

154690

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BATONARME BİR TAŞIYICI SİSTEMİN DOĞRUSAL  
OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnşaat Müh. Murat PURUT  
(501011124)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Temmuz 2004  
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Mayıs 2004**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zekai CELEP  
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Feridun ÇILI (İ.T.Ü.)  
Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK (İ.T.Ü.)**

*metin  
feridun  
ozturk*

**TEMMUZ 2004**

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, betonarme bir çerçeve sistemin farklı sargı donatısı ve malzeme durumlarında doğrusal olmayan statik itme çözümlemesi ve performans metodu ile değerlendirilmesi sunulmaktadır.

Beraber çalışma fırsatı bulduğum, tez çalışmam süresince bana sabır gösteren ve her konuda yardımını esirgemeyen danışmanım, Hocam Sayın Prof. Dr. Zekai Celep'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendileri ile beraber yürüttüğümüz bitirme ve yüksek lisans tez çalışmaları, mesleki öğrenme ve kendimi geliştirme sürecimin en verimli kısımları olmuştur.

Yoğun iş temposuna rağmen, bana zaman ayırarak, tez çalışmama yön veren ve sonuçlandırılmasında emeği geçen İnş. Yük. Müh. Kağan Sayın'a da teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca sürekli yanımda olan, en sıkıntılı anlarımda desteğini ve yardımını esirgemeyen, tezimin son şeklini almasında büyük özveri gösteren, değerli dostum İnş. Yük. Müh. Volkan Koç'a özellikle teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca destek ve dualarını hiç bir zaman esirgemeyen, benim için ellerinden gelenin en iyisini yapan aileme; gösterdikleri sevgi, sabır ve hoşgörü için minnettarım.

Nisan 2004

Murat PURUT

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

|                                                       |             |
|-------------------------------------------------------|-------------|
| <b>KISALTMALAR</b> .....                              | <b>v</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b> .....                            | <b>vi</b>   |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....                            | <b>viii</b> |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....                           | <b>x</b>    |
| <b>ÖZET</b> .....                                     | <b>xii</b>  |
| <b>SUMMARY</b> .....                                  | <b>xiii</b> |
| <b>1 GİRİŞ</b> .....                                  | <b>1</b>    |
| <b>2 BETONARME MALZEME</b> .....                      | <b>3</b>    |
| 2.1 Beton ve Davranışı.....                           | 3           |
| 2.2 Çelik ve Davranışı .....                          | 3           |
| 2.3 İdeal Elastoplastik Kabul .....                   | 4           |
| <b>3 SÜNEKLİK</b> .....                               | <b>5</b>    |
| 3.1 Betonda Süneklik.....                             | 5           |
| 3.2 Çelikte Süneklik.....                             | 6           |
| 3.3 Yapı Elemanlarında Süneklik .....                 | 6           |
| 3.3.1 Basit Eğilme Etkisi .....                       | 6           |
| 3.3.2 Normal Kuvvet Etkisi .....                      | 7           |
| 3.3.3 Sargı Etkisi.....                               | 8           |
| 3.4 Yapı Sistemlerinde Süneklik .....                 | 8           |
| <b>4 PLASTİK MAFSAL KABULÜ</b> .....                  | <b>10</b>   |
| <b>5 ÇÖZÜMLEME</b> .....                              | <b>11</b>   |
| 5.1 Doğrusal Olmayan Statik Çözümleme (Pushover)..... | 12          |
| 5.2 Boyutlamada Kapasite Kavramı .....                | 13          |
| <b>6 PERFORMANS METODU</b> .....                      | <b>14</b>   |
| 6.1 Performans Amacı .....                            | 14          |
| 6.1.1 Deprem Etki Seviyesi .....                      | 14          |
| 6.1.2 Yapı Performans Seviyesi.....                   | 15          |
| 6.1.3 Performans Amacı Belirlenmesi.....              | 19          |
| 6.2 Kapasite .....                                    | 21          |
| 6.2.1 Kapasite Eğrisinin Oluşturulması .....          | 21          |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2.2 Doğrusal Olmayan Statik Analiz (Pushover) .....      | 22        |
| 6.2.3 Kapasite Spektrumunun Oluşturulması .....            | 23        |
| 6.3 Talep .....                                            | 25        |
| 6.3.1 Talep Spektrumu.....                                 | 25        |
| 6.3.2 Doğrusal Davranış Spektrumu.....                     | 25        |
| 6.4 Kapasite Spektrum Metodu (ATC40).....                  | 28        |
| 6.5 Yerdeğiştirme Katsayıları Metodu (FEMA 273/356).....   | 34        |
| 6.6 Performans Noktası.....                                | 36        |
| 6.6.1 Kapasite ve Talep Spektrumlarının Kesişmesi .....    | 36        |
| 6.6.2 Performans Noktasının Bulunması .....                | 37        |
| <b>7 GÜÇLENDİRMEDE PERFORMANS METODU UYGULANMASI .....</b> | <b>40</b> |
| 7.1 Veri Toplanması ve Eksikliklerin Belirlenmesi.....     | 40        |
| 7.2 Performans Amacı Belirlenmesi .....                    | 44        |
| 7.3 Çözümleme .....                                        | 44        |
| <b>8 KABUL KRİTERLERİ.....</b>                             | <b>45</b> |
| 8.1 Genel Yapı Kabul Kriterleri .....                      | 45        |
| 8.1.1 Düşey Yükler .....                                   | 45        |
| 8.1.2 Yatay Yükler.....                                    | 45        |
| 8.1.3 Yerdeğiştirmeler .....                               | 45        |
| 8.2 Sistem ve Eleman Kabul Kriterleri .....                | 46        |
| 8.3 Betonarme Çerçeve Sistem Kabul Kriterleri .....        | 47        |
| <b>9 ÖRNEK UYGULAMALAR .....</b>                           | <b>53</b> |
| 9.1 Sistemin Tanımlanması.....                             | 53        |
| 9.2 Mafsalların Tanımlanması .....                         | 55        |
| 9.2.1 Moment-Dönme Bağlantıları.....                       | 55        |
| 9.2.2 Sınır Değerler.....                                  | 59        |
| 9.3 Çözümleme Kombinasyonlarının Tanımlanması .....        | 60        |
| 9.3.1 Çözümleme .....                                      | 61        |
| 9.4 Üç Boyutlu Model .....                                 | 61        |
| 9.5 Uygulama 1 .....                                       | 66        |
| 9.6 Uygulama 2.....                                        | 69        |
| 9.6 Uygulama 3.....                                        | 72        |
| <b>10 SONUÇLAR.....</b>                                    | <b>76</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                     | <b>78</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                      | <b>79</b> |

## **KISALTMALAR**

|               |                                                     |
|---------------|-----------------------------------------------------|
| <b>SE</b>     | : Serviceability Earthquake                         |
| <b>DE</b>     | : Design Earthquake                                 |
| <b>ME</b>     | : Maximum Earthquake                                |
| <b>TGD</b>    | : Temel Güvenlik Depremi                            |
| <b>SP</b>     | : Structural Performance                            |
| <b>NP</b>     | : Nonstructural Performance                         |
| <b>ATC</b>    | : Applied Technology Council                        |
| <b>ADRS</b>   | : Acceleration Displacement Response Spectra        |
| <b>FEMA</b>   | : Federal Emergency Management Agency               |
| <b>XTRACT</b> | : Cross Sectional Structural Analysis of Components |
| <b>SAP</b>    | : Structural Analysis Program                       |
| <b>IO</b>     | : Immediate Occupancy                               |
| <b>LS</b>     | : Life Safety                                       |
| <b>SS</b>     | : Structural Stability                              |
| <b>EPA</b>    | : Effective Peak Acceleration                       |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 6.1 Yapı performans seviyeleri.....                                                      | 19 |
| Tablo 6.2 Performans amacının belirlenmesi .....                                               | 20 |
| Tablo 6.3 Temel güvenlik performans amacı .....                                                | 21 |
| Tablo 6.4 Deprem katsayısı $C_A$ .....                                                         | 26 |
| Tablo 6.5 Deprem katsayısı $C_V$ .....                                                         | 26 |
| Tablo 6.6 Zemin profilleri tablosu.....                                                        | 27 |
| Tablo 6.7 Sismik bölge katsayısı, $Z$ .....                                                    | 27 |
| Tablo 6.8 Deprem etki seviyesi katsayısı, $E$ .....                                            | 27 |
| Tablo 6.9 Deprem kaynağı yakınlık katsayısı, $N$ .....                                         | 28 |
| Tablo 6.10 Sismik kaynak tipi tablosu.....                                                     | 28 |
| Tablo 6.11 Sönüm değiştirme katsayısı, $\kappa$ .....                                          | 31 |
| Tablo 6.12 Spektral azaltma katsayıları.....                                                   | 32 |
| Tablo 6.13 Spektral azaltma katsayıları.....                                                   | 32 |
| Tablo 6.14 Yapı davranış sınıfı tablosu.....                                                   | 32 |
| Tablo 6.15 $C_0$ katsayısı tablosu.....                                                        | 35 |
| Tablo 6.16 $C_2$ katsayısı tablosu.....                                                        | 35 |
| Tablo 7.1 Veri toplama matrisi .....                                                           | 41 |
| Tablo 7.2 Orijinal çizimler mevcut ise ön değerlendirme için gerekli bilgiler.....             | 42 |
| Tablo 7.3 Orijinal çizimler mevcut değilse ön değerlendirme için gerekli bilgiler...           | 42 |
| Tablo 7.4 Orijinal çizimler mevcut ise detaylı değerlendirme için gerekli bilgiler...          | 43 |
| Tablo 7.5 Orijinal çizimler mevcut değil ise detaylı değerlendirme için gerekli bilgiler ..... | 43 |
| Tablo 8.1 Şekil değiştirme sınır değerleri.....                                                | 46 |
| Tablo 8.2 Kirişler için plastik mafsallı dönmeleri kabul kriteri tablosu (rad) .....           | 48 |
| Tablo 8.3 Kolonlar için plastik mafsallı dönmeleri kabul kriteri tablosu .....                 | 49 |
| Tablo 8.4 Düğüm noktaları için toplam kayma açısı kabul kriteri tablosu (rad).....             | 50 |
| Tablo 8.5 Döşemeler için plastik mafsallı dönmeleri kabul kriteri tablosu (rad) .....          | 51 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 8.6 Perdeler için plastik mafsal dönmeleri kabul kriteri tablosu (rad) ..... | 51 |
| Tablo 9.1 Uygulama detay tablosu .....                                             | 54 |
| Tablo 9.2 Kirişler için modelleme parametreleri.....                               | 57 |
| Tablo 9.3 Kolonlar için modelleme parametreleri.....                               | 58 |
| Tablo 9.4 “cBS20” modeli çözümleme sonuçları.....                                  | 67 |
| Tablo 9.5 “ucBS20” modeli çözümleme sonuçları.....                                 | 68 |
| Tablo 9.6 “cBS25” modeli çözümleme sonuçları.....                                  | 70 |
| Tablo 9.7 “cBS18” modeli çözümleme sonuçları.....                                  | 70 |
| Tablo 9.8 “cBS14” modeli çözümleme sonuçları.....                                  | 71 |
| Tablo 9.9 “cBS20StIII” çözümleme sonuçları .....                                   | 73 |
| Tablo 9.10 “ucBS14StI” modeli çözümleme sonuçları .....                            | 73 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....                             | 3  |
| Şekil 2.2 Çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....                             | 4  |
| Şekil 2.3 İdealleştirilmiş beton ve çelik gerilme-şekil değiştirme ilişkileri .....  | 4  |
| Şekil 3.1 Farklı dayanımda betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkileri.....       | 6  |
| Şekil 3.2 Farklı donatı çelikleri için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri .....     | 6  |
| Şekil 3.3 Basit eğilme etkisindeki betonarme kesitte eğilme momenti-eğrilik ilişkisi | 7  |
| Şekil 3.4 Normal kuvvetin sünekliğe etkisi .....                                     | 7  |
| Şekil 3.5 Sargı donatısının sünekliğe etkisi .....                                   | 8  |
| Şekil 6.1 Performans amacı .....                                                     | 14 |
| Şekil 6.2 Yapı performans seviyesi .....                                             | 16 |
| Şekil 6.3 Performans amacının belirlenmesi .....                                     | 20 |
| Şekil 6.4 Kapasite eğrisi .....                                                      | 22 |
| Şekil 6.5 Kapasite eğrisinin kapasite spektrumuna dönüştürülmesi.....                | 23 |
| Şekil 6.6 Doğrusal davranış spektrumu .....                                          | 25 |
| Şekil 6.7 Doğrusal davranış spektrumunun ADRS formuna dönüştürülmesi .....           | 29 |
| Şekil 6.8 Doğrusal davranış spektrumunun azaltılması.....                            | 29 |
| Şekil 6.9 Sönümün belirlenmesi .....                                                 | 30 |
| Şekil 6.10 Sönüm değiştirme katsayısının yapı türlerine göre değişimi.....           | 33 |
| Şekil 6.11 Etkili sönümün yapı türlerine göre değişimi .....                         | 33 |
| Şekil 6.12 Spektral azaltma katsayısı , $SR_v$ .....                                 | 33 |
| Şekil 6.13 Spektral azaltma katsayısı, $SR_A$ .....                                  | 34 |
| Şekil 6.14 Kapasite ve talep spektrumlarının kesişmesi.....                          | 37 |
| Şekil 6.15 Kapasite ve talep spektrumlarının üst üste çizilmesi.....                 | 37 |
| Şekil 6.16 Performans noktası için ilk tahmin.....                                   | 38 |
| Şekil 6.17 Kapasite spektrumunun çift doğrusal duruma getirilmesi.....               | 38 |
| Şekil 6.18 Kapasite spektrumunun ve talep spektrumunun üst üste çizilmesi .....      | 38 |
| Şekil 9.1 Uygulamalarda kullanılan sistemin plan ve kesiti.....                      | 54 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 9.2 Kolon ve kiriş mesnet kesitleri .....                       | 54 |
| Şekil 9.3 Sargılı ve sargısız beton Mander modeli .....               | 56 |
| Şekil 9.4 ATC40 Moment-Dönme ilişkisi .....                           | 59 |
| Şekil 9.5 ATC40 ve SAP2000 Moment-Dönme ilişkileri .....              | 59 |
| Şekil 9.6 ATC40 sınır koşulları .....                                 | 60 |
| Şekil 9.7 Üç boyutlu model .....                                      | 61 |
| Şekil 9.8 Üç boyutlu model .....                                      | 62 |
| Şekil 9.9 Kirişler için M3 mafsallının tanımlanması .....             | 62 |
| Şekil 9.10 Kolonlar için PMM mafsallının tanımlanması .....           | 63 |
| Şekil 9.11 PUSH1 yüklemesinin tanımlanması .....                      | 63 |
| Şekil 9.12 PUSH2 yüklemesinin tanımlanması .....                      | 64 |
| Şekil 9.13 PUSH3 yüklemesinin tanımlanması .....                      | 64 |
| Şekil 9.14 Kapasite eğrisi .....                                      | 65 |
| Şekil 9.15 Performans noktası .....                                   | 65 |
| Şekil 9.16 Performans noktası mafsall durumları .....                 | 66 |
| Şekil 9.17 Kolon ve kiriş kesitleri, etriye durumları .....           | 66 |
| Şekil 9.18 Her iki modelin performans noktası mafsall durumları ..... | 68 |
| Şekil 9.19 Kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi .....              | 69 |
| Şekil 9.20 Tüm modeller performans noktası mafsall durumları .....    | 71 |
| Şekil 9.21 Kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi .....              | 72 |
| Şekil 9.22 Performans noktası mafsallaşma durumları .....             | 74 |
| Şekil 9.23 Kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi .....              | 74 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                      |                                                   |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| $a, b, c$            | : Modelleme katsayıları                           |
| $A, B, C$            | : Yapı davranış sınıfı                            |
| $A_g$                | : Brüt kesit alanı                                |
| $A_s$                | : Çekme donatısı alanı                            |
| $A_s'$               | : Basınç donatısı alanı                           |
| $\alpha$             | : Birinci modun modal kütle katsayısı             |
| $b_w$                | : Kesit basınç bölgesi genişliği                  |
| $\beta_{eff}$        | : Eşdeğer viskoz sönüm                            |
| $\beta_0$            | : Çevrimsel sönüm                                 |
| $C_0, C_1, C_2, C_3$ | : Yerdeğiştirme katsayıları                       |
| $C_A, C_V$           | : Deprem katsayıları                              |
| $d$                  | : Etkili kesit derinliği                          |
| $E$                  | : Deprem etki seviyesi katsayısı                  |
| $E_c$                | : Beton için elastisite modülü                    |
| $E_{sec}$            | : Beton için sekant rijitliği                     |
| $\varepsilon$        | : Şekil değiştirme                                |
| $\varepsilon_c$      | : Betonun şekil değiştirmesi                      |
| $\varepsilon_{cc}$   | : Sargılı beton şekil değiştirmesi                |
| $\varepsilon_{su}$   | : Çelik kopma şekil değiştirmesi                  |
| $\varepsilon_y$      | : Çelik akma şekil değiştirmesi                   |
| $f_c$                | : Beton basınç gerilmesi                          |
| $f_{cc}$             | : Sargılı beton basınç gerilmesi                  |
| $f_{cu}$             | : Beton ezilme gerilmesi                          |
| $f_l'$               | : Etkili yanıl sargı basıncı                      |
| $f_{st}$             | : Çeliğin kopma gerilmesi                         |
| $f_y$                | : Çeliğin akma gerilmesi                          |
| $\phi$               | : Dönme                                           |
| $\phi_u$             | : Sınır dönme değeri                              |
| $\phi_y$             | : Akma dönme değeri                               |
| $g$                  | : Yer ivmesi                                      |
| $K_e$                | : Etkili rijitlik                                 |
| $K_i$                | : Başlangıç rijitliği                             |
| $\kappa$             | : Sönüm değıştirme katsayısı                      |
| $l_p$                | : Plastik mafsıl boyu                             |
| $l_w$                | : Perde uzunluğu                                  |
| $M_u$                | : Sınır durum momenti                             |
| $M_w$                | : Moment büyüklüğü                                |
| $N$                  | : Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı deneyi |
| $N_A, N_V$           | : Deprem kaynağı yakınlık katsayısı               |
| $P$                  | : Tasarım normal kuvveti                          |
| $PF$                 | : Modal katılım katsayısı                         |

|                                       |                                            |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>R</b>                              | : Doğrusal dayanımın akma dayanımına oranı |
| <b>R<sub>a</sub></b>                  | : Deprem yükü azaltma katsayısı            |
| <b>ρ</b>                              | : Çekme donatısı oranı                     |
| <b>ρ'</b>                             | : Basınç donatısı oranı                    |
| <b>ρ<sub>bal</sub></b>                | : Dengeli donatı oranı                     |
| <b>S<sub>a</sub></b>                  | : Spektral ivme                            |
| <b>S<sub>d</sub></b>                  | : Spektral yerdeğiştirme                   |
| <b>SR<sub>A</sub>, SR<sub>V</sub></b> | : Azaltma katsayıları                      |
| <b>S<sub>u</sub></b>                  | : Drenajsız kayma mukavemeti               |
| <b>σ</b>                              | : Gerilme                                  |
| <b>t<sub>w</sub></b>                  | : Perde genişliği                          |
| <b>T</b>                              | : Periyot                                  |
| <b>T<sub>A</sub>, T<sub>S</sub></b>   | : Kontrol periyotları                      |
| <b>T<sub>i</sub></b>                  | : Başlangıç periyodu                       |
| <b>V</b>                              | : Taban kesme kuvveti                      |
| <b>w</b>                              | : Kat ağırlığı                             |
| <b>Z</b>                              | : Sismik bölge katsayısı                   |

## BETONARME BİR TAŞIYICI SİSTEMİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

### ÖZET

Deprem etkileri altında oluşan yatay kuvvetler, yapı sistemlerinin sürekli karşı karşıya oldukları düşey yüklerden farklıdır. Deprem etkisinden oluşan yatay kuvvetler tersinir ve tekrarlı yüklemelerdir. Çerçeve sistemler bu tür etkilerde, özellikle mesnet kesitlerinde, alışık olmadıkları yön ve şiddette iç kuvvetler ile karşılaşılır.

Yapı sistemlerinin yatay kuvvetler altında çözümleme yöntemlerinde genelde doğrusal çözümleme yöntemleri kullanılır. Bu yöntemlerde doğrusal olmayan kapasite belirli katsayılarla gözönünde bulundurulur ve doğrusal etki bu katsayılar ile azaltılarak çözümleme yapılır. Boyutlamada kapasite kavramının ve doğrusal olmayan çözümleme yöntemlerinin gelişmesi ile çözümleme yöntemleri de yer değiştirme kontrollü doğrusal olmayan çözümlemelere doğru gelişmekte ve değişmektedir. Doğrusal olmayan çözümleme yöntemleri sayesinde doğrusal sınır ötesindeki kapasiteden daha etkin yararlanılmakta ve daha ekonomik kesitler üretilmektedir. Doğrusal olmayan statik itme analizi ve performans metodu da yapı sistemlerinin boyutlandırılmasında kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntemler kullanılarak yapı sistemlerinin göçme şekilleri de belirlenebilir ve göçmeye karşı sabit bir güvenlik elde edilir.

Doğrusal olmayan çözümleme yöntemlerinin uygulanabilmesi, yapı elemanlarının ve sistemlerinin süneklik özelliğine bağlıdır. Bu aşamada süneklik, doğrusal olmayan şekil değiştirme ve yer değiştirme yapabilme özelliği olarak tanımlanabilir. Sünek kesit ve sistemler sayesinde kapasite dayalı boyutlandırma ve doğrusal olmayan çözümlemeler kullanılabilir duruma gelir.

Bu çalışmada doğrusal olmayan statik itme çözümlemesinin tipik bir betonarme çerçeve sistem üzerinde, değişik malzeme ve sargı durumlarına göre incelenmesi verilmiştir. Sargı donatısı artırıldıkça ve malzeme kaliteleri yükseldikçe sistemin daha sünek davrandığı, daha az plastikleşme bölgeleri ile sistemde daha fazla yatay kuvvet kapasitesi bulunduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Performansa Dayalı Tasarım, Doğrusal Olmayan Statik İtme Çözümlemesi, Kapasite Eğrisi, Süneklik.

## **NONLINEAR BEHAVIOUR OF A REINFORCED CONCRETE FRAME SYSTEM**

### **SUMMARY**

The earthquake forces are lateral forces that are applied to a structural system different from the vertical service loads. Earthquake forces are cyclic loads and structural systems are not used to resist these forces.

Generally, linear analysis methods are used in design and analysis of structural systems subjected to earthquake forces. Nonlinear capacity of the structural system is represented by some factors and linear forces are reduced by these factors. With the development of capacity based design and nonlinear analysis procedures, the analysis methods progress towards nonlinear analysis controlled by displacements. Nonlinear capacity of a structural system can be determined by nonlinear analysis procedures and economical sections can be achieved. Nonlinear static analysis and performance based design are the optimum procedures to design a structural system. According to these procedures, a uniform factor of safety for structural failure can be determined. Also the collapse form of the structural system can be determined.

Nonlinear procedures need ductility in members and the structural system. Ductility can be defined as the ability to perform nonlinear deformations and displacements. In ductile members and systems nonlinear analysis procedures can be applied.

The presented thesis explains a nonlinear static procedure of a structural system subjected to earthquake loading in addition to vertical load and gives three examples consisting of reinforced concrete structural system having various degrees of confinement and material qualities. The numerical results show that the performance of the structural system increases as the confinement ratio and the material quality get better.

**Key Words:** Performance Based Design, Nonlinear Static Analysis, Pushover Analysis, Pushover Curve, Capacity Curve, Ductility.

## 1 GİRİŞ

Türkiye topraklarının büyük kısmı deprem tehlikesi ile karşı karşıyadır. Nüfusun ve sanayinin yoğun olduğu bölgelerde deprem riski daha da fazladır. Marmara Bölgesi sanayinin ve nüfusun en yoğun olduğu bölgedir ve aktif olan Kuzey Anadolu Fayı'nın etkisi altındadır. Deprem raporlarının açıklanması ile bölgede beklenen deprem ortalama 7.5 ( $M_w$ ) büyüklüğündedir. Beklenen bu depremler sonucunda bölgede oluşabilecek can ve mal kaybı konusunda ise verilen rakamlar, günümüze kadar olan depremlerden daha fazladır.

Deprem tehlike oluşturması ve afete dönüşmesi, yapıların güvenlik derecesine bağlıdır. Malesef ülkemizdeki genel yapı stoğu depremin afete dönüşmesine neden olabilir. Genel olarak betonarme taşıyıcı sistemlerin tercih edildiği yapılar, çoğu zaman mühendislik bilgisinden yoksun ve bilinçsizce inşa edilmiştir. Kullanılan yapı malzemelerinin kalite düşüklüğü ve betonarme kesitlerin düzenlenmesi mevcut yapıların başlıca problemidir. 1998 yılında yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik ve 2000 yılında yenilenen TS500 ile birlikte bir takım standartlar sağlansa da, bu yönetmeliklerden önce yapılan yapıların durumları belirsizliğini korumaktadır.

Deprem kuvvetleri, yapı sistemlerinin sürekli karşı koydukları düşey yüklerden farklı olan, tekrarlı ve yön değiştiren yatay kuvvetlerdir. Dolayısıyla bu kuvvetlerin belirlenmesi ve betonarme çerçeve sistemlerin yatay kuvvetlere göre boyutlandırılması, düşey kuvvetlere oranla daha karmaşıktır. Bunun sonucu olarak yatay deprem kuvvetlerinin belirlenmesinden kesitlerin boyutlandırılmasına kadar birçok noktada kabuller yapmak gereklidir.

Yatay kuvvetler altında betonarme taşıyıcı sistemlerin çözümlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Genel olarak çözümleme yöntemlerinde yapının doğrusal olmayan kapasitesi bir katsayı ile belirlenir ve bu katsayı ile doğrusal çözümleme yapılır. 1998 yönetmeliği de bina ve bina türü yapıların deprem hesabında üç adet hesap yöntemi belirtilmektedir. Bunlar Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemleri'dir. Eşdeğer

deprem yükü ve mod birleştirme yöntemleri de, yapının doğrusal olmayan kapasitesini Deprem Yükü Azaltma Katsayısı ( $R_a$ ) ile tanımlar. Kuvvetler bu katsayı ile azaltılarak doğrusal çözümleme yapılır. Ancak, yapının doğrusal olmayan kapasitesinin belirlenmesi ve bu kapasiteden yararlanılması için doğrusal olmayan çözümleme daha etkilidir.

Doğrusal olmayan statik itme çözümlemesi de (Pushover) yapıların yatay kuvvetler altında incelenmesinde kullanılan yöntemlerdendir. Boyutlamada kapasite kavramının gelişmesi ile bu yöntemin uygulamaları da artmıştır. Gerek malzemenin (beton ve çelik) gerekse taşıyıcı sistemin doğrusal sınır ötesi kapasitesini daha etkin kullanması, taşıyıcı sistemin güç tükenmesinde durumunu da tespit ve kontrol etmesi yanında uygulama kolaylığı da yöntemin kullanılmasını cazip hale getirmiştir.

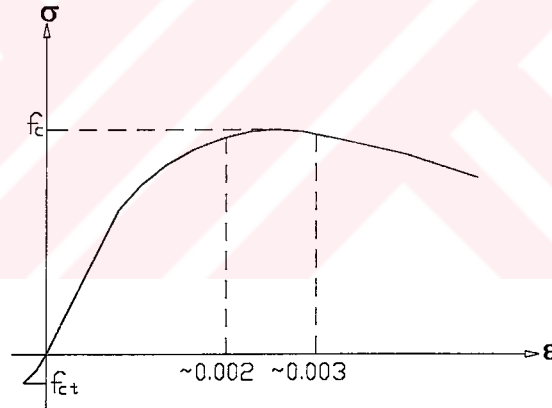
Genel olarak bu çalışmada, doğrusal sınır ötesi kapasitenin kullanımında Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi'nden (Pushover), ilgili yönetmeliklerden ve bir betonarme taşıyıcı sistem için uygulanmasından bahsedilecektir. Seçilen tipik bir betonarme taşıyıcı sistem üzerinde sargı donatısı ve malzeme kalitesi etkisi incelenmiştir.

## 2 BETONARME MALZEME

Betonarme; agrega, su ve çimentodan oluşan beton malzemesi içine çelik çubukların yerleştirilmesi ile oluşturulur. Bu sayede basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük olan beton; çekme dayanımı yüksek olan çeliklerle tamamlanır. Aynı zamanda gevrek bir yapı malzemesi olan betonun bu eksikliği sünek bir yapı malzemesi olan çelikle giderilmektedir.

### 2.1 Beton ve Davranışı

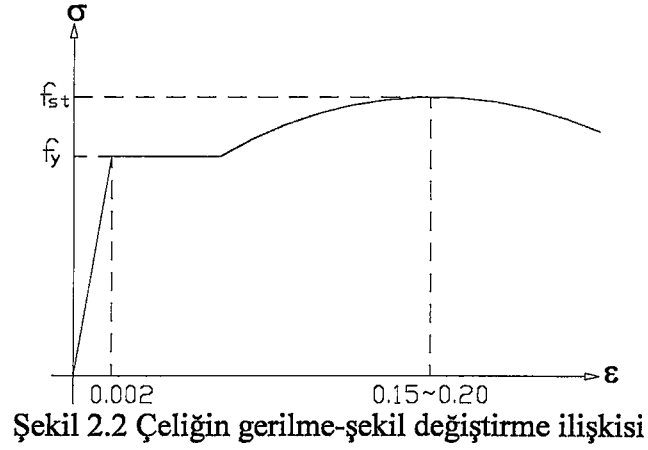
Beton belirli oranlarda karıştırılan agrega, çimento ve sudan oluşmaktadır. Gevrek bir yapı malzemesi olan beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.1’de verilmiştir. Betonun doğrusal davranış bölgesi  $0.60\sim0.70f_c$  gerilmesine kadardır.



Şekil 2.1 Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

### 2.2 Çelik ve Davranışı

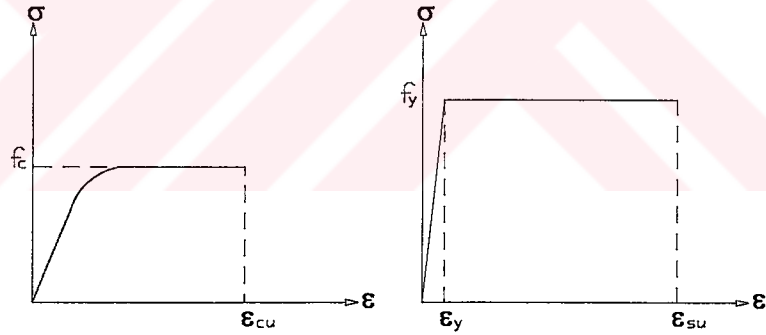
Yüksek çekme dayanımına sahip çelik için eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.2’de verilmiştir. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi üç parçadan oluşur. Birinci parça doğrusal davranışın bulunduğu bölümdür. Bu bölümü akma sahanlığının bulunduğu ikinci bölüm takip eder ve pekleşmeyi içeren üçüncü bölüm ile son bulur. Şekil 2.2’den de anlaşılabileceği gibi, çelikte de elastik sınır ötesi kapasite ihmal edilemeyecek kadar fazladır.



Şekil 2.2 Çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

### 2.3 İdeal Elastoplastik Kabul

Yapı sistemlerinin hesap aşamasında mevcut malzemelerin (beton ve çelik) gerilme-şekil değiştirme eğrileri, ideal elastoplastik gerilme-şekil değiştirme eğrisine dönüştürülür. Beton ve çelik malzeme için elastik sınır ve taşıma gücü sınır değerleri belirlenerek, ideal elastoplastik davranış eğrileri çizilir.



Şekil 2.3 İdealleştirilmiş beton ve çelik gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Şekil 2.3 beton ve çelik için kabul edilebilir elastoplastik gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini göstermektedir. Malzemelerde doğrusal elastik bölgeyi plastikleşme bölgesi takip etmektedir. Malzemelerin plastikleşme bölgelerindeki kapasitelerinin daha iyi kullanılması için doğrusal olmayan çözümleme yöntemleri daha etkili sonuçlar vermektedir.

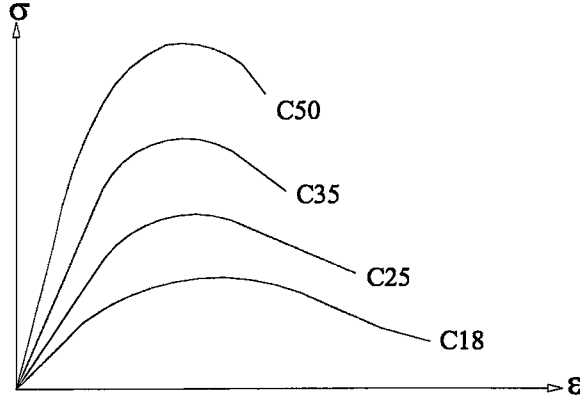
### 3 SÜNEKLİK

Süneklik; bir elemanın, bir kesitin ya da bir yapısal sistemin doğrusal sınır ötesinde şekil değiştirme veya yerdeğiştirme yapabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Sünek bir eleman, kesit ya da yapısal sistemde, ileri yük kademelerinde dayanım neredeyse sabit kalırken önemli ölçüde şekil değiştirmeler meydana gelir. Sünek davranış gösteren yapılarda, ileri yük kademelerinde, plastik şekil değiştirmeler sayesinde göçme olmadan yük taşınmaya devam edecektir. Önemli olan yapının karşılaştığı dinamik etkiyi, süneklik sayesinde kazandığı şekil değiştirme kapasitesini kullanarak sönmülmesidir. Süneklik, doğrusal sınır sonrasında ani göçme olmadan şekil değiştirme yeteneğidir [1].

Sünek bir taşıyıcı sistem ancak ve ancak sünek kesitlere sahip elemanlardan oluşturulur. Betonarme kesitlerde doğrusal sınır geçilince beton ve çeliğin doğrusal olmayan davranışları betonarme malzemenin doğrusal olmayan davranışında etkili olur. Bir betonarme elemanda yeterli sünekliğin sağlanması için, elemanı oluşturan beton ve çeliğin de kabul edilebilir süneklığe sahip olması gerekir [2]. Beton ve çelik malzemeleri için süneklik, şekil değiştirebilme yeteneği olarak tanımlanabilir.

#### 3.1 Betonda Süneklik

Beton, gevrek davranış gösteren bir yapı malzemesidir. Şekil 3.1 farklı kalitelere sahip betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini göstermektedir.

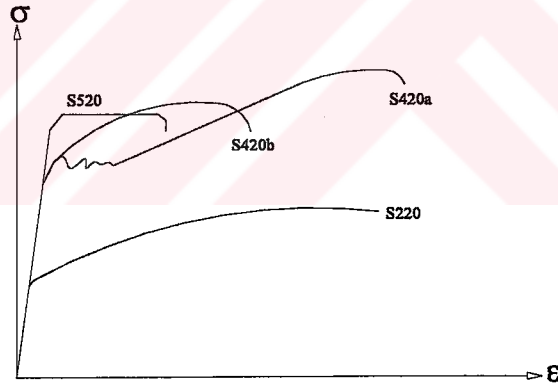


Şekil 3.1 Farklı dayanımda betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Şekil 3.1'den de anlaşılacağı gibi, beton basınç dayanımı arttıkça şekil değiştirme kapasitesi azalmaktadır. Yani düşük dayanımlı betonlar, kendilerinden daha yüksek dayanımlı betonlara oranla daha sünektir.

### 3.2 Çelikte Süneklik

Çelik, sünek davranışlı bir yapı malzemesidir. Şekil 3.2 farklı kalitelere sahip çeliklerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini göstermektedir.

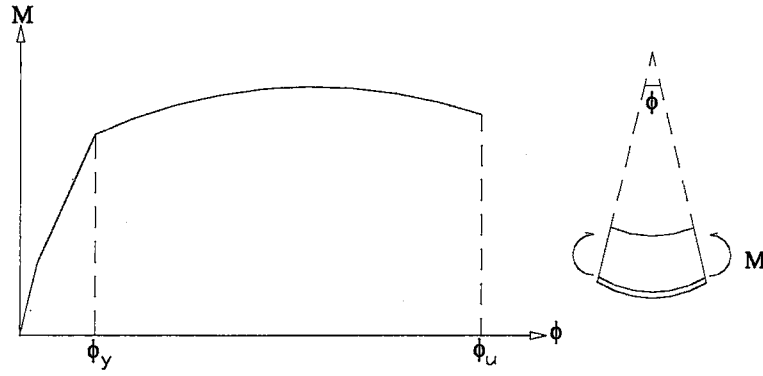


Şekil 3.2 Farklı donatı çelikleri için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

### 3.3 Yapı Elemanlarında Süneklik

#### 3.3.1 Basit Eğilme Etkisi

Betonarme çerçevesel yapı sistemlerinde kirişler eğilme momentinin normal kuvvete göre daha etkin olduğu elemanlardır. Eğilme momenti etkisindeki kiriş kesitleri döner.



Şekil 3.3 Basit eğilme etkisindeki betonarme kesitte eğilme momenti-eğrilik ilişkisi

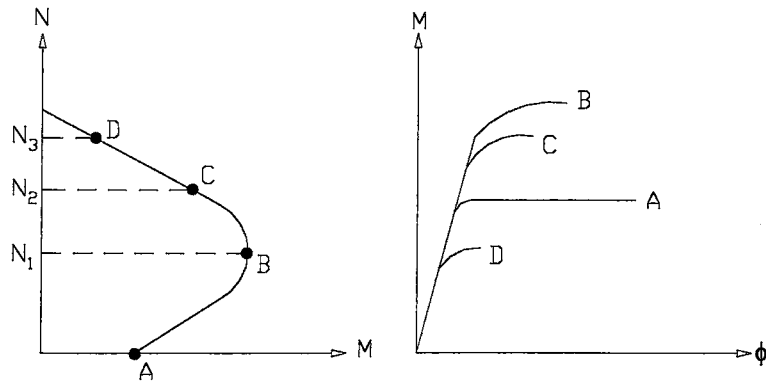
Şekil 3.3 sünek bir kiriş kesitinin moment-dönme eğrisini göstermektedir. Eğilme etkilerinin ön plana çıktığı kiriş kesitleri için süneklik, kesit dayanımında önemli bir değişim olmadan dönebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Buna göre kiriş kesiti için süneklik bağıntısı;

$$\mu = \frac{\Phi_u}{\Phi_y} \quad (3.1)$$

olarak tanımlanabilir. Kiriş kesitlerinin sünekliği çeşitli parametrelere bağlıdır. Süneklik çekme donatısı oranı ve donatı kalitesi ile ters, basınç donatısı oranı ve beton kalitesi ile doğru orantılıdır.

### 3.3.2 Normal Kuvvet Etkisi

Betonarme çerçeveli yapı sistemlerinde kolonlar normal kuvvetin ve eğilme momentinin etkin olduğu elemanlardır. Eğilme momenti ve normal kuvvet etkisindeki bir kolon kesitinin moment-dönme eğrisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

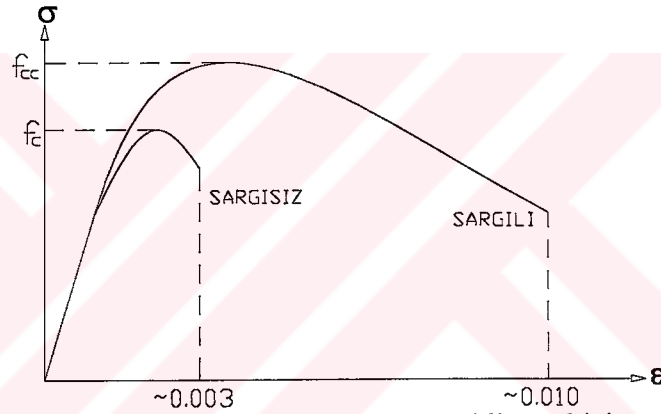


Şekil 3.4 Normal kuvvetin sünekliğe etkisi

Şekil 3.4'ten de anlaşılacağı gibi A durumu basit eğilme durumunu temsil etmektedir. Normal kuvvetin artması ile beraber, erişilen sınır durum eğrilik değerleri ( $\phi_u$ ) azalmaktadır. Süneklik sınır durum eğrilik değerinin ( $\phi_u$ ) akma eğrilğine ( $\phi_y$ ) oranı olarak düşünülürse, artan normal kuvvet etkilerinde genel olarak süneklik azalmaktadır.

### 3.3.3 Sargı Etkisi

Betonarme kesitlerde sargı donatısı, beton basınç dayanımını artırır ve şekil değiştirmeleri sınırlar. Bu sayede artan etkiler altında kesit moment dayanımında önemli bir azalma olmadan şekil değiştirme yapabilmesi amaçlanır. Yanal şekil değiştirmelerin önlenmesi sünekliği artırır. Sargı donatısı, betonarme kesitlerde sünekliği artıran en önemli etkidir.



Şekil 3.5 Sargı donatısının sünekliğe etkisi

Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi sargılı durumdaki beton sargısız durumdaki betona göre çok daha fazla şekil değiştirme yapabilmektedir. Eğrilerin altında kalan alan tüketilen enerjinin dolayısıyla sünekliğin ifadesidir. Sargılı durum sünekliği, sargısız duruma göre fazladır.

### 3.4 Yapı Sistemlerinde Süneklik

Yapı sistemlerinde süneklik, yapının enerji tüketebilme yeteneğidir. Sünek yapılarda deprem etkilerinin meydana getirdiği enerji, büyük genlikli titreşimlerle yutulur. Sünek yapılarda bu büyük genlikli titreşimler yapının toplam dayanımında önemli bir kayıp oluşturmaz. Süneklik sayesinde kesitler arası yardımlaşma meydana gelecek ve yüklemenin ilerleyen kademelerinde doğrusal sınırı geçen kesitler plastik şekil değiştirmeler ile enerji sönmölerken, iç kuvvetler daha az zorlanan kesitlere aktarılacaktır. Sünekliğin gereği olan plastikleşme bölgelerinin meydana gelebilmesi

için sistemin yüksek mertebeden hiperstatik olması gerekir [3]. Bu zellik yapının göçme şeklinin belirlenmesine de yardımcı olur. Ayrıca patlama gibi yükleme durumlarında enerjinin yutulması için süneklik gereklidir [4].

Sünek yapılar için sünek malzemeler, sünek kesitler ve sünek taşıyıcı sistemler gereklidir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin sahip oldukları sönüm yeteneklerinin süneklik özelliği ile birleştirilmesi sonucu depreme dayanıklı betonarme yapı sistemleri oluşturulabilir. Süneklik düzeyi yüksek olmayan betonarme yapılarda, bir çok kesit kapasitesine ulaşmadan kat mekanizması gibi durumların oluşması sonucu yapı stabilitesini yitirmektedir. Oysa süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanan yapılarda süneklik, kesitlerin yardımlaşmasına imkan verebilecek şekil değiştirme ve yerdeğiştirme yeteneği sağlar.



#### 4 PLASTİK MAFSAL KABULÜ

Betonarme kesitlerde moment etkisi altında dönme meydana gelir. Momentin düşük değerlerinde betonarme kesitlerin moment-eğrilik bağıntıları doğrusal elastik olarak kabul edilebilir. Momentin artan değerlerinde sırasıyla betonarme kesitte çatlama ve donatıda akma meydana gelir. Bu noktadan itibaren betonarme kesiti oluşturan betonun ve çeliğin doğrusal olmayan davranışları kesitte hakim olur. Kesitin moment-eğrilik bağıntısı da doğrusal davranıştan uzaklaşır. Plastik davranışın hakim olduğu bu aşamalarda kesitin taşıyabileceği moment çok az artarken, kesit dönmeleri hızlı bir şekilde artar. Bu iki bölgenin ayrımı, çekme donatısının akmaya başladığı nokta olarak kabul edilebilir.

Meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin belirli bir bölgede yoğunlaştığı ve bu bölgede kesit dönmelerinin en büyük kesit dönmesine ( $\phi_u$ ) eşit olduğu kabul edilir. Plastik dönmelerin bu şekilde belirli bir bölgede toplanması “Plastik Mafsal Kabulü” olarak adlandırılır. Plastik mafsalarda kesit dönmeleri, eğilme momentinin en büyük değerine ( $M_u$ ) ulaşması ile ortaya çıkar. Bu, plastik mafsalın normal mafsaldan ayrılan en önemli özelliğidir. Plastik mafsal bölgelerinde kesit, moment artışı olmadan dönmeye devam eder.

Plastik mafsal bölgelerinin sünek sistemlerde oluşabilmesi, sistemin yüksek dereceden hiperstatik olmasına bağlıdır. Plastik mafsal bölgesi boyu, moment-eğrilik diyagramına, eleman boyunca eğilme momentinin değişimine, kesit yüksekliğine ve kesitteki normal kuvvete bağlıdır [3]. Kiriş kesitleri için  $d/2$ , kolon kesitleri için  $d$  plastik mafsal boyu olarak kabul edilebilir. Diğer bir yaklaşımla deney sonuçlarına göre kirişlerde plastik mafsal boyu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$l_p = 0.25d + 0.075z \quad (4.1)$$

$$l_p = 0.50d + 0.050z \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 ve 4.2’de verilen  $l_p$  plastik mafsal boyu,  $z$  kesitin moment sıfır kesitinden uzaklığı,  $d$  kiriş yüksekliğidir.

## 5 ÇÖZÜMLEME

Yapı analizi metotları kuvvet kontrollü davranış yerine yerdeğiştirme kontrollü davranışın tercih edilmesi yönünde gelişmektedir [5]. Yapı sistemlerinde hasar seviyesi, yerdeğiştirme kontrolü ile daha kolay tanımlanabilmektedir.

Yapıların yatay kuvvet etkisindeki analizlerinde, genel olarak basitleştirilmiş statik yatay yük yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak yapılan yatay yük hesaplarında yapının, meydana gelebilecek deprem etkilerini elastik sınırlar içerisinde karşılaması öngörülür. Ancak düşünülen deprem etkilerinin elastik sınırlar içinde karşılanması, yapıda ekonomik olmayan çözümleri doğurmaktadır. Yapının ömrü boyunca karşılaşma olasılığı düşük olan bu etkilerin, sürekli karşılaştığı düşey yükler gibi, elastik davranış sınırları içerisinde hesaplanması makul değildir. Seyrek olarak meydana gelen bu tür etkilerde, yapının elastik ötesi “yedek gücünün” [6] de devreye sokulması gerekir. Ancak yapının elastik ötesi davranışından kaynaklanan kapasitesinin hesaplanması, doğrusal olmayan analizi gerektirir.

Yapı sistemlerinde doğrusal olmayan davranışın iki nedeni vardır:

- Malzemenin doğrusal elastik olmaması
- Geometri değişimi

Malzemenin doğrusal elastik olmadığı durumlarda elastoplastik teori geçerlidir. Geometri değişimleri bulunan sistemlerde ise ikinci mertebe teorisi uygulanır. Bu iki durumun, malzemenin doğrusal elastik davranmaması ve geometri değişimi, bulunduğu sistemlerde ikinci mertebe elastoplastik teori uygulanır.

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan hesabında; elastik ötesi şekil değiştirmeler sınırlılık amacını sağlarken, ikinci mertebe etkilerinin artmasına neden olabilir. İkinci mertebe etkilerinin sebep olabileceği göçmeye, bu sistemlerde dikkat edilmelidir.

### 5.1 Doğrusal Olmayan Statik Çözümleme (Pushover)

Yapıların doğrusal hesap metotları ile analizlerinde yapı malzemesinin doğrusal elastik davrandığı ve yerdeğiştirmelerin çok küçük olduğu (I. Mertebe Teorisi) kabulleri yapılır. Süperpozisyon kuralları geçerlidir. İşletme yükleri altındaki gerilmeler seçilen güvenlik katsayılarına bölünerek, doğrusal elastik sınır gerilmesinden küçük olması hedeflenir. Doğrusal analiz sonucu göçmeye karşı sabit güvenlik sağlanamazken, doğrusal elastik sınır ötesindeki taşıma gücünden yararlanılamaz. Doğrusal analiz, yapıların elastik kapasiteleri ve ilk akma bölgesi hakkında iyi sonuçlar vermektedir. Ancak, yapının göçme mekanizması bu metotla belirlenemez. Ayrıca ilk plastik mafsaldan sonra takip eden akmalar sonucu kuvvetlerin yeniden dağılımı belirlenemez.

Yapıların doğrusal olmayan hesap metotları ile analizlerinde; yapı malzemesinin lineer elastik davranmaması ve büyük yerdeğiştirmelerin meydana gelmesi durumları göz önüne alınır. Süperpozisyon geçerli değildir. Yatay yükler uygulanırken yapıda düşey yükleme bulunur. Yatay yükler, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde artırılır. Genel olarak düzgün yapılarda birinci mod etkileri önemli olduğundan, uygulanan yatay yük dağılımı bu mod şekline benzer bir dağılım olarak seçilebilir. Yükler artarken kesitlerden biri veya birkaçı taşıma gücüne erişir ve bu kesitlerde plastik mafsallar oluşur. Plastik mafsal oluşan kesitler, taşıma güçlerinde değişme olmaksızın, dönmeye devam ederler. Plastik mafsallar arasında sistem lineer elastik davranır. Her adımda değişen rijitlik matrisleri ile lineer hesap yapılır. Takip eden seviyelerde sistem mekanizma durumuna gelir ve göçme yüküne ulaşılır. Göçme yükü (Limit Yük), sistemin bir bölümünü veya tamamını mekanizma durumuna getiren yüküdür. Göçme yükü tayin edilerek işletme yüklerine bölünür ve güvenlik katsayısı elde edilir. İşletme yükleri altında; yapının elastik sınırı aşmaması ve zararlı olabilecek yerdeğiştirmelerin, şekil değıştirmelerin ve çatlakların oluşmaması istenir. Doğrusal olmayan analiz sonucu göçmeye karşı sabit güvenlik sağlanırken, lineer sınır ötesindeki taşıma gücünden de yararlanılmış olunur. Diğer taraftan, yapının tanımlanan göçme modlarında nasıl davrandığının belirlenmesine yardımcı olur.

Doğrusal olmayan çözümlemeler belirli sınırlar içerisinde kullanılır. Doğrusal olmayan statik çözümlemede aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Yüksek modların etkili olduğu durumlarda statik çözümleme yeterli olmaz. Eğer %90 kütle katılım oranı ile modal çözümleme yapıldığında bulunan kat

kesme kuvveti, bir mod göz önüne alınarak yapılan çözümlemelerden bulunan kesme kuvvetinin %130 unu geçiyorsa, yüksek modların etkili olduğuna karar verilir.

- Taşıyıcı sistem hakkında ayrıntılı bilgi olmadığı durumlarda doğrusal olmayan statik çözümleme kullanılmamalıdır.

Doğrusal olmayan dinamik çözümlemede aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Taşıyıcı sistem hakkında ayrıntılı bilgi olmadığı durumlarda doğrusal olmayan dinamik çözümleme kullanılmamalıdır.
- Çözümleme ve sonuçlar deneyimli bir üçüncü taraf tarafından gözden geçirilmelidir [7].

## 5.2 Boyutlamada Kapasite Kavramı

Yapıların yatay kuvvetler altında hesaplarında malzeme özelliklerinden yatay kuvvetin belirlenmesine kadar bir çok kabul yapılır. Bunun sonucu olarak, meydana gelecek depremlerde, yapı öngörülenden daha çok veya daha az zorlanabilir. Yapı karşılaşabileceği öngörülenden fazla kuvvetler altında hasar görebilir ancak ayakta kalabilmelidir. Bu durum hasarın sistemde yayılı olarak meydana gelmesi ile sağlanır.

Hasarın taşıyıcı sistemde yayılı olarak meydana gelmesi kesitler arası yardımlaşmaya bağlıdır. Bu sayede kapasitesine ulaşan kesite diğer kesitler yardımcı olacak ve sistemdeki toplam hasar kesitler arasında paylaşılabilecektir. Ancak kesitler arası yardımlaşmanın olabilmesi sünekliğe bağlıdır. Kapasitesine ulaşan kesit, diğer kesitlere kuvvetler aktarılırken, şekil değiştirmeye devam etmelidir (Plastik Mafsallı Kabulü). Bu sayede yerel büyük hasar yerine, yayılı olarak küçük hasarlarla öngörülenden daha büyük kuvvetler karşılanır. Ayrıca yönetmeliklerce istenen sünek güç tükenmesi koşulları da sağlanmış olur. Kesitler arası yardımlaşma sünekliğe, hiperstatiklik derecesine, sistem geometrisine ve kesitler arası kapasite oranlarına bağlıdır.

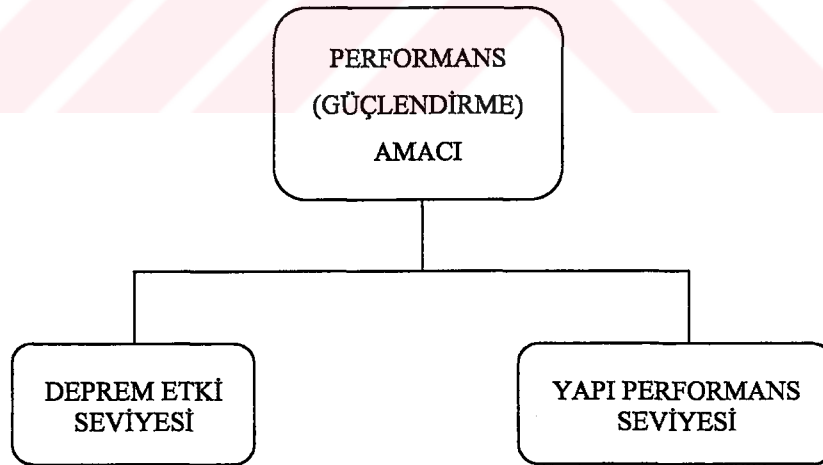
Kesitlerin kapasitelerini göz önünde bulunduran bu sistem sayesinde yapı, önceden belirlenen bir göçme şekline göre davranır. Yani yapı sünek olarak davranacak ve toptan göçme engellenecektir.

## 6 PERFORMANS METODU

Performans Metodu, yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının belirlenmesi ve depreme dayanıklı duruma getirilmelerinde kullanılan yöntemlerdendir. Yapının fonksiyonuna göre Yapı Performans Seviyeleri'nden biri belirlenir. Belirlenen yapı performans seviyesinin şartlarına göre yeni yapıların tasarımı, mevcut yapıların incelemesi ve güçlendirilmesi yapılır.

### 6.1 Performans Amacı

Yeni yapılacak tasarımda ya da mevcut bir sistemin incelenmesinde ilk adım performans amacının belirlenmesidir. Belirlenecek performans amacı, seçilen deprem etkisi altında yapıdan beklenen performans seviyesini tanımlar. Buradan da anlaşılacağı gibi performans amacının belirlenmesinin iki bileşeni, deprem etkisini tanımlayan Deprem Etki Seviyesi ve yapının performansını tanımlayan Yapı Performans Seviyesi'dir.



Şekil 6.1 Performans amacı

#### 6.1.1 Deprem Etki Seviyesi

Yapıların Performans Metodu ile incelenmesinde, seçilen performans amacının hangi deprem etkisi altında sağlanacağını belirlemek gerekir. Deprem etkisinin belirlenmesi iki adımdan oluşur:

- kullanılacak depremin tanımlanması
- bu deprem için spektrum eğrisinin oluşturulması

Kullanılacak depremin tanımlanmasında iki yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi, depremin 50 yıl içerisinde aşılma olasılığından hareket eder. Diğer tanım ise benzer büyüklükteki depremlerin ortalama tekrarlanma aralığı (dönüş periyodu) kavramını kullanır. Birinci tanım kullanılarak üç adet deprem seviyesi tanımlanabilir:

- Kullanma Depremi (SE)

50 yıllık periyot içinde aşılma olasılığı %50 olan deprem etkisini tanımlar (%50/50 yıl). Bu etkinin ortalama dönüş periyodu yaklaşık 75 yıldır ve yapı ömrü boyunca ortaya çıkması muhtemeldir.

- Tasarım Depremi (DE)

Temel Güvenlik Depremi 1 (TGD-1) olarak belirtilebilecek bu tür depremlerin 50 yıllık periyot içinde aşılma olasılığı %10'dur (%10/50 yıl). Bu etkinin ortalama dönüş periyodu yaklaşık 500 yıldır ve yapı ömrü boyunca ortaya çıkması pek muhtemel değildir. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik 1998 de tarif ettiği deprem kuvvetlerinde yaklaşık olarak bu depremi göz önünde bulundurur.

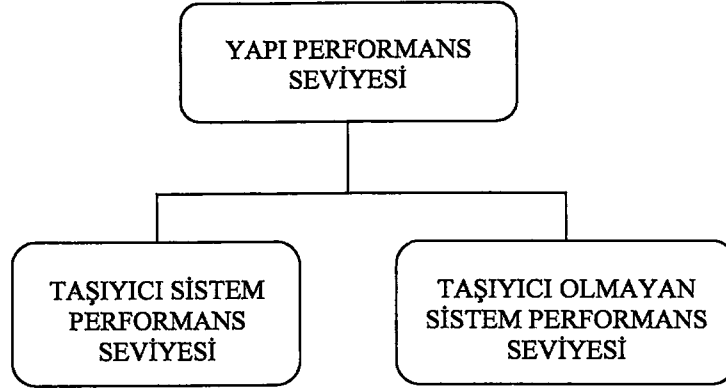
- Maksimum Deprem (ME)

Temel Güvenlik Depremi 2 (TGD-2) olarak belirtilebilecek bu tür depremlerin 50 yıllık periyot içinde aşılma olasılığı %2'tir (%2/50 yıl). Bu etkinin ortalama dönüş periyodu yaklaşık 2500 yıldır.

### **6.1.2 Yapı Performans Seviyesi**

Performans seviyeleri, deprem sonrası meydana gelen hasarı ve yapı sistemlerinin deprem sonrası durumlarını sınıflandırır. Deprem sırasında ve sonrasında can güvenliği riskini inceler. Deprem sonrası onarım veya güçlendirme gereksinimlerini tanımlar.

Yapı performans seviyeleri, taşıyıcı olan ve taşıyıcı olmayan sistemler için ayrı ayrı tanımlanır. Taşıyıcı Sistem Performans Seviyeleri ve Taşıyıcı Olmayan Sistem Performans Seviyeleri'nin çeşitli kombinasyonları Yapı Performans Seviyesi'ni oluşturur.



Şekil 6.2 Yapı performans seviyesi

#### 6.1.2.1 Taşıyıcı Sistem Performans Seviyeleri

Taşıyıcı sistem performans seviyeleri, yapı taşıyıcı sistem elemanlarının deprem sonrası hasarlarını sınıflandırır. Taşıyıcı sistemlerin deprem sonrası işlevselliğini tespit eder. Üç adet taşıyıcı sistem performans seviyesi ve bu seviyeler arasında kalan, iki adet taşıyıcı sistem performans aralığı tanımlanır.

- Hemen Kullanım Performans Seviyesi (SP-1): Deprem sonrasında sınırlı yapısal hasarın olduğu performans seviyesidir. Yapının taşıyıcı sistemleri, deprem öncesi kapasite ve taşıyıcılık özelliklerini hemen hemen korumaktadırlar. Yapı giriş ve çıkışları hemen kullanım aşamasında güvenlidir.
- Hasar Kontrol Performans Aralığı (SP-2): Performans seviyesi olmayıp, Hemen Kullanım Performans Seviyesi (SP-1) ile Can Güvenliği Performans Seviyesi (SP-3) aralığını tanımlar. Yönetmeliklerde yeni binalar için 50 yıllık süre içinde aşılma olasılığı %10 olarak tanımlanan deprem etkisinde öngörülen performans seviyesi bu aralığa düşer [8].
- Can Güvenliği Performans Seviyesi (SP-3): Deprem sonrasında önemli sayılabilecek yapısal hasarın olduğu performans seviyesidir. Ancak taşıyıcı sistem toptan veya kısmi göçme durumuna ulaşmamıştır. Önemli yapısal sistemlerde düşme veya göçme gözlenmez. Deprem sırasında yaralanma olabilir. Yapısal hasardan kaynaklanan, hayati tehlike oluşturabilecek yaralanma riski çok düşüktür. Yapının kullanımı için kapsamlı yapısal onarımlar gerekebilir. Ancak, hasar seviyesi her zaman onarılabilecek kadar ekonomik olmayabilir.

- Sınırlı Güvenlik Performans Aralığı (SP-4): Performans seviyesi olmayıp, Can Güvenliği Performans Seviyesi (SP-3) ile Toptan Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi (SP-5) aralığını tanımlar.
- Toptan Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi (SP-5): Deprem sonrası, güç tükenmesi eşiğindeki hasarın sınırlandırılması seviyesidir. Yapıda önemli derecede hasar meydana gelmiştir. Yatay kuvvet taşıyıcı sistem rijitlik ve dayanımında önemli derecede düşüş gerçekleşmiştir. Ancak, düşey yük taşıyıcı sistem işlevini sürdürmektedir. Yapı içinde veya dışında yaralanma riski yüksektir. Artçı depremler göçmeye neden olabilir. Maksimum deprem etkilerinde yapısal stabilite devamı için bu performans seviyesi kullanılabilir.
- Hasarın Göz Önüne Alınmadığı Performans Seviyesi (SP-6): Taşıyıcı sistem ve eleman hasarlarının göz önüne alınmadığı hasar seviyesidir.

#### **6.1.2.2 Taşıyıcı Olmayan Sistem Performans Seviyeleri**

Taşıyıcı olmayan sistem performans seviyeleri, yapıda taşıyıcı olmayan sistem elemanlarının deprem sonrası hasarlarını sınıflandırır. Taşıyıcı olmayan sistemlerin deprem sonrası işlevselliğini tespit eder. Beş adet taşıyıcı olmayan sistem performans seviyesi tanımlanır.

- Kullanıma Devam Performans Seviyesi (NP-A): Deprem sonrasında yapısal olmayan eleman ve sistemler genel olarak işlevlerine devam eder. Küçük temizlik ve onarım gerekebilir. Bütün ekipman ve makineler çalışabilir durumdadır.
- Hemen Kullanım Performans Seviyesi (NP-B): Yapısal olmayan elemanlarda bir hasar söz konusu değildir. Deprem sonrasında yapısal olmayan eleman ve sistemler genel olarak işlevlerine devam eder. Küçük temizlik ve onarım gerekebilir. Ekipman ve makineler genellikle sabitlenmiştir. Kuvvetli sarsıntıdan sonra işlevsel olmaları düşünülemez ve işlevlerinde bazı kısıtlamalar olabilir.
- Can Güvenliği Performans Seviyesi (NP-C): Deprem sonrası yapısal olmayan eleman ve sistemlerde önemli hasarlar meydana gelebilir. Fakat yapının kısmi veya toptan göçmesi söz konusu değildir. Yapısal olmayan sistemler, ekipman ve makineler işlevsel değildir. Deprem sırasında yaralanmalar

meydana gelebilir. Yapısal olmayan eleman hasarlarından kaynaklanabilecek hayati yaralanma riski düşüktür.

- Azaltılmış Hasar Performans Seviyesi (NP-D): Deprem sonrası yapısal olmayan eleman ve sistemlerde yaygın hasarlar meydana gelebilir. Fakat göçme veya düşme gözlenmez.
- Hasarın Göz Önüne Alınmadığı Performans Seviyesi (NP-E): Taşıyıcı olmayan eleman hasarlarının göz önüne alınmadığı hasar seviyesidir.

#### **6.1.2.3 Yapı Performans Seviyeleri**

Bir yapının Performans Seviyesi; depremden sonraki kabul edilebilir hasar ve binada kabul edilecek deprem güvenliği seviyesine bağlı olarak tanımlanır. Taşıyıcı sistem ve taşıyıcı olmayan sistem performans seviyelerinin birleştirilmesiyle, yapı için hasar sınırlarını belirleyen, Yapı Performans Seviyesi belirlenir. En çok kullanılan yapı performans seviyeleri:

- Kullanıma Devam Performans Seviyesi (1-A): Bu performans seviyesi işlevsellikle ilgilidir. Yapıdaki hasar sınırlıdır. Yapının taşıyıcı olan ve olmayan elemanlarındaki hasar, kullanımı etkilemeyecek seviyededir.
- Hemen Kullanım Performans Seviyesi (1-B): Önemli yapılar için öngörülen performans seviyesidir. Yapının sistemleri kullanılabilir durumdadır. Bazı onarım işlemleri gerekebilir.
- Can Güvenliği Performans Seviyesi (3-C): Can güvenliği için tehlikeli olabilecek hasar seviyesi olasılığının çok düşük olmasını ön görür. Taşıyıcı olan sistemde hasar oluşmuştur. Ancak sistemde bir miktar kapasite bulunmaktadır.
- Toptan Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi (5-E): Yapının düşey yük taşıyıcı sistemdeki hasarla ilgilidir. Yapının düşey yük taşıyan sistemi ancak ayaktaadır. Yatay yükler altında sistemin yalnızca stabil olması yeterlidir. Artçı depremlerde toptan göçme olabilir. Taşıyıcı olan ve taşıyıcı olmayan sistem elemanları hasarları can güvenliğini tehlikeye sokabilir.

Tablo 6.1 Yapı performans seviyeleri

| YAPI PERFORMANS SEVİYELERİ                       |                                       |                                  |                                   |                                     |                                               |                                                  |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Taşıyıcı Olmayan Sistem Performans Seviyeleri    | Taşıyıcı Sistem Performans Seviyeleri |                                  |                                   |                                     |                                               |                                                  |
|                                                  | SP-1<br>Hemen Kullanım P. Seviyesi    | SP-2<br>Hasar Kontrol P. Aralığı | SP-3<br>Can Güvenliği P. Seviyesi | SP-4<br>Sınırlı Güvenlik P. Aralığı | SP-5<br>Toptan Göçmenin Önlenmesi P. Seviyesi | SP-6<br>Hasarın Göz Önüne Alınmadığı P. Seviyesi |
| NP-A<br>Kullanıma Devam P. Seviyesi              | 1-A<br>Kullanıma Devam P. Seviyesi    | 2-A                              |                                   |                                     |                                               |                                                  |
| NP-B<br>Hemen Kullanım P. Seviyesi               | 1-B<br>Hemen Kullanım P. Seviyesi     | 2-B                              | 3-B                               |                                     |                                               |                                                  |
| NP-C<br>Can Güvenliği P. Seviyesi                | 1-C                                   | 2-C                              | 3-C<br>Can Güvenliği P. Seviyesi  | 4-C                                 | 5-C                                           | 6-C                                              |
| NP-D<br>Azaltılmış Hasar P. Seviyesi             |                                       | 2-D                              | 3-D                               | 4-D                                 | 5-D                                           | 6-D                                              |
| NP-E<br>Hasarın Göz Önüne Alınmadığı P. Seviyesi |                                       |                                  | 3-E                               | 4-E                                 | 5-E<br>Toptan Göçmenin Önlenmesi P. S.        |                                                  |

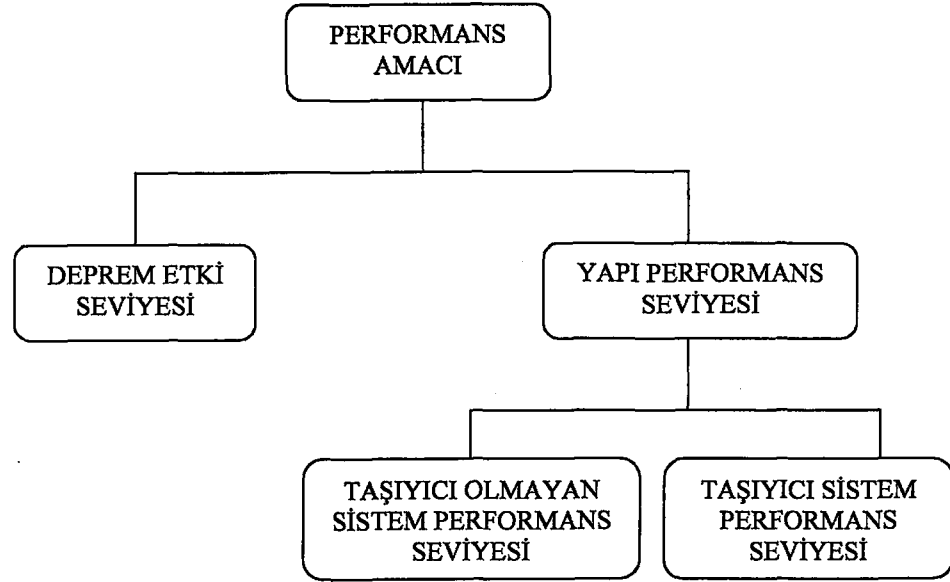
|                                                            |
|------------------------------------------------------------|
| En çok kullanılan performans seviyeleri                    |
| Diğer kullanılabilir performans seviyeleri                 |
| Tavsiye edilmeyen veya uygulanamayan performans seviyeleri |

Yapı performans seviyeleri Tablo 6.1’de gösterildiği gibi köşegen üzerinde, Taşıyıcı Sistem ve Taşıyıcı Olmayan Sistem Performans Seviyelerinin mantıklı eşleşmeleriyle belirlenir. Tavsiye edilmeyen performans seviyeleri, Taşıyıcı Sistem ve Taşıyıcı Olmayan Sistem Performans seviyelerinin mantıklı olmayan eşleşmeleridir. Örnek olarak taşıyıcı olmayan sistemlerde kullanıma devam seviyesi hedeflenirken, taşıyıcı sistemlerde hasarın göz önünde bulundurulmadığı performans seviyesinin hedeflenerek eşleştirilmesi mantıklı değildir.

### 6.1.3 Performans Amacı Belirlenmesi

Yapılarda performans amacı; yapı performans seviyeleri ve deprem etki seviyelerinin birebir eşlenmesi ile oluşturulur. Belirlenen deprem etki seviyesinde, seçilen yapı performans seviyesi, yapı performans amacını oluşturur. Yapı için tek performans

amacı belirlenebileceği gibi; değişik deprem etkileri altında değişik yapı performans seviyeleri seçilerek, birden fazla performans amacı da belirlenebilir.



Şekil 6.3 Performans amacının belirlenmesi

Tablo 6.2’de Deprem Etki Seviyesinin ve Yapı Performans Seviyesinin eşlenerek Performans Amacı’nın oluşturulması gösterilmiştir. Değişik Yapı Performans ve Deprem Etki Seviyeleri eşlenerek farklı performans amaçları belirlenebilir.

Tablo 6.2 Performans amacının belirlenmesi

| Performans Amacının Belirlenmesi |                            |                      |                     |                                 |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------|
| Deprem Etki Seviyeleri           | Yapı Performans Seviyeleri |                      |                     |                                 |
|                                  | Kullanıma Devam (1-A)      | Hemen Kullanım (2-B) | Can Güvenliği (3-C) | Toptan Göçmenin Önlenmesi (5-E) |
| Kullanıma Depremi (SE)           |                            |                      |                     |                                 |
| Tasarım Depremi (DE)             |                            |                      | √                   |                                 |
| Maksimum Deprem (ME)             |                            |                      |                     |                                 |

▪ Temel Güvenlik Amacı

Tasarım depremi etkisi (DE) altında Can Güvenliği Performans Seviyesini (3-C), maksimum deprem etkisi (ME) altında Yapısal Stabilitate Performans Seviyesini (5-E) tanımlayan performans amacıdır. Tablo 6.3 Temel Güvenlik Amacı’nı belirtmektedir.

Tablo 6.3 Temel güvenlik performans amacı

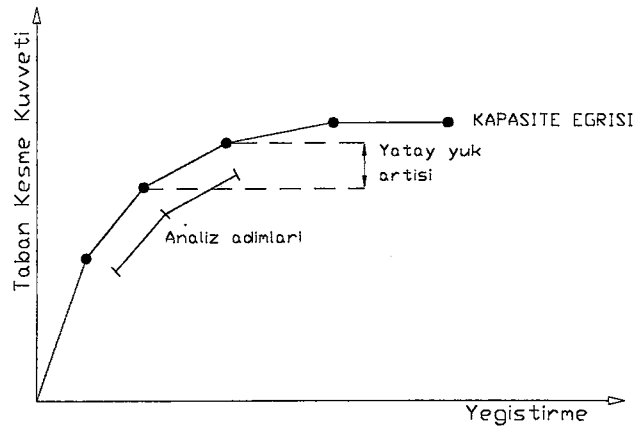
| Performans Amacının Belirlenmesi |                            |                      |                     |                                 |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------|
| Deprem Etki Seviyeleri           | Yapı Performans Seviyeleri |                      |                     |                                 |
|                                  | Kullanıma Devam (1-A)      | Hemen Kullanım (2-B) | Can Güvenliği (3-C) | Toptan Göçmenin Önlenmesi (5-E) |
| Kullanıma Depremi (SE)           |                            |                      |                     |                                 |
| Tasarım Depremi (DE)             |                            |                      | √                   |                                 |
| Maksimum Deprem (ME)             |                            |                      |                     | √                               |

## 6.2 Kapasite

Kapasite, yapının beklenen talep deprem etkisini karşılayabilme özelliğidir. Yapıyı oluşturan elemanların dayanım ve şekil değiştirme kapasitelerine bağlı olan yapının genel kapasitesidir. Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan sistemlerin ve elemanların kapasiteleri ile yapının kapasitesi tanımlanabilir. Yapıda performans amacıyla tanımlanan deprem etkisine karşı koyabilecek kapasitenin bulunması gerekir. Yapının performansı, kapasitenin talep deprem etkisini karşılayabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Elastik sınır ötesindeki kapasitenin bulunması için doğrusal olmayan statik analiz kullanılabilir. Bu, tüm yapının, kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinin yaklaşık olarak çıkartılması işlemidir.

### 6.2.1 Kapasite Eğrisinin Oluşturulması

Yapı kapasitesi kapasite (pushover) eğrisi ile tanımlanır. Kapasite eğrisinin eksen takımları, taban kesme kuvveti ve yapının en üst noktasındaki yerdeğiştirme değerleridir. Yapının, belirlenen yatay yük modeli ile, limit duruma erişene kadar artarak itilmesi ile elde edilir. Kapasiteye erişen kesitler akma sonrası rijitliklerine eşitlenir ve yeni durumda doğrusal analiz tekrarlanır. Tekrar eden doğrusal analizler sonucu, her adımdaki taban kesme kuvvetleri ve yerdeğiştirmelerin birleştirilmesiyle kapasite eğrisi oluşturulur.



Şekil 6.4 Kapasite eğrisi

Eğer yapının sonsuz elastik kapasitesi olsaydı, kapasite eğrisi eğimi yapı rijitliği olan düz bir çizgi olarak karşımıza çıkardı. Ancak kapasite eğrisi, yapıların sonsuz elastik kapasitesi bulunmadığından, doğru parçalarından oluşur. Artan yatay kuvvetler sonucu oluşan akmalardan ve hasarlardan yapıda oluşan rijitlik azalmaları, doğru parçaları eğimlerinin giderek azaltmaktadır. Eğri üzerinde herhangi bir yerdeğiştirme noktasından ve orijinden geçen doğrunun eğimi, o noktadaki yapı etkili rijitliğini verir.

### 6.2.2 Doğrusal Olmayan Statik Analiz (Pushover)

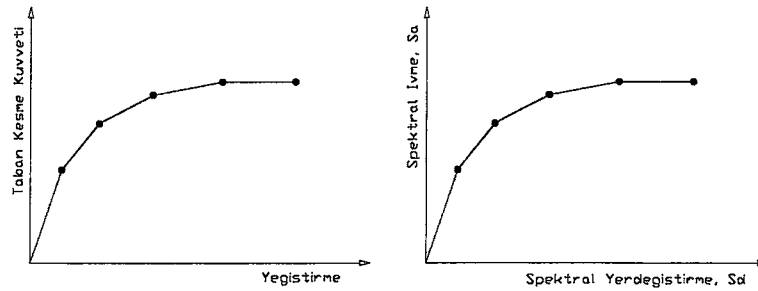
Yapıların doğrusal hesap metotları ile analizlerinde yapı malzemesinin doğrusal elastik davrandığı ve yerdeğiştirmelerin çok küçük olduğu (I. Mertebe Teorisi) kabulleri yapılır. Süperpozisyon kuralları geçerlidir. İşletme yükleri altındaki gerilmeler seçilen güvenlik katsayılarına bölünerek, doğrusal elastik sınır gerilmesinden küçük olması hedeflenir. Doğrusal analiz sonucu göçmeye karşı sabit güvenlik sağlanamazken, doğrusal elastik sınır ötesindeki taşıma gücünden yararlanılamaz. Doğrusal analiz, yapıların elastik kapasiteleri ve ilk akma bölgesi hakkında iyi sonuçlar vermektedir. Ancak, yapının göçme mekanizması bu metotla belirlenemez. Ayrıca ilk akmadan sonra takip eden akmalar sonucu kuvvetlerin yeniden dağılımı belirlenemez.

Yapıların doğrusal olmayan hesap metotları ile analizlerinde; yapı malzemesinin doğrusal elastik davranmaması ve büyük yerdeğiştirmelerin meydana gelmesi durumları göz önüne alınır. Süperpozisyon geçerli değildir. Yatay yükler uygulanırken yapıda düşey yükleme bulunur. Yatay yükler, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde arttırılır. Genel olarak düzgün yapılarda birinci mod etkileri önemli

olduğundan, uygulanan yatay yük dağılımı bu mod şekline benzer bir dağılım olarak seçilebilir. Yükler artarken kesitlerden biri veya birkaçı taşıma gücüne erişir ve bu kesitlerde plastik mafsallar oluşur. Plastik mafsal oluşan kesitler, taşıma güçlerinde değişme olmaksızın, dönmeye devam ederler. Plastik mafsallar arasında sistem doğrusal elastik davranır. Her adımda değişen rijitlik matrisleri ile doğrusal hesap yapılır. Takip eden seviyelerde sistem mekanizma durumuna gelir ve göçme yüküne ulaşılır. Göçme yükü (Limit Yük), sistemin bir bölümünü veya tamamını mekanizma durumuna getiren yüküdür. Göçme yükü tayin edilerek işletme yüklerine bölünür ve güvenlik katsayısı elde edilir. İşletme yükleri altında; yapının elastik sınırı aşmaması ve kabul edilemeyecek yerdeğiştirmelerin, şekil değıştirmelerin ve çatlakların oluşmaması istenir. Doğrusal olmayan analiz sonucu göçmeye karşı sabit güvenlik sağlanırken, doğrusal sınır ötesindeki taşıma gücünden de yararlanılmış olunur. Diğer taraftan, yapının tanımlanan göçme modlarında nasıl davrandığının belirlenmesine yardımcı olur.

### 6.2.3 Kapasite Spektrumunun Oluşturulması

Doğrusal olmayan statik analiz sonucu elde edilen kapasite eğrisinin (taban kesme kuvveti-yerdeğıştirme) talep spektrumu ile karşılaştırılabilmesi için eksen takımlarının aynı olmaları gerekmektedir. Bunun için ATC40 “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings” kapasite eğrisi kapasite spektrumu eğrisine (spektral ivme-spektral yerdeğıştirme) dönüştürülmesini önermektedir. Kapasite spektrum eğrisinin bu eksen takımlarında gösterilmesi ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra) formu olarak isimlendirilir. Bu dönüşüm için iki temel denklem kullanılır:



Şekil 6.5 Kapasite eğrisinin kapasite spektrumuna dönüştürülmesi

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (6.1)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{\text{çatı}}}{PF_1 \phi_{\text{çatı},1}} \quad (6.2)$$

Bu denklemlerde kullanılan PF ve  $\alpha$  terimleri:

$$PF_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1})/g}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2)/g} \right] \quad (6.3)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1})/g \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N w_i/g \right] \left[ \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2)/g \right]} \quad (6.4)$$

$PF_1$ = Birinci modun modal katılım katsayısı

$\alpha_1$ = Birinci modun modal kütle katsayısı

$w_i/g$ = i. kat kütlesi

$\phi_{i1}$ = Birinci modun i. kattaki genliği

$N$ = Toplam kat sayısı

$V$ = Taban kesme kuvveti

$W$ = Yapı ağırlığı (sabit yük + hareketli yük)

$\Delta_{\text{çatı}}$ = Birinci modda en üst nokta yerdeğiştirmesi

$S_a$ = Spektral ivme

$S_d$ = Spektral yerdeğiştirme

Kapasite eğrisi kapasite spektrumuna dönüştürölürken ilk adımda modal katılım katsayısı ( $PF_1$ ) ve modal kütle katsayısı ( $\alpha_1$ ) hesaplanır. Daha sonra bu değerler kullanılarak kapasite eğrisi üzerindeki her nokta için spektral ivme ( $S_a$ ) ve spektral yerdeğiştirme ( $S_d$ ) değerleri hesaplanarak kapasite spektrum eğrisi oluşturulur.

### 6.3 Talep

Talep, Performans Metodu'nda deprem etkisini tanımlar. Yapı kapasitesinin seçilen deprem etkisi altında performansı, kapasite eğrisinin talep eğrisi ile karşılaştırılması ile belirlenir. Performans noktası Kapasite Spektrumu ile Talep Spektrumu'nun kesişim noktasıdır. Deprem etkisinin, kapasite ile yani Kapasite Spektrumu ile karşılaştırılması için Talep Spektrumu tanımlanmalıdır.

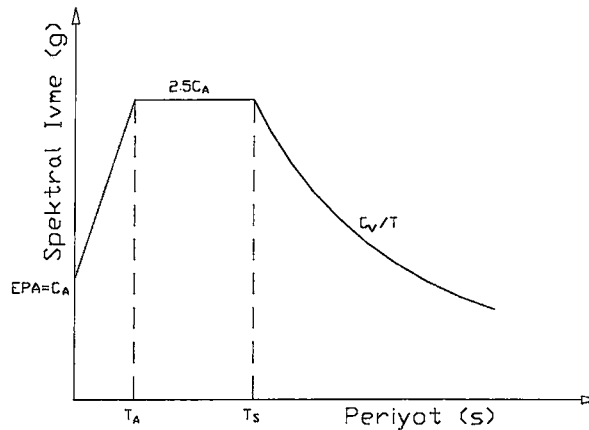
#### 6.3.1 Talep Spektrumu

Talep spektrumu, performans metodunda sismik talebin temsil edildiği grafikdir. Elde edilen kapasite eğrisinin karşılaştırılacağı deprem etkisini tanımlar. Talep Spektrumu'nun tanımlanmasında %5 sönümlü doğrusal davranış spektrumundan yararlanılır. Doğrusal olmayan etkiler de göz önüne alınarak, %5 sönümlü doğrusal davranış spektrumu azaltılarak Talep Spektrumu elde edilir.

%5 sönümlü elastik ivme spektrumunun eksen takımları spektral ivme ve periyottur. Tanımlanan elastik ivme spektrumu Talep Spektrumu'na dönüştürülmelidir. Talep spektrumunun elde edilmesinde iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi ATC40'ta açıklanan Kapasite Spektrumu Metodu, diğeri ise FEMA356'da açıklanan Yerdeğiştirme Katsayıları Metodu'dur.

#### 6.3.2 Doğrusal Davranış Spektrumu

%5 sönümlü doğrusal davranış spektrumu  $C_A$  ve  $C_V$  katsayıları ile tanımlanır ve Talep Spektrumu'nun elde edilmesinde kullanılır. Şekil 6.6'da %5 sönümlü doğrusal davranış spektrumunun oluşturulması gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Doğrusal davranış spektrumu

Burada  $T_A$  ve  $T_S$  kontrol periyotları olup 6.5 ve 6.6 denklemleri ile hesaplanır.

$$T_S = C_V / 2.5 C_A \quad (6.5)$$

$$T_A = 0.2 T_S \quad (6.6)$$

$C_A$  ve  $C_V$  katsayıları Tablo 6.4 ve 6.5'ten belirlenebilir ve binanın bulunduğu deprem bölgesine, bilinen herhangi bir faya olan uzaklığa ve zemin özelliklerine göre değişir.  $C_A$  katsayısı zeminin etkili en büyük ivmesini temsil etmektedir.  $C_V$ , periyodu 1s olan %5 sönümlü sistemin spektrum değeridir.  $2.5 C_A$ , %5 sönümlü kısa periyotlu sistemin en büyük ortalama ivme değerlerini temsil etmektedir.

Tablo 6.4 Deprem katsayısı  $C_A$

| Zemin Sınıfı | Deprem Katsayısı, $Z \cdot E \cdot N$ |       |       |       |       |                               |
|--------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|
|              | 0.075                                 | 0.150 | 0.200 | 0.300 | 0.400 | >0.400                        |
| $S_A$        | 0.08                                  | 0.15  | 0.20  | 0.30  | 0.40  | $1.0 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_B$        | 0.08                                  | 0.15  | 0.20  | 0.30  | 0.40  | $1.0 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_C$        | 0.09                                  | 0.18  | 0.24  | 0.33  | 0.40  | $1.0 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_D$        | 0.12                                  | 0.22  | 0.28  | 0.36  | 0.44  | $1.1 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_E$        | 0.19                                  | 0.30  | 0.34  | 0.36  | 0.56  | $0.9 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_F$        | Yerel Zemin İncelemesi Gerekli        |       |       |       |       |                               |

Tablo 6.5 Deprem katsayısı  $C_V$

| Zemin Sınıfı | Deprem Katsayısı, $Z \cdot E \cdot N$ |       |       |       |       |                               |
|--------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|
|              | 0.075                                 | 0.150 | 0.200 | 0.300 | 0.400 | >0.400                        |
| $S_A$        | 0.08                                  | 0.15  | 0.20  | 0.30  | 0.40  | $1.0 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_B$        | 0.08                                  | 0.15  | 0.20  | 0.30  | 0.40  | $1.0 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_C$        | 0.13                                  | 0.25  | 0.32  | 0.45  | 0.56  | $1.4 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_D$        | 0.18                                  | 0.32  | 0.40  | 0.54  | 0.64  | $1.6 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_E$        | 0.26                                  | 0.50  | 0.64  | 0.84  | 0.96  | $2.4 \cdot Z \cdot E \cdot N$ |
| $S_F$        | Yerel Zemin İncelemesi Gerekli        |       |       |       |       |                               |

Tablo 6.4 ve 6.5'de belirtilen zemin sınıfları Tablo 6.6'te tanımlanmıştır.

Tablo 6.6 Zemin profilleri tablosu

| Zemin<br>Profilleri | Zemin Profil İsmi<br>(Görsel Tanımlama) | İlk 30m'deki Ortalama Zemin Özellikleri  |                                                                            |                                                                 |
|---------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                     |                                         | Kayma Dalgası<br>Hızı ( $v_s$ )<br>(m/s) | Standart Penetrasyon Deneyi<br>Darbe Sayısı Değeri (N)<br>(darbe sayısı/m) | Drenajsız Kayma<br>Mukavemeti ( $s_U$ )<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
| S <sub>A</sub>      | Sert Kaya                               | $v_s > 1500$                             | Uygulanamaz                                                                |                                                                 |
| S <sub>B</sub>      | Kaya                                    | $1500 \geq v_s > 750$                    | Uygulanamaz                                                                |                                                                 |
| S <sub>C</sub>      | Çok Sıkı Zemin<br>ve Yumuşak Kaya       | $750 \geq v_s > 350$                     | $N > 165$                                                                  | $s_U > 100$                                                     |
| S <sub>D</sub>      | Sert Zemin                              | $350 \geq v_s > 180$                     | $165 \geq N > 50$                                                          | $100 \geq s_U \geq 50$                                          |
| S <sub>E</sub>      | Yumuşak Zemin                           | $180 > v_s$                              | $50 > N$                                                                   | $50 > s_U$                                                      |
| S <sub>F</sub>      | Yerel zemin incelemesi gerekli          |                                          |                                                                            |                                                                 |

Tablo 6.4 ve 6.5’de kullanılan Z katsayısı binanın bulunduğu deprem bölgesine göre değişmektedir. Bu katsayı 1998 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik’te [8] tanımlanan  $A_0$  katsayısı gibi değerlendirilebilir.

Tablo 6.7 Sismik bölge katsayısı, Z

| Sismik Bölge Katsayısı |       |      |      |      |      |
|------------------------|-------|------|------|------|------|
| Bölge                  | 1     | 2A   | 2B   | 3    | 4    |
| Z                      | 0.075 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 |

Kullanılan E katsayısı binaya uygulanacak deprem etki seviyesini tanımlayan katsayıdır. Bölüm 6.1.1’de tanımlanan deprem etki seviyelerine göre değişmektedir.

Tablo 6.8 Deprem etki seviyesi katsayısı, E

| Deprem Etki Seviyesi  | E         |
|-----------------------|-----------|
| Kullanma Depremi (SE) | 0.50      |
| Tasarım Depremi (DE)  | 1.00      |
| Maksimum Deprem (ME)  | 1.25-1.50 |

Kullanılan N katsayısı binanın bilinen herhangi bir sismik kaynağa (fay) olan uzaklığına göre değişen katsayıdır.

Tablo 6.9 Deprem kaynağı yakınlık katsayısı, N

| Deprem Kaynağı Yakınlık Katsayısı |                                         |                |                |                |                |                |                |                |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sismik Kaynak Tipi                | Bilinen Sismik Kaynağa En Yakın Uzaklık |                |                |                |                |                |                |                |
|                                   | ≤ 2 km                                  |                | 5 km           |                | 10 km          |                | ≥ 15 km        |                |
|                                   | N <sub>A</sub>                          | N <sub>V</sub> | N <sub>A</sub> | N <sub>V</sub> | N <sub>A</sub> | N <sub>V</sub> | N <sub>A</sub> | N <sub>V</sub> |
| A                                 | 1.5                                     | 2.0            | 1.2            | 1.6            | 1.0            | 1.2            | 1.0            | 1.0            |
| B                                 | 1.3                                     | 1.6            | 1.0            | 1.2            | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            |
| C                                 | 1.0                                     | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            | 1.0            |

Tablo 6.9’da üç tip sismik kaynak görülmektedir. Bunlar Tablo 6.10’da açıklanmıştır.

Tablo 6.10 Sismik kaynak tipi tablosu

| Sismik Kaynak Tipi | Sismik Kaynak Tanımı                                                                | Sismik Kaynak Tanımı |             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------|
|                    |                                                                                     | Maksimum Moment      | Kayma Hızı  |
|                    |                                                                                     | Büyüklüğü, M         | SR (mm/yıl) |
| A                  | Yüksek oranda sismik aktiviteli, büyük manyitüdlü depremler oluşturan kaynaklar     | M ≥ 7.0              | SR ≥ 5      |
| B                  | A ve C dışındaki bütün kaynaklar                                                    | Uygulanamaz          | Uygulanamaz |
| C                  | Düşük oranda sismik aktiviteli, büyük manyitüdlü depremler oluşturmamayan kaynaklar | M < 6.5              | SR < 2      |

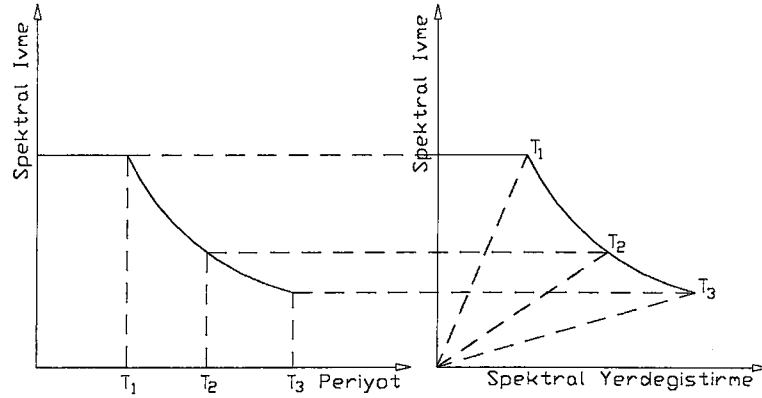
%5 sönümlü doğrusal davranış spektrumu oluşturulduktan sonra bu spektrum kullanılarak Talep Spektrumu oluşturulur. Talep spektrumunun elde edilmesinde iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi ATC40’ta açıklanan Kapasite Spektrumu Metodu, diğeri ise FEMA356’da [9] açıklanan Yerdeğiştirme Katsayıları Metodu’dur.

#### 6.4 Kapasite Spektrum Metodu (ATC40)

%5 sönümlü doğrusal davranış spektrumunun eksen takımı spektral ivme-periyottur. Bu eksen takımının ADRS formuna (spektral ivme-spektral yerdeğiştirme) dönüştürülmesi gerekmektedir. Şekil 6.7 eksen takımı değişimlerini göstermektedir. Bunun için 6.7 ve 6.8 denklemleri kullanılır:

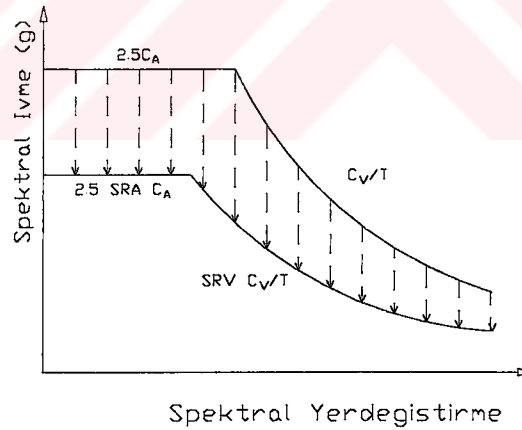
$$S_d = \frac{1}{4\pi} \cdot S_a \cdot T^2 \quad (6.7)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad (6.8)$$



Şekil 6.7 Doğrusal davranış spektrumunun ADRS formuna dönüştürülmesi

Talep Spektrumu doğrusal olmayan davranış sonucu oluşacak sönüm de göz önünde bulundurularak azaltılır. Talep Spektrumunun azaltılmasında Azaltma katsayıları ( $SR_A$  ve  $SR_V$ ) kullanılır ve Azaltılmış Talep Spektrumu elde edilir. Azaltma Katsayıları'nın bulunması için aşağıda açıklanan adımlar takip edilir.



Şekil 6.8 Doğrusal davranış spektrumunun azaltılması

$$SR_A = \frac{1}{B_s} \approx \frac{3.21 - 0.681 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (6.9)$$

$$SR_V = \frac{1}{B_L} \approx \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (6.10)$$

6.9 ve 6.10 denklemlerinde azaltma katsayılarının bulunmasında kullanılan  $\beta_{eff}$ , etkili toplam sönümü tanımlamaktadır. Doğrusal davranış spektrumu %5'lik bir sönüm

içerir. Ancak deprem etkileri altında doğrusal sınır aşıldıktan sonra davranış spektrumu çevrimsel değişim gösterir. Deprem etkisi altında yapıda doğrusal olmayan ve çevrimsel oluşan şekil değiştirmeler sonucu enerji tüketilir.

Deprem etkisi sırasında yapıda oluşan toplam sönüm iki parçadan oluşur: viskoz sönüm ve çevrimsel sönüm. Çevrimsel sönüm, yapının deprem etkisi altında yaptığı çevrimlerinin, taban kesme kuvveti-yerdeğiştirme grafiğinin altında kalan alanıdır. Çevrimsel sönüm yaklaşık olarak eşdeğer viskoz sönüme ( $\beta_0$ ) çevrilebilir. Eşdeğer viskoz sönüm en büyük yerdeğiştirmeye ( $d_{pi}$ ) bağlıdır ve denklem 6.11 ile hesaplanır.

$$\beta_{eff} = \beta_0 + 0.05 \quad (6.11)$$

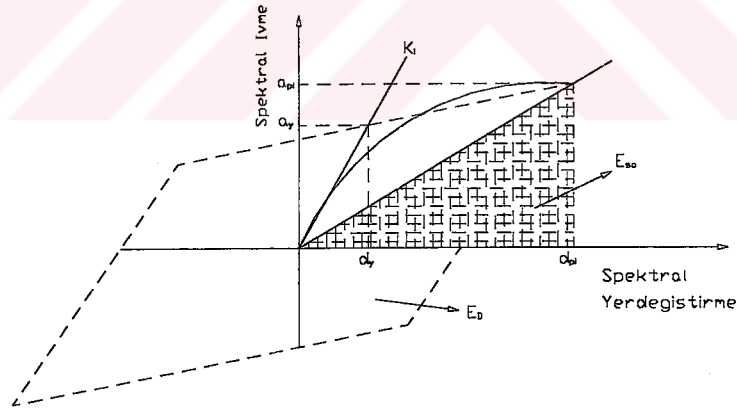
$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (6.12)$$

$\beta_0$ : eşdeğer toplam sönümün parçası olarak temsil edilen çevrimsel sönüm

0.05: yapıda bulunan %5 viskoz sönüm (sabit kabul edilir)

$E_D$ = sönümleme ile yutulan enerji

$E_{S0}$ = en büyük şekil değiştirme enerjisi



Şekil 6.9 Sönümün belirlenmesi

Şekil 6.9 sönümün belirlenmesini göstermektedir.  $E_D$ , tek çevrimde yapı tarafından yutulan enerji ile orantılıdır. Bu da tek çevrim eğrisinin altındaki alana eşittir.  $E_{S0}$ , bu çevrim altında maksimum şekil değiştirme enerjisidir ve taralı alanla ifade edilir, denklem 6.13 ve 6.14 ile hesaplanır.

$$E_D = 4(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi}) \quad (6.13)$$

$$E_{so} = \frac{a_{pi} \cdot d_{pi}}{2} \quad (6.14)$$

$$\beta_{eff} = \kappa \cdot \beta_0 + 5 = \frac{63.7\kappa(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}} + 5 \quad (6.15)$$

6.15 denkleminde kullanılan  $\kappa$ , yapının davranışına bağlı Sönüm Değiştirme katsayısıdır. Sismik etkileri taşıyan sistemin kalitesine ve deprem etkisinin süresine bağlıdır. Çevrimsel sönümün belirlenmesinde kullanılan paralel kenarın gerçek yapıda farklı olabileceği düşünülerek bu düzeltme katsayısı öngörülmüştür. Tablo 6.11 Sönüm Değiştirme Katsayısı'nın yapı davranış sınıfına göre değişimini göstermektedir.

Doğrusal olmayan statik itme çözümlemesinde, sistemin tekrarlı yükler altında çözümlemesi yapılmayıp tek yönde itilerek sonuca ulaşılır. Bunun için sistemin çevrimsel davranışı bulunarak, toplam sönüme çevrimsel davranış sönümü de dahil edilmelidir.

Tablo 6.11 Sönüm değiştirme katsayısı,  $\kappa$

| Yapı Davranış Sınıfı | $\beta_0$ (%) | $\kappa$                                                                         |
|----------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| A                    | $\leq 16.25$  | 1.0                                                                              |
|                      | $> 16.25$     | $1.13 - \frac{0.51(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}}$   |
| B                    | $\leq 25$     | 0.67                                                                             |
|                      | $> 25$        | $0.845 - \frac{0.446(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}}$ |
| C                    |               | 0.33                                                                             |

Çevrimsel davranışın tam oluşmadığı, yapım kalitesi düşük eski yapılarda katsayı düşük, yeni yapılarda ise sönüm çevrimi dolgun biçimde ortaya çıkacağı için düzeltme katsayısı yüksektir. Deprem etkisinin uzun olması durumunda enerji tüketimi artacaktır ve kısa süreli depremlere göre düzeltme katsayısı daha büyük olacaktır.

Denklem 6.9 ve 6.10'dan hesaplanan azaltma katsayıları Tablo 6.12'de verilen değerlerden küçük olamaz. Spektral azaltma katsayıları Tablo 6.13'ten yararlanılarak da belirlenebilir.

Tablo 6.12 Spektral azaltma katsayıları

| Yapı Davranış Sınıfları | SR <sub>A</sub> | SR <sub>V</sub> |
|-------------------------|-----------------|-----------------|
| A                       | 0.33            | 0.50            |
| B                       | 0.44            | 0.56            |
| C                       | 0.56            | 0.67            |

Tablo 6.13 Spektral azaltma katsayıları

| $\beta_0$<br>(%) | Yapı Davranış Sınıfı A |                                        |                                        | Yapı Davranış Sınıfı B |                                        |                                        | Yapı Davranış Sınıfı C |                                        |                                        |
|------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
|                  | $\beta_{eff}$          | SR <sub>A</sub><br>(1/B <sub>S</sub> ) | SR <sub>V</sub><br>(1/B <sub>L</sub> ) | $\beta_{eff}$          | SR <sub>A</sub><br>(1/B <sub>S</sub> ) | SR <sub>V</sub><br>(1/B <sub>L</sub> ) | $\beta_{eff}$          | SR <sub>A</sub><br>(1/B <sub>S</sub> ) | SR <sub>V</sub><br>(1/B <sub>L</sub> ) |
| 0                | 5                      | 1.00                                   | 1.00                                   | 5                      | 1.00                                   | 1.00                                   | 5                      | 1.00                                   | 1.00                                   |
| 5                | 10                     | 0.78                                   | 0.83                                   | 8                      | 0.83                                   | 0.87                                   | 7                      | 0.91                                   | 0.93                                   |
| 15               | 20                     | 0.55                                   | 0.66                                   | 15                     | 0.64                                   | 0.73                                   | 10                     | 0.78                                   | 0.83                                   |
| 25               | 28                     | 0.44                                   | 0.57                                   | 22                     | 0.53                                   | 0.63                                   | 13                     | 0.69                                   | 0.76                                   |
| 35               | 35                     | 0.38                                   | 0.52                                   | 26                     | 0.47                                   | 0.59                                   | 17                     | 0.61                                   | 0.70                                   |
| >45              | 40                     | 0.33                                   | 0.50                                   | 29                     | 0.44                                   | 0.56                                   | 20                     | 0.56                                   | 0.67                                   |

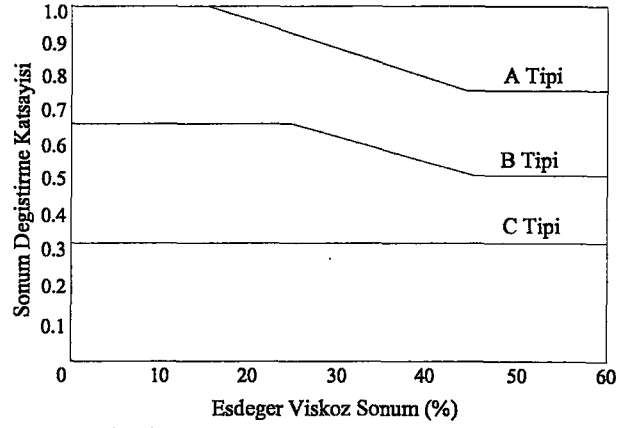
Tablo 6.11, 6.12 ve 6.13'te belirtilen Yapı Davranış Sınıfları Tablo 6.14'te açıklanmıştır.

Tablo 6.14 Yapı davranış sınıfı tablosu

| Salınım süresi | Genel olarak yeni bina | Ortalama mevcut bina | Zayıf mevcut bina |
|----------------|------------------------|----------------------|-------------------|
| Kısa           | TipA                   | TipB                 | TipC              |
| Uzun           | TipB                   | TipC                 | TipC              |

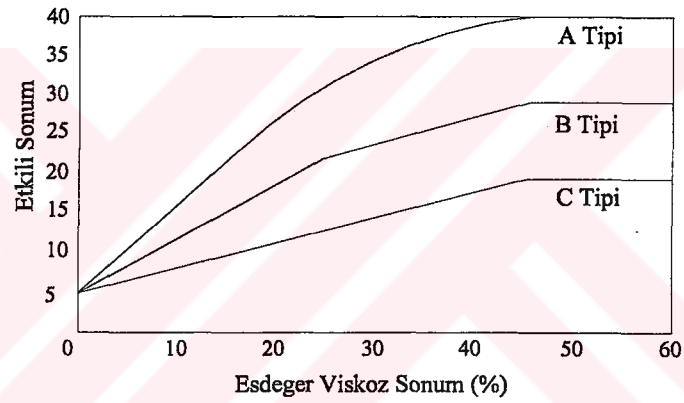
Tablo 6.13'ten de anlaşılacağı gibi azaltma katsayıları sönüm oranına ve binanın kalitesine bağlıdır. Yüksek sönümlü yeni binalar için verilen azaltma katsayıları, düşük sönümlü eski binalar için verilen azaltma katsayılarından düşüktür.

Sönüm Değiştirme Katsayısının yapı davranış sınıflarına göre değişimleri Şekil 6.10'da belirtilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi yeni binalarda oluşabilecek çevrimlerin eski binalara göre daha dolgun olacağı düşünülerek daha yüksek sönüm değiştirme katsayıları verilmektedir.



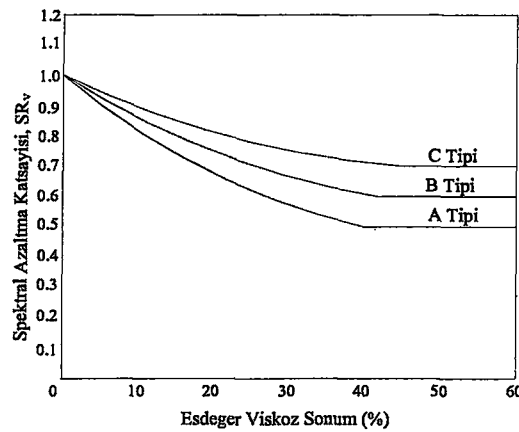
Şekil 6.10 Sönüm değiştirme katsayısının yapı türlerine göre değişimi

Şekil 6.11 etkili sönümün yapı davranış sınıflarına göre değişimini göstermektedir. Yeni binalar için öngörülen etkili sönüm, kısmen eski binalar için öngörülen etkili sönümlerden daha yüksektir.

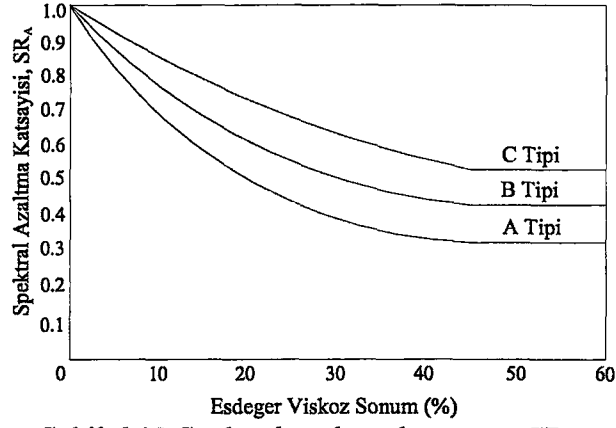


Şekil 6.11 Etkili sönümün yapı türlerine göre değişimi

Spektral azaltma katsayılarının yapı davranış sınıflarına göre değişimleri Şekil 6.12 ve 6.13'te belirtilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi doğrusal spektrumdaki azaltmalar, yeni ve sönümü yüksek yapılar için daha çoktur.



Şekil 6.12 Spektral azaltma katsayısı,  $SR_v$



Şekil 6.13 Spektral azaltma katsayısı,  $SR_A$

### 6.5 Yerdeğiştirme Katsayıları Metodu (FEMA 273/356)

Bu metodun uygulanması iki adımdan oluşur:

- Hedef yerdeğiştirmenin tanımlanması
- Kabul kriterlerinin incelenmesi

Belirlenen hedef yerdeğiştirme değerine sistemin artan yatay kuvvet modeli ile erişmesi hedeflenir. Sistemde en üst noktanın hedef yerdeğiştirmesi incelenirken güç tükenmesi durumu da kontrol edilir. Hedef yerdeğiştirme 4.12 denklemi ile elde edilir:

$$\delta = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a T_e^2 g / 4\pi^2 \quad (6.16)$$

$C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  ve  $C_3$  katsayıları tasarım deprem etkisi altında yapının en üst yerdeğiştirmesinin belirlenmesinde yardımcı olur. Katsayılar; yüksek mod etkilerini, doğrusal olmayan yerdeğiştirmeleri, yapının çevrimsel davranışını ve ikinci mertebe etkilerini düzenler.

$C_0$ , tek serbestlik dereceli sistemin spektral yerdeğiştirmesini, çok serbestlik dereceli sistemin çatı yerdeğiştirmesi ile ilişkilendiren katsayıdır.  $C_0$  katsayısının değişimi Tablo 6.15'te verilmiştir.

Tablo 6.15 C<sub>0</sub> katsayısı tablosu

|               | Yüksekliğin artmasıyla kat<br>yerdeğistirmelerinin azaldığı yapılar |                             | Diğer yapılar        |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Kat<br>sayısı | Üçgen yük<br>modeli                                                 | Düzgün yayılı<br>yük modeli | Tüm yük<br>modelleri |
| 1             | 1.00                                                                | 1.00                        | 1.00                 |
| 2             | 1.20                                                                | 1.15                        | 1.20                 |
| 3             | 1.20                                                                | 1.20                        | 1.30                 |
| 5             | 1.30                                                                | 1.20                        | 1.40                 |
| 10+           | 1.30                                                                | 1.20                        | 1.50                 |

C<sub>1</sub>, tahmin edilen en büyük plastik yerdeğistirmeyi, doğrusal çözümden elde edilen yerdeğistirmelerle ilişkilendiren katsayıdır ve 6.17 veya 6.18 denklemleri ile hesaplanır.

$$C_1 = 1.0 \quad (T_e \geq T_0) \quad (6.17)$$

$$C_1 = [1.0 + (R-1) T_s / T_e] / R \quad (T_e < T_0) \quad (6.18)$$

C<sub>2</sub>, en büyük yerdeğistirme etkisinde, çevrimlerin zayıflaması ile dayanım ve rijitlik azalmalarını temsil eden katsayı olup Tablo 6.16'te değışimi gösterilmiştir.

Tablo 6.16 C<sub>2</sub> katsayısı tablosu

| Performans Seviyesi                    | T ≤ 0.1s          |                   | T ≥ T <sub>0</sub> |                   |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                                        | Çerçeve<br>tipi 1 | Çerçeve<br>tipi 2 | Çerçeve<br>tipi 1  | Çerçeve<br>tipi 2 |
| Hemen kullanım<br>performans seviyesi  | 1.0               | 1.0               | 1.0                | 1.0               |
| Can güvenliği<br>performans seviyesi   | 1.3               | 1.0               | 1.1                | 1.0               |
| Toptan göçmenin<br>önlenmesi perf.sev. | 1.5               | 1.0               | 1.2                | 1.0               |

C<sub>3</sub>, ikinci mertebe etkilerini içeren katsayı

- akma sonrası pozitif eğimli davranış için 1.0
- akma sonrası negatif eğimli davranış için:

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|}{T_e} (R-1)^{3/2} \quad (6.19)$$

R: Doğrusal dayanımın akma dayanımına oranını ifade eden katsayı

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (6.20)$$

$T_i$ : Doğrusal temel periyot

$K_i$ : Doğrusal rijitlik

$K_e$ : Sekant rijitliği (kesmede akmanın %60'ına karşı gelen rijitlik)

## 6.6 Performans Noktası

Talep spektrumu üzerinde bulunan talep yerdeğiştirme noktası, aynı zamanda kapasite spektrumu üzerinde de bulunmalıdır ve bu nokta Performans Noktası olarak isimlendirilir. Bu performans noktası; seçilen deprem etkisiyle yapıdan istenen sismik talebin, sismik kapasiteye eşit olduğu noktayı belirtir.

Performans noktası iki özelliği sağlamalıdır:

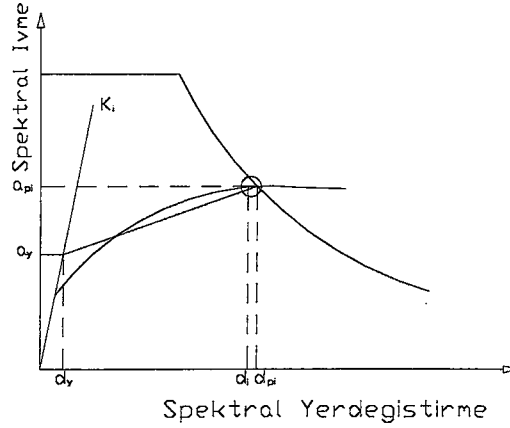
- Verilen yerdeğiştirme altında, yapıyı temsil etmesi için, kapasite spektrumu üzerinde bulunmalıdır.
- Verilen yerdeğiştirme altında, lineer olmayan talebi temsil etmesi için, talep spektrumu üzerinde bulunmalıdır.

Bu iki özelliğinde sağlanabilmesi iterasyon sayesinde gerçekleşir. Talep spektrumu bu aşamada bilinmemektedir. Bilinen, seçilen deprem etkisinin %5 sönümlü doğrusal ivme spektrumudur. Azaltma katsayıları ile bu spektrumun azaltılarak talep spektrumuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Ancak azaltma katsayıları için sönümün belirlenmesi, dolayısıyla performans noktasının koordinatlarının bilinmesi gereklidir. Bu koşullar altında seçilen nokta performans noktası olmayabilir ve iterasyon gerekebilir.

### 6.6.1 Kapasite ve Talep Spektrumlarının Kesişmesi

Kapasite spektrumunun ve talep spektrumunun kesişim noktası ( $d_i$ ), seçilen performans noktasına ( $a_{pi}$ ,  $d_{pi}$ ) gerektiği kadar yakınsa, bu nokta ( $d_{pi}$ ) performans noktası olarak kabul edilir. Bu sınır seçilen noktanın %5'i kadardır ( $0.95d_{pi} \leq d_i \leq 1.05d_{pi}$ ). Performans noktası, talep deprem etkisi altında yapının yapabileceği maksimum yerdeğiştirmedir. Eğer talep ve kapasite spektrumlarının kesişim noktası belirlenen sınırlar içinde değilse, yeni bir deneme noktası ( $a_{pi}, d_{pi}$ )

seçilir ve işlem tekrarlanır. Şekil 6.14'te Kapasite ve Talep spektrumlarının kesişmesi gösterilmiştir.

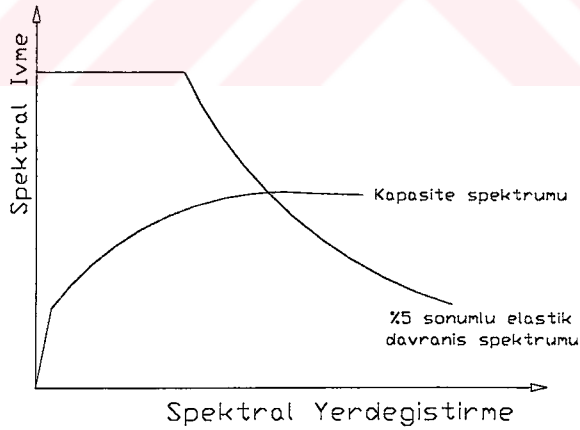


Şekil 6.14 Kapasite ve talep spektrumlarının kesişmesi

### 6.6.2 Performans Noktasının Bulunması

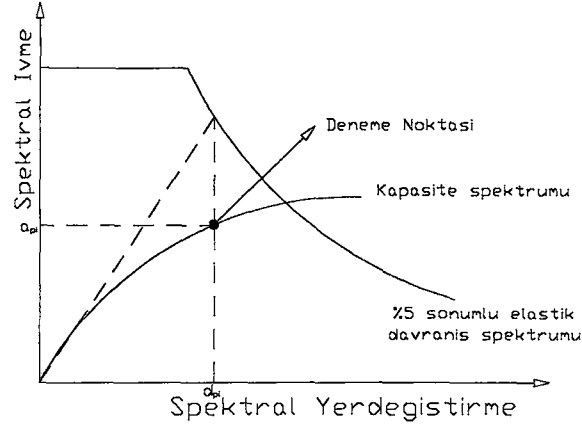
Performans Noktası'nın bulunması 7 aşamadan oluşur:

1. %5 sönümlü elastik davranış spektrumu oluşturulur.
2. Kapasite eğrisi, kapasite spektrumuna dönüştürülür. Kapasite spektrumu eğrisi, %5 sönümlü davranış spektrumu ile üst üste çizilir. Şekil 15'de Kapasite ve Talep spektrumlarının üst üste çizilmesi gösterilmiştir.



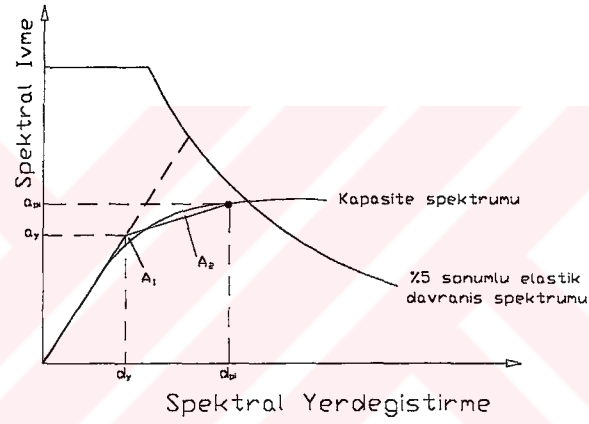
Şekil 6.15 Kapasite ve talep spektrumlarının üst üste çizilmesi

3. Performans noktası için ilk tahmin yapılır ( $a_{pi}$ ,  $d_{pi}$ ). Şekil 6.16 ilk tahmin noktasını göstermektedir.



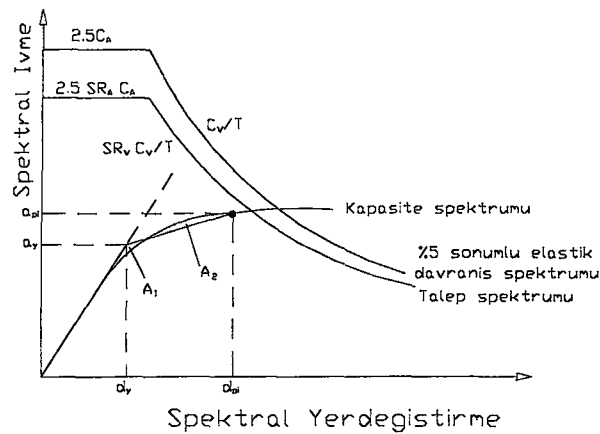
Şekil 6.16 Performans noktası için ilk tahmin

4. Kapasite spektrumu çift doğrusal duruma dönüştürülür. Şekil 6.17 kapasite spektrumunun çift doğrusal duruma dönüştürülmesini göstermektedir.



Şekil 6.17 Kapasite spektrumunun çift doğrusal duruma getirilmesi

5. Spektral azaltma katsayıları hesaplanır ( $SR_A$  ve  $SR_V$ ). Talep spektrumu oluşturulur. Talep spektrumu ile kapasite spektrumu üst üste çizilir. Şekil 6.18 azaltılmış talep spektrumunun ve kapasite spektrumunun üst üste çizilmesini göstermektedir.



Şekil 6.18 Kapasite spektrumunun ve talep spektrumunun üst üste çizilmesi

6. Talep spektrumunun kapasite spektrumunu, seçilen noktada ( $a_{pi}, d_{pi}$ ) veya kabul sınırları altında kesip kesmediği kontrol edilir.
7. Talep spektrumu kapasite spektrumunu belirtilen sınırlar altında kesmezse yeni bir deneme noktası ( $a_{pi}, d_{pi}$ ) seçilir. İşlemler 4. adımdan itibaren tekrarlanır.

Talep spektrumu kapasite spektrumunu belirtilen sınırlar altında keserse, deneme noktası ( $a_{pi}, d_{pi}$ ) performans noktasıdır ( $a_p, d_p$ ). Yerdeğiştirme değeri ( $d_p$ ), talep deprem etkisi altında oluşabilecek maksimum yerdeğiştirme değeridir.

Bulunan performans noktası taşıyıcı sistem kapasitesinin deprem etkilerine eşit olduğu noktayı tanımlar. Spektrum eğrisinin kapasite eğrisinin üstünde bulunduğu bölgede (performans noktasının sol tarafı) deprem kuvvetleri etkin durumdadır ve yapıyı yerdeğiştirme yapmaya zorlar. Yapıda yerdeğiştirmeler arttıkça hasar meydana gelir ve kesitlerin enerji yutma kapasiteleri artar. Enerji yutma kapasiteleri artan kesitlerin rijitlikleri ve esneklikleri azalır. Kesitlerin artan enerji yutma kapasiteleri spektrum eğrisi ile kesişerek performans noktasına ulaşır. Bu noktadaki değerler yapının hedeflenen performans değerleridir.

## 7 GÜÇLENDİRMEDE PERFORMANS METODU UYGULANMASI

Güçlendirme uygulamasında Performans Metodu uygulanabilmesi için ilk önce mevcut durumun tespit edilmesi gerekmektedir. Güçlendirme yapılacak yapı ile ilgili mevcut tüm veriler toplanmalı, eksik olan veriler temin edilmelidir. Gerekli veriler toplandıktan sonra yapı için performans amacı belirlenir ve çözümleme yapılır. Çözümleme sonucunda taşıyıcı sistem seçilen performans amacının kabul kriterlerine göre kontrol edilir.

### 7.1 Veri Toplanması ve Eksikliklerin Belirlenmesi

Mevcut yapılara güçlendirme gerekip gerekmediği, gerekli ise performans amacının belirlenebilmesi için yapı ile ilgili verilerin toplanması ve yapısal eksikliklerin belirlenmesi gerekir. Belirlenen yapısal eksiklikler göz önünde bulundurularak, toplanan veriler ışığı altında güçlendirme projesi hazırlanır.

Betonarme çerçeve sistemlerde genel olarak görülen eksiklikler:

- Tamamlanmamış yük yörüngeleri
- Düşey düzensizlik durumları
- Yatay düzensizlik durumları
- Zayıf kolon/kuvvetli kiriş durumu

Betonarme çerçeve sistemlerde sünek olmayan davranış oluşturabilecek detay eksiklikleri ise:

- Kolon enine donatılarının miktar, çap ve aralıkları
- Dış bölgelerdeki kolon-kiriş birleşim bölgeleri enine donatıları
- Kritik kesitlerde kolon ve kiriş boyuna donatılarının yer ve uzunlukları
- Kolon-kiriş birleşimlerinde kiriş üst ve alt donatılarının sürekliliği
- Kirişlerde kesme donatısı olarak pliye kullanılması, yetersiz kesme donatısı
- Kiriş etriyelerinin kenetlenmesi ve kolon etriye uçlarının kolon kesitine 135<sup>0</sup>'lik açı ile saplanması

Yukarıda açıklanan eksikler söz konusu yapıda mevcutsa, hazırlanacak güçlendirme projesinde bu eksiklikler giderilmelidir.

Mevcut betonarme yapıların sismik hesabı verilerin toplanmasına bağlıdır. Veri toplama işlemi aşağıdaki aşamaları içerir:

- Uygun belgelerin elde edilmesi
- Saha gözlemleri
- Saha araştırmaları
- Malzeme testleri

Veri toplama işlemi yapıdan yapıya değişmektedir. Aynı zamanda çizimlerin elde edilmesine ve değerlendirme seviyesinin belirlenmesine bağlıdır. Değerlendirme, Ön Değerlendirme ve Detaylı Değerlendirme olarak ikiye ayrılabilir. Tablo 7.1’de Veri toplama matrisi belirtilmiştir.

Tablo 7.1 Veri toplama matrisi

| <b>Sismik<br/>Değerlendirme<br/>Seviyesi</b> | <b>Orijinal Çizimler<br/>Mevcut</b> | <b>Orijinal Çizimler<br/>Mevcut Değil</b> |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ön Değerlendirme                             | TABLO 7.2                           | TABLO 7.3                                 |
| Detaylı Değerlendirme                        | TABLO 7.4                           | TABLO 7.5                                 |

Tablo 7.1’de belirtilen Tablo 7.2, 7.3, 7.4 ve 7.5 aşağıda açıklanmaktadır.

Tablo 7.2 Orijinal çizimler mevcut ise ön değerlendirme için gerekli bilgiler

| Madde                                          | Gerekli |       | Yorum                                                     |
|------------------------------------------------|---------|-------|-----------------------------------------------------------|
|                                                | Evet    | Hayır |                                                           |
| Yapısal hesaplar                               |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                         |
| Sismik ve geoteknik rapor                      |         | X     | Yardımcı olur ancak yenilenmeli                           |
| Zemin raporu                                   |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                         |
| Eski sismik rapor                              |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                         |
| Yapının teftişteki durumu                      | X       |       |                                                           |
| Yapıdaki değişiklikler                         | X       |       |                                                           |
| Yapı ötelenme durumu                           |         | X     | Belirtilmeyen değişiklikler mevcutsa yardımcı olur        |
| Yapısal olmayan elemanların ötelenme durumları | X       |       | Göçme riskinin ve ağırlığın belirlenmesinde yardımcı olur |
| Karot testi                                    |         | X     | Beton, standartlara uygunsa                               |
| Schmidt çekici testi                           |         | X     | Beton, standartlara uygunsa                               |
| Agrega testi                                   |         | X     |                                                           |
| Donatı testi                                   |         | X     |                                                           |
| Donatı yer durumları                           |         | X     | Çizimler yeterli ise                                      |
| Yapısal olmayan tespitler                      |         | X     |                                                           |

Tablo 7.3 Orijinal çizimler mevcut değilse ön değerlendirme için gerekli bilgiler

| Madde                                          | Gerekli |       | Yorum                                                     |
|------------------------------------------------|---------|-------|-----------------------------------------------------------|
|                                                | Evet    | Hayır |                                                           |
| Yapısal hesaplar                               |         | X     | Saha çalışmasını azaltır                                  |
| Sismik ve geoteknik rapor                      |         | X     | Saha çalışmasını azaltır                                  |
| Zemin raporu                                   |         | X     | Saha çalışmasını azaltır                                  |
| Eski sismik rapor                              |         | X     | Saha çalışmasını azaltır                                  |
| Yapının teftişteki durumu                      | X       |       |                                                           |
| Yapıdaki değişiklikler                         | X       |       |                                                           |
| Yapı ötelenme durumu                           | X       |       | Birincil elemanların belirlenmesi için gerekli            |
| Yapısal olmayan elemanların ötelenme durumları | X       |       | Göçme riskinin ve ağırlığın belirlenmesinde yardımcı olur |
| Karot testi                                    | X       |       | Her kat için minimum 2, yapı için minimum 8 örnek         |
| Schmidt çekici testi                           |         | X     | Beton, standartlara uygun değilse yardımcı olur           |
| Agrega testi                                   | X       |       | Birkaç örnek alınmalı                                     |
| Donatı testi                                   |         | X     |                                                           |
| Donatı yer durumları                           |         | X     | Yardımcı olabilir                                         |
| Yapısal olmayan tespitler                      |         | X     |                                                           |

Tablo 7.4 Orijinal çizimler mevcut ise detaylı değerlendirme için gerekli bilgiler

| Madde                                          | Gerekli |       | Yorum                                                                            |
|------------------------------------------------|---------|-------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                | Evet    | Hayır |                                                                                  |
| Yapısal hesaplar                               |         | X     | Çok yardımcı olabilir                                                            |
| Sismik ve geoteknik rapor                      |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                                                |
| Zemin raporu                                   |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                                                |
| Eski sismik rapor                              |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                                                |
| Yapının teftişteki durumu                      | X       |       |                                                                                  |
| Yapıdaki değişiklikler                         | X       |       |                                                                                  |
| Yapı ötelenme durumu                           |         | X     | Nokta kontrolü uygundur                                                          |
| Yapısal olmayan elemanların ötelenme durumları | X       |       | Göçme riskinin ve ağırlığın belirlenmesinde yardımcı olur                        |
| Karot testi                                    | X       |       | Her kat için minimum 2, yapı için minimum 8 örnek                                |
| Schmidt çekici testi                           | X       |       | Her kat için minimum 8, yapı için minimum 16 örnek                               |
| Agrega testi                                   | X       |       | Bütün örnekler için                                                              |
| Donatı testi                                   |         | X     | İsteğe bağlı                                                                     |
| Donatı yer durumları                           | X       |       | Bütün kritik kesitlerde                                                          |
| Yapısal olmayan tespitler                      | X       |       | Yapı performansında etkin elemanların sabitletme ve ankraj durumlarının kontrolü |

Tablo 7.5 Orijinal çizimler mevcut değil ise detaylı değerlendirme için gerekli bilgiler

| Madde                                          | Gerekli |       | Yorum                                                                            |
|------------------------------------------------|---------|-------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                | Evet    | Hayır |                                                                                  |
| Yapısal hesaplar                               |         | X     | Çok yardımcı olabilir                                                            |
| Sismik ve geoteknik rapor                      |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                                                |
| Zemin raporu                                   |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                                                |
| Eski sismik rapor                              |         | X     | Gerekli değil ancak yardımcı olur                                                |
| Yapının teftişteki durumu                      | X       |       |                                                                                  |
| Yapıdaki değişiklikler                         | X       |       |                                                                                  |
| Yapı ötelenme durumu                           | X       |       | Özellikle yapı güçlendirilecekse çok iyi yapılmalı                               |
| Yapısal olmayan elemanların ötelenme durumları | X       |       | Göçme riskinin ve ağırlığın belirlenmesinde yardımcı olur                        |
| Karot testi                                    | X       |       | Her kat için minimum 2, yapı için minimum 8 örnek                                |
| Schmidt çekici testi                           | X       |       | Her kat için minimum 8, yapı için minimum 16 örnek                               |
| Agrega testi                                   | X       |       | Bütün örnekler için                                                              |
| Donatı testi                                   | X       |       | Her tip için 2 adet                                                              |
| Donatı yer durumları                           | X       |       | Bütün kritik elemanlarda                                                         |
| Yapısal olmayan tespitler                      | X       |       | Yapı performansında etkin elemanların sabitletme ve ankraj durumlarının kontrolü |

Çizimlerin elde edilmesi saha çalışmasını kolaylaştırır ve yapı hakkında daha geniş bilgi edinilmesini sağlar. Orijinal mimari ve uygulama çizimlerinin elde edilmesi

maliyet hesabında etkili olur. Çizimlerin yanında aşağıdaki unsurlar da yardımcı olur:

- Yapısal hesaplamalar
- Sismik ve geoteknik raporlar
- Zemin raporları
- Yapının önceden bildirilen değeri

### **7.2 Performans Amacı Belirlenmesi**

Güçlendirme yapılacak yapının kullanım amacı, yeri ve yapı sahibinin tercihi doğrultusunda yapıya uygulanacak performans amacı belirlenir. Seçilen performans amacı ekonomik olarak da uygulanabilir olmalıdır.

### **7.3 Çözümleme**

Yapıya uygulanacak performans amacı belirlendikten sonra mevcut sistemin çözümlemesi yapılır. Yapılan hesaplamalar sonucunda yapıya uygulanacak güçlendirme yöntemi belirlenir ve yeni taşıyıcı sistem oluşturulur. Yeni taşıyıcı sistem tekrar çözümlenerek, seçilen performans amacı kabul kriterlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

Güçlendirmede değiştirilecek kesitler belirlendikten sonra, güçlendirilmiş sistem çözümlenir. Çözümleme sonucunda bulunan kapasite eğrisi talep ile karşılaştırılır. Kapasite spektrumu belirlenen talep spektrumu ile kesişmiyorsa, yapılan güçlendirme yetersiz durumdadır. Kesitler gözden geçirilmeli, gerekli ise daha fazla kesit güçlendirilmelidir.

Çözümleme sonucunda kapasite spektrumu ve talep spektrumları kesişiyor fakat performans noktasında hasar durumu kabul edilemez ise, kesitler tekrar gözden geçirilmeli ve güçlendirilmelidir.

## **8 KABUL KRİTERLERİ**

Yapının belirlenen performans amacını karşılayıp karşılamadığı, doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen değerlerin ilgili performans seviyesi limit değerleri ile karşılaştırılmasıyla belirlenir. ATC40'ta tavsiye edilen kabul kriterleri iki kategoride incelenir: Genel Yapı Kabul Kriterleri ile Sistem ve Eleman Kabul Kriterleri.

### **8.1 Genel Yapı Kabul Kriterleri**

Bu kriterler; düşey ve yatay yük taşıyabilme ile yatay yerdeğiştirmelerle ilgili sınırları tanımlar.

#### **8.1.1 Düşey Yükler**

Yapının düşey yük taşıma kapasitesi, bütün performans seviyeleri için eksiksiz sağlanmalıdır. Yapının sistemlerinden veya elemanlarından düşey yük taşıma kapasitesini yitirenler olursa; yapı, bu yükleri diğer eleman ve sistemlere dağıtabilmelidir.

#### **8.1.2 Yatay Yükler**

Önemli sayıda yapı elemanı dayanımını kaybederse, yapının yatay yük taşıma kapasitesi etkilenebilir. İkinci mertebe etkilerini de içeren yapının yatay yük taşıma kapasitesi, maksimum kapasitesinin %80'inden az olmaması tavsiye edilir.

#### **8.1.3 Yerdeğiştirmeler**

Performans noktasını tanımlayan yerdeğiştirme limit değerlerinin belirlenmesidir.

Tablo 8.1 Şekil değiştirme sınır değerleri

| Katlar Arası<br>Yerdeğiştirme<br>Sınırları          | Performans Seviyeleri |                   |                  |                 |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------|
|                                                     | Hemen<br>Kullanım     | Hasar<br>Kontrolü | Can<br>Güvenliği | Toptan<br>Göçme |
| Maksimum<br>Toplam<br>Yerdeğiştirme<br>Oranı        | 0.01                  | 0.01-0.02         | 0.02             | $0.33V_i/P_i$   |
| Maksimum<br>Elastik Ötesi<br>Yerdeğiştirme<br>Oranı | 0.005                 | 0.005-0.015       | sınır<br>yok     | sınır<br>yok    |

Tablo 8.1, değişik performans seviyeleri için yerdeğiştirme sınır değerleri oranını belirtmektedir. Maksimum toplam yerdeğiştirme, performans noktasında katlar arası rölatif yerdeğiştirme değerleridir. Maksimum elastik olmayan yerdeğiştirme, etkili akma noktası ötesindeki maksimum toplam yerdeğiştirmenin bir parçasıdır. Toptan Göçmenin Önlenmesi Performans Seviyesi için, performans noktasında herhangi bir kattaki maksimum toplam yerdeğiştirme  $0.33V_i/P_i$  değerini geçemez. İkinci mertebe etkilerinin ve taşıyıcı olmayan elemanlarda hasarın sınırlandırılması amaçlanmaktadır.  $V_i$ , kattaki toplam kayma kuvveti ve  $P_i$ , toplam düşey yükü belirtmektedir. Performans seviyesi düştükçe yerdeğiştirme sınır değerleri de artmaktadır.

## 8.2 Sistem ve Eleman Kabul Kriterleri

Bütün sistem, her elemanının performans noktası kuvvet ve yerdeğiştirmelerini kabul kriterleri sınırlarında karşıladığı, kontrol edilmelidir. Bunun için sistemler ve elemanlar birincil ve ikincil olarak sınıflandırılır.

### ▪ Birincil ve İkincil Sistem ve Elemanlar

Bütün sistem ve elemanlar, yatay yük taşımadaki önemlerine göre, birincil ve ikincil olarak sınıflandırılırlar. Performans noktasında, yapının dayanımının veya yatay rijitliğinin önemli bir kısmını oluşturan sistem veya elemanlar birincil olarak isimlendirilir. Diğer sistem ve elemanlar ikincil olarak isimlendirilir.

### ▪ Eleman Dayanımları

Performans noktasındaki talep dayanımları, belirlenen dayanım değerlerini aşmaması gerekir. Yerdeğiştirme kontrollü (sünek) durumda, elastik sınır ötesi davranış, yerdeğiştirme sınır değerleri aşılmadığı sürece kabul edilebilir.

- Eleman Şekil Değiştirme Kapasitesi

Hesaplanan eleman şekil değiştirmelerinin, belirlenen performans seviyesinin şekil değiştirme sınır değerlerini geçmesine izin verilmez.

### 8.3 Betonarme Çerçeve Sistem Kabul Kriterleri

Bu bölümde kiriş-kolon çerçeve sistemler ele alınacaktır. Kabul kriterleri; kirişlerin, kolonların ve kolon-kiriş birleşimlerinin, dayanım ve şekil değiştirme kapasitelerini içerir. Aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır:

1. Kirişlerle kolonların eksenel ve eğilme kabul kriterleri sağlanmalıdır. Ayrıca elastik sınır ötesi dayanım ve dönmeler hesaplanmalıdır.
2. Kiriş ve kolonların, eleman sonlarında ve donatı düzeninin değiştiği açıklık bölgelerinde, kesme dayanımları hesaplanmalıdır.
3. Kolon-kiriş birleşim noktalarında kuvvet dengesi hesaplanmalıdır.
4. Kolonlarda, kirişlerde ve birleşim bölgelerinde donatı detay yeterliliği incelenmelidir.
5. Kolonların, kirişlerin ve kolon-kiriş birleşimlerinin göçmesinin neden olacağı düşey yük taşıma kapasitesi kayıpları incelenmelidir.

Aşağıda açıklanan Tablo 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 ve 8.6 yapı elemanları için kabul kriter değerlerini belirlemektedir.

Tablo 8.2 Kirişler için plastik mafsal dönmeleri kabul kriteri tablosu (rad)

| Eleman<br>Tipi | Performans Seviyesi |    |    |         |    |
|----------------|---------------------|----|----|---------|----|
|                | Birincil            |    |    | İkincil |    |
|                | IO                  | LS | SS | LS      | SS |

**1.Eğilme kontrollü kirişler**

| $\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$ | Sargı<br>Donatısı | $\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f'_c}}$ |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.0$                        | Uygun             | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.020 | 0.025 | 0.020 | 0.050 |
| $\leq 0.0$                        | Uygun             | $\geq 0.50$                               | 0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.020 | 0.040 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun             | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.020 | 0.030 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun             | $\geq 0.50$                               | 0.005 | 0.005 | 0.015 | 0.015 | 0.020 |
| $\leq 0.0$                        | Uygun Değil       | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.020 | 0.030 |
| $\leq 0.0$                        | Uygun Değil       | $\geq 0.50$                               | 0.000 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.015 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun Değil       | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.015 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun Değil       | $\geq 0.50$                               | 0.000 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.010 |

**2.Kesme kontrollü kirişler**

|                           |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| etriye aralığı $\leq d/2$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.020 |
| etriye aralığı $> d/2$    | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.010 |

**3.Açıklıklarında yetersiz bağlantı bulunan kirişler**

|                           |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| etriye aralığı $\leq d/2$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.020 |
| etriye aralığı $> d/2$    | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.010 |

**4.Kiriş kolon birleşimleri yetersiz kirişler**

|  |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 0.010 | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.030 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|

“Uygun” olarak belirtilen etriye koşulları aşağıda belirtilmiştir:

1. etriye aralığı  $\leq d/3$
2. etriye kesme kapasitesi tasarım kesme kuvvetinin en az  $\frac{3}{4}$ 'ü ise.

Bu koşulları sağlamayan elemanlar “uygun değil” olarak tanımlanmalıdır.

Tablo 8.3 Kolonlar için plastik mafsal dönmeleri kabul kriteri tablosu

| Eleman<br>Tipi | Performans Seviyesi |    |    |         |    |
|----------------|---------------------|----|----|---------|----|
|                | Birincil            |    |    | İkincil |    |
|                | IO                  | LS | SS | LS      | SS |

**1.Eğilme kontrollü kolonlar**

| $\frac{P}{A_g \cdot f_c}$ | Sargı<br>Donatısı | $\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c'}}$ |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.1$                | Uygun             | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.015 | 0.030 |
| $\leq 0.1$                | Uygun             | $\geq 0.50$                               | 0.005 | 0.010 | 0.015 | 0.010 | 0.025 |
| $\geq 0.4$                | Uygun             | $\leq 0.25$                               | 0.000 | 0.005 | 0.015 | 0.010 | 0.025 |
| $\geq 0.4$                | Uygun             | $\geq 0.50$                               | 0.000 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.015 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil       | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.005 | 0.015 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil       | $\geq 0.50$                               | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil       | $\leq 0.25$                               | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.000 | 0.005 |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil       | $\geq 0.50$                               | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

**2.Kesme kontrollü kolonlar**

|                                                                      |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Etriye aralığı $> d/2$<br>$\frac{P}{A_g \cdot f_c} \leq 0.1$<br>veya | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.015 |
| diğer durumlar                                                       | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

**3.Yüksekliği boyunca yetersiz bağlantı bulunan kirişler**

|                           |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Etriye aralığı $\leq d/2$ | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.020 |
| Etriye aralığı $> d/2$    | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.010 |

**4.Eksenel yükü  $0.70P_0$  değerini aşan kolonlar**

|                                       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| kolon boyunca uygun donatılı kolonlar | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.005 | 0.010 |
| diğer durumlar                        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

“Uygun” olarak belirtilen etriye koşulları aşağıda belirtilmiştir:

1. etriye aralığı  $\leq d/3$
2. etriye kesme kapasitesi tasarım kesme kuvvetinin en az  $\frac{3}{4}$ 'ü ise.

Bu koşulları sağlamayan elemanlar “uygun değil” olarak tanımlanmalıdır.

Tablo 8.4 Düğüm noktaları için toplam kayma açısı kabul kriteri tablosu (rad)

| Eleman<br>Tipi | Performans Seviyesi |    |    |         |    |
|----------------|---------------------|----|----|---------|----|
|                | Birincil            |    |    | İkincil |    |
|                | IO                  | LS | SS | LS      | SS |

**1.İç düğüm noktaları**

| $\frac{P}{A_g \cdot f_c}$ | Sargı<br>Donatısı | $\frac{V}{V_n}$ |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.1$                | Uygun             | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.020 | 0.030 |
| $\leq 0.1$                | Uygun             | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.020 |
| $\geq 0.4$                | Uygun             | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.025 |
| $\geq 0.4$                | Uygun             | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.020 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil       | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.020 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil       | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.015 |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil       | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.015 |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil       | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.015 |

**2.Diğer düğüm noktaları**

| $\frac{P}{A_g \cdot f_c}$ | Sargı<br>Donatısı | $\frac{V}{V_n}$ |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.1$                | Uygun             | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.020 |
| $\leq 0.1$                | Uygun             | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.015 |
| $\geq 0.4$                | Uygun             | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.020 |
| $\geq 0.4$                | Uygun             | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.015 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil       | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.010 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil       | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.010 |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil       | $\leq 1.2$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil       | $\geq 1.5$      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

“Uygun” olarak belirtilen etriye koşulları aşağıda belirtilmiştir:

1. etriye aralığı  $\leq d/3$
2. etriye kesme kapasitesi tasarım kesme kuvvetinin en az  $\frac{3}{4}$ 'ü ise.

Bu koşulları sağlamayan elemanlar “uygun değil” olarak tanımlanmalıdır.

Tablo 8.5 Döşemeler için plastik mafsallı dönmeleri kabul kriteri tablosu (rad)

| Eleman<br>Tipi | Performans Seviyesi |    |    |         |    |
|----------------|---------------------|----|----|---------|----|
|                | Birincil            |    |    | İkincil |    |
|                | IO                  | LS | SS | LS      | SS |

1.Eğilme kontrollü döşemeler ve döşeme-kolon birleşimleri

| $\frac{V_g}{V_0}$ | Donatı<br>Sürekliliği |       |       |       |       |       |
|-------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.2$        | Sürekli               | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.030 | 0.050 |
| $\geq 0.4$        | Sürekli               | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 0.040 |
| $\leq 0.2$        | Sürekli Değil         | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.015 | 0.020 |
| $\geq 0.4$        | Sürekli Değil         | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

2.Açıkhıkları boyunca yeterli bağlantısı bulunmayan döşemeler

|  |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.020 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|

3.Kolon birleşimleri yetersiz döşemeler

|  |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 0.010 | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.030 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|

Tablo 8.6 Perdeler için plastik mafsallı dönmeleri kabul kriteri tablosu (rad)

| Eleman<br>Tipi | Performans Seviyesi |    |    |         |    |
|----------------|---------------------|----|----|---------|----|
|                | Birincil            |    |    | İkincil |    |
|                | IO                  | LS | SS | LS      | SS |

1.Eğilme kontrollü perdeler

| $\frac{(A_s - A_s') \cdot f_y + P}{t_w \cdot l_w \cdot f_c}$ | $\frac{V}{t_w \cdot l_w \cdot \sqrt{f_c'}}$ | Perde<br>Uç<br>Donatısı |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.10$                                                  | $\leq 0.25$                                 | Uygun                   | 0.005 | 0.010 | 0.015 | 0.015 | 0.020 |
| $\leq 0.10$                                                  | $\geq 0.50$                                 | Uygun                   | 0.004 | 0.008 | 0.010 | 0.010 | 0.015 |
| $\geq 0.25$                                                  | $\leq 0.25$                                 | Uygun                   | 0.003 | 0.006 | 0.009 | 0.009 | 0.012 |
| $\geq 0.25$                                                  | $\geq 0.50$                                 | Uygun                   | 0.001 | 0.003 | 0.005 | 0.005 | 0.010 |
| $\leq 0.10$                                                  | $\leq 0.25$                                 | Uygun Değil             | 0.002 | 0.004 | 0.008 | 0.008 | 0.015 |
| $\leq 0.10$                                                  | $\geq 0.50$                                 | Uygun Değil             | 0.002 | 0.004 | 0.006 | 0.006 | 0.010 |
| $\geq 0.25$                                                  | $\leq 0.25$                                 | Uygun Değil             | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.003 | 0.005 |
| $\geq 0.25$                                                  | $\geq 0.50$                                 | Uygun Değil             | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.004 |

Genel olarak birincil elemanlarda sınır değerler, ikincil elemanlara göre daha katıdır. Taşıyıcı olan elemanlarda, taşıyıcı olmayan elemanlara göre daha düşük sınır değerleri verilmektedir. Ayrıca sargı donatısı uygun kesitlerde, sargı donatısı uygun olmayan kesitlere göre daha esnek sınır koşulları belirlenmiştir. Sargı donatısı uygun

olan kesitlerin daha sünek davranacağından dolayı daha büyük sınır değerleri verilmiştir. Tablolardaki diğer değerlendirme unsuru da kesme kuvvetine ilişkindir. Kesitlerin kayma g  tükenmesini engellemek amacı ile amprik bir formüle dayanan sınır koşulları tanımlanmıştır. Tanımları gereği performans seviyeleri de ilerledikçe (IO, LS, SS) sınır değerler de artmaktadır. Genel olarak bütün sınır değerleri ikinci merteye etkilerinin sınırlandırılmasını amaçlamaktadır.



## 9 ÖRNEK UYGULAMALAR

Örnek uygulamada düzgün bir betonarme çerçeve sistem üzerinde doğrusal olmayan statik itme analizi yapılacak ve sonuçları açıklanacaktır. Sistemin analizinde ve metodun uygulanmasında SAP2000 (Structural Analysis Program) [11] programının doğrusal olmayan hesap içeren versiyonundan ve XTRACT (Cross Sectional Analysis Program For Structural Engineers) [12] programından yararlanılmıştır.

Tanımlanacak çerçeve sistem üzerinde üç farklı karşılaştırma yapılacaktır. Birinci karşılaştırma kesitlerdeki sargı donatısının sistem üzerindeki etkisini, ikinci karşılaştırma beton kalitesinin sistem üzerindeki etkisini ve üçüncü karşılaştırma seçilen tipik malzemelerin sistem üzerindeki etkisini inceleyecektir. Tablo 9.1’de uygulamaların detayları verilmiştir.

### 9.1 Sistemin Tanımlanması

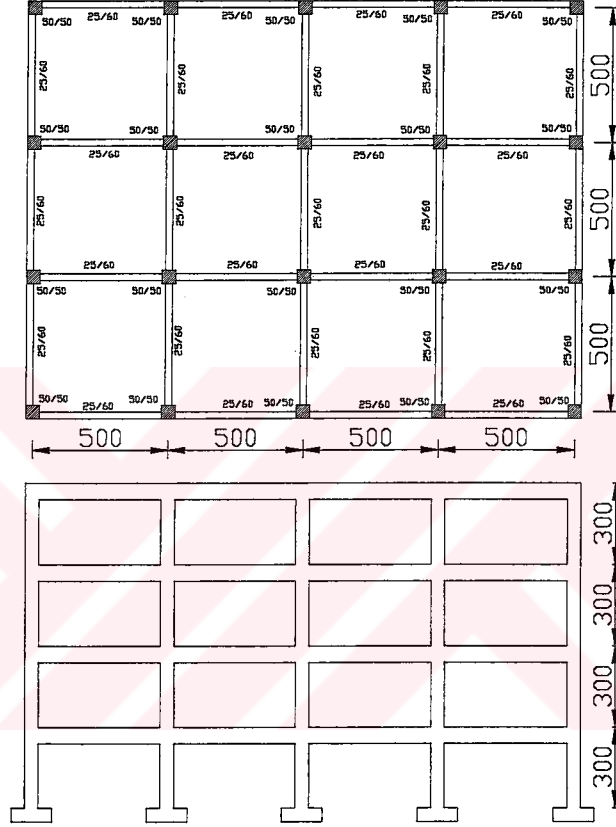
Sistem bir doğrultuda dört, diğer doğrultuda üç açıklıktan oluşan, perde elemanların bulunmadığı düzgün çerçeve sistemdir. Açıklıklar her iki doğrultuda da 5m’dir. Dört kattan oluşan yapının kat yükseklikleri 3m’dir. Uygulama için 3 boyutlu model seçilirken doğrusal olmayan statik itme analizinin uygulanabileceği ve yorumlanabilir sonuçlar verebilecek düzgün, perde elemanların bulunmadığı bir sistem tercih edilmiştir, Şekil 9.1.

Sistemin malzeme kaliteleri ve sargı durumu her uygulama için farklıdır. Kolon boyutları 500/500 mm/mm olup tüm sistemde aynıdır. Kiriş boyutları da tüm sistem için aynı olup 250/600 mm/mm boyutlarındadır.

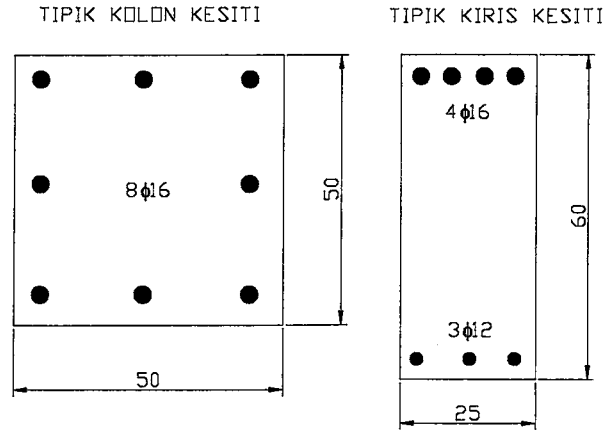
Kolon ve kirişler için tipik donatı durumları belirlenmiştir. Kolonlar için 8Φ16 donatı miktarı olarak seçilmiştir. Kirişlerde tanımlanacak mafsallar mesnet bölgelerinde oldukları için bu bölgelerde kesitin çekme kısmında 4Φ16 ve basınç kısmında 3Φ12 donatı miktarı olarak seçilmiştir.

Tablo 9.1 Uygulama detay tablosu

|           | 3D MODEL                         | BETON                      | DONATI ÇELİĞİ      | SARGI DONATISI           |
|-----------|----------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|
| UYGULAMA1 | a) cBS20<br>b) ucBS20            | C20                        | S420               | a) s=100mm<br>b) s=200mm |
| UYGULAMA2 | a) cBS25<br>b) cBS18<br>c) cBS14 | a) C25<br>b) C18<br>c) C14 | S420               | s=100mm                  |
| UYGULAMA3 | a) cBS20StIII<br>b) ucBS14StI    | a) C20<br>b) C14           | a) S420<br>b) S220 | a) s=100mm<br>b) s=200mm |



Şekil 9.1 Uygulamalarda kullanılan sistemin plan ve kesiti



Şekil 9.2 Kolon ve kiriş mesnet kesitleri

## 9.2 Mafsalların Tanımlanması

Doğrusal olmayan statik itme analizi uygulamasının en önemli kısmı, kesitlere atanacak mafsallık özelliklerinin belirlenmesidir. SAP2000 programında üç tür mafsallık mevcuttur. Bunlar programın tanımladığı (default), kullanıcının tanımladığı (user defined) ve programın kullanıcının tanımlamalarına göre geliştirdiği (generated) mafsallardır. Programın standart moment-eğrilik bağıntılarını kullanmak uygun olmayabilir ve uygulamalarda kullanıcının tanımladığı özel mafsallar kullanılmıştır.

Sistem elemanlarına atanacak mafsallar, kolon ve kiriş kesitleri için farklı seçilmelidir. SAP2000 programında tanımlanan mafsallar bu kesitlere atanır. Bu mafsallar programda M3, V2, P ve PMM mafsalları olarak tanımlıdır. Bunlar;

M3:moment

V2:kesme kuvveti

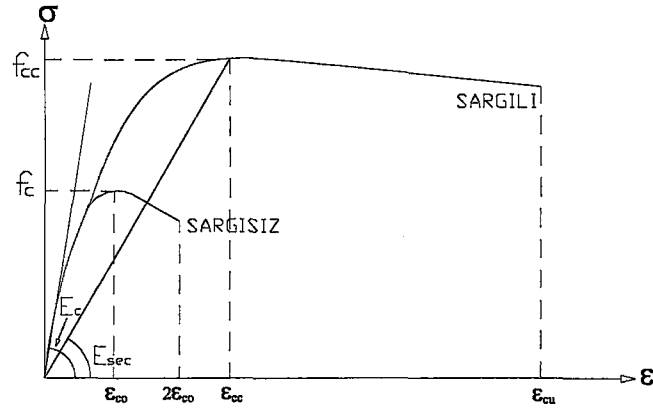
P:normal kuvvet

PMM:normal kuvvet ve iki yönde moment

kontrollü mafsallardır. Kolon kesitlerinde PMM, kiriş kesitlerinde M3 mafsalları kullanılmıştır. Bunun nedeni kiriş kesitlerinde normal kuvvet etkisinin, kolon kesitlerine göre çok daha düşük olmasıdır.

### 9.2.1 Moment-Dönme Bağıntıları

Mafsalların tanımlanmasında kesitlere ait moment-dönme bağıntılarına gereksinim duyulmaktadır. Kesitlerin moment-dönme bağıntıları için XTRACT programının 2.6.2 versiyonu kullanılmıştır. XTRACT programı, sonlu elemanlar metodu ile, ilgili kesitlerin moment-eğrilik bağıntılarını vermektedir. Gerekli kesitler bu programda tanımlanarak moment-eğrilik bağıntıları elde edilir. Ayrıca XTRACT programından kesit moment-eğrilik bağıntılarının çift doğrusal hale dönüştürülmüş durumları da temin edilmektedir. Program sargılı beton davranışı için Mander modelini göz önünde bulundurmaktadır.



Şekil 9.3 Sargılı ve sargısız beton Mander modeli

Şekil 9.3 Mander modeline göre sargılı ve sargısız beton davranışını göstermektedir.

$f'_{cc}$  ve  $\epsilon_{cc}$  en büyük beton gerilme ve şekil değiştirmeleri olmak üzere,

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x} \quad (9.1)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (9.2)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (9.3)$$

$$\epsilon_{cc} = 0.002 \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \quad (9.4)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (9.5)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_c} \quad (9.6)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (9.7)$$

Denklemlerde kullanılan  $f'_l$  etkili yanal sargı basıncı ve sıfır alınması durumunda sargısız beton için formüller değiştirilmiş olur.

XTRACT programından ilgili kesitin akma ve sınır durum eğriliği ile akma ve sınır durum moment değerleri alınır. Bu değerler ile ATC40 Bölüm 9’da tavsiye edilen değerler birleştirilerek kesitin moment-dönme bağıntısı tanımlanır.

Elde edilen akma eğriliği plastik mafsallık boyu ile çarpılarak akma dönmesi bulunur. Akma dönmesine ATC40’tan a ve b değerleri eklenerek sınır dönme değerleri elde edilir.

Tablo 9.2 Kirişler için modelleme parametreleri

| Eleman Tipi | Modelleme Parametreleri |   |                   |
|-------------|-------------------------|---|-------------------|
|             | Plastik Dönme, rad      |   | Son Dayanım Oranı |
|             | a                       | b | c                 |

**1.Eğilme kontrollü kirişler**

| $\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$ | Sargı Donatısı | $\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c'}}$ |       |       |       |
|-----------------------------------|----------------|-------------------------------------------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.0$                        | Uygun          | $\leq 0.25$                               | 0.025 | 0.050 | 0.200 |
| $\leq 0.0$                        | Uygun          | $\geq 0.50$                               | 0.020 | 0.040 | 0.200 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun          | $\leq 0.25$                               | 0.020 | 0.030 | 0.200 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun          | $\geq 0.50$                               | 0.015 | 0.020 | 0.200 |
| $\leq 0.0$                        | Uygun Değil    | $\leq 0.25$                               | 0.020 | 0.030 | 0.200 |
| $\leq 0.0$                        | Uygun Değil    | $\geq 0.50$                               | 0.010 | 0.015 | 0.200 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun Değil    | $\leq 0.25$                               | 0.010 | 0.015 | 0.200 |
| $\geq 0.5$                        | Uygun Değil    | $\geq 0.50$                               | 0.005 | 0.010 | 0.200 |

**2.Kesme kontrollü kirişler**

|                           |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| etriye aralığı $\leq d/2$ | 0.000 | 0.020 | 0.200 |
| etriye aralığı $> d/2$    | 0.000 | 0.010 | 0.200 |

**3.Açıklıklarında yetersiz bağlantı bulunan kirişler**

|                           |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| etriye aralığı $\leq d/2$ | 0.000 | 0.020 | 0.000 |
| etriye aralığı $> d/2$    | 0.000 | 0.010 | 0.000 |

**4.Kiriş kolon birleşimleri yetersiz kirişler**

|  |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
|  | 0.015 | 0.030 | 0.200 |
|--|-------|-------|-------|

“Uygun” olarak belirtilen etriye koşulları aşağıda belirtilmiştir:

1. etriye aralığı  $\leq d/3$
2. etriye kesme kapasitesi tasarım kesme kuvvetinin en az  $\frac{3}{4}$ ’ü ise.

Bu koşulları sağlamayan elemanlar “uygun değil” olarak tanımlanmalıdır.

Tablo 9.3 Kolonlar için modelleme parametreleri

| Eleman<br>Tipi | Modelleme Parametreleri |   |                   |
|----------------|-------------------------|---|-------------------|
|                | Plastik Dönme, rad      |   | Son Dayanım Oranı |
|                | a                       | b | c                 |

1.Eğilme kontrollü kolonlar

| $\frac{P}{A_g \cdot f_c}$ | Sargı Donatısı | $\frac{V}{b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c'}}$ |       |       |       |
|---------------------------|----------------|-------------------------------------------|-------|-------|-------|
| $\leq 0.1$                | Uygun          | $\leq 0.25$                               | 0.020 | 0.030 | 0.200 |
| $\leq 0.1$                | Uygun          | $\geq 0.50$                               | 0.015 | 0.025 | 0.200 |
| $\geq 0.4$                | Uygun          | $\leq 0.25$                               | 0.015 | 0.025 | 0.200 |
| $\geq 0.4$                | Uygun          | $\geq 0.50$                               | 0.010 | 0.015 | 0.200 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil    | $\leq 0.25$                               | 0.010 | 0.015 | 0.200 |
| $\leq 0.1$                | Uygun Değil    | $\geq 0.50$                               | 0.005 | 0.005 | -     |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil    | $\leq 0.25$                               | 0.005 | 0.005 | -     |
| $\geq 0.4$                | Uygun Değil    | $\geq 0.50$                               | 0.000 | 0.000 | -     |

2.Kesme kontrollü kolonlar

|                                                                   |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Etriye aralığı $> d/2$<br>veya $\frac{P}{A_g \cdot f_c} \leq 0.1$ | 0.000 | 0.015 | 0.200 |
| diğer durumlar                                                    | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

3.Yüksekliği boyunca yetersiz bağlantı bulunan kolonlar

|                           |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| Etriye aralığı $\leq d/2$ | 0.010 | 0.020 | 0.400 |
| Etriye aralığı $> d/2$    | 0.000 | 0.010 | 0.200 |

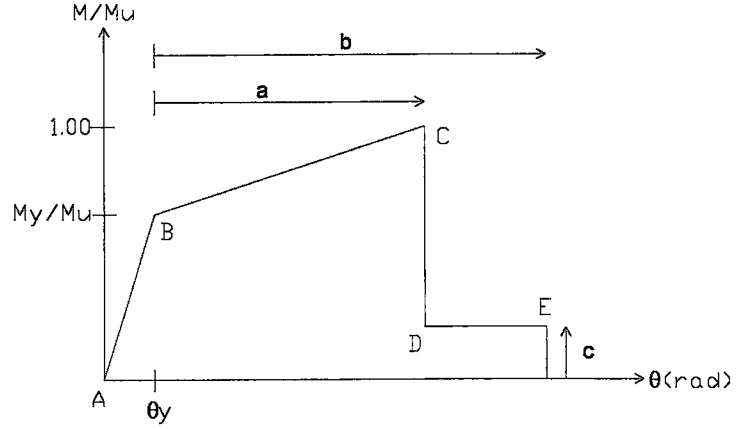
4.Eksenel yükü  $0.70P_0$  değerini aşan kolonlar

|                                       |       |       |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|
| kolon boyunca uygun donatılı kolonlar | 0.015 | 0.025 | 0.020 |
| diğer durumlar                        | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

“Uygun” olarak belirtilen etriye koşulları aşağıda belirtilmiştir:

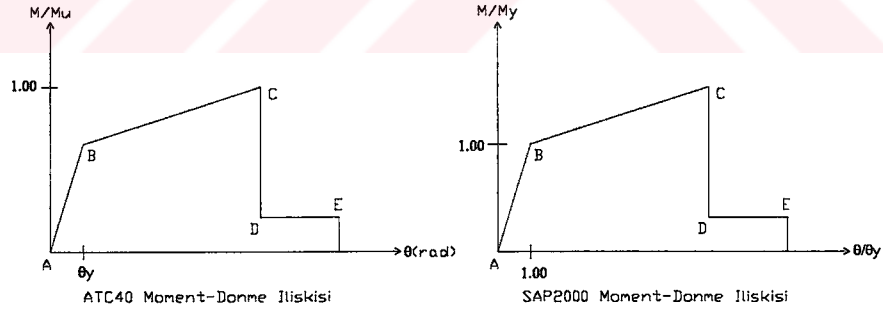
1. etriye aralığı  $\leq d/3$
2. etriye kesme kapasitesi tasarım kesme kuvvetinin en az  $\frac{3}{4}$ 'ü ise.

Bu koşulları sağlamayan elemanlar “uygun değil” olarak tanımlanmalıdır.



Şekil 9.4 ATC40 Moment-Dönme ilişkisi

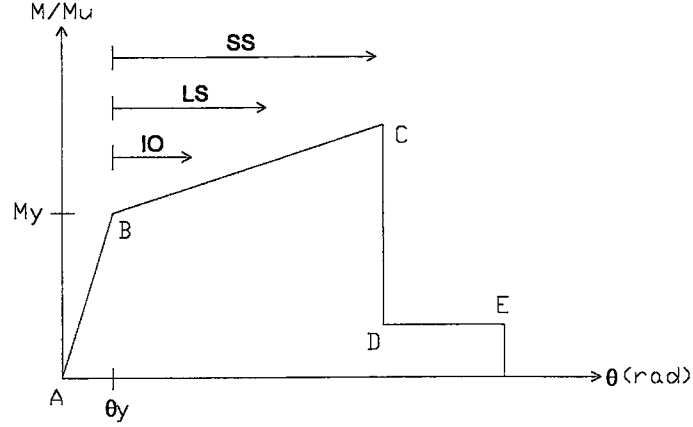
ATC40'ta tavsiye edilen moment-dönme bağıntısının eksen takımı SAP2000'de verilen eksen takımı ile farklıdır. ATC40'ta verilen değerlerin kullanılması halinde elde edilen eksen takımının düşey eksenini sınır durum momenti ile normalleştirilmiştir ( $M/M_u$ ). Yatay eksen de ise radyan olarak dönme değerleri verilmektedir. SAP2000 programında ise eksen takımları bazı farklar mevcuttur. SAP2000 programında yatay ve düşey eksen takımları akma değerleri ile normalleştirilerek verilmektedir ( $M/M_y$  ve  $\theta/\theta_y$ ). ATC40'tan elde edilen moment-dönme bağıntısı SAP2000 formuna çevrilmelidir.



Şekil 9.5 ATC40 ve SAP2000 Moment-Dönme ilişkileri

### 9.2.2 Sınır Değerler

Tanımlanan moment-dönme bağıntılarından sonra sınır değerlerin de tanımlanmaları gerekmektedir. Bu değerler için ATC40 Bölüm 11'de verilen değerler kullanılabilir. Bu sınır değerler ilgili kesitlerin hangi değerlerde hangi performans bölgesinde bulunmasını tanımlamaktadır. İlgili tablo değerleri radyan cinsinden olup akma değerleri üzerine eklenerek tanımlanmalıdır.



Şekil 9.6 ATC40 sınır koşulları

Ancak burada da ATC40 ile SAP2000 programının eksen takımlarının farklı oldukları ve bulunan değerlerin SAP2000 için akma değeri ile normalleştirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

### 9.3 Çözümleme Kombinasyonlarının Tanımlanması

İlgili kesitlere mafsallar atandıktan sonra sisteme doğrusal olmayan statik çözümleme için yükler tanımlanmalıdır (pushover load cases). Bu çözümleme metodunda sistemde düşey yükler tanımlı iken yatay yük kombinasyonları tanımlanır ve bunlar artırılarak mekanizma durumu hedeflenir. Düşey yükler mevcut iken yatay yükler dört değişik durumda tanımlanabilir:

1. her düğüm noktasına, kendi kütlesi ile orantılı ivme tanımlayarak
2. belirli bir mod şeklinin kütle dağılımı ile açısal frekansın karesinin çarpımı ile
3. statik yükleme tanımlayarak
4. yukarıdaki üç yöntemin kombinasyonları ile.

Uygulamalarda PUSH1 olarak tanımlanan yük modeli düşey yükleri temsil etmektedir. PUSH2, 1. mod şekline göre tanımlanmış yatay yükleme modelidir. PUSH3 ise yine 1. mod şekline göre tanımlanmış ancak PUSH2'den elde edilen performans noktasına kadar itilmiş yükleme modelidir. Bunun nedeni, performans noktasına kadar olan süreçte ara kademelerde neler olduğunun belirlenmesidir. Tüm yüklemelerde yapının en üst noktası kontrol noktası olarak belirlenmelidir.

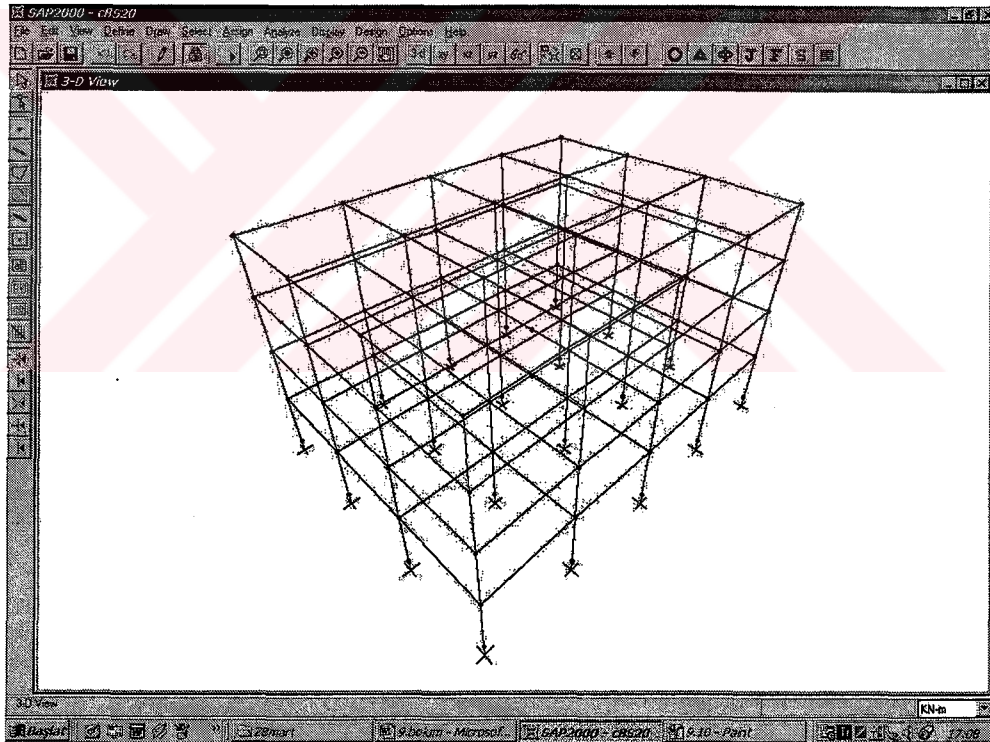
### 9.3.1 Çözümleme

Kesitler, mafsallar ve yükler tanımlandıktan sonra çözümleme işlemine geçilir. İlgili çözümleme yöntemi seçilerek (Run Static Pushover) çözümleme işlemi yaptırılır. Çözümleme tanımlandıktan sonra programdan alınabilecek sonuçlar:

- Kapasite Eğrisi (Pushover Curve)
- Talep Spektrumlarının farklı sönüm oranlarına göre belirlenmesi
- Talep ve kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi
- Kesitlerin adım adım durumlarının takip edilmesi.

### 9.4 Üç Boyutlu Model

Açıklanan sistem üzerinde mafsallık özellikleri de tanımlandıktan sonra üç boyutlu model oluşturulmuştur.



Şekil 9.7 Üç boyutlu model

Talep eğrisinin tanımlanması için kabul edilen katsayılar aşağıdaki gibidir:

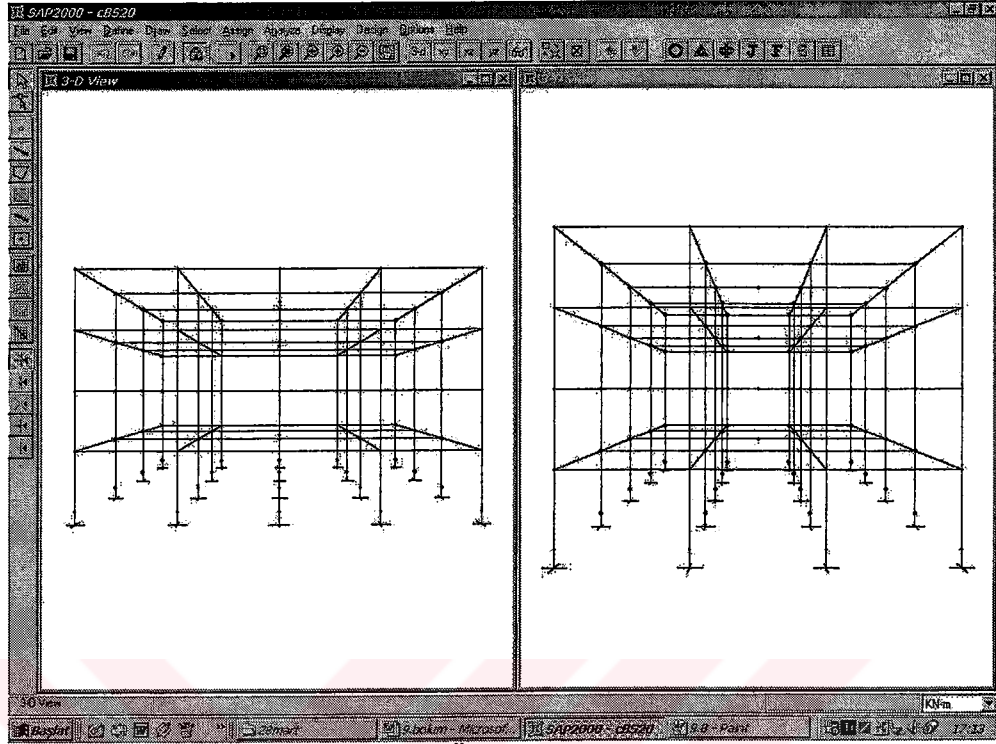
Sismik bölge katsayısı ( $Z$ ):0.4

Kaynağa yakınlık katsayıları ( $N_A$ ,  $N_V$ ):1

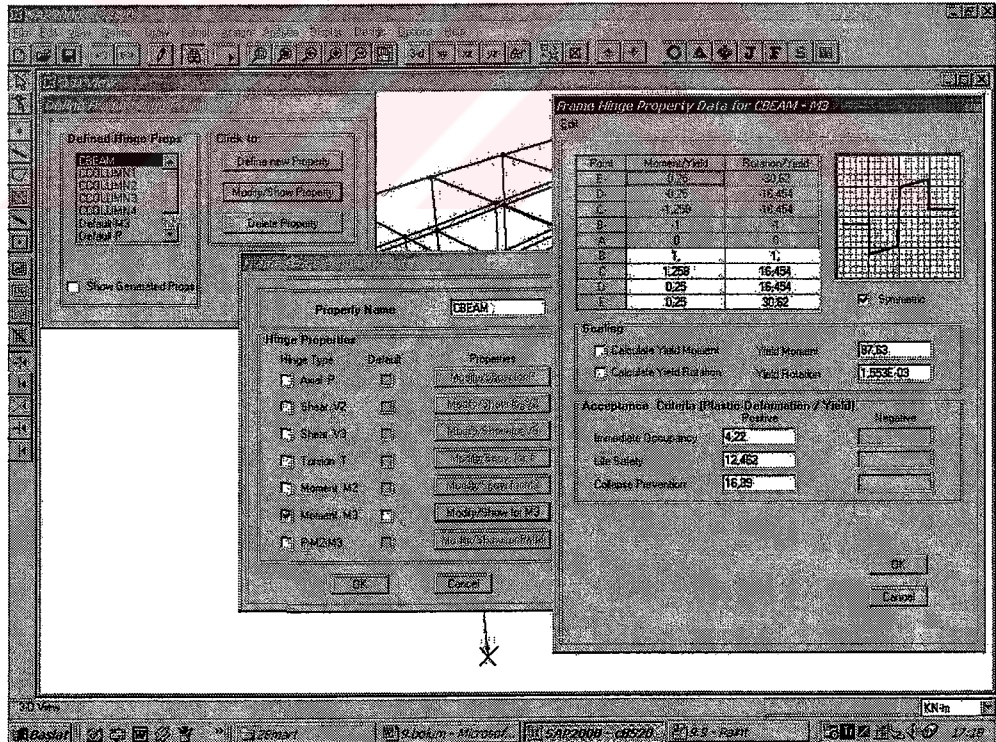
Deprem katsayısı ( $E$ ):1

Zemin tipi: $S_B$

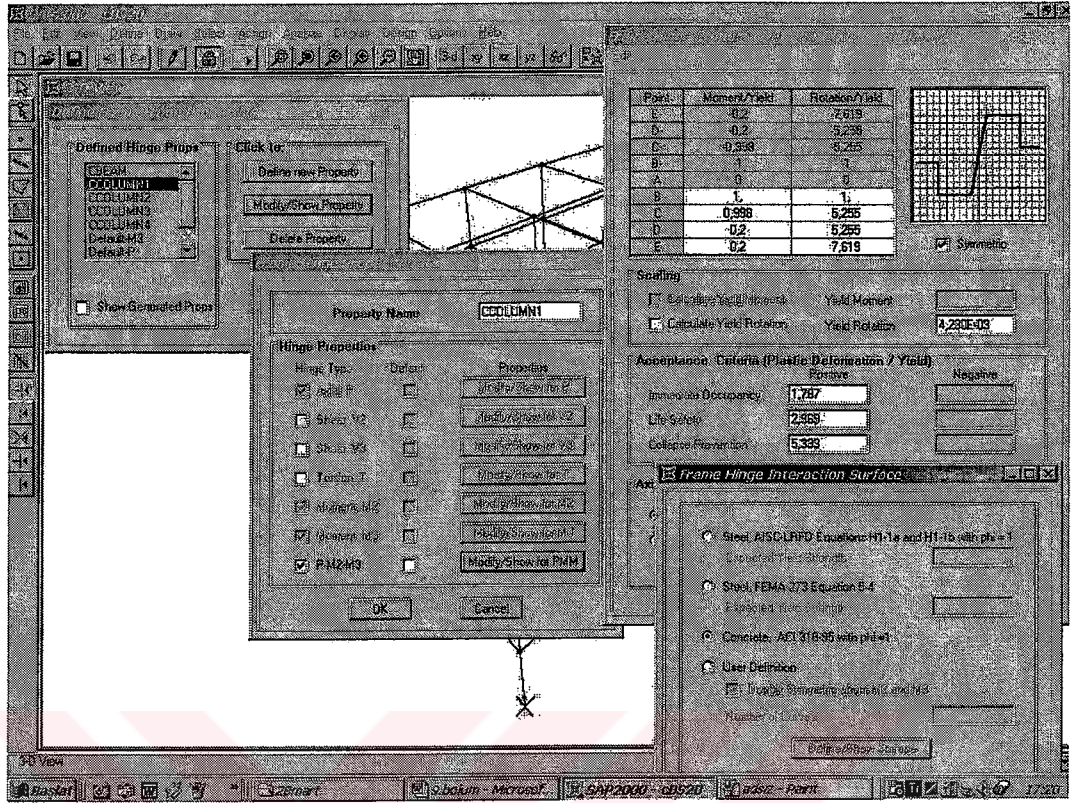
Bu kabuller altında  $C_A$  ve  $C_V$  sismik katsayıları 0.4 olarak tanımlanmalıdır.



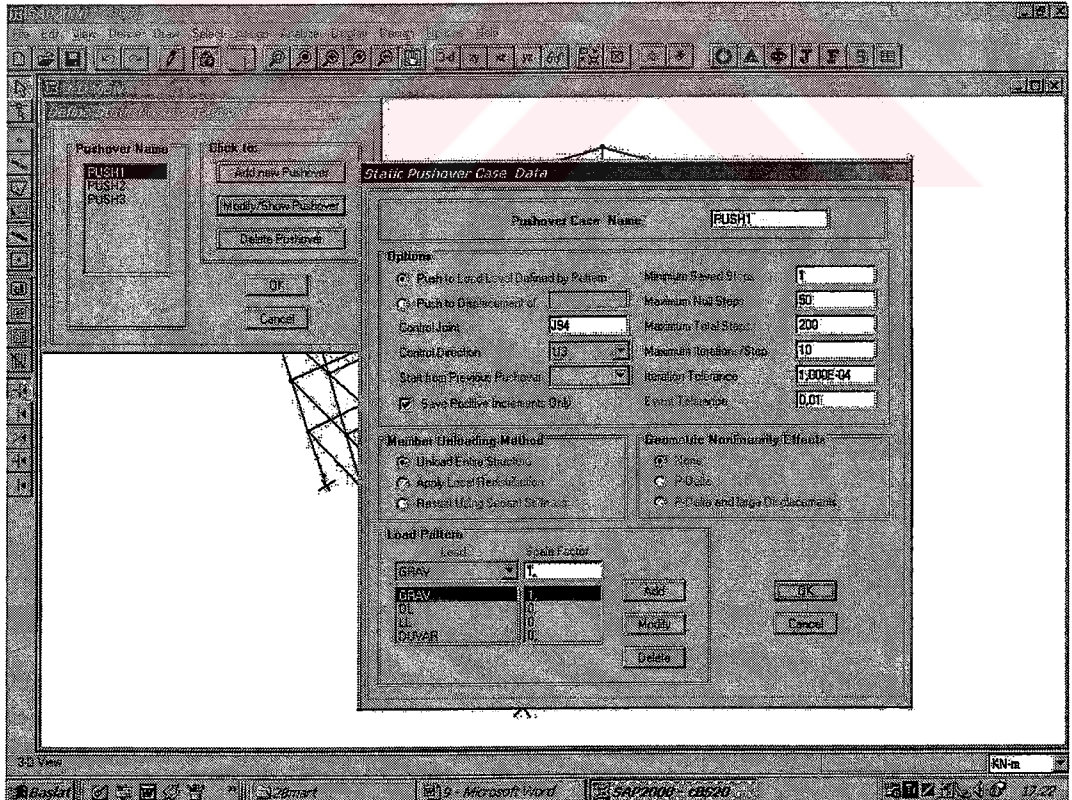
Şekil 9.8 Üç boyutlu model



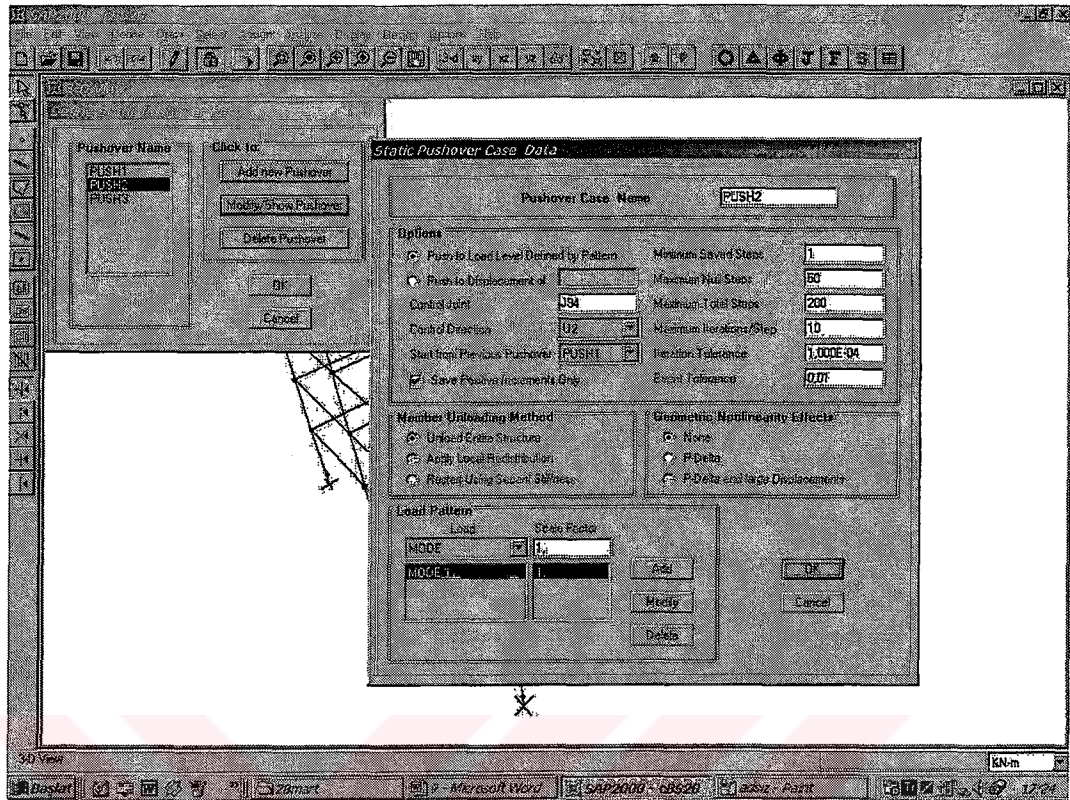
Şekil 9.9 Kirişler için M3 mafsalsının tanımlanması



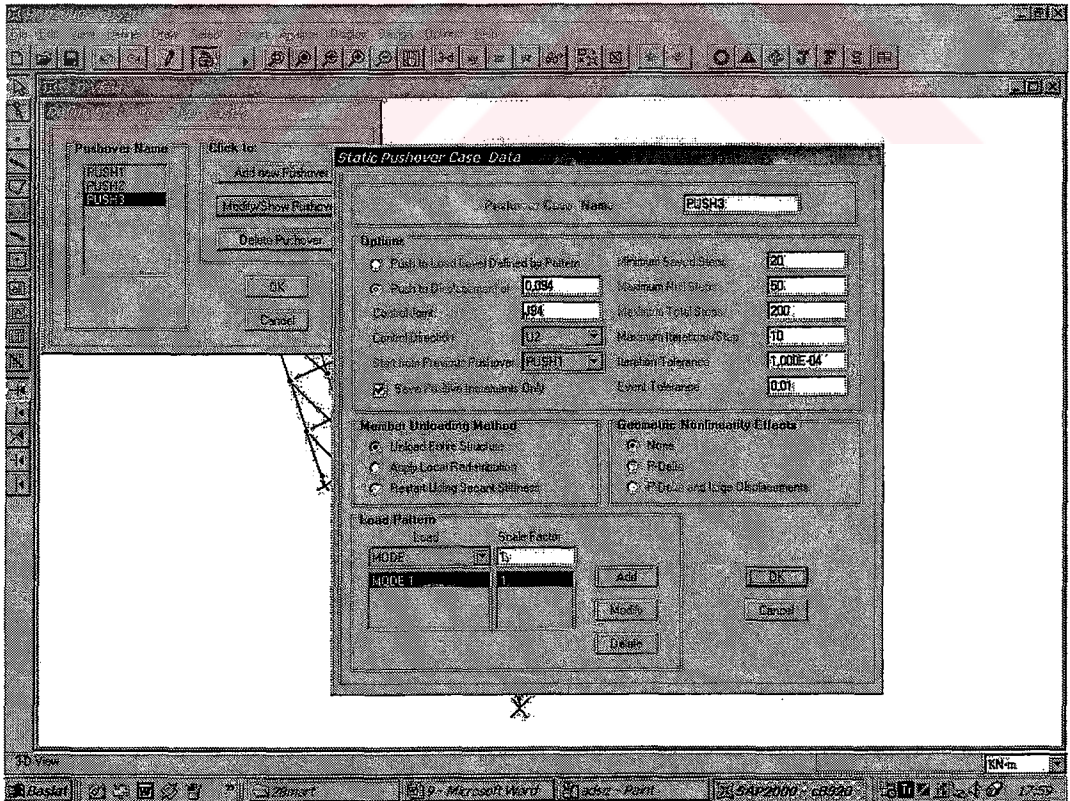
Şekil 9.10 Kolonlar için PMM mafsalsının tanımlanması



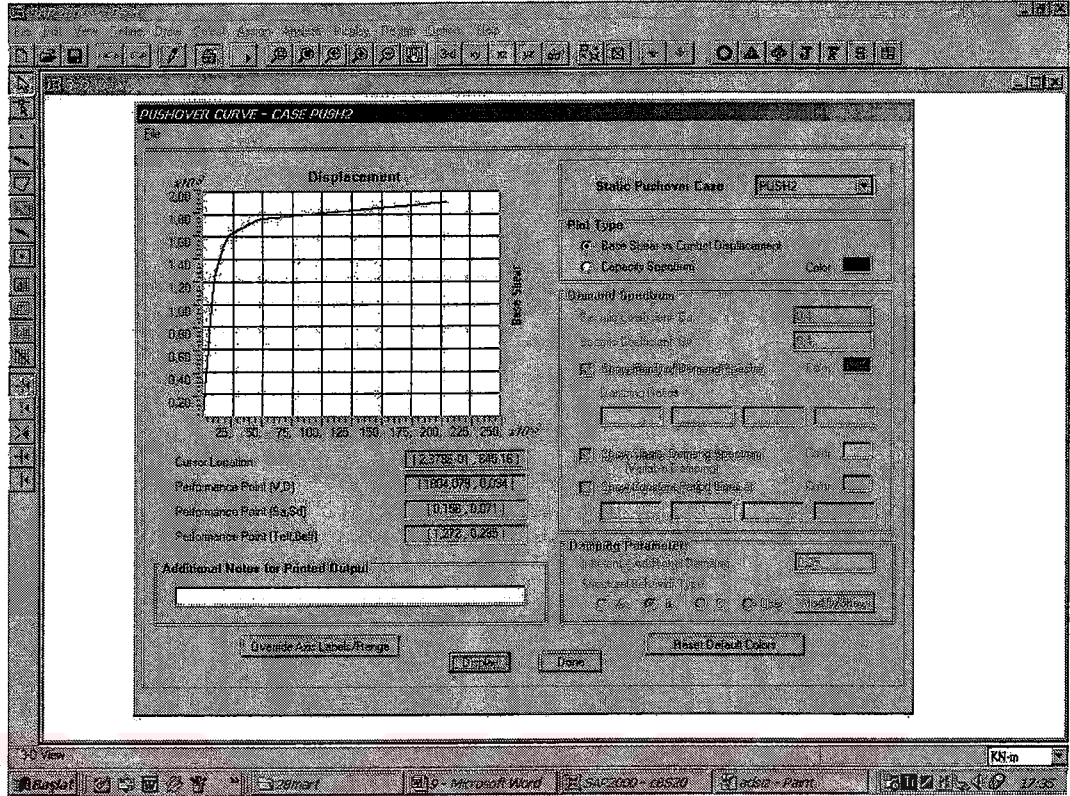
Şekil 9.11 PUSH1 yüklemesinin tanımlanması



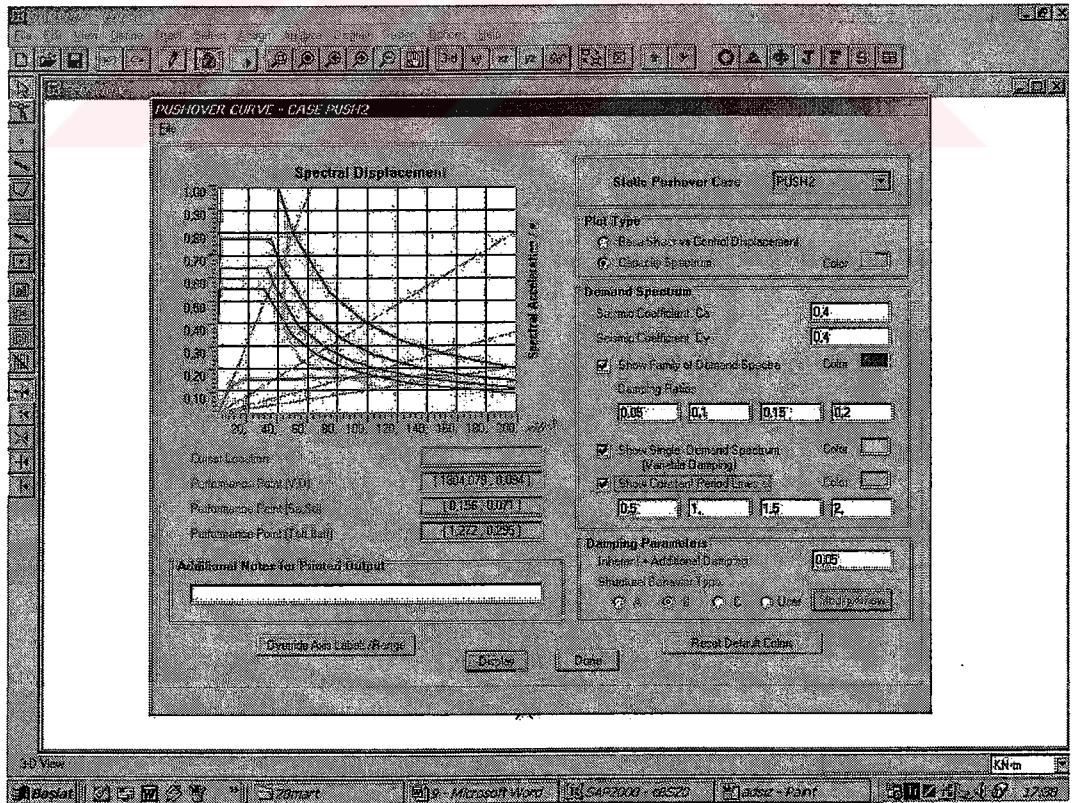
Şekil 9.12 PUSH2 yüklemesinin tanımlanması



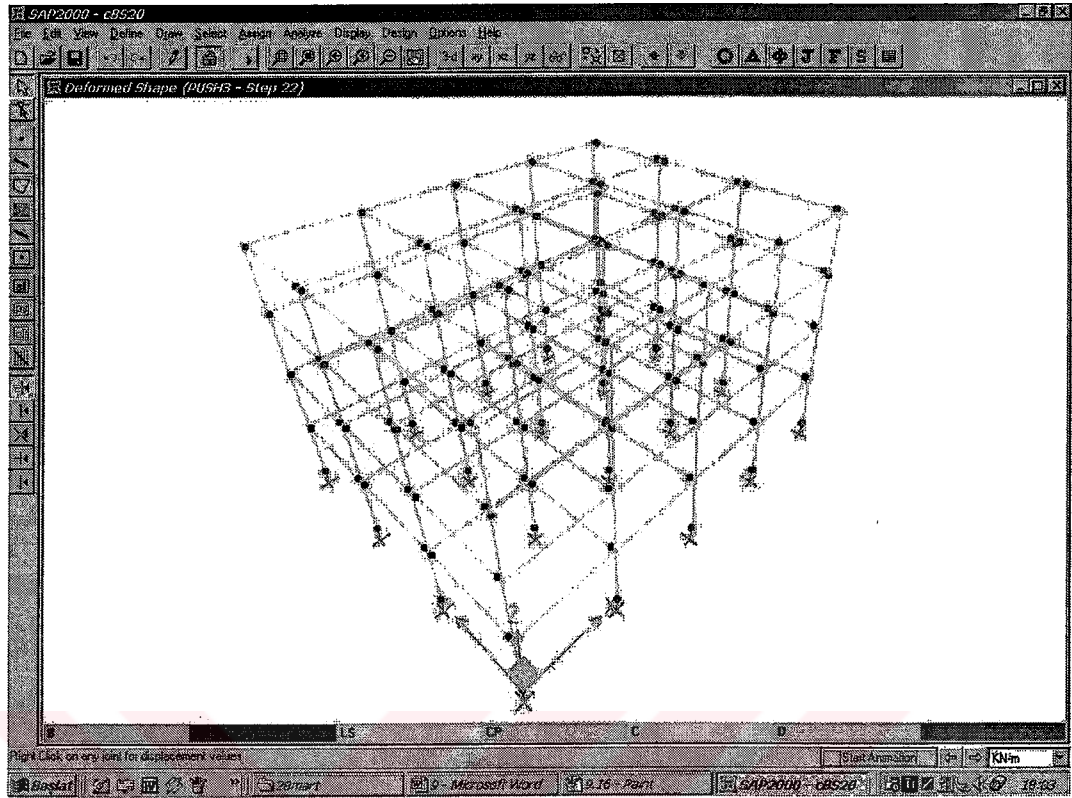
Şekil 9.13 PUSH3 yüklemesinin tanımlanması



Şekil 9.14 Kapasite eğrisi



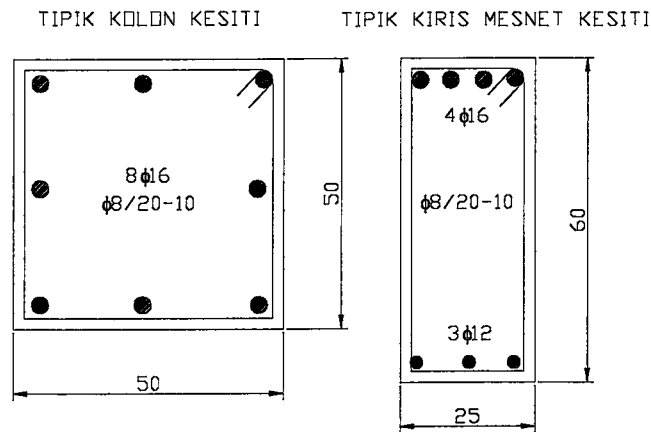
Şekil 9.15 Performans noktası



Şekil 9.16 Performans noktası mafsallı durumları

### 9.5 Uygulama 1

Birinci örnekte daha önce açıklanan sistem üzerinde sargılı ver sargısız durumu incelenecektir. Bu uygulama için malzeme kaliteleri C20/S420 olarak seçilmiştir. Birinci modelde sargı aralığı 100mm (cBS20), ikinci modelde sargı aralığı 200mm (ucBS20) olarak alınmıştır. Bu sargı durumlarına göre kesitlerin moment-dönme bağıntıları tanımlanmış ve çözümleme yapılmıştır.



Şekil 9.17 Kolon ve kiriş kesitleri, etriye durumları

Bu uygulamada aynı sistem ve kesitler üzerinde sargı etkisi incelenmiştir. Sargılı ve sargısız durum için yapılan çözümleme sonuçları Tablo 9.4 ve Tablo 9.5'te verilmiştir.

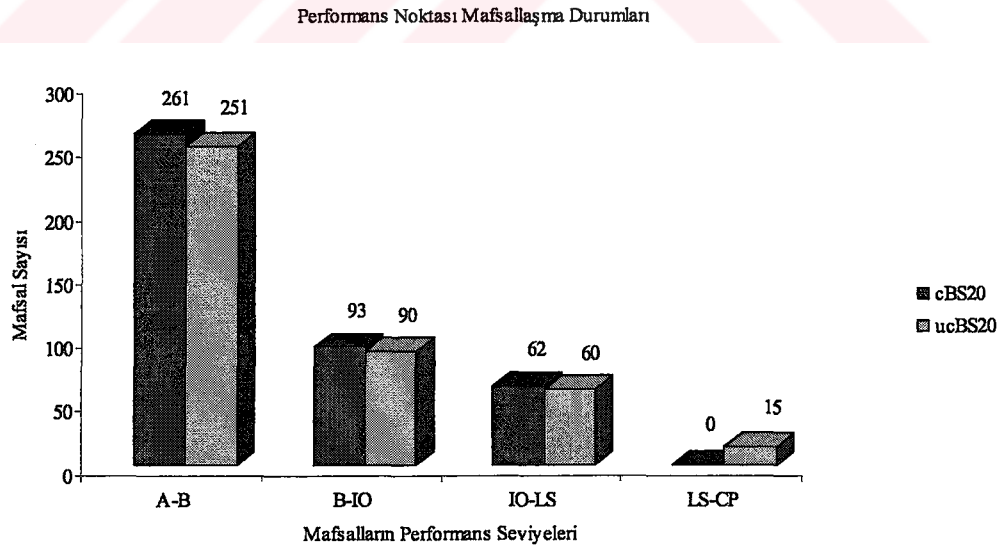
Tablo 9.4 “cBS20” modeli çözümleme sonuçları

| Adım | Yerdeğiştirme (m) | Kesme Kuvveti (kN) | Mafsal sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|-------------------|--------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                   |                    | A-B           | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0,000             | 0,00               | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,005             | 673,78             | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,007             | 980,67             | 411           | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,010             | 1241,36            | 366           | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,015             | 1469,76            | 336           | 80   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,019             | 1576,52            | 311           | 105  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,022             | 1615,26            | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,027             | 1643,74            | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,031             | 1672,22            | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,036             | 1701,39            | 301           | 115  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,042             | 1734,58            | 286           | 130  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,047             | 1752,65            | 282           | 134  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,049             | 1760,69            | 269           | 147  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,050             | 1761,75            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,055             | 1766,70            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,059             | 1771,65            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,064             | 1776,60            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,069             | 1781,54            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,073             | 1786,49            | 266           | 132  | 18    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,078             | 1791,44            | 266           | 115  | 35    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,083             | 1796,39            | 264           | 92   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 21   | 0,087             | 1801,32            | 264           | 92   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 22   | 0,092             | 1806,25            | 261           | 95   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 23   | 0,094             | 1808,27            | 261           | 93   | 62    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |

Tablo 9.5 “ucBS20” modeli çözümleme sonuçları

| Adım | Yerdeğiştirme (m) | Kesme Kuvveti (kN) | Mafsals Sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|-------------------|--------------------|----------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                   |                    | A-B            | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0,000             | 0,00               | 416            | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,005             | 716,79             | 416            | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,007             | 981,04             | 411            | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,010             | 1242,32            | 366            | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,015             | 1472,64            | 336            | 80   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,019             | 1580,40            | 311            | 105  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,022             | 1621,13            | 306            | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,027             | 1656,23            | 306            | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,032             | 1691,32            | 306            | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,040             | 1746,21            | 291            | 125  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,047             | 1779,93            | 282            | 134  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,049             | 1789,30            | 266            | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,054             | 1798,34            | 266            | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,059             | 1807,37            | 266            | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,064             | 1816,41            | 266            | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,069             | 1825,44            | 266            | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,074             | 1834,48            | 266            | 130  | 20    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,079             | 1843,52            | 264            | 107  | 45    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,084             | 1852,53            | 261            | 95   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,089             | 1861,48            | 257            | 99   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,094             | 1870,34            | 257            | 99   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 21   | 0,099             | 1879,19            | 251            | 90   | 60    | 15    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 22   | 0,100             | 1880,68            | 251            | 90   | 60    | 15    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |

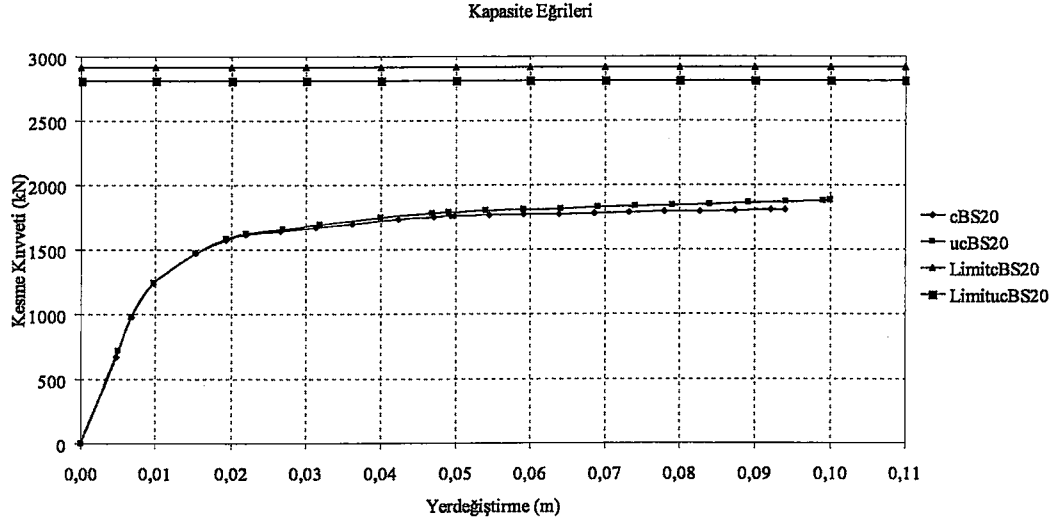
Tablo 9.4 ve Tablo 9.5’te her adımda oluşan yerdeğiştirmeler, kesme kuvvetleri, oluşan mafsals sayısı ve bu mafsalların performans seviyeleri verilmektedir. Her iki model için performans noktası toplam mafsallaşma durumları Şekil 9.18’de verilmiştir.



Şekil 9.18 Her iki modelin performans noktası mafsals durumları

Şekil 9.19 her iki durum için kapasite eğrileri ve kesme kuvveti kapasiteleri verilmiştir. Kesme kuvveti kapasiteleri hesaplanırken, zemin kat kolonlarının her iki

ucundan mafsallaştığı varsayılmıştır. Bu durum sistemin ulaşabileceği sınır durumdur ve buradan sistemin karşı koyabileceği toplam taban kesme kuvveti kolon kapasitelerinden hesaplanmıştır.



Şekil 9.19 Kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi

Sargılı ve sargısız durumların karşılaştırılması yukarıdaki şekillerde verilmiştir. Sargılı ve sargısız durum için XTRACT programından elde edilen ve sargı durumuna göre değerlendirilen beton basınç dayanımları ile ATC40 bölüm 11’de verilen sınır durum değerleri farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar kapasite eğrilerinde büyük değişiklikler oluşturmazsa da sınır durum mafsallaşma durumlarında birtakım farklar oluşmaktadır. Sargısız model performans noktasında 15 adet mafsal LS-CP performans aralığındadır. Sargılı modelde ise tüm mafsallar LS performans sınırının altındadır. Ayrıca bulunan performans noktası yatay kuvvet değerleri, sistemlerde kolonların mafsallaştığı kabul edilerek hesaplanan kapasite kesme kuvvetlerinden büyüktür. Sargılı ve sargısız durum arasında yatay kuvvetteki artış, daha büyük oranda yerdeğiştirme değeri ile sağlanmaktadır.

## 9.6 Uygulama 2

İkinci örnekte açıklanan sistem üzerinde beton kalitesi değiştirilmiştir. Bu uygulama için yatay ve düşey donatı kalitesi S420 olarak seçilmiştir. Tüm modellerde sargı donatısı aralığı 100mm olarak alınmıştır. Beton kaliteleri, iyi bir beton C25 ile sık rastlanan C18 (B225) ve C14 (B160) olarak belirlenmiştir. Seçilen bu beton kalitelerine uygun olarak bütün kesitlerin ayrı ayrı moment-dönme bağıntıları tekrar belirlenmiş ve üç ayrı sistem modeli oluşturulmuştur.

Tablo 9.6 “cBS25” modeli çözümleme sonuçları

| Adım | Yerdeğiştirme<br>(m) | Kesme Kuvveti<br>(kN) | Mafsıl Sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|----------------------|-----------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                      |                       | A-B           | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0                    | 0,00                  | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,0058               | 898,55                | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,0064               | 985,40                | 411           | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,0091               | 1246,59               | 366           | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,0158               | 1526,47               | 334           | 82   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,0204               | 1624,85               | 309           | 107  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,0209               | 1631,83               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,0267               | 1677,88               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,0369               | 1755,50               | 291           | 125  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,0444               | 1796,47               | 277           | 139  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,0448               | 1798,20               | 272           | 144  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,0507               | 1809,14               | 272           | 144  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,0565               | 1820,07               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,0624               | 1830,99               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,0682               | 1841,91               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,0741               | 1852,83               | 266           | 135  | 15    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,0799               | 1863,75               | 266           | 100  | 50    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,0858               | 1874,67               | 266           | 90   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,0916               | 1885,59               | 266           | 90   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,0975               | 1896,51               | 264           | 92   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,1033               | 1907,42               | 260           | 71   | 85    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 21   | 0,1092               | 1918,24               | 257           | 64   | 95    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 22   | 0,115                | 1929,04               | 251           | 55   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 23   | 0,117                | 1932,47               | 251           | 55   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |

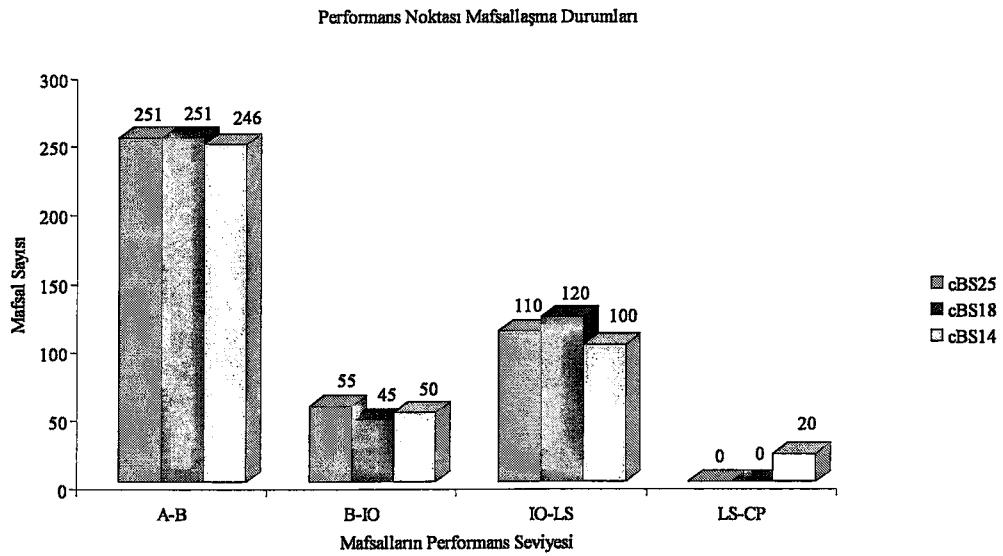
Tablo 9.7 “cBS18” modeli çözümleme sonuçları

| Adım | Yerdeğiştirme<br>(m) | Kesme Kuvveti<br>(kN) | Mafsıl Sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|----------------------|-----------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                      |                       | A-B           | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0,000                | 0,00                  | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,007                | 929,27                | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,007                | 975,09                | 411           | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,010                | 1235,22               | 366           | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,017                | 1506,19               | 334           | 82   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,020                | 1570,10               | 311           | 105  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,022                | 1606,03               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,029                | 1645,67               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,035                | 1685,30               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,043                | 1726,74               | 286           | 130  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,050                | 1754,30               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,057                | 1761,61               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,064                | 1768,93               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,070                | 1776,24               | 266           | 145  | 5     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,077                | 1783,56               | 266           | 120  | 30    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,083                | 1790,87               | 264           | 92   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,090                | 1798,16               | 264           | 92   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,097                | 1805,45               | 261           | 75   | 80    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,103                | 1812,67               | 259           | 72   | 85    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,110                | 1819,85               | 257           | 54   | 105   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,116                | 1826,97               | 252           | 54   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 21   | 0,123                | 1833,75               | 251           | 55   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 22   | 0,130                | 1840,38               | 251           | 55   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 23   | 0,132                | 1842,88               | 251           | 45   | 120   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |

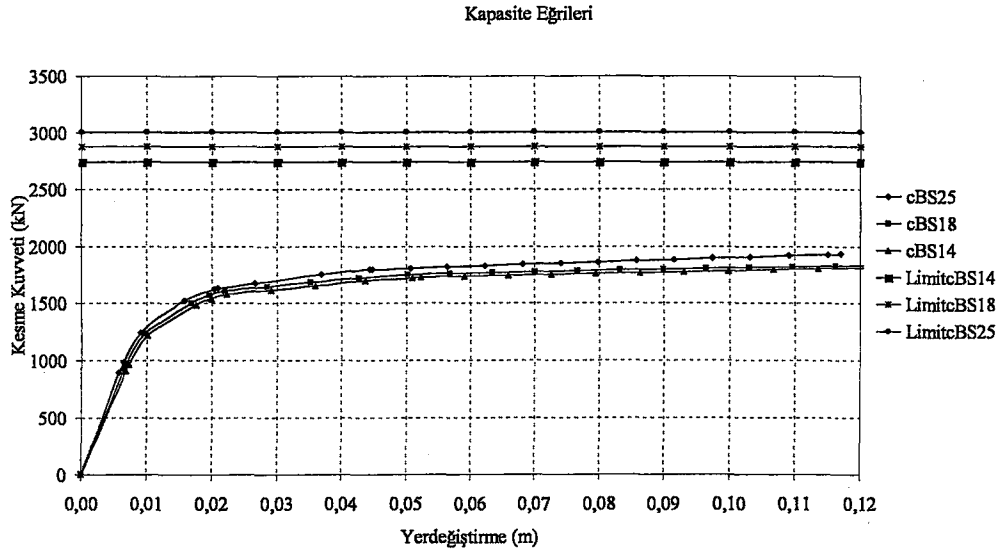
Tablo 9.8 “cBS14” modeli çözümleme sonuçları

| Adım | Yerdeğiştirme (m) | Kesme Kuvveti (kN) | Mafsal Sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|-------------------|--------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                   |                    | A-B           | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0,000             | 0,00               | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,007             | 910,43             | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,007             | 962,35             | 411           | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,010             | 1221,18            | 366           | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,018             | 1490,74            | 334           | 82   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,020             | 1541,78            | 311           | 105  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,022             | 1577,11            | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,029             | 1616,60            | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,036             | 1656,08            | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,044             | 1698,90            | 291           | 125  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,051             | 1727,10            | 282           | 134  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,052             | 1731,79            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,059             | 1739,80            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,066             | 1747,80            | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,073             | 1755,81            | 266           | 135  | 15    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,080             | 1763,82            | 266           | 90   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,086             | 1771,82            | 264           | 72   | 80    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,093             | 1779,80            | 261           | 75   | 80    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,100             | 1787,69            | 261           | 75   | 80    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,107             | 1795,59            | 257           | 74   | 85    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,114             | 1803,37            | 255           | 51   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 21   | 0,120             | 1811,05            | 251           | 55   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 22   | 0,127             | 1818,29            | 251           | 55   | 110   | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 23   | 0,134             | 1825,53            | 249           | 52   | 95    | 20    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 24   | 0,136             | 1827,71            | 246           | 50   | 100   | 20    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |

Tablo 9.6, Tablo 9.7 ve Tablo 9.8’de her adımda oluşan yerdeğiştirmeler, kesme kuvvetleri, oluşan mafsal sayısı ve bu mafsalların performans seviyeleri verilmektedir. Her üç model için performans noktası toplam mafsallaşma durumları Şekil 9.20’de verilmiştir.



Şekil 9.20 Tüm modeller performans noktası mafsal durumları



Şekil 9.21 Kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi

Tanımlanan üç durumun karşılaştırılması yukarıdaki şekillerde verilmiştir. Performans eğrileri değerlendirilirse, beton kalitesi arttıkça sistemin aynı yerdeğiştirme değeri altında daha fazla yatay kuvvet talep ettiği görülmektedir. Sistemlerde beton kaliteleri ve buna bağlı olarak elastisite modülleri değişmektedir. Beton kalitesi arttıkça sistemin aynı yerdeğiştirme altında talep ettiği yatay kuvvet değeri de artmaktadır. Ayrıca performans noktalarında mafsalların performans seviyeleri de beton kalitesi arttıkça performans seviyelerinin de iyileştiğini göstermektedir. Beton kalitesi C14 olarak seçilen modelin performans noktasında 20 adet mafsal LS-CP performans aralığındadır. Tüm modeller için bulunan performans kesme kuvvetleri, hesaplanan kapasite değerlerinin altındadır.

### 9.6 Uygulama 3

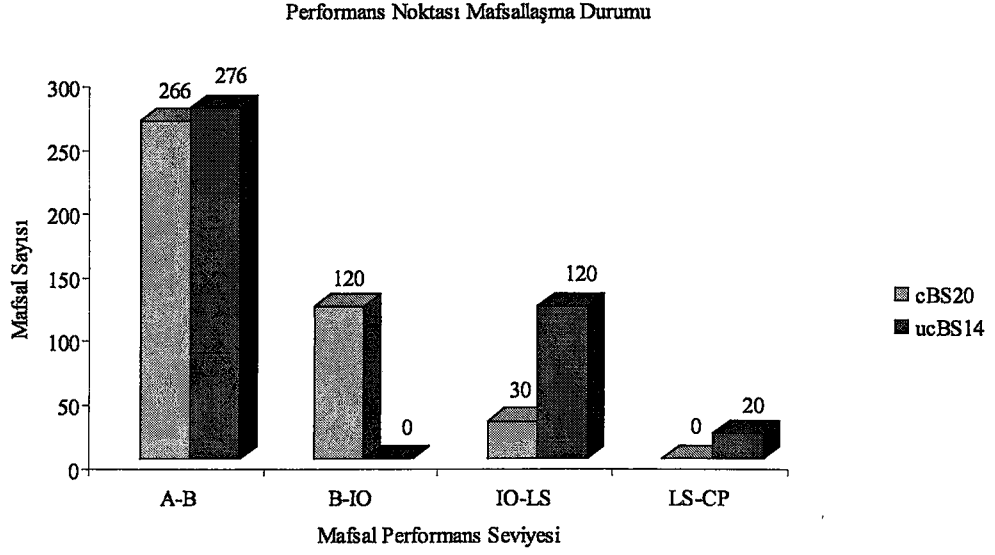
Üçüncü örnekte açıklanan sistem üzerinde farklı malzeme ve sargı durumları incelenecektir. Bu uygulama için malzeme kaliteleri C20 ve S420 olan sargılı model ile malzeme kaliteleri C14 ve S220 olan sargısız model karşılaştırılacaktır. Birinci modelin günümüz şartnamelerine yakın bir binayı, ikinci model ise daha eski bir binayı temsil ettiği düşünülmüştür. Seçilen bu malzeme kalitelerine uygun olarak bütün kesitlerin ayrı ayrı moment-dönme bağıntıları tekrar belirlenmiş ve iki ayrı sistem modeli oluşturulmuştur.

Tablo 9.9 “cBS20StIII” çözümleme sonuçları

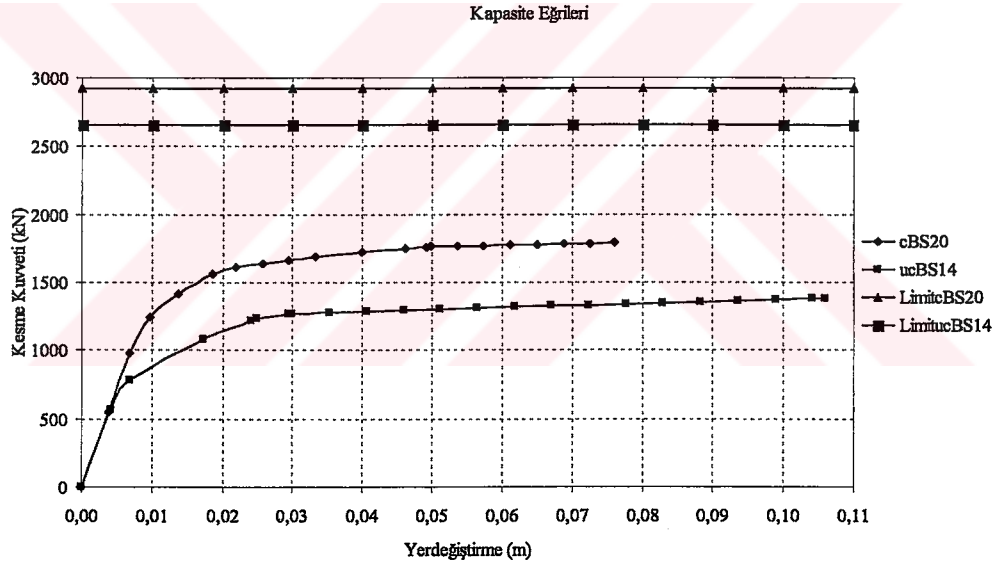
| Adım | Yerdeğiştirme<br>(m) | Kesme Kuvveti<br>(kN) | Mafsal Sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|----------------------|-----------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                      |                       | A-B           | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0,000                | 0,00                  | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,004                | 544,76                | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,007                | 980,67                | 411           | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,010                | 1241,36               | 366           | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,014                | 1415,89               | 341           | 75   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,019                | 1559,40               | 317           | 99   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,022                | 1615,26               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,026                | 1638,28               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,030                | 1661,31               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,033                | 1684,34               | 306           | 110  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,040                | 1722,74               | 301           | 115  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,046                | 1749,19               | 282           | 134  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,049                | 1760,58               | 269           | 147  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,050                | 1761,72               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,054                | 1765,72               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,057                | 1769,72               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,061                | 1773,72               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,065                | 1777,72               | 266           | 150  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,069                | 1781,72               | 266           | 148  | 2     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,073                | 1785,72               | 266           | 135  | 15    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,076                | 1789,31               | 266           | 120  | 30    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |

Tablo 9.10 “ucBS14StI” modeli çözümleme sonuçları

| Adım | Yerdeğiştirme<br>(m) | Kesme Kuvveti<br>(kN) | Mafsal Sayısı |      |       |       |      |     |     |    | Toplam |
|------|----------------------|-----------------------|---------------|------|-------|-------|------|-----|-----|----|--------|
|      |                      |                       | A-B           | B-IO | IO-LS | LS-CP | CP-C | C-D | D-E | >E |        |
| 0    | 0,000                | 0,00                  | 416           | 0    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 1    | 0,004                | 565,04                | 411           | 5    | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 2    | 0,007                | 777,68                | 366           | 50   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 3    | 0,017                | 1079,37               | 326           | 90   | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 4    | 0,024                | 1220,00               | 304           | 112  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 5    | 0,025                | 1232,87               | 294           | 122  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 6    | 0,029                | 1269,60               | 279           | 137  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 7    | 0,030                | 1272,71               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 8    | 0,035                | 1280,12               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 9    | 0,041                | 1287,52               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 10   | 0,046                | 1294,93               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 11   | 0,051                | 1302,34               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 12   | 0,057                | 1309,75               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 13   | 0,062                | 1317,16               | 276           | 140  | 0     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 14   | 0,067                | 1324,56               | 276           | 135  | 5     | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 15   | 0,072                | 1331,97               | 276           | 95   | 45    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 16   | 0,078                | 1339,38               | 276           | 80   | 60    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 17   | 0,083                | 1346,79               | 276           | 65   | 75    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 18   | 0,088                | 1354,20               | 276           | 50   | 90    | 0     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 19   | 0,094                | 1361,60               | 276           | 41   | 90    | 9     | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 20   | 0,099                | 1369,01               | 276           | 20   | 100   | 20    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 21   | 0,104                | 1376,42               | 276           | 0    | 120   | 20    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |
| 22   | 0,106                | 1378,95               | 276           | 0    | 120   | 20    | 0    | 0   | 0   | 0  | 416    |



Şekil 9.22 Performans noktası mafsallaşma durumları



Şekil 9.23 Kapasite eğrilerinin üst üste çizilmesi

Tanımlanan iki durumun karşılaştırılması Şekil 9.22 ve Şekil 9.23'te verilmiştir. Sargı durumu ve malzeme kalitesi arttıkça performansın da arttığı açıkça görülmektedir. Sargılı durumda sistem aynı yerdeğiştirme altında daha fazla yatay kuvvete karşı koyabilmekte ya da aynı kesme kuvvetine daha küçük yerdeğiştirme değerlerinde ulaşabilmektedir. Sistemlerin performans noktalarındaki mafsallaşma durumları ise iki sistem arasındaki farkı daha net ortaya koymaktadır. Sargı donatısı ve malzeme kalitesi yetersiz sistemde performans noktasında 20 adet kesit LS-CP

performans aralığındadır. Diğer sistemde bütün kesitler LS performans seviyesini sağlamaktadır.



## 10 SONUÇLAR

Yapı sistemlerinin doğrusal olmayan ve yerdeğiştirme kontrollü çözümleme yöntemleri gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Sistemin, elemanların ve malzemenin doğrusal olmayan kapasitesinden daha iyi yararlanabilmek; sistemi ve elemanları yerdeğiştirme ve şekil değiştirme değerlerine göre kontrol edebilmek, doğrusal olmayan çözümleme yöntemlerini cazip hale getirmektedir.

Doğrusal olmayan çözümleme yöntemleri sistem ve elemanların değişik yatay yük seviyelerindeki durumlarını vermektedir. Ayrıca kapasiteyi daha etkin kullanabilmek ve göçmeye karşı sabit güvenlik elde edebilmek için doğrusal olmayan çözümleme yöntemleri daha kullanışlı ve uygundur. Doğrusal olmayan çözümleme yöntemleri ile sistemdeki hasar sıraya konabilir ve göçme şekli belirlenebilir. Doğrusal olmayan çözümleme yöntemlerinin kullanılması sayesinde yapı sisteminin davranışı hakkında gerçeğe daha yakın bilgi sahibi olunabilecektir. Bunların yanında yapı sisteminin ve elemanların hangi adımda ne durumda oldukları da daha detaylı şekilde incelenebilir. Bu sayede daha ekonomik çözümler üretilebilir.

Performans Metodu da doğrusal olmayan nümerik çözümleme yöntemlerinden biridir. Temelde yapının kapasitesi ile talep edilen etkinin buluşturulması sonucu yapının performans noktasının bulunmasını amaçlar. Kapasite ve talep eğrilerinin kesişmesiyle, yapının seçilen etki altındaki performans seviyesi ve elemanların durumları belirlenebilir. Eğer kapasite eğrisi talep eğrisinin altında ise yapı yetersiz durumdadır.

Bölüm 9'da açıklanan uygulamalarda tipik bir yapının, farklı durumlarda, performans metodu ile ATC40'a göre incelenmesine yer verilmiştir. 1. uygulamada yapı sistemi üzerinde sargı etkisi araştırılmıştır. Sargı etkili kesitlerin bulunduğu model tasarım depremi altında Can Güvenliği (LS) performans seviyesini sağlarken, sargı etkisi daha az olan kesitlerin bulunduğu modelde bazı kesitler Can Güvenliği performans seviyesi aşmaktadır.

2. uygulamada üç farklı modelde beton kalitesi üzerinde durulmuştur. Beton kalitesinin iyi olarak seçildiği 1. modelde bütün kesitler Can Güvenliği performans

seviyesini sağlamaktadır. Beton kalitesinin normal olarak seçildiği 2. modelde kesitler yine Can Güvenliği performans seviyesini sağlamaktadır ancak elastik sınırı aşan kesit sayısı 1. modelden daha fazladır. Beton kalitesi zayıf olarak seçilen 3. modelde mafsallaşan toplam kesit sayısı daha fazladır ve bu kesitlerin bazıları Can Güvenliği performans seviyesini aşmaktadır. Kapasite eğrilerinin karşılaştırılması sonucu, aynı yerdeğiştirme değerinde beton kalitesi arttıkça daha fazla yatay kuvvet talep edilmektedir.

3. uygulamada iki farklı modelde yeni yönetmeliklerin öngördüğü yapı özellikleri ile mevcut yapıların büyük kısmını temsil edebilecek zayıf yapı özellikleri karşılaştırılmıştır. Yeni yönetmeliklere göre oluşturulan modelin tasarım deprem etkisi altında kesitleri Can Güvenliği performans seviyesini sağlamaktadır. Ancak zayıf yapı özelliklerinin bulunduğu modelin kesitlerinin büyük kısmı Can Güvenliği performans seviyesini sağlarken, kesitlerinin bir kısmı da Can Güvenliği performans seviyesini aşmaktadır. Malzeme ve sargı durumu daha iyi olan modelin kapasite eğrisi diğer modelin kapasite eğrisi ile karşılaştırıldığında, malzeme ve sargı durumu iyi olan model daha fazla yatay kuvvet taşıdığı görülmektedir.

İncelenen tüm modellerde performans noktasında bulunan yatay kuvvet değerleri, en büyük kapasite değerlerinin altındadır. Ayrıca sargı donatısı sıklaştıkça ve beton kalitesi arttıkça sistemden talep edilen yatay kuvvet değeri artmaktadır.

Uygulama sonuçlarından da anlaşılabileceği gibi yapı sisteminin hangi yatay kuvvet değerinde hangi performans seviyesinde olduğu ve sistemin bütün olarak hangi performans seviyesini sağladığı hakkında detaylı bilgi sahibi olunabilmektedir. Doğrusal olmayan çözümleme yöntemlerinin bu özelliği mevcut yapıların değerlendirilmesinde kullanılabileceği gibi tasarımı yapılan yeni yapıların da daha ekonomik boyutlandırılmasında yardımcı olmaktadır. Performans metodu sayesinde kesit ve sistem kapasiteleri doğru kullanılarak ekonomik ve güvenli yapı sistemleri oluşturulabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **ATC-40**, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *Applied Technology Council*, California.
- [2] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [3] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2001. Yapı Dinamiği, Rehber Matbaacılık, İstanbul.
- [4] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 1998. Betonarme Yapılar, Sema Matbaacılık, İstanbul.
- [5] **Iancovici, M., Fukuyama, H., Kusunoki, K.**, 2002. The Assessment of the Reinforced Concrete Building Structures based on the Seismic Performance Concept, *Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering*, İTÜ, İstanbul, 25-27 Eylül, s.555-564.
- [6] **Bayülke, N.**, 2001. Depremde Hasar Gören Yapıların Onarım ve Güçlendirmesi, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.
- [8] **Celep, Z.**, 2002. Deprem Etkisindeki Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesinde Performans Kavramı, Mustafa İnan Tatbiki Mekanik Seminerleri, İTÜ, İstanbul, 12 Mart.
- [9] **ABYYHY**, 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- [10] **FEMA 356/357**, 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency*, Washington.
- [11] **SAP2000 Manuals**, 2000. Structural Analysis Program CSI Company, Berkeley, California.
- [12] **XTRACT 2.6 Manuals**, 2001. Cross Sectional Structural Analysis of Components Imbsen Software Systems, Sacramento.
- [13] **Karadoğan, F.**, 2002. *İleri Yapı Statiği Ders Notları*, İTÜ, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

Murat Purut, 1979 Eskişehir doğumlu olup; ilk ve orta öğrenimini Eskişehir’de tamamladıktan sonra, 1997 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başlamıştır. Haziran 2001’de lisans öğrenimini tamamlayarak, aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Halen uluslararası bir mühendislik ve müşavirlik şirketinde inşaat mühendisi olarak çalışmaktadır.

