

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK KATLI BETONARME PREFABRİKE ENDÜSTRİ  
YAPILARININ PERFORMANS ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Halis GÜRLEK**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Yapı Mühendisliği**

**HAZİRAN 2009**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK KATLI BETONARME PREFABRİKE ENDÜSTRİ  
YAPILARININ PERFORMANS ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Halis GÜRLEK  
(501051142)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009  
Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin AYDOĞAN (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Mustafa ZORBOZAN (YTÜ)  
Doç. Dr. Kutlu DARILMAZ (İTÜ)**

**HAZİRAN 2009**



## ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı - Yapı Mühendisliği Programında master tezi olarak yapılan bu çalışmada tek katlı, kolonları temelde ankastre betonarme prefabrike endüstri yapılarını temsil etmek üzere seçilen iki ayrı çerçeve sistemin doğrusal olmayan davranışları incelenmiş ve performans düzeylerinin belirlenmesi amacıyla sayısal incelemelere yer verilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamda bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren ve her konuda desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Metin AYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenim boyunca bana her konuda destek olan değerli dostum Ziya AKSOY'a ve ailesine ve çalışma boyunca her an desteğini gördüğüm değerli arkadaşlarım Hande ERTEKİN, Fatih AKIN ve Nusret OKAY'a teşekkürü borç bilirim.

Bu günlere gelmemde desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler.

Haziran 2009

Halis GÜRLEK

(İnşaat Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ .....	xi
SEMBOL LİSTESİ .....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Konu.....	1
1.2 Konu ile İlgili Çalışmalar.....	2
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	3
<b>2. BETONARME PREFABRİKE YAPILAR.....</b>	<b>5</b>
2.1 Giriş.....	5
2.1.1 Prefabrike yapıların sınıflandırılması.....	5
2.2 Betonarme Prefabrike Endüstri Yapıları.....	9
2.2.1 Betonarme prefabrike yapıların tasarımında dikkate alınan hususlar.....	11
2.2.2 2007 Türk deprem yönetmeliğine göre tasarım .....	11
<b>3. YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI.....</b>	<b>15</b>
3.1 Doğrusal Olmayan Yönteme Giriş.....	15
3.1.1 Çözümün sağlanması gereken koşullar.....	16
3.1.2 Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri.....	16
3.1.3 Yapı sistemlerinin dış yükler altındaki doğrusal olmayan davranışı .....	17
3.2 İç Kuvvet - Şekil Değiştirme Bağlılıkları ve Akma (Kırılma) Koşulları.....	19
3.2.1 Çeşitli yapı malzemelerinde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları .....	19
3.2.1.1 Beton çeliği .....	20
3.2.1.1 Beton .....	21
3.2.2 Düzlem çubuk elemanlarda iç kuvvet - şekil değiştirme bağıntıları ve akma (kırılma) koşulları.....	21
3.2.3 Betonarme çubuklar .....	23
3.2.3.1 Varsayımlar ve esaslar .....	24
3.2.3.2 Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisindeki çubuklar .....	24
3.3 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Betonarme Sistemlerin Hesabı .....	27
3.3.1 Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin yayılı olması hali.....	27
3.3.2 Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin belirli kesitlerde toplandığının varsayılması hali .....	27
3.3.2.1 Plastik mafsal hipotezi .....	27

<b>4. PERFORMANSA DAYALI TASARIM VE DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>33</b>
4.1 Yapı Elemanlarında Hasar Sınırları ve Hasar Bölgeleri .....	34
4.1.1 Kesit hasar sınırları.....	34
4.1.2 Kesit hasar bölgeleri.....	35
4.1.3 Kesit hasar ve eleman hasar bölgeleri .....	35
4.2 Binaların Deprem Performans Seviyeleri .....	35
4.2.1 Hemen kullanım performans düzeyi .....	35
4.2.2 Can güvenliği performans düzeyi .....	36
4.2.3 Göçme öncesi performans düzeyi .....	36
4.2.4 Göçme durumu.....	37
4.3 Performans Belirlemede Esas Alınacak Deprem Hareketleri .....	37
4.4 Performans Hedefi ve Çok Seviyeli Performans Hedefleri .....	38
4.5 Performans Belirlenmesi ve Kullanılan Analiz Yöntemleri .....	38
4.5.1 Doğrusal elastik hesap yöntemleri .....	39
4.5.1.1 Eşdeğer deprem yükü yöntemi.....	39
4.5.2 Doğrusal elastik olmayan hesap yöntemleri.....	40
4.5.2.1 Doğrusal elastik olmayan davranışın idealleştirilmesi.....	41
4.5.2.2 Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi.....	42
4.5.2.3 Kesitteki birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi .....	49
4.5.2.4 Betonarme elemanların kesit birim şekil değiştirme kapasiteleri .....	50
4.5.3 Yer değiştirme katsayısı yöntemi (Displacement Coefficient Method, FEMA 356) .....	50
<b>5. TEK KATLI BETONARME PREFABRİKE ENDÜSTRİ YAPILARININ PERFORMANS ANALİZİ.....</b>	<b>53</b>
5.1 Giriş.....	53
5.2 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Boyutlandırılan Kırıklı Çerçeve Betonarme Prefabrike Bir Sistemin Performans Analizi .....	53
5.2.1 Sistemin boyutlandırılması.....	54
5.2.2 Çerçeve elemanlarına ait kesme kuvveti kapasitelerinin belirlenmesi.....	62
5.2.3 Deprem performansının FEMA 356' ya göre belirlenmesi .....	62
5.3 Doğrusal ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemlerle Deprem Performansının Belirlenmesi.....	63
5.3.1 Doğrusal elastik hesap (Eşdeğer deprem yükü yöntemi).....	63
5.3.2 Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi.....	66
5.3.3 Deprem performansının FEMA 356'ya göre belirlenmesi .....	69
5.4 1998 Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Boyutlandırılan Alttan Ankastre Üstten Mafsallı Betonarme Prefabrike Bir Sistemin Performans Analizi.....	73
5.4.1 Sistemin Boyutlandırılması .....	73
5.5 Doğrusal ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemlerle Deprem Performansının Belirlenmesi.....	75
5.5.1 Doğrusal elastik hesap (Eşdeğer deprem yükü yöntemi) .....	75
5.5.2 Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi.....	77
5.5.3 Deprem performansının FEMA 356'ya göre belirlenmesi .....	79
<b>6. SONUÇLAR .....</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>83</b>



## KISALTMALAR

<b>ATC</b>	: Applied Technology Council
<b>ATC 40</b>	: Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings
<b>FEMA</b>	: Federal Emergency Management Agency
<b>FEMA 356</b>	: Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings
<b>FEMA 440</b>	: Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures
<b>TDY-98</b>	: 1998 Türk Deprem Yönetmeliği Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY)
<b>TDY-07</b>	: 2007 Türk Deprem Yönetmeliği Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY)
<b>TS500</b>	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
<b>TS498</b>	: Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri
<b>MN</b>	: Minimum Hasar Sınırı
<b>GV</b>	: Güvenlik Sınırı
<b>HK</b>	: Hemen Kullanım
<b>CG</b>	: Can Güvenliği
<b>GÖ</b>	: Göçmenin Önlenmesi
<b>MHB</b>	: Minimum Hasar Bölgesi
<b>BHB</b>	: Belirgin Hasar Bölgesi
<b>IHB</b>	: İleri Hasar Bölgesi
<b>MHB</b>	: Minimum Hasar Bölgesi



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı .....	13
Çizelge 3.1	: Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri .....	17
Çizelge 4.1	: Binalar için öngörülen minimum performans hedefleri .....	38
Çizelge 4.2	: Donatı çeliği için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı.....	49
Çizelge 5.1	: Normal kuvvete bağlı çatlamış kesit eğilme rijitlikleri .....	54
Çizelge 5.2	: X Doğrultusu için tüm kattaki kolonların moment büyütme katsayıları .....	57
Çizelge 5.3	: X Doğrultusu için kolonların bireysel moment büyütme katsayıları .....	57
Çizelge 5.4	: X Doğrultusu için hesaplarda kullanılan $\beta$ moment büyütme katsayıları .....	57
Çizelge 5.5	: Y Doğrultusu için tüm kattaki kolonların moment büyütme katsayıları .....	59
Çizelge 5.6	: Y Doğrultusu için kolonların bireysel moment büyütme katsayıları .....	59
Çizelge 5.7	: Y Doğrultusu için hesaplarda kullanılan $\beta$ moment büyütme katsayıları .....	60
Çizelge 5.8	: Seçilen donatılar.....	61
Çizelge 5.9	: Sistemde düşey yükler altında oluşan iç kuvvetler .....	63
Çizelge 5.10	: Sistemde deprem yükleri altında oluşan iç kuvvetler.....	64
Çizelge 5.11	: X Doğrultusu için TDY-07' e göre belirlenen performans seviyesi .....	68
Çizelge 5.12	: Y Doğrultusu için TDY-07' e göre belirlenen performans seviyesi .....	69
Çizelge 5.13	: X Doğrultusu için FEMA 356' ya göre giriş performans seviyesi.....	71
Çizelge 5.14	: X Doğrultusu için FEMA 356' ya göre kolon performans seviyesi.....	72
Çizelge 5.15	: Y Doğrultusu için FEMA 356' ya göre kolon performans seviyesi.....	73
Çizelge 5.16	: Sistemde düşey yükler altında oluşan iç kuvvetler .....	76
Çizelge 5.17	: Sistemde deprem yükleri altında oluşan iç kuvvetler.....	77
Çizelge 5.18	: TDY-07' e göre belirlenen performans seviyesi .....	79
Çizelge 5.19	: FEMA 356' ya göre belirlenen performans seviyesi.....	80
Çizelge 6.1	: Sonuçların karşılaştırılması .....	81



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1	: Kırıklı çerçeve sistemi.....	10
Şekil 3.1	: Çeşitli teorilere göre yük parametresi –yer değiştirme bağıntıları .....	18
Şekil 3.2	: Beton çeliğinde $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramı .....	20
Şekil 3.3	: Beton çeliğinin $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramlarının idealleştirilmesi .....	20
Şekil 3.4	: Betonarme çubuğun eğilmesinde dış basınç lifindeki $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramı.....	21
Şekil 3.5	: Düzlem çubuk elemanda iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler .....	22
Şekil 3.6	: Betonarme kesitlerde ( $M - \chi$ ) diyagramı.....	25
Şekil 3.7	: Betonarme kesitlerde karşılıklı etki diyagramı .....	26
Şekil 3.8	: Eğilme momenti - eğrilik diyagramı .....	28
Şekil 3.9	: Doğrusal olmayan şekil değiştirmeler .....	29
Şekil 3.10	: İdealleştirilmiş bünye bağıntısı .....	29
Şekil 3.11	: Plastik mafsalsal boyu .....	31
Şekil 4.1	: Kesit hasar bölgeleri.....	35
Şekil 4.2	: Eğilme momenti plastik dönme bağıntıları .....	42
Şekil 4.3	: Performans noktasının belirlenmesi ( $T_1^{(1)} > T_B$ ) .....	45
Şekil 4.4	: Performans noktasının belirlenmesi ( $T_1^{(1)} < T_B$ ) .....	46
Şekil 4.5	: Performans noktasının belirlenmesi ( $T_1^{(1)} < T_B$ ) .....	47
Şekil 4.6	: Donatı çeliği davranış modeli .....	49
Şekil 4.7	: İki doğru parçası ile idealleştirilmiş kapasite eğrisi .....	51
Şekil 5.1	: Seçilen betonarme prefabrike endüstri yapısı .....	54
Şekil 5.2	: Tasarıma esas olan yükler.....	55
Şekil 5.3	: $M_{G+Q}$ ve $M_{Ex}$ diyagramları .....	58
Şekil 5.4	: Moment kombinasyonlarının $\beta$ ile arttırılmış değerlerinin diyagramları .....	58
Şekil 5.5	: Tasarım deprem yükü ve moment kombinasyonlarının $\beta$ ile arttırılmış değerlerinin diyagramları.....	60
Şekil 5.6	: Donatıların yerleşim düzeni .....	61
Şekil 5.7	: Sistemin düşey yükler altında normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment diyagramları .....	63
Şekil 5.8	: Sistemin deprem yükleri altında normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment diyagramları .....	64
Şekil 5.9	: X Doğrultusu için statik itme eğrisi (TDY-07) .....	67
Şekil 5.10	: Spektral ivme- spektral yer değiştirme grafiği .....	67
Şekil 5.11	: Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar.....	68
Şekil 5.12	: Y Doğrultusu için statik itme eğrisi (TDY-07).....	68
Şekil 5.13	: Spektral ivme- spektral yer değiştirme grafiği .....	69
Şekil 5.14	: Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar .....	69
Şekil 5.15	: X Doğrultusu için statik itme eğrisi (FEMA 356).....	71
Şekil 5.16	: Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar .....	71
Şekil 5.17	: Y Doğrultusu için statik itme eğrisi (FEMA 356).....	72
Şekil 5.18	: Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar .....	73

Şekil 5.19 : Seçilen betonarme prefabrike endüstri yapısı .....	73
Şekil 5.20 : Çerçeve sistemin hesap modeli ve yükleme durumu .....	74
Şekil 5.21 : Seçilen kolon donatılarının yerleşim düzeni .....	75
Şekil 5.22 : Sistemin düşey yükler altında normal kuvvet ve moment diyagramları.....	75
Şekil 5.23 : Sistemin deprem yükleri altında kesme kuvveti ve moment diyagramları.....	76
Şekil 5.24 : Statik itme eğrisi (TDY-07).....	78
Şekil 5.25 : Spektral ivme- spektral yer değiştirme grafiği.....	78
Şekil 5.26 : Statik itme eğrisi (FEMA 356).....	79

## SEMBOL LİSTESİ

$A(T_1)$	: Spektral ivme katsayısı
$A_c$	: Brüt enkesit alanı
$A_o$	: Etkin yer ivmesi katsayısı
$A_s$	: Donatı alanı
$a$	: Modal yer değiştirme
$a^{(i)}_n$	: (i)' inci itme adımı sonunda n' inci moda ait modal ivme
$a_{yn}$	: n' inci moda ait eşdeğer akma ivmesi
$b$	: Kolon enkesit boyutu
$C_0$	: Çok serbestlik dereceli sistemin tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi ile eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin spektral yerdeğiştirmesi arasındaki ilişkiyi oluşturan modal katılım katsayısı
$C_1$	: Doğrusal elastik yer değiştirmeyi, beklenen maksimum inelastik yer değiştirmeye dönüştüren düzeltme katsayısı
$C_2$	: Histeresiz enerji şeklinin etkisini hesaba katan düzeltme katsayısı
$C_3$	: İkinci merteye etkileri nedeniyle artan yerdeğiştirmelerin etkisini göz önüne alan düzeltme katsayısı
$C_m$	: Burkulmada moment katsayısı
$C_{R,1}$	: Yer değiştirme oranı
$d$	: Enkesit faydalı yüksekliği
$d^{(i)}_n$	: (i)' inci itme adımı sonunda elde edilen 1' inci moda ait modal yer değiştirme
$d^{(i)}_p$	: Birinci moda ait modal yer değiştirme istemi
$E$	: Deprem yükleri
$E_c$	: Beton elastisite modülü
$E_s$	: Donatı çeliğinin elastisite modülü
$EI_o$	: Brüt kesit eğilme rijitliği
$EI_e$	: Çatlamış kesit eğilme rijitliği
$e$	: Güvenlik katsayısı
$F_1, F_2, F_3$	: Malzeme karakteristiklerine ve enkesit özelliklerine bağlı olarak belirlenen doğrusal olmayan fonksiyonlar
$f_{ck}, f'_c$	: Karakteristik basınç dayanımı
$f_{ctk}$	: Betonun karakteristik çekme dayanımı
$f_{ctm}$	: Mevcut betonun çekme dayanımı
$f_{yk}$	: Donatı çeliğinin akma dayanımı
$G$	: Kalıcı yükler
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$H$	: Çerçeve yüksekliği
$h$	: Çalışan doğrultudaki kesit boyutu
$h_i$	: Binanın i' inci katının kat yüksekliği
$I$	: Bina önem katsayısı
$I_g$	: Brüt kesidin eylemsizlik momenti
$K_1, K_2$	: Akma (kırılma) koşulları

$K_e$	: Elastik rijitlik
$K_s$	: Elastoplastik rijitlik
$L$	: Kolon boyu
$L_o$	: Beton kesitin dış çekme lifinde çatlakların başladığı durum
$L_1$	: Betonun dış basınç lifinde veya çekme donatısında plastik şekil değiştirmelerin başlamasına karşı gelen durum
$L_2$	: Kırılma
$l_k$	: Kolon burkulma boyu
$l_p$	: Plastik mafsal boyu
$M$	: Eğilme momenti
$M_r$	: Karakteristik malzeme dayanımları kullanılarak elde edilen eğilme momenti kapasitesi
$M_p$	: Plastik moment değeri
$N$	: Normal kuvvet, Binanın kat sayısı
$N_d$	: Tasarım aksenal kuvveti
$N_{gd}$	: Tasarım aksenal kuvvetinin kalıcı yükten kaynaklanan bölümü
$N_k$	: Kolon burkulma yükü
$n$	: Hareketli yük katılım katsayısı
$P_{1,2,3}$	: Yük parametresi
$P_G$	: Göçme yükü
$P_i$	: İşletme yükü
$P_L$	: Limit yük (birinci mertebe limit yük)
$Q$	: Hareketli yükler
$r$	: Etki/Kapasite oranı
$R$	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
$R_a(T)$	: Deprem yükü azaltma katsayısı
$R_m$	: Sünme katsayısı
$R_{y,1}$	: Birinci moda ait dayanım azaltma katsayısı
$S_a$	: Spektral ivme
$S_{ae,1}$	: Lineer elastik spektral ivme
$S_d$	: Spektral yer değiştirme
$S_{de,1}$	: Lineer elastik spektral yer değiştirme
$S_{di,1}$	: Nonlineer spektral yer değiştirme
$S(T)$	: Spektrum katsayısı
$T_1$	: Başlangıç periyodu
$T_e$	: Sistemin etkin doğal periyodu
$T_i$	: Hesap yapılan doğrultudaki elastik doğal periyodu
$T$	: Bina doğal titreşim periyodu, Kesme kuvveti
$T_A, T_B$	: Spektrum karakteristik periyotları
$u_{xN1}^{(i)}$	: Binanın tepesinde x deprem doğrultusunda (i)' inci itme adımı sonunda elde edilen birinci moda ait yer değiştirme
$u_{xN1}^{(p)}$	: Binanın tepesinde x deprem doğrultusunda tepe yer değiştirme istemi
$V_d$	: Tasarım kesme kuvveti
$V_{gd}$	: Tasarım kesme kuvvetinin kalıcı yükten kaynaklanan bölümü
$V_t$	: Toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti)
$V_e$	: Kesme kuvveti
$V_r$	: Kesme kuvveti kapasitesi
$t$	: Kesite etkiyen düzgün sıcaklık değişimi
$W$	: Bina toplam ağırlığı



$w_i$	: Hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak bulunan kat ağırlığı
$w_B$	: İvme spektrumundaki $T_B$ karakteristik periyoduna karşı gelen doğal açısal frekans
$\alpha_1$	: Modal kütle katsayısı
$\alpha_t$	: Sıcaklık genleşme katsayısı
$\beta$	: Kolonların bireysel moment büyütme katsayısı
$\beta_s$	: Tüm kattaki kolonlar için moment büyütme katsayısı
$\chi$	: Birim dönme(eğrilik)
$\chi_p$	: Kesitin eğilme momenti taşıma gücüne karşı gelen birim dönme
$\Delta_i$	: Göreli kat ötelemesi
$\Delta t$	: Kesite etkiyen farklı sıcaklık değişimi
$\delta$	: Yer Değiştirme
$\delta_{maks}$	: Yapının tepe noktasının yatay yer değiştirmesi
$(\delta_i)_{max}$	: Göreli kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri
$\delta_t$	: Hedef yer değiştirme
$\epsilon$	: Birim boy değişmesi
$\epsilon_{cu}$	: Beton ezilme birim kısalması
$\epsilon_c$	: Beton birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_y$	: Beton akma şekil değiştirmesi
$\epsilon_s$	: Donatı çeliği birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_{su}$	: Donatı çeliğinin kopma uzaması
$\phi_y$	: Çekme noktasının akmaya başlamasına karşılık gelen eğrilik
$\phi_u$	: Güç tükenmesine karşı gelen toplam eğrilik
$\Phi_p$	: Plastik eğrilik istemi
$\Phi_t$	: Toplam eğrilik istemi
$\Phi_y$	: Eşdeğer akma eğriliği
$\Phi_{xN1}$	: Binanın tepesinde x deprem doğrultusunda birinci moda ait mod şekli genliği
$\Gamma_{x1}$	: x deprem doğrultusunda birinci moda ait katkı çarpanı
$\theta_p$	: Plastik mafsal dönmesi
$\text{maks}\phi_p$	: Plastik mafsalın dönme kapasitesi
$\mu$	: Kesitin eğilme sünekliği
$\eta_{bi}$	: i' inci katta tanımlanan burulma düzensizliği katsayısı
$\lambda$	: Eşdeğer deprem yükü azaltma katsayısı
$\rho$	: Çekme donatısı oranı
$\rho'$	: Basınç donatısı oranı
$\rho_b$	: Dengeli donatı oranı
$\sigma_e$	: Beton akma gerilmesi
$\sigma_k$	: Beton kopma gerilmesi
$\omega^{(1)}_1$	: Başlangıçtaki itme adımında birinci titreşim moduna ait doğal açısal frekans
$\omega_B$	: İvme spektrumundaki $T_B$ karakteristik periyoduna karşı gelen doğal açısal frekans



# TEK KATLI BETONARME PREFABRİKE ENDÜSTRİ YAPILARININ PERFORMANS ANALİZİ

## ÖZET

Ülkemizin büyük bir bölümü deprem kuşağı altında bulunmakta, bu nedenle depreme dayanıklı yapı tasarımı önem kazanmaktadır. İnşaat süresinin kısalığı, alternatif yapı sistemleri ile kıyaslandığında ekonomikliği, büyük açıklıkların geçilmesine olanak vermesi gibi nedenlerle özellikle sanayi yapılarında prefabrike yapılar tercih edilmektedir. Bu çalışmada tek katlı, kolonları temelde ankastre betonarme prefabrike endüstri yapılarını temsil etmek üzere seçilen iki ayrı çerçeve sistemin doğrusal olmayan davranışları incelenmiş ve performans düzeylerinin belirlenmesi amacıyla sayısal incelemelere yer verilmiştir.

Bu çalışma toplam altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde konunun açıklanması, amacı ve kapsamı hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, betonarme prefabrike yapılar tanımlanarak taşıyıcı sistemlerine göre sınıflandırılmakta ve bu yapıların tasarımını etkileyen faktörler gözden geçirilmektedir. Özellikle bu çalışmada ele alınan, tek katlı, kolonları temelde ankastre, kırıklı çerçeve sistemler tanıtılmış ve bu sistemlerin 2007 Türk Deprem Yönetmeliği doğrultusunda deprem hesabı açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, betonarme yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışı incelenmektedir. Bu bölümde, malzeme bakımından doğrusal olmayan betonarme sistemlerin iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntıları verilmiştir. Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin belirli kesitlerde toplandığı varsayımına dayanan plastik mafsallı hipotezi ve bu hipotezi esas alan hesap yöntemi açıklanmıştır.

Dördüncü bölüm, yapı sistemlerinin performansa dayalı tasarımına ayrılmıştır. Performans hedefinin tanımı yapılarak performans seviyeleri ve aralıkları açıklanmıştır. Yapıların deprem etkileri altında performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlerden 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve FEMA 356'da yer alan Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemine yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, betonarme prefabrike endüstri yapılarını temsil etmek üzere seçilen, iki ayrı çerçeve tipinde sistemin deprem etkileri altındaki doğrusal olmayan davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Yapı sistemlerinden kırıklı çerçeve şeklindeki prefabrike endüstri yapısı 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine uygun olarak boyutlandırılmıştır. Deprem etkileri altındaki performansları, 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan doğrusal elastik hesap yöntemlerinden, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinden Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve FEMA 356'da yer alan Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi ile belirlenmiştir. Diğer bir yapı sistemi olan kolonları üstten mafsallı

prefabrike endüstri yapısı 1998 Türk Deprem Yönetmeliğine uygun olarak boyutlandırılmış olup doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerine göre deprem performansları belirlenmiştir.

Altıncı bölümde, bu tez kapsamında varılan sonuçları içermektedir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi bu bölümde sunulmuştur.

Çalışmanın sayısal incelemelerinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1- Kırıklı çerçeve tipinde çerçeve doğrultusunda şekil değiştirme enerjisi yutan daha çok kesit bulunmaktadır. Bu nedenle çerçeve doğrultusundaki performansı kesit boyutu daha küçük olduğu halde diğer tipten daha iyi bulunmuştur.
- 2- Deprem Yönetmeliğine göre tasarımı yapılan her iki tip betonarme prefabrike endüstri yapısının can güvenliği performans düzeyini sağladığı görülmüştür.

# **SEISMIC PERFORMANCE INVESTIGATION OF ONE STORY REINFORCED CONCRETE PREFABRICATED INDUSTRIAL STRUCTURES**

## **SUMMARY**

A large proportion of our country is under the seismic zone, so it is important to design earthquake resistant structures. Reinforced concrete prefabricated structural systems are preferred depending on their short duration, economic advantages. Also, reinforced concrete prefabricated structural systems allow constructing large span frames. In this study, the nonlinear behavior of one-story, reinforced concrete prefabricated industrial structural systems, with columns fixed at the bottom, is examined under two different frame systems and numerical examinations are given to determine performance ranges.

This study is composed of six chapters. The first chapter is explained the information of the subject, purpose and the scope of the work.

In the second chapter, the reinforced concrete prefabricated structures are introduced and classified and factors affecting the design of this type of structures are reviewed. Especially, one-story, columns are fixed at the bottom, with a lambda systems are introduced and the calculation of these systems using the Turkish Seismic Code 2007, is explained.

In the third chapter, the nonlinear behavior of reinforced concrete structures is investigated. The internal force-deformation relationships for materially nonlinear reinforced concrete sections are studied. The plastic hinge hypothesis which assumes concentrated nonlinear deformations and the analysis method based on this hypothesis is explained.

The fourth chapter is devoted to the performance based design and evaluation of structural systems. The performance objective, performance levels and ranges are defined. The Incremental Equivalent Seismic Load Method, defined in Turkish Seismic Code 2007 and Displacement Coefficient Method, defined in FEMA 356, which are linear and nonlinear elastic methods used in structures performances under seismic effects, are presented.

In the fifth chapter, the two different types of frames, which represent the reinforced concrete prefabricated structural systems, are investigated to declare the nonlinear behavior of the systems under seismic effects. First, one of the structural system, lambda shaped prefabricated structural system, is designed according to Turkish Seismic Code 2007. The performances under seismic effects are determined by using one of the linear elastic calculation methods, Equivalent Seismic Load Method and one of the nonlinear elastic calculation methods, The Incremental Equivalent Seismic Load Method in Turkish Seismic Code 2007 and Displacement Coefficient Method,

presented in FEMA 356. Also, another prefabricated structural system with columns hinged at the top, is designed using Turkish Seismic Code 1998 and its seismic performance is determined by linear elastic and nonlinear elastic calculation method.

The sixth chapter includes the results of these studies. The assessment of the study results are presented in this chapter.

The results obtained numerical calculations of this study can be as follows:

- 1- There are more sections that are absorbed deformation energy in direction of frame, those types are lambda. So, its performance in direction of frame is found better than other types although its section is smaller.
- 2- The two different types of frames, which are designed according to Seismic Code and represent reinforced concrete prefabricated industrial structure, are reviewed that they provide life safety level.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Konu

Betonarme prefabrike elemanlar, fabrika, atölye v.b. yerlerde hazırlanmış kalıplarda seri olarak üretilen, inşaat yerinde montajı yapılan ve özel olarak projelendirilen hazır yapı elemanlarıdır. Betonarme prefabrike elemanlar kullanılarak, çok farklı fonksiyonlar gören binaları kısa sürede ve ekonomik olarak inşa etmek mümkündür. Prefabrike inşaatın tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında betonun uzun ömürlü, yangın, korozyon ve sıcaklık değişimine dayanıklı olması, fabrika ortamında hazırlanan taşıyıcı elemanların yüksek kalitede üretilebilmeleri ve özellikle kısa zamanda gerçekleştirilmesi gibi birçok faktörler sayılabilir.

Ülkemizin büyük bir bölümünün deprem kuşağı altında bulunması dolayısıyla yapıların depreme dayanıklı ve gerçeğe yakın olarak tasarımı gereklidir. Yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının belirlenmesinde ana etken olan hasar durumları en gerçekçi olarak şekil değiştirmelerle ifade edilebilmektedir. Doğrusal olmayan teoriyi esas alan hesap yöntemlerinden yararlanarak, yapı sistemlerinin dış yükler ve deprem yükleri altındaki davranışları daha gerçekçi olarak belirlenebilmektedir.

Deprem yönetmeliğine göre yapıların deprem etkileri altında performanslarının değerlendirmesi genel olarak iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Bunlar doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlerdir.

Doğrusal elastik değerlendirme yöntemi, yapı elemanlarının taşıma kapasitelerinin sistem üzerindeki yüklerin oluşturduğu iç kuvvetlerle karşılaştırılarak eleman bazında bir tür deprem azaltma katsayısı çerçevesinde yapılan değerlendirmedir.

Doğrusal olmayan değerlendirme yöntemi, şekil değiştirmeye dayanan değerlendirmenin esas alındığı, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistem hesabına dayanan ve genellikle belirli bir deprem etkisi

altında belirli kesitlerde plastik mafsal oluşumu esasına göre yapılan bir değerlendirmedir.

## **1.2 Konu ile İlgili Çalışmalar**

Yapı sistemlerinin deprem performanslarının belirlenmesinde doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılmaktadır. Özellikle doğrusal olmayan davranış esaslı yöntemler üzerindeki çalışmalar uzun yıllara dayanmaktadır, [1-3]. Bu yöntemlerin geliştirilmesine paralel olarak, doğrusal olmayan kurama dayanan pratik ve etkin bilgisayar programları da giderek gelişmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır,[4-6].

Yer değiştirme ve şekil değiştirmelere bağlı performans kriterlerini esas alan yapısal değerlendirme ve tasarım kavramı özellikle son yıllarda Amerika Birleşik Devletlerinin deprem bölgelerindeki mevcut yapıların deprem güvenliklerinin daha gerçekçi olarak belirlenmesi ve yeterli güvenlikte olmayan yapıların güçlendirilmeleri çalışmaları sırasında ortaya konulmuş ve geliştirilmiştir.

Bu kapsamda, Applied Technology Council (ATC ) tarafından Guidelines and Commertary for Seismic Rehabilitation of Buildings – ATC40 projesi [7] ve Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings – FEMA 273 ve FEMA 356 [8, 9] yayınları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu çalışmaların geliştirilmesi amacıyla ATC55 projesi yürütülmüş ve projenin bulgularını içeren FEMA 440 [10] taslak raporu hazırlanmıştır. Bu projelere ek olarak, 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 projelerde bu alandaki araştırmalara katkı sağlamaktadır. Bu projeler ve yayınlar ile deprem bölgelerinde yer alan mevcut yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve yeni inşa edilecek binaların performansa dayalı tasarımı mümkün olmaktadır.

Mevcut yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi, son yıllarda meydana gelen depremler sonrasında ülkemizde de giderek önem kazanmış ve bir gereksinim haline gelmiştir. Nitekim bu gereksinime cevap vermek amacıyla mevcut binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar yürütülmüş ve bu çalışmaların sonucunda 2007 Türk Deprem Yönetmeliği [11] hazırlanmıştır.



### 1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez kapsamında, tek katlı, kolonları alttan ankastre betonarme prefabrike endüstri yapılarını temsil etmek üzere seçilen iki ayrı çerçeve tipinin deprem performanslarının doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmesi üzerine ayrıntılı bir sayısal inceleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu amaca yönelik olarak, yöntemlerin anlaşılması ve kolay uygulanabilmesi açısından 2007 Türk Deprem Yönetmeliği [11] esaslarına ve yer değiştirme kriterlerine göre boyutlandırılmış betonarme prefabrike bir kırıklı çerçeve taşıyıcı sistem modeli ile mevcut betonarme prefabrike binaları temsil etmek üzere 1998 Türk Deprem Yönetmeliği [12] esaslarına ve yer değiştirme kriterlerine göre boyutlandırılmış kolonları üstten mafsallı betonarme prefabrike çerçeve taşıyıcı sistem modeli üzerinde sayısal incelemeler yapılmıştır, [13].

Çalışmada izlenen yol aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- 1) Betonarme prefabrike sistemlerin tanıtılması.
- 2) Malzeme bakımından doğrusal olmayan sistemlerin hesap yöntemlerinin incelenmesi.
- 3) Yapı sistemlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan performansa dayalı tasarımı ve değerlendirilmesine yönelik yöntemlerin açıklanması.
- 4) Betonarme prefabrike endüstri yapılarını temsil eden iki ayrı çerçeve taşıyıcı sistem modeli üzerinde sayısal incelemelerin yapılması ve performanslarının belirlenmesi.
- 5) Elde edilen sayısal sonuçların değerlendirilmesi.



## **2. BETONARME PREFABRİKE YAPILAR**

### **2.1 Giriş**

Kullanım amacına göre dayanım, görünüm, uygunluk, süre ve bakım yönlerinden olağan koşullara yeterli şekilde yanıt verebilecek bir yapım sistemi meydana getirmek üzere, elemanların fabrika, atölye v.b. yerlerde modern endüstriyel yöntemlerle seri halde imal edilen yapı türleri prefabrikasyon olarak adlandırılır.

#### **2.1.1 Prefabrike yapıların sınıflandırılması**

Prefabrike yapılar taşıyıcı sistemlerine göre panolu ve çerçeveli sistemler olarak iki ana gruba ayrılırlar. Daha ayrıntılı bir sınıflandırma ile [14];

- a. Çerçeve Sistemler
- b. Panolu Sistemler
- c. Hücre Sistemler
- d. Karma Sistemler

#### **a. Çerçeve Sistemler**

Bu tür sistemlerde düşey yükler kiriş ve kolonlar tarafından, yatay yükler kolonlar veya yerinde dökme perde veya prefabrike perdeler tarafından taşınır. Bu tür sistemlerin kullanım alanı oldukça geniş olmasına rağmen ülkemizde genelde bölme duvar kullanılmayan veya bölme duvarların taşıyıcı olarak kullanılmadığı endüstri yapıları, depo, hangar türü yapılarda kullanılmaktadır.

Çerçeve sistemler, kolon-kiriş ve kolon-döşeme sistemleri olmak üzere iki farklı şekilde imal edilirler.

#### **a.1 Kolon-kiriş sistemleri**

Prefabrike kolon-kiriş çerçeve sistemleri konut türü yapılarda ve özellikle az sayıda bölme duvar isteyen ofis ve endüstri yapılarında kullanılırlar. Sistemin ana öğeleri

taşıyıcı düşey kolon ve yatay kirişlerdir. Çerçeve sistemlerin kolon-kiriş birleşimleri rijit ve mafsalı olmak üzere iki türlü yapılabilmektedir. Rijit birleşim bölgelerinin uygun yerlerde, örneğin kolonlarda katların orta noktalarında, kirişlerde ise deprem momentinin daha fazla olduğu mesnet bölgelerinin dışında yapılması tercih edilebilmektedir.

**Rijit bağlantılar:** Hareketli yüklerin ve deprem kuvvetlerinin etkin olduğu sistemlerde, çerçeveleri oluşturan kolon ve kirişlerin birbirlerine rijit olarak bağlanmaları uygun olmaktadır. Birleşim noktalarının bu kesitlerdeki normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momentini aktarmaları kuru birleşim, ıslak birleşim veya ardgerme ile sağlanmaktadır. Mafsalı bağlantılar ile karşılaştırıldığında, rijit bağlantıların montaj hızı daha düşük, buna karşılık yapı elemanlarındaki donatı gereksinimi daha azdır. Büyük açıklıklı, yüksek binalarda kolon yüksekliği boyunca rijit bağlantılar yapmak ve açıklık boyunca kirişlere öngerme uygulamak avantajlıdır. Bu sistemlerde maksimum açıklık 30m.ye kadar çıkabilmekte, yükseklik ise montajda kullanılacak krenin taşıma kapasitesine bağlı olarak değişmektedir, [14].

**Mafsalı bağlantılar:** Düşey yüklerin deprem kuvvetlerinden daha etkin olduğu ve deprem etkilerinin diğer yatay yük taşıyıcı elemanlar tarafından karşılandığı durumlarda veya tek katlı endüstri yapılarında bu tür birleşimlerin kullanılması uygundur. Bu birleşimler genellikle maksimum açıklığın ~25m. yüksekliğin ~10m. kren taşıma kapasitesinin ~15t olduğu yapılarda uygulanmaktadır. Sistem iki veya üç mafsalı çerçevelerden oluşturulabilir. Dik çatı eğimi öngörülen binalarda, yüksek yapılarda veya zemin cinsinin gerektirdiği durumlarda iç kuvvetlerin uygun bir şekilde dağılımını sağlamak için üç mafsalı çerçevelerin kullanılması yararlı olmaktadır.

## **a.2 Kolon-döşeme sistemleri**

Bu tür sistemlerde döşemeler doğrudan doğruya kolonlar üzerine mesnetlenmektedir. Deprem kuvvetlerinin karşılanmasında tek başına yetersiz kalan bu sistemler, yerinde dökme betonarme veya prefabrik perdelerle güçlendirilerek ve döşemelerde diyafram etkisi sağlanarak yanal yüklere karşı rijitleştirilirler. Kolon-döşeme sistemlerinin inşaatında özel yapım teknikleri kullanılmaktadır.

## **b. Panolu Sistemler**

Bu tür sistemler daha çok konut türü yapılarda kullanılırlar. Sistemin ana elemanları taşıyıcı duvar panelleridir. Paneller yükleri yüzeyleri boyunca taşırlar. Panolu sistemler çok katlı prefabrike binaların yapımında daha çok tercih edilirler. Bunun sebebi taşıyıcı sistemin oluşturulması ile birlikte cephelerin ve iç bölmelerin büyük bölümünün de tamamlanması ve döşeme panoları ile taşıyıcı duvar elemanlarının benzer nitelikte olması nedeniyle hızlı ve ekonomik bir seçenektir. Yatay döşeme elemanları, tek veya çift doğrultuda çalışan pano elemanlarından oluşmakta, birbirleri ile uygun bir şekilde bağlandıklarında, diyafram gibi davranmakta ve düşey yüklerin aktarılmasını da sağlamaktadır. Bu sistemler panoların yerleşim düzenine göre üç farklı tipte uygulanmaktadırlar:

### **b.1 Enine duvarlı sistemler**

Bu sistemler, yapının kısa doğrultusundaki boşluklu veya boşluksuz panolardan oluşmaktadır. Bu panolar tek doğrultuda yük taşıyan döşeme panellerine mesnet oluşturmakta, düşey yüklerin ve kısa doğrultudaki deprem kuvvetlerinin de karşılanmasını sağlamaktadır. Yapının uzun doğrultusuna paralel olarak düzenlenen panolarla elde edilen taşıyıcı duvarlar sadece yatay yükleri alabilmektedir.

### **b.2 Boyuna duvarlı sistemler**

Yapının uzun doğrultusuna paralel olarak düzenlenen panolar, döşeme panellerinden aktarılan düşey yükleri ve deprem kuvvetlerini taşımaktadır. Buna dik doğrultudaki duvarlar ise sadece yatay yüklerin etkisi altındadır.

### **b.3 İki doğrultuda duvarlı sistemler**

Bu sistemlerde, duvarlar yapının uzun doğrultusuna paralel ve ona dik doğrultuda düzenlenerek, her iki doğrultuda yük taşıyan döşeme elemanlarından aktarılan düşey yükleri ve kendi doğrultularındaki deprem kuvvetlerini taşımaktadırlar.

Panolu sistemlerde, birleşim doğrultusuna bağlı olarak, iki şekilde bağlantı yapılabilmektedir:

**Yatay birleşim:** Komşu duvar ve döşeme elemanlarının yatay olarak birleştirildiği, öncelikle üst panodan ve döşemeden gelen normal kuvvetlerin ve deprem

kuvvetlerinden oluşan eğilme momenti ve kesme kuvvetlerinin her iki doğrultudaki etkileri altında olan yatay bağlantı çizgileridir.

**Düşey birleşim:** Deprem kuvvetlerinin panolar arasındaki iletişiminden kaynaklanan düşey kesme kuvveti etkisi altındaki komşu duvar panolarının kesiştiği düşey bağlantı çizgileridir.

Bu birleşimler ıslak ve kuru olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır:

Islak birleşimlerde prefabrike panolar yerinde dökme beton ile birbirine bağlanmaktadır. Yapısal süreklilik gerekiyorsa birleşim bölgeleri donatılarak, elemanların donatıları kaynatılarak, vidalanarak veya uygun şekilde düzenlenerek betonlanmaktadır. Kuru birleşimlerde panolar arasındaki kuvvet aktarımı, çelik bağlantıların yapıldığı noktalarda sağlanmakta, dolayısıyla bu noktalarda gerilme yığılması oluşabilmektedir. Islak birleşimler monolitik yapıya yakın davranış gösterirken, kuru birleşimlerin montajı hızlı ve daha kolay olmaktadır, [14].

### **c. Hücre Sistemler**

Prefabrikasyonun en ileri aşamalarından olan hücre (kutu) sistemlerde taşıyıcı panel ve döşeme elemanlarını ayrı üretilip şantiyede birleştirmek yerine monolitik olarak oluşturulan hücrelerin şantiyede birleştirilmesi esasına dayanır. Böylece çalışmalar çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilir.

Hücre sistemlerde oda boyutunda üretilmiş hücreler üst üste ve yan yana yerleştirilirler ve beraber çalışmalarını için özel detaylarla birbirlerine bağlanırlar. Bu tip hücrelerin ağırlıkları 7 t – 50 t arasında değişirler. Hücre sistemler diğer prefabrike elemanlara göre daha ağır olduklarından nakliye ve kaldırma problemleri olabilmektedir. Bu yüzden hücre sistemlerin tasarımında oldukça dikkatli davranılmalıdır.

### **d. Karma Sistemler**

Yukarıda açıklanan sistemlerin çeşitli kombinasyonlarının bir arada kullanılmasıyla karma sistemler elde edilmektedir. Dış duvarları taşıyıcı panellerden, iç taşıyıcı sistemi kolon, kiriş ve döşemelerden, mutfak, banyo gibi tesisat içeren ıslak mekanları veya merdiven boşluğu, asansör yuvası v.b. gibi çekirdek oluşturacak mekanları hücrelerden oluşan karma sistemler yapılabilmektedir. Bu tür yapılarda çok farklı ağırlıklardaki elemanların taşınıp kaldırılması gerektiğinden, farklı

kapasitelerde birden fazla vinç, kalifiye şantiye kadrosu ve üst düzeyde eşgüdüm sağlayacak bir planlama gereklidir. Karma sistemler ile yapılan yapılarda, ana taşıyıcı karkas sistemle oluşturulmuş, özellikle kolonları parçalı olan bir yapıya yanal stabilite ve rijitlik kazandırılacağı gibi, aynı tipte çok sayıda binanın hızla ve uygun maliyetle bitirilmesini öngören bir yaklaşım da gerçekleştirilebilmektedir.

## **2.2 Betonarme Prefabrike Endüstri Yapıları**

Finansman ve detayları önceden çözümlenmiş olduğu için endüstriyel bina karkas elemanlarının prefabrikasyon sistemleri ile imal edilmeleri yaygındır. Bu elemanlar ön gerilimli veya normal betonarme olarak imal edilerek iş yerine nakledilmekte ve montajları yapılmaktadır.

Ülkemizde endüstri türü yapılar bağlantı noktaları mafsallı olanlar ağırlıklı olmak üzere;

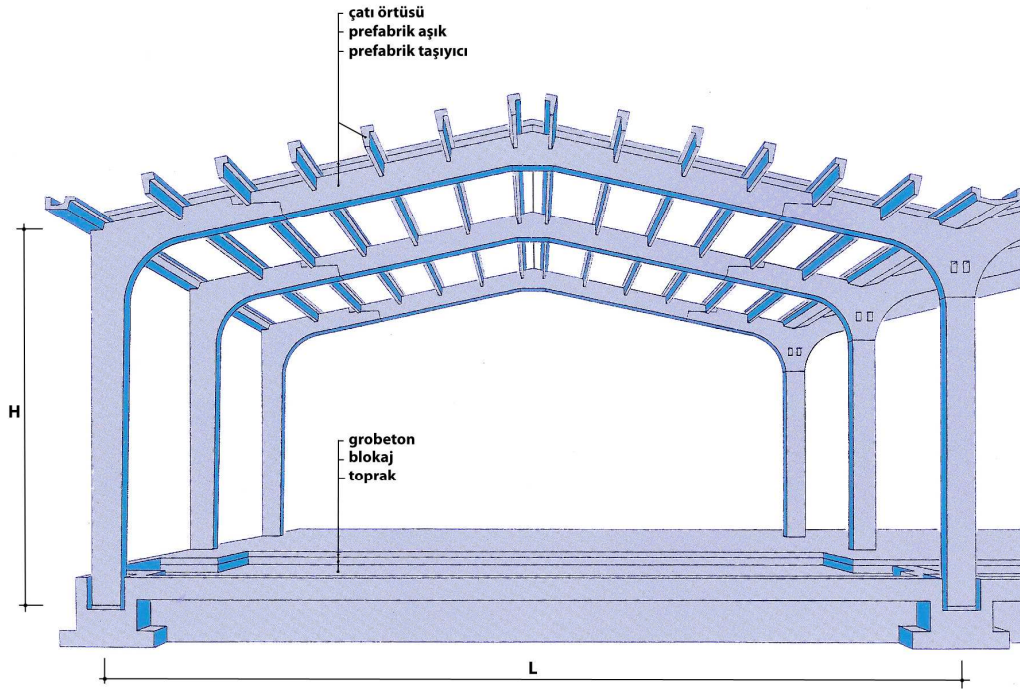
- 1) Prefabrike mafsallı çerçeveler
- 2) Moment aktarabilen bağlantılara sahip prefabrike çerçeveler

şeklinde iki grupta toplanabilir. Kolonlar genelde yerinde dökme bir soket temele oturmakta ve montaj boşluğu harçla doldurulmaktadır.

Bu çalışmada incelenecek olan prefabrike endüstri yapısı düşey ve kırıklı çubukların statikçe uygun bir noktadan birleştirilmesi ile oluşturulan kırıklı çerçeve (Lambda) sistemidir. Bu sistemin genel özellikleri şu şekildedir;

- 1) Çatı eğimi %20'dir.
- 2) Açıklıklar uygulamada 15m.~ 22m. arasında değişmektedir.
- 3) Aks aralıkları 6m.~10m. arasında değişmektedir.

Sistemi oluşturan prefabrike elemanlar Şekil 2.1’de görülmektedir.



**Şekil 2.1 : Kırıklı çerçeve sistemi**

Sistem hesap edildikten sonra momentin yaklaşık olarak sıfır olduğu yerlerde kolon inceltilmiş ucu ile tepe elemanının inceltilmiş ucu birbirlerinin üzerine oturtularak bağlanmaktadır. Göz önüne alınan sistemde tepe elemanı ile kolon üst ucundan çıkan eğik kısmın birleşim uzunluğu 80 cm. olup iki elemanın birleşimi iki adet yüksek mukavemetli bulonla sağlanmakta ve bulonlar yeteri bir tork ile sıkılmaktadır. Bu birleşim yerinde eleman sürekliliğinde bir zayıflama oluşacağı açıktır. Buna paralel olarak yapılan sayısal ve deneysel incelemeler birleşim uzunluğunun toplam 1.7 katı (~1.40 m.) kadar bölgede atalet momentinin 0.25 katı (genişliğinin 4’ te 1) alınmak suretiyle sistemin sürekli gibi çözülebileceği gösterilmiştir, [15]. Sonuç olarak birleşim bölgesinde yapılan bu zayıflatma ile sistem sürekli bir çerçeve olarak çözülebilmektedir.



### 2.2.1 Betonarme prefabrike yapıların tasarımında dikkate alınan hususlar

Özellikle endüstri binası olarak kullanılması amaçlanan betonarme prefabrike yapıların tasarımında göz önünde tutulması gereken veriler ve diğer hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir, [16]:

- 1) Bina açıklığı ve çatı kirişi açıklığı
- 2) Çatı eğimi
- 3) Endüstriyel gereksinimler (kren sayısı ve kapasitesi )
- 4) Yapısal olabilirlik
- 5) Zemin durumu
- 6) Deprem bölgesi
- 7) Prefabrik bileşenlerin üretimi, taşınması ve montajı
- 8) Gün ışığından faydalanma (fenerli, fenersiz çatı sistemi)

### 2.2.2 2007 Türk deprem yönetmeliğine göre tasarım

Deprem etkisi altındaki bina türü yapıların taşıyıcı sisteminde boyutlamaya esas olacak kesit etkilerinin bulunmasında üç farklı çözümlenme yöntemi vardır. Bu yöntemler [11];

- 1) Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi
- 2) Mod Birleştirme Yöntemi
- 3) Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Bu yöntemlerden uygulanması basit olan ‘Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi’ taşıyıcı sistemi düzenli veya düzensizliği fazla olmayan yapılarda, yapının birinci temel modunu esas alarak deprem yüklerini hesaplayan yaklaşımdır.

Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi yönetmelikte ana hatlarıyla şu şekilde verilmektedir. Göz önüne alınan deprem doğrultusunda tasarıma esas olan ‘Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü (Taban Kesme Kuvveti)’  $V_t$ ;

$$V_t = W \cdot A(T_1) / R_a(T_1) \geq 0.10 A_0 I \cdot W \quad (2.1)$$

$$W = \sum_{i=1}^N w_i \quad : \text{Bina toplam ağırlığı} \quad (2.2)$$

$$w_i = g_i + n.q_i \quad : \text{Hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak bulunan kat ağırlığı} \quad (2.3)$$

Deprem yüklerinin belirlenmesinde kullanılacak çatı katı ağırlığının hesabında kar yüklerinin %30'u göz önüne alınacaktır.

$$A(T_1) = A_0 . I . S(T_1) \quad : \text{spektral ivme katsayısı} \quad (2.4)$$

Spektrum katsayısı, S(T), yerel zemin koşullarına ve bina doğal periyodu T' ye bağlı olarak aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesap edilir.

$$S(T_1) = 1 + 1,5T/T_A \quad 0 \leq T \leq T_A \quad (2.5a)$$

$$S(T_1) = 2,5 \quad T_A \leq T \leq T_B \quad (2.5b)$$

$$S(T_1) = 2,5 . (T_B/T)^{0,8} \quad T > T_B \quad (2.5c)$$

Deprem yükü azaltma katsayısı  $R_a(T)$ , çeşitli taşıyıcı sistemler için tanımlanan taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R' ye ve doğal titreşim periyodu T' ye bağlı olarak aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesap edilir.

$$R_a(T) = 1,5 + (R - 1,5)T/T_A \quad 0 \leq T \leq T_A \quad (2.6a)$$

$$R_a(T) = R \quad T > T_A \quad (2.6b)$$

Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, R, taşıyıcı sistemin türüne ve süneklik düzeyine bağlı olarak belirlenir. Yapı sistemleri süneklik düzeyi yüksek ve normal taşıyıcı sistemler olarak sınıflandırılır. Bina taşıyıcı sisteminin yerinde dökme betonarme, prefabrike betonarme ve çelik olması hallerine karşı gelen R katsayıları TDY'07 de ayrıntılı olarak tablolaştırılmıştır. Bu çalışmanın konusunu oluşturan prefabrike betonarme sistemler için esas alınacak R katsayısı Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1 : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)**

<b>Bina Taşıyıcı Sistemi</b>	<b>Süneklik Düzeyi Normal Sistemler</b>	<b>Süneklik Düzeyi Yüksek Sistemler</b>
Deprem yüklerinin tamamının, bağlantıları tersinir momentleri aktarabilen çerçevelerle taşındığı binalar	3	7
Deprem yüklerinin tamamının, üstteki bağlantıları mafsallı kolonlar tarafından taşındığı tek katlı binalar	-	3
Deprem yüklerinin tamamının prefabrike veya yerinde dökme boşluksuz ve/veya bağ kirişli (boşluklu) perdelerle taşındığı, çerçeve bağlantıları mafsallı olan prefabrike binalar	-	5
Deprem yüklerinin, bağlantıları tersinir momentleri aktarabilen prefabrike çerçeveler ile yerinde dökme boşluksuz ve/veya bağ kirişli (boşluklu) perdeler tarafından birlikte taşındığı binalar	3	6

2007 Türk Deprem Yönetmeliğinde yer değiştirmeler herhangi bir kolon veya perde için, ardışık iki kat arasındaki yer değiştirme farkını ifade eden azaltılmış görelî kat ötelenmesi,  $\Delta_i$ , Denk.(2.7) ile elde edilir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (2.7)$$

Denk.(2.7)'de tanımlanan görelî kat ötelemelerinin sınırlandırılmasında esas alınacak,  $\delta_i$ , büyüklüğü Denk.(2.8) ile elde edilmektedir.

$$\delta_i = R.\Delta_i \quad (2.8)$$

Her bir deprem doğrultusu için hesaplanan,  $\delta_i$ , etkin görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri,  $(\delta_i)_{\max}$  için Denk.(2.9)'daki koşulu sağlayacak şekilde sınırlandırılmıştır.

$$\frac{(\delta_i)_{\max}}{h_i} \leq 0,02 \quad (2.9)$$



### 3. YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI

#### 3.1 Doğrusal Olmayan Yönteme Giriş

Bazı özel durumların dışında, yapı sistemleri işletme yükleri altında genellikle doğrusal davranış gösterirler. İşletme yükleri altında doğrusal olmayan yapı sistemleri arasında narin yapılar ve elastik zemine oturan sistemler ile bölgesel zayıflıklar ve stabilite yetersizlikleri içeren yapılar sayılabilir.

Doğrusal sistem davranışını esas alan analiz yöntemlerinde, malzemenin gerilme-şekil değiştirme bağıntıları (bünye denklemleri) doğrusal-elastik olarak alınmakta ve yer değiştirmelerin çok küçük olduğu varsayılmaktadır.

Buna karşılık, dış etkiler işletme yüklerini aşarak yapı sisteminin taşıma gücüne yaklaştıkça, gerilmeler doğrusal-elastik sınırı aşmakta ve yer değiştirmeler çok küçük varsayılamayacak değerler almaktadır.

Günümüzde yapı mühendisliğinde genellikle uygulanmakta olan ve sistem analizi bakımından doğrusal teoriye dayanan tasarım yaklaşımlarında (çelik yapıların güvenlik gerilmeleri esasına göre tasarımı ve betonarme yapıların taşıma gücü yöntemine göre tasarımı), yapı sisteminin doğrusal olmayan davranışı çeşitli şekillerde göz önüne alınmaya çalışılmaktadır. Örneğin, ikinci mertbe etkilerini hesaba katılması ve burkulmaya karşı yeterli bir güvenlik sağlanması amacıyla moment büyütme yönteminden ve burkulma katsayılarından yararlanılmakta, yapı sisteminin doğrusal olmayan şekil değiştirmesi nedeniyle iç kuvvet dağılımının değişmesi yeniden dağılım ilkesi yardımı ile göz önüne alınmaya çalışılmaktadır. Diğer taraftan, deprem etkilerine göre hesapta, malzemenin doğrusal-elastik sınır ötesindeki davranışını ve deprem enerjisinin söndürülmesini hesaba katmak üzere, taşıyıcı sistem davranış katsayısı tanımlanmakta ve elastik deprem yükleri bu katsayıya bağlı bir deprem yükü azaltma katsayısı ile bölünerek küçültülmektedir.

Yapı malzemelerinin doğrusal-elastik sınır ötesindeki taşıma kapasitesini göz önüne almak, çok küçük olmayan yer değiştirmelerin denge denklemlerine ve gerekli

olduğu hallerde geometrik uygunluk koşullarına etkilerini hesaba katmak suretiyle, yapı sistemlerinin dış etkiler altındaki davranışlarının daha yakından izlenebilmesi ve bunun sonucunda daha gerçekçi ve ekonomik çözümler elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Doğrusal olmayan sistem davranışını esas alan hesap yöntemlerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında genel olarak iki durumla karşılaşmaktadır. Bunlardan birincisi, yapı sisteminin doğrusal olmamasına neden olan etkenlerin belirlenerek, sistem davranışının gerçeğe yakın bir biçimde temsil eden bir hesap modelinin oluşturulması, diğeri ise bu hesap modelinin analizi sonucunda elde edilen doğrusal olmayan denklem sisteminin etkin bir şekilde çözülmesidir.

### **3.1.1 Çözümün sağlanması gereken koşullar**

Bir yapı sisteminin dış etkiler altında analizi ile elde edilen iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmelerin çözüm olabilmeleri için aşağıdaki üç koşulu bir arada sağlamaları gerekmektedir.

- 1- Bünye denklemleri:** Malzemenin cinsine ve özelliklerine bağlı olan gerilme-şekil değiştirme bağlantılarına bünye denklemleri denilmektedir.
- 2- Denge koşulları:** Sistemi oluşturan elemanların ve bu elemanların birleştiği düğüm noktalarının denge denklemlerinden oluşmaktadır.
- 3- Geometrik uygunluk koşulları:** Elemanların ve düğüm noktalarının geometrik süreklilik denklemleri ile mesnetlerdeki geometrik sınır koşullardır.

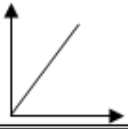
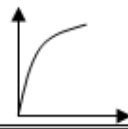
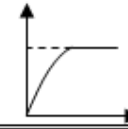
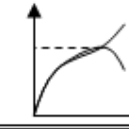
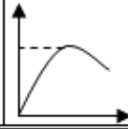
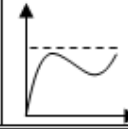
### **3.1.2 Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri**

Bir yapı sisteminin dış yükler altındaki davranışının doğrusal olmaması genel olarak iki temel nedenden kaynaklanmaktadır, [17].

- 1- Malzemenin doğrusal-elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekil değiştirme bağlantılarının (bünye denklemlerinin) doğrusal olmaması.
- 2- Geometri değişimlerinin yeter derecede küçük olmaması nedeniyle denge denklemlerinin (ve bazı hallerde geometrik süreklilik denklemlerinin) doğrusal olmaması.

Yapı sistemlerinin doğrusal olmamasına neden olan etkenler ve bu etkenleri göz önüne alan teoriler Çizelge 3.1’de topluca özetlenmiştir.

**Çizelge 3.1 : Yapı sistemlerinin doğrusal olmama nedenleri**

Çözümün Sağlanması 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 Değişirme Bağlılıkları)	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik <b>Değil</b>	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik <b>Değil</b>	Doğrusal Elastik <b>Değil</b>
Denge Denklemlerinde Yer Değişirmeler	Küçük	Küçük	Küçük <b>Değil</b>	Küçük <b>Değil</b>	Küçük <b>Değil</b>	Küçük <b>Değil</b>
Geometrik Uygunluk Koşullarında Yer Değişirmeler	Küçük	Küçük	Küçük	Küçük <b>Değil</b>	Küçük	Küçük <b>Değil</b>
P-δ Bağlılıkları						

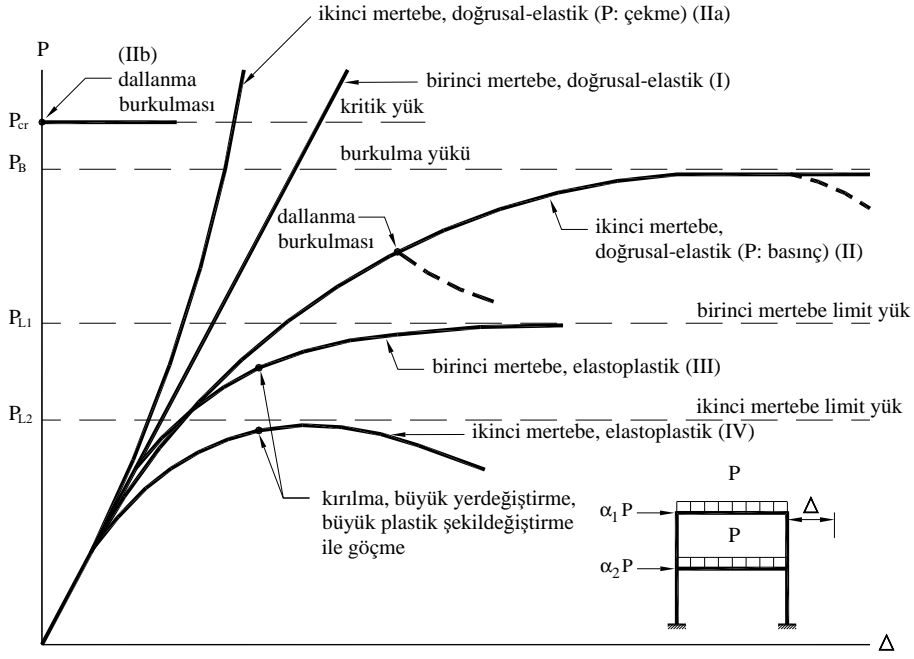
Denge denklemlerinde yer değiştirmelerin küçük olmadığı sistemlerde denge denklemleri Şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılmaktadır.

Geometrik uygunluk koşullarında yer değiştirmelerin küçük olmadığı sistemlerde ise, geometrik süreklilik denklemlerinin de Şekil değiştirmiş eksen üzerinde yazılması gerekmektedir.

### 3.1.3 Yapı sistemlerinin dış yükler altındaki doğrusal olmayan davranışı

Düşey ve yatay yükler etkisindeki bir yapı sisteminin doğrusal ve doğrusal olmayan teorilere göre hesabı ile elde edilen yük parametresi – yer değiştirme (P-Δ) bağlılıkları Şekil 3.1’de Şematik olarak gösterilmişlerdir.

Malzemenin sınırsız olarak doğrusal-elastik varsayıldığı bir yapı sisteminin, artan dış yükler altında, birinci mertebe teorisine göre elde edilen davranışı (I) doğrusu ile gösterilmektedir. Geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin, diğer bir deyişle, aksenal kuvvetlerin Şekil değiştirmiş sistem üzerinde oluşturduğu ikinci mertebe etkilerinin hesaba katıldığı ikinci mertebe teorisinde ise, aksenal kuvvetin basınç veya çekme olmasına göre farklı sistem davranışları ile karşılaşılabilmektedir.



**Şekil 3.1 :** Çeşitli teorilere göre yük parametresi -yer değıştirme bağıntıları

Örneğin aksel kuvvetin basınç olması halinde, (II) eğrisinden de görüldüğü gibi, artan dış yüklerle daha hızla artan yer değıştirmeler karşı gelmektedir. Dış yüklerin şiddetini ifade eden yük parametresi artarak doğrusal-elastik *burkulma yükü* adı verilen bir  $P_B$  değerine eşit olduğu zaman yer değıştirmeler artarak sonsuza erişir ve sistem burkularak göçer. Bazı özel durumlarda, burkulmadan sonra artan yer değıştirmelere azalan yük parametresi karşı gelebilir. Yanal yük etkisinde olmayan ve bu nedenle burkulmadan önce şekil değıştirmeyen sistemlerde, yük parametresinin bir  $P_{cr}$  değerinde dallanma burkulması oluşur ve şekildeki (IIb) diyagramından görüldüğü gibi, yer değıştirmeler birden artarak sonsuza erişir. Dallanma burkulmasına neden olan yüke *kritik yük* denilmektedir. Kritik yük genellikle burkulma yükünden biraz daha büyük veya ona eşittir. Dallanma burkulması, bazı hallerde burkulmadan önce şekil değıştiren sistemlerde de oluşabilir, (II eğrisi).

Doğrusal olmayan malzemenen yapılmış sistemlerde, artan dış yüklerle birlikte iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde doğrusal-elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolayında doğrusal olmayan (plastik) şekil değıştirmeler meydana gelmektedir. Doğrusal olmayan şekil değıştirmeler genel olarak sistem üzerinde sürekli olarak yayılmaktadır. Buna karşılık, taşıma kapasitesine karşı gelen toplam şekil değıştirmelerin doğrusal şekil değıştirmelere oranının büyük olduğu sünek malzemenen yapılmış sistemlerde, doğrusal olmayan şekil değıştirmelerin plastik



mafsal (veya genel anlamda plastik kesit) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bu kesitlerin dışındaki bölgelerde ise sistemin doğrusal-elastik davrandığı varsayılabilir. Bu varsayım plastik mafsal hipotezi olarak isimlendirilmektedir. Plastik mafsal hipotezinin esas alındığı bir yapı sisteminin birinci merteye teorisine göre hesabında (III eğrisi), oluşan plastik mafsallar nedeniyle sistemin tümünün veya bir bölümünün mekanizma durumuna gelmesi taşıma gücünün sona erdiğini gösterir. Bu yük *birinci merteye limit yük* adını alır.

Doğrusallığı bozan her iki etkinin birlikte göz önüne alınması halinde, diğer bir deyişle yapı sisteminin ikinci merteye elastoplastik teoriye göre hesabı ile elde edilen  $P-\Delta$  diyagramı şekilde (IV) eğrisi ile gösterilmiştir. Bu diyagram ilk kritik kesitte doğrusal-elastik sınırın aşılmasına kadar (II) eğrisini izlemekte, daha sonra oluşan lineer olmayan şekil değiştirmeler nedeniyle yer değiştirmeler daha hızlı olarak artmaktadır. Plastik mafsal hipotezinin esas alındığı yapı sistemlerinde, dış yükler artarak bir  $P_{L2}$  sınır değerine eşit olunca, meydana gelen plastik mafsallar nedeniyle rijitliği azalan sistemin burkulma yükü dış yük parametresinin altına düşer, yani  $P-\Delta$  diyagramında artan yer değiştirmelere azalan yükler karşı gelir. Sistemin stabilite yetersizliği nedeniyle taşıma gücünü yitirmesine sebep olan bu yük parametresine *ikinci merteye limit yük* denilmektedir.

Bazı hallerde, dış yükler limit yüke erişmeden önce, meydana gelen büyük yer değiştirmeler, büyük plastik şekil değiştirmeler ile betonarme sistemlerde oluşan çatlaklar ve kırılma yapının göçmesine neden olabilmektedir.

## **3.2 İç Kuvvet-Şekil Değiştirme Bağlılıları ve Akma (Kırılma) Koşulları**

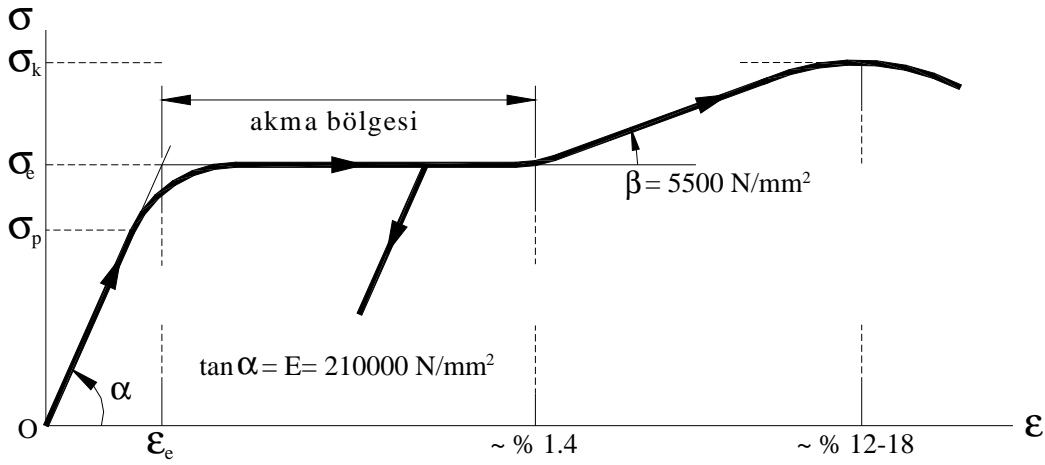
Aşağıda, çeşitli yapı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ile düzlem çubuk elemanlarda ve özellikle betonarme çubuklarda iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntıları ve akma (kırılma) koşulları incelenecektir.

### **3.2.1 Çeşitli yapı malzemelerinde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları**

Betonarme yapı elemanlarını oluşturan beton çeliği ve betonun gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma-\epsilon$ ) diyagramları ve bu diyagramlara ait bazı sayısal değerler aşağıda verilmiştir.

### 3.2.1.1 Beton çeliği

Beton çeliğinin gerilme-şekil değiştirme bağıntıları Şekil 3.2’te görülmektedir.

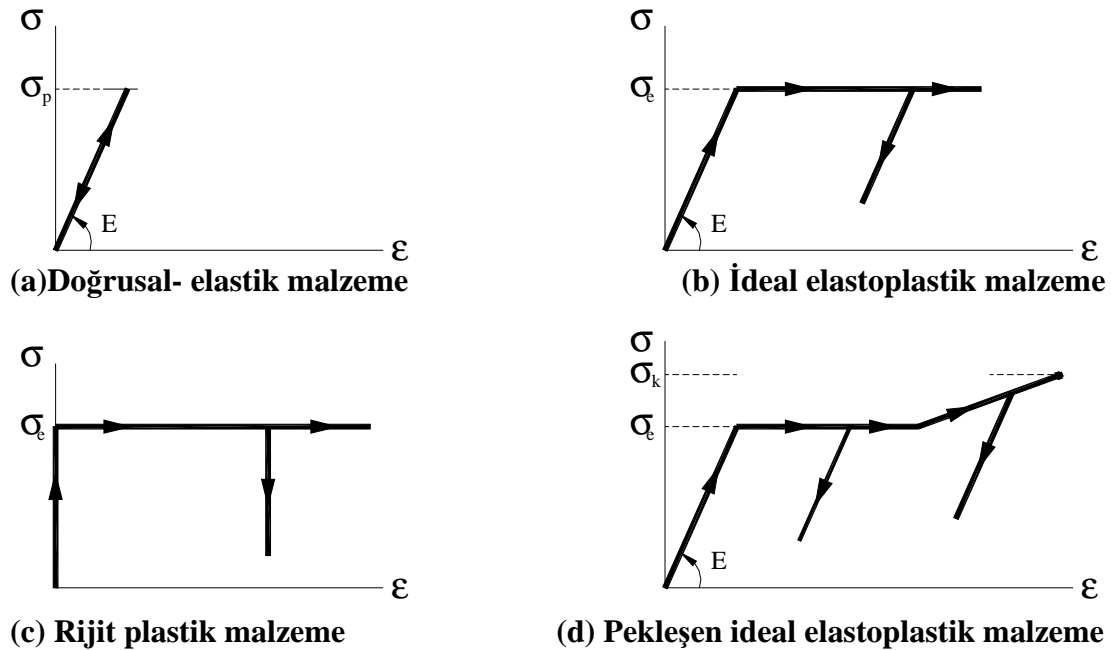


Şekil 3.2 : Beton çeliğinde  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramı

Bu diyagramı tanımlayan  $\sigma_k$  kopma gerilmesi,  $\sigma_e$  akma gerilmesi ve  $\epsilon_e$  akma şekil değiştirmesinin S420 beton çeliği için aldığı değerler aşağıda verilmiştir:

$$\text{S420 beton çeliği : } \sigma_k = 500 \text{ N/mm}^2, \quad \sigma_e = 420 \text{ N/mm}^2 \quad (\epsilon_e \cong 0,0021)$$

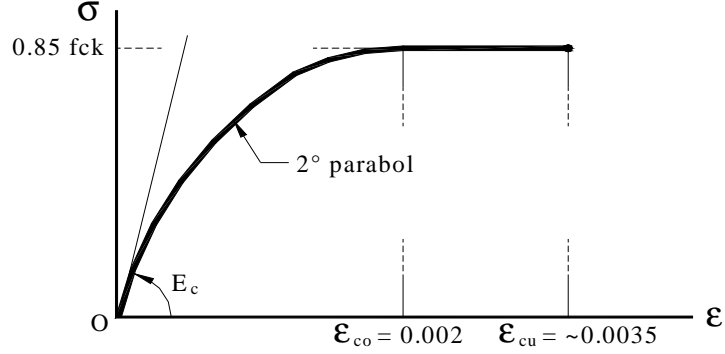
Betonarme yapı elemanlarının iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarının elde edilmesinde, uygulanan analiz ve tasarım yaklaşımına bağlı olarak, beton çeliğinin  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramlarının bir bölümü veya tümü Şekil 3.3’deki gibi idealleştirilebilir.



Şekil 3.3 : Beton çeliğinin  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramlarının idealleştirilmesi

### 3.2.1.2 Beton

Betonarme bir çubuk elemanın eğilmesinde dış basınç lifindeki betonun  $\sigma$ - $\epsilon$  bağıntısı Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4 : Betonarme çubuğun eğilmesinde dış basınç lifindeki  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramı

Şekil 3.4’de  $f_{ck}$  karakteristik basınç dayanımını,  $E_c$  ise

$$E_c = 14000 + 3250\sqrt{f_{ck}} \quad (N/mm^2) \quad (3.1)$$

formülü ile hesaplanabilen beton elastisite modülünü göstermektedir.

Betonun ezilerek kırılmasına neden olan  $\epsilon_{cu}$  birim kısalması sargısız betonda yaklaşık olarak 0,0030-0,0035 iken, sargılı betonda sargı donatısı (etriye) miktarına bağlı olarak önemli oranda artabilmektedir.

2007 Türk Deprem Yönetmeliği, başka bir seçim yapılmadığı durumlarda, sargılı veya sargısız beton modelleri için Mander beton modelinin kullanılmasını önermektedir. [11] Mander sargılı beton modelinde, sargı etkisiyle artan beton basınç dayanımı ve  $\epsilon_{cu}$  birim kısalması, malzeme dayanımlarının yanında elemanda enine ve boyuna donatı yerleşimi göz önüne alınarak hesaplanır. Mander sargısız beton modelinde ise  $\epsilon_{cu}$  birim kısalmasının değeri 0,004 olarak alınmaktadır.

### 3.2.2 Düzlem çubuk elemanlarda iç kuvvet – şekil değiştirme bağıntıları ve akma (kırılma) koşulları

Düzlemi içindeki kuvvetlerin etkisi altında bulunan düzlem çubuk elemanlarda iç kuvvetler (kesit zorları),  $M$  eğilme momenti,  $N$  normal kuvveti ve  $T$  kesme kuvvetidir.  $ds$  boyundaki bir çubuk elemanın bir yüzünün diğer yüzüne göre göreceli (rölatif) yer değiştirmelerinin kesit zorları doğrultularındaki bileşenleri  $ds$  elemanın

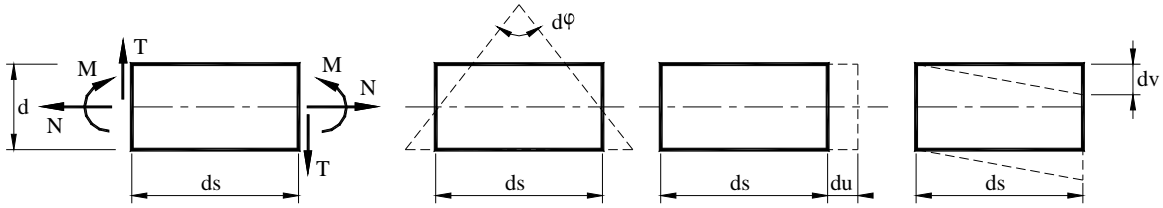
birim şekil değiştirmeleri olarak tanımlanır. Bunlar  $\varphi$  kesitin dönmesini,  $u$  ve  $v$  kesitin çubuk eksenine ve ona dik doğrultudaki yer değiştirmelerini göstermek üzere

$$\chi = d\varphi / ds \quad : \quad \text{birim dönme (eğrilik)}$$

$$\varepsilon = du / ds \quad : \quad \text{birim boy değişmesi}$$

$$\gamma = dv / ds \quad : \quad \text{birim kayma}$$

adını alırlar, Şekil 3.5.



**Şekil 3.5 :** Düzlem çubuk elemanda iç kuvvetler ve şekil değiştirmeler

Düzlem çubuk sistemlerde iç kuvvetler ile şekil değiştirmeler arasındaki bağıntılar (bünye denklemleri), genel olarak

$$\chi = \frac{d\varphi}{ds} = F_1(M, N, T) + \frac{\alpha_t \cdot \Delta t}{d} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} = F_2(M, N, T) + \alpha_t \cdot t \quad (3.3)$$

$$\gamma = \frac{dv}{ds} = F_3(M, N, T) \quad (3.4)$$

şeklindedir. Burada  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  malzeme karakteristiklerine ve enkesit özelliklerine bağlı olarak belirlenen doğrusal olmayan fonksiyonları,  $t$  ve  $\Delta t$  kesite etkiyen düzgün ve farklı sıcaklık değişmelerini,  $\alpha_t$  sıcaklık genleşme katsayısını göstermektedir.

İç kuvvetlerin artarak, belirli bir sınır duruma erişmesi halinde kırılma, akma veya büyük şekil değiştirmeler nedeniyle kesitin taşıma gücü sona erer. Kesitin daha büyük kesit zorlarını taşıyamayacağını ifade eden bu sınır durum kısaca akma veya kırılma olarak tanımlanır. Bu duruma karşı gelen iç kuvvetlere de kesitin taşıma gücü adı verilir. Akma (kırılma) durumunu kesit zorlarına veya şekil değiştirmelere bağlı olarak ifade eden

$$K_1(M, N, T) = 0 \quad (3.5)$$

veya

$$K_2(\chi, \varepsilon, \gamma) = 0 \quad (3.6)$$

bağıntılarına akma (kırılma) koşulları denilmektedir.

Uygulamada genellikle olduğu gibi, kayma şekil değiştirmeleri eğilme ve uzama şekil değiştirmeleri yanında terk edilir ve kesme kuvvetinin birim dönme ve birim boy değişmesine etkileri ihmal edilirse, iç kuvvet şekil değiştirme bağıntıları (bünye denklemleri)

$$\chi = \frac{d\varphi}{ds} = F_1(M, N) + \frac{\alpha_t \cdot \Delta t}{d} \quad (3.2a)$$

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} = F_2(M, N) + \alpha_t \cdot t \quad (3.3a)$$

ve akma (kırılma) koşulu da

$$K_1(M, N) = 0 \quad (3.5a)$$

veya

$$K_2(\chi, \varepsilon) = 0 \quad (3.6a)$$

şeklini alır.

### 3.2.3 Betonarme çubuklar

Eğilme momenti ve normal kuvvet (bileşik eğilme) etkisindeki betonarme çubuk elemanlarda iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntıları ile akma (kırılma) koşulları incelenecektir. Ayrıca, bu bağıntı ve koşulların nasıl idealleştirilebileceği açıklanacaktır. Basit eğilme ( $M \neq 0, N = 0$ ) etkisindeki çubuklar, incelenen durumun özel bir halini oluşturmaktadır.

### 3.2.3.1 Varsayımlar ve esaslar

Betonarme çubuk elemanların iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarının elde edilmesinde şu temel varsayımlar ve esaslar göz önünde tutulmaktadır.

- 1- Dik kesit şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalmaktadır.
- 2- Beton ve donatı arasında tam aderans bulunmaktadır.
- 3- Çatlamış betonun çekme dayanımı terk edilmektedir.
- 4- Betonun  $\sigma$ - $\varepsilon$  diyagramı için Şekil 3.4'de verilen parabol ve dikdörtgen modeli esas alınmaktadır.
- 5- Beton çeliğinin  $\sigma$ - $\varepsilon$  diyagramı için ideal elastoplastik malzeme varsayımı yapılmaktadır, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3.

### 3.2.3.2 Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisindeki çubuklar

#### a) Eğilme momenti – birim dönme ( $M - \chi$ ) bağıntısı

Sabit normal kuvvet ( $N=N_0$ ) altında, artan eğilme momenti ile zorlanan betonarme bir kesitte  $M$  eğilme momenti ile  $\chi$  birim dönmesi (eğriliği) arasındaki bağıntı üç bölgeden oluşmaktadır, Şekil 3.6. Bu bölgeleri sınırlayan  $L_0$ ,  $L_1$  ve  $L_2$  noktalarına karşı gelen durumlar aşağıda açıklanmıştır, [18].

$L_0$  : Beton kesitin dış çekme lifinde çatlakların başladığı durumdur. Dış çekme lifindeki normal gerilme, eğilmedeki betonun çekme dayanımına eşit olunca betonda çatlakların meydana geldiği varsayılmaktadır. Eğilmedeki betonun çekme dayanımı ise

$$f'_{ctk} = 0,70\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3.7)$$

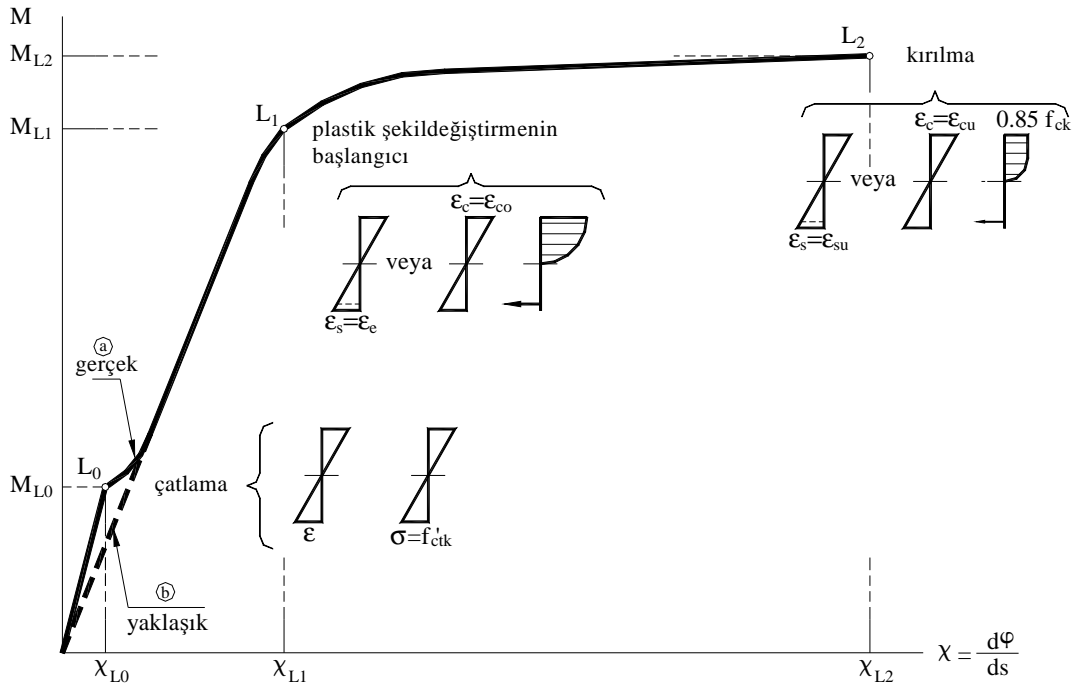
bağıntısı ile hesaplanabilir.

$L_0$  çatlama noktasına karşı gelen  $M_{L_0}$  momentinin bulunmasında, beton kesitin homojen olduğu varsayılmakta ve betonun  $\sigma$ - $\varepsilon$  bağıntısı doğrusal-elastik olarak alınmaktadır.

$L_1$  : Betonun dış basınç lifinde veya çekme donatısında plastik şekil değiştirmelerin başlamasına karşı gelen durumdur. Plastik şekil değiştirmelerin betonda

$\varepsilon_{co} = 0,002$  birim kısalmasında, çelikte ise  $\varepsilon_e$  akma sınırında başladığı göz önünde tutulmaktadır.  $M_{L1}$  eğilme momentinin hesabında betonun çekme dayanımı göz önüne alınmaz.

$L_2$  : Eğilme momenti artarak betonarme kesitin taşıma gücü adı verilen  $M_{L2} = M_p$  değerine eşit olunca basınç bölgesindeki beton ezilerek kırılır veya çekme donatısı kopar. Betonun ezilerek kırılması birim kısalmanın  $\varepsilon_{cu}$  sınır değerine erişmesi suretiyle meydana gelir. Sargısız betonda kısa süreli yükler için  $\varepsilon_{cu} = 0,003 - 0,0035$  olan bu sınır değer sargı donatısına bağlı olarak artmaktadır. Betonarme kesitlerin boyutlandırılmasında, çekme donatısının kopması yerine, genellikle çelikteki birim uzamanın  $\varepsilon_{su} = 0,01$  değeri ile sınırlandırılması esas alınır.



Şekil 3.6 : Betonarme kesitlerde ( $M - \chi$ ) diyagramı

Betonunun çekme dayanımının terk edildiği durumlarda,  $M - \chi$  bağıntısının çatlama öncesi bölümü yaklaşık olarak (b) eğrisi ile temsil edilmektedir.

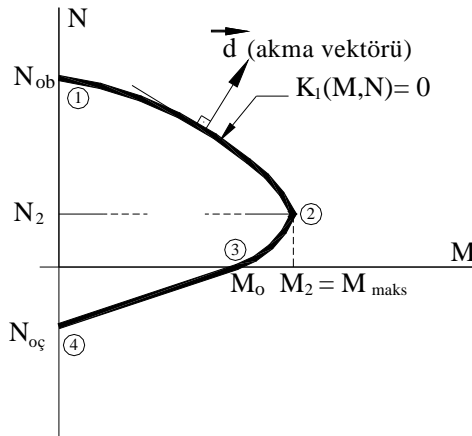
Betonarme kesitlerin taşıma gücüne göre boyutlandırılmasında, betonarme betonu ve beton çeliğinin karakteristik dayanımları malzeme güvenlik katsayılarına bölünerek küçültülür. Buna karşılık, betonarme sistemlerin dış yükler altındaki davranışlarının

incelenmesinde malzeme güvenlik katsayılarının kullanılmasına ve çelikteki birim uzamanın  $\varepsilon_{su} = 0,01$  değeri ile sınırlandırılmasına gerek olmamaktadır.

### b) Akma koşulu (Karşılıklı etki diyagramı)

Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisindeki betonarme bir kesitte taşıma gücünü ifade eden karşılıklı etki diyagramı Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir.

Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin, plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı varsayılan betonarme sistemlerde, iç kuvvet durumunun bu eğri üzerinde bulunması bir plastik kesitin oluştuğunu ve bu kesitte sonlu plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiğini (yani kesitin aktığı) ifade etmektedir. Bu nedenle, karşılıklı etki diyagramına akma eğrisi de denilmektedir. Denklem 3.5a’daki bağıntı ile tanımlanan akma eğrisi N normal kuvvetinin çeşitli değerleri için hesaplanan  $M_{L2} = M_p$  eğilme momentleri yardımı ile elde edilebilir.



Şekil 3.7 : Betonarme kesitlerde karşılıklı etki diyagramı

Akma eğrisi dört karakteristik noktası ile tanımlanmaktadır. Akma eğrisinin idealleştirilmesinde yararlanılabilecek olan bu noktalar aksenal basınç, basit eğilme ve aksenal çekme hallerine karşı gelen (1),(3) ve (4) noktaları ile kesitin en büyük eğilme momenti taşıma gücüne sahip olduğu dengeli duruma karşı gelen (2) noktasıdır.

Bileşik eğilme etkisindeki betonarme kesitlerde, plastik şekil değiştirme bileşenlerini içeren akma vektörünün bazı koşullar altında ve yaklaşık olarak akma eğrisine dik olduğu bilinmektedir, [19].



### **3.3 Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Betonarme Sistemlerin Hesabı**

Malzeme bakımından doğrusal olmayan betonarme sistemlerin hesabı, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin sistem üzerinde yayılı olması ve plastik mafsalsal adı verilen belirli kesitlerde toplandığının varsayılması halleri için ayrı ayrı incelenecektir. Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin sistem üzerinde yayılı olması hali hakkında ön bilgi verildikten sonra, bu çalışmanın kapsamı içinde olan plastik mafsalsal hipotezi ve bu hipoteze dayanan hesap yöntemi ayrıntılı olarak incelenecektir.

#### **3.3.1 Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin yayılı olması hali**

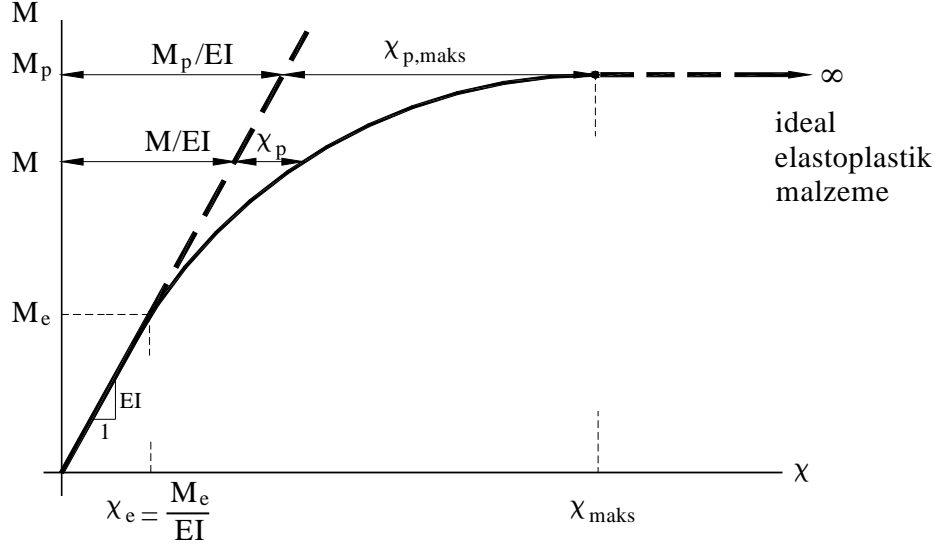
Malzeme bakımından doğrusal olmayan yapı sistemlerinde, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin sistem üzerinde sürekli olarak yayıldığı göz önüne alınması halinde, yük parametresi-yer değiştirme bağıntılarının (kapasite eğrilerinin) belirlenmesi ve göçme yüklerinin hesabı için, ardışık yaklaşım yöntemlerinden veya yük artımı yöntemlerinden yararlanılabilir, [17, 20, 21].

#### **3.3.2 Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin belirli kesitlerde toplandığının varsayılması hali**

Malzeme bakımından doğrusal olmayan sünek yapı sistemlerinde, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin plastik mafsalsal (plastik kesit) adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, sistemin diğer bölümlerinin ise doğrusal-elastik davrandığı varsayımı yapılabilir [17].

##### **3.3.2.1 Plastik mafsalsal hipotezi**

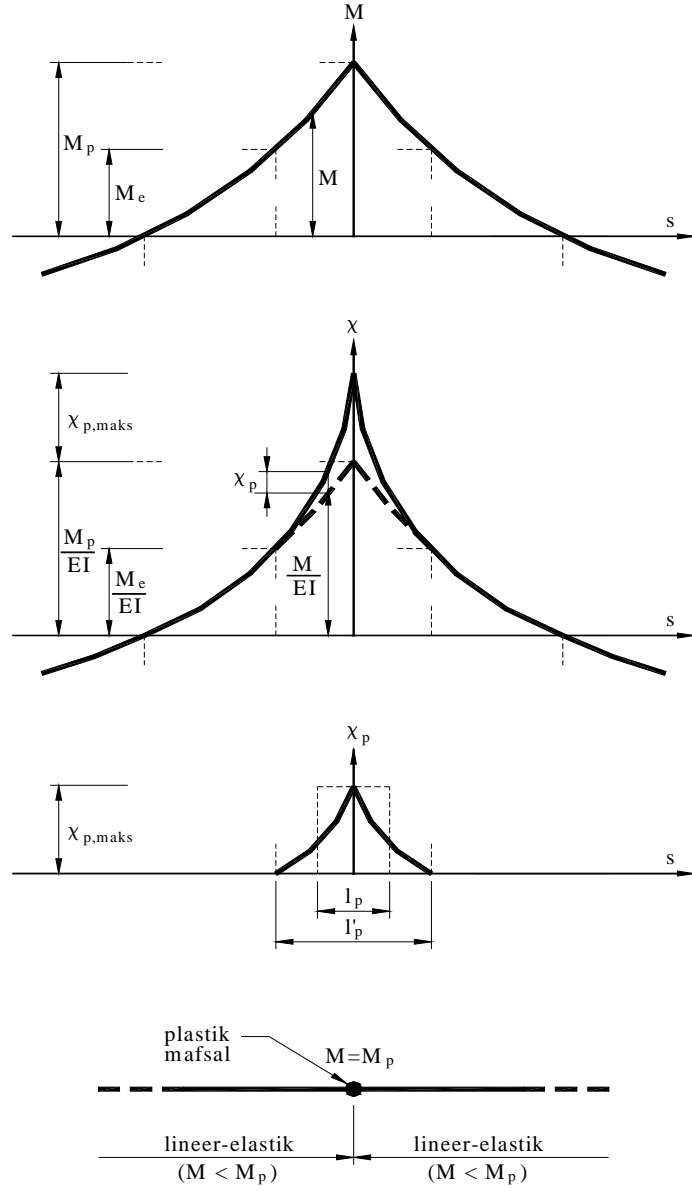
Toplam şekil değiştirmelerin lineer şekil değiştirmelere oranı olarak tanımlanan süneklik oranının büyük olduğu ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin küçük bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan eğilme şekil değiştirmelerinin plastik mafsalsal adı verilen belirli kesitlerde toplandığı, bunun dışındaki bölgelerde sistemin doğrusal-elastik davrandığı varsayılır. Bu hipoteze *plastik mafsalsal hipotezi* adı verilir.



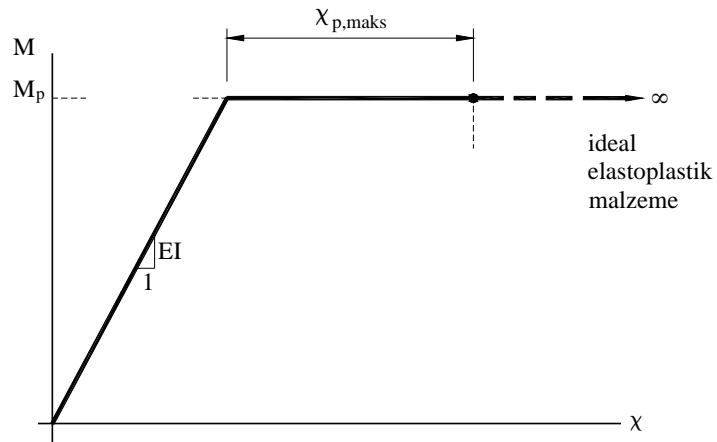
**Şekil 3.8 :** Eğilme momenti - eğrilik diyagramı

Gerçek eğilme momenti-eğrilik bağıntısı Şekil 3.8’de verilen bir düzlem çubuk elemanın bir bölgesine ait eğilme momenti diyagramı, toplam eğilme şekil değiştirmeleri ve doğrusal olmayan şekil değiştirmeler Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Çelik kesitlerin ve yeterli süneklığe sahip olan betonarme kesitlerin eğilme momenti-eğrilik bağıntıları incelendiğinde, bu bağıntıların esas olarak iki farklı bölgeden oluştuğu gözlenir. Birinci bölgede, eğilme momentinin küçük değerleri için eğilme momenti-eğrilik ilişkisi yaklaşık olarak doğrusal-elastik varsayılabilir. Betonarme kesitler için, bu bölgede beton ve beton çeliği doğrusal davranış bölgesinde kaldığı için, eğilme momenti-eğrilik bağıntısında da benzer özellikte ortaya çıkar. Ancak beton ve çelik gerilmelerinin artmasına paralel olarak, doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin kesitin davranışında etkili olmaya başlaması, eğilme momenti-eğrilik bağıntısının da doğrusal davranıştan ayrılmasına sebep olur. Eğilme momenti-eğrilik bağıntısının ikinci bölgesinde eğri yataya yakın olur. Bu bölgede elastik ötesi, elastoplastik davranış etkilidir. Kesite etkileyen eğilme momentinde çok küçük artım meydana gelirken, eğrilik belirgin bir şekilde artar ve eğriliğin sınır değerine erişmesi ile kesitte güç tükenmesi meydana gelir. Plastik mafsal hipotezinde, eğilme momenti-eğrilik bağıntısını oluşturan bu iki bölge ideal elastoplastik malzemede olduğu gibi, biri yatay olan iki doğru parçası ile ifade edilir, Şekil 3.10.



**Şekil 3.9 :** Doğrusal olmayan şekil değiştirmeler



**Şekil 3.10 :** İdealleştirilmiş bünye bağıntısı

Her iki doğrusal davranış birbirinden kesin bir nokta ile ayrılmaz. Ancak, çekme noktasının akmaya başlaması veya betondaki birim kısalmanın  $\epsilon_{co}$  sınır değerine erişmesi bu iki bölgeyi ayıran nokta olarak varsayılabilir ve bu duruma karşı gelen eğrilik  $\phi_y$  olarak gösterilir.

Güç tükenmesine karşı gelen toplam eğrilik de  $\phi_u$  ile gösterilirse, kesitin eğilme sünekliği

$$\mu = \phi_u / \phi_y \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanır.

Plastik mafsal hipotezinin uygulanması, gerçek eğilme momenti-eğrilik bağıntısının iki doğru parçasından oluşacak şekilde idealleştirilmesine karşı gelmektedir. Bu idealleştirme, Denk.(3.9) ve (3.10) da verilen bağıntılarla temsil edilmektedir.

$$M < M_p \text{ için } \chi = \frac{M}{EI} \quad (3.9)$$

$$M = M_p \text{ için } \chi \rightarrow \chi_{p,maks} \quad (3.10)$$

Artan dış yükler altında, plastik mafsalın dönmesi artarak *dönme kapasitesi* adı verilen bir sınır değere ulaşıncaya kadar meydana gelen büyük plastik şekil değiştirmeler nedeniyle kesit kullanılamaz hale gelir. Yapı sisteminin bir veya daha çok kesitindeki plastik mafsal dönmelerinin kendilerine ait dönme kapasitelerine ulaşması halinde ise, yapı sisteminin kullanım dışı kaldığı varsayılır.

Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi, doğrusal olmayan şekil değiştirmeler çubuk üzerindeki  $l_p$  uzunluğundaki bir bölgede yoğunlaşmakta ve en büyük eğrilik  $\chi_{p,maks}$  değerine eşit olmaktadır. Bu hipotezde doğrusal olmayan (plastik) şekil değiştirmelerin çubuk elemanı üzerinde  $l_p'$  uzunluğunda bir bölgede sürekli olarak düzgün yayıldığı varsayılmaktadır. Buna göre plastikleşen bölgedeki toplam plastik dönme;

$$\phi_p = \int_{l_p'} \chi_p ds \quad (3.11)$$

şeklinde hesaplanabilir ve plastik mafsal dönmesi olarak isimlendirilir.

Plastik mafsalin *dönme kapasitesi* ise

$$\text{maks}\varphi_p = \int_{l_p}^{\prime} \chi_p ds \quad (\chi \rightarrow \chi_{p,\text{maks}}) \quad (3.12)$$

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

Plastik dönme kapasitesi yaklaşık olarak

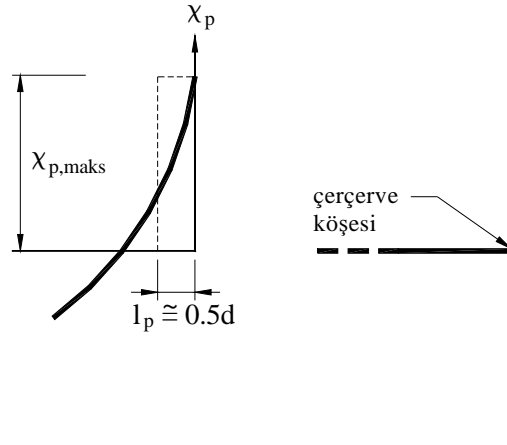
$$\text{maks}\varphi_p = I_p \chi_{p,\text{maks}} \quad (3.13)$$

$$I_p \cong 0.5d \quad (3.14)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada

$d$  : enkesit yüksekliği

$I_p$  : plastik mafsal boyu olarak tanımlanmaktadır, Şekil 3.11.



**Şekil 3.11** : Plastik mafsal boyu

Betonarme yapı sistemlerinde dönme kapasitesi çeşitli etkenlere bağlıdır. Bunlardan başlıcaları aşağıda verilmiştir.

- Betonarme betonu ve beton çeliğinin  $\sigma-\epsilon$  diyagramlarını belirleyen  $\epsilon_{cu}$  ve  $\epsilon_{su}$  sınır birim boy değişimleri,
- Betonarme betonunun  $\epsilon_{cu}$  birim boy değişmesini etkileyen sargı donatısının miktarı, şekli ve yerleşim düzeni,
- Plastik bölge uzunluğunu etkileyen enkesit boyutları,
- Eğilme momenti diyagramının şekli ve kesitteki normal kuvvettir.

Yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan plastik mafsallık hipotezinin esasları aşağıda özetlenmiştir.

1. Bir kesitteki eğilme momenti artarak  $M_p$  plastik moment değerine eşit olunca, o kesitte bir plastik mafsallık oluşur. Daha sonra, kesitteki eğilme momenti ( $M=M_p$ ) sabit olarak kalır ve kesit serbestçe döner. Böylece kesitteki eğilme momentinin  $M=M_p$  değerinde sabit kalması sağlanır. Plastik mafsaldaki  $\phi_p$  plastik dönmesi artarak dönme kapasitesine ( $\max\phi_p$ ) erişince sistem kullanılamaz duruma gelir; yani göçer.
2. Plastik mafsallar arasında sistem doğrusal-elastik olarak davranır.
3. Kesite eğilme momenti ile birlikte normal kuvvetin de etkimesi halinde,  $M_p$  plastik momentini yerine, kesitteki  $N$  normal kuvvetine bağlı olarak akma koşulundan bulunan indirgenmiş plastik moment ( $M_p'$ ) değeri kullanılır

#### 4. PERFORMANSA DAYALI TASARIM VE DEĞERLENDİRME

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme, inşaat mühendisliğinde yeni gelişen bir kavram olup, yer değiştirme ve şekil değiştirmeye bağlı performans kriterini esas alan tasarım kavramı, deprem bölgelerindeki mevcut yapıların deprem güvenliklerinin belirlenmesi ve yeterli güvenlikte olmayan yapıların güçlendirme çalışmaları sırasında ortaya konulmuş ve geliştirilmiştir.

Yeni yapı tasarımında elastik ötesi davranış tek bir  $R_a$  deprem yükü azaltma katsayısı ile göz önüne alınır. Dayanım bazlı olan bu yöntemde, verilen bir deprem etkisi altında, her eleman için hesaplanan bir etki/kapasite oranı hesaplanarak ön görülen sınır değerlerle karşılaştırılmaktadır. Yer değiştirme ve şekil değiştirme esaslı değerlendirmenin esas alındığı yöntemlerde ise, belirli bir yatay deprem yükü dağılımı için yapıdaki yer değiştirme istemine ulaşıldığında, yapıdan beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir.

Amerika Birleşik Devletlerinin California eyaletinde, 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremlerinin neden olduğu büyük hasar, deprem etkileri altında yeterli bir dayanımı öngören performans kriterlerine alternatif olarak, yer değiştirmeye bağlı daha gerçekçi performans kriterlerini esas alan yöntemlerin geliştirilmesi gereksinimini ortaya çıkarmıştır.

Bu gereksinimi karşılamaya yönelik olarak, Applied Technology Council (ATC) tarafından *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* - ATC 40 [7] ve Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings* - FEMA 273, 356 [8, 9] raporları yayınlanmıştır. Daha sonra, bu çalışmaların sonuçlarının irdelenerek geliştirilmesi amacıyla ATC 55 projesi yürütülmüş ve projenin bulgularını içeren FEMA 440 [10] taslak raporu hazırlanmıştır.

Ülkemizde, deprem bölgelerinde bulunan mevcut ve güçlendirilecek tüm binaların deprem etkileri altındaki davranışlarının değerlendirilmesinde uygulanacak hesap kuralları, güçlendirme kararlarının alınmasında esas alınacak ilkeler ve

güçlendirilmesine karar verilen binaların güçlendirme tasarım ilkeleri 2007 Türk Deprem Yönetmeliği [11] Bölüm 7’de verilmiştir.

Aşağıdaki bölümlerde, söz konusu temel ilkeler ve hesap kuralları ile betonarme binaların deprem performanslarının değerlendirilmesine yönelik bilgi verilecektir.

#### **4.1 Yapı Elemanlarında Hasar Sınırları ve Hasar Bölgeleri**

Yapıların deprem etkileri altındaki performanslarının değerlendirmesi genel olarak iki farklı kritere göre yapılabilmektedir. Doğrusal elastik değerlendirme yöntemlerinin esasını oluşturan ve *dayanım (kuvvet) bazlı değerlendirme* adı verilen birinci tür değerlendirmede, yapı elemanlarının dayanım kapasiteleri elastik deprem yüklerinden oluşan ve doğrusal teoriye göre hesaplanan etkilerle karşılaştırılmakta ve yapı elemanının sünekliğini göz önüne alan, eleman bazındaki bir tür deprem yükü azaltma katsayıları çerçevesinde, binadan beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Doğrusal elastik olmayan değerlendirme yöntemlerinin esasını oluşturan, *yer değiştirme ve şekil değiştirme bazlı değerlendirmenin* esas alındığı ve genel olarak malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan sistem hesabına dayanan yöntemlerde ise, belirli bir deprem etkisi için binadaki yer değiştirme istemine ulaşıldığında, yapıdan beklenen performans hedefinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir.

Her iki yaklaşımda da, yapı elemanları için hasar sınırları ve hasar bölgeleri tanımlanmıştır. Hasar sınırlarının belirlenmesinde, yapı elemanları “*sünek*” ve “*gevrek*” olarak iki sınıfa ayrılırlar. Sünek ve gevrek eleman tanımları, elemanların kapasitelerine hangi kırılma türü ile ulaştıkları ile ilgilidir.

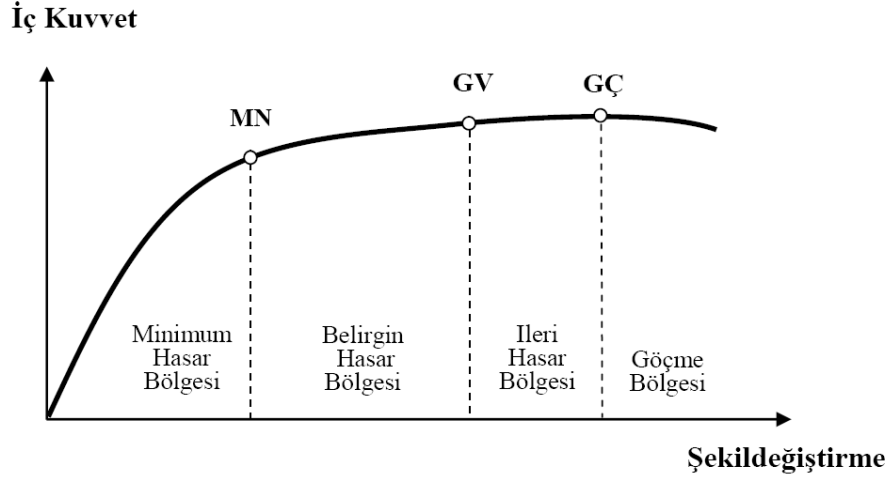
##### **4.1.1 Kesit hasar sınırları**

Sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç sınır durum tanımlanmıştır. Bunlar Minimum Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ)’dir. Minimum hasar sınırı ilgili kesitte elastik ötesi davranışın başlangıcını, güvenlik sınırı kesitin dayanımını güvenli olarak sağlayabileceği elastik ötesi davranışın sınırını, göçme sınırı ise kesitin göçme öncesi davranışının sınırını tanımlamaktadır. Eksenel basınç ve kesme gibi etkiler altında kapasitesine ulaşan gevrek elemanlar için elastik ötesi davranışa izin verilmemektedir.



#### 4.1.2 Kesit hasar bölgeleri

Kritik kesitlerinin hasarı MN' ye ulaşmayan elemanlar Minimum Hasar Bölgesi'nde, MN ile GV arasında kalan elemanlar Belirgin Hasar Bölgesi'nde, GV ve GÇ arasında kalan elemanlar İleri Hasar Bölgesi'nde, GÇ' i aşan elemanlar ise Göçme Bölgesi'nde kabul edilirler, Şekil 4.1.



Şekil 4.1 : Kesit hasar bölgeleri

#### 4.1.3 Kesit hasar ve eleman hasar bölgeleri

Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle hesaplanan iç kuvvetlerin ve/veya şekil değiştirmelerin, yukarıda tanımlanan sınır durumlara karşı gelen sayısal değerler ile karşılaştırılması sonucunda kesitlerin hasar bölgelerine karar verilir. Eleman hasarı, elemanın en fazla hasar gören kesitine göre belirlenir.

#### 4.2 Binaların Deprem Performans Seviyeleri

Binaların deprem performansı, uygulanan deprem etkisi altında yapıda oluşması beklenen hasarın durumu ile ilişkilidir ve dört farklı hasar durumu esas alınarak tanımlanmıştır.

##### 4.2.1 Hemen kullanım performans düzeyi

Uygulanan deprem etkisi altında yapısal elemanlarda oluşan hasar minimum düzeydedir ve elemanlar rijitlik ve dayanım özelliklerini korumaktadırlar. Yapıda kalıcı ötelenmeler oluşmamıştır. Az sayıda elemanda akma sınırı aşılmış olabilir.

Yapısal olmayan elemanlarda çatlamlar görülebilir, ancak bunlar onarılabılır düzeydedir.

Herhangi bir katta, uygulanan her bir deprem doğrultusu için yapılan hesap sonucunda kirişlerin en fazla %10'u belirgin hasar bölgesine geçebilir, ancak diğer taşıyıcı elemanlarının tümü minimum hasar bölgesindedir. Eğer varsa, gevrek olarak hasar gören elemanların güçlendirilmeleri kaydı ile bu durumdaki binaların *Hemen Kullanım Performans Düzeyi*'nde olduğu kabul edilir.

#### **4.2.2 Can güvenliği performans düzeyi**

Uygulanan deprem etkisi altında yapısal elemanların bir kısmında hasar görülür, ancak bu elemanlar yatay rijitliklerinin ve dayanımlarının önemli bölümünü korumaktadırlar. Düşey elemanlar düşey yüklerin taşınması için yeterlidir. Yapısal olmayan elemanlarda hasar bulunmakla birlikte dolgu duvarları yıkılmamıştır. Yapıda az miktarda kalıcı ötelenmeler oluşabilir; ancak gözle fark edilebilir değerlerde değildir.

Herhangi bir katta, uygulanan her bir deprem doğrultusu için yapılan hesap sonucunda kirişlerin en fazla %30'u ve kolonların bir kısmı ileri hasar bölgesine geçebilir. Ancak ileri hasar bölgesindeki kolonların, tüm kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetine katkısı %20'nin altında olmalıdır. Diğer taşıyıcı elemanların tümü minimum hasar bölgesi veya belirgin hasar bölgesindedir. Bu durumda, eğer varsa, gevrek olarak hasar gören elemanların güçlendirilmeleri koşulu ile, bina *Can Güvenliği Performans Düzeyi*'nde kabul edilir. Can güvenliği performans düzeyinin kabul edilebilmesi için herhangi bir katta alt ve üst kesitlerinin ikisinde birden minimum hasar sınırı aşılmış olan kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetinin, o kattaki tüm kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranının %30'u aşmaması gerekir. En üst katta ileri hasar bölgesindeki kolonların kesme kuvvetleri toplamının, o kattaki tüm kolonların kesme kuvvetlerinin toplamına oranı en fazla %40 olabilir. Binanın güçlendirilmesine, güvenlik sınırını aşan elemanların sayısına ve yapı içindeki dağılımına göre karar verilir.

#### **4.2.3 Göçme öncesi performans düzeyi**

Uygulanan deprem etkisi altında yapısal elemanların önemli bir kısmında hasar görülür. Bu elemanların bazıları yatay rijitliklerinin ve dayanımlarının önemli

bölümünü yitirmişlerdir. Düşey elemanlar düşey yüklerin taşınmasında yeterlidir; ancak bazıları aksel kapasitelerine ulaşmıştır. Yapısal olmayan elemanlar hasarlıdır, dolgu duvarların bir bölümü yıkılmıştır. Yapıda kalıcı ötelenmeler oluşmuştur.

Herhangi bir katta, uygulanan her bir deprem doğrultusu için yapılan hesap sonucunda kirişlerin en fazla %20'si göçme bölgesine geçebilir. Diğer taşıyıcı elemanların tümü minimum hasar bölgesi, belirgin hasar bölgesi veya ileri hasar bölgesindedir. Bu durumda bina, eğer varsa, gevrek olarak hasar gören elemanların güçlendirilmeleri koşulu ile *Göçmenin Öncesi Performans Düzeyi*'nde kabul edilir. Göçmenin önlenmesi durumunun kabul edilebilmesi için herhangi bir katta alt ve üst kesitlerinin ikisinde birden minimum hasar sınırı aşılmış olan kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetinin, o kattaki tüm kolonlar tarafından taşınan kat kesme kuvvetine oranının %30'u aşmaması gerekir. Binanın mevcut durumunda kullanımı can güvenliği bakımından sakıncalıdır ve bina güçlendirilmelidir. Ancak güçlendirmenin ekonomik verimliliği değerlendirilmelidir.

#### **4.2.4 Göçme durumu**

Yapı uygulanan deprem etkisi altında göçme durumuna ulaşır. Düşey elemanların bir bölümü göçmüştür. Göçmeyenler düşey yükleri taşıyabilmektedir; ancak rijitlikleri ve dayanımları çok azalmıştır. Yapısal olmayan elemanların büyük çoğunluğu göçmüştür. Yapıda belirgin kalıcı ötelenmeler oluşmuştur. Yapı tamamen göçmüştür veya yıkılmanın eşiğindedir ve daha sonra meydana gelebilecek hafif şiddette bir yer hareketi altında bile yıkılma olasılığı yüksektir.

#### **4.3 Performans Belirlemede Esas Alınacak Deprem Hareketleri**

Performansa dayalı değerlendirme ve tasarımda göz önüne alınmak üzere, farklı düzeyde üç deprem hareketi tanımlanmıştır. Bu deprem hareketleri genel olarak, 50 yıllık bir süreç içindeki aşılma olasılıkları ile ve benzer depremlerin oluşumu arasındaki zaman aralığı (dönüş periyodu) ile ifade edilirler.

1- *Servis (kullanım) depremi* : 50 yılda aşılma olasılığı % 50 olan yer hareketidir. Yaklaşık dönüş periyodu 72 yıldır. Bu depremin etkisi, aşağıda tanımlanan tasarım depreminin yarısı kadardır.

2- *Tasarım depremi* : 50 yılda aşılma olasılığı % 10 olan yer hareketidir. Yaklaşık dönüş periyodu 475 yıldır. Bu deprem 1998 ve 2007 Türk Deprem Yönetmelikleri'nde esas alınmaktadır.

3- *En büyük deprem* : 50 yılda aşılma olasılığı % 2, dönüş periyodu yaklaşık 2475 yıl olan bir depremdir. Bu depremin etkisi tasarım depreminin yaklaşık olarak 1.50 katıdır.

#### 4.4 Performans Hedefi ve Çok Seviyeli Performans Hedefleri

Belirli bir deprem hareketi altında, bina için öngörülen yapısal performans düzeyi, *performans hedefi* olarak tanımlanır. Bir bina için, birden fazla yer hareketi altında farklı performans hedefleri öngörülebilir. Buna *çok seviyeli performans hedefi* denir. Mevcut ve güçlendirilecek binaların deprem performanslarının belirlenmesinde esas alınacak deprem düzeyleri ve bu deprem düzeylerinde binalar için öngörülen minimum performans hedefleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1** : Binalar için öngörülen minimum performans hedefleri

Binanın Kullanım Amacı ve Türü	Deprem Aşılma Olasılığı		
	50 yılda %50	50 yılda %10	50 yılda %2
<b>Deprem Sonrası Kullanımı Gereken Binalar:</b> Hastaneler, sağlık tesisleri, itfaiye binaları, haberleşme ve enerji tesisleri, ulaşım istasyonları, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, afet yönetim merkezleri, v.b.	-	HK	CG
<b>İnsanların Uzun Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar:</b> Okullar, yatakhaneler, yurtlar, pansiyonlar, askeri kışlalar, cezaevleri, müzeler, vb.	-	HK	CG
<b>İnsanların Kısa Süreli ve Yoğun Olarak Bulunduğu Binalar:</b> Sinema, tiyatro, konser salonları, kültür merkezleri, spor tesisleri	HK	CG	-
<b>Tehlikeli Madde İçeren Binalar:</b> Toksit, parlayıcı ve patlayıcı özellikleri olan maddelerin bulunduğu ve depolandığı binalar	-	HK	GÖ
<b>Diğer Binalar:</b> Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (konutlar, işyerleri, oteller, turistik tesisler, endüstri yapıları, vb.	-	CG	-

**HK:** Hemen Kullanım; **CG:** Can Güvenliği; **GÖ:** Göçme Öncesi

#### 4.5 Performans Belirlenmesi ve Kullanılan Analiz Yöntemleri

Performansa dayalı tasarım ve değerlendirmenin iki temel parametresi istem (talep) ve kapasitedir. İstem yapıya etkileyen deprem yer hareketini, kapasite ise yapının bu deprem etkisi altındaki davranışını temsil etmektedir.

Aşağıdaki bölümlerde ilk olarak, 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinde [11] yer alan doğrusal elastik hesap yöntemlerinden *Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi* ve doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinden *Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi* ile deprem performansı belirlenmesi hakkında bilgi verilecektir. Son olarak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinden FEMA356'da [8, 9] yer alan *Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi* ile deprem performansının nasıl belirleneceği açıklanacaktır.

#### 4.5.1 Doğrusal elastik hesap yöntemleri

2007 Türk Deprem Yönetmeliği'nde öngörülen ve binaların deprem performanslarının belirlenmesi için kullanılan doğrusal elastik hesap yöntemleri, *Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi*' dir. Dayanım bazlı olan bu yöntemlerin amacı, verilen bir deprem etkisi altında, deprem yükü azaltma katsayısının  $R_a=1$  değeri için hesaplanan etkiler ile yapı elemanlarının artık kapasiteleri arasındaki *etki/kapasite* ( $r$ ) oranlarının hesaplanması ve bu değerlerin ilgili sınır değerler ile karşılaştırılması suretiyle yapı elemanlarının kesit hasar bölgelerinin belirlenmesi ve bunlardan yararlanarak bina düzeyinde performans değerlendirmesi yapılmasıdır. [11, 22]

##### 4.5.1.1 Eşdeğer deprem yükü yöntemi

Eşdeğer deprem yükü yöntemi, bodrum üzerinde toplam yüksekliği 25 metreyi ve toplam kat sayısı 8'i aşmayan, ayrıca ek dışmerkezlilik göz önüne alınmaksızın hesaplanan burulma düzensizliği katsayısı  $\eta_{bi} < 1.4$  olan binalara uygulanır. Bu yöntemde toplam eşdeğer deprem yükünün (taban kesme kuvveti) hesabında  $R_a=1$  alınır ve denklemin sağ tarafı  $\lambda$  katsayısı ile çarpılır.  $\lambda$  katsayısı bodrum hariç bir ve iki katlı binalarda 1.0, diğerlerinde 0.85 değerini almaktadır.

Hesap Adımları:

- a) Gerekli çalışmalar yapılarak bina bilgi düzeyi belirlenir.
- b) Analizde elemanların etkin rijitliği kullanılacağından, kolon ve perdedeki normal kuvvet değerlerinin belirlenmesi amacıyla, çatlama kesitlerin kullanıldığı model üzerinde deprem hesabında kullanılacak kütlelerle uyumlu düşey yükler altında analiz yapılarak düşey taşıyıcı elemanların normal kuvvet değerleri hesaplanır. Hesaplanan normal kuvvet seviyesine göre taşıyıcıların etkin eğilme rijitliği belirlenir.

- c) Etkin eğilme rijitliklerinin kullanıldığı model oluşturulur. Bundan sonra, tüm hesaplar bu model üzerinde yapılır.
- d) Tüm yapı elemanlarının taşıma kapasiteleri hesaplanır. Kapasite hesabında mevcut malzeme dayanımları kullanılır. Bu dayanım değerlerine malzeme güvenlik katsayıları uygulanmaz, buna karşılık mevcut dayanımlar bilgi düzeyi katsayıları ile çarpılır.
- e) Deprem yükü azaltma katsayısı  $R_a=1$  alınarak ve bina önem katsayısı dikkate alınmadan taban kesme kuvveti hesaplanır. Ayrıca denklemin sağ tarafı  $\lambda$  ile çarpılır. Sistem yatay ve düşey yükler altında çözülerek iç kuvvetler hesaplanır.
- f) Uygulanan deprem yükü dikkate alınarak, deprem etkisi altında elde edilen eğilme momenti değerleri artık eğilme momenti kapasitesine bölünerek etki/kapasite değerleri sınır değerlerle karşılaştırılarak eleman kesitlerinin hasar seviyeleri belirlenir.
- g) Birleşim bölgelerinde kesme güvenliği kontrolü yapılır.
- h) Elemanların kesitleri için belirlenen hasar bölgeleri ele alınarak yapı sisteminin deprem performansı değerlendirilir. Ayrıca görelî kat ötelemeleri değerlendirilerek bina performans seviyesi kontrol edilir.

#### **4.5.2 Doğrusal elastik olmayan hesap yöntemleri**

Bu yöntemde amaç, ele alınan deprem yükü altında eleman kesitlerinde oluşan plastik şekil değiştirmelerin, eleman kesitlerinin şekil değiştirme kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit ve bina düzeyinde performans değerlendirilmesi yapılmasıdır.

Bu kapsamda yer alan doğrusal olmayan analiz yöntemleri;

- a) *Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi*
- b) *Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi*
- c) *Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi*

Artımsal itme analizinde genel amaç koordinatları ‘modal yer değiştirme-modal ivme’ olarak tanımlanan modal kapasite diyagramı elde edilip, buradan modal yer değiştirme isteminin belirlenmesidir. Daha sonra sistem yer değiştirme istemine

kadar itilip elemanlarda oluşan şekil değiştirmelerin sınır değerlerle karşılaştırılmasıdır.

#### 4.5.2.1 Doğrusal elastik olmayan davranışın idealleştirilmesi

Malzeme bakımından doğrusal elastik olmayan davranışın idealleştirilmesi için, mühendislik uygulamalarındaki yaygınlığı ve pratikliği nedeni ile doğrusal elastik olmayan analiz için *yığılı plastik davranış modeli* esas alınmıştır. Basit eğilme durumunda *plastik mafsalsal hipotezine* karşı gelen bu modelde, çubuk eleman olarak idealleştirilen kiriş, kolon ve perde türü taşıyıcı sistem elemanlarındaki iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine eriştiği sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca, plastik şekil değiştirmelerin düzgün yayılı biçimde olduğu varsayılmaktadır. Plastik mafsalsal boyu olarak adlandırılan *plastik şekil değiştirme bölgesinin* uzunluğu ( $L_p$ ), çalışan doğrultudaki kesit boyutu ( $h$ )'nin yarısına eşit alınır.

$$L_p = 0.5 h \quad (4.1)$$

Sadece eksenel kuvvet altında plastik şekil değiştirme yapan elemanların plastik şekil değiştirme bölgelerinin uzunluğu, ilgili elemanın serbest boyuna eşit alınır.

Yığılı plastik şekil değiştirmeyi temsil eden *plastik kesit*'in, teorik olarak plastik şekil değiştirme bölgesinin tam ortasına yerleştirilmesi gerekir. Ancak pratik uygulamalarda aşağıda belirtilen yaklaşık idealleştirmeler yapılabilir:

a) Kolon ve kirişlerde plastik kesitler, kolon-kiriş birleşim bölgesinin hemen dışına, diğer deyişle kolon veya kirişlerin net açıklıklarının uçlarına konulabilir. Ancak, düşey yüklerin etkisinden ötürü kiriş açıklıklarında da plastik mafsalların oluşabileceği göz önüne alınmalıdır.

b) Betonarme perdelerde, plastik kesitlerin her katta perde kesiminin alt ucuna konulmasına izin verilebilir. U, T, L veya kutu kesitli perdeler, bütün kolları birlikte çalışan tek perde olarak idealleştirilmelidir. Binaların bodrum katlarında rijit çevre perdelerinin bulunması durumunda, bu perdelerden üst katlara doğru devam eden perdelerin plastik kesitleri bodrum üstünden başlamak üzere konulmalıdır.

Bir veya iki eksenli eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki betonarme kesitlerin etkileşim diyagramlarının tanımlanması aşağıda verilen ilkelere göre yapılır:

a) Analizde beton ve donatı çeliğinin bilgi düzeyine göre belirlenen mevcut dayanımları esas alınır.

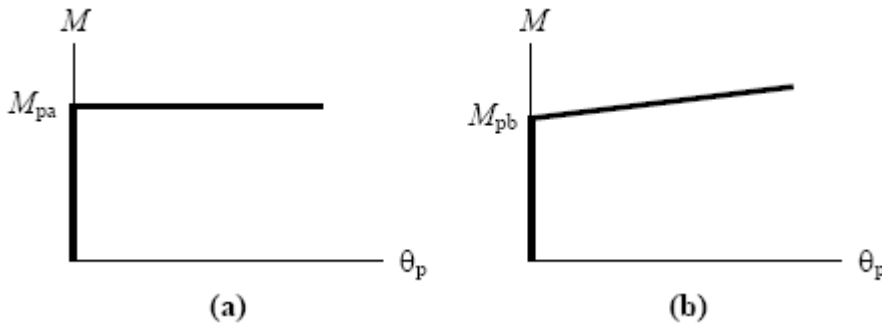
b) Betonun maksimum basınç birim şekil değiştirmesi 0.003, donatı çeliğinin maksimum birim şekil değiştirmesi ise 0.01 alınabilir.

Etkileşim diyagramları uygun biçimde doğrusallaştırılarak çok doğrulu veya çok düzlemlili diyagramlar olarak modellenenebilir.

İtme analizi modelinde kullanılacak plastik kesitlerin iç kuvvet - plastik şekil değiştirme bağıntıları ile ilgili olarak, aşağıdaki idealleştirmeler yapılabilir:

a) İç kuvvet-plastik şekil değiştirme bağıntılarında pekleşme etkisi (plastik dönme artışına bağlı olarak plastik momentin artışı) yaklaşık olarak terk edilebilir, Şekil 4.2a. Bu durumda, bir veya iki eksenli eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki kesitlerde plastikleşmeyi izleyen itme adımlarında, iç kuvvetlerin akma yüzeyinin üzerinde kalması koşulu ile plastik şekil değiştirme vektörünün akma yüzeyine yaklaşık olarak dik olması koşulu göz önüne alınır.

b) Pekleşme etkisinin göz önüne alınması durumunda (Şekil 4.2b), bir veya iki eksenli eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki kesitlerde plastikleşmeyi izleyen itme adımlarında iç kuvvetlerin ve plastik şekil değiştirme vektörünün sağlaması gereken koşullar, ilgili literatürden alınan uygun bir pekleşme modeline göre tanımlanır.



Şekil 4.2 : Eğilme momenti – plastik dönme bağıntıları

#### 4.5.2.2 Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi

Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi'nin amacı, birinci (deprem doğrultusunda hakim) titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde, deprem istem sınırına kadar monotonik olarak adım adım arttırılan eşdeğer deprem yüklerinin etkisi altında *doğrusal olmayan itme analizinin* yapılmasıdır. Düşey yük analizini izleyen itme analizinin her bir adımında taşıyıcı sistemde meydana gelen yer değiştirme, plastik şekil değiştirme ve i kuvvet artımları ile bunlara ait birikimli (kümülatif) değerler ve son adımda deprem istemine karşı gelen maksimum değerler hesaplanır. [11, 22]



Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'nin kullanılabilmesi için, binanın kat sayısının bodrum hariç 8'den fazla olmaması ve herhangi bir katta ek dışmerkezlilik göz önüne alınmaksızın doğrusal elastik davranışa göre hesaplanan burulma düzensizliği katsayısının  $\eta_{bi} < 1.4$  koşulunu sağlaması gereklidir. Ayrıca göz önüne alınan deprem doğrultusunda, doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan birinci (hakim) titreşim moduna ait etkin kütlelerin toplam bina kütlelerine (rijit perdelerle çevrelenen bodrum katlarının kütleleri hariç) oranının en az 0.70 olması zorunludur.

Artımsal itme analizi sırasında, eşdeğer deprem yükü dağılımının, taşıyıcı sistemdeki plastik kesit oluşumlarından bağımsız biçimde sabit kaldığı varsayımı yapılabilir. Bu durumda yük dağılımı, analizin başlangıç adımında doğrusal elastik davranış için hesaplanan birinci (deprem doğrultusundaki hakim) doğal titreşim mod şekli genliği ile ilgili kütlelerin çarpımından elde edilen değerle orantılı olacak şekilde tanımlanır. Kat döşemeleri rijit diyafram olarak idealleştirilen binalarda, birinci (hakim) doğal titreşim mod şeklinin genlikleri olarak her katın kütle merkezindeki birbirine dik iki yatay öteleme ile kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafındaki dönme göz önüne alınır.

Sabit yük dağılımına göre yapılan itme analizi ile koordinatları *“tepe yer değiştirmesi – taban kesme kuvveti”* olan *itme eğrisi* elde edilir. Tepe yer değiştirmesi, binanın en üst katındaki kütle merkezinde, göz önüne alınan x deprem doğrultusunda, her itme adımında hesaplanan yer değiştirmedir. Taban kesme kuvveti ise, her adımda eşdeğer deprem yüklerinin x deprem doğrultusundaki toplamıdır. İtme eğrisine uygulanan koordinat dönüşümü ile, koordinatları *“modal yer değiştirme – modal ivme”* olan modal kapasite diyagramı aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

a) (i)'inci itme adımında birinci (deprem doğrultusunda hakim) moda ait modal ivme  $a_1^{(i)}$  aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$a_1^{(i)} = \frac{V_{x1}^{(i)}}{M_{x1}} \quad (4.2)$$

denklemden  $V_{x1}^{(i)}$  x deprem doğrultusunda (i)'inci itme adımı sonunda elde edilen birinci (hakim) moda ait taban kesme kuvvetini,  $M_{x1}$  x deprem doğrultusunda

doğrusal elastik davranış için tanımlanan birinci (hakim) moda ait etkin kütleli göstermektedir.

b) (i)'inci itme adımında birinci (deprem doğrultusunda hakim) moda ait modal yer değiştirme  $d_1^{(i)}$  'nin hesabı için ise, aşağıdaki bağıntıdan yararlanılabilir:

$$d_1^{(i)} = \frac{u_{xN1}^{(i)}}{\Phi_{xN1} \Gamma_{x1}} \quad (4.3)$$

Birinci (deprem doğrultusunda hakim) moda ait modal katkı çarpanı  $\Gamma_{x1}$ , x deprem doğrultusunda taşıyıcı sistemin başlangıç adımıdaki doğrusal elastik davranışı için tanımlı ilgili bölümde yapılan  $L_{x1}$  ve 1. doğal titreşim moduna ait modal kütle  $M_1$ 'den yararlanılarak:

$$\Gamma_{x1} = \frac{L_{x1}}{M_1} \quad (4.4)$$

şeklinde elde edilir.

İtme analizi sonucunda elde edilen modal kapasite diyagramı ile elastik davranış spektrumu ve farklı aşılma olasılıklı deprem istemi için bu spektrum üzerinde yapılan değişiklikler göz önüne alınarak, birinci (hakim) moda ait maksimum modal yer değiştirme, diğer deyişle, modal yer değiştirme istemi hesaplanır. Tanım olarak modal yer değiştirme istemi,  $d_1^{(p)}$ , doğrusal olmayan (nonlinear) spektral yer değiştirme  $S_{di1}$ 'e eşittir:

$$d_1^{(p)} = S_{di1} \quad (4.5)$$

Doğrusal elastik olmayan (nonlinear) spektral yer değiştirme,  $S_{di1}$ , itme analizinin ilk adımında, doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan birinci (hakim) moda ait  $T_1^{(1)}$  başlangıç periyoduna karşı gelen doğrusal elastik (linear) spektral yer değiştirme  $S_{de1}$ 'e bağlı olarak Denk.(4.6) ile elde edilir:

$$S_{di1} = C_{R1} S_{de1} \quad (4.6)$$

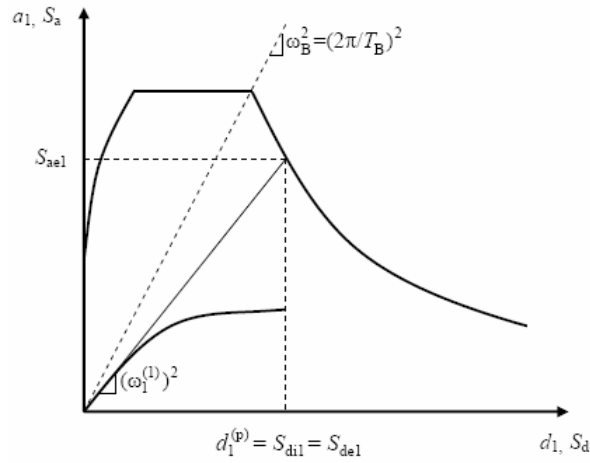
Doğrusal elastik (linear) spektral yer değiştirme  $S_{del}$ , itme analizinin ilk adımında birinci moda ait elastik spektral ivme  $S_{ael}$  'den hesaplanır:

$$S_{del} = \frac{S_{ael}}{(\omega_1^{(1)})^2} \quad (4.7)$$

Spektral yer değiştirme oranı  $C_{R1}$ , başlangıç periyodu  $T_1^{(1)}$ 'in değerine ( $T_1^{(1)} = 2\pi / \omega_1^{(1)}$ ) bağlı olarak belirlenir.  $T_1^{(1)}$  başlangıç periyodunun, ivme spektrumundaki karakteristik periyot  $T_B$ ' ye eşit veya daha uzun olması durumunda ( $T_1^{(1)} \geq T_B$  veya  $(\omega_1^{(1)})^2 \leq \omega_B^2$ ), doğrusal elastik olmayan (nonlinear) spektral yer değiştirme  $S_{di1}$ , eşit yer değiştirme kuralı uyarınca doğal periyodu yine  $T_1^{(1)}$  olan eşlenik doğrusal elastik sistem'e ait doğrusal elastik spektral yer değiştirme  $S_{del}$  'e eşit alınır. Buna göre spektral yer değiştirme oranı:

$$C_{R1} = 1 \quad (4.8)$$

olarak tanımlanır. Şekil 4.3.

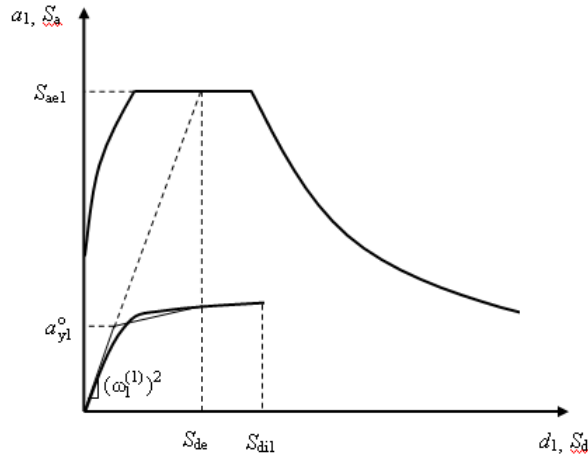


**Şekil 4.3 :** Performans noktasının belirlenmesi ( $T_1^{(1)} \geq T_B$ )

Şekilde birinci (hakim) titreşim moduna ait ve koordinatları ( $d_1$ ,  $a_1$ ) olan modal kapasite diyagramı ile koordinatları “spektral yer değiştirme ( $S_d$ ) – spektral ivme ( $S_a$ )” olan davranış spektrumu bir arada çizilmiştir.

$T_1^{(1)}$  başlangıç periyodunun, ivme spektrumundaki karakteristik periyot  $T_B$ ’ den daha kısa olması durumunda ( $T_1^{(1)} < T_B$  veya  $(\omega_1^{(1)})^2 > \omega_B^2$ ) ise, spektral yer değiştirme oranı  $C_{R1}$ , ardışık yaklaşımla hesaplanır. Hesap adımları şu şekildedir:

a) İtme analizi sonucunda elde edilen modal kapasite diyagramı, Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, yaklaşık olarak iki doğrulu (bi-lineer) bir diyagrama dönüştürülür. Bu diyagramın başlangıç doğrusunun eğimi, itme analizinin ilk adımındaki ( $i=1$ ) doğrunun eğimi olan birinci moda ait öz değere,  $(\omega_1^{(1)})^2$ , eşit alınır ( $T_1^{(1)} = 2\pi / \omega_1^{(1)}$ ).



**Şekil 4.4 :** Performans noktasının belirlenmesi ( $T_1^{(1)} < T_B$ )

b) Ardışık yaklaşımın ilk adımında  $C_{R1} = 1$  varsayımı yapılarak, eşdeğer akma noktasının koordinatları eşit alanlar kuralı ile belirlenir. Şekil 4.4’de görülen  $a_{y1}^o$  esas alınarak  $C_{R1}$  aşağıda şekilde tanımlanır:

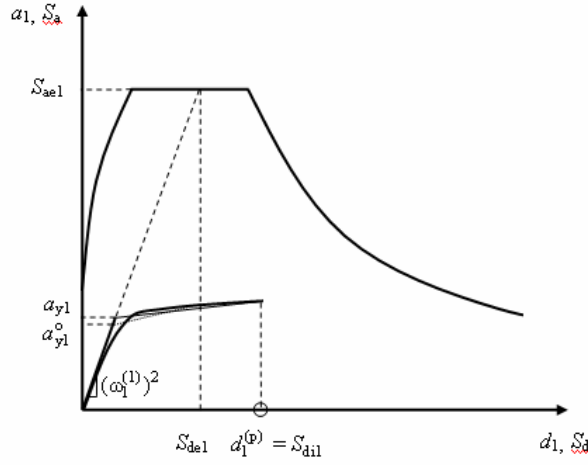
$$C_{R1} = \frac{1 + (R_{y1} - 1) T_B / T_1^{(1)}}{R_{y1}} \geq 1 \quad (4.9)$$

Bu bağıntıda  $R_{y1}$  birinci moda ait dayanım azaltma katsayısını göstermektedir.

$$R_{y1} = \frac{S_{ae1}}{a_{y1}} \quad (4.10)$$

Denklem 4.9’den bulunan  $C_{R1}$  kullanılarak, Denklem 4.6’ya göre hesaplanan  $S_{d1}$  esas alınarak eşdeğer akma noktasının koordinatları, Şekil 4.4’de gösterildiği üzere, eşit alanlar kuralı ile yeniden belirlenir ve bunlara göre  $a_{y1}$ ,  $R_{y1}$  ve  $C_{R1}$  tekrar

hesaplanır. Ardışık iki adımda elde edilen sonuçların kabul edilebilir ölçüde birbirlerine yaklaştıkları adımda ardışık yaklaşıma son verilir.



**Şekil 4.5 :** Performans noktasının belirlenmesi ( $T_1^{(1)} < T_B$ )

Son itme adımı  $i = p$  için Denk.(4.5)' e göre belirlenen modal yer değiştirme istemi  $d_1^{(p)}$ 'nin Denk.(4.3)'de yerine konulması ile  $x$  deprem doğrultusundaki tepe yer değiştirmesi istemi  $u_{xN1}^{(p)}$  elde edilir.

$$u_{xN1}^{(p)} = \Phi_{xN1} \Gamma_{x1} d_1^{(p)} \quad (4.11)$$

Buna karşı gelen diğer tüm istem büyüklükleri (yer değiştirme, şekil değiştirme ve iç kuvvet istemleri) mevcut itme analizi dosyasından elde edilir veya tepe yer değiştirmesi istemine ulaşıncaya kadar yapılan yeni bir itme analizi ile hesaplanır.

Hesap Adımları:

- a) Gerekli çalışmalar yapılarak bina bilgi düzeyi belirlenir.
- b) Analizde elemanların etkin eğilme rijitliği kullanılacağından, kolon ve perdedeki normal kuvvet değerlerinin belirlenmesi amacıyla, çatlamamış kesitlerin kullanıldığı model üzerinde deprem hesabında kullanılacak kütlelerle uyumlu düşey yükler altında analiz yapılarak düşey taşıyıcı elemanların normal kuvvet değerleri hesaplanır. Hesaplanan normal kuvvet seviyesine göre düşey taşıyıcıların etkin eğilme rijitliği belirlenir.

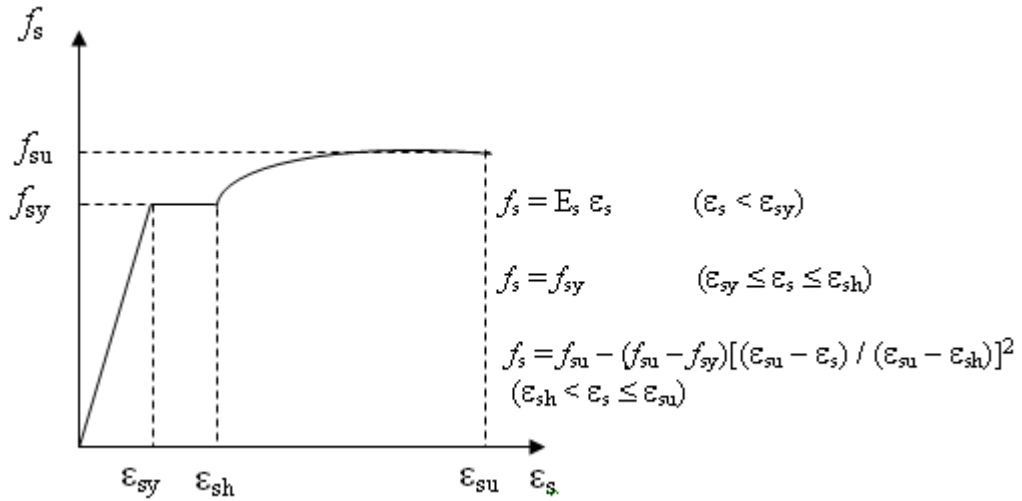
- c) Etkin eğilme rijitliklerinin kullanıldığı ve plastik mafsall oluşması beklenen elemanların kesitlerine potansiyel plastik mafsallar tanımlanarak sistem modeli oluşturulur.
- d) İtme analizinde kullanılacak yük dağılımını belirlemek için sistemin periyot hesabı yapılır. Sistemin deprem doğrultusundaki hakim periyodunun sistem üzerindeki yük dağılımı belirlenir.
- e) İtme analizinden önce, kütlelerle uyumlu düşey yüklerin göz önüne alındığı doğrusal olmayan statik analiz yapılır. Bu analizin sonuçları artımsal itme analizinin başlangıç koşulları olarak dikkate alınır.
- f) Sistem elde edilen yük dağılımı altında öngörülen herhangi bir yatay yer değiştirme değerine kadar itilir. (bina yüksekliğinin %2-4'ü olabilir.)
- g) Yapılan itme analizi ile koordinatları 'tepe yer değiştirmesi – taban kesme kuvveti' olan itme eğrisi elde edilir. İtme eğrisine uygulanan koordinat dönüşümü ile, koordinatları 'modal yer değiştirme – modal ivme' olan modal kapasite diyagramı elde edilir.
- h) İtme analizi sonucunda elde edilen modal kapasite diyagramı ile elastik davranış spektrumu göz önüne alınarak birinci moda ait maksimum modal yer değiştirme, diğer bir deyişle modal yer değiştirme istemi hesaplanır.
- i) Son itme adımı için tepe noktası yer değiştirmesi istemi hesaplanır ve yapı sistemi elde edilen bu yer değiştirme istemine kadar itilir.
- j) İtme analizi sonucunda tüm kritik kesitlerdeki plastik mafsall dönmeleri plastik mafsall boyuna bölünerek plastik eğrilik istemleri hesaplanır. Hesaplanan plastik eğrilikler akma eğrilikleri ile toplanarak toplam eğrilik istemleri belirlenir.
- k) Her bir plastik kesitte, uygun beton ve donatı çeliği modeli kullanılarak kesit analizi yapılır ve toplam eğriliklere karşı gelen beton birim kısalması, donatı çeliği birim boy uzaması hesaplanır. Bu işlemler deprem doğrultusunun diğer yönü içinde yapılarak hesaplanan birim boy değişimleri yönetmeliklerdeki sınır değerlerle karşılaştırılarak eleman hasar seviyeleri belirlenir.

#### 4.5.2.3 Kesitteki birim şekil değiştirme istemlerinin belirlenmesi

Doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre hesaplanan taşıyıcı sistemlerde, herhangi bir kesitte elde edilen  $\theta_p$  plastik mafsal dönmesine bağlı olarak, plastik eğrilik istemi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\Phi_p = \theta_p / L_p \quad (4.12)$$

Betonarme sistemlerde betonun basınç birim şekil değiştirmesi istemi ile donatı çeliğindeki birim şekil değiştirme istemi, Denk.(4.13) ile tanımlanan toplam eğrilik istemine göre, ilgili kesitte aşağıda verilen beton ve donatı çeliği modelleri kullanılarak elde edilen moment-eğrilik ilişkisinden hesaplanabilir.



Şekil 4.6 : Donatı çeliği davranış modeli

Betonda Mander modelinin [23], donatı çeliğinde Şekil (4.6)'da tanımlanan modelinin esas alınması uygun olmaktadır.

Çizelge 4.2 : Donatı çeliği için gerilme – şekil değiştirme bağıntısı

Kalite	$\epsilon_{sy}$	$\epsilon_{sh}$	$\epsilon_{su}$	$f_{sy}$ [MPa]	$f_{su}$ [Mpa]
S220	0.0011	0.011	0.16	220	275
S420	0.0021	0.008	0.10	420	550

Yukarıda belirtilen beton ve çelik modelleri kullanılarak elde edilen iki doğrulu moment eğrilik ilişkisi ile tanımlanan  $\Phi_y$  eşdeğer akma eğriliği, Denk.(4.12) ile tanımlanan  $\Phi_p$  plastik eğrilik istemine eklenerek, kesitteki  $\Phi_t$  toplam eğrilik istemi elde edilmektedir:

$$\Phi_t = \Phi_y + \Phi_p \quad (4.13)$$

Beton ve donatı çeliğinin birim şekil değiştirmeleri cinsinden elde edilen deprem istemleri, aşağıda tanımlanan birim şekil değiştirme kapasiteleri ile karşılaştırılarak kesit bazında taşıyıcı sistem performansı belirlenebilir.

#### 4.5.2.4 Betonarme elemanların kesit birim şekil değiştirme kapasiteleri

Plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği sünek betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında, performans düzeylerine göre izin verilen şekil değiştirme sınırları (kapasiteleri) aşağıda tanımlanmıştır.

a) *Minimum Hasar Sınırı (MN)* için beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 \quad (\varepsilon_s)_{MN} = 0.010 \quad (4.14)$$

b) *Kesit Güvenlik Sınırı (GV)* için beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01 \cdot (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135 \quad (\varepsilon_s)_{GV} = 0.040 \quad (4.15)$$

c) *Kesit Göçme Sınırı (GÇ)* için beton basınç birim şekil değiştirmesi ile donatı çeliği birim şekil değiştirmesi üst sınırları:

$$(\varepsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014 \cdot (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018 \quad (\varepsilon_s)_{GC} = 0.060 \quad (4.16)$$

değerleri önerilmektedir.

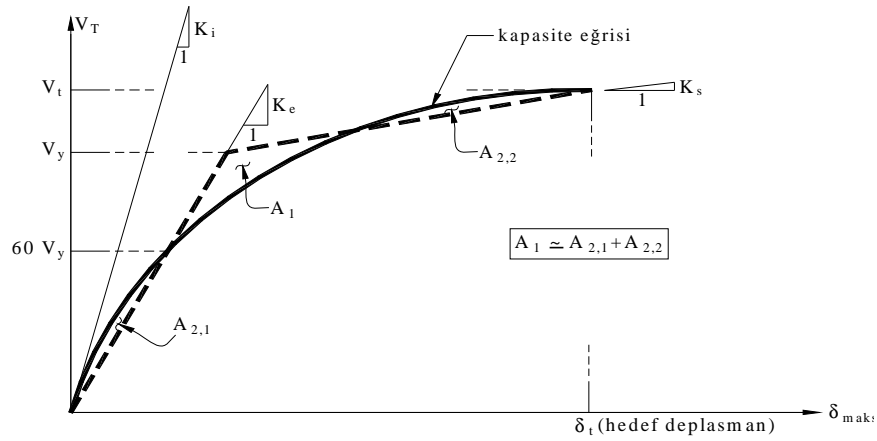
#### 4.5.3 Yer değiştirme katsayısı yöntemi (Displacement Coefficient Method, FEMA 356)

Deplasman katsayısı yöntemi (FEMA 356) deplasman talebinin hesaplanması için direkt nümerik çözüm sağlar, [8, 9]. Bu durumda, kapasite eğrisinin kapasite spektrumuna dönüştürülmesine de gerek olmamaktadır.

Deplasman katsayısı yönteminde önce  $V_T$  taban kesme kuvveti ile  $\delta_{max}$  tepe noktası yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi belirleyen kapasite eğrisi elde edilir. Kapasite eğrisinin çizilmesinde, yapının birinci doğal periyoduna ve etkin olan modlara bağlı olarak uygun bir yatay yük dağılımı seçilir. Sabit düşey yükler ve orantılı olarak artan yatay yükler altında, doğrusal olmayan teoriye göre hesap yapılarak kapasite eğrisi elde edilir. Daha sonra bu eğri, birincisinin eğimi elastik rijitliği ( $K_e$ ),



ikincisinin eğimi ise elastoplastik rijitliği ( $K_s$ ) temsil eden iki doğru parçasından oluşacak şekilde idealleştirilir. İdealleştirme yapılırken, gerçek ve idealleştirilmiş kapasite diyagramlarının altında kalan alanların eşit olması ve  $K_e$  eğimli doğrunun kapasite eğrisini kestiği noktanın ordinatının,  $K_e$  ve  $K_s$  eğimli doğruların kesiştiği noktanın ordinatının 0.60 katı olması koşulları esas alınır. Ancak iki doğrunun kesim noktası başlangıçta bilinmediğinden, bir deneme-yanılma yöntemi uygulanması gerekir, Şekil 4.7.



**Şekil 4.7 :** İki doğru parçası ile idealleştirilmiş kapasite eğrisi

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

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (4.17)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Yapı sisteminin  $T_e$  etkin doğal periyodu bulunduktan sonra, hedef yer değiştirme

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (4.18)$$

formülü ile elde edilir. Bu formüldeki katsayı ve büyüklükler aşağıda tanımlanmıştır.

$C_0$  :Çok serbestlik dereceli sistemin tepe noktasının yatay yer değiştirmesi ile eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin spektral yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi oluşturan modal katılım katsayısı

- $C_1$  :Doğrusal elastik yer değiştirmeyi, beklenen maksimum inelastik yer değiştirmeye dönüştüren düzeltme katsayısı
- $C_2$  :Histeresiz enerji şeklinin etkisini hesaba katan düzeltme katsayısı
- $C_3$  :İkinci mertebe etkileri nedeniyle artan yer değiştirmelerin etkisini göz önüne alan düzeltme katsayısı
- $S_a$  :Göz önüne alınan yapının etkin doğal periyoduna ve sönüm oranına bağlı olarak belirlenen ve  $g$  yerçekimi ivmesini de içeren spektral ivmedir.

Hedef yer değiştirmenin bulunması için bir ardışık yaklaşım yolunun izlenmesi gerekmektedir. Başlangıçta seçilen ve  $T_e$  etkin doğal periyodunun hesabına esas olan  $\delta_t$  yer değiştirmesi ile hesap sonucunda bulunan değerlerin eşit veya birbirine yeterince yakın olması halinde hedef yer değiştirme bulunmuş olur ve ardışık yaklaşıma son verilir.

Öngörülen deprem etkisi altındaki hedef yer değiştirme bulunduktan sonra, performans hedefinin gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilir. Bunun için, sisteme ait büyüklüklerin (yer değiştirmeler, plastik şekil değiştirmeler, v.b.) değerleri kendilerine ait sınır değerler ile karşılaştırılır.

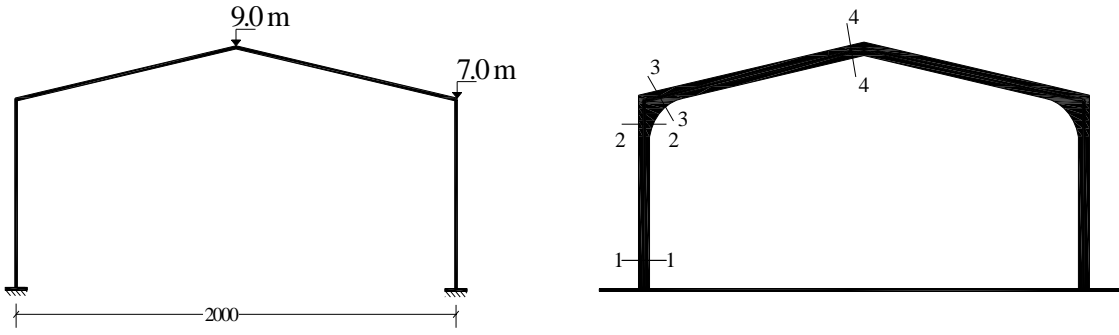
## **5. TEK KATLI BETONARME PREFABRİKE ENDÜSTRİ YAPILARININ PERFORMANS ANALİZİ**

### **5.1 Giriş**

Bu bölümde, tek katlı, kolonları alttan ankastre betonarme prefabrike endüstri yapılarını temsil etmek üzere seçilen iki ayrı çerçeve tipinde sistemin deprem etkileri altındaki doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının ve performans düzeylerinin belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal incelemeler yer almaktadır. Yapı sistemine etkileyen düşey yükler ve deprem yükleri ile bunlara uygulanacak yük katsayıları TS498, TS500 standartlarına [24], [25] 2007 ve 1998 Türk Deprem Yönetmeliklerine [11] , [12] göre belirlenmiştir.

### **5.2 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Boyutlandırılan Kırıklı Çerçeve Şeklinde Betonarme Prefabrike Bir Sistemin Performans Analizi**

Bu bölümde, kırıklı çerçeve şeklinde örnek bir betonarme prefabrike endüstri yapısı incelenmiştir. Boyutlandırılan taşıyıcı sistemin beton sınıfı C30, beton çeliği sınıfı S420 olarak seçilmiştir. İncelenen sistem, taşıyıcı sistem davranış katsayısı çerçeve doğrultusunda  $R=7$  ve çerçeveye dik doğrultuda  $R=3$  değeri için TDY'07 deki yer değiştirme kriterleri göz önüne alınarak boyutlandırılmış, boyutlandırılan sistemin deprem etkileri altındaki performansı, doğrusal elastik hesap yöntemlerinden *Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi*, doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinden, 2007 Türk Deprem Yönetmeliğindeki *Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi* [11] ve FEMA356'da yer alan *Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi* [9] ile belirlenmiştir.



**Şekil 5.1** : Seçilen betonarme prefabrikte endüstri yapısı

### 5.2.1 Sistemin boyutlandırılması

Yapı sisteminin boyutlandırılmasında, kolonların ve kirişlerin brüt enkesit rijitlikleri göz önüne alınmıştır. Buna karşılık, çerçevenin yapısal kapasite eğrisinin elde edilmesinde ve performans hedefinin belirlenmesinde çatlama enkesit rijitliğine göre hesap yapılmaktadır. Çeşitli kaynaklarda, normal kuvvetin değerine bağlı olarak, öngörülen çatlama kesit rijitlik değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1** : Normal kuvvete bağlı çatlama kesit eğilme rijitlikleri

FEMA 356	$N \leq 0,3.A_c.f_{ck}$	$EI = 0,5.E_c.I_g$
	$N \leq 0,5.A_c.f_{ck}$	$EI = 0,7.E_c.I_g$
TDY’07	$N \leq 0,1.A_c.f_{ck}$	$EI = 0,4.E_c.I_g$
	$N \leq 0,4.A_c.f_{ck}$	$EI = 0,8.E_c.I_g$

$A_c$ : Brüt enkesit alanını,

$f_{ck}$ : Betonun karakteristik basınç dayanımını,

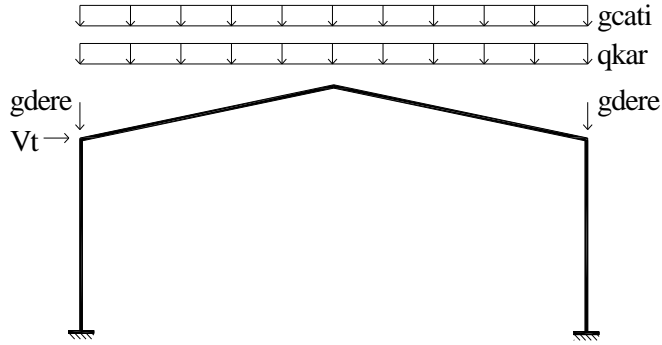
$E_c$ : Betonun elastisite modülünü,

$I_g$ : Brüt enkesitin eylemsizlik momentini göstermektedir.

Sistemin boyutlandırılmasında ve analizinde aşağıdaki veriler kullanılmıştır:

Deprem Bölgesi	: 1
Etkin yer ivmesi katsayısı ( $A_0$ )	: 0,40
Yerel zemin sınıfı	: Z3
Spektrum karakteristik periyotları	: $T_A = 0,15$ sn $T_B = 0,60$ sn
Bina önem katsayısı (I)	: 1
Hareketli yük katılım katsayısı(n)	: 0,30
Beton sınıfı ve karakteristikleri	: C30 $f_{ck} = 30$ MPa $E_c = 32000$ MPa
Beton çeliği sınıfı ve karakteristikleri	: S420 $f_{yk} = 420$ MPa $E_s = 210000$ MPa
Çatı yükleri ( $g_{çatı}$ )	: 2,0 kN/m
Kar yükleri ( $q_{kar}$ )	: 4,5 kN/m
Dere öz ağırlığı	: 7,2 kN

Boyutlandırmada esas alınan düşey yapı yükleri ve kar yükleri ile yatay deprem kuvvetleri Şekil 5.2’te gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Tasarıma esas olan yükler

### **X Doğrultusu için hesap:**

$$W=223,12 \text{ kN}$$

$$T_x = 0,512 \text{ sn} \quad T_A \leq T \leq T_B \quad \text{olduğundan spektrum katsayısı}$$

$$S(T_x) = 2,5 \text{ değerini alır.}$$

$T = 0,512 \text{ sn} > T_A = 0,15 \text{ sn}$  olduğundan deprem yükü azaltma katsayısı

$R_a(T) = R = 7$  olarak hesaba katılır.

$$A(T) = A_0 \cdot I \cdot S(T) = 1,0$$

$$V_t = W \cdot A(T_1) / R_a(T_1) = 223,12 \times 1,0 / 7 \cong 32,0 \text{ kN}$$

Narinliğin önemli olduğu durumlarda, birinci mertbe teorisine göre yapılan çerçeve çözümlemesi sonucu bulunan kesit tesirlerinin, ikinci mertbe etkilerini de içerecek şekilde yeniden hesaplanması ve bu değerlerin boyutlandırılmada kullanılması gerekir.

$\beta_s = 1 / (1 - 1,3 \sum N_d / \sum N_k)$  Tüm kattaki kolonlar için moment büyütme katsayısı

$\beta = C_m / (1 - 1,3 N_d / N_k)$  Kolonların bireysel moment büyütme katsayısı

$$\beta = \max(\beta_s, \beta)$$

$C_m$  : Burkulmada moment katsayısı. Yanal öteleme önlenmemiş sistemlerde  $C_m = 1$  değerini alır.

$N_d$  : Tasarım eksenel kuvveti yük kombinasyonlarına göre ele alınacaktır.

$N_k$  : Kolon burkulma yükü Denk.(5.1) ile hesaplanabilir.

$$N_k = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_k^2} \quad (5.1)$$

$$(EI) = \frac{0,4 \cdot E_c \cdot I_c}{1 + R_m} \quad (5.2)$$

$$R_m = \frac{N_{gd}}{N_d} \text{ Yanal ötelenmesi önlenmiş sistemlerde sünme katsayısı} \quad (5.3a)$$

$$R_m = \frac{\sum V_{gd}}{\sum V_d} \text{ Yanal ötelenmesi önlenmemiş sistemlerde sünme katsayısı} \quad (5.3b)$$

$N_{gd}$  : Tasarım eksenel kuvvetinin kalıcı yükten kaynaklanan bölümü

$V_{gd}$  : Tasarım kesme kuvvetinin kalıcı yükten kaynaklanan bölümü

$V_d$  : Tasarım kesme kuvveti

$l_k$  : Kolon burkulma boyu

$$V_{gd} = 36 \text{ kN} \quad V_d = 95 \text{ kN}$$

$$R_m = 0,38 \quad EI = 33855 \text{ kNm}^2$$

$$N_k = 3031 \text{ kN}$$

$$\sum N_k = 2 \times 3031 = 6062 \text{ kN}$$

Belirtilen yükleme kombinasyonlarında tüm kattaki kolonlar için hesaplanan moment büyütme katsayıları  $\beta_s$ , Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.2 :** X Doğrultusu için tüm kattaki kolonların moment büyütme katsayıları

$\sum N_k = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_k^2} = 6062 \text{ kN}$	kN	$\sum N_d < 0,45 \sum N_k$	$\beta_s = 1/1 - 1,3 \frac{\sum N_d}{\sum N_k}$
1-) $\sum N_d = 1,4 \sum N_g + 1,6 \sum N_q$	418	√	1,10
2-) $\sum N_d = \sum N_g + \sum N_q + \sum N_e$	286	√	1,07
3-) $\sum N_d = 0,9 \sum N_g + \sum N_e$	177	√	1,04

Kolonların  $\beta$  bireysel moment büyütme katsayıları Çizelge 5.3’te verilmiştir.

**Çizelge 5.3 :** X Doğrultusu için kolonların bireysel moment büyütme katsayıları

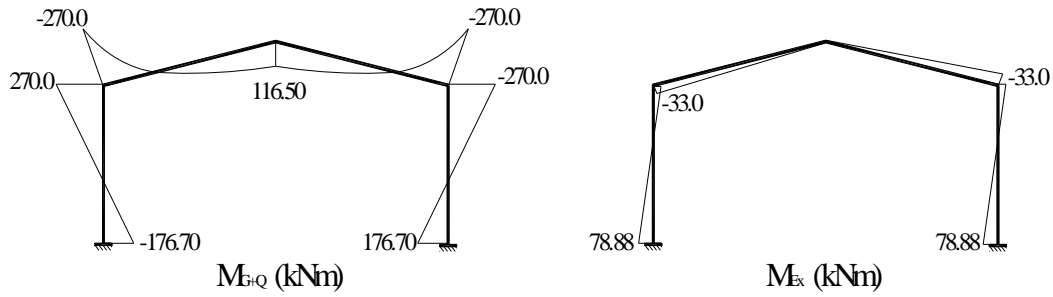
$N_k = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_k^2} = 3031 \text{ kN}$	kN	$\beta_s = C_m / 1 - 1,3 \frac{N_d}{N_k}$
1-) $N_d = 1,4 N_g + 1,6 N_q$	209	1,10
2-) $N_d = N_g + N_q + N_e$	143	1,07
3-) $N_d = 0,9 N_g + N_e$	88,5	1,04

Hesaplarda kullanılacak olan moment büyütme katsayıları Çizelge 5.4’de yer almaktadır.

**Çizelge 5.4 :** X Doğrultusu için hesaplarda kullanılan  $\beta$  moment büyütme katsayıları

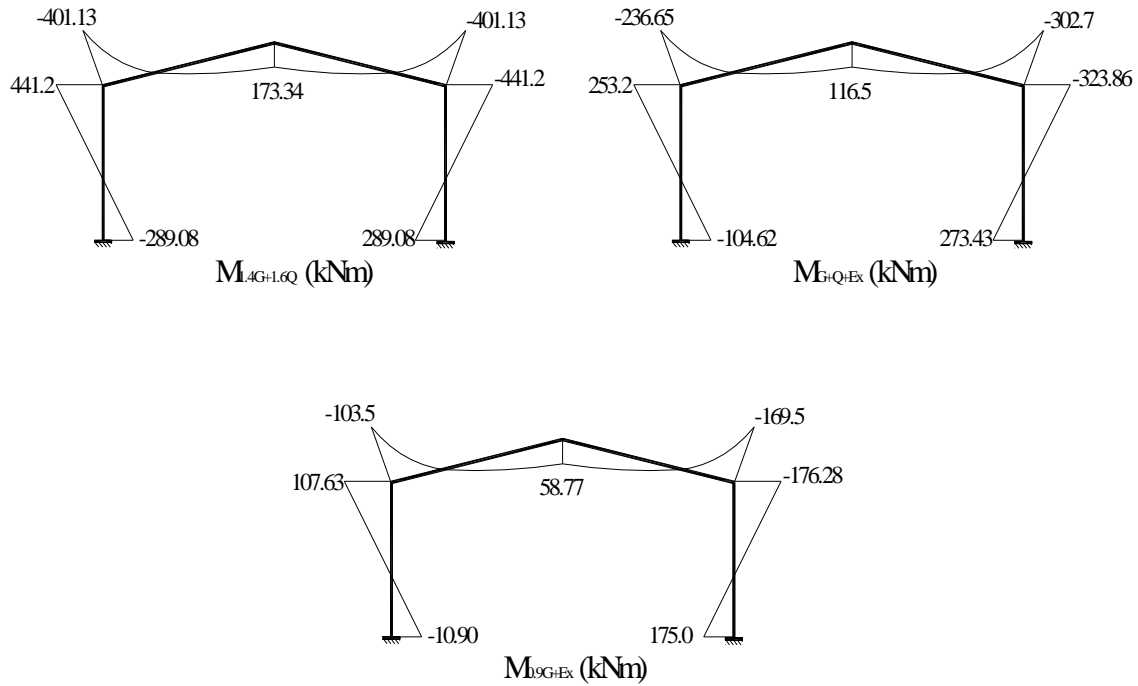
$\beta = \max(\beta_s; \beta)$	$\beta$
1-) 1,4G + 1,6Q	1,10
2-) G + Q + E <sub>x</sub>	1,07
3-) 0,9G + E <sub>x</sub>	1,04

Yapı yükleri ve hareketli yükler ile tasarım deprem yükünün oluşturduğu moment diyagramı Şekil 5.3'te verilmiştir.



**Şekil 5.3 :**  $M_{G+Q}$  ve  $M_{Ex}$  diyagramları

(1,4G+1,6Q), (1,0G+1,0Q+1,0E) ve (0,9G+1,0E) yük kombinasyonları için moment büyütme katsayısıyla arttırılmış eğilme momenti değerleri Şekil 5.4'teki sistem şeması üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 5.4 :** Moment kombinasyonlarının  $\beta$  ile arttırılmış değerlerinin diyagramları

İncelenen taşıyıcı sistem, deprem yüklerinden oluşan yatay yer değiştirmesi  $\delta = 0,009m$  değerini almaktadır. Buna göre boyutlandırılan sistemin yer değiştirme kriterlerini sağladığı aşağıdaki bağıntılarda görülmektedir.

$$\frac{\delta}{h} = 1,286 \times 10^{-3} < \frac{0,02}{7} = 2,857 \times 10^{-3}$$



### Y Doğrultusu için hesap:

$T_y = 1,230$  sn  $T_y > T_B$  olduğundan spektrum katsayısı

$$S(T_y) = 2,5 \left( \frac{T_B}{T} \right)^{0,8} = 1,408 \text{ değerini alır.}$$

$T_y = 1,230$  sn  $> T_A = 0,15$  olduğunda deprem yükü azaltma katsayısı

$R_a(T) = R = 3$  olarak hesaba katılır.

$$A(T) = 0,563 \quad V_t \cong 42,0kN$$

Yatay ötelenmesi önlenmemiş bu sistemde sünme katsayısı  $R_m = 0$  ve  $EI = 22861$   $kNm^2$  değerlerini alır.

$$N_k = 1151kN$$

$$\sum N_k = 2 \times 1151 = 2302kN$$

Belirtilen yükleme kombinasyonlarında tüm kattaki kolonlar için hesaplanan moment büyütme katsayıları  $\beta_s$ , Çizelge 5.5’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.5 :** Y Doğrultusu için tüm kattaki kolonların moment büyütme katsayıları

$\sum N_k = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_k^2} = 2302kN$	kN	$\sum N_d < 0,45 \sum N_k$	$\beta_s = 1/1 - 1,3 \frac{\sum N_d}{\sum N_k}$
1-) $\sum N_d = 1,4 \sum N_g + 1,6 \sum N_q$	418	√	1,31
2-) $\sum N_d = \sum N_g + \sum N_q + \sum N_e$	286	√	1,19
3-) $\sum N_d = 0,9 \sum N_g + \sum N_e$	177	√	1,11

Kolonların  $\beta$  bireysel moment büyütme katsayıları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

**Çizelge 5.6 :** Y Doğrultusu için kolonların bireysel moment büyütme katsayıları

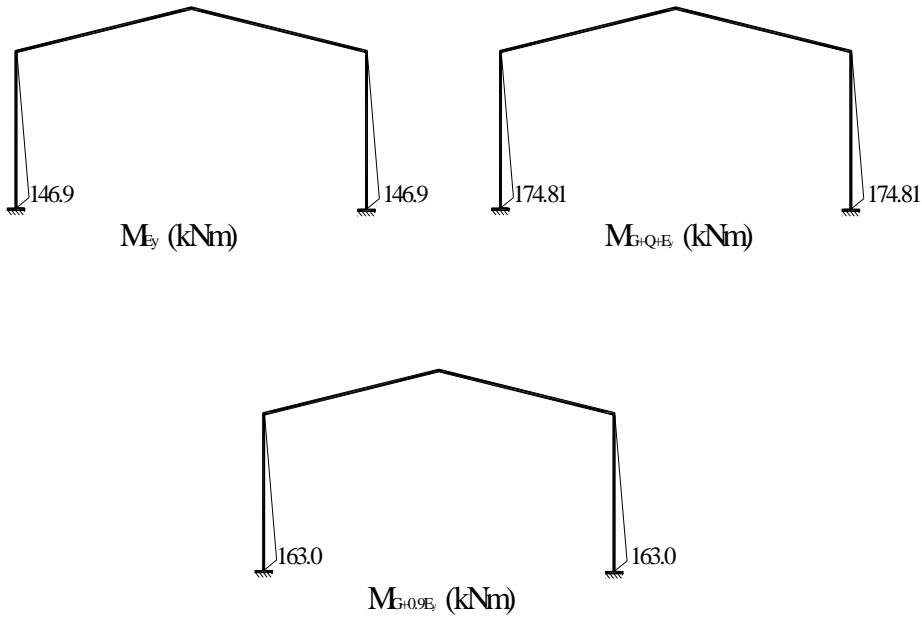
$N_k = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_k^2} = 1151kN$	kN	$\beta_s = C_m / 1 - 1,3 \frac{N_d}{N_k}$
1-) $N_d = 1,4N_g + 1,6N_q$	209	1,31
2-) $N_d = N_g + N_q + N_e$	143	1,19
3-) $N_d = 0,9N_g + N_e$	88,5	1,11

Hesaplarda kullanılacak olan moment büyütme katsayıları Çizelge 5.7’de yer almaktadır.

**Çizelge 5.7 :** Y Doğrultusu için hesaplarda kullanılan  $\beta$  moment büyütme katsayıları

$\beta = \max(\beta_s; \beta)$	$\beta$
1-) $1,4G + 1,6Q$	1,31
2-) $G + Q + E_v$	1,19
3-) $0,9G + E_v$	1,11

Tasarım deprem yükünün oluşturduğu moment diyagramı ve  $(1,0G+1,0Q+1,0E_y)$ ,  $(0,9G+1,0E_y)$  yük kombinasyonları için moment büyütme katsayısıyla arttırılmış eğilme momenti değerleri Şekil 5.5’de sistem şeması üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 5.5 :** Tasarım deprem yükü ve moment kombinasyonlarının  $\beta$  ile arttırılmış değerlerinin diyagramları

İncelenen taşıyıcı sistemin deprem yüklerinden oluşan yer değiştirmesi  $\delta = 0,043$  m değerini almaktadır. Buna göre boyutlandırılan sistemin yer değiştirme kriterlerini sağladığı aşağıdaki bağıntılardan izlenmektedir.

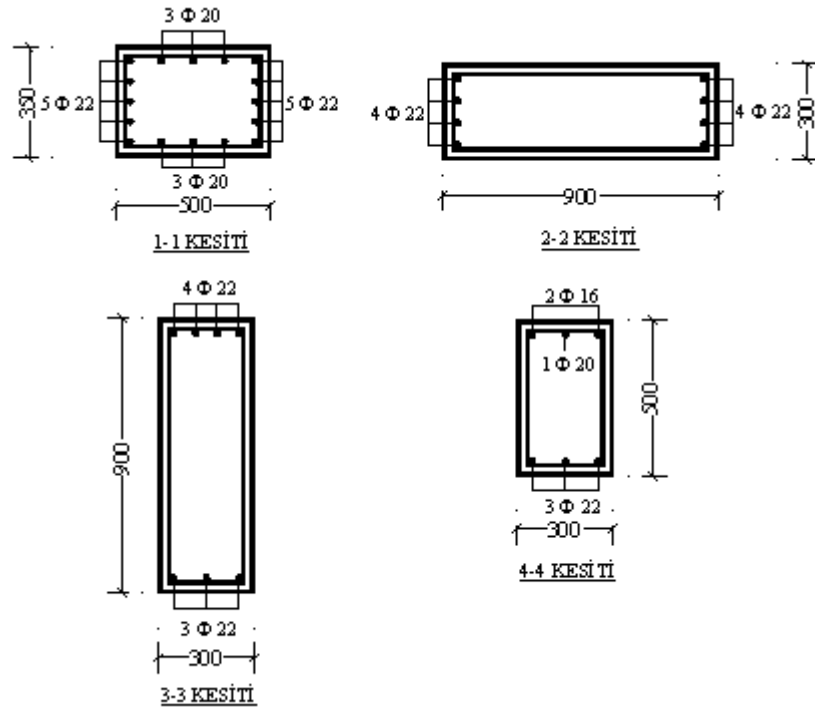
$$\frac{\delta}{h} = 6,143 \times 10^{-3} < \frac{0,02}{3} = 6,667 \times 10^{-3}$$

Yükleme kombinasyonlarından oluşan  $N_d$  ve  $M_d$  iç kuvvet değerlerine karşı gelen donatı gereksinimi ve seçilen boyuna donatılar Çizelge 5.8’de verilmiştir.

**Çizelge 5.8 : Seçilen donatılar**

Kesit	Yükleme	b (cm)	h (cm)	N <sub>d</sub> (kN)	M <sub>d</sub> (kNm)	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	Seçilen Donatı
1-1	1,4G+1,6Q	35	50	209,30	289,08	39,30	10Φ22 + 6Φ20
	G+Q+E <sub>x</sub>			146,36	273,43	36,94	
	0,9G+E <sub>x</sub>			91,55	175,0	22,44	
	G+Q+E <sub>y</sub>			146,36	174,81	34,48	
	0,9G+E <sub>y</sub>			91,55	163,0	31,86	
2-2	1,4G+1,6Q	30	90	165,60	441,20	30,20	8Φ22
	G+Q+E <sub>x</sub>			115,14	323,86	21,76	
	0,9G+E <sub>x</sub>			63,45	176,28	11,60	
	G+Q+E <sub>y</sub>			115,14	-	4,10	
	0,9G+E <sub>y</sub>			63,45	-	4,10	
3-3	1,4G+1,6Q	30	90	123,54	401,13	13,64	7Φ22
	G+Q+E <sub>x</sub>			83,72	302,70	10,14	
	0,9G+E <sub>x</sub>			42,84	169,50	5,57	
4-4	1,4G+1,6Q	30	50	93,0	173,34	11,27	3Φ22
	G+Q+E <sub>x</sub>			61,88	116,50	7,33	
	0,9G+E <sub>x</sub>			31,0	58,77	3,60	

Kolon ve kirişte seçilen donatıların yerleşimi Şekil 5.6'da görülmektedir.



**Şekil 5.6 : Donatıların yerleşim düzeni**

### 5.2.2 Çerçeve elemanlarına ait kesme kuvveti kapasitelerinin belirlenmesi

Kiriş kesme kuvveti kapasitesi:

$$V_r = 0,80.V_{cr} + V_w = 0,80.0,65.f_{ctk}.b_w.d + A_{sw}.f_{yk}.\frac{d}{s} \quad (5.4)$$

$$V_r = 0,80 \times 0,65 \times 1,90 \times 300 \times 870 + 79 \times 2 \times 420 \times \frac{870}{200}$$

$$V_r = 546,5kN$$

Kolon kesme kuvveti kapasitesi:

$$V_r = 0,80 \times 0,65 \times 1,90 \times 350 \times 470 + 79 \times 2 \times 420 \times \frac{470}{200}$$

$$V_r = 318,5kN$$

Kolonda normal kuvvet etkisi düzeyi:

$$N_{G+Q} / (A_c \cdot f_{ck}) = 143000 / (350 \times 500 \times 30) = 0,027$$

$$N_{r \max} = 0,5 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot h = 0,5 \times 30 \times 350 \times 500 = 2625kN$$

### 5.2.3 Kiriş moment kapasitesinin belirlenmesi

Eğilme momenti kapasiteleri Denk.(5.5) ve (5.6) kullanılarak taşıma gücü formülleri ile hesaplanabilir.

$$0,85 \cdot f_{ck} \cdot b_w \cdot a = A_s \cdot f_{yk} \quad (5.5)$$

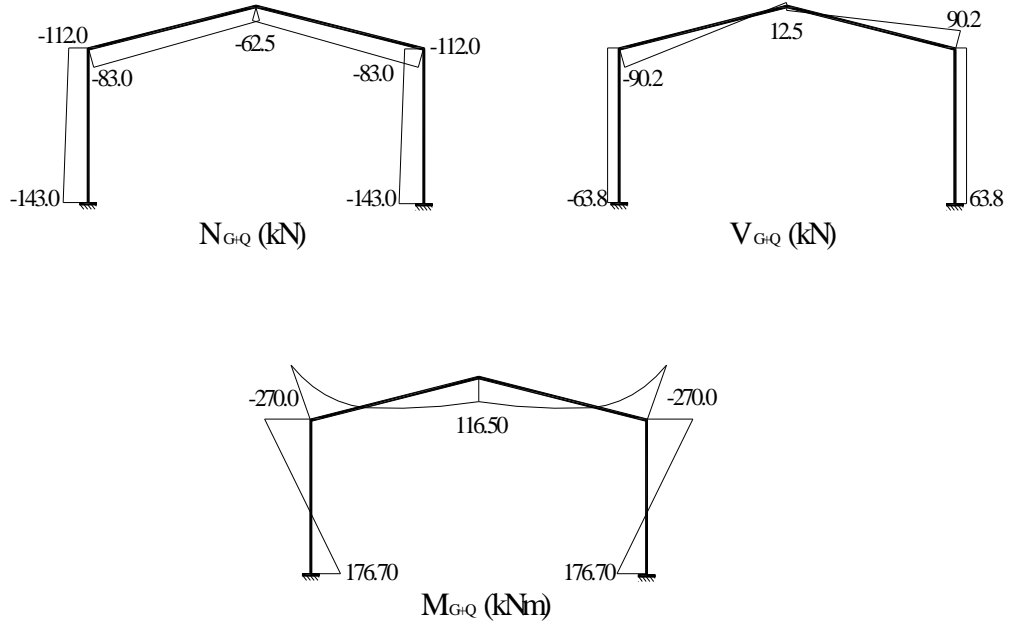
$$M_r = A_s \cdot f_{yk} \cdot (d - 0,5 \cdot a) \quad (5.6)$$

$$1521 \times 420 = 0,85 \times 30 \times 300 \times a \Rightarrow a = 83,50mm$$

$$M_r^- = 1521 \times 420 \times (870 - 0,5 \times 83,50) \Rightarrow M_r^- = 529kNm$$

$$1140 \times 420 = 0,85 \times 30 \times 300 \times a \Rightarrow a = 62,60mm$$

$$M_r^+ = 1140 \times 420 \times (870 - 0,5 \times 62,60) \Rightarrow M_r^+ = 402kNm$$



**Şekil 5.7 :** Sistemin düşey yükler altında normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment diyagramları

**Çizelge 5.9 :** Sistemde düşey yükler altında oluşan iç kuvvetler

Düşey Yükler Altında İç Kuvvetler (G+Q)			
Eleman Kritik Kesitleri	Normal Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
3-3	-83,0	$\mp 90,2$	-270,0
2-2	-112,0	+63,8	-270,0
1-1	-143,0	+63,8	+176,7

### 5.3 Doğrusal ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemlerle Deprem Performansının Belirlenmesi

#### 5.3.1 Doğrusal elastik hesap (Eşdeğer deprem yükü yöntemi)

##### X Doğrultusu için hesap:

Sistemin 1. titreşim modu  $T_1 = 0,495$  sn olarak hesaplanmıştır. Toplam eşdeğer deprem yükünün hesabında deprem yükü azaltma katsayısı ( $R_a = 1$ ) olarak uygulanır.

$$A_0 = 0,40 \quad \lambda = 1,0 \quad T_1 = 0,495 \text{ sn}$$

$$S(T_1) = 2,5 \quad A(T_1) = 1,0$$

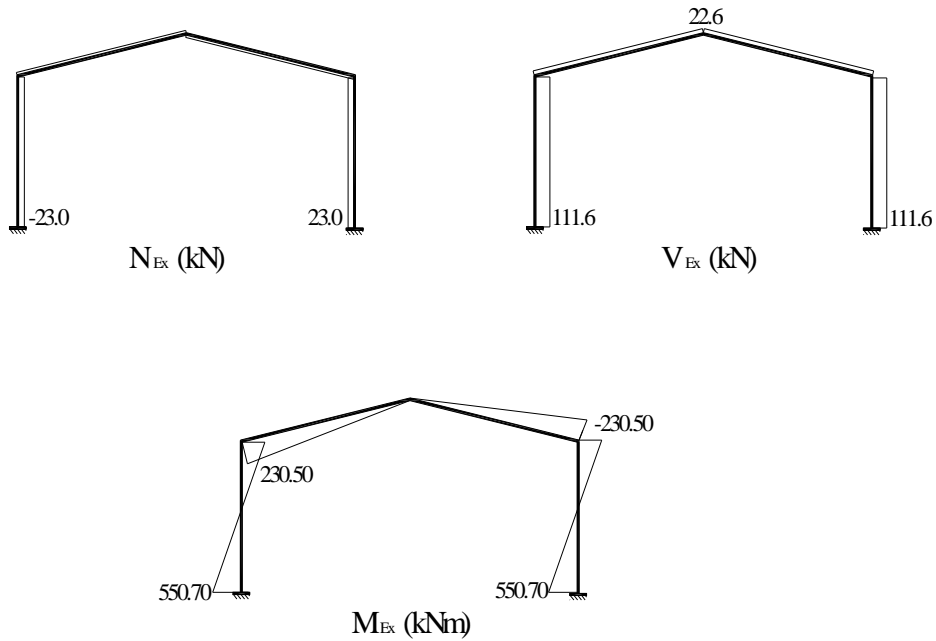
$$V_t = \frac{\lambda.W.A(T_1)}{R_a}$$

$$V_t = 223,0 \text{ kN}$$

$F_1 = F_2 = 111,5 \text{ kN}$  olarak eşdeğer deprem yükleri hesaplanarak sisteme etkilmiştir.

**Çizelge 5.10** : Sistemde deprem yükleri altında oluşan iç kuvvetler

Deprem Yükleri Altında İç Kuvvetler ( $E_x$ )			
Eleman Kritik Kesitleri	Normal Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
3-3	-	+22,6	$\mp 230,5$
2-2	$\mp 23,0$	+111,6	-230,5
1-1	$\mp 23,0$	+111,6	+550,7



**Şekil 5.8** : Sistemin deprem yükleri altında normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment diyagramları

Kiriş etki/kapasite oranı:

Dengeli durum:

$$\frac{x}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{(\epsilon_{cu} + \epsilon_y)} = \frac{3}{3 + 2,1} = 0,528$$

$$\rho_b = 0,85 \cdot k_1 \cdot k_x \cdot \frac{f_{ck}}{f_{yk}} = 0,85 \times 0,82 \times 0,588 \times \frac{30}{420} = 0,0293$$

$$M_r^+ = 402 \text{ kNm} \quad r = M_e / (M_r - M_d) = 0,34$$

$$M_r^- = -529 \text{ kNm} \quad r = M_e / (M_r - M_d) = 0,89$$

$$(\rho - \rho') / \rho_b = 0,05 \quad V_{g+q+e} / (b_w \cdot d \cdot f_{ctk}) = 0,23$$

Eğilme momenti kapasitesine karşı gelen kesme kuvveti:

$$\frac{M_{rsol} + M_{rsağ}}{l_n} + V_d = \frac{402 + 529}{3,35} + 90,2 = 368 \text{ kN} < V_r = 546,5 \text{ kN}$$

Kolon etki/kapasite oranı:

$$M_{ralt} = 360 \text{ kNm} \quad r_{alt} = M_e / (M_r - M_d) = 3$$

$$M_{rüst} = 529 \text{ kNm} \quad r_{üst} = M_e / (M_r - M_d) = 0,89$$

$$N_{g+q+e} / (A_c \cdot f_{ck}) = 0,032$$

$$\frac{M_{ralt} + M_{rüst}}{l_n} = \frac{360 + 529}{7} = 127 \text{ kN}$$

$$V_e / (b_w \cdot d \cdot f_{ctk}) = 0,41$$

Yatay yer değiştirme kontrolü:

$$\frac{\delta}{h} = \frac{0,063}{7} = 0,009$$

Y Doğrultusu için hesap:

Sistemin 1. titreşim modu  $T_1 = 1,230$  sn olarak hesaplanmıştır.

$$A_0 = 0,40 \quad \lambda = 1,0 \quad T_1 = 1,230 \text{ sn}$$

$$S(T_1) = 1,410 \quad A(T_1) = 0,563$$

$$V_t = \frac{\lambda \cdot W \cdot A(T_1)}{R_a} \quad V_t = 125,55 \text{ kN}$$

$F_1 = F_2 = 62,80$  kN olarak eşdeğer deprem yükleri hesaplanarak sisteme etkilmiştir.

Kolon etki/kapasite oranı:

$$M_{ralt} = 216 \text{ kNm} \quad r_{alt} = M_e / (M_r - M_d) = 2,04$$

$$N_{g+q+e}/(A_c \cdot f_{ck}) = 0,03$$

$$V_e/(b_w \cdot d \cdot f_{ctk}) = 0,21$$

Yatay yer değiştirme kontrolü:

$$\frac{\delta}{h} = \frac{0,1288}{7} = 0,0184$$

Kiriş ve kolon için hesaplanan etki/kapasite oranlarının ilgili sınır değerler ile karşılaştırılması suretiyle bu elemanların kesit hasar bölgeleri belirlenir.

### 5.3.2 Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi

Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü yönteminin amacı, birinci (deprem doğrultusunda hakim) titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde deprem istem limitine kadar monotonik olarak adım adım arttırılan eşdeğer deprem yüklerinin etkisi altında doğrusal elastik davranış esas alınarak hesaplanan birinci moda ait  $T_1$  başlangıç periyodunun karakteristik periyot  $T_B$ 'ye eşit veya daha uzun olması durumunda ( $T_1=T_B$ ) doğrusal elastik olmayan (nonlinear) spektral yer değiştirme  $S_{di,1}$ , eşit yer değiştirme kuralı uyarınca doğal periyodu yine  $T_1$  olan eşlenik doğrusal elastik sisteme ait lineer elastik spektral yer değiştirme  $S_{de,1}$ 'e eşittir. Denk.(5.7)

$$S_{di,1} = S_{de,1} \quad (5.7)$$

Taşıyıcı sistem üzerinde çatlamış kesit rijitliği brüt kesit rijitliğinin 0,40 katı olarak hesaplanmıştır.

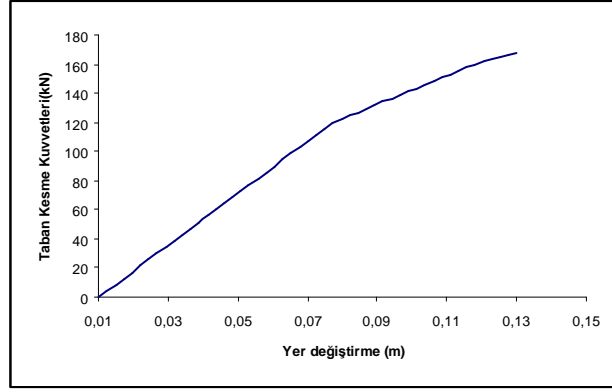
$$\text{Kiriş} = 0,40EI_0$$

$$\text{Kolon} = 0,40EI_0$$

Kolon ve kirişlerin her iki ucunda da plastik mafsallar tanımlanır. Daha sonra sisteme etki etkiletilecek olan eşdeğer deprem yükü dağılımı, deprem doğrultusundaki hakim doğal titreşim mod şekil genliği ile ilgili kütlelerin çarpımından elde edilen değerle orantılı olacak şekilde tanımlanır. Kütlelerle uyumlu düşey yüklerin göz önüne alındığı doğrusal olmayan analiz tekrarlanır. Daha sonra belirlenmiş olan eşdeğer deprem yüklerinin monotonik olarak adım adım arttırılması ile doğrusal olmayan itme analizi yapılır ve sistemin “tepe yer değiştirmesi” – “taban kesme kuvveti” değerleri elde edilir.



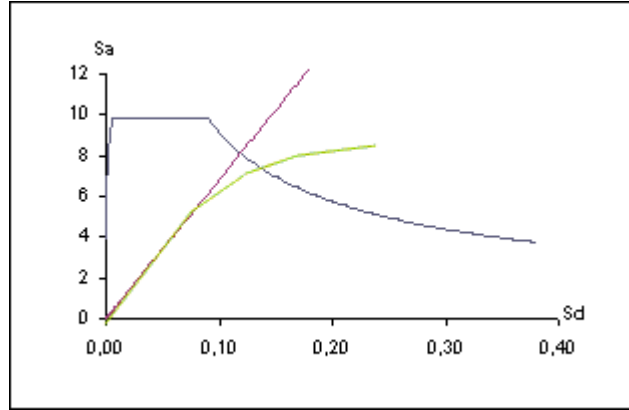
### X Doğrultusu için hesap:



Şekil 5.9 : X Doğrultusu statik itme eğrisi (TDY-07)

Çatlamış kesit rijitliği ile hesaplanan doğal periyot  $T_1 = 0,707$  sn bulunmuştur. Bu periyoda karşılık gelen eşlenik doğrusal elastik sistemin lineer elastik spektral yer

değiştirmesi  $S_{de,1} = \frac{S_{ae,1} \cdot g \cdot T_1^2}{4\pi^2} = 11,90cm$  olarak bulunur.



Şekil 5.10 : Spektral ivme- spektral yer değiştirme grafiği

Plastik mafsal boyu olan  $L_p$ , çalışan doğrultudaki kesit boyutu olan  $h$ 'nin yarısına eşit olmalıdır.

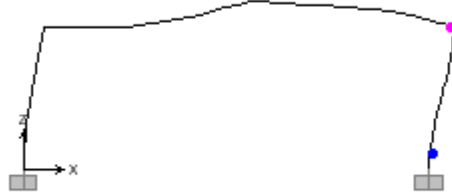
$$L_p = 0,5h$$

Doğrusal olmayan yöntemlere göre hesaplanan taşıyıcı sistemlerde, herhangi bir kesitte elde edilen  $\theta_p$  plastik mafsal dönmesine bağlı olarak, plastik eğrilik istemi Denk.(5.8)'deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\Phi_p = \theta_p / L_p \quad (5.8)$$

Beton ve çelik modelleri kullanılarak elde edilen iki doğrulu moment eğrilik ilişkisi ile tanımlanan  $\Phi_y$  eşdeğer akma eğriliği ile  $\Phi_p$  plastik eğrilik sistemine eklenerek kesitteki  $\Phi_T$  toplam eğrilik istemi elde edilir. Denk.(5.9).

$$\Phi_t = \Phi_y + \Phi_p \quad (5.9)$$



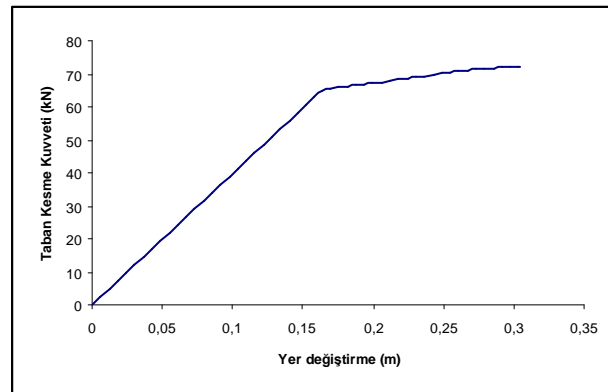
**Şekil 5.11 :** Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar

Bu esaslara göre kiriş ve kolonlarda oluşan toplam eğrilik istemini veren birim şekil değiştirmeler ile kesit bazında taşıyıcı sistem performansı belirlenmiş ve Çizelge 5.11 üzerinde gösterilmiştir.

**Çizelge 5.11 :** X Doğrultusu için TDY-07'e göre belirlenen performans seviyesi

Eleman	$\delta_d$ (cm)	$\Phi_t$	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	Perform. Seviyesi
Kiriş 3-3 Kesiti	11,90	0,0072	0,0048	-0,0012	MN
Kolon 1-1 Kesiti		0,0440	0,0124	-0,006	MN-GV

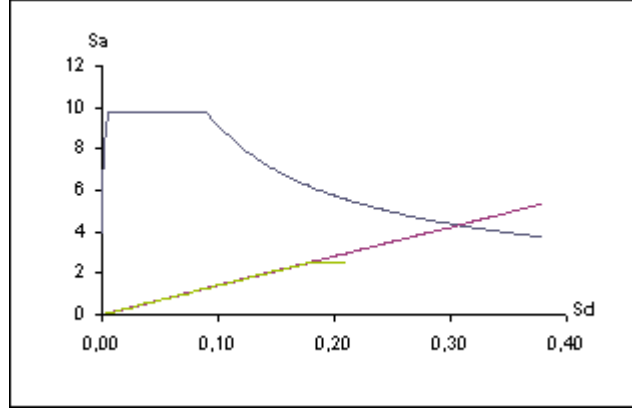
**Y Doğrultusu için hesap:**



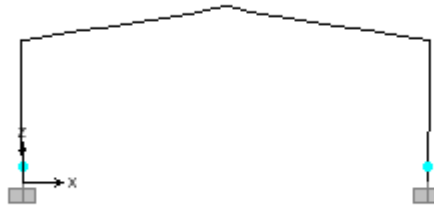
**Şekil 5.12 :** Y Doğrultusu için statik itme eğrisi (TDY-07)

Çatlamış kesit rijitliği ile hesaplanan doğal periyot  $T_1 = 1,830$  sn bulunmuştur. Bu periyoda karşılık gelen eşlenik doğrusal elastik sistemin lineer elastik spektral yer

değiştirme  $S_{de,1} = \frac{S_{ae,1} \cdot g \cdot T_1^2}{4\pi^2} = 30,50cm$  olarak bulunur.



Şekil 5.13 : Spektral ivme- spektral yer değiştirme grafiği



Şekil 5.14 : Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar

Çizelge 5.12 : Y Doğrultusu için TDY-07'e göre belirlenen performans seviyesi

Eleman	$\delta_d$ (cm)	$\Phi_t$	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	Perform. Seviyesi
Kolon 1-1 Kesiti	30,50	0,1095	0,0161	-0,0120	MN-GV

### 5.3.3 Deprem performansının FEMA 356' ya göre belirlenmesi

Kapasite eğrisi, yatay yük parametreleri ve bu yük parametrelerine karşı gelen yer değiştirmeler esas alınarak çizilebilir. FEMA 356'da açıklanan deplasman katsayısı yönteminde,  $V_t$  taban kesme kuvveti ile  $\delta_{max}$  tepe noktası yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi belirleyen kapasite eğrisinin çizilmesinin ardından bu eğrinin, birincisinin eğimi elastik rijitliği ( $K_e$ ), ikincisinin eğimi ise elastoplastik rijitliği ( $K_s$ ) temsil eden iki doğru parçasından oluşacak şekilde idealleştirilmesi gerekmektedir. İncelenen tek katlı betonarme prefabrike sistemin kapasite eğrisi iki doğrulu diyagrama yakın bir

eğri olduğundan idealleştirmeye gerek olmamaktadır. Seçilen sistemin normal kuvvet değerlerine bağlı olarak, başlangıçtaki elastik rijitliği ( $K_e$ ) ve elastoplastik rijitliği ( $K_s$ ) çatlamış kesit rijitliği olan brüt kesit rijitliğinin %50'sine eşit olmaktadır.

**X Doğrultusu için hesap:**

$T_i$  elastik doğal periyodu, çatlamış kesit rijitliği kullanılarak hesaplandığında;

$T_i = 0,670$  sn olarak bulunur.

Sistem  $T_e$  etkin doğal periyodu;

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0,670 \text{ sn} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Hedef deplasman FEMA 356'ya göre sayısal olarak hesaplanabilmektedir. Denk.(5.10) seçilen yapı sistemi için, hedef deplasman formülünde yer alan katsayıların açıklamaları ve aldıkları değerler aşağıda belirtilmiştir.

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} \tag{5.10}$$

$C_0$  : Modal katılım katsayısı, kat sayısına ve yük modeline bağlıdır.

$$C_0 = 1,0$$

$C_1$  : Doğrusal elastik yer değiştirmeyi, beklenen maksimum inelastik yer değiştirmeye dönüştüren düzeltme katsayısı

$$C_1 = 1,0 \quad T_e \geq T_B \tag{5.11a}$$

$$C_1 = \frac{1,0 + (R-1)T_s / T_e}{R} \quad T_e < T_B \tag{5.11b}$$

$C_2$  : Histeresiz enerji şeklinin etkisini hesaba katan düzeltme katsayısı

$$C_2 = 1,0$$

$C_3$  : İkinci mertebe etkileri nedeniyle artan yer değiştirmelerin etkisini göz önüne alan düzeltme katsayısı, pekleşme bölgesi eğimi pozitif olan yapılar için 1,0'dır.

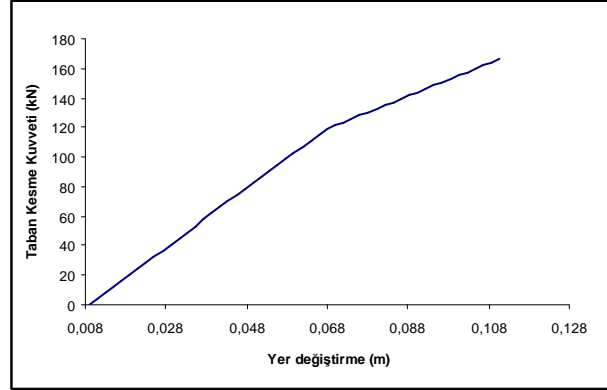
$$C_3 = 1,0$$

$S_a$  : Göz önüne alınan yapının etkin doğal periyoduna ve sönüm oranına bağlı olarak belirlenen ve g yerçekimi ivmesini de içeren spektral ivmedir.

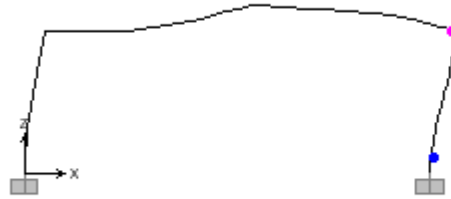
$$S(T_i) = 2,5 \left( \frac{T_B}{T} \right)^{0,8} = 2,289$$

$S_a = 0,4 \cdot S(T_i) = 0,916$  olduğu için hedef yer değiştirme;

$$\delta_i = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} = 0,102m \text{ olarak hesaplanır.}$$



**Şekil: 5.15** : X Doğrultusu için statik itme eğrisi (FEMA 356)



**Şekil 5.16** : Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar

Bu hedef yer değiştirme için sistem FEMA 356'ya göre belirlenen deprem performansı Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14 üzerinde gösterilmiştir.

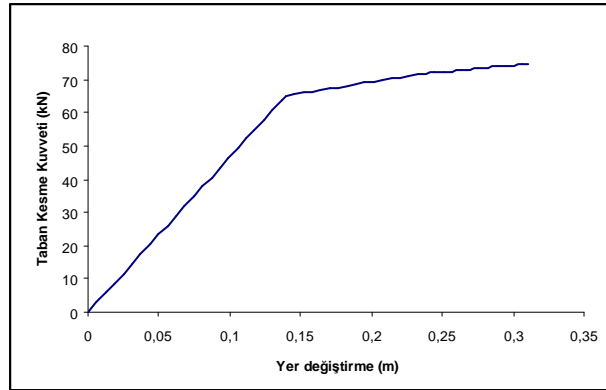
**Çizelge 5.13** : X Doğrultusu için FEMA 356'ya göre kiriş performans seviyesi

Kiriş	$\rho - \rho' / \rho$	$V / (b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}) < 3$	$\sum \theta_{p \max}$ (rad)	Perform. seviyesi
3-3 Kesiti	0,05	0,06	0,0004	IO

**Çizelge 5.14 : X Doğrultusu için FEMA 356'ya göre kolon performans seviyesi**

Kolon	$\frac{P}{A_g \cdot f'_c} < 0,1$	$V / (b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}) < 3$	$\sum \theta_{p \max}$ (rad)	$\delta_d$ (cm)	Perform. seviyesi
1-1 Kesiti	0,026	0,13	0,0076	10,2	IO-LS

**Y Doğrultusu için hesap:**



**Şekil 5.17 : Y Doğrultusu için statik itme eğrisi (FEMA 356)**

$T_e$  elastik doğal periyodu çatlamış kesit rijitliği kullanılarak hesaplandığında

$T_e=1,717$  sn olarak bulunur.

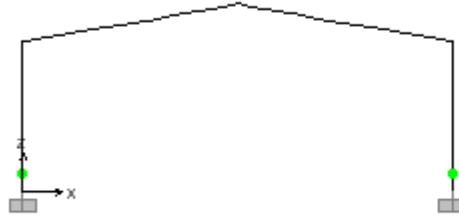
Sistem  $T_e$  etkin doğal periyodu;

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 1,717 \text{ sn} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

$$S(T_i) = 2,5(T_B / T)^{0,8} = 1,078$$

$$S_a = 0,4 \cdot S(T_i) = 0,431$$

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} = 0,315 \text{ m}$$



**Şekil 5.18 :** Statik itme analizi sonucu oluşan plastik mafsallar

Bu hedef yer değiştirme için, sistem FEMA 356'ya göre belirlenen deprem performansı Çizelge 5.15 üzerinde gösterilmiştir.

**Çizelge 5.15 :** Y Doğrultusu için FEMA 356'ya göre kolon performans seviyesi

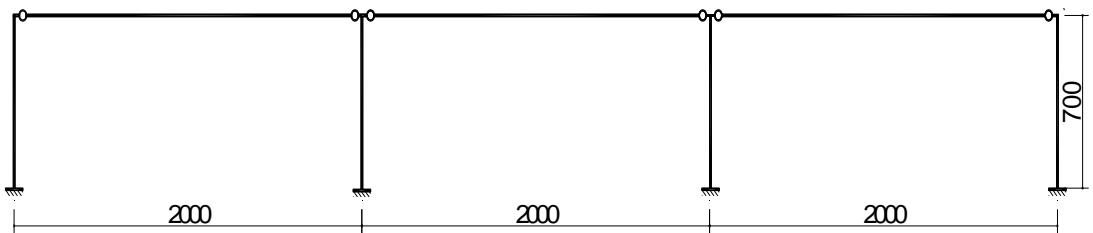
Kolon	$\frac{P}{A_g \cdot f'_c} < 0,1$	$V / (b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}) < 3$	$\sum \theta_{p \max}$ (rad)	$\delta_d$ (cm)	Perform. seviyesi
1-1 Kesiti	0,022	0,042	0,0215	31,5	>CP

#### 5.4 1998 Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Boyutlandırılan Alttan Ankastre Üstten Mafsallı Betonarme Prefabrike Bir Sistemin Performans Analizi

Çalışmanın bu bölümünde tek katlı, çok açıklıklı kolonları üstten mafsallı prefabrike bir yapının Doğrusal Elastik Hesap Yöntemi ve Doğrusal Elastik Olmayan Hesap Yöntemleri kullanılarak deprem performansı belirlenmiştir.

##### 5.4.1 Sistemin boyutlandırılması

İnceleme için seçilen sistem üç açıklıklı, tek katlı, kolonları temelde ankastre, üstte mafsallı betonarme prefabrike bir endüstri yapısıdır. Kolon yükseklikleri 7.0m, açıklıklar 3x20.0m, çerçeve aralığı 8.0m' dir, [13]. ( Şekil 5.19)

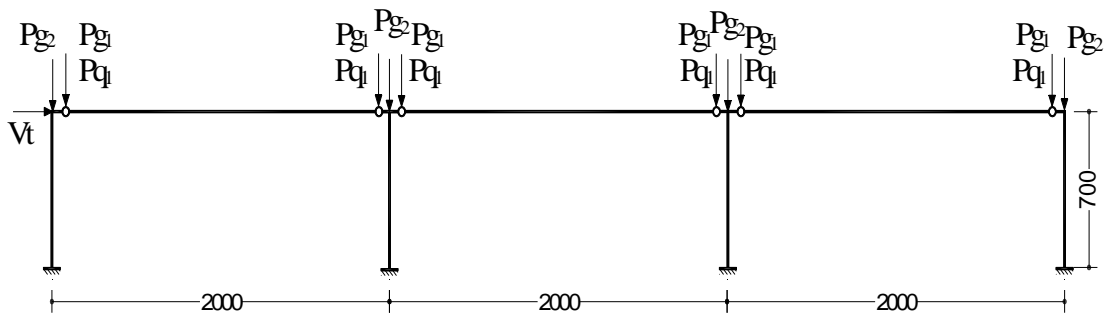


**Şekil 5.19 :** Seçilen betonarme prefabrike endüstri yapısı

Bu sayısal incelemede taşıyıcı sistem ve malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir.

Kolon enkesit boyutları (bxh)	: 0,50m x 0,50m
Deprem bölgesi	: 1
Etkin yer ivmesi katsayısı ( $A_0$ )	: 0,40
Yerel zemin sınıfı	: Z3
Spektrum karakteristik periyotları	: $T_A = 0,15$ sn $T_B = 0,60$ sn
Bina önem katsayısı (I)	: 1
Hareketli yük katılım katsayısı(n)	: 0,30
Beton sınıfı ve karakteristikleri	: C25 $f_{ck} = 25$ MPa $E_c = 30000$ MPa
Beton çeliği sınıfı ve karakteristikleri	: S420 $f_{yk} = 420$ MPa $E_s = 210000$ MPa
Çatı yükleri ( $P_{g1}$ )	: 84,6 kN
Kolon öz ağırlıkları ( $P_{g2}$ )	: 42,6 kN
Kar yükleri ( $P_{q1}$ )	: 60,0 kN

Tek katlı, üç açıklıklı betonarme prefabrike endüstri yapısında, çatıdan gelen düşey yüklerin bir bölümünün de kolonların üzerine etkidiği Şekil 5.20’de görülmektedir. Çatı yüklerinin öz ağırlık bölümü çatı makasının, aşıkların ve alüminyum sandviç panellerin öz ağırlıklarından, hareketli yük bölümü de kar yükünden oluşmaktadır. Mafsallar kolon eksenlerine 0.45m uzaklıkta olduğundan, yapı yükleri ve hareketli yüklerden dolayı kolonlarda eğilme momentleri meydana gelmektedir.

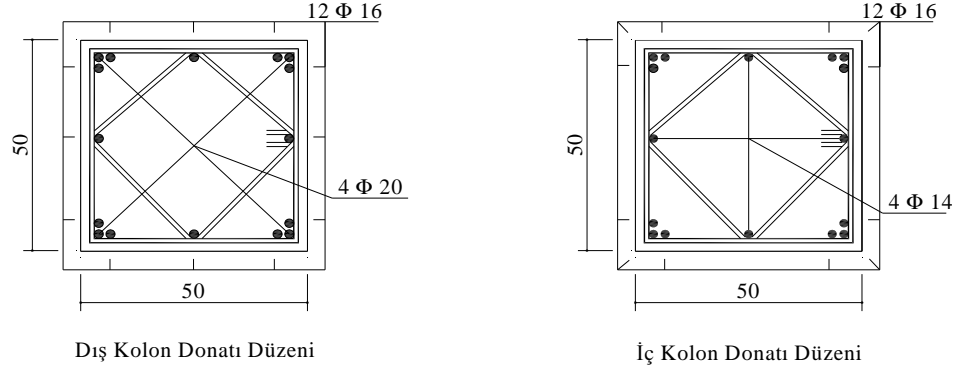


Şekil 5.20 : Çerçeve sistemin hesap modeli ve yükleme durumu



Yapı sisteminin boyutlandırılmasında, kolonların brüt enkesit rijitlikleri göz önüne alınmıştır. Buna karşılık, çerçevenin yapısal kapasite eğrisinin elde edilmesinde ve performans hedefinin belirlenmesinde çatlama enkesitin rijitliğine göre hesap yapılmaktadır.

TDY'98 yönetmeliğinin tasarım esaslarına ( $R=5$ ) ve yer değiştirme kriterlerine göre boyutlandırılan sistemin kolon enkesit boyutları ve boyuna donatıları yerleşimi Şekil 5.21'de görülmektedir.

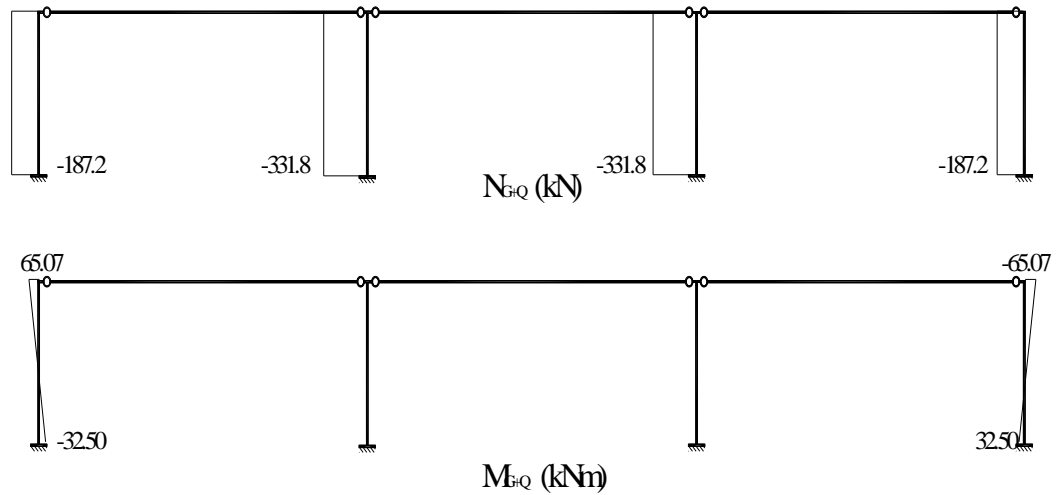


Şekil 5.21 : Seçilen kolon donatılarının yerleşim düzeni

## 5.5 Doğrusal ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemlerle Deprem Performansının Belirlenmesi

### 5.5.1 Doğrusal elastik hesap (Eşdeğer deprem yükü yöntemi)

Bu bölümde mevcut bina performansı doğrusal değerlendirme yöntemi ile belirlenmiştir. Performans belirleme için tasarım aşamasında yapılan çözümden farklı olarak deprem yükü azaltma katsayısı ( $R_a=1$ ), çatlama kesit rijitlikleri yerine de çatlama kesit rijitlikleri alınmıştır.



Şekil 5.22 : Sistemin düşey yükler altında normal kuvvet ve moment diyagramları

**Çizelge 5.16 :** Sistemde düşey yükler altında oluşan iç kuvvetler

Düşey Yükler Altında İç Kuvvetler (G+Q)			
Kolon	Normal Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
İç	-331,8	-	-
Dış	-187,2	13,2	27,4

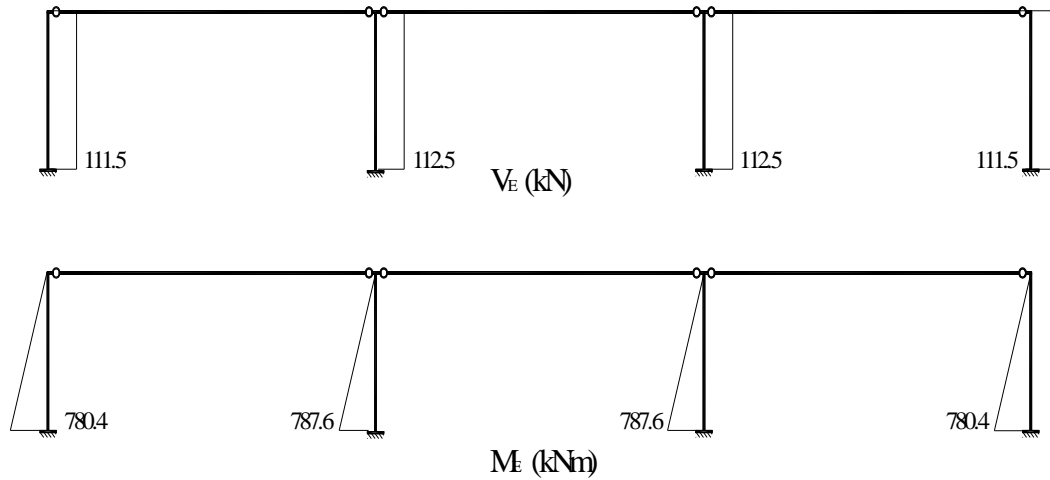
Sistem düşey yükler altında analiz edildikten sonra 1. titreşim mod şekli  $T_1 = 1,209$  sn olarak hesaplanmıştır.

$$Kolonlar = 0,40EI_0$$

$$A_0 = 0,40 \quad \lambda = 1,0 \quad T_1 = 1,209 \text{ sn}$$

$$S(T_1) = 1,427 \quad A(T_1) = 0,571 \quad R_a = 1$$

$$V_t = \frac{\lambda \cdot W \cdot A(T_1)}{R_a} \quad V_t = 448,70 \text{ kN}$$



**Şekil 5.23 :** Sistemin deprem yükleri altında kesme kuvveti ve moment diyagramları

**Çizelge 5.17 :** Sistemde deprem yükleri altında oluşan iç kuvvetler

Deprem Yükleri Altında İç Kuvvetler (E)			
Kolon	Normal Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)	Eğilme Momenti (kNm)
İç	-	112,50	787,60
Dış	-	111,50	780,40

Kolonların etki/kapasite (r) oranları uygulanan deprem kuvvetinin yönü dikkate alınarak, sadece deprem etkisi altında hesaplanan kesit eğilme momentinin kesitin artık eğilme momenti kapasitesine bölünmesi ile elde edilir.

Kolon etki/kapasite oranı:

$$M_{\text{ralt}}^{\text{iç}} = 356,62 \text{ kNm} \quad r_{\text{alt}} = M_e / (M_r - M_d) = 2,21$$

$$N_{\text{g+q+e}} / (A_c \cdot f_{\text{ck}}) = 0,053 \quad V_e / (b_w \cdot d \cdot f_{\text{ctk}}) = 0,27$$

$$M_{\text{ralt}}^{\text{dış}} = 384,50 \text{ kNm} \quad r_{\text{alt}} = M_e / (M_r - M_d) = 2,19$$

$$N_{\text{g+q+e}} / (A_c \cdot f_{\text{ck}}) = 0,030 \quad V_e / (b_w \cdot d \cdot f_{\text{ctk}}) = 0,26$$

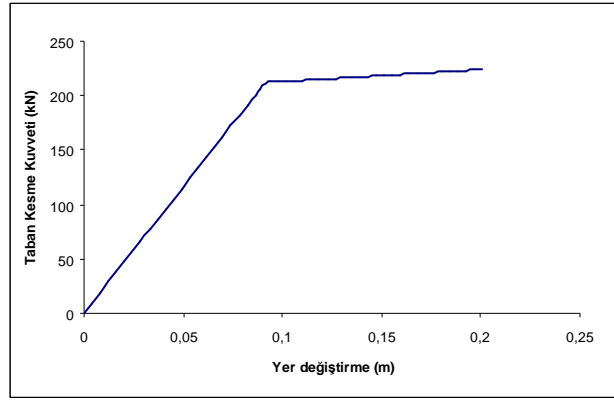
Yatay yer değiştirme kontrolü:

$$\frac{\delta}{h} = \frac{0,2042}{7} = 0,0292$$

Kolonlar için hesaplanan etki/kapasite oranlarının ilgili sınır değerler ile karşılaştırılması suretiyle bu elemanların kesit hasar bölgeleri belirlenir.

### 5.5.2 Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi

Sistemin plastik mafsal hipotezi uygulanarak çizilen “tepe yer değiştirmesi” – “taban kesme kuvveti” diyagramı elde edildikten sonra, deprem performansı TDY-07’de açıklanan Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemine göre, diğer bir deyişle, birim şekil değiştirmelere bağlı olarak yapılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen kapasite eğrisi Şekil 5.24’de gösterilmiştir.



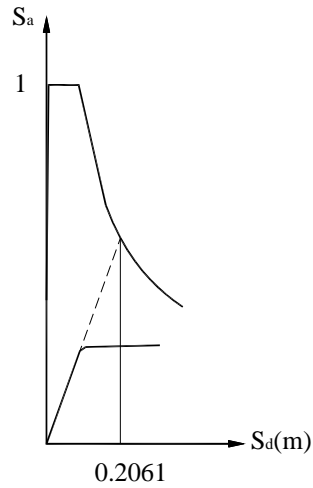
**Şekil 5.24 : Statik itme eğrisi (TDY-07)**

Plastik mafsal hipotezine göre yer değiştirmelerin hesaplanmasında ve performans hedefinin belirlenmesinde brüt kesitin 0.40 katı olan çatlama kesit rijitliği kullanılmıştır. Çatlama kesit rijitliği ile hesaplanan doğal periyot  $T_1 = 1,203$  sn olarak bulunmuştur.

Bu periyoda karşılık gelen eşlenik doğrusal elastik sistemin lineer elastik spektral yer

değiştirmesinin  $S_{de,1} = \frac{S_{ae,1} \cdot g \cdot T_1^2}{4\pi^2} = 20,605 \text{ cm}$  olarak bulunduğu Şekil 5.25’de grafik

üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 5.25 : Spektral ivme- spektral yer değiştirme grafiği**

Kolonlarda oluşan toplam eğrilik istemini veren birim şekil değiştirmeler ile kesit bazında taşıyıcı sistem performansı Çizelge 5.18’de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.18 :** TDY-07'e göre belirlenen performans seviyesi

Kolon	$\delta_d$ (cm)	$\Phi_t$	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	Perform. Seviyesi
İç	20,61	0,0712	0,0295	-0,0039	MN-GV
Dış		0,0710	0,0293	-0,0041	

### 5.5.3 Deprem performansının FEMA 356' ya göre belirlenmesi

İncelenen tek katlı betonarme prefabrike sistemin kapasite eğrisi iki doğrulu diyagrama yakın bir eğri olduğundan seçilen sistemin normal kuvvet değerlerine bağlı olarak, başlangıçtaki elastik rijitliği ( $K_e$ ) ve elastoplastik rijitliği ( $K_s$ ) çatlama kesit rijitliği olan brüt kesit rijitliğinin %50'sine eşit olmaktadır.  $T_i$  elastik doğal periyodu, çatlama kesit rijitliği kullanılarak hesaplandığında  $T_i = 1,076$  sn olarak bulunur.

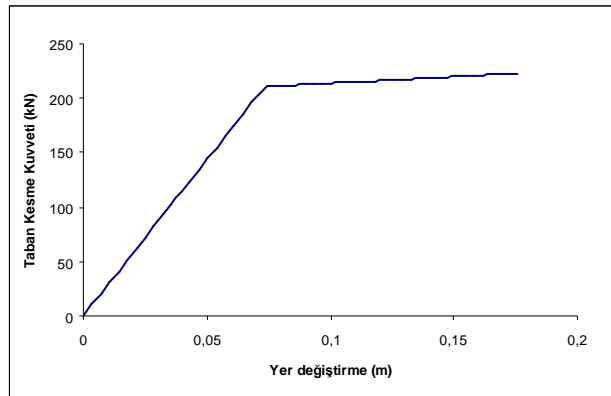
Sistem  $T_e$  etkin doğal periyodu aşağıdaki bağıntı ile

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 1,076 \text{ sn} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

$$S(T_i) = 2,5 \left(\frac{T_B}{T}\right)^{0,8} = 1,567 \text{ değeri spektral ivmeye çevrilirse,}$$

$$S_a = 0,4 \cdot S(T_i) = 0,627 \text{ olduğundan hedef yer değiştirme;}$$

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} = 18,02 \text{ cm} \text{ olarak hesaplanır.}$$



**Şekil 5.26 :** Statik itme eğrisi (FEMA 356)

FEMA 356'ya göre belirlenen deprem performansı Çizelge 5.19 üzerinde gösterilmiştir.

**Çizelge 5.19** : FEMA 356'ya göre belirlenen performans seviyesi

Kolon	$\frac{P}{A_g \cdot f'_c} < 0,1$	$V / (b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}) < 3$	$\sum \theta_{p \max}$ (rad)	$\delta_d$ (cm)	Perform. seviyesi
İç	0,05	1,42	0,01510	18,02	LS-CP
Dış	0,03		0,01524		



## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ülkemizde çok inşa edilen tek katlı iki ayrı betonarme prefabrike endüstri yapısı tipinin sismik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Bunlardan birinci tip kırıklı çerçeve diğeri ise kolonları üstten mafsalı betonarme prefabrike sistemlerdir.

Çalışma kapsamında her iki tipin TDY 2007 - Bölüm 7'e göre doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan (Statik İtme) analizi ile FEMA 356'da yer alan Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemine göre performans analizi yapılmıştır. Yapıların tasarımı yönetmeliklere uygun olarak yapılmış ve performans analizinde bu tasarımdan elde edilen boyuna ve enine donatılar kullanılmıştır.

Her iki tip için her üç yöntemle yapılan performans analizi sonuçları Çizelge 6.1'de özetlenmiştir.

**Çizelge 6.1 : Sonuçların karşılaştırılması**

SİSTEM		X Doğrultusu			Y Doğrultusu		
		TDY 2007 Artımsal Eşdeğer	FEMA 356	TDY 2007 Eşdeğer Deprem	TDY 2007 Artımsal Eşdeğer	FEMA 356	TDY 2007 Eşdeğer Deprem
	<b>Kolon</b>	$\delta=11,90$ cm MN-GV	$\delta=10,20$ cm HK-CG	$\delta=6,3$ cm MN	$\delta=30,50$ cm MN-GV	$\delta=31,50$ cm GÖ	$\delta=12,88$ cm MN-GV
	<b>Kiriş</b>	MN	HK	MN	-	-	-
	<b>Kolon</b>	$\delta=20,61$ cm MN-GV	$\delta=18,02$ cm CG-GÖ	$\delta=20,42$ cm MN-GV	-	-	-

Bu sonuçlara göre her iki tipin performansı minimum hasar bölgesinde veya belirgin hasar bölgesinde kalmaktadır. Dolayısıyla bu yapılar kendilerinden beklenen hedef performans düzeyi olan can güvenliği performans düzeyini sağlamaktadır.

Kırıklı çerçeve tipinde çerçeve doğrultusunda şekil değiştirme enerjisi yutan daha çok kesit bulunduğu için bu doğrultudaki performansı kesit boyutu daha küçük olduğu halde diğer tipten, beklendiği üzere, daha iyi bulunmuştur. Üç yöntem karşılaştırıldığında TDY 2007'e ve FEMA 356'ya göre yapılan analiz sonuçları birbirine yakın bulunmuştur.

Sonuç olarak yönetmeliklere uygun olarak boyutlandırılmış olan her iki tip tek katlı betonarme prefabrike endüstri yapısının hedeflenen performans düzeyini sağladığı grlmştir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Özer, E.**, 1987. Determination of Second-Order Limit Load by a Method of Load Increments, *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, İstanbul, 40(4), 815-836.
- [2] **Neal, B.G.**, 1956. The Plastic Methods of Structural Analysis, Chapman & Hall, London.
- [3] **Hodge, P.G.**, 1959. Plastic Analysis of Structures, McGraw-Hill, New York.
- [4] **SAP 2000**, 2000. Structural Analysis User's Manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- [5] **İrtem, E.**, 1991. Uzak Çubuk Sistemlerde İkinci Mertebe Limit Yükün Hesabı İçin Bir Yük Artımı Yöntemi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Girgin, K.**, 1996. Betonarme Yapı Sistemlerinde İkinci Mertebe Limit Yükün ve Göçme Güvenliğinin Belirlenmesi İçin Bir Yük Artımı Yöntemi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **ATC-40**, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *Applied Technology Council*, California.
- [8] **FEMA-273**, 1997. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency*, Washington.
- [9] **FEMA-356**, 2000. Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency*, Washington.
- [10] **FEMA-440**, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, *Federal Emergency Management Agency*, Washington.
- [11] **DBYBHY**, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- [12] **ABYYHY**, 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (TDY-98), *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- [13] **Gülal, S.**, 2005. Kolonları Üstten Mafsallı Betonarme Prefabrike Yapıların Deprem Performanslarının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Giydirici, N.**, 2001. Sanayi Tipi Prefabrike Yapılarda Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Aydoğan, M. ve Aköz, A.Y.**, 1994. A Numerical Approach to Define the Rotational Stiffness of a Prefabricated Connection and Experimental Study , *Computers & Structures* Vol.57, June 1994.

- [16] **Arslan, M.**, 2000. Prefabrikte Endüstri Yapılarının Deprem Yüğü Etkisi Altındaki Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Özer, E.**, 2004. Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi Ders Notları, [www.ins.itu.edu.tr/eozler](http://www.ins.itu.edu.tr/eozler), İstanbul.
- [18] **Çakıroğlu, A. ve Özer, E.**, 1980. Malzeme ve Geometri Değişimleri Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Cilt I, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [19] **Çakıroğlu, A., Özer, E. ve Girgin, K.**, 1999. Yield Conditions and Yield Vector for Combined Biaxial Bending of Rectangular Reinforced Concrete Sections, *Uğur Ersoy Symposium in Structural Engineering*, Ankara, July 1999, 121-135.
- [20] **Çavuş, K.**, 2000. Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemlerin Hesabına Yönelik Bir Yaklaşım ve Sayısal Uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Özer, G.**, 2003. Malzeme Bakımından Lineer Olmayan Sistemlerin Hesabı İçin Bir Ardışık Yaklaşım Yöntemi ve Bilgisayar Programı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Celep, Z.**, 2007. Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [23] **Mander, J.B., Priestly, M.J.N., Park, R.**, 1988. Theoretical Stress- Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Division*, 114(8), 1804-1826, ASCE, Reston, VA.
- [24] **TS-498**, 1997. Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [25] **TS-500**, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Halis GÜRLEK

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Ankara, 01.01.1983

**Adres:** Beşiktaş / İstanbul

**Lisans Üniversitesi:** Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü