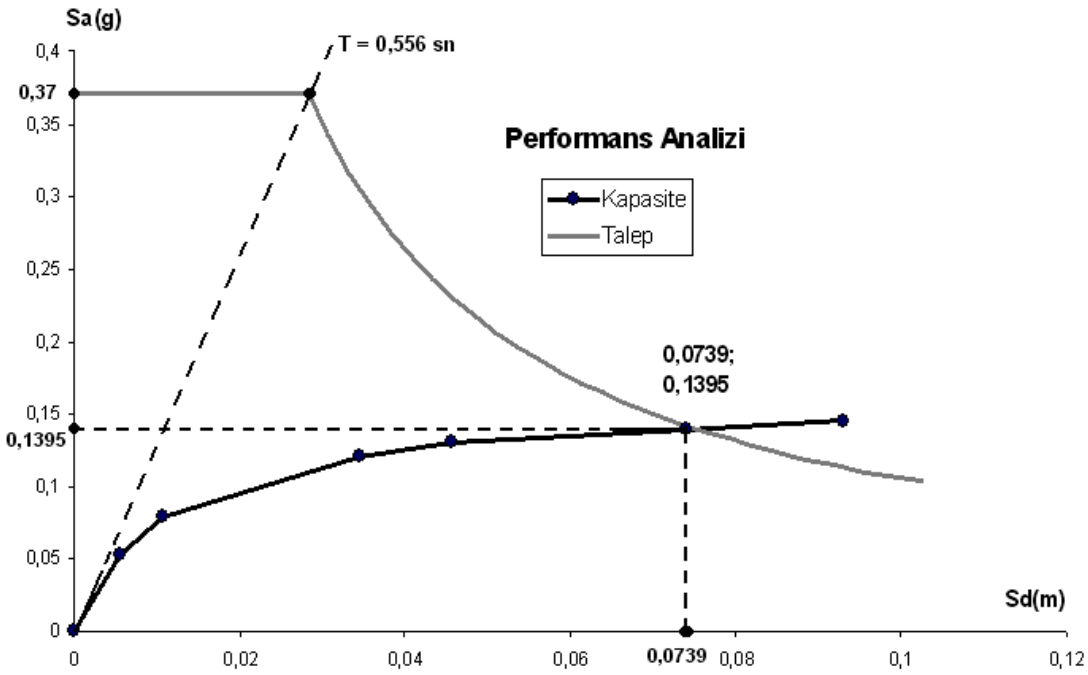
Seçilen ivme değerinin, indirgenmiş talep spektrum eğrisinin en büyük ivme değerinden küçük olması, aranan spektral yerdeğiştirme değerinin eğrinin azalan bölümünde olduğunu göstermektedir. Bu durumda, indirgenmiş talep spektrumunda a_{p1} spektral ivme değerine karşı gelen yer değiştirme miktarı

$$a_{p1} = 0.1395 = SR_V C_V / T$$

$$T = SR_V C_V / a_{p1} = 1.473 \text{ sn}$$

$$d_p = Sd = \frac{1}{4\pi^2} * Sa * T^2 * g = 0.0753 \text{ m} = 1.018\ d_{p1} < 1.05\ d_{p1}$$

Kapasite ve talep spektrum eğrilerinde, spektral yer değiştirmeler arasında yukarıdaki koşul dikkate alınacak olursa, bu koşulun sağlandığı ve aranan performans noktasının bulunduğu söylenebilir. Şekil 5.26 da, güçlendirilmiş sistemin kapasite ve talep spektrum eğrileri ve bu eğrilerin kesişim noktası olan performans noktası gösterilmektedir.



Şekil 5.26 Güçlendirilmiş Sisteme Ait Kapasite ve Talep Spektrum Eğrileri

5.3.5 Performans Seviyesi ve Hasar Tespiti

Performans analizi yapılarak performans noktası tespit edilen güçlendirilmiş sistemin, binanın tümü ve yapıyı oluşturan elemanlar için kabul edilen kriter sınırlar içinde olup olmadığı irdelenmelidir. İrdelemelere geçmeden önce, performans noktasındaki yatay yük parametresi ve bu parametreye karşı gelen yer değiştirme değeri elde edilmelidir. Bunun için, Denklem (4.2) ve (4.3) kullanılacaktır.

$$S_{ai} = (V / W) / \alpha_1 \qquad (4.2)$$

$$V_p = S_{ai} * W * \alpha_1 = 0.1395*1050*1.00 = 146.475 \text{ kN}$$

$$S_{di} = \Delta_{roof} / (PF_1\Phi_{1,roof}) \qquad (4.3)$$

$$\Delta_{roof} = S_{di} * (PF_1\Phi_{1,roof}) = 0.0739 * 1.00 = 0.0739 \text{ m}$$

5.3.5.1 Performans Noktasının Bina İçin Öngörülen Kabul Kriterleri

Güçlendirilmiş sistemin performans noktasının, yapının genel davranışı için kabul edilebilmesi, Bölüm 4.2.6.1 de belirtilen koşulların sağlanmasına bağlıdır.

Düşey Yükler Altındaki Davranış

Taşıyıcı sistem, performans noktasına ait yatay yük parametresi altında düşey yük taşıma kapasitesini devam ettirebilmektedir. Ancak, bu noktadan sonra sistem üzerinde (k) kesitinin plastik dönme kapasitesini aşmış olması, sistemdeki iç kuvvetlerin yeniden dağılımına engel olmakta ve sistemin düşey yük taşıma kapasitesini yetersiz kılmaktadır.

Yatay Yükler Altındaki Davranış

Binanın performans noktasındaki toplam yatay yük taşıma kapasitesinin, ilerleyen yükleme adımlarında oluşan plastik mafsallarla beraber %20 den daha fazla azalmaması gerekir. Bina için elde edilen performans noktasına bakıldığında bu koşulun sağlandığı görülmektedir.

$$\text{Yatay yük taşıma kapasitesi oranı} = \frac{V_{PN}}{V_{maks} = P_G} = \frac{146.475}{152.741} = 0.959 < 1.0 \text{ (azalma yok)}$$

Yatay Ötelemeler

Bölüm 4.2.6.1 açıklandığı gibi, hasarın performans seviyelerine bağlı olarak sınıflandırılması için binada katlar arası rölatif kat ötelemelerinin Tablo 4.16 daki sınırlar içerisinde kalması öngörülmektedir.

$$\text{Performans noktasındaki toplam yerdeğiştirme oranı} = \frac{\Delta_{roof\ ,\ PN}}{H} = \frac{0.0739}{6} = 0.0123$$

$$\text{En büyük elastik ötesi yerdeğiştirme oranı} = \frac{\Delta_{roof} - \Delta_{elastik}}{H} = \frac{0.06851}{6} = 0.0114$$

Burada $\Delta_{elastik}$, güçlendirilmiş sistemin birinci plastik kesit oluşumu anında yaptığı yatay yer değiştirme, H ise, sistemin kat yüksekliğidir.

Bu sonuçlar Tablo 4.16 daki sınırlar ile karşılaştırıldığında, yapının performans seviyesinin yukarda hesaplanan her iki durum için de SP-2 olarak isimlendirilen *Hasar Kontrol* aralığına düştüğü görülmektedir.

5.3.5.2 Performans Noktasının Elemanlar İçin Öngörülen Kabul Kriterleri

Taşıyıcı elemanlara ait kabul edilebilirlik kriterleri, elemanların yaptığı plastik şekil değiştirme miktarları ile ölçülür. Bulunan performans noktasına ait yatay yük parametresi için, taşıyıcı elemanlarda oluşan plastik şekil değiştirme miktarları ve buna bağlı olarak yapının hasar seviyesi belirlenebilir. Plastik şekil değiştirme miktarları, Tablo 4.21 de verilmiş olan kabul edilebilir plastik şekil değiştirme miktarları ile karşılaştırılarak hangi elemanın hangi yapısal performans seviyesinde olduğu belirlenir.

Performans noktası, güçlendirilmiş sistemin doğrusal olmayan statik analizinin üçüncü ve dördüncü adımı arasında bir noktadır. Bu durumda, dördüncü adımda performans noktasının elde edilmesi için gerekli yatay yük parametresi artışı

$P_{4p} = (V_p - P_3) = 146.475 - 137.096 = 9.379$ kN $= 0.2733\ P_4$

olarak bulunur. V_p = 146.475 kN'luk yatay yük parametresinde, elemanlarda meydana gelen plastik deformasyon değerleri

$P_{4p} = 0.2733^* P_4 = 9.373$ kN, $\Sigma P_i = P_1 + P_{2'} + P_2 + P_3 + P_{4'} = 146.475$ kN $= V_p$
$\delta_{4pPM}{}^2 = 0.0739$ m $= 7.390$ cm (2 numaralı düğüm noktasının yatay ötelemesi)
$\delta_{57} = 0.10964$ m , $\theta_5 = 0.00138$ radyan, $\theta_7 = 0$ (ankastre uç)
$\delta_{23} = 0.0727$ m , $\theta_2 = -0.0217$ radyan, $\theta_3 = 0.00063$ radyan
$\delta_{34} = -0.0725$ m , $\theta_3 = 0.00063$ radyan, $\theta_4 = 0.0186$ radyan

- (5-7) çubuğu, (l) ve (k) kesitlerinin plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(1). $229.760 = 31528^*0.00138 + 15764^*0.10964 + 2A\theta_k + A\theta_l$
(2). $229.760 = 15764^*0.00138 + 15764^*0.10964 + A\theta_k + 2A\theta_l$

(1) ve (2) denklemleri bir arada çözülürse

$$\left.\begin{aligned} 2A\theta_k + A\theta_l &= -1542.114 \\ A\theta_k + 2A\theta_l &= -1520.359 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(k)\,4pPM} &= -0.03307 \\ \theta_{(l)\,4pPM} &= -0.03169 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(l)\,4pPM} = 1\ \theta_y + 5.934\ \theta_y = 6.934\ \theta_y$
$\Sigma\theta_{(k)\,4pPM} = 1\ \theta_y + 6.193\ \theta_y = 7.193\ \theta_y$

- (2-3) çubuğu, (e) ve (f) kesitlerinin plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(3). $22.386 = 8173.2*-0.0217 + 4086.6*0.00063 + 3064.95*0.0727 + 2B\theta_e + B\theta_f$

(4). $88.080 = 4086.6*-0.0217 + 8173.2*0.00063 + 3064.95*0.0727 + B\theta_e + 2B\theta_f$

(3) ve (4) denklemleri bir arada çözülürse

$$\left.\begin{aligned} 2B\theta_e + B\theta_f &= -25.652 \\ B\theta_e + 2B\theta_f &= -51.212 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(e)\,4pPM} &= 0 \\ \theta_{(f)\,4pPM} &= 0.00628 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(e)\,4pPM} < 1\ \theta_y$

$\Sigma\theta_{(f)\,4pPM} = 1\ \theta_y + 0.874\ \theta_y = 1.874\ \theta_y$

- (3-4) çubuğu, (g) ve (h) kesitlerinin plastik mafsal dönmelerinin hesabı

(5). $-88.080 = 8173.2*0.00063 + 4086.6*0.0186 + 3064.95*-0.0725 + 2B\theta_g + B\theta_h$

(6). $-41.280 = 4086.6*0.00063 + 8173.2*0.0186 + 3064.95*-0.0725 + B\theta_g + 2B\theta_h$

(5) ve (6) denklemleri bir arada çözülürse

$$\left.\begin{aligned} 2B\theta_g + B\theta_h &= 52.969 \\ B\theta_g + 2B\theta_h &= 26.333 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \theta_{(g)\,4pPM} &= 0.00649 \\ \theta_{(h)\,4pPM} &= 0 \end{aligned}$$

$\Sigma\theta_{(g)\,4pPM} = 1\ \theta_y + 0.904\ \theta_y = 1.904\ \theta_y$

$\Sigma\theta_{(h)\,4pPM} < 1\ \theta_y$

Böylece, plastikleşen kesitlere ait plastik şekil değiştirme değerleri elde edilmiş olur. Bu aşamanın ardından, plastik şekil değiştirmelerin kendi kapasiteleri ile karşılaştırılması ve yapısal performans seviyelerinin belirlenmesi gerekir. Elemanların performans seviyeleri ve plastik şekil değiştirmeleri, Tablo 5.10 da topluca özetlenmektedir. Tabloda, çaprazlarda plastikleşme olmadığı için bu elemanlara ait plastik şekil değiştirme değerlerine yer verilmemiştir.

Tablo 5.10 Elemanların Plastik Şekil Değiştirme Miktarları ve Performans Seviyeleri

Kesit	θ_y (radyan)	$\Sigma\theta$ x θ_y	IO x θ_y	LS x θ_y	CP x θ_y	Aralık
a	0.00534	< 1	1	6	8	a < IO
b	0.00534	< 1	1	6	8	b < IO
c	0.00534	< 1	1	6	8	c < IO
d	0.00534	< 1	1	6	8	d < IO
e	0.00718	< 1	1	6	8	e < IO
f	0.00718	1.874	1	6	8	IO > f > LS
g	0.00718	1.904	1	6	8	IO > g > LS
h	0.00718	< 1	1	6	8	h < IO
i	0.00534	< 1	1	6	8	i < IO
j	0.00534	< 1	1	6	8	j < IO
k	0.00534	7.193	1	6	8	LS > k > CP
l	0.00534	6.934	1	6	8	LS > l > CP

Tablo 5.10 da, (5-7) kolonu üzerindeki (k) ve (l) kesitlerinin, can güvenliği (LS) ve göçmenin önlenmesi (CP) performans seviyeleri arasında kalan SP-4, *Sınırlı Güvenlik* performans aralığında olduğu görülmektedir. Bu aralık, binalar için pek istenmeyen bir hasar seviyesinde olsa da, mevcut sistem düşünüldüğünde, sonucun iyi olduğu söylenebilir. Diğer kesitlerden (f) ve (g) kesitleri ise hemen kullanım (IO) ve can güvenliği (LS) performans seviyeleri arasında kalan SP-2, *Hasar Kontrol* performans aralığında kalmaktadır. Yapıda, bu dört kesitin dışında kalan kesitlerde herhangi bir hasar olmadığı ve özellikle basınç kuvveti altında burkulması beklenen çapraz elemanların, üzerlerine yerleştirilen özel düğüm noktası sayesinde, olası bir deprem etkisine burkulmadan karşı koyabildikleri tespit edilmektedir.

5.4 Alternatif Güçlendirme Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Güçlendirilmiş sisteme ait sayısal hesaplara göre, düğüm noktasındaki kayma hareketinin başladığı yatay yük parametresi, (l) kesiti plastikleştikten sonra oluşmaktadır. Ayrıca, çözümleme boyunca çapraz üzerindeki düğüm noktasının oval deliğin sonuna dayanmadığı ve bu nedenle çapraz elemanların yapının rijitliğinde etkin olamadıkları görülmektedir. Bu şekilde öngörülen güçlendirme sisteminin başka öngörülerle de tasarlanması mümkündür. Çalışmanın bu aşamasında, aşağıda

açıklanan iki adet alternatif güçlendirme sistemine ait bilgisayar analiz sonuçları verilerek daha önce yapılan güçlendirme sistemi ile karşılaştırılacaklardır. Böylece, geliştirilen bütün alternatif güçlendirme sistemleri irdelenerek, gerek bina için gerekse elemanlar için kabul edilen kriterleri sağlayacak biçimde bir güçlendirme sistemi oluşturulabilecektir. Gösterim açısından, ilk güçlendirme sistemine (A_0), ikinci sisteme (A_1) ve son sisteme ise (A_2) denilecektir.

5.4.1 Analiz Verileri

A_1 Numaralı Alternatif Güçlendirme Sistemi

Düğüm noktasının kayması için gerekli olan eşik sürtünme kuvveti aşağı çekilerek, (l) kesiti plastikleşmeden önce kayma hareketinin başlaması sağlanacak ve yatay yük artımı süresince bulonlar oval delik sonuna dayanmayacaktır. Bu koşullara uyularak yapılan modelde, aşağıda verilen parametreler kullanılacaktır.

a). Eşik sürtünme kuvveti: Çaprazın burkulma yükünden küçük ve düşey yük altında çaprazda oluşan eksenel yük değerinden büyük bir sürtünme kuvveti seçilmelidir. Bu koşullara uygun olarak seçilen sürtünme kuvvetinin değeri aşağıda verilmiştir.

$(N^H = 196.36\ kN) < (N_{kayma} = N_S = 200\ kN) < (N_{CR} = 282.70\ kN)$

b). Kayma mesafesi: Çapraz elemanların, sistemin doğrusal olmayan statik çözümlemesinde burkulmaması için en uygun kayma uzunluğu belirlenmelidir. Bu uzunluk, olması gereken en büyük değer olarak alınırsa, kayma uzunluğunun kontrol edilmesine gerek kalmaz. Bu koşullar altında, kayma uzunluğunun değeri aşağıda verilmektedir.

e = En büyük değer (hesabın herhangi bir adımındaki en büyük kayma mesafesi)

A_2 Numaralı Alternatif Güçlendirme Sistemi

Düğüm noktasının kayması için gerekli olan eşik sürtünme kuvveti aşağı çekilerek, (l) kesiti plastikleşmeden önce kayma hareketinin başlaması sağlanacak ve bulonlar oval delik sonuna dayanarak, çapraz elemanların yatay yük artımı boyunca çalışması sağlanacaktır. Böylece çapraz elemanlar, hesabın herhangi bir adımında sisteme yeniden dahil edilerek sistemin rijitliğinde etkin olacaklardır. Bu koşullara uyularak yapılan modelde, aşağıda verilen parametreler kullanılacaktır.

a). Eşik sürtünme kuvveti: Çaprazın burkulma yükünden küçük ve düşey yük altında çaprazda oluşan eksenel yük değerinde büyük bir sürtünme kuvveti seçilmelidir. Bu koşullara uygun olarak seçilen sürtünme kuvvetinin değeri aşağıda verilmektedir.

$(N^H = 196.36\ kN) < (N_{kayma} = N_S = 200\ kN) < (N_{CR} = 282.70\ kN)$

b). Kayma mesafesi: Çapraz elemanların hesabın ilerleyen adımlarında sistemin rijitliğinde etkin olmaları için, kayma uzunluğunun en büyük değerden daha küçük seçilmesi gereklidir. Yapılan ön hesap sonucunda ve A1 numaralı güçlendirme sisteminin çözümü yardımıyla, önce kaymanın başlaması ve sonra bulonun oval delik sonuna dayanması için seçilen kayma uzunluğu aşağıda verilmiştir.

$e_{min} = 0 < e = 100\ mm < e_{maks} \approx 180\ mm$ (A_1' deki en büyük kayma mesafesi)

5.4.2 Analiz Sonuçları

Her üç sistemin bilgisayarda yapılan doğrusal olmayan statik analizleri yardımıyla ilgi çekici bazı sonuçlara varılmıştır. Özellikle, eşik sürtünme kuvvetinin ve kayma mesafesinin seçimindeki farklılıklar, sistemlerin gerek yatay yük taşıma kapasitelerinde ve toplam yer değiştirmelerinde, gerekse performans analizi sonucunda ortaya çıkan performans seviyelerinde ve hasar düzeylerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Sırasıyla Tablo 5.11, Tablo 5.12 ve Tablo 5.13 de A_0, A_1 ve A_2 numaralı alternatif güçlendirme sistemlerinin kapasite eğrilerine ve plastikleşen kesitlerdeki plastik şekil değiştirme değerlerinin bulunduğu yapısal performans seviyelerine ait bilgiler sunulmaktadır. Tablolardaki A, B, C, D ve E harfleri, Şekil 5.6 yardımı ile izlenebilmektedir.

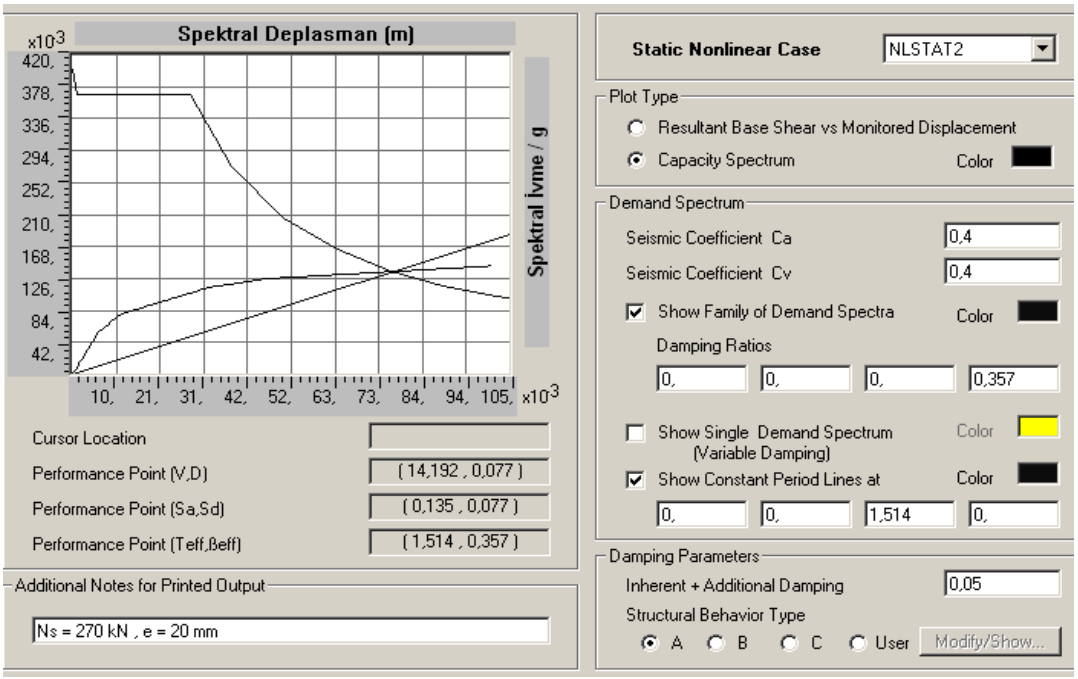
5.4.2.1 A_0 Sistemi

Tablo 5.11 de, A_0 alternatif güçlendirme sisteminin kapasite eğrisine ve plastikleşen kesitlerdeki plastik şekil değiştirme değerlerinin bulunduğu yapısal performans seviyelerine ait bilgiler sunulmaktadır. Tablodaki A, B, C, D ve E harfleri, Şekil 5.6 yardımı ile izlenebilmektedir.

Tablo 5.11 A_0 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Analiz Sonuçları

Kesit İsmi	Deplasman (m)	Yatay Yük (kN)	Plastik Deformasyon Değerlerinin Bulunduğu Aralıklar								Kesit Sayısı
			A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	
-	-2,36E-04	0	14	0	0	0	0	0	0	0	14
(l)	0,0063	58,916	13	1	0	0	0	0	0	0	14
Kayma	0,0118	83,296	13	1	0	0	0	0	0	0	14
(k)	0,0328	119,66	12	1	1	0	0	0	0	0	14
(f ve g)	0,0468	131,975	10	2	2	0	0	0	0	0	14
PN	**0,077**	**141,92**	**10**	**0**	**2**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**14**
Göçme	0,1008	149,624	10	0	2	0	2	0	0	0	14

Şekil 5.27 de, A_0 alternatif güçlendirme sistemine ait performans analizi ve bu analiz için bilgisayara girilen bilgiler gösterilmektedir. Şeklin sol tarafında, talep ve kapasite spektrum eğrileri ve performans noktasına ait bilgiler bulunmaktadır. Sağ tarafta ise, talep spektrumu ve sönüm parametreleri ile ilgili bilgiler mevcuttur.



Şekil 5.27 A_0 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Performans Analizi

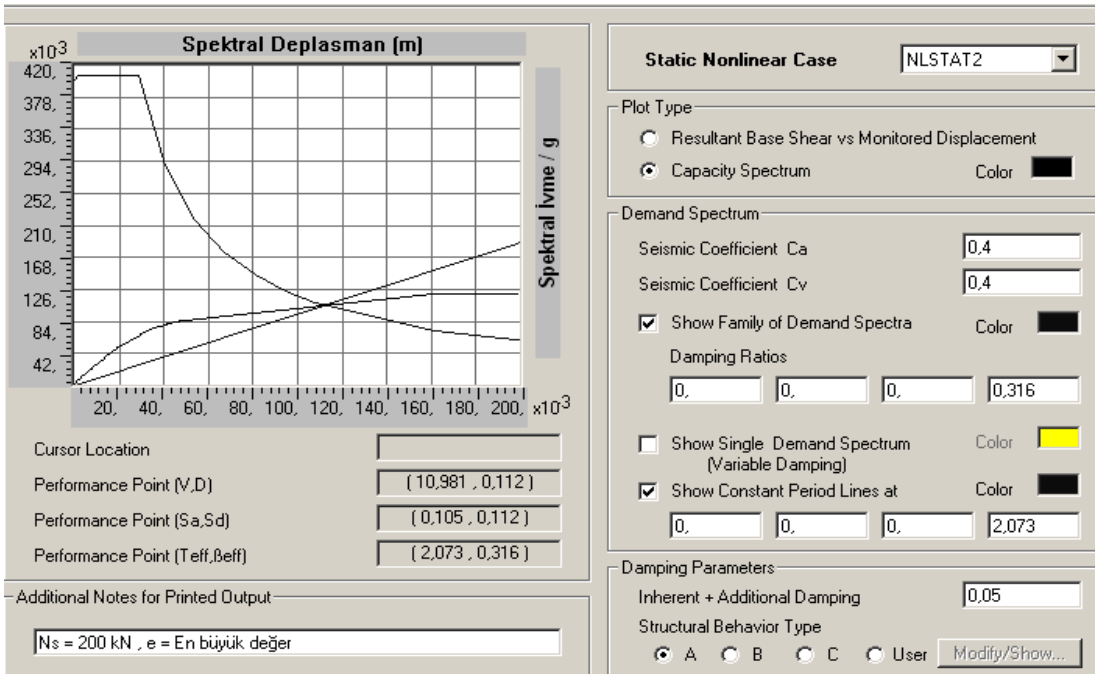
A_0 sisteminin performans noktasının kabul kriterleri daha önceki hesaplarda kontrol edilmiş ve düşey yükler altındaki davranışın yetersiz, yatay yük taşıma kapasitenin ise yeterli olduğu görülmüştü. Yatay öteleme kontrolunda, sistemin SP-2 yapısal performans aralığında olduğu, elemanlar için yapılan kontrolda ise sistemin SP-4 yapısal performans aralığında bulunduğu sonucuna varılmıştı. Gelecek bölümlerde,

aynı kontrollar diğer sistemler için de yapılacak ve sonuçlar bir tablo aracılığı ile tüm sistemler için ortak olarak sunulacaktır.

5.4.2.2 A_1 Sistemi

Tablo 5.12 A_1 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Analiz Sonuçları

Kesit İsmi	Deplasman (m)	Yatay Yük (kN)	Plastik Deformasyon Değerlerinin Bulunduğu Aralıklar								Kesit Sayısı
			A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	
-	-2,36E-04	0	14	0	0	0	0	0	0	0	14
Kayma	3,89E-04	5,665	14	0	0	0	0	0	0	0	14
(l)	0,0179	49,666	13	1	0	0	0	0	0	0	14
(f ve g)	0,0341	77,798	11	3	0	0	0	0	0	0	14
(h)	0,0454	87,925	10	3	1	0	0	0	0	0	14
PN	**0,112**	**109,81**	**10**	**0**	**4**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**14**
(b)	0,1623	126,46	9	1	3	1	0	0	0	0	14
Göçme	0,196	126,623	9	0	4	0	1	0	0	0	14



Şekil 5.28 A_1 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Performans Analizi

A_1 sisteminin performans noktasının bina ve elemanlar için öngörülen kabul kriterlerine uyması, aşağıdaki koşulların sağlanması ile mümkün olmaktadır.

Düşey Yükler Altındaki Davranış

Tablo 5.12 den görüldüğü gibi, performans noktasına ait yatay yük parametresinden sonra sistem yatay yük taşımaya devam etmekte ve hemen ardından (b) kesiti plastikleşmektedir. Bu durumda, performans noktasından sonra plastikleşen ilk kesit ile birlikte sistemde yeniden bir yük dağılımı meydana gelmekte ve göçme yüküne gelene kadar sistem düşey yükleri taşımaktadır. Sonuç olarak A_1 sistemi, kendi performans noktasında düşey yük taşıma kapasitesi bakımından yeterli görünmektedir.

Yatay Yükler Altındaki Davranış

Performans noktasındaki yatay yük parametresi ile göçme anındaki yatay yük parametresi arasındaki oran %80 den daha büyük ise, sistem yatay yükler altında yeterli olmaktadır. Tablo 5.12 deki sonuçlara bakılacak olursa, göçme anındaki yatay yük parametresi, performans noktasındaki değere oranla büyüktür. Yani, performans noktasından sonra yatay yük taşıma kapasitesinde azalma yoktur.

$$\text{Yatay yük taşıma kapasitesi oranı} = \frac{V_{PN}}{V_{maks} = P_G} = \frac{109.81}{126.623} = 0.867 < 1.0$$

Yatay Ötelemeler

$$\text{Performans noktasındaki toplam yerdeğiştirme oranı} = \frac{\Delta_{roof\ ,\ PN}}{H} = \frac{0.112}{6} = 0.0187$$

$$\text{En büyük elastik ötesi yerdeğiştirme oranı} = \frac{\Delta_{roof} - \Delta_{elastik}}{H} = \frac{0.1784}{6} = 0.0297$$

Bu sonuçlar, Tablo 4.16 daki sınırlar ile karşılaştırıldığında, yapının performans seviyesinin yukarıda hesaplanan ilk durum için SP-2, *Hasar Kontrol*, ikinci durum için ise SP-4, *Sınırlı Güvenlik* yapısal performans aralığında olduğu tespit edilmektedir.

Plastik Şekil Değiştirmeler

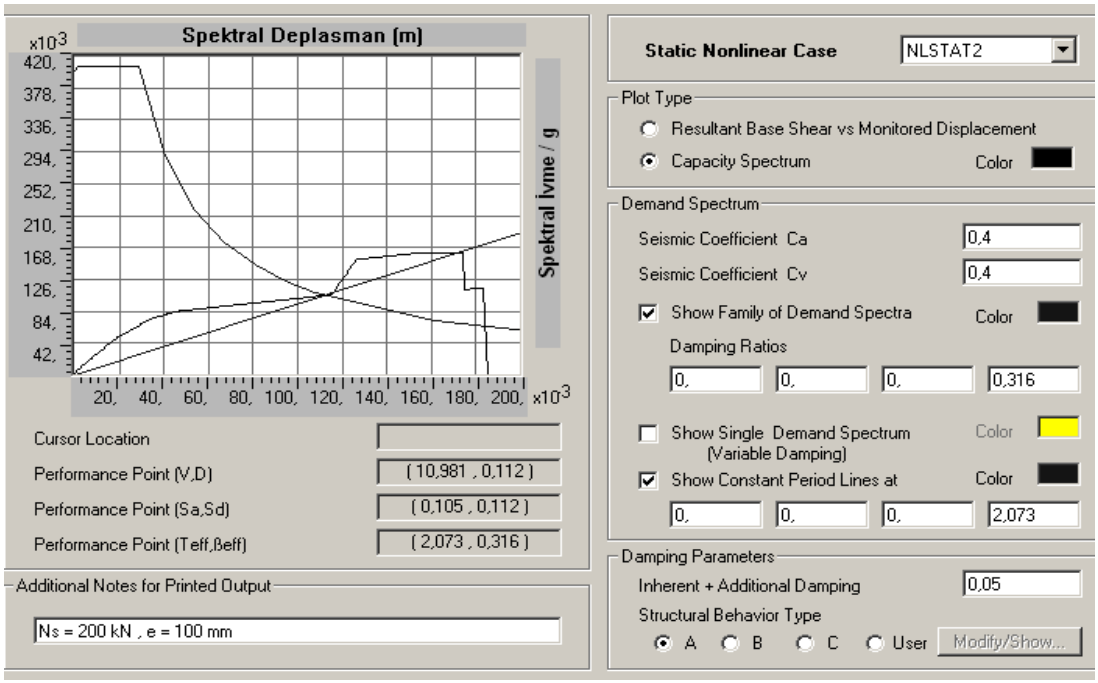
Performans noktasında plastikleşen dört kesitin plastik deformasyon seviyelerinin, hemen kullanım (IO) ve can güvenliği (LS) performans seviyeleri arasında yer alan SP-2, *Hasar Kontrol* yapısal performans aralığında olduğu görülmektedir.

5.4.2.3 A_2 Sistemi

Tablo 5.13 A_2 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Analiz Sonuçları

Kesit İsmi	Deplasman	Yatay Yük	Plastik Deformasyon Değerlerinin Bulunduğu Aralıklar								Kesit Sayısı
	(m)	(kN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	
-	-2,36E-04	0	14	0	0	0	0	0	0	0	14
Kayma(1)	3,89E-04	5,665	14	0	0	0	0	0	0	0	14
(l)	0,0179	49,66	13	1	0	0	0	0	0	0	14
(f ve g)	0,0341	77,798	11	3	0	0	0	0	0	0	14
(h)	0,0454	87,925	10	3	1	0	0	0	0	0	14
PN	**0,112**	**109,81**	**10**	**0**	**4**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**14**
Kayma(2)	0,1154	111,005	10	0	4	0	0	0	0	0	14
(k)	0,1266	159,786	9	1	4	0	0	0	0	0	14
(a)	0,1523	168,161	8	1	4	1	0	0	0	0	14
Göçme	0,1741	168,162	8	1	4	0	0	1	0	0	14

(Kayma(1): Kayma başlangıcı, Kayma(2): Kayma Bitişi)



Şekil 5.29 A_2 Alternatif Güçlendirme Sistemine Ait Performans Analizi

A_2 sisteminin performans noktasının bina ve elemanlar için öngörülen kabul kriterlerine uyması, aşağıdaki koşulların sağlanması ile mümkün olmaktadır.

Düşey Yükler Altındaki Davranış

Tablo 5.13 ten görüldüğü gibi, performans noktasına ait yatay yük parametresinden sonra sistem yatay yük taşımaya devam etmekte ve hemen ardından (k) kesiti

plastikleşmektedir. A_1 sistemine benzer biçimde A_2 sistemi de kendi performans noktasında düşey yük taşıma kapasitesi bakımından yeterli görünmektedir.

Yatay Yükler Altındaki Davranış

Performans noktasındaki yatay yük parametresi ile göçme anındaki yatay yük parametresi arasındaki oran %80 den daha büyük ise, sistem yatay yükler altında yeterli olmaktadır. Tablo 5.13 deki sonuçlara bakılacak olursa, göçme anındaki yatay yük parametresi, performans noktasındaki değere oranla büyüktür. Yani, performans noktasından sonra yatay yük taşıma kapasitesinde azalma yoktur.

$$\text{Yatay yük taşıma kapasitesi oranı} = \frac{V_{PN}}{V_{maks} = P_G} = \frac{109.81}{168.162} = 0.653 < 1.00$$

Yatay Ötelemeler

$$\text{Performans noktasındaki toplam yerdeğiştirme oranı} = \frac{\Delta_{roof}}{H} = \frac{0.112}{6} = 0.0187$$

$$\text{En büyük elastik ötesi yerdeğiştirme oranı} = \frac{\Delta_{roof} - \Delta_{elastik}}{H} = \frac{0.1565}{6} = 0.0261$$

Bu sonuçlar, Tablo 4.16 daki sınırlar ile karşılaştırıldığında, yapının performans seviyesinin yukarıda hesaplanan ilk durum için SP-2, *Hasar Kontrol*, ikinci durum için ise SP-4, *Sınırlı Güvenlik* performans aralığında olduğu tespit edilmektedir.

Plastik Şekil Değiştirmeler

Performans noktasında plastikleşen dört kesitin plastik deformasyon seviyelerinin, hemen kullanım (IO) ve can güvenliği (LS) yapısal performans seviyeleri arasında yer alan SP-2, *Hasar Kontrol* yapısal performans aralığında olduğu görülmektedir.

Alternatif güçlendirme sistemlerinin analiz sonuçlarına ait özet bilgiler Tablo 5.14 de sunulmaktadır. Tablodaki bilgilere göre, performans noktası için öngörülen kabul kriterlerinin yalnızca A_2 alternatif güçlendirme sistemi tarafından sağlandığı, diğer iki sistemin ise yatay yüklere karşı uygun bir tasarım olmadıkları sonucuna varılmaktadır.

Tablo 5.14 Alternatif Güçlendirme Sistemlerinin, Performans Noktaları İçin Öngörülen Kabul Kriterlerine Uygunluğu ve Performans Seviyeleri ve Aralıkları

Sistem	Kriter	Kriter Tipi		Sonuç	Performans Seviyesi	Performans Aralığı
A_0	Bina	Düşey Yük Taşıma Kapasitesi		Yetersiz	-	-
		Yatay Yük Taşıma Kapasitesi		Yeterli	-	-
		Yatay Öteleme	Koşul 1	-	IO-LS	SP-2
			Koşul 2	-	IO-LS	SP-2
	Eleman	Plastik Deformasyon Kapasitesi		-	LS-CP	SP-4
A_1	Bina	Düşey Yük Taşıma Kapasitesi		Yeterli	-	-
		Yatay Yük Taşıma Kapasitesi		Yeterli	-	-
		Yatay Öteleme	Koşul 1	-	IO-LS	SP-2
			Koşul 2	-	LS-CP	SP-4
	Eleman	Plastik Deformasyon Kapasitesi		-	IO-LS	SP-2
A_2	Bina	Düşey Yük Taşıma Kapasitesi		Yeterli	-	-
		Yatay Yük Taşıma Kapasitesi		Yeterli	-	-
		Yatay Öteleme	Koşul 1	-	IO-LS	SP-2
			Koşul 1	-	LS-CP	SP-4
	Eleman	Plastik Deformasyon Kapasitesi		-	IO-LS	SP-2

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

1. Bu çalışmada, eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu sürtünmeli düğüm noktalarından oluşan sismik yapısal kontrol sistemlerinin, çelik yapıların deprem performansına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. İncelemeler, doğrusal olmayan kuram çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve performansa dayalı tasarım ve değerlendirme yaklaşımından yararlanılmıştır.

2. İncelenen yapı sistemlerinin doğrusal olmayan kurama göre deprem güvenlikleri belirlenirken, plastik mafsal hipotezinin geçerli olduğu varsayılmakta ve sistem hesabı, sabit düşey yükler ile monoton olarak artan yatay yükler altında, her adımda doğrusal çözümleme ile yapılmaktadır. Bu yaklaşım ile, sistemdeki plastik kesit oluşumu elde edilebilmekte, plastik mafsal dönmeleri ile toplam elastoplastik yer değiştirmeler belirlenmekte ve süneklik oranları hesaplanabilmektedir.

3. Özel düğüm noktalarının oluşturulduğu elemanların bu düğüm noktalarına birleştikleri uçlarında uzama ve dönme süreksizliklerinin meydana gelmesi halinde, bu süreksizliklerin elemanların iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarında göz önüne alınması suretiyle, yapı sisteminin doğrusal olmayan kurama göre hesabı yapılabilmektedir.

4. Kayıcı bulonlu özel düğüm noktalarının çalışma prensibi, bulonlara verilen ön germeye ve kayma yüzeyindeki sürtünme katsayısına bağlı olarak, oluşan sürtünme kuvvetinin aşılması ve bu andan itibaren düğüm noktasının ve dolayısıyla elemanın özel düğüm noktası uygulanan ucunun sürtünme kuvveti altında kaymaya başlamasına dayanmaktadır. Kaymanın başlamasına paralel olarak, sürtünme kuvveti verilen kayma mesafesi boyunca bir iş yapmaktadır. Düğüm noktasının bu hareketi,

sistemde çevrimsel döngünün oluşmasını ve sistemin etkili sönüm oranının artmasını sağlamaktadır.

5. Eksenel doğrultuda kayıcı bulonlu düğüm noktalarının çelik çapraz elemanlar üzerinde uygulanması halinde, basınç kuvveti ile zorlanan bu elemanlarda burkulma riskinin azaldığı ve böylece çapraz elemanların daha etkin bir biçimde davranarak yapının yatay yüklere karşı direncini arttırdığı görülmektedir.

6. Bu çalışmada yer verilmemesine karşın, kayıcı bulonlu düğüm noktasının kolon-kiriş birleşim bölgesinde ve kiriş elemanı üzerinde uygulanması halinde, elastik ötesi şekil değiştirmelerin önlenebileceği ve elastik sınırlar içerisinde kalan bu bölgelerde yapısal hasarların en aza indirilebileceği söylenebilir.

7. Kayıcı bulonlu özel düğüm noktasının etkin bir biçimde davranması koşulu ile, yapı sistemlerinin yatay yük taşıma kapasiteleri ile toplam yer değiştirmelerinin arttığı ve buna paralel olarak sünekliğin, gerek yapı elemanlarının elastik davranış sınırları içerisinde gerekse elastik ötesi davranış sürecinde büyük değerler aldığı gözlenmektedir.

8. Yatay yük taşıma kapasitesi bakımından iyi tasarlanmış bir yapının deprem etkileri altındaki olası hasar seviyesinin, aynı yapıya uygulanan kayıcı bulonlu özel düğüm noktası aracılığı ile daha aşağıya çekilmesi ve hatta yapıda hiçbir hasarın oluşmaması sağlanabilmektedir. Böylece, yapının ana taşıyıcı sistemi tamamen elastik sınırlar içerisinde kalabilmekte ve hasar oluşumu önlenmektedir.

9. Bu çalışmada incelenen kayıcı bulonlu sürtünmeli özel düğüm noktası detayı, yeterli deprem güvenliğine sahip olmayan mevcut yapıların güçlendirilmesinin yanında, yeni yapılacak yapıların etkin ve ekonomik olarak tasarımı amacıyla da kullanılabilmektedir.

10. Diğer güçlendirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, pasif yapısal kontrol sistemi özelliğine sahip olan, kayıcı bulonlu sürtünmeli düğüm noktalarının uygulanabilirlik, zaman ve yapım maliyetleri bakımından en basit, en hızlı ve en ekonomik çözümler arasında bulunduğu görülmektedir.

11. Sayısal uygulamalardan gözlendiği gibi, seçilen sürtünme kuvvetine ve kayma mesafesine bağlı olarak, çok sayıda alternatif güçlendirme sistemi oluşturulabilmekte ve bu parametrelerin uygun şekilde seçilmesi suretiyle yapı sistemlerinin performanslarının istenen düzeye getirilmesi mümkün olabilmektedir.

12. Bu çalışmada uygulanan yaklaşım, benzer şekilde, diğer yapısal kontrol sistemlerinin mevcut yapıların veya yeni yapılacak olan yapıların sismik davranışına ve performansına etkilerinin incelenmesinde de kullanılabilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **ATC 40,** 1996**.** Seismic Evaluation and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings, *Applied Technology Council,* California.

[2] **FEMA 273,** 1997**.** NERHP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency,* Washington.

[3] **FEMA 356,** 2000**.** Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency,* Washington.

[4] **Eurocode-8,** 2003**.** Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 3: Strengthening and Repair of Buildings, *European Committee for Standardization,* Brussels.

[5] **Parikh, B.P.,** 1966**.** Elastic-Plastic Analysis and Design of Unbraced Multistory Frames, *PhD Thesis,* Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania.

[6] **Özer, E.,** 1987**.** Determination of Second Order Limit Load by a Method of Load Increments, *Bulletin of the Technical University of Istanbul,* 40, 4, 815-836, İstanbul.

[7] **İrtem, E.,** 1991**.** Uzay Çubuk Sistemlerde İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı İçin Bir Yük Artım Yöntemi, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] **Girgin, K.,** 1996**.** Betonarme Yapı Sistemlerinde İkinci Mertebe Limit Yükün ve Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Bir Yük Artım Yöntemi, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[9] **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,* New York.

[10] **Popov, E.G., Yang, T-S.,** 1995**.** Experimental and Analytical Studies of Steel Connections and Energy Dissipators, *Report No.UCB/EERC-95/13, University of California,* California.

[11] **Butterworth, J.W.,** 1999**.** Seismic Damage Limitation in Steel Frames Using Friction Energy Dissipators, *6th International Conference on Steel & Space Structures,* Singapore.

[12] **Butterworth, J.W., Clifton, G.C.,** 2000**.** Performance of Hierarchical Friction Dissipating Joints in Moment Resisting Steel Frames, *12WCEE,* Auckland/ New Zeland.

[13] **Celep, Z., Kumbasar, N.,** 2004**.** Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.

[14] **Özer, E.,** 2004**.** Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi Ders Notları, İstanbul.

[15] **SAP 2000,** 2000**.** Structural Analysis Program User's Manual, Computers & Structures Inc., *University of California Berkeley,* California.

[16] **AISC(1993) LRFD,** 1993**.** Load and Resistance Factor Design Specifications for Structural Steel Buildings, *American Institute of Steel Construction, Chicago,* Illinois.

[17] **AISC(1997),** 1999**.** Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, with Supplement No.1 dated 1999, *American Institute of Steel Construction, Chicago,* Illinois.

[18] **Newmark, N.M., and Hall, W.J.,** 1982**.** "Earthquake Spectra and Design, Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records," Vol 3, *Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley*, California.

[19] **Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik,** 1998. *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı,* Ankara.

EK A. MATRİS YER DEĞİŞTİRME YÖNTEMİ

Bu çalışmanın sayısal uygulamalarında, Sonlu Elemanlar Yönteminin özel bir hali olan Matris Yer Değiştirme Yönteminden yararlanılmıştır. Matris Yer Değiştirme Yönteminin amacı, dış etkiler altında sistemde oluşacak uç kuvvetlerinin ve uç yer değiştirmelerinin elde edilmesidir. Bu yapılırken, denge denklemleri, geometrik süreklilik koşulları ve gerilme – şekil değiştirme bağıntıları kullanılır. Matris Yer Değiştirme Yönteminde bilinmeyenler, düğüm noktalarının doğrusal ve açısal yer değiştirmeleridir. Her eleman için bulunan rijitlik alt matrisleri bir araya getirilerek sistem rijitlik matrisi hesaplanır. Sistemin denge denklemleri, düğüm noktalarının moment ve izdüşüm denge denklemleri yazılarak elde edilir. Elemanların yükleme sabitleri ve düğüm noktası yük matrisleri bulunarak denge denkleminde yerine konur ve bilinmeyenler olan uç yer değiştirme matrisleri her düğüm noktasında hesaplanır. Daha sonra uç kuvvetleri ile uç yer değiştirmeleri arasındaki bağıntılardan yararlanılarak sistemi oluşturan elemanlardaki uç kuvvetler elde edilir. Bütün bu işlemler yapılırken çubuk eksen takımında bulunan ifadeler sistem eksen takımına dönüştürülür. Bulunan uç kuvvetler sistem eksen takımındaki uç kuvvetler olduğu için tekrar eksen dönüştürme matrislerinden yararlanılarak çubuk eksenlerindeki uç kuvvetlerine geçilir.

Matris Yer Değiştirme Yönteminin Esasları

Matris Yer Değiştirme Yönteminin klasik yer değiştirme yöntemlerinden başlıca farkları, elemanların boy değişimini dikkate alması ($\Delta \neq 0$) ve bilinmeyenlerin seçimi ile denklemlerin yazılmasının daha sistematik olmasıdır. Bu nedenle, yöntem bilgisayar uygulamaları için daha elverişlidir. Ancak, bu yöntemde bilinmeyen sayısı klasik yer değiştirme yöntemlerine kıyasla daha fazladır.

Matris Yer Değiştirme Yönteminde, önce sistemin uç yer değiştirme durumu geometrik uygunluk koşullarını sağlayan birbirinden bağımsız uç yer değiştirme durumlarının lineer kombinezonu olarak ifade edilir. Sonra bu bağıntıda bulunan ve sistemin geometrik serbestlik derecesine eşit sayıdaki bilinmeyen katsayılar, denge koşulları ve iç kuvvet - şekil değiştirme bağıntıları yardımı ile tayin edilerek sistemin uç yer değiştirme durumu belirlenir. Daha sonra, uç yer değiştirmelerine bağlı olarak uç kuvvetler de bulunarak hesap tamamlanmış olur.

Çözümün Sağlaması Gereken Koşullar

1. Denge denklemleri
   a – Düğüm noktalarının denge denklemleri
   b – Çubukların denge denklemleri
2. Geometrik Süreklilik Koşulları
3. Bünye denklemleri (gerilme – şekil değiştirme bağıntıları)

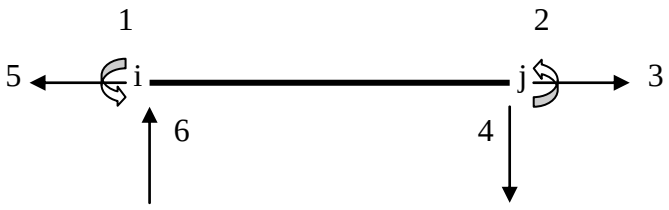
Bilinmeyenler

Düzlem çubuk sistemlerde bilinmeyenler, sistemin düğüm noktalarındaki θ_i , dx_i , dy_i yer değiştirmeleridir. Buna göre, düzlem çubuk sistemlerde bilinmeyen sayısı = 3 x n (n: düğüm noktası sayısı) olarak belirlenir. Bu çalışmadaki örnek sistemde beş adet düğüm noktası olduğundan, toplam olarak 3x5 = 15 yer değiştirme bilinmeyeni vardır.

Hesabın Yapılması İçin Yardımcı Bilgiler

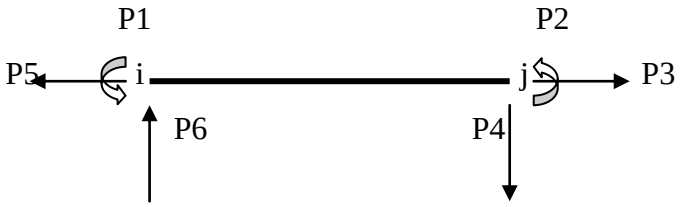
- **Tanımlar**

a. Çubuk Eksen Takımı (Özel Eksen Takımı)



Şekil A.1 Çubuk Eksen Takımının Pozitif Yönleri

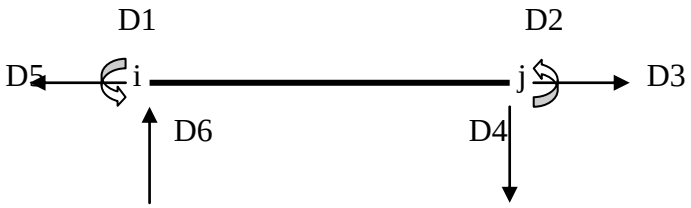
b. Uç Kuvvetleri ve Matris Gösterimi



Şekil A.2 Çubuk Uç Kuvvetleri

$$[p]_i=\begin{bmatrix} P1 \\ P5 \\ P6 \end{bmatrix}, [p]_j = \begin{bmatrix} P2 \\ P3 \\ P4 \end{bmatrix}, [\,p\,] = \begin{bmatrix} [p]i \\ [p]j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P1 \\ P5 \\ P6 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{bmatrix} \qquad (A.1)$$

c._Uç Yer Değiştirmeleri ve Matris Gösterimi



Şekil A.3 Çubuk Uç Yer Değiştirmeleri

$$[d]_i=\begin{bmatrix} D1 \\ D5 \\ D6 \end{bmatrix}, [d]_j = \begin{bmatrix} D2 \\ D3 \\ D4 \end{bmatrix}, [\,d\,] = \begin{bmatrix} [d]i \\ [d]j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D1 \\ D5 \\ D6 \\ D2 \\ D3 \\ D4 \end{bmatrix} \qquad (A.2)$$

Uç Kuvvetleri ile Uç Yer Değiştirmeleri Arasındaki Bağıntılar

Dış etkiler ve bunlara bağlı olarak hesaplanan uç yer değiştirmeleri bilinmektedir. Uç yer değiştirmelerinden oluşan uç kuvvetleri için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$[p]_i = [k]_{ii}\,[d]_i + [k]_{ij}\,[d]_j + [P_0]_i \qquad (A.3)$$

$$[p]_j = [k]_{ji}\,[d]_i + [k]_{jj}\,[d]_j + [P_0]_j \qquad (A.4)$$

Burada

$[d]_i$, $[d]_j$: bilinen uç yer değiştirmeleri matrisleri,

$[p]_i$, $[p]_j$: aranan uç kuvvet matrisleri,

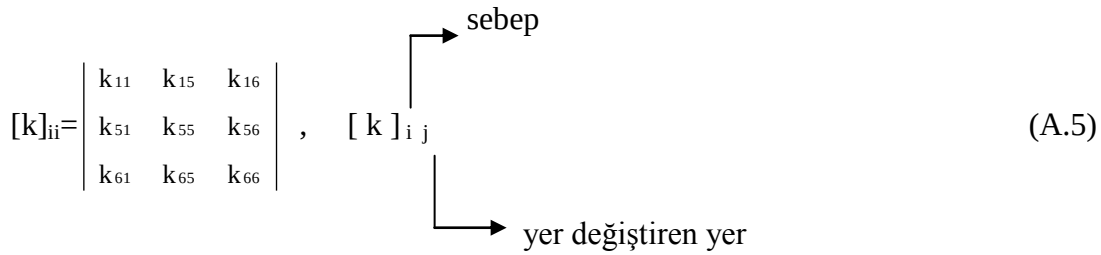
$[k]_{ii}$, $[k]_{ij}$, $[k]_{ji}$, $[k]_{jj}$: uç yer değiştirmelerinin birim değerlerinden oluşan uç kuvvetlerini içeren birim yer değiştirme, yani rijitlik alt matrisleri,

$[P_0]_i$, $[P_0]_j$: dış yüklerden meydana gelen yükleme matrisleridir.

Birim Yer Değiştirme (Rijitlik) Matrisleri

Uç yer değiştirmelerinin birim değerlerinden oluşan uç kuvvetleri matrisleridir. Bir çubuk eleman için dört adet birim yer değiştirme matrisi yazılabilir.

$[k]_{ij}$: j ucundaki uç yer değiştirmelerinin birim değerlerinden dolayı, i ucunda oluşan (3x3) boyutundaki uç kuvvetleri matrisini temsil eder.



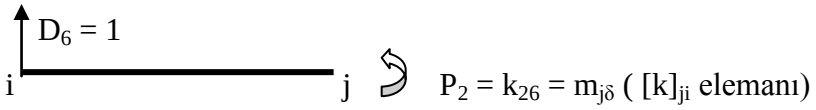
(A.5)

$$[k]_{ij} = \begin{vmatrix} k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{52} & k_{53} & k_{54} \\ k_{62} & k_{63} & k_{64} \end{vmatrix}, \quad [k]_{ji} = \begin{vmatrix} k_{21} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{45} & k_{46} \end{vmatrix}, \quad [k]_{jj} = \begin{vmatrix} k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{vmatrix} \qquad (A.5a)$$

(A.1) ve (A.2) de tanımlanmış olan uç kuvvetleri ve uç yer değiştirme matrisleri dikkate alınacak olursa, birim yer değiştirme matrislerindeki her elemanın Açı yöntemindeki birim yer değiştirme sabitlerinden oluştukları görülebilir. Örneğin (i) ucu için $[k]_{ii}$ birim yer değiştirme matrisi, bu birim yer değiştirme sabitleri cinsinden yazılırsa

$$[k]_{ii} = \begin{vmatrix} m_i\theta_i & m_i\Delta & m_i\delta \\ n_i\theta_i & n_i\Delta & n_i\delta \\ t_i\theta_i & t_i\Delta & t_i\delta \end{vmatrix} \qquad \text{(A.5b)}$$

elde edilir. Diğer rijitlik matrisleri de benzer şekilde yazılabilir.



Şekil A.4 Çubuk Birim Yer Değiştirme Sabiti

Rijitlik matrisleri arasında, Betti karşıtlık teoremi uyarınca bazı bağıntılar vardır. Bunlar

$$\left.\begin{array}{l} [k]_{ii} = [k]_{ii}^T \text{ : esas köşegenine göre simetrik} \\ [k]_{ij} = [k]_{ji}^T \text{ : esas köşegenine göre simetrik} \\ [k]_{jj} = [k]_{jj}^T \text{ : esas köşegenine göre simetrik} \end{array}\right\} \qquad \text{(A.6)}$$

Ayrıca, dış yüksüz bir çubukta herhangi bir uç yer değiştirme durumundan oluşan uç kuvvetleri arasında, denge denklemleri nedeniyle üç bağıntı bulunur.

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = -P_1 + P_6 L \\ P_3 = P_5 \\ P_4 = P_6 \end{array}\right\} \qquad \text{(A.7)}$$

Bu bağıntılar nedeniyle, bir uçtaki uç kuvvetleri belli iken diğer uçtaki uç kuvvetleri $[T_1]$ dönüştürme matrisi aracılığı ile bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} * \begin{bmatrix} P_1 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} \qquad \text{(A.8)}$$

Dönüştürme bağıntıları için, genel olarak Denklem (A.8a) yazılabilir.

$$[p]_j = [T_1][p]_i \qquad \text{(A.8a)}$$

$[T_1]$ dönüştürme matrisi, bilinen bir rijitlik matrisinden diğer rijitlik matrislerinin elde edilmesinde de kullanılabilir.

$$\left.\begin{aligned} [k]_{ji} &= [T_1][k]_{ii} \\ [k]_{ij} &= [k]_{ji}^{T} \\ [k]_{jj} &= [T_1][k]_{ij} \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A.9)}$$

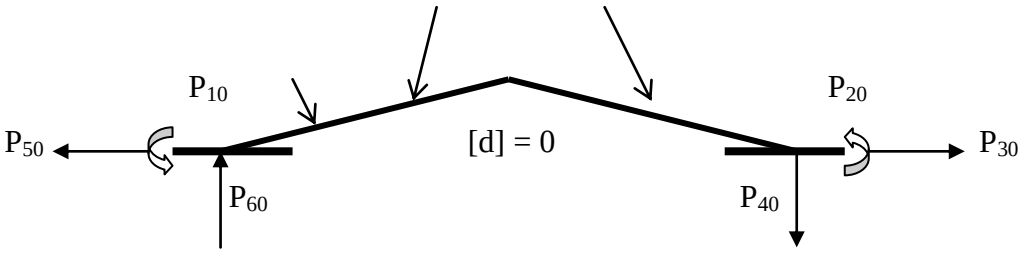
Buna göre, herhangi bir i-j çubuğunun sistem eksenlerindeki alt rijitlik matrisi

$$[K]^{ij} = \left|\begin{array}{c:c} [k]_{ii} & [k]_{ij} \\ \hdashline [k]_{ji} & [k]_{jj} \end{array}\right| \qquad \text{(A.10)}$$

şeklinde elde edilir.

Yükleme Matrisleri

Uç yer değiştirmeleri = 0 iken, dış etkilerden oluşan uç kuvvetleri matrisine yükleme matrisi denir. Yükleme matrisi bir kolon matrisi olup, düzlem çubuk sistemlerde (3n x 1) boyutunadır.



Şekil A.5 Dış Yüklü Çubuk ve Yükleme Sabitleri

Denklem (A.11) de bir çubuğun **(i)** ucu ve çubuğun tümü için yazılmış yükleme **matrisleri** gösterilmektedir.

$$[p_0]_i = \begin{bmatrix} P_{10} \\ P_{50} \\ P_{60} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{ij} \\ \eta_{ij} \\ \tau_{ij} \end{bmatrix}, \quad [p_0] = \begin{bmatrix} [p_0]_i \\ [p_0]_j \end{bmatrix} \qquad \text{(A.11)}$$

Eksen Takımlarının Dönüştürülmesi

a. $[T2]_i$ Eksen Dönüştürme Matrisi

Matris Yer Değiştirme Yönteminde çubukların kendi özel eksenlerinde (lokal eksen takımları) yazılan ifadelerin tüm sisteme uyarlanması için, her çubuk eleman için sistem eksen takımına (global eksen takımları) iz düşürülmesi gerekir. Bunun için $[T_2]$ eksen dönüştürme matrisinden yararlanılır. Bu işlem yapılırken bütün indislerin sonuna x indisi ilave edilerek, bulunan ifadenin sistem eksen takımında yazıldığı ifade edilmiş olur.

$[T_2]$ eksen dönüştürme matrisi, i ucu sol uç ve j ucu sağ uç olduğu düşünülerek

$$[T_2]_i = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & -\cos\beta \end{vmatrix}, \quad [T_2]_j = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{vmatrix} \qquad (A.12)$$

şeklinde elde edilir.

b. Sistem Eksen Takımındaki Uç Kuvvetleri ve Uç Yer Değiştirmeleri

Çubuk eksen takımında yazılan çubuk uç kuvvetlerini sistem eksen takımına dönüştürmek için

$$[p]_{ix} = [T_2]_i\,[p]_i \;,\quad [d]_{ix} = [T_2]_i\,[d]_i$$
$$[p]_{jx} = [T_2]_j\,[p]_j \;,\quad [d]_{jx} = [T_2]_j\,[d]_j \qquad (A.13)$$

denklemleri kullanılır. Buna karşılık, sistem eksen takımından çubuk eksen takımına geçmek için

$$[p]_i = [T_2]_i^T\,[p]_{ix}$$
$$[p]_j = [T_2]_j^T\,[p]_{jx} \qquad (A.13a)$$

denklemlerinden yararlanılır.

c. Sistem Eksen Takımında Uç Kuvvetleri ile Uç Yer Değiştirmeleri Arasındaki Bağıntılar

$$[p]_{ix} = [k]_{ixix}\,[d]_{ix} + [k]_{ixjx}\,[d]_{jx} + [P_0]_{ix}$$
$$[p]_{jx} = [k]_{jxix}\,[d]_{ix} + [k]_{jxjx}\,[d]_{jx} + [P_0]_{jx} \qquad (A.14)$$

Burada, rijitlik matrisleri sistem eksen takımında yazılmışlardır. Çubuk eksen takımındaki rijitlik matrislerini sistem eksen takımına dönüştürmek için aşağıdaki bağıntılar kullanılır.

$$\left.\begin{aligned} [k]_{ixix} &= [T_2]_i\,[k]_{ii}\,[T_2]_i^T \\ [k]_{ixjx} &= [T_2]_i\,[k]_{ij}\,[T_2]_j^T \\ [k]_{jxix} &= [T_2]_j\,[k]_{ji}\,[T_2]_i^T \\ [k]_{jxjx} &= [T_2]_j\,[k]_{jj}\,[T_2]_j^T \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A.15)}$$

i-j çubuğu için, sistem eksen takımındaki alt rijitlik matrisi Denklem (A.16) da gösterilmiştir.

$$[K]^{ixjx} = \left|\begin{array}{c:c} [k]_{ixix} & [k]_{ixjx} \\ \hdashline [k]_{jxix} & [k]_{jxjx} \end{array}\right| \qquad \text{(A.16)}$$

d. Yükleme Matrislerinin Dönüştürülmesi

$$[P_0]_{ix} = [T_2]_i\,[P_0]_i$$
$$[P_0]_{jx} = [T_2]_j\,[P_0]_j$$

Bilinmeyenlerin Tayininde Kullanılan Denklemler

Önceki bölümlerde, çözümün sağlaması gereken koşullar arasında, denge denklemlerinin varlığından söz edilmişti. Denge denklemleri, düğüm noktası denge denklemleri ve çubuk denge denklemlerinden oluşmaktadır. Çubuk denge denklemleri, (A.7) denkleminde $[T_1]$ matrisinin tanımında kullanılmaktadır. Bu durumda, düğüm noktası denge denklemlerinin sağlanması ile çözüme ulaşılacağı görülmektedir.

Düğüm noktası denge denklemleri uyarınca, herhangi bir i düğüm noktasındaki uç kuvvetlerinin bu düğüm noktasına doğrudan etkiyen dış yüke eşdeğer olması gerekmektedir.

$$\Sigma\ -[P]_{ix}^{ij} + [q]_{ix} = 0 \qquad (i = 1, 2,..., n) \qquad \text{(A.17)}$$

$$\Sigma\ [P]_{ix}^{ij} = [q]_{ix} \qquad \text{(A.17a)}$$

(A.17) denklemindeki (-) işareti etki = tepki prensibinden kaynaklanmaktadır.

(A.17) ve (A.17a) ile verilen denklemlerde, $[P]_{ix}$ yerine, uç kuvvetleri ile uç yer değiştirmeleri arasında yazılan (A.14) denklemindeki değeri konulursa

$$(\Sigma\,[k]_{ixix})\,[d]_{ix} + \Sigma\,[k]_{ixjx}\,[d]_{jx} + \Sigma\,[P_0]_{ix} = [q]_{ix} \qquad \text{(A.18)}$$

denklemi elde edilir. Bu matris denklemi, her düğüm noktasında üç denklem içermektedir. Bu denklemler n adet düğüm noktası için topluca yazılırsa

$$[\,S\,]\,[\,d\,] + [\,P_0\,] = [\,q\,] \qquad \text{(A.19)}$$

sistem denklem takımı elde edilir. Burada

[S] : Bütün sistem için çubuk rijitlik matrislerinin bir araya gelmesi ile oluşan (3n x 3n) boyutundaki sistem rijitlik matrisi (Tablo A.1),

Tablo A.1 Sistem Rijitlik Matrisinin Kurulumu

[S]	**1**	**2**	**3**	**i**	**n**
1	$[K]_{1x1x}^{61}$ $[K]_{1x1x}^{12}$ $[K]_{1x1x}^{13}$	$[K]_{1x2x}^{12}$	$[K]_{1x3x}^{13}$		
2	$[K]_{2x1x}^{12}$	$[K]_{2x2x}^{12}$ $[K]_{2x2x}^{23}$	$[K]_{2x3x}^{23}$		
3	$[K]_{3x1x}^{13}$	$[K]_{3x2x}^{23}$	$[K]_{3x3x}^{13}$ $[K]_{3x3x}^{23}$ $[K]_{3x3x}^{3i}$ $[K]_{3x3x}^{3n}$	$[K]_{3xix}^{3i}$	$[K]_{3xnx}^{3n}$
i			$[K]_{ix3x}^{3i}$	$[K]_{ixix}^{3i}$ $[K]_{ixix}^{in}$	$[K]_{ixnx}^{in}$
n			$[K]_{nx3x}^{3n}$	$[K]_{nxix}^{in}$	$[K]_{nxnx}^{3n}$ $[K]_{nxnx}^{in}$ $[K]_{nxnx}^{n7}$

[P_0] : (3n x 1) boyutundaki sistem yükleme matrisi,

[d] : (3n x 1) boyutundaki bilinmeyenler matrisi,

[q] : (3n x 1) boyutundaki düğüm noktası dış yük matrisidir.

(A.19) denklem takımı çözülerek $[d]_x$ bilinmeyen uç yer değiştirmeleri elde edilir. Çubukların uç kuvvetleri, (A.14) ile verilen uç kuvvetleri – uç yer değiştirmeleri bağıntılarında $[d]_x$ değerleri yerlerine yazılarak hesaplanır.

Hesapta İzlenen Yol

1. Sistem çubuklara ayrılır.

2. Her çubuk teker teker ele alınır.

   a – Çubuk eksen takımındaki rijitlik matrisleri ile dış yük varsa yükleme matrisleri çubuk eksen takımında hesaplanır.

   b – Sistem eksen takımına ait dönüştürme matrisleri bulunarak, rijitlik ve yükleme matrisleri çubuk eksen takımından ortak eksen takımına dönüştürülür.

3. Sistem eksen takımında her çubuk için bulunan alt rijitlik matrisleri sistem rijitlik matrisinin gerekli yerlerine yerleştirilerek [S] matrisi oluşturulur.

4. Benzer şekilde, [P_0] ve [q] matrisleri oluşturulur.

5. Sistemin denge denklemleri yazılıp çözülerek bilinmeyenler olan [d] uç yer değiştirmeleri matrisi elde edilir.

6. Uç yer değiştirmeleri bilinen her çubuk için ortak eksen takımındaki uç kuvvetleri, uç kuvvetleri ile uç yer değiştirmeleri arasındaki (A.14) bağıntısı yardımı ile hesaplanır.

7. Uç kuvvetleri, (A.13a) bağıntısı yardımı ile çubuk eksen takımına dönüştürülür.

8. Bulunan uç kuvvetlerinden yararlanarak M, N, T kesit zorları diyagramları çizilir.

EK B. İDEAL SİSTEMİN DOĞRUSAL STATİK HESABI

Yapı Sisteminin Kısa Tanımı

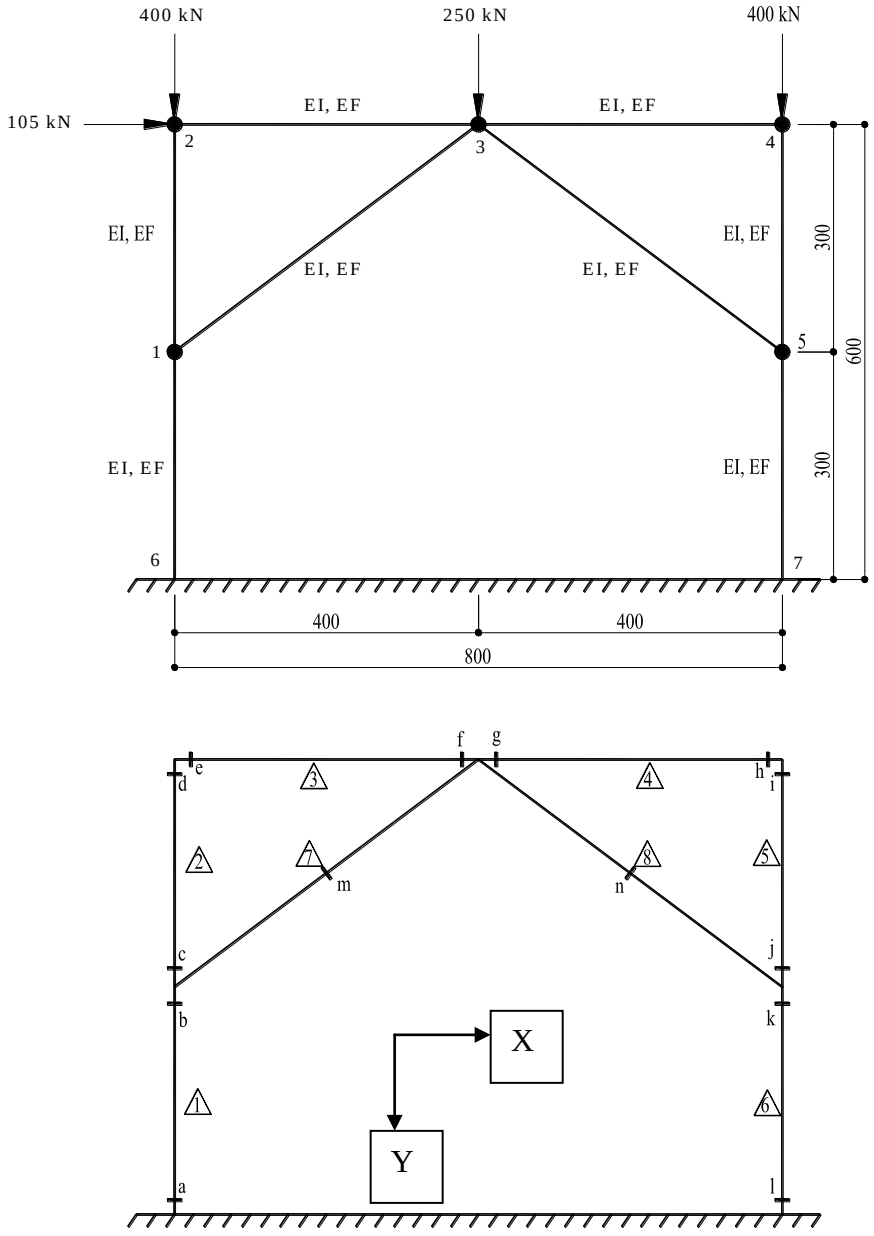
1. Yapının Geometrisi ve Sınır Koşulları

İncelenecek olan yapı, tek açıklıklı ve tek katlı düzlem çelik çerçeveden ve yatay harekete karşı rijitlik sağlayan çapraz elemanlardan oluşan bir çubuk sistemdir. Çerçevenin toplam yüksekliği 6.00 metre, açıklığı ise 8.00 metredir. Diyagonal elemanlar veya diğer adı ile çaprazlar, kirişin orta noktasında merkezi olarak bağlanırken, kolonlara orta noktalarından dış merkez olarak bağlanmaktadır. Kirişler, kolonlara moment aktaran rijit birleşimle mesnetlenmiştir. Kolonlar ankastre mesnetlidir. Çapraz elemanlar, kolon ve kirişlere yalnızca normal kuvvet aktaracak biçimde, mafsallı olarak birleşmişlerdir. Kolonlarda ve çaprazlarda HE-A veya HE-B, kirişlerde ise IPE profilleri kullanılacaktır.

2. Tasarıma Esas Olan Yükler

Sistem, düşey ve yatay yükler ile zorlanmaktadır. Hesabın ön boyutlama ve kesin hesap aşamalarında malzeme doğrusal elastik varsayıldığı için, elastik hesap yöntemleri geçerlidir ve bu nedenle sistem işletme yükleri (arttırılmamış yükler) altında hesaplanacaktır. Yapının performansının belirlenmesine yönelik olan hesaplamalarda ise, malzeme ideal elastoplastik malzeme olarak alınacaktır. Bu durumda hesap, sabit düşey yükler ve sürekli artan yatay yükler altında doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak yapılacaktır. Düşey yükler (G), kolonların tepe noktalarında 400 kN ve kiriş ortasında 250 kN dur. Deprem etkisi olarak alınan yatay yükler (W), ön boyutlama ve kesin hesap adımlarında, yapının kendi ağırlığının %10 una eşit olacak şekilde sisteme etkitilecektir. Buna göre, ön boyutlama aşamasında çerçeveye etkitilecek olan yatay deprem yükü W=105 kN olarak belirlenmiştir.

Şekil B.1 de sistemin çözümüne ilişkin bilgiler verilmiştir. Sistemdeki elemanların eğilme ve uzama rijitlikleri, ön boyutlamanın I. adımı için geçerli olan değerler ile temsil edilmektedir.



Şekil B.1 Sistem Geometrisi ve Tasarıma Esas Olan Yükler

Genel Varsayımlar

1. Malzeme

Malzeme St 37 yapı çeliğidir. St 37 çeliğinin karakteristik değerleri :

σ_a = 240000 kN/m^2 .....(malzeme akma gerilmesi)

σ_u = 370000 kN/m^2 .....(malzeme kopma gerilmesi)

σ_{emn}^{H} = 0,6* σ_a = 144000 kN/m^2 .....(düşey işletme yükleri emniyet gerilmesi)

σ_{emn}^{HD} = 1,15* σ_{emn} = 165600 kN/m^2 .....(yatay işletme yükleri emniyet gerilmesi)

Es = 2,1x10^8 kN/m^2 .....(tüm çelikler için elastisite modülü)

Gs = 8,1x10^7 kN/m^2 .....(tüm çelikler için kayma modülü)

α_t = 10^{-5} .....(sıcaklık genleşme katsayısı)

ν = 0,30 .....(Poisson oranı)

2. Hesap Yöntemleri

Bu bölümde, hesabın hangi aşamasında hangi hesap yönteminin kullanılacağına ve hesap yöntemlerinde ne gibi varsayımlar yapılacağına ilişkin genel açıklamalarda bulunulacaktır.

2a. Doğrusal (Elastik) Statik Hesap Yöntemi

Elastik hesap yöntemleri, işletme yükleri altında zorlanan yapının doğrusal-elastik sınırlar içinde davrandığını varsayan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde, yapıyı oluşturan elemanlar üzerindeki zorlar, orantılı sınır gerilmesinin belirli bir güvenlik katsayısına bölünmesi ile elde edilen emniyet gerilmelerini aşamaz, (bkz. Bölüm 2). Düşey ve yatay işletme yüklerine ait güvenlik katsayıları aşağıda verilmektedir.

ν_R = 1.71 = Düşey işletme yükleri için geçerli emniyet katsayısı (H yüklemesi)

ν_R = 1.50 = Yatay işletme yükleri için geçerli emniyet katsayısı (HZ yüklemesi)

Bu durumda emniyet gerilmesi değeri Denklem (B.1) kullanılarak elde edilebilir.

$$\sigma_{emn} = \sigma_a / \nu_R \qquad \text{(B.1)}$$

Örnek yapı sisteminin ön boyutlama ve kesin hesap aşamalarında elastik hesap yöntemleri kullanılacaktır. Bununla beraber, yapı sisteminin doğrusal olmayan

davranışlarına ilişkin etkiler de, yapı davranış katsayısı ve burkulma katsayısı gibi kavramlardan yararlanarak dolaylı olarak göz önüne alınır.

Yapının doğrusal-elastik hesabında kullanılacak olan yük kombinasyonları aşağıdaki gibidir.

Düşey yükler = 1.0 G + 1.0 Q
Yatay yükler = 1.0 G + 1.0 Q ± 1.0 W

2b. Doğrusal Olmayan Statik (Elastoplastik) Hesap Yöntemleri

Doğrusal olmayan statik hesap yöntemleri, yapı sistemlerinin yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılan ve malzeme ve/veya geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan davranış varsayımına dayanan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde iki farklı yük artımı esas alınabilir. Bunlardan ilkinde, yapıya etkiyen yatay ve düşey yükler aralarındaki oran sabit kalacak şekilde arttırılarak bu yükler için ortak bir taşıma kapasitesi belirlenirken, diğerinde sabit düşey yükler altında sistemin yatay yük taşıma kapasitesi tayin edilir, (bkz. Bölüm 2). Bu çalışmada kullanılacak olan yük artımı yönteminde, sabit düşey yükler ve artan yatay yükler için hesap yapılacaktır. Sistemin performansa dayalı tasarımı ve değerlendirilmesi aşamasında, doğrusal olmayan statik hesap yönteminden yararlanılacaktır.

Ön Boyutlandırma ve Kesin Hesap

Ön boyutlandırma ve kesin hesap aşamalarında, malzeme ve hesap yöntemlerinde yapılan varsayımlar aynen geçerlidir. Ayrıca, ön boyutlandırmanın birinci adımında, yapıyı oluşturan elemanların rijitlikleri ile ilgili varsayımlar da yapılmalıdır. Bu aşamada, sistem elemanlarının enkesitleri hakkında bilgi mevcut olmadığından bütün elemanların eğilme ve uzama rijitlikleri kendi aralarında birbirlerine eşit alınmıştır.

EI (Eğilme rijitliği) = 1 kNm^2
EF (Uzama rijitliği) = 1000 kN

Ön Boyutlandırma I. Adım Statik Hesabı

Çubuk Alt Rijitlik Matrisleri

Çubuk alt rijitlik matrisleri, her çubuğun rijitlikleri esas alınarak belirlenir ve alt rijitlik matrisleri sisteme ait rijitlik matrisini oluşturmak üzere uygun yerlere yerleştirilir.

[S] Sistem Rijitlik Matrisinin Oluşturulması

Tablo B.1 [S] Sistem Rijitlik Matrisinin Kurulması

[S]	1	2	3	4	5
1	$[K]_{1x1x}^{61}$ $[K]_{1x1x}^{12}$ $[K]_{1x1x}^{13}$	$[K]_{1x2x}^{12}$	$[K]_{1x3x}^{13}$		
2	$[K]_{2x1x}^{12}$	$[K]_{2x2x}^{12}$ $[K]_{2x2x}^{23}$	$[K]_{2x3x}^{23}$		
3	$[K]_{3x1x}^{13}$	$[K]_{3x2x}^{23}$	$[K]_{3x3x}^{13}$ $[K]_{3x3x}^{23}$ $[K]_{3x3x}^{34}$ $[K]_{3x3x}^{35}$	$[K]_{3x4x}^{34}$	$[K]_{3x5x}^{35}$
4			$[K]_{4x3x}^{34}$	$[K]_{4x4x}^{34}$ $[K]_{4x4x}^{45}$	$[K]_{4x5x}^{45}$
5			$[K]_{5x3x}^{35}$	$[K]_{5x4x}^{45}$	$[K]_{5x5x}^{35}$ $[K]_{5x5x}^{45}$ $[K]_{5x5x}^{57}$

Sistem Dış Yük Matrisleri, [q]

Sistem iki tip yük altında zorlanmaktadır. Bunlar G düşey yükleri ve W yatay yüklerdir. G düşey yükleri sistemin 2, 3 ve 4 numaralı düğüm noktalarına pozitif Y doğrultusunda yani yer çekimi kuvvetleri yönünde etkimektedir. W yatay deprem yükleri ise sistemin 2 ve 4 numaralı düğüm noktalarına sırasıyla pozitif X (sağa doğru) ve negatif X (sola doğru) yönlerinde ayrı ayrı etkimektedir. Bu üç yükleme türü sisteme ayrı ayrı yüklenecek ve süperpozisyon ilkesi uyarınca birleştirileceklerdir. Tablo B.2 de bu üç dış yük etkisi ve bu yüklerin değerleri (15x1) boyutlu bir dikdörtgen matris üzerinde gösterilmektedir. Tabloda, WE ile gösterilen kombinasyondaki E sembolünün anlamı eksidir. Yani negatif X yönündeki deprem

yüklemesini temsil etmektedir. Sonuçta, [q] düğüm noktası yük matrisleri elde edilmiş olur.

Tablo B.2 Ön Boyutlama I. Adım G, W ve WE Düğüm Noktası Dış Yük Matrisleri

$[q]^G$	$[q]^W$	$[q]^{WE}$	Etki	D.N.
0	0	0	M1	
0	0	0	X1	**1**
0	0	0	Y1	
0	0	0	M2	
0	105	0	X2	**2**
400	0	0	Y2	
0	0	0	M3	
0	0	0	X3	**3**
250	0	0	Y3	
0	0	0	M4	
0	0	-105	X4	**4**
400	0	0	Y4	
0	0	0	M5	
0	0	0	X5	**5**
0	0	0	Y5	

$[P_0]$ Yükleme Matrisleri

Şekil B.1 den, yüklerin sadece düğüm noktalarında etkidiği ve dolayısıyla sistemdeki çubukların hiç birinde ankastrelik uç kuvvetleri oluşturmadığı görülebilir. Sonuç olarak, sisteme ait yükleme matrislerinin değerleri sıfıra eşit olarak bulunur.

$[P_0] = 0$

Sistem Denge Denklemleri ve Uç Yer Değiştirme Matrislerinin Bulunması

Denklem (A.19) da, Matris Yer Değiştirme Yöntemine ait düğüm noktası denge denklemlerinden yararlanarak çubukların uç yer değiştirme değerleri belirlenir. Bunu için daha önceden tayin edilen [S] sistem rijitlik matrisi, [q] sistem düğüm noktası dış yük matrisi ve $[P_0]$ yükleme sabitleri matrisi Denklem (A.19) da yerlerine konur ve bu eşitlikten [d] uç deplasmanları matrisi çekilir.

$$[S] [d] + [P_0] = [q] \quad \text{(A.19)}$$

$$[S] [d] = [q - P_0] \quad \text{(B.2a)}$$

[S] sistem rijitlik matrisinin simetrik kare matris olmasından faydalanarak (B.2a) denklemi sağdan $[S]^{-1}$ matrisi ile çarpılır ve bilinmeyen [d] uç yer değiştirme matrisi

eşitliğin sol tarafında yalnız bırakılır. Böylece, [d] uç yer değiştirmeleri matrisi elde edilmiş olur.

$$\underbrace{[\,S\,]^{-1}\,[\,S\,]}\,[\,d\,] = [\,S\,]^{-1}\,[\,q - P_0\,] \qquad \text{(B.2b)}$$

$$[\,I\,] \quad [\,d\,] = [\,S\,]^{-1}\,[\,q - P_0\,] \qquad \text{(B.2c)}$$

Denklem (B.2c) kullanılarak elde edilen [d] uç yer değiştirme matrisleri Tablo B.3 de gösterilmektedir.

Tablo B.3 Ön Boyutlama I. Adım [d] Uç Yer Değiştirme Matrisleri

(birimler: metre-radyan)

$[d]^G$	$[d]^W$	$[d]^{WE}$	Deplasman	D.N.
37,825	-54,550	54,453	θ1	**1**
-280,609	199,939	-199,815	d1x	
1,575	-0,164	0,164	d1y	
-151,105	17,081	-17,111	θ2	**2**
-0,196	201,119	-200,699	d2x	
2,816	-0,154	0,154	d2y	
0,000	-8,606	8,606	θ3	**3**
0,000	200,601	-200,601	d3x	
377,268	-0,082	-0,082	d3y	
151,105	17,111	-17,081	θ4	**4**
0,196	200,699	-201,119	d4x	
2,816	0,154	-0,154	d4y	
-37,825	-54,453	54,550	θ5	**5**
280,609	199,815	-199,939	d5x	
1,575	0,164	-0,164	d5y	

Çubuk Uç Kuvvetlerinin Bulunması

Sistemin düğüm noktası yer değiştirmeleri ve çubukların uç yer değiştirmeleri hesaplandıktan sonra, Denklem (A.14) de verilen uç kuvvetleri – uç yer değiştirmeleri bağıntıları yardımı ile çubuk uç kuvvetleri elde edilir. Hesaplanan bu değerler sistem eksen takımındaki büyüklüklerdir. Sistem eksen takımında elde edilen uç kuvveti değerleri, Denklem (A.13a) kullanılarak çubuk eksen takımına indirgenir ve böylece sistemdeki bütün kesit tesirleri belirlenerek ön boyutlamaya hazır hale getirilir, Tablo B.4.

$$[p]_i = [T_2]_i^T\,[p]_{ix}$$
$$[p]_j = [T_2]_j^T\,[p]_{jx} \qquad \text{(A.13a)}$$

Tablo B.4 Ön Boyutlama I. Adım Uç Kuvvetleri Değerleri

Kesitler ve Zorları		Düşey Yük	Yatay Yük		Düşey Kombo	Yatay Kombo			
		G	W	WE	G	G+W yada G+WE			
		G	W	WE	M,N,T	Mmaks	Mmin	Nmaks	Nmin
a	M	161.86	-96.93	96.93	161.86	258.78	64.93	64.93	258.78
	N	-525.00	54.52	-54.52	-525.00	-579.52	-470.48	-470.48	-579.52
	T	-99.50	52.50	-52.50	-99.50	-151.99	-47.00	-47.00	-151.99
b	M	-136.64	60.56	-60.56	-136.64	-76.08	-197.20	-76.08	-197.20
	N	-525.00	54.52	-54.52	-525.00	-470.48	-579.52	-470.48	-579.52
	T	-99.50	52.50	-52.50	-99.50	-47.00	-151.99	-47.00	-151.99
c	M	-136.64	60.56	-60.56	-136.64	-76.08	-197.20	-197.20	-76.08
	N	-413.55	-3.19	3.19	-413.55	-416.74	-410.35	-410.35	-416.74
	T	49.11	-24.45	24.45	49.11	24.65	73.56	73.56	24.65
d	M	10.69	-12.81	12.81	10.69	23.58	-2.21	23.49	-2.12
	N	-413.55	-3.19	3.19	-413.55	-410.31	-416.78	-410.35	-416.74
	T	49.11	-24.45	24.45	49.11	-73.61	-24.61	73.56	24.65
e	M	10.69	-12.81	12.81	10.69	-2.12	23.49	23.49	-2.12
	N	49.11	-129.45	129.45	49.11	-80.35	178.56	178.56	-80.35
	T	13.55	3.19	-3.19	13.55	16.74	10.35	10.35	16.74
f	M	64.87	-0.04	0.04	64.87	64.91	64.83	64.91	64.83
	N	49.11	-129.45	129.45	49.11	178.56	-80.35	178.56	-80.35
	T	13.55	3.19	-3.19	13.55	10.35	16.74	10.35	16.74
g	M	64.87	-0.04	0.04	64.87	64.91	64.83	64.83	64.91
	N	49.11	24.50	-24.50	49.11	178.56	73.61	73.61	24.61
	T	-13.55	3.23	-3.23	-13.55	10.35	-10.31	-10.31	-16.78
h	M	10.69	12.90	-12.90	10.69	23.58	-2.21	23.58	-2.21
	N	49.11	24.50	-24.50	49.11	73.61	24.61	73.61	24.61
	T	-13.55	3.23	-3.23	-13.55	-10.31	-16.78	-10.31	-16.78
i	M	10.69	12.90	-12.90	10.69	23.58	-2.21	23.58	-2.21
	N	-413.55	3.23	-3.23	-413.55	-410.31	-416.78	-410.31	-416.78
	T	-49.11	-24.50	24.50	-49.11	-73.61	-24.61	-73.61	-24.61
j	M	-136.64	-60.61	60.61	-136.64	-76.03	-197.25	-197.25	-76.03
	N	-413.55	3.23	-3.23	-413.55	-416.78	-410.31	-410.31	-416.78
	T	-49.11	-24.50	24.50	-49.11	-24.61	-73.61	-73.61	-24.61
k	M	-136.64	-60.61	60.61	-136.64	-76.03	-197.25	-76.03	-197.25
	N	-525.00	-54.52	54.52	-525.00	-470.48	-579.52	-470.48	-579.52
	T	99.50	52.50	-52.50	99.50	46.99	152.00	46.99	152.00
l	M	161.86	96.91	-96.91	161.86	258.76	64.95	64.95	258.76
	N	-525.00	-54.52	54.52	-525.00	-579.52	-470.48	-470.48	-579.52
	T	99.50	52.50	-52.50	99.50	152.00	46.99	46.99	152.00
m	M	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	-185.76	96.19	-96.19	-185.76	-89.57	-281.94	-89.57	-281.94
	T	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n	M	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	N	-185.76	-96.26	96.26	-185.76	-89.50	-282.02	-89.50	-282.02
	T	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ön Boyutların Belirlenmesi

_Kolonların Ön Boyutlarının Belirlenmesi

Tablo B.4 de belirtilen kesit isimlerinin hangi taşıyıcı elemanlara ait olduğu Şekil B.1 de verilmişti. Bu bilgiler ışığında a, b, c, d, i, j, k ve l isimli kesitlerin kolonlara ait olduğu anlaşılmaktadır. Tablo B.4 de, en elverişsiz durumlar için eğilme momentinin en büyük ve en küçük olduğu, benzer şekilde normal kuvvetin en büyük ve en küçük olduğu değerler ve bunlara ait yüklerden ve yük bileşenlerinden meydana gelen diğer kesit tesirleri dikkate alınmıştır. Bu durumda, kolonlar için en elverişsiz yük bileşenine ait kesit tesirleri a ve l kesitlerinde sırasıyla G+WE ve G+W yük bileşenlerinde ortaya çıkmaktadır.

Kesit Tesirleri

M = 258.78 kNm

N = -579.52 kN

T = 152 kN

Seçilen kolon ön boyutu *HE320-B* dir. *HE320-B* kesiti için en kesit karakteristikleri ve çelik kesit hesabı aşağda verilmiştir.

I = 30820 cm^4 , W = 1926 cm^3 , F = 161 cm^2 , i_{min} = 7.58 cm

S_k = 300 cm (yatay hareketi önlenmiş sistemde altı metre yüksekliğindeki kolonun orta noktasından tutulu olduğu göz önünde tutulmuş ve burkulma boyu katsayısının en büyük değeri 1.00 olarak alınmıştır)

$\lambda = S_k / i = 39.58 < 40$ (TS 648), elemanda burkulma problemi yoktur.

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} = 134361.37 + 35995.03 = 170356 \text{ kN/m}^2 \geq \sigma_{emn}^{HD} = 165600 \text{ kN/m}^2$$

Seçilen kolon ön boyutu, ön boyutlandırmanın birinci adımı için kabul edilebilir bir sınırda bulunmaktadır.

_Çaprazların Ön Boyutlarının Belirlenmesi

Çapraz elemanlar m ve n kesitleri ile temsil edilmektedir. Bu durumda, söz konusu kesitlerde oluşan en elverişsiz kesit tesirleri yatay yük kombinasyonlarında meydana gelmektedir.

Kesit Tesirleri

N_{min} = 282.02 kN

Seçilen çapraz ön boyutu *HE180-A* dır. *HE180-A* kesiti için en kesit karakteristikleri ve çelik kesit hesabı aşağıda verilmiştir.

I = 2510 cm^4 , W = 294 cm^3 , F = 45.3 cm^2 , i_{min} = 4.52 cm

S_k = 500 cm (iki ucu mafsallı çapraz elemanın burkulma boyu kendi boyu olarak alınmıştır)

$\lambda = S_k / i$ = 110.62 ise w = 2.14

$$\sigma = w \frac{N}{F} = 133228 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{emn}^{HD} = 165600 \text{ kN/m}^2$$

Seçilen çapraz ön boyutu, ön boyutlandırmanın birinci adımı için kabul edilebilir bir sınırda bulunmaktadır.

_Kirişlerin Ön Boyutlarının Belirlenmesi

Kirişler e, f, g ve h kesitleri ile temsil edilmektedir. En elverişsiz kesit tesirleri f ve g kesitlerinde yatay yük kombinasyonunda görülmektedir.

Kesit Tesirleri

M = 64.91 kNm

N = 178.56 kN

T = 10.35 kN

Seçilen kiriş ön boyutu *IPE 300* dür. *IPE 300* kesiti için en kesit karakteristikleri ve çelik kesit hesabı aşağıda verilmiştir.

I = 8356 cm^4 , W = 557 cm^3 , F = 53.8 cm^2 , i_{min} = 3.35 cm

S_k = 0.8 * 400 = 320 cm (Döşeme düzlemi içinde orta noktasından tali kiriş ile tutulu ve bir ucu kolona mesnetli, bir ucu basit diğer ucu ankastre olarak alınmıştır)

$\lambda = S_k / i$ = 96 ise w = 1.82

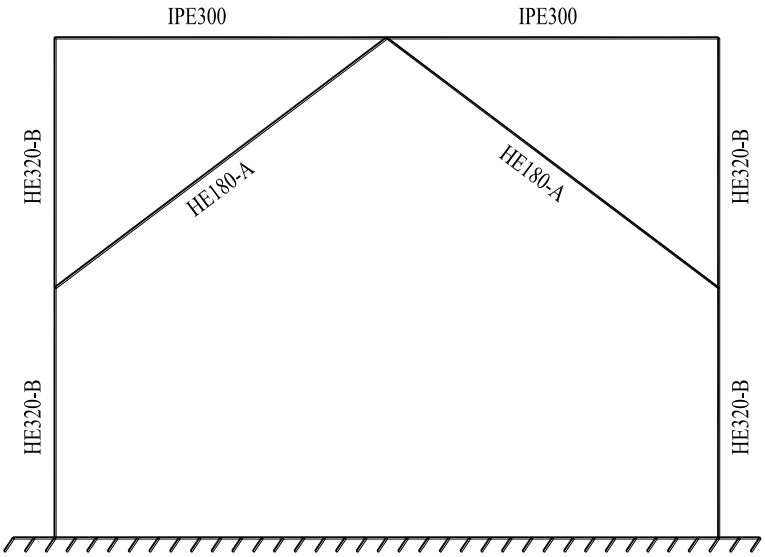
$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} = 116535 + 33189 = 149724 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{emn}^{HD} = 165600 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma = 0.9\frac{M}{W} + w\frac{N}{F} = 104881 + 60403 = 165284 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{emn}^{HD} = 165600 \text{ kN/m}^2$$

Seçilen kiriş ön boyutu, ön boyutlandırmanın birinci adımı için uygundur.

Ön Boyutlandırma II. Adım Statik Hesabı

Ön boyutlandırma I. Adımda bütün elemanların uzama ve eğilme rijitlikleri aynı varsayılmış ve bu rijitliklere sahip olan sistemin statik hesabı yapılarak her çubuk için uç kuvvetleri elde edilmişti. Elde dilen kesit tesirlerine dayanarak sistemin bütün elemanlarının ön boyutlandırması yapılmış ve yeni rijitlikler elde edilmişti. Ön boyutlandırma II. Adımda, yeni rijitlikler dikkate alınarak yeni uç kuvvet dağılımları elde edilecek ve bu etkiler altında seçilen kesitlerin yeterli olup olmadıkları kontrol edilecektir. Şekil B.2 de, ön boyutlandırma I. Adım sonucunda bulunan yeni sistem gösterilmektedir. Yeterli görülen kesitler aynen kalacak ve yetersiz bulunanlar değiştirilerek kesin hesaba geçilecektir.



Şekil B.2 Ön Boyutlandırma I. Adım Sonuçları

Çubuk alt rijitlik matrisleri ve sistem rijitlik matrisi, ön boyutlandırma I. adımda olduğu gibi oluşturulacaktır.

Sistem Dış Yük Matrisleri, [q]

Dış yüklerin etki noktalarında herhangi bir değişiklik yoktur. Düşey G yüklerinin büyüklükleri aynı kalmakta, ancak yatay W deprem yükü sistemin bulunduğu deprem bölgesine, zemin koşullarına, kütle özelliklerine ve rijitliğine bağlı olarak yeniden hesaplanmaktadır. Buna göre, sistemin tasarımında önemli bir yeri olan

deprem karakteristiklerinin gözden geçirilmesi gerekmektedir. Deprem karakteristik bilgileri, Türk deprem yönetmeliği ABYYHY [19] dikkate alınarak belirlenecektir.

Deprem Karakteristikleri

Deprem Bölgesi : II. Derece Deprem Bölgesi ($A_0 = 0.30$)

Zemin Koşulları : Zemin Sınıfı Z1

Z1 Zemin sınıfına ait spektrum karakteristik periyotları

$T_A = 0.10$ sn , $T_B = 0.30$ sn

Yapı Önem Katsayısı : I = 1.00

Yapı Davranış Katsayısı : Dış Merkez Çaprazlı Çelik Sistem (R = 7)

Spektrum Katsayısı

$S(T) = 1+1.5\ T/T_A$ $\quad (0 \leq T \leq T_A)$

$S(T) = 2.5$ $\quad (T_A < T \leq T_B)$

$S(T) = 2.5\ (T_B / T)^{0.8}$ $\quad (T > T_B)$

T = Yapının doğal titreşim periyodu

Eşdeğer Deprem Yükünün Hesabı

$$V_t = \Sigma W\ \frac{A_0 I S(T)}{R}$$

ΣW = Yapının toplam ağırlığı = 400+400+250 = 1050 kN

T = 0.442 sn (SAP2000 bilgisayar programından elde edilen 1.mod periyodu, kütle katılım katsayısı: %99)

$S(T) = 2.5\ (0.3/0.442)^{0.8} = 1.834$, $(T > T_B)$

$V_t = 82.51$ kN $> 0.1\ A_0\ I\ S(T)\ \ \Sigma W = 57.771$ kN

Böylece, sisteme etkiyen W deprem yükü tayin edilmiş olur.

G ve W yükleri belirlendikten sonra, sistemin düğüm noktası dış yük matrisleri oluşturulabilir. Tablo B.5 de, [q] düğüm noktası dış yük matrisleri gösterilmektedir.

Tablo B.5 Ön Boyutlandırma II. Adım G, W ve WE Düğüm Noktası Dış Yük Matrisleri

$[q]^G$	$[q]^W$	$[q]^{WE}$	Etki	D.N.
0	0	0	M1	**1**
0	0	0	X1	
0	0	0	Y1	
0	0	0	M2	**2**
0	82.51	0	X2	
400	0	0	Y2	
0	0	0	M3	**3**
0	0	0	X3	
250	0	0	Y3	
0	0	0	M4	**4**
0	0	-82.51	X4	
400	0	0	Y4	
0	0	0	M5	**5**
0	0	0	X5	
0	0	0	Y5	

$[P_0]$ Yükleme Matrisleri

$[P_0] = 0$

Aranan Uç Yer Değiştirme Değerleri, [d]

Tablo B.6 Ön Boyutlandırma II. Adım [d] Uç Yer Değiştirmeleri Matrisi

$[d]^G$	$[d]^W$	$[d]^{WE}$	Deplasman	D.N.
0,000730618	-0,000911067	0,000851606	θ1	**1**
-0,004868306	0,002801241	-0,002711151	d1x	
0,000465839	-3,6964E-05	3,6964E-05	d1y	
-0,002752872	5,8368E-05	-0,000109277	θ2	**2**
-0,0001696	0,003585898	-0,003297147	d2x	
0,000827584	-3,70007E-05	3,63842E-05	d2y	
-4,06576E-19	-5,56709E-05	5,56709E-05	θ3	**3**
5,14996E-18	0,003243426	-0,003243426	d3x	
0,008669672	-5,49885E-05	-5,49885E-05	d3y	
0,002752872	0,000109277	-5,8368E-05	θ4	**4**
0,0001696	0,003297147	-0,003585898	d4x	
0,000827584	3,63842E-05	-3,70007E-05	d4y	
-0,000730618	-0,000851606	0,000911067	θ5	**5**
0,004868306	0,002711151	-0,002801241	d5x	
0,000465839	3,6964E-05	-3,6964E-05	d5y	

Çubuk Uç Kuvvetlerinin Bulunması

Bulunan uç yer değiştirmeleri, Denklem (A.14) yardımı ile uç kuvvetlerin bulunmasında kullanılırlar. Sistem eksen takımındaki uç kuvvet değerleri Denklem (A.13a) ile çubuk eksen takımına indirgenir ve böylece sistemdeki bütün kesit tesirleri belirlenerek ön boyutlandırma ikinci adımının kesit kontrollarına geçilebilir.

Tablo B.7 Ön Boyutlandırma II. Adım Uç Kuvvetleri Değerleri

					Düşey K.	Yatay Kombo			
Kesitler ve Zorları		Düşey Y.	Yatay Yük		G	G+W yada G+WE			
		G	W	WE	M,N,T	Mmaks	Mmin	Nmaks	Nmin
a	M	178,53	-81,56	81,56	178,53	260,09	96,98	96,98	260,09
	N	-525,00	41,66	-41,66	-525,00	-566,66	-483,34	-483,34	-566,66
	T	-108,51	41,27	-41,27	-108,51	-149,78	-67,25	-67,25	-149,78
b	M	-147,01	42,25	-42,25	-147,01	-104,76	-189,25	-104,76	-189,25
	N	-525,00	41,66	-41,66	-525,00	-483,34	-566,66	-483,34	-566,66
	T	-108,51	41,27	-41,27	-108,51	-67,25	-149,78	-67,25	-149,78
c	M	-147,01	42,25	-42,25	-147,01	-104,76	-189,25	-189,25	-104,76
	N	-407,69	0,04	-0,04	-407,69	-407,65	-407,73	-407,73	-407,65
	T	47,90	-14,22	14,22	47,90	33,68	62,12	62,12	33,68
d	M	-3,30	-0,42	0,42	-3,30	-2,88	-3,71	-2,88	-3,71
	N	-407,69	0,04	-0,04	-407,69	-407,73	-407,65	-407,73	-407,65
	T	47,90	-14,22	14,22	47,90	62,12	33,68	62,12	33,68
e	M	-3,30	-0,42	0,42	-3,30	-2,88	-3,71	-2,88	-3,71
	N	47,90	-96,73	96,73	47,90	-407,73	-407,65	144,63	-48,83
	T	7,69	-0,04	0,04	7,69	62,12	33,68	7,73	7,65
f	M	27,45	-0,58	0,58	27,45	28,03	26,87	28,03	26,87
	N	47,90	-96,73	96,73	47,90	144,63	-48,83	144,63	-48,83
	T	7,69	-0,04	0,04	7,69	7,73	7,65	7,73	7,65
g	M	27,45	-0,58	0,58	27,45	28,03	26,87	26,87	28,03
	N	47,90	15,17	-15,17	47,90	32,73	63,08	63,08	32,73
	T	-7,69	0,65	-0,65	-7,69	-8,34	-7,03	-7,03	-8,34
h	M	-3,30	2,03	-2,03	-3,30	-1,27	-5,33	-1,27	-5,33
	N	47,90	15,17	-15,17	47,90	63,08	32,73	63,08	32,73
	T	-7,69	0,65	-0,65	-7,69	-7,03	-8,34	-7,03	-8,34
i	M	-3,30	2,03	-2,03	-3,30	-1,27	-5,33	-1,27	-5,33
	N	-407,69	0,65	-0,65	-407,69	-407,03	-408,34	-407,03	-408,34
	T	-47,90	-15,17	15,17	-47,90	-63,08	-32,73	-63,08	-32,73
j	M	-147,01	-43,49	43,49	-147,01	-103,52	-190,50	-190,50	-103,52
	N	-407,69	0,65	-0,65	-407,69	-408,34	-407,03	-407,03	-408,34
	T	-47,90	-15,17	15,17	-47,90	-32,73	-63,08	-63,08	-32,73
k	M	-147,01	-43,49	43,49	-147,01	-103,52	-190,50	-103,52	-190,50
	N	-525,00	-41,66	41,66	-525,00	-483,34	-566,66	-483,34	-566,66
	T	108,51	41,24	-41,24	108,51	67,27	149,76	67,27	149,76
l	M	178,53	80,24	-80,24	178,53	258,77	98,30	98,30	258,77
	N	-525,00	-41,66	41,66	-525,00	-566,66	-483,34	-483,34	-566,66
	T	108,51	41,24	-41,24	108,51	149,76	67,27	67,27	149,76
m	M	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	-195,52	69,36	-69,36	-195,52	-126,16	-264,88	-126,16	-264,88
	T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
n	M	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	-195,52	-70,52	70,52	-195,52	-125,00	-266,04	-125,00	-266,04
	T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ön Boyutların Kontrolu

_Kolonların Ön Boyutlarının Kontrolu

Kesit Tesirleri (a kesiti)

M_{maks} = 260.09 kNm

N = -566.66 kN

T = -149.78 kN

Seçilen kolon ön boyutu *HE320-B* dir. *HE320-B* kesiti için en kesit karakteristikleri ve çelik kesit hesabı aşağıda verilmiştir.

I = 30820 cm^4 , W = 1926 cm^3 , F = 161 cm^2 , i_{min} = 7.58 cm

S_k = 300 cm (yatay hareketi önlenmiş sistemde altı metre yüksekliğindeki kolonun orta noktasından tutulu olduğu göz önünde tutulmuş ve burkulma boyu katsayısının en büyük değeri 1.00 olarak alınmıştır)

$\lambda = S_k / i = 39.58 < 40$, burkulma problemi yoktur.

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} = 135041 + 35196 = 170237 \text{ kN/m}^2 \geq \sigma_{emn}^{HD} = 165600 \text{ kN/m}^2$$

Seçilen kolon ön boyutu, kesin hesap için kabul edilebilir bir sınırda bulunmaktadır.

_Çaprazların Ön Boyutlarının Kontrolu

Kesit Tesirleri (n kesiti)

N_{min} = 266.04 kN

Seçilen çapraz ön boyutu *HE180-A* dır. *HE180-A* kesiti için en kesit karakteristikleri :

I = 2510 cm^4 , W = 294 cm^3 , F = 45.3 cm^2 , i_{min} = 4.52 cm

S_k = 500 cm (iki ucu mafsallı çapraz elemanın burkulma boyu kendi boyu olarak alınmıştır)

$\lambda = S_k / i = 110.62$ ise w = 2.14

$$\sigma = w \frac{N}{F} = 125678 \text{ kN/m}^2 < \sigma_{emn}^{HD} = 165600 \text{ kN/m}^2$$

Seçilen çapraz ön boyutu, kesin hesap için kabul edilebilir bir sınırda bulunmaktadır.

Kirişlerin Ön Boyutlarının Kontrolu

Kesit Tesirleri (f kesiti)

M = 28.03 kNm

N = 144.63 kN

T = 7.73 kN

Seçilen kiriş ön boyutu *IPE 300* dür. *IPE 300* kesiti için en kesit karakteristikleri :

$I = 8356\ cm^4$, $W = 557\ cm^3$, $F = 53.8\ cm^2$, $i_{min} = 3.35$ cm

$S_k = 0.8 * 400 = 320$ cm (Döşeme düzlemi içinde orta noktasından tali kiriş ile tutulu ve bir ucu kolona mesnetli, bir ucu basit diğer ucu ankastre olarak alınmıştır)

$\lambda = S_k / i = 96$ ise $w = 1.82$

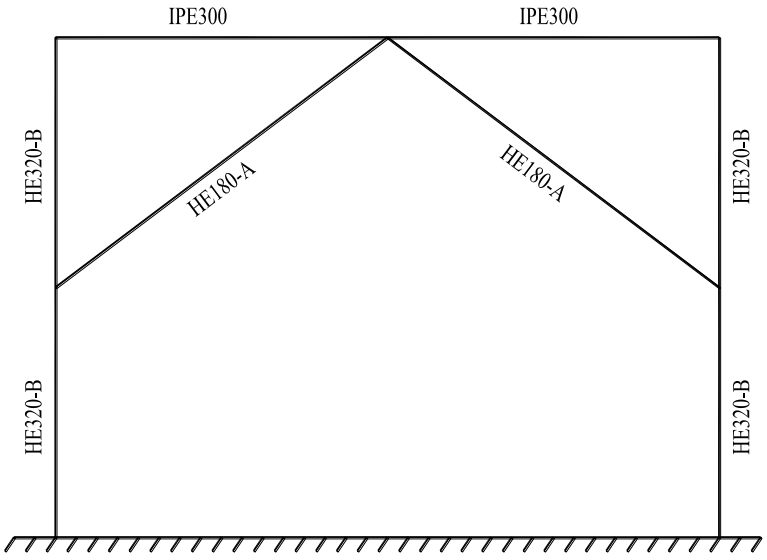
$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} = 50323 + 26883 = 77206\ kN/m^2 < \sigma_{emn}^{HD} = 165600\ kN/m^2$$

$$\sigma = 0.9\frac{M}{W} + w\frac{N}{F} = 45291 + 48927 = 94218\ kN/m^2 < \sigma_{emn}^{HD} = 165600\ kN/m^2$$

Seçilen kiriş ön boyutu, kesin hesap için kabul edilebilir bir sınırda bulunmaktadır.

Sonuç

Ön boyutlandırmanın birinci adımı sonunda belirlenen kesitler, ön boyutlandırmanın ikinci adımında kontrol edilmiş ve kesitlerde gerekli güvenliğin sağlandığı görülmüştür. Şekil B.3 de, sistemin kesin boyutları gösterilmektedir.



Şekil B.3 Sistemin Kesin Boyutları

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Kırşehir'in Güzler köyünde doğan Baykal DÖNMEZ ilk, orta ve lise öğrenimini Antalya'da tamamladı. 1996 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2000 yılında lisans eğitimini iyi derece ile tamamladıktan sonra, 2000 kış yarıyılında İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programına girmeye hak kazandı. Bir yıllık İngilizce hazırlık programında okuduktan sonra 2003 - 2004 bahar yarıyılı sonunda Yüksek Lisans eğitimini tamamladı.

Baykal DÖNMEZ, 2000 yılında başladığı proje mühendisliği ve koordinasyonu görevini halen özel bir firmada sürdürmektedir.