

152134

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPILAR ÜZERİNDEKİ P-DELTA ETKİLERİ VE  
BU ETKİLERİN YÖNETMELİKLERDEKİ YERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Barış KANDİŞ**  
**501021175**

152134

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Aralık 2003**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2004**

**Tez Danışmanı :**

**Prof.Dr. Ertuç ERGÜVEN**

**Diğer Jüri Üyeleri**

**Prof.Dr. Metin AYDOĞAN (İ.T.Ü.)**

**Prof.Dr. Turgut KOCATÜRK (Y.T.Ü.)**

**OCAK 2004**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, yapılar üzerindeki P-Delta etkileri, bu etkilerin nasıl dikkate alınması gerektiği ve bu etkilerin yönetmeliklerdeki yeri incelenerek çok katlı bir yapının bu etkileri içeren duruma göre analizi yapılmıştır.

Yokluğunda bu araştırmanın mümkün olamayacağı değerli danışmanım Sn.Prof.Dr.Ertaç ERGÜVEN'e içten şükranlarımı sunarım. Kendisi bu araştırma boyunca bana sadece yönlendirme ve rehberlik sunmadı, aynı zamanda benim deprem mühendisliğini gerçekten anlamam ve öğrenmem için beni motive etti.

Tüm yaşantım boyunca bana inanan, benim inanmamda bana yardımcı olan ve sonsuz desteklerini benden esirgemeyen aileme özel teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda İTÜ Deprem Mühendisliği öğrencisi bulunduğum dönemi anlamlı ve eğlenceli kılan değerli arkadaşlarıma ve öğretmenlerime de çok teşekkür ederim.

Ocak, 2004

Barış KANDİŞ

## İÇİNDEKİLER

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| KISALTMALAR                                           | iv   |
| TABLO LİSTESİ                                         | v    |
| ŞEKİL LİSTESİ                                         | vi   |
| SEMBOL LİSTESİ                                        | vii  |
| ÖZET                                                  | viii |
| SUMMARY                                               | ix   |
| <br>                                                  |      |
| 1. GİRİŞ                                              | 1    |
| <br>                                                  |      |
| 2. P-DELTA ETKİSİ VE İLGİLİ KAVRAMLAR                 | 2    |
| 2.1. Birinci Mertebe Ve İkinci Mertebe Teorileri      | 2    |
| 2.2. Geometrik Rijitlik                               | 4    |
| 2.3. Burkulma Analizi                                 | 7    |
| 2.4. P-Delta Etkisi                                   | 9    |
| 2.5. Kat Yer Değiştirmeleri                           | 15   |
| 2.6. Taban İzolasyonlu Yapılarda P-Delta Etkisi       | 18   |
| 2.7. Eleman Uzunluğu Boyunca P-Delta Etkisi           | 19   |
| <br>                                                  |      |
| 3. P-DELTA ETKİSİNİN YÖNETMELİKLERDEKİ YERİ           | 21   |
| 3.1. Amerika (UBC)                                    | 21   |
| 3.2. Amerika (AISC)                                   | 23   |
| 3.3. Arjantin                                         | 26   |
| 3.4. Avustralya                                       | 27   |
| 3.5. El Salvador                                      | 28   |
| 3.6. Fransa                                           | 28   |
| 3.7. Yunanistan                                       | 29   |
| 3.8. İsrail                                           | 31   |
| 3.9. Meksika                                          | 33   |
| 3.10. Yeni Zelanda                                    | 34   |
| 3.11. Porto Riko                                      | 35   |
| 3.12. Eurocode 8                                      | 37   |
| 3.13. Türkiye (ABYYHY ve TS500)                       | 38   |
| <br>                                                  |      |
| 4. P-DELTA ETKİSİ HESAP YÖNTEMLERİ                    | 44   |
| 4.1. İteratif P-Delta Analizi                         | 45   |
| 4.2. İteratif Ağırlık Yüğü Yöntemi                    | 49   |
| 4.3. Büyültme Katsayısı Yöntemi                       | 51   |
| 4.4. Direkt Yöntem                                    | 55   |
| 4.5. Negatif Rijitlikli Eleman Yöntemi                | 57   |
| 4.6. P-Delta Analizi Yapabilen Bilgisayar Yazılımları | 61   |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>5. P-DELTA ETKİLİ YAPI ANALİZİ</b> | <b>64</b> |
| <b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>        | <b>79</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                      | <b>82</b> |
| <b>EKLER</b>                          | <b>84</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                       | <b>90</b> |



**KISALTMALAR**

|               |                                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>UBC</b>    | : Uniform Building Code                                   |
| <b>AISC</b>   | : American Institute of Steel Construction                |
| <b>LRFD</b>   | : Load Resistance Factor Design                           |
| <b>ABYYHY</b> | : Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik |
| <b>TS500</b>  | : Türk Standartları Enstitüsü                             |



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 3.1.</b> Betonarme yapılar için yapı tepkisi düzeltme katsayısı .....                 | 30              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Çelik yapılar için yapı tepkisi düzeltme katsayısı .....                     | 30              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Yığma yapılar için yapı tepkisi düzeltme katsayısı .....                     | 30              |
| <b>Tablo 3.4.</b> Betonarme yapılar için azaltma katsayısı .....                               | 31              |
| <b>Tablo 3.5.</b> Çelik yapılar için azaltma katsayısı .....                                   | 31              |
| <b>Tablo 5.1.</b> P-Delta etkisi dahil edilmediği duruma ait deprem kuvveti.....               | 66              |
| <b>Tablo 5.2.</b> P-Delta etkisi dahil edildiği duruma ait deprem kuvveti.....                 | 66              |
| <b>Tablo 5.3.</b> P-Delta etkisi dahil edilmediği duruma ait kat deplasmanları.....            | 67              |
| <b>Tablo 5.4.</b> P-Delta etkisi hesaba dahil edildiği duruma ait kat deplasmanları..          | 67              |
| <b>Tablo 5.5.</b> P-Delta etkisi dahil edilmediği durum taban toplam momentleri...             | 68              |
| <b>Tablo 5.6.</b> P-Delta etkisi dahil edilmediği duruma ait perde toplam momentleri           | 69              |
| <b>Tablo 5.7.</b> P-Delta etkisi dahil edilen duruma ait taban toplam momentleri....           | 69              |
| <b>Tablo 5.8.</b> P-Delta etkisi dahil edilen duruma ait perde toplam momentleri....           | 70              |
| <b>Tablo 5.9.</b> Analiz sonuçları taban momenti özet tablosu.....                             | 71              |
| <b>Tablo 5.10</b> Analiz sonuçları perdelerine gelen toplam moment özet tablosu.....           | 71              |
| <b>Tablo 5.11</b> Kat kütlesi ve rijitlik merkezi değerleri .....                              | 77              |
| <b>Tablo 5.12</b> Analiz sonucu elde edilen stabilite indeksi değerleri .....                  | 78              |
| <b>Tablo A.1.</b> Lineer olan ve olmayan sistemler genel özet tablosu.....                     | 84              |
| <b>Tablo A.2.</b> P-Delta etkilerini içermeyen $\pm\%5$ X ve Y yönü yüklemeleri sonuçları..... | 85              |
| <b>Tablo A.3.</b> P-Delta etkilerini içeren $\pm\%5$ X ve Y yönü yüklemeleri sonuçları..       | 87              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                               | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1 : Yük parametresi – yer değiştirme ( $P^*-\delta$ ) bağıntıları .....               | 3               |
| Şekil 2.2 : Doğrusal elemana etkiyen kuvvetler.....                                           | 5               |
| Şekil 2.3 : Eksenel yük etkisindeki konsol kiriş.....                                         | 7               |
| Şekil 2.4 : Yapı üzerindeki P-Delta etkisi .....                                              | 10              |
| Şekil 2.5 : Kolondaki P-Delta Etkisi.....                                                     | 12              |
| Şekil 2.6 : Farklı sismik bölgelerdeki P-Delta etkisi.....                                    | 14              |
| Şekil 2.7 : MacRae tarafından önerilen yöntem.....                                            | 15              |
| Şekil 2.8 : Çerçeve de yan al yer değıştirme.....                                             | 17              |
| Şekil 2.9 : Eleman uzunluğu boyunca P-Delta etkisi.....                                       | 20              |
| Şekil 3.1 : P-Delta etkileri.....                                                             | 21              |
| Şekil 4.1 : Katlardaki ilave kesme kuvveti artışları.....                                     | 45              |
| Şekil 4.2 : Çerçeve deki kolon momentleri .....                                               | 46              |
| Şekil 4.3 : Kattaki P-Delta etkisinden oluş an eşdeğer kesme kuvvetleri.....                  | 48              |
| Şekil 4.4 : Birincil momentler ve P-Delta momentleri.....                                     | 48              |
| Şekil 4.5 : Şekil değıştirmiş geometriye uygulanan ağırlık yükleri ve ilave deplasmanlar..... | 49              |
| Şekil 4.6 : Şekil değıştirmiş fiktif kolona uygulanan ağırlık yükleri.....                    | 50              |
| Şekil 4.7 : Eğilme kolonu.....                                                                | 52              |
| Şekil 4.8 : Ağırlığı üniform yayılı konsol .....                                              | 53              |
| Şekil 4.9 : Fiktif kesme kolonu modeli .....                                                  | 59              |
| Şekil 4.10 : Fiktif eğilme kolonu modeli .....                                                | 60              |
| Şekil 4.11 : RISA- 3D P-Delta analizi.....                                                    | 62              |
| Şekil 5.1 : P-Delta analizi yapılacak yapıya ait ön görünüş.....                              | 64              |
| Şekil 5.2 : P-Delta analizi yapılacak yapıya ait normal kat kalıp planı.....                  | 65              |
| Şekil 5.3 : Yapının 9. katındaki röl atif yer değıştirme.....                                 | 72              |

## SEMBOL LİSTESİ

|                          |                                                                         |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $A_{si}$                 | : i katındaki fiktif kayma kolonu alanı                                 |
| $C_m$                    | : Burkulmada moment katsayısı                                           |
| $d_i$                    | : Binanın i'inci katında deprem yüklerine göre hesaplanan yerdeğiştirme |
| $E$                      | : Elastisite modülü                                                     |
| $E_c I_c$                | : Tüm beton kesitinin eğilme rijitliği                                  |
| $E_s I_s$                | : Boyuna donatı kesitinin oluşturduğu eğilme rijitliği                  |
| $F, B_1, B_2, \psi, a_d$ | : Büyültme faktörleri                                                   |
| $f_{ck}$                 | : Beton karakteristik basınç dayanımı                                   |
| $F_d$                    | : Tarım yük etkisi                                                      |
| $G$                      | : Kayma modülü                                                          |
| $h_i, l$                 | : Binanın i'inci katının kat yüksekliği                                 |
| $H$                      | : Yapının en üst kısmına etkiyen eşdeğer yatay kuvvet                   |
| $H'$                     | : Yatay yük artışları                                                   |
| $H_x$                    | : Yapının x katının yüksekliği                                          |
| $I$                      | : Eylemsizlik momenti                                                   |
| $I_i$                    | : i katına ait fiktif kolonun eğilme ataleti                            |
| $i$                      | : Eylemsizlik yarıçapı                                                  |
| $k$                      | : Kolon etkili boyu katsayısı                                           |
| $K$                      | : P-Delta etkilerinin dikkate alındığı durumdaki rijitlik               |
| $K_d$                    | : Deformasyon büyültme faktörü                                          |
| $K_e$                    | : Elastik rijitlik                                                      |
| $K_0$                    | : P-Delta etkilerinin dikkate alınmadığı durumdaki rijitlik             |
| $[K]$                    | : Birinci mertebe yanal rijitlik matrisi                                |
| $[K_s]$                  | : İkinci mertebe yanal rijitlik matrisi                                 |
| $[K_g]$                  | : Geometrik rijitlik matrisi                                            |
| $L$                      | : Kütle merkezi yüksekliği veya eleman uzunluğu                         |
| $l_k$                    | : Kolon etkili (burkulma) boyu                                          |
| $l_n$                    | : Mesnet yüzünden mesnet yüzüne ölçülen net açıklık                     |
| $M$                      | : Moment                                                                |
| $M_1, M_2$               | : Kolon uç momentleri (yük katsayılarıyla çarpılmış çözümlemede)        |
| $M_d$                    | : Tasarım eğilme momenti                                                |
| $M_p, M_s$               | : Birincil ve ikincil momentler                                         |
| $M_{max}$                | : Maksimum moment                                                       |
| $M_y^*$                  | : Akma momenti                                                          |
| $M_i^*$                  | : i katına ait P-Delta etkisini içeren sonuç momenti                    |
| $N_d$                    | : Tasarım eksenel kuvveti                                               |
| $N_i$                    | : Kat normal kuvveti                                                    |
| $N_k$                    | : Kolon burkulma yükü                                                   |
| $P$                      | : Yük parametresi veya eksenel kuvvet                                   |
| $P_{cr}$                 | : Kritik burkulma yükü                                                  |
| $P_{of}$                 | : Eğilme modundaki burkulma yükü                                        |

|                            |                                                                    |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $P_{os}$                   | : Kesme modundaki burkulma yükü                                    |
| $P_{L1}, P_{L2}$           | : Birinci ve ikinci mertebe limit yük                              |
| $P_x$                      | : x katı ve üzerindeki toplam sismik ağırlık                       |
| $P^*$                      | : Yük parametresi                                                  |
| $\Sigma P_u$               | : Kattaki tüm kolanlara gelen eksenel kuvvet toplamı               |
| $q$                        | : Yapı tepkisi düzeltme katsayısı                                  |
| $Q$                        | : Hareketli yük etkisi                                             |
| $R$                        | : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı                               |
| $R_m$                      | : Sünme oranı                                                      |
| $T$                        | : Çekme kuvveti                                                    |
| $V'$                       | : İkincil kesme kuvvetleri                                         |
| $V_i$                      | : i katına ait kat kesme kuvveti                                   |
| $V_{ia}$                   | : İlave kesme kuvveti                                              |
| $V_i, V_j$                 | : Doğrusal elemanın i ve j uçlarındaki yer değiştirmeler           |
| $\alpha_m$                 | : $\alpha_1, \alpha_2$ oranları ortalaması                         |
| $\alpha_1, \alpha_2$       | : Kolon ucu dönmesi engelleme katsayıları                          |
| $\beta$                    | : Kolon için moment büyütme katsayısı                              |
| $\beta_s$                  | : Kat kolonlarının tümü için moment büyütme katsayısı              |
| $\beta_i$                  | : Binanın i'inci katındaki P-Delta katsayısı                       |
| $\beta_{max}$              | : Tüm katlarda hesaplanan P-Delta katsayısı değerlerinin en büyüğü |
| $\delta$                   | : Yerdeğiştirme                                                    |
| $\delta_i^*$               | : P-Delta etkisini içeren sonuç kat ötelemesi                      |
| $\delta_{i1}, \delta_{i2}$ | : i katına ait ilave yer değiştirmeler                             |
| $\Delta$                   | : Yanal deplasman                                                  |
| $\Delta_{di,ort}$          | : Kat rölatif tasarım yer değiştirmesi                             |
| $\Delta_i$                 | : Binanın i'inci katındaki görelî kat ötelemesi                    |
| $\Delta_x$                 | : x katına ait görelî kat ötelemesi                                |
| $(\Delta_i)_{max}$         | : Binanın i'inci katındaki maksimum görelî kat ötelemesi           |
| $(\Delta_i)_{ort}$         | : Binanın i'inci katındaki ortalama görelî kat ötelemesi           |
| $\Delta_y^*$               | : Akma yer değiştirmesi                                            |
| $\Delta_i$                 | : P-Delta etkisini içeren sonuç deplasman                          |
| $\phi$                     | : Duraylılık (stabilite) göstergesi                                |
| $\Phi_i, \Phi_j$           | : Doğrusal elemanın i ve j ucundaki dönmeler                       |
| $\mu$                      | : Sünelik katsayısı                                                |
| $\Theta$                   | : Stabilite indeksi                                                |
| $\Theta_i$                 | : i'inci katta tanımlanan İkinci Mertebe Gösterge Değeri           |

## YAPILAR ÜZERİNDEKİ P-DELTA ETKİLERİ VE BU ETKİLERİN YÖNETMELİKLERDEKİ YERİ

### ÖZET

Bu çalışmanın ilk bölümünde P-Delta etkisi kavramı ve bu etkinin anlaşılmasını kolaylaştıracak kavramlar ele alınmıştır. Ayrıca P-Delta etkisinin yapının rijitliğine olan etkisinin yanında, eleman uzunluğu boyunca moment dağılımına ve akma uzunluğuna etkisi de incelenmiştir. Bunlara ilave olarak taban izolasyonlu yapılarda P-Delta etkisi incelenmiştir. Çalışmanın odak noktası, P-Delta etkisi kavramının anlaşılması, bu etkilerin hesaplamalarda nasıl dikkate alınması gerektiğinin belirlenmesi ve bu etkilerin yapıda meydana getireceği sonuçların görülmesidir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, P-Delta etkilerini, Amerikan yönetmeliklerinin (UBC ve AISC), ülkemiz yönetmeliğinin ve daha birçok yabancı ülke yönetmeliğinin nasıl dikkate aldığı incelenmiştir.

Bir sonraki aşamada, P-Delta etkilerini hesap etmek amaçlı kullanılan, İteratif P-Delta Analiz Yöntemi, İteratif Ağırlık Yüğü Yöntemi, Büyültme Katsayısı Yöntemi ve Negatif Rijitlikli Eleman Yöntemi incelenmiştir. Bu hesap yöntemlerine ilave olarak P-Delta etkilerini yapı analizine dahil edebilen bilgisayar yazılımlarına ve bu yazılımların hesap yaklaşımlarına genel bir bakış sunulmuştur. Daha sonra 17 katlı bir yapı STA4 CAD programı kullanılarak, sırasıyla P-Delta etkileri hesaba dahil edilen ve edilmeyen durumlar için analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara ilave olarak yapının dokuzuncu katına ait stabilite indeksi değeri incelenen yönetmeliklere göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Son bölümde ise P-Delta analiz yöntemlerinin karşılaştırılmasıyla elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışmaların değerlendirilmesinden açıkça görüleceği gibi P-Delta etkileri analizde dikkate alınmalıdır.

# **THE P- DELTA EFFECTS ON STRUCTURES AND THE PLACE OF THESE EFFECTS IN CODES**

## **SUMMARY**

In the first part of this study, the concept of P-Delta effect and the concepts that will make easier to understand this effect are considered. Also, the effect of P-Delta effects to stiffness of structure and how P-Delta effects may change moment distribution along the element length and their effect to yield length along element are examined. In addition to those, the P-Delta effects in base isolated structures are also examined. The focus of the study is to understand the concept of P-Delta effect, to determine how to regard these effects in calculations and to foresee the results that these effects will cause in structure.

In the second part of the study, how the codes of America (UBC and AISC), code of our country and codes of many other countries regard P-Delta effects are examined.

In the next part of the study, The Iterative P-Delta Analysis Method, The Iterative Gravity Load Method, The Amplification Factor Method and The Negative Property Member Method which are used to calculate P-Delta effects are examined. In addition to these calculation methods, a general review to the computer software programs that can include P-Delta effects over structure analysis and the calculation approaches of these softwares is presented.

Later, a seventeen stored structure is analyzed by using STA4 CAD program, first with including P-Delta effects and later for situations in which P-Delta effects are not included. Then the results of these two different analyses were compared. In addition to these results, the stability index value of the ninth floor of the structure has been calculated separately according to the examined codes.

Finally, in the last part of the study, the results that are obtained by comparing the analyzing methods are evaluated and some proposals are offered. As it becomes apparent by evaluation of these studies, P-Delta effects must be regarded in analysis.

## 1. GİRİŞ

Bir yapının analizinin tam ve doğru yapılabilmesi için yapıyı temsil edecek uygun bir modelin ve sistemin uygulanmış yüklere tepkisini yansıtacak uygun bir analiz yönteminin seçilmesi gerekir. Denge ve kinematik denklemlerinin yapının şekil değiştirmemiş geometrisi üzerinde kurulduğu birinci mertebe analizi , gerçekleştirilmesi basit bir analiz olmasına rağmen yapının deformasyonundan kaynaklanan ilave yükleri göz ardı ettiği için de eksik bir analizdir. Birçok yapının stabilite tasarımı bakımından, denge ve kinematik denklemlerini yapının şekil değiştirmiş geometrisi üzerinde kuran ikinci mertebe analizi yapılması gereklidir [1].

Yanal yükler yapıya etkidiğinde yapıda deformasyon meydana getirir ve bunun neticesinde yapıdaki düşey elemanların eksenleri eğimli hale gelir. Ağırlık yüklerinin bu elemanlara eksantrik etki etmesinden dolayı yapı yanal deplasmanı ve elemanlara etkileyen momentlerde artış meydana gelir. Yeterli rijitliğe sahip kısa ve orta yükseklikteki yapılarda P-Delta etkileri ihmal edilebilir. Fakat büyük yanal esnekliğe sahip narin ve yüksek yapıların yapılmaya başlamasıyla P-Delta etkileri daha önemli olmaya başlamıştır. Bu etkiler, özellikle büyük ağırlık yükleri etkisinde oldukça esnek teşkil edilmiş yapılarda, göz önüne alınmadığında yapıyı göçmeye kadar sürükleyebilir ve bu yüzden tüm yüksek yapıların tasarımında değerlendirilmelidir.

Çoğu deprem yönetmeliği ‘tasarım depremi’ne karşı gelen bir depremde, yapının bir miktar lineer olmayan şekil değiştirmeler yapmasına izin verir ve o yapının bazı hasarlar almasını baştan kabul eder. Fakat yönetmelik sınırlamalarının amacı şiddetli depremlerdeki hasar miktarını kontrol etmek ve hayat güvenliğini garantiye almaktır. Ülkemizdeki ve yaygın kullanılan çoğu deprem yönetmeliklerinde yapının tasarımı yapı matematik modelinin elastik analizine dayanır. Daha sonra bu sonuçlar beklenen elastik ötesi davranışlara ve yapı tarafından tüketilebilecek enerjiye karşı gelmesi düşünülen düzeltme katsayıları ile düzeltilir ve özel detaylandırma kuralları getirilir [2].

## 2. P-DELTA ETKİSİ VE İLGİLİ KAVRAMLAR

### 2.1 Birinci ve İkinci Mertebe Teorileri

Birinci mertebe teorisinde, sisteme etkiyen kuvvetlerin, sistemin şekil değiştirmemiş geometrisi üzerine etkidikleri varsayılır. Gittikçe daha yüksek mukavemetli malzemelerin kullanılması ve bunların elastisite modüllerinin aynı oranda yüksek olmaması sonucunda narinleşen yapıların şekil değiştirmeleri de daha büyük olmakta ve bu yüzden bazı sistemlerde meydana gelen tesirler, I. mertebe teorisine göre boyutlandırılan yapıların yıkılmasına sebep olacak değerlere kadar yükselebilmektedir. Kuvvetlerin sistemin şekil değiştirmiş geometrisi üzerine etkidiğinin kabul edildiği II. mertebe teorisinin uygulanamaması halinde , özellikle bazı sistemlerde, yapıların boyutlandırması tehlikeden çekinmek suretiyle ekonomik olmayan bir şekilde yapılmakta veya bu olayın önemi yeter derecede dikkate alınmadığından emniyetin azalmasına sebep olunmaktadır.

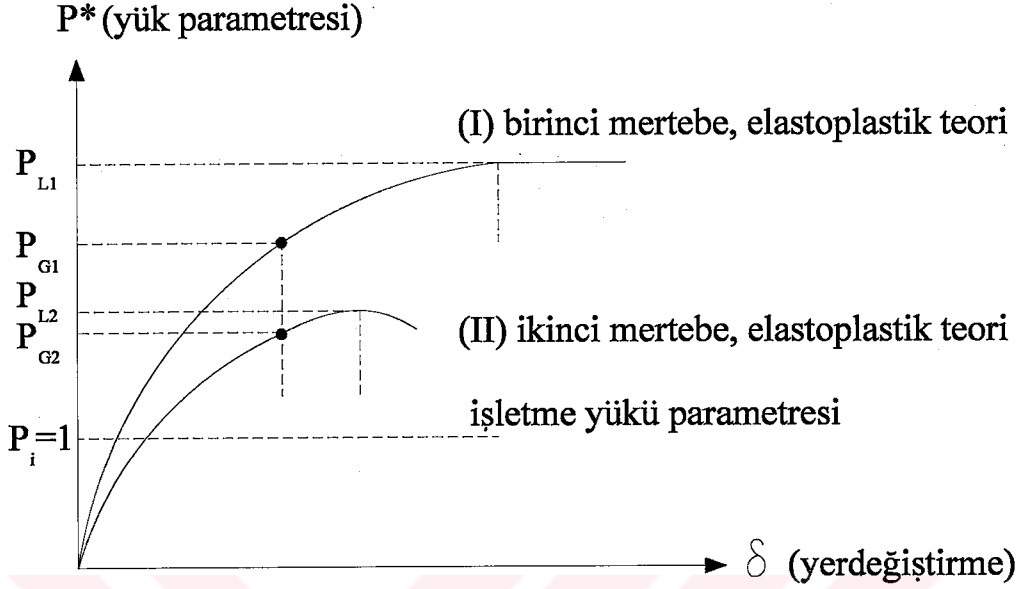
Bir yapı sisteminin dış yükler altındaki davranışının lineer olmaması genel olarak iki sebepten gelmektedir:

- a) malzemenin lineer-elastik olmaması nedeniyle iç kuvvet-şekil değiştirme bağıntılarının (bünye denklemleri) lineer olmaması
- b) geometri değişimlerinin etkisi nedeniyle denge denklemlerinin lineer olmamasıdır.

Malzemenin lineer olmayan davranışının göz önüne alındığı teoriye *elastoplastik teori*, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisinin göz önüne alındığı teoriye *ikinci mertebe teorisi*, lineerliği bozan her iki etkinin birlikte hesaba katıldığı teoriye ise *ikinci mertebe elastoplastik teori* denilmektedir. Lineer olan ve olmayan sistemleri genel özet tablosu halinde Ek1 de görebiliriz.

Lineer olmayan malzemedan yapılmış sistemlerde, artan dış yükler altında iç kuvvetler de artarak bazı kesitlerde lineer-elastik sınırı aşmakta ve bu kesitler dolaylarında plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu plastik şekil

değiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli kesitlerde toplandığı ve bunların dışındaki bölgelerde sistemin lineer-elastik davrandığı kabul edilebilir.



Şekil 2.1 Yük parametresi – yer değiştirme ( $P^*$ - $\delta$ ) bağıntıları

Plastik kesit kavramının geçerli olduğu varsayılan bir betonarme yapı sisteminin birinci merteye teorisine göre elastoplastik hesabı sonucu elde edilen yük parametresi-şekil değiştirme ( $P^*$ - $\delta$ ) bağıntısı şekil 2.1’de ( I ) eğrisi ile gösterilmiştir. Bu teoride oluşan plastik kesitler sebebiyle sistemin bir bölümü veya tümü mekanizma durumuna gelerek taşıma gücü sona ermektedir. Bu duruma karşı gelen yük parametresi *birinci merteye limit yük* ( $P_{L1}$ ) olarak tanımlanır.

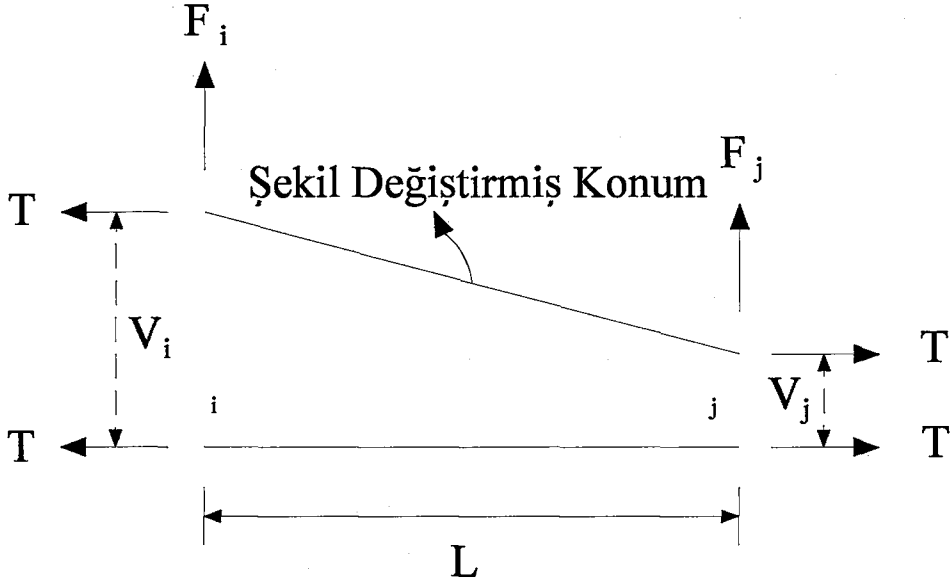
Lineerliği bozan her iki etkinin birlikte göz önüne alınması halinde, yani yapı sisteminin ikinci merteye elastoplastik teoriye göre hesabı ile elde edilen yük parametresi-şekil değiştirme ( $P^*$ - $\delta$ ) bağıntısı şekil 2.1’de ( II ) eğrisi ile gösterilmiştir. Görüldüğu gibi bu eğri başlangıçta ( I ) eğrisine teğet olmakta, daha sonra ikinci merteye etkileri ve bunlara bağlı olarak artan plastik şekil değiştirmeler nedeniyle yer değiştirmeler hızla artmaktadır. Yükler artarak bir  $P_{L2}$  sınır değerine eşit olunca, meydana gelen plastik kesitler nedeniyle rijitliği azalan sistemin burkulma yükü dış yük parametresinin altına düşer, diğer bir deyişle,  $P^*$ - $\delta$  diyagramında artan yer değiştirmelere azalan yük parametreleri karşılık gelir. Yapının stabilite yetersizliği nedeniyle taşıma gücünün yitirilmesine sebep olan bu yük parametresine *ikinci merteye limit yük* denilmektedir.

## 2.2 Geometrik Rijitlik

Geometrik rijitlik matrisinin kullanılması, tüm yapı sistemlerinin statik ve dinamik analizine ikinci mertebe etkileri dahil etmekte kullanılan genel bir yaklaşımdır. Her tip sonlu eleman için geometrik rijitlik matrisinin hesaplanması mümkündür. Elastik rijitlik matrisinin kurulmasında kullanılan biçim fonksiyonlarının aynısı geometrik rijitlik matrisinin hesabında da kullanılabilir [3].

Doğrusal bir eleman büyük çekme kuvveti etkisi altında iken yanal rijitliğinde artma meydana gelir. Fakat uzun bir eleman büyük basınç kuvvetine maruz ve burkulma sınırında ise yanal rijitliğinde önemli bir azalma olur ve küçük bir yanal yük bile çubuğun burkulmasına sebebiyet verebilir. Bu genel tip davranış yapının geometrik rijitliğindeki değişimden kaynaklanır. Bu rijitliğin yapısal elemanlara etkileyen yükün bir fonksiyonu olduğu ve pozitif veya negatif değerde olabileceği açıktır.

Herhangi bir doğrusal elemanın geometrik rijitlik eşitliklerini kurmak oldukça kolaydır. Şekil 2.2'deki gibi  $L$  uzunluğunda ve  $T$  çekme kuvveti etkisindeki yatay elemanı ele alalım. Elemanın şekilde görüldüğü gibi, uçlarda  $V_i$  ve  $V_j$  yer değiştirmeleri yaptığı durumda, elemanın şekil değiştirmiş konumunda dengenin sağlanması için ilave  $F_i$  ve  $F_j$  kuvvetleri geliştirilmelidir. Burada tüm kuvvet ve yer değiştirmelerin yukarı yönü pozitif seçilmiştir ve yer değiştirmenin elemana etkileyen çekme gerilmesini değiştirmedeği varsayımı yapılmıştır.



Şekil 2.2 Doğrusal elemana etkiyen kuvvetler

Şekil değiştirmiş konumda j noktasına göre moment alınırsa denge denklemi denklem (2.1)'deki gibi olur.

$$F_i = \frac{T}{L}(V_i - V_j) \quad (2.1)$$

ve düşeydeki dengeden dolayı,

$$F_i = -F_j \quad (2.2)$$

elde edilir. Denklem (2.1) ve denklem (2.2) birleştirilirse, yanal kuvvetler yanal deplasmanların yerine aşağıdaki matris formda elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F_j \end{bmatrix} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \text{ veya sembolik olarak } F_g = k_g V \quad (2.3)$$

Buradaki 2x2'lik geometrik rijitlik matrisi  $k_g$ , elemanın mekanik özelliklerinin fonksiyonu değil sadece elemana etkiyen kuvvet ile elemanın boyunun fonksiyonudur. Bu sebeple, elemanın fiziksel özelliklerine dayanan mekanik rijitlik matrisinden farklı bir isim alması için geometrik ya da gerilme rijitlik matrisi olarak tanımlanır. Geometrik rijitlik tüm yapılarda mevcuttur fakat yapısal sistemin mekanik rijitliğiyle karşılaştırıldığında büyük olduğunda önem kazanır.

Şekil değiştirmiş konumun uçlardaki  $\Phi_i$  ve  $\Phi_j$  dönmelerinin kübik fonksiyonu olduğu eğilme etkisindeki kiriş ele alındığında ilave  $M_i$  ve  $M_j$  momentleri geliştirilir. Kuvvet yer değiştirme bağıntısı denklem (2.4)'teki gibi verilebilir.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ M_i \\ F_j \\ M_j \end{bmatrix} = \frac{T}{30L} \begin{bmatrix} 36 & 3L & -36 & 3L \\ 3L & 4L^2 & -3L & -L^2 \\ -36 & -3L & 36 & -3L \\ 3L & -L^2 & -3L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \phi_i \\ v_j \\ \phi_j \end{bmatrix} \quad \text{yada } F_G = k_G v \quad (2.4)$$

Kayma deformasyonu yapmayan prizmatik kirişe ait elastik kuvvet deformasyon ilişkisi denklem (2.5)'teki gibidir.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ M_i \\ F_j \\ M_j \end{bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & -2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ -6L & -2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \phi_i \\ v_j \\ \phi_j \end{bmatrix} \quad \text{yada } F_E = k_E v \quad (2.5)$$

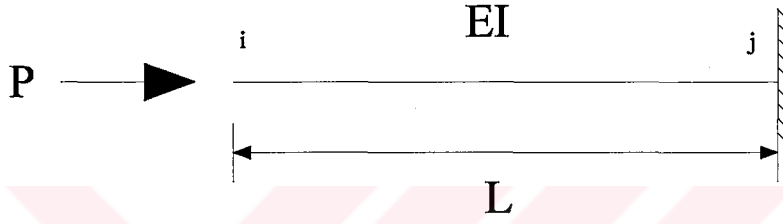
Böylece, kiriş elemanına etkiyen toplam kuvvetler denklem (2.6)'daki gibidir.

$$F_T = F_E + F_G = [k_E + k_G]v = k_T v \quad (2.6)$$

Elemandaki büyük eksenel kuvvetin sabit olması durumunda, rijitleşme veya yumuşama etkisini hesaplamak için yalnızca toplam rijitlik matrisini oluşturmak gereklidir [3].

### 2.3 Burkulma Analizi

Eksenel basınç kuvvetinin büyük olduğu durumlarda,  $T = -P$ , kirişe ait toplam rijitlik matrisi tekil olabilir. Bu stabilite sorununu şekil 2.3'deki j ucundaki deplasmanı sıfır olan kiriş üzerinde görebiliriz.



Şekil 2.3 Eksenel yük etkisindeki konsol kiriş

Denklem (2.6)'dan şekilde görülen kirişin matris formundaki denge denklemi denklem (2.7)'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} 12 + 36\lambda & 6L + 3L\lambda \\ 6L + 3L\lambda & 4L^2 + 4L^2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ \phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Burada,

$$\lambda = -\frac{PL^2}{30EI} \quad (2.8)$$

Bu özdeğer denklemi en küçük kök olan

$$\lambda_1 = -0.0858 \quad \text{veya} \quad P_{cr} = 2.57 \frac{EI}{L^2} \quad (2.9)$$

için çözülebilir. Konsol kiriş veya kolon için Euler burkulma yükü denklem (2.10)'daki gibidir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} = 2.47 \frac{EI}{L^2} \quad (2.10)$$

Buradan, denklem (2.9)'daki yaklaşık sonucun, denklem (2.10) ile elde edilen kesin sonuçtan yalnızca %5 farklı olduğu görülür. Denklem (2.3)'de verilen doğru şekilli yaklaşım kullanılırsa yaklaşık burkulma yükü ( $3.0 \frac{EI}{L^2}$ ) olarak elde edilir. Bu yine de uygun bir yaklaşımdır [3].

TS 500 kolon burkulma yükünün belirlenmesinde Euler denkleminden faydalanır ve ifadeyi denklem (2.11)'deki gibi verir.

$$N_k = \frac{\pi^2 (EI)}{l_k^2} \quad (2.11)$$

Yine TS 500'e göre kolon etkili eğilme rijitliği (EI), daha güvenilir bir hesap yapılamayan durumlarda, aşağıda verilen denklemlerden elde edilebilir.

$$(EI) = \frac{0.2E_c I_c + E_s I_s}{1 + R_m} \quad \text{veya} \quad (EI) = \frac{0.4E_c I_c}{1 + R_m} \quad (2.12)$$

Burada  $E_c I_c$  tüm beton kesitinin eğilme rijitliği,  $E_s I_s$  de boyuna donatı kesitinin, eleman kesiti ağırlık merkezine göre oluşturduğu eğilme rijitliğidir. Sünme oranı  $R_m$ , yanal ötelenmesi önlenmiş sistemlerde, düşey yüklerden elde edilen kolon hesap eksenel kuvvetindeki kalıcı yük katkısının, toplam değere oranıdır [4].

$$R_m = \frac{N_{gd}}{N_d} \quad (2.13)$$

Sünme oranı  $R_m$ , yanal ötelenmesi önlenmemiş sistemlerde ise, tüm kat kolonları hesap kesme kuvvetlerindeki ( $V_d$ ) kalıcı yük katkısı toplamının, hesap kesme kuvvetleri toplamına oranıdır [4].

$$R_m = \frac{\sum V_{gd}}{\sum V_d} \quad (\text{tüm katlar için}) \quad (2.14)$$

## 2.4 P-Delta Etkisi

Yapıların narinleşmesiyle düşey yüklerin ikinci mertebe etkisi artar. Birinci mertebe hesabında denge denklemleri yapının şekil değiştirmemiş geometrisini esas alır. Yatay yer değiştirmelerden ortaya çıkan, düşey normal yüklerin ek eğilme momenti oluşturması P-Delta etkisi olarak ifade edilebilir. Bu etkiler ikinci mertebe etkilerdir ve bazı durumlarda çok küçük mertebelerde olduğundan ihmal edilebilirler. Yüksek yapılarda, düşey yükü ve kat yer değiştirmesi büyük olan ve burulma etkisinin önemli olduğu yerlerde, kat yer değiştirmeleri daha da büyüyeceğinden ikinci mertebe etkileri dikkate alınmalıdır. Taşıyıcı olmayan elemanlarda hasarın sınırlandırılması ve ikinci mertebe etkilerin göz önüne alınması gereklidir [5].

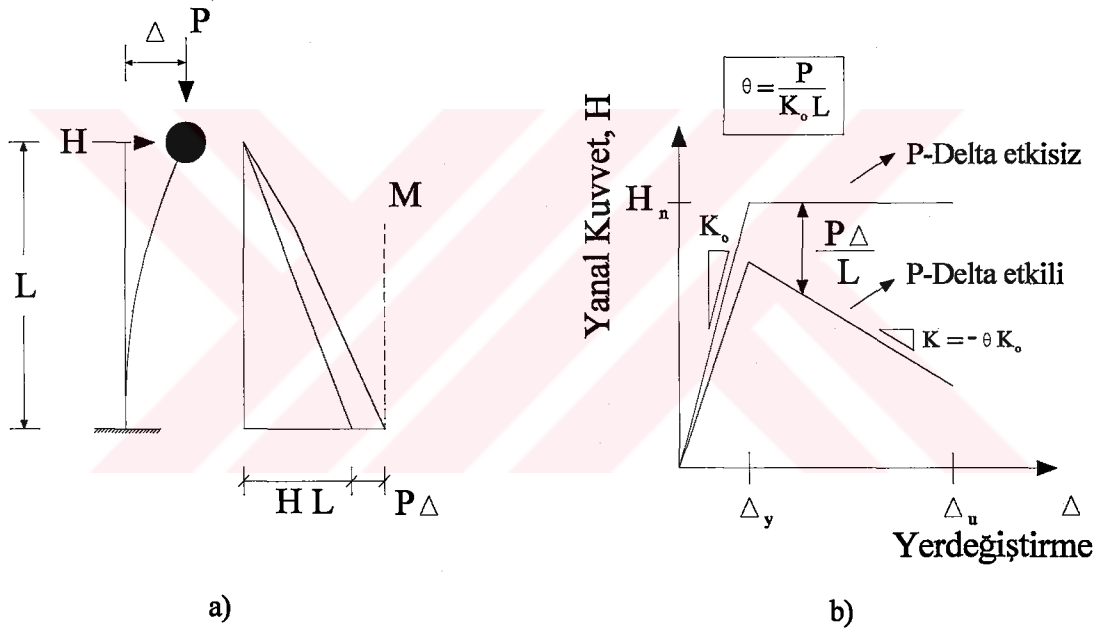
Betonarme yapılar genellikle çelik yapılara oranla daha rijit ve daha düşük yükseklikte teşkil edildiğinden, P-Delta etkileri çelik yapılarda daha baskındır. Ayrıca çelik berkitilmiş çerçevelerin elastik rijitliği, berkitilmemiş çelik çerçevelerden daha büyük olduğundan P-Delta etkileri öncelikli olarak berkitilmemiş çelik çerçevelerde ön plana çıkar [6].

P-Delta etkilerini içeren ve içermeyen iki analiz sonuçlarının karşılaştırılması P-Delta etkilerinin büyüklüğünü gösterir. İyi tasarlanmış yapılar genellikle iyi bir rijitlik/ağırlık oranına sahiptirler ve bu tip yapılarda P-Delta etkileri çok önemli seviyelere ulaşmaz. Eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler arasındaki fark %10 mertebesinde azdır. Fakat, yanal rijitliğine oranla büyük ağırlık yükü etkisindeki yapılarda P-Delta etkilerinin katılımı oldukça artar ve bazı durumlarda yer değiştirmeleri ve eleman kuvvetlerini %25 veya daha fazla oranlarda arttırabilir. Aşırı P-Delta etkileri çözümlemede stabilite yetersizliği ortaya çıkartabilir ve bu

davranış belirgin bir biçimde ilave rijitliğe ihtiyacı olan zayıf tasarlanmış yapıların göstergesidir [3].

P-Delta etkileri şekil 2.4a'da görüldüğü gibi yapı kütesinin ağırlığı  $P$  ile yapının  $\Delta$  yer değiştirmesinin kombinasyonundan meydana gelir ve yine aynı şekilde görülebileceği gibi bu etkiler, yapı tabanında  $P\Delta$  momenti meydana getirirler. Yapı tabanında meydana gelen toplam moment denklem (2.15)'teki gibidir. Burada,  $H$  yapının en üst kısmına etkiyen eşdeğer yatay kuvvet ve  $L$  ise kütle merkezinin yüksekliğidir [7].

$$M = HL + P\Delta \quad (2.15)$$



Şekil 2.4 Yapı üzerindeki P-Delta etkisi

Denklem (2.15) yeniden düzenlenirse denklem (2.16)'deki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} H &= \frac{(M - P\Delta)}{L} \\ &= \frac{M}{L} - \frac{P\Delta}{L} \end{aligned} \quad (2.16)$$

P-Delta etkilerini içeren H yanal atalet kuvveti, P-Delta etkisini içermeyen yanal atalet kuvveti,  $H_i (=M/L)$  ile denklem (2.17)'deki gibi ifade edilebilir.

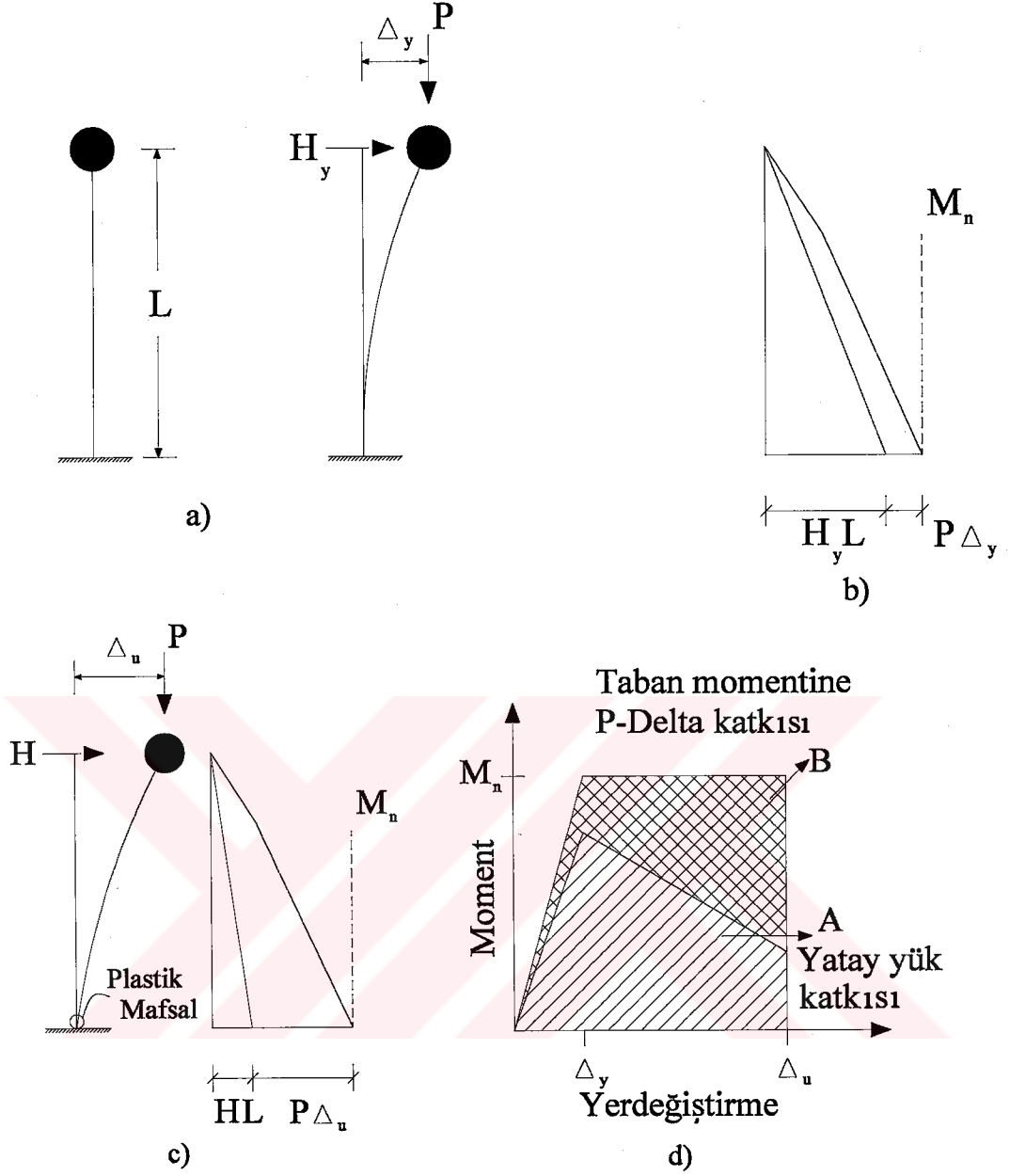
$$H = H_i - \frac{P\Delta}{L} \quad (2.17)$$

Şekil 2.4b'de görülebileceği gibi P-Delta etkileri mukavemetin azalmasına sebebiyet verdiği gibi aynı zamanda yanal kuvvet-deformasyon karakteristiklerinin de değişmesine yol açar. Başlangıç efektif rijitliği azalır ve akma sonrası rijitlik negatif olabilir.

P-Delta etkilerinin göz önünde bulundurulduğu herhangi bir K rijitliği, P-Delta etkilerinin dikkate alınmadığı durumdaki  $K_o$  rijitliği ve P/L oranı ile denklem (2.18)'de olduğu gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} K &= \frac{\partial H}{\partial \Delta} \\ &= \frac{\partial \left( H_i - \frac{P\Delta}{L} \right)}{\partial \Delta} = \frac{\partial H_i}{\partial \Delta} - \frac{\partial \left( \frac{P\Delta}{L} \right)}{\partial \Delta} = K_o - \frac{P}{L} \end{aligned} \quad (2.18)$$

P-Delta etkileri, birinci mertebe analizde dikkate alınmayan ikinci mertebe etkilerdir. Elastik durum şekil 2.5b'de ve deprem etkisi altında oluşabilecek inelastik durum, plastik mafsallı olmuş bir kolonda şekil 2.5c'de gösterilmiştir. Yanal yer değiştirme büyüdükçe yapı tabanında oluşacak P-Delta momentleri artacaktır ve akmanın oluşması için gerekli yatay yük azalacaktır. P-Delta etkileri yapının davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Bazı durumlarda maksimum yer değiştirmede artışa sebebiyet verir veya en uç bir durumda, bir doğrultuda meydana gelebilecek sürekli akmalar ile yapının devrilmesine sebebiyet verebilir. Bu sebeplerle P-Delta etkileri tasarımda mutlaka göz önüne alınmalıdır [7].



Şekil 2.5 Kolondaki P-Delta Etkisi

P-Delta etkilerinde oluşabilecek tehlikeler bilindiğinden, bununla ilgili birçok soru akla gelebilir. Bu sorulara örnek olarak, ‘P-Delta etkisi ne zaman ihmal edilebilir?’, ‘Yapının rijitliğinin arttırılmasıyla P-Delta etkilerinin ortadan kaldırılması sağlanabilir mi?’, ‘Yapının mukavemet ve rijitlik değerleri P-Delta etkilerini kontrol amaçlı kullanılabilir mi ve eğer kullanılabilirse ilave dayanım ve rijitlik hangi mertebede olmalıdır?’ ve ‘Deprem kayıtlarının olası bir P-Delta davranışına etkisi nedir?’ verilebilir. Bir çerçevedeki ikinci mertebe etkileri, çerçeveye tekabül eden P-Δ etkileriyle, çerçevedeki bireysel elemanlara tekabül eden

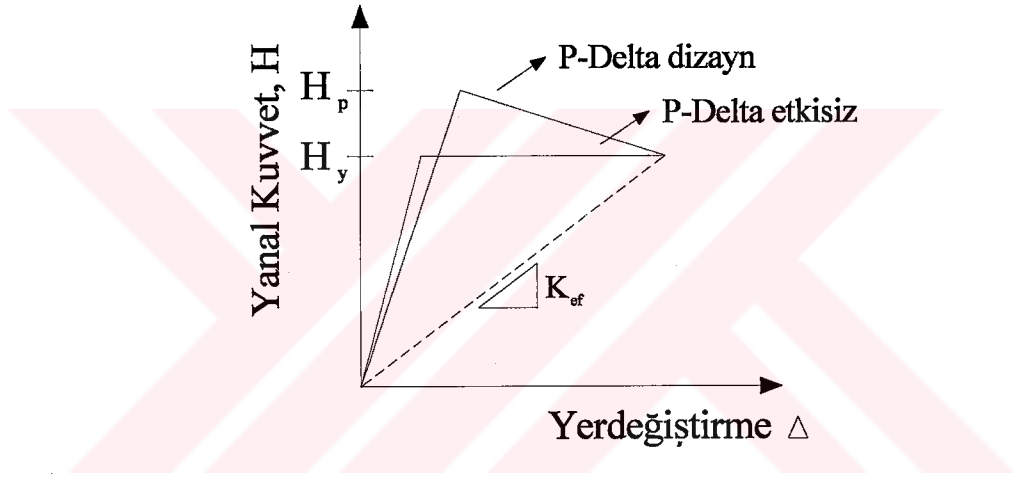
P-  $\delta$  etkilerinin bileşimiyle hesaplanır. Bunların her ikisi de çerçevenin şekil değiştirmesinde rol oynadığı için bileşimlerinin dikkate alınması önemlidir [1].

P-Delta etkilerinin hesaba katılması hususunda yönetmeliklerde çeşitli yaklaşımlar yer aldığı gibi bazı bilim adamları da yaptıkları çalışmalar sonucunda bazı değerlendirmelerde bulunmuştur. Bunlardan Andrews (1977)'in öne sürdüğü teoriye göre yapının yer değiştirmesi belirli limitler içerisinde kaldığında P-Delta etkileri ihmal edilebilir. Bu durum şekil 2.5d'de 'A' olarak gösterilen P-Delta etkilerinin analize dahil edildiği durumda yapıya ait histeresis eğrisinin altında kalan enerjinin, yine aynı şekilde 'A+B' olarak gösterilen P-Delta etkilerinin dahil edilmediği durumdaki histeresis eğrisinin altında kalan enerjinin %90'ı mertebesinde olduğu durumdur. Bu şekilde görülen  $\Delta_u$  deplasmanı, akma yer değiştirmesi olan  $\Delta_y$ 'nin 4 katıdır ve tasarım yer değiştirme limiti bu tanım üzerine dayanır. Bu yaklaşımdan yola çıkarak, düşük sismik aktiviteli bölgelerde katlar arası maksimum öteleme sınırının, yüksek sismik aktiviteye sahip bölgelerdekine oranla daha katı olması gerekir. Bölgenin sismik aktivitesinden bağımsız olarak her yapı için aynı olan bir minimum rijitlik sağlanmalıdır. Şekil 2.6'da maksimum katlar arası ötelemenin aynı varsayıldığı durumda bu etkiler görülmektedir. Aynı yanal deplasman  $\Delta$ 'yı elde edebilmek için, yüksek sismik aktiviteye sahip bir bölgede yapılacak yapının rijitliği  $K_1$ , düşük sismik aktiviteye sahip bölgede yapılacak olan aynı yapıya ait rijitlik değeri  $K_2$ 'den büyük olmalıdır. Bunun sebebi yüksek sismik aktiviteye sahip bölgedeki yanal kuvvet  $H_1$ 'in, düşük sismik aktiviteye sahip bölgedeki yanal kuvvet  $H_2$ 'den büyük olmasıdır. Eğer ağırlık yükleri eşit ise aynı yanal deplasman için, yapılar aynı P-Delta momentlerine sahip olacaktır. Tüm sismik bölgelerde yapılacak yapılar için P-Delta etkilerinden oluşan momentlerin toplam momentlere oranının aynı olmasını sağlamak için, yapı rijitliği tüm bölgelerde aynı olmasına rağmen düşük sismik aktiviteye sahip bölgedeki yapılara daha katı öteleme sınırları getirilmelidir [7,15].



Burada,  $P$  eksenel kuvvet,  $L$  eleman uzunluğu ve  $K_e$  elastik rijitliktir. Paulay (1978) P-Delta etkilerinin yaratacağı ilave etkileri telafi etmek için rijitliğin artırılmasındansa dayanımın artırılmasını önerir. [7,18].

MacRae ve diğ. (1990) efektif periyot ve efektif sönüm kavramlarına dayalı önerilerde bulunmuştur. Buna göre P-Delta etkisin hesaba katıldığı veya katılmadığı durumlardaki pik yer değiştirmeye tekabül eden yer değiştirmelerin aynı olması için mukavemetin artırılması gerekmektedir. Bu izahı şekil 2.7’de görebiliriz. Ayrıca yapılan çalışmalar P-Delta etkilerinin yüksek frekanslı yapılarda daha az etkili olduğunu göstermiştir [7,16].



Şekil 2.7 MacRae tarafından önerilen yöntem

## 2.5 Kat Yer değiştirmeleri

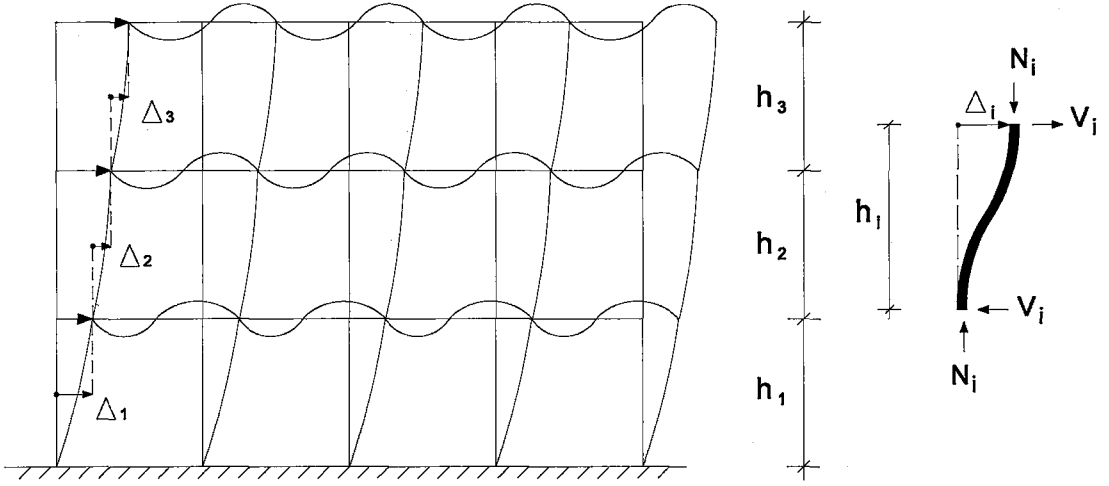
Deprem yükleri altındaki katlar arası yer değiştirmeler ve bunlardan oluşan kat toplam yatay yer değiştirmelerinin özellikle narin yapılarda hesap edilmesi taşıyıcı olmayan elemanda hasarın sınırlandırılması ve ikinci mertebe etkilerinin göz önüne alınması bakımından gereklidir. Katların birbirlerine göre olan yer değiştirmesi ayrıca deprem etkisindeki hasarla ilgili olduğu için sınırlandırılmaları yönetmeliklerde öngörülmüştür [8].

Depremlerde yapıların yıkılması göçmesi, kat arası rölatif deplasmanların büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Deprem yükleri kiriş kolonlar yerine deprem perdeleri ile karşılanırsa, perdelerin rijitliği nedeniyle katlar arası yanal deplasmanlar küçülür. Ayrıca yapının stabil kalması, mal ve can kaybının en alt düzeyde olması için de yanal ötelenmelerin sınırlı olması gerekir. Büyük yer değiştirmeler yapı taşıyıcı sisteminde ikinci mertebe tesirlerine neden olacaktır. Yapı, süneklik gereği elastik sınır dışında deformasyon yapacaktır. Şiddetli depremde büyük yer değiştirmeler olacaktır ve bunun neticesinde duvar, bölme, pencere gibi taşıyıcı olmayan elemanlarda büyük hasarlar oluşacaktır. Ayrıca kolon ve perdelerde çok yüksek derecedeki deplasmanlardan dolayı ikinci mertebe momentleri doğacaktır. Bu deplasmanların düşük değerde tutulması için, katlar arasındaki yer değiştirmeler sınırlandırılmalıdır. Yönetmeliğe göre doğrusal elastik analizle bulunan kat araları deplasmanın kat yüksekliğinin 0.0025'ini aşmamalıdır. Bu da taşıyıcı sistemi düzenli yapı için bir güvencedir [5].

Yatay yüklere karşı kolay yer değiştirebilen sistemlerde normal kuvvetlerin de büyük olması ikinci mertebe etkilerin birinci mertebe etkiler yanında önem kazanmasına sebep olur. Bu parametreleri içeren ve ikinci mertebe etkilerin birinci mertebe etkilere oranı olarak kabul edilebilecek  $\theta_i$ , *İkinci Mertebe Gösterge Değeri*

$$\theta_i = \frac{N_i \Delta_{i,ort}}{V_i h_i} \quad N_i = \sum_{j=1}^N W_j \quad (2.21)$$

her kat için hesap edilerek ikinci mertebe etkilerin seviyesi hakkında karar verilebilir. Bu ifadeler şekil 2.8'de görülebilmektedir. Burada;  $N_i$  kat normal kuvveti,  $V_i$  kat kesme kuvveti,  $h_i$  kat yüksekliği ve  $\Delta_{di,ort}$  kat rölatif tasarım yer değiştirmesidir. Bütün katlarda  $\theta_i$ 'nin 0.0475'den küçük olması durumunda ikinci mertebe etkilerinin ihmal edilebileceği, 0.0475 ile 0.12 arasında ise, ikinci mertebe etkilerin narin elemanlar için verilen, moment büyütme yöntemi gibi yöntemler kullanılarak göz önüne alınabilir. İkinci mertebe etkilerinin büyük olduğu  $\theta_i > 0.12$  durumunda ise, taşıyıcı sistemin rijitleştirilerek ikinci mertebe gösterge değerinin 0.12 değerinin altına düşürülmesi gerekir [8].



Şekil 2.8 Çerçeve yanal yer değiştirme

Elastik deprem yükleri altında taşıyıcı sistemde hesaplanan  $d_i$  kat yer değiştirmelerinden birbirine komşu iki katın yer değiştirmelerinin farkı olarak rölatif kat yer değiştirmesi şekil 2.8'deki gibi elde edilir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (2.22)$$

Deprem yükleri altında kesit etkilerinin karşılanması yanında ikinci mertebe etkilerinin artmamasını sağlamak ve hem de taşıyıcı olmayan elemanlardaki deprem hasarının önlenmesi amacıyla rölatif kat yer değiştirmelerinin sınırlı tutulması gerekir. Bu amaçla taşıyıcı sistemin yatay öteleme rijitliğinin

$$\frac{\Delta_i}{h_i} \leq \min(0.0035; 0.02 / R) \quad (2.23)$$

koşulunu sağlayacak şekilde düzenlenmesi öngörülmüştür.

Deprem sırasında meydana gelen yatay yer değiştirmeler bitişik yapıların birbirine çarpmasına ve ek etkilerin meydana gelmesine sebep olur. Bunlardan kaçınmak için binaların arasında farklı zemin oturmalarına bağlı temel öteleme ve dönmeleriyle sıcaklık değişimlerinin etkisi dışında, komşu binaların yatay yer değiştirmelerini hesaba katarak bir derz bırakılması gerekir [8].

Kat yer değiştirmelerinin hesabı, yapıda ikinci mertbe momentlerinin belirlenmesi ve stabilitenin kontrol edilmesi, taşıyıcı olmayan elemanlardaki hasar durumunun belirlenmesi, kullanımdaki rahatsızlığın tahmini yönünden önemlidir. Katlar arası rölatif yer değiştirmeler yanında, en üst katın toplam yer değiştirmesi ve bunların kat yüksekliklerine oranı da bu hesabın bir parçasıdır. Bu ifadeyi şekil 2.8’de görebiliriz.

$$\delta_i = \frac{(\Delta_i - \Delta_{i-1})}{h_i} \quad (2.24)$$

Meydana gelen deprem hasarının, oluşan yanal yer değiştirmelerle orantılı olduğu deprem sonrası yapılan incelemelerde belirlenmiştir. Tarif edilen yanal rölatif kat yer değiştirmesi oranıyla hasar arasındaki ilişki yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilir.

$\delta = 0.001$  taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar muhtemel

$\delta = 0.002$  taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar çok muhtemel

$\delta = 0.007$  taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar hemen hemen kesin, taşıyıcı elemanlarda muhtemel

$\delta = 0.015$  taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar kesin, taşıyıcı elemanlarda hasar çok muhtemeldir [8].

## 2.6 Taban İzolasyonlu Yapılarda P-Delta Etkisi

Kontrol teorileri elektrik-elektronik, makine ve uçak mühendisliği gibi birçok mühendislik alanlarında uzun yıllardan beri çok geniş ölçüde kullanılmaktadır ve bu teoriler, bilgisayar ve kontrol sistemlerinin gelişmesine paralel olarak 70’li yıllardan itibaren yapı mühendisliğinde de deprem, rüzgar gibi yüklerin etkisi altında bulunan yapı sistemlerinin kontrolünde kullanılmaya başlandı. Yapı sistemlerinin kontrolü, genelde sisteme ilave edilen elemanların, sisteme giren enerjiyi kendi bünyelerinde depolaması veya başka formlara dönüştürmesi veya sistemde hazır bekletilen enerjiyi kullanmaları ile yapılır. Sistemde hazır bekletilen enerjiyi kullanan sistemler aktif kontrol sistemleri diğerleri ise pasif kontrol sistemleri olarak isimlendirilir.

Günümüzde yapı malzemelerinin dayanımlarındaki gelişmeler oranında rijitliklerinde gelişme sağlanmadığından yapılar daha esnek olmakta ve bu nedenle P-Delta etkisi modern malzemeler ile yapılan yapılarda önem kazanmaktadır. Ayrıca dinamik etkiler, deprem, rüzgar ile depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan

taban izolasyonlarında yatay yer değiştirmeler büyük olduğunda P-Delta etkisi göz önüne alınması gereken bir husustur.

Taban izolasyonlu yapılarda yapının mekanik modellenmesi geometrik rijitlik matrisi kullanılarak yapılabilir. Geometrik rijitlik matrisi kavramı ile P-Delta etkisi sistemin elastik rijitlik matrisinin azaltılması ile sisteme dahil edilmektedir. Bu kavram ile sistem lineerleştirilmekte ve iterasyon yapılmadan P-Delta etkisi göz önüne alınmaktadır. Kolonlar üzerine gelen yükler Euler burkulma yükünden küçük olduğu zaman geometrik rijitlik matrisi ile yapılan lineerleştirme çok iyi sonuç vermektedir.

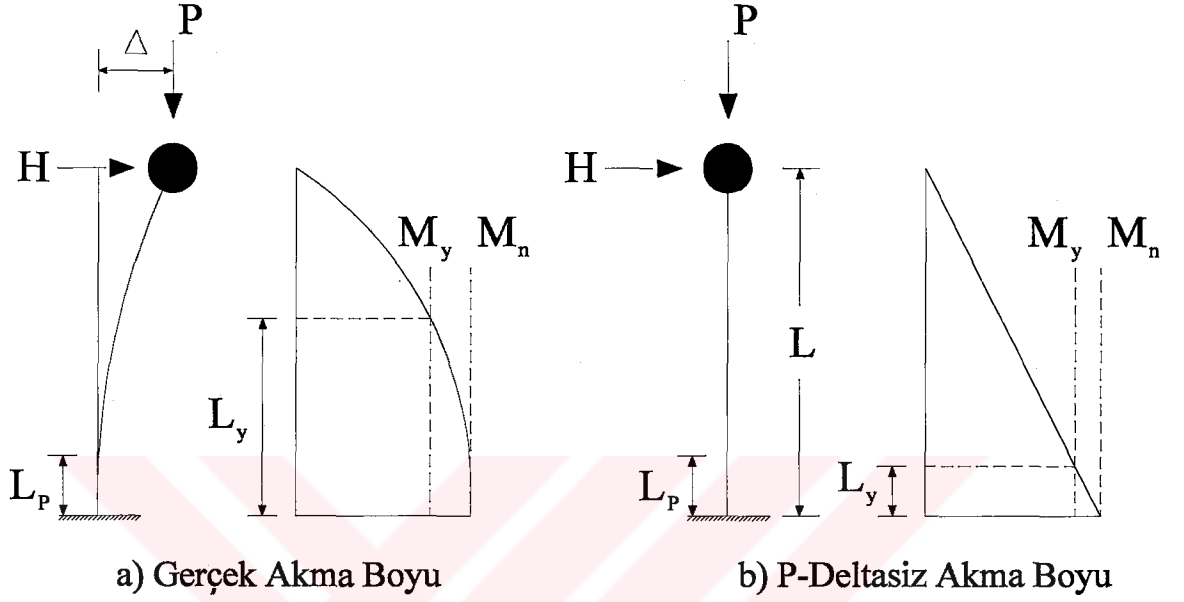
Çalışmalar, taban izolasyonlu sistemlerde P-Delta etkisi hesaba katıldığında, deprem etkisi altında, taban izolasyonunda büyük deplasmanlar oluşurken katlar arası rölatif deplasmanların büyük ölçüde azaldığını göstermiştir. Dolayısıyla taban izolasyonlu sistemlerde P-Delta etkisini ihmal etmek mümkün değildir. Taban izolasyonunda oluşan fazla deplasmanlar eklenecek pasif kütle sönümleyici ile kolaylıkla azaltılabilmektedir [9].

## **2.7 Eleman Uzunluğu Boyunca P-Delta Etkisi**

P-Delta etkileri eleman uzunluğu boyunca moment dağılımını değiştirebilmektedir. Bu durum, şekil 2.9'da görüldüğü gibi, P-Delta etkilerinin ihmal edildiği duruma göre akmanın, eleman üzerinde daha büyük uzunlukta meydana gelmesine sebebiyet verir. Bir eleman donatılırken elemanda oluşabilecek akma bölgesinde yeterli donatı kullanılmasına rağmen, P-Delta etkileri sebebiyle akmanın eleman boyunca daha uzun bir bölgede meydana gelmesi sebebiyle, ilk düşünölen duruma göre bir olumsuzluk ve dolayısıyla istenmeyen bir davranış meydana gelecektir [7].

Üzerinde sabit eksenel yüke sahip ve yanal yük etkisindeki bir elemana ait moment dağılımı şekil 2.9a'da görölmektedir. Toplam moment, yanal yükten oluşan moment ile deformasyon yapmış eleman üzerine etkiyen eksenel yükün sebep olduğu momentin toplamıdır. Burada ikinci olarak bahsedilen moment, eleman P-Delta etkisinden kaynaklanan momenttir. Yine aynı şekilden göröleceği üzere maksimum moment daima eleman ucunda oluşmaktadır. Akma moment  $M_y$  ve maksimum moment  $M_{max}$  dır. Akma, P-Delta etkileri ihmal edilen duruma göre eleman boyunca çok yüksek bir uzunlukta meydana gelecektir. P-Delta etkilerinin ihmal edildiği

durumdaki akma uzunluğu,  $L_y$  şekil 2.9b’de görülmektedir. Eğer elemanın esnekliği yüksek ise akma uzunluğu  $L_y$  daha büyük olacaktır fakat elemanın rijit olması durumunda ise moment diyagramı şekil 2.9b’deki gibi olacak ve akma uzunluğu daha düşük olacaktır.



Şekil 2.9 Eleman uzunluğu boyunca P-Delta etkisi

Akmanın elemanın üzerinde büyük uzunlukta meydana gelmesinin, deformasyonun bir bölgede yoğunlaşmaması açısından faydası vardır [7].

### 3. P-DELTA ETKİSİNİN YÖNETMELİKLERDEKİ YERİ

#### 3.1 Amerika ( UBC )

Amerika yönetmeliğine göre (Uniform Building Code) P-Delta etkilerinden oluşan ilave eleman kuvvetleri, momentleri ve kat deplasmanlarının yapının stabilitesi açısından aşağıda açıklanan koşullar dahilinde göz önünde tutulmalıdır. Yönetmeliğe göre, yapının herhangi bir katında, ikincil momentlerin birincil momentlere oranı 0.1'i geçerse veya 3. ve 4. sismik bölgelerde kat ötelenme oranı  $0.02/R$  değerini aşarsa, ikincil momentler tüm yapı analizine dahil edilmelidir. İkincil momentlerin birincil momentlere oranı stabilite katsayısı olarak nitelendirilir ve aşağıdaki gibidir.

$$\theta = \frac{M_s}{M_p} = \frac{P_x \Delta_x}{F_x H_x} \quad (3.1)$$

Burada,

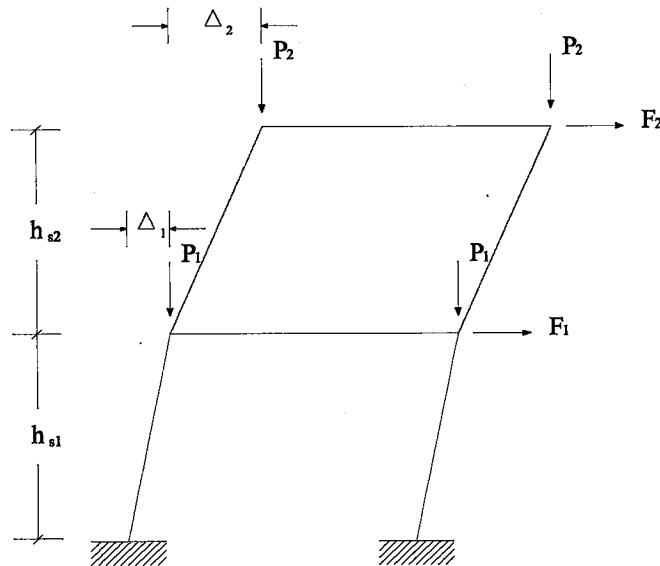
$M_p, M_s$  = birincil ve ikincil momentler

$P_x$  = x katı ve üzerindeki toplam sismik ağırlık

$\Delta_x$  = x katına ait göreceli kat ötelenmesi

$F_x$  = x katına ait kesme kuvveti

$H_x$  = x katının yüksekliği



Şekil 3.1 P-Delta etkileri

Herhangi bir kattaki ikincil momentler, kat üzerindeki toplam ölü yük, kat hareketli yükü ve kar yükünün toplamının o katın deplasmanı ile çarpılmasıyla elde edilir. Birincil momentler ise kattaki sismik kesme kuvveti ile o katın yüksekliğinin çarpılmasıyla elde edilir. Şekil 3.1’de görülen çerçevenin ikinci katına ait birincil moment;

$$M_{p2} = F_2 h_{s2}$$

yine bu kata ait ikincil moment,  $M_{s2} = 2P_2 \Delta_2$

ve bu kata ait stabilite katsayısı,  $\theta_2 = \frac{M_{p2}}{M_{s2}}$

Bu çerçevenin birinci katına ait birincil moment,  $M_{p1} = (F_1 + F_2) h_{s1}$

çerçevenin birinci katına ait ikincil moment,  $M_{s1} = 2(P_1 + P_2) \Delta_1$

ve stabilite katsayısı,  $\theta_1 = \frac{M_{p1}}{M_{s1}}$  dır.

Yönetmeliğe göre P-Delta etkisi denklem (3.2a)’da verilen büyültme faktörü ile elastik analize dahil edilebilir.

$$a_d = \frac{\theta}{\theta - 1} \quad (3.2a)$$

Her kata ait kesme kuvvetleri  $(1+a_d)$  katsayısı ile çarpılarak, yapıya ait eleman kuvvetleri ve yer değiştirmeler tekrar hesaplanır. Bu katsayı ile sağlanan her artış beraberinde kuvvet ve yer değiştirmelerde ilave bir artış meydana getirir ve bu denklem (3.2b)’deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} (1 + a_d) &= 1/(1 - \theta) \\ &= 1 + \theta + \theta^2 + \theta^3 + \dots \end{aligned} \quad (3.2b)$$

P-Delta etkileri, tasarım yükleri, akma noktası deplasmanları,  $\Delta_s$ ’ler kullanılarak hesaplanabilir. Bu deplasmanlar yapının eşdeğer yanal yük analizinden ve statikten gelen değerlerdir. Dinamik analiz yapıldığında elde edilen deplasmanlar elastik spektruma dayalı gerçek değerlerdir. Amerika yönetmeliği (UBC) statik tasarım

yükü yer değiştirmelerini hesaplarken düzenli yapılar için bu değerlerin azaltılabileceğini belirtir. Yönetmelikte yer alan spektrum kullanıldığı takdirde dinamik yer değiştirmeler, statik analizden elde edilen taban kesme kuvveti değerinin %90 ı alınarak hesaplanabilir. Bölgeye ait spesifik spektrum kullanılması durumunda dinamik yer değiştirmeler, statik analizden elde edilen taban kesme kuvveti değerinin %80 i alınarak hesaplanabilir. Bu azaltmalar, kuvvet ve yer değiştirmeleri eşit ölçüde değiştireceğinden ikincil momentlerin birincil momentlere oranı orijinal dinamik değerler ile azaltılmış dinamik değerler kullanılarak hesaplandığında aynıdır.

Yönetmelik, doğal periyodu 0.7 saniyeden küçük olan yapılarda, yanal ötelemeyi maksimum 0.025(kat yüksekliği) değeri olarak sınırlandırmıştır. Doğal periyodu 0.7 saniyeden büyük olan yapılar için ise maksimum 0.020(kat yüksekliği) değeri olarak daha kısıtlı bir sınırlama getirmiştir. Bu sınırlamalar, inelastik deformasyonu ve oluşması muhtemel stabilite sorunlarını kontrol altında tutacak minimum rijitliğin sağlandığından emin olmak amaçlıdır. Özellikle yüksek yapılarda, büyük yanal deplasman ve büyük düşey yükler etkisi altında ikinci mertebe etkiler önem kazanır ve beraberinde stabilite sorunları da çıkarabilir [10].

### 3.2 Amerika ( AISC )

Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (American Institute of Steel Construction-AISC), LRFD (Load Resistance Factor Design-1998) taslağında, çerçevelerin tasarımında P-Delta etkilerinin dikkate alınması gerektiğini belirtmiş ve uygulama için bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem elemanlardaki birinci mertebe momentlerinin büyültme faktörleri ile artırılması esasına dayanır. Bu yöntem tüm kolon ve kirişlerin birbirine dik olduğu ve kayıp elemanların bulunmadığı çerçevelere uygulanır. Yönteme göre tasarımda kullanılmak üzere, elemanların uç momentlerinin büyültme katsayılarıyla çarpılmasıyla denklem (3.3)'deki gibi  $M_u$  maksimum momenti hesaplanır.

$$M_u = B_1 M_m + B_2 M_{\text{tr}} \quad (3.3)$$

burada,  $M_{nt}$  çerçevenin yanal öteleme yapmadığı varsayıldığında elemanlardaki gerekli eğilme mukavemetidir.  $M_{lt}$  ise çerçevenin yanal ötelemesinden kaynaklanan eleman gerekli eğilme mukavemetidir.  $B_1$  ve  $B_2$  ikisi de birden büyük veya bire eşit olmak üzere hesaplanan ve sırasıyla  $M_{nt}$  ve  $M_{lt}$  ye uygulanan büyültme faktörleridir. (AISC LRFD,1998) Bu yöntemde de yapılan bazı kabuller vardır.

Varsayımlar,

- Davranış tamamen elastiktir.
- Tüm elemanlar sabit kesite sahiptir.
- Tüm düğüm noktaları rijittir.
- Berkitilmiş çerçevelerde tutucu kiriş uçlarında oluşan momentlerin büyüklükleri eşit ve zıt yönlüdür.
- Tüm kolonlarda rijitlik parametreleri  $L\sqrt{(P/EI)}$  'ya eşittir.
- Kattaki tüm kolonlar aynı anda burkulur.
- Çerçeve ana girişinde önemli eksenel basınç kuvveti oluşmaz.

İdealleştirilmiş duruma ait bu varsayımların gerçek yapılarda nadir olarak varolduğunu fark etmek önemlidir. Gerçek şartlar bu varsayımlardan uzaklaştıkça gerçekçi olmayan tasarımlar oluşabilir. LRFD, çerçeve tasarım sınırlandırmalarına cevap olarak, değişik durumları da göz önüne almak ve önceki varsayımların bir kısmının üstesinden gelmek için bazı geliştirmeler yapmıştır.

Denklem (3.3)'deki LRFD eşitliğinin birinci bölümü,  $B_1M_{nt}$ , çerçevelerdeki P-Delta etkileriyle (P-Δ) ilgilidir. Çerçevenin her bir üyesi için büyültme faktörü  $B_1$  denklem (3.4)'deki gibi hesaplanır.

$$B_1 = \frac{C_m}{\left(1 - \frac{P_u}{P_{el}}\right)} > 1.0 \quad (3.4)$$

Burada,  $P_u$  = eksenel kuvvettir ve  $C_m$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_m = 0.6 - 0.4 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \quad (|M_1| < |M_2|) \quad (3.5)$$

$$P_{e1} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (K=1) \text{ durumunda} \quad (3.6)$$

Diğer büyültme faktörü  $B_2$  denklem (3.7)'deki gibi hesaplanır.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \left( \frac{\sum P_u}{\sum P_{e2}} \right)} \quad (3.7)$$

Burada,  $\sum P_u$  = kattaki tüm kolanlara gelen eksenel kuvvet toplamıdır.

$$P_{e2} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (K>1) \text{ durumunda} \quad (3.8)$$

$M_{nt}$  ilk olarak ele alınır. Rüzgar yükünün çerçevenin sol tarafında etki ettiği modellendiğinden ilave kısıtlayıcılar (restraints) çerçevelerin yanal ötelenmesini sınırlandıran düğüm noktalarının üzerine yerleştirilir. Analizde bu düğüm noktalarının her birinde ilave bir tepki hesaplanır. Uygulanabilir tüm hareketli yükler, kar yükleri, ölü yükler ve rüzgar yükleri çerçeveye uygulanarak  $M_{nt}$  momentlerini elde etmek için çerçeveye birinci mertebe analizi uygulanır. Daha sonra  $M_{lt}$  yi ele almak için tüm ilave kısıtlayıcılar ve tüm çerçeve kuvvetleri kaldırılır. Kısıtlayıcılardan kaynaklanan kuvvete eşit ama onunla zıt yönde olan bir yanal kuvvet çerçeveye uygulanır. Bu durumda  $M_{lt}$  momentlerine ulaşmak için bir birinci mertebe analizi gerçekleştirilir. Çerçevenin yanal öteleme yaptığı ve yapmadığı durumlardaki momentler, kendi büyültme faktörleriyle denklem (3.3)'deki gibi büyültülerek birleştirilir.

Kirişlerdeki ikinci mertebe momentleri denklem (3.9)'a göre hesaplanır.

$$M_u = M_{nt} + M_{lt} + \Delta M_b \quad (3.9a)$$

$$\Delta M_b = DF \sum \Delta M_c \quad (3.9b)$$

Burada,  $DF$  = ilave kolonların rijitliğine ve uzunluğuna bağlı dağıtma faktörü  
 $\Delta M_c$  = ilave kolondaki moment =  $(B_2-1)M_{lt}$  dir [1].

### 3.3 Arjantin

Arjantin yönetmeliğine (INPRES-CIRCOS 103-1991) göre şekil değiştirmiş bir yapıda, ağırlık yüklerinin sebep olduğu ilave deformasyon etkilerinin (P-Delta etkilerinin) denklem (3.10)'da belirtilen koşul sağlandığı takdirde mutlaka hesaba dahil edilmesi gerektiğini belirtir.

$$\beta_i = \frac{P_i \Delta_i}{V_i H_i} \geq 0.08 \quad (3.10)$$

Burada,

$\beta_i$  = i katına ait P-Delta katsayısı

$\Delta_i$  = i katına ait yanal öteleme,

$V_i$  = i katına ait sismik kesme kuvveti

$H_i$  = i katının yüksekliği

$P_i$  = i katındaki ve üzerindeki katlardaki toplam sismik ağırlıktır.

Yönetmeliğe göre, P-Delta etkilerini hesapta göz önüne almakta yaklaşık bir yöntem, sismik hareket sonucu oluşan hesaplanmış kuvvet ve yer değiştirmelerin aşağıda verilen büyültme katsayısı ile büyültülmesidir.

$$\psi = \frac{1}{1 - \beta_{\max}} \quad (3.11)$$

Burada,

$\beta_{\max}$  = Yapının tüm katlarında, denklem (3.10) ile hesaplanan P-Delta katsayısı değerlerinin en büyüğüdür [11].

Yönetmelikte deformasyonlar için açıklamalar yer almaktadır. Sismik yüklere maruz yapılarda deformasyon analizi aşağıdaki problemlerle bağlantılıdır.

- Yapısal olmayan elemanlarda hasar
- Stabilite ve dayanım problemleri
- Bitişik yapıların birbirlerine vurması

Bu potansiyel problemlerin önlenmesi için aşağıdaki parametreler mutlaka kontrol altına alınmalıdır.

- Kat ötelemeleri
- P-Delta etkileri
- Bitişik binalar arasındaki ayırma (derz) mesafeleri

### 3.4 Avustralya

Avustralya yönetmeliği (Australian Standart 1170.4 - 1993) P-Delta etkilerini, kat ötelemelerinin denklem (3.12)'de verilen katsayı ile arttırılmasını sağlayarak hesaba katar.

$$\frac{0.9}{1-m} \geq 1.0 \quad (3.12)$$

Burada,

m = stabilite katsayısıdır ve izleyen şekilde hesaplanır :

$$m = \frac{P_x \Delta_x}{V_x h_{sx} K_d} \quad (3.13)$$

Burada,

$P_x$  = x katındaki toplam düşey tasarım yükü

$\Delta_x$  = tasarım kat ötelemesi

$V_x$  = x katındaki sismik yatay kesme kuvveti

$h_{sx}$  = x katının yüksekliği

$K_d$  = yönetmelikte değişik yapı tiplerine bağlı olarak, değeri 1.25~6.5 arasında değişen deformasyon büyültme faktörüdür.

Yönetmelik  $m < 0.1$  olması durumunda P-Delta etkilerinin ihmal edilebileceğini,  $m \geq 0.1$  olması durumunda ise kat ötelemelerindeki artışa ilave olarak, P-Delta etkileri göz önüne alınmadan hesaplanan kat kesme ve devrilme momentlerinin değiştirilmesi gerektiğini belirtir [11].

### 3.5 El Salvador

El Salvador yönetmeliği (Reglamento de Diseno Sismico de El Salvador), ikinci mertebe etkiler için bir stabilite katsayısı tanımlar ve bu katsayının 0.1'e eşit veya küçük olduğu durumlarda, kat kesme kuvvetleri, devrilme momenti ve kat ötelemeleri üzerindeki P-Delta etkisinin ihmal edilebileceğini belirtir. Herhangi bir x katına ait stabilite katsayısı  $\theta_x$  denklem (3.14)'deki gibi hesaplanır.

$$\theta_x = \frac{P_x \Delta_x}{C_d V_x h_{sx}} \quad (3.14)$$

Burada,

$P_x$  = x katındaki ve üzerinde bulunan toplam ağırlık

$\Delta_x$  = x katı için tasarım kat deplasmanı

$V_x$  = x katına ait kat kesme kuvveti

$h_{sx}$  = x katının yüksekliği

Yönetmelik, yapının herhangi bir katına ait stabilite katsayısı  $\theta_x$  değerinin 0.1'den büyük olduğu durumda P-Delta etkilerinin hesaba katılması gerektiğini belirtir. P-Delta etkileri göz önüne alınmadan hesaplanan kat kesme kuvvetleri ve momentlerine, kat deplasmanlarının artışının sebep olduğu kesme kuvvetleri ve momentlerin eklenmesi gerektiğini belirtir [11].

### 3.6 Fransa

Fransa yönetmeliği (Association Francaise du Genie Parasismique- AFPS-90), P-Delta etkilerini, yapı kolonları ve diğer elemanlarının yanal yer değiştirmesiyle üzerlerindeki düşey yükün yaratmış olduğu ilave momentler olarak nitelendirir. Yönetmeliğe göre, bu etkilerin sebep olduğu kuvvet, yer değiştirme ve kat ötelemelerinin aşağıda (3.15) denkleminde tanımlanan  $\theta$  değerinin 0.05'i aştığı durumlarda hesaba katılması gerekir [11].

$$\theta = \frac{\Delta_r P_r}{h_r F_r} \quad (3.15)$$

Burada,

$P_r$  = r katı ve üzerindeki toplam sismik ağırlık

$\Delta_r$  = r katının rölatif yanal ötelemesi

$F_r$  = r katındaki kat kesme kuvveti

$h_r$  = r katının yüksekliğidir.

### 3.7 Yunanistan

Yunanistan yönetmeliği (Greek Seismic Code-1992), P-Delta etkilerine ilave koşullar eklemiştir. Yönetmelik, sismik kuvvetlerin yapıya birbirine dik iki yönde etki ettiklerinin düşünülebileceğini belirtmiştir. Fakat yönetmelik bir yönde etkiyen sismik kuvvetlerin, aynı elemanlar için sismik kuvvetlerin düşey bileşeninden dolayı %30 mertebesinde arttırılması gerektiğini belirtmiştir.

P-Delta etkileri aşağıda denklem (3.16)'da belirtilen ve yapının her katı için hesaplanan  $\theta_i$  parametresine bağlı olarak değerlendirir.

$$\theta_i = \frac{N_i q \Delta_i}{V_i L_i} \quad (3.16)$$

Burada,

$\Delta_i$  = yukarıda belirtilen arttırılmış yükler göz önüne alınarak hesaplanan i katına ait kat ötelemesi

$N_i$  = arttırılmış yükler göz önüne alınarak elde edilen i katına ait toplam eksenel yük

$V_i$  = arttırılmış yükler göz önüne alınarak elde edilen i katına ait toplam kesme kuvveti

$L_i$  = kat yüksekliği

q = yapı tipine bağlı olarak aşağıda tablo 3.1, 3.2 ve 3.3'de verilen, yapı tepkisi (kuvvet, moment, yer değiştirme) düzeltme katsayısıdır.

Tablo 3.1 Betonarme yapılar için yapı tepkisi düzeltme katsayısı

| Taşıyıcı Sistem              | q   |
|------------------------------|-----|
| Çerçeve veya Perde+Çerçevesi | 3.5 |
| Yalnız perde                 | 3.0 |

Tablo 3.2 Çelik yapılar için yapı tepkisi düzeltme katsayısı

| Yapı Taşıyıcı Sistemi            | q   |
|----------------------------------|-----|
| Diyagonal güçlendirilmiş çerçeve | 3.0 |
| V tipi güçlendirilmiş çerçeve    | 1.5 |
| K tipi güçlendirilmiş çerçeve    | 1.0 |
| Güçlendirilmemiş çerçeve         | 4.0 |
| Dışmerkez güçlendirilmiş çerçeve | 4.0 |

Tablo 3.3 Yığma yapılar için yapı tepkisi düzeltme katsayısı

| Taşıyıcı Sistem                        | q   |
|----------------------------------------|-----|
| Sürekli betonarme yatay hatlı          | 3.5 |
| Sürekli betonarme düşey ve yatay hatlı | 3.0 |

Yönetmeliğe göre,  $\theta_i$  parametresinin yapının hiçbir katında 0.3 değerinden büyük olmasına izin verilmez. Eğer bu değer yapının herhangi bir katında dahi aşılsa, bu değer 0.3'ün altına düşmesi için yapısal sistemde rijitliği artırıcı düzeltmeler yapılmalıdır.  $\theta_i$  parametresinin diğer değerlendirmeleri şöyledir;

$\theta_i \leq 0.1$  olması durumunda, ikinci mertebe etkiler tüm katlarda ihmal edilebilir.

$0.1 < \theta_i \leq 0.2$  olması durumunda, ikinci mertebe etkiler yaklaşık olarak, hesaplanmış moment, kuvvet ve yer değiştirme değerlerinin  $1/(1-\theta_i)$  katsayısı ile artırılmalarıyla hesaba katılabilir.

$0.2 < \theta_i \leq 0.3$  olması durumunda, ikinci mertebe etkiler  $1/(1-\theta_i)$  katsayısı ile bulunan yaklaşık değerlerden mutlak suretle daha kesin bir biçimde hesaplanarak hesaba katılmalıdır [11].

### 3.8 İsrail

İsrail yönetmeliği (İsrail Standart IC 413 – 1994), eşdeğer statik yatay yük yönteminde P-Delta analizini denklem (3.17)'de verilen  $\theta_i$  katsayısının 0.1'i aşması durumunda gerekli kılar.

$$\theta_i = \frac{W\Delta_{el,i}K}{V_i h_i} \quad (3.17)$$

Burada,

$W$  = i katı ve üzerindeki katlarda bulunan toplam düşey yük

$\Delta_{el,i}$  = i katında hesaplanmış maksimum görelî kat ötelemesi

$K$  = yapı sistemine bağılı tablo 3.4 ve 3.5'de verilen azaltma katsayısı

$V_i$  = i katına ait toplam kat kesme kuvvetidir.

Yönetmeliğe göre  $\theta_i$  her kat için hesaplanır ve bu değerin 0.2'den büyük olmasına izin verilmez.

Tablo 3.4 Betonarme yapılar için azaltma katsayısı

| Taşıyıcı Sistem            | Düktillik Seviyesi |      |        |
|----------------------------|--------------------|------|--------|
|                            | Düşük              | Orta | Yüksek |
| Moment taşıyıcı çerçeveler | 4                  | 5.5  | 7      |
| Güçlendirilmiş çerçeveler  | 3.5                | 4.5  | 6      |
| Perde duvarlı sistemler    | 4                  | 5.5  | 7      |

Tablo 3.5 Çelik yapılar için azaltma katsayısı

| Taşıyıcı Sistem           | K |
|---------------------------|---|
| Düktil uzay çerçeveler    | 8 |
| Güçlendirilmiş çerçeveler | 4 |

Yönetmelik maksimum katlar arası ötelemeye de ( $\Delta_{i,lim}$ ) sınırlama getirmiştir. Bu sınırlama doğal periyodu  $T \leq 0.7$  saniye olan yapılarda denklem (3.18)'deki gibidir.

$$\Delta_{i,\lim} = \min\left(\frac{h_i}{40K}; \frac{h_i}{200}\right) \quad (3.18)$$

doğal periyodu  $T > 0.7$  saniye olan yapılarda denklem (3.19)'daki gibidir.

$$\Delta_{i,\lim} = \min\left(\frac{0.75h_i}{40K}; \frac{h_i}{250}\right) \quad (3.19)$$

Bu ifadede  $h_i$  yapının yerden  $i$ . kat seviyesine olan mesafesidir.

Ayrıca her bir doğrultuda beklenen gerçek yer değiştirme  $\delta_{i,\max}$  denklem (3.20)'de olduğu gibi ifade edilmiştir.

$$\delta_{i,\max} = \pm K \sum_{i=0}^i \Delta_i \quad (3.20)$$

Burada,

$\Delta_i$  = lineer elastik analiz sonucu hesaplanmış katlar arası yer değiştirmedir. Bu maksimum yapı yanal ötelemesi  $\delta_{i,\max}$  bitişik yapıların birbirine vurmasını önlemek amacıyla yapılacak boşluğu (derz) belirlemek amaçla hesaplanır.

Yönetmelik, modal analizde P-Delta etkilerini, eşdeğer statik yatay yük yöntemindekine benzer şekilde denklem (3.21)'deki gibi hesaba katar.

$$\theta_i = \frac{WK\Delta_{el,i}}{h_i V_i} \quad (3.21)$$

Burada,

$$\Delta_{el,i} = \sqrt{\sum_{m=1}^N (\Delta_{el,im})^2} \quad (3.22)$$

$$V_i = \sqrt{\sum_{m=1}^N (V_{im})^2} \quad (3.23)$$

Burada,

$V_{im}$  = i katındaki modal kesme kuvveti

$\Delta_{el,im}$  = i kat seviyesindeki modal kat deplasmanı

$h_i$  = i katının yüksekliği

K = tablo 3.4 ve 3.5’de verilen azaltma katsayısıdır [11].

### 3.9 Meksika

Meksika yönetmeliği (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal – 1993), P-Delta etkilerinin yapı elemanlarında oluşan ilave kesme kuvvetleri ve ilave eğilme momentleri şeklinde düşünülmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu etkilerin yanal öteleme yapmış yapı üzerindeki düşey yüklerden meydana geldiğini ve yapının herhangi bir katındaki yanal deplasmanın denklem (3.24)’deki ifadenin aşıldığı durumlarda ortaya çıktığını belirtmiştir.

$$\frac{0.08V}{W} \quad (3.24)$$

Burada,

V = göz önüne alınan kattaki hesaplanmış kat kesme kuvveti

W = yapının göz önüne alınan katı üzerinde kalan kısmının ağırlığıdır.

Yönetmelik, ardışık iki kat arasındaki rölatif yer değiştirmelerin de bu katlar arasındaki yüksekliğin 0.006 katından büyük olmaması gerektiğini belirtmiştir. Burada, kattaki bölme duvarları gibi yapısal olmayan kırılgen elemanların, yapı taşıyıcı sisteminden yeterli derecede ayrı teşkil edildiği durumlarda bu sınır 0.012 olarak alınabilir [11].

### 3.10 Yeni Zelanda

Yeni Zelanda yönetmeliğine (New Zealand Standart NZS 4203 – 1992) göre aşağıda belirtilen şartların herhangi birisinin sağlanmadığı durumlarda P-Delta etkileri analiz edilmelidir.

- Yapı doğal periyodu  $T < 0.4$  saniye
- Yapı yüksekliği  $H < 15$  metre ve  $T < 0.8$  saniye
- Yapısal düktilite faktörü  $\mu < 1.5$
- Katlar arası deplasmanın katlar arası yüksekliğe oranı denklem (3.25)'de verilen değeri aşmamalıdır.

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} \leq \frac{V_i}{7.5 \sum_{j=i}^N W_j} \quad (3.25)$$

Burada,

$u_i$  = kabul edilen düktilite faktörüne göre,  $i$  katına ait yatay yer değiştirme

$u_{i-1}$  = kabul edilen düktilite faktörüne göre,  $i-1$  katına ait yatay yer değiştirme

$V_i$  = tasarım kat kesme kuvveti

$W_i$  =  $i$  katına ait sismik ağırlıktır.

(3.25) denklemi, daha düşük yatay yük yaşama kapasitesine sahip yapıların, ilave P-Delta momentlerine karşı daha zayıf olduklarını göstermektedir. Esneklik ve düktilite gereksinimi arttıkça ve şiddetli sismik etkinin süresi uzadıkça P-Delta etkileri artarak kritik düzeylere gelmeye başlar. (3.25) denkleminin sağlanmadığı durumlarda ilgili katlarda P-Delta momentleri gereksinimini karşılayacak biçimde, kesme kuvveti kapasitesini artırıcı çözümler yapılmalıdır. Bu çözümlemede yapı yüksekliği boyunca, yapının elastik olmayan yer değiştirme profiliyle ilgili olarak gerçekçi varsayımlar yapılmalıdır. Yönetmeliğin P-Delta etkileriyle ilgili bu şartlarının sağlanması amacıyla bir teknik önerilmektedir (Fenwick ve Davidson 1991) [11].

### 3.11 Porto Riko

Porto Riko yönetmeliği (Puerto Ricon Seismic Code-Enmiendas Adoptadas al Reglamento de Edification-1987), P-Delta analizinin gerekli olup olmadığının tayini için bir stabilite katsayısının hesaplanması gerektiğini belirtir. Yönetmelikte denklem (3.26)'e göre hesaplanacak olan stabilite katsayısının değerinin 0.1'den küçük olduğu durumlarda P-Delta etkilerinin yapıya ait deplasman ve kuvvetler üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu belirtilmiştir. Bu katsayı P-Delta momentlerinin yatay yüklerden oluşan kat momentlerine oranıdır.

$$\theta_x = \frac{P_x \Delta}{V_x H_x} \quad (3.26)$$

Burada,

$P_x$  = göz önüne alınan kat üzerindeki toplam ağırlıktır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_x = \sum_{i=x}^n W_i \quad (3.27)$$

$\Delta$  = göz önüne alınan kattaki, lineer teoriye göre hesaplanmış rölatif kat ötelemesi

$V_x$  = x ve x-1 kat seviyeleri arasındaki kat kesme kuvveti

$H_x$  = x katının yüksekliğidir.

Stabilite katsayısı değerinin 0.1'den büyük olduğu durumlarda, P-Delta etkilerinden dolayı bir büyültme katsayısı denklem (3.28)'e göre hesaplanır.

$$a_d = \frac{1}{1 - \theta} \quad (3.28)$$

P-Delta etkilerini içeren kat ötelemesi ve kat kesme kuvvetlerini elde etmek için, tasarım kat ötelemesi ve tasarım kat kesme kuvvetlerinin  $(1+a_d)$  faktörü ile çarpılması gerekir.

Kat ötelemesi, söz konusu katın zemin kısmı ile üst kısmının arasındaki farktır. Yönetmelik toplam elastik ötelemenin hesabı için, elastik deplasmanların  $(1/K)$  katsayısı ile büyütülmesi gerektiğini belirtir.

$$\delta_x = \frac{1.0}{K} \delta_{xe}; \quad (x = 1, 2, \dots, n) \quad (3.29)$$

Burada,

$\delta_{xe}$  = eşdeğer kesme kuvvetleri kullanılarak uygulanan elastik analiz sonucu elde edilen deplasmanlar

$K$  = Yapı türüne bağlı olan katsayıdır.

Yönetmelik  $(1/K)$  değerinin 1 den az olamayacağını belirtir. Denklem (3.29)'da belirtilen  $\delta_x$  deplasmanı aşağıda denklem (3.30)'da gösterilen biçimde elastik toplam ötelemeyi hesaplamakta kullanılır.

$$\Delta_x = \delta_{x+1} - \delta_x \quad (3.30)$$

Daha büyük deplasmanlara müsaade edilmediği durumlarda yönetmelik katlar arası elastik ötelemeyi maksimum olarak  $(0.005H)$  değerinde sınırlandırmıştır. Burada  $H$ , ilgili kat yüksekliğidir. Bu ifadeyi denklem (3.31)'de görebiliriz.

$$\frac{\Delta_x}{K} < 0.005H ; \quad K \leq 1.0 \text{ olduğu durumda} \quad (3.31)$$

Yapının tüm bileşenleri, sismik veya rüzgar yüklerinden meydana gelen yer değiştirmelerden etkilenmemek için yapıdan yeterli mesafede ayrılmadıkları durumlarda, bu etkilere karşı tekil elemanlarmış gibi tasarlanıp inşa edilmelidir. Elastik olmayan yer değiştirmeler, elastik yer değiştirmelerin  $K \geq 1$  olmak koşulu ile  $(3/K)$  katsayısı ile çarpılmasıyla elde edilir [11].

### 3.12 Eurocode 8

Avrupa Birliği, afet bölgelerinde yapılacak yapılarda uyulması gerekli kuralları Eurocode 8 (EC8) yönetmeliğinde belirtmiş ve 1998 de bir Avrupa Ön Standardı olarak yayınlamıştır. EC8, yurdumuzda kullanılan Deprem Yönetmeliği'ne paralellik teşkil etmekte olup, burada ele alınmayan, ancak öngörülen bölümleri gözden geçirildiğinde çok daha kapsamlı planlanmış olduğu görülür. EC yönetmeliklerinde, genel tanımlar ve uyulması gerekli şartlar şeklinde Yönetmelik İlkeleri yanında, bu şartların uygulanmasını sağlayan Uygulama Kuralları verilmiştir.

EC8, P-Delta etkilerinin hesabı için bir ikinci mertebe gösterge değerini denklem (3.32)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\theta = \frac{P_{tot} d_r}{V_{tot} h} \quad (3.32)$$

Taşıyıcı sistemin her katında hesaplanacak olan bu değer 0.1'den küçük olması durumunda ikinci mertebe etkilerin (P-Delta etkileri) göz önüne alınmasına gerek yoktur.

Burada,

$P_{tot}$  = deprem durumunda göz önüne alınan katta ve üstündeki toplam düşey yükler

$d_r$  = rölatif ortalama kat yer değiştirmesi

$V_{tot}$  = toplam deprem kat kesme kuvveti

$h$  = kat yüksekliğidir.

Denklem (3.32)'ye göre hesaplanan ikinci mertebe gösterge değerinin  $0.1 < \theta \leq 0.2$  olması durumunda, deprem etkileri  $1/(1-\theta)$  katsayısı ile artırılarak ikinci mertebe etkiler göz önüne alınabilir.  $0.1 < \theta \leq 0.2$  olması durumunda ise ikinci mertebe etkilerinin ayrıntılı biçimde hesaplanması gerekir.  $\theta > 0.3$  olması durumuna izin verilmez ve bu durumda kesit rijitliklerinin artırılması gerekir [8].

### 3.13 Türkiye (ABYYHY-1998 ve TS500)

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliğe (ABYYHY-1998) göre herhangi bir perde veya kolon için, ardışık iki kat arasındaki yer değiştirme farkını ifade eden görelî kat ötelemesi,  $\Delta_i$ , denklem (3.33) ile elde edilecektir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1} \quad (3.33)$$

Burada  $d_i$  ve  $d_{i-1}$ , binanın  $i$ ' inci ve  $(i-1)$ ' inci katlarında herhangi bir kolon veya perdenin uçlarında hesaptan elde edilen yatay yer değiştirmeyi göstermektedir. Yine herhangi bir deprem doğrultusu için, binanın herhangi bir  $i$ ' inci katındaki kolon veya perdelerde, denklem (3.33) ile hesaplanan görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri  $(\Delta_i)_{\max}$ , aşağıdaki koşullardan elverişsiz olanını sağlayacaktır [12].

$$\begin{aligned} (\Delta_i)_{\max} / h_i &\leq 0.0035 \\ (\Delta_i)_{\max} / h_i &\leq 0.02 / R \end{aligned} \quad (3.34)$$

Burada denklem (3.34) ve (3.35)'de verilen koşulların binanın herhangi bir katında sağlanmaması durumunda, taşıyıcı sistemin rijitliği artırılarak deprem hesabı tekrarlanacaktır. Ancak verilen koşul sağlansa bile, yapısal olmayan gevrek elemanların (cephe elemanları vs.) elde edilen görelî kat ötelemeleri altında kullanılabilirliği hesapla doğrulanmalıdır. Taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal elastik olmayan davranışını esas alan daha kesin bir hesap yapılmadıkça, ikinci mertebe etkileri denklem (3.35)'e göre göz önüne alınabilir.

$$\theta_i = \frac{(\Delta_i)_{\text{ort}} \sum_{j=i}^N W_j}{V_i h_i} \leq 0.12 \quad (3.35)$$

Burada  $(\Delta_i)_{\text{ort}}$ ,  $i$ 'inci kattaki kolon ve perdelerde hesaplanan görelî kat ötelemelerinin kat içindeki ortalama değeridir. Göz önüne alınan deprem doğrultusunda her bir katta, ikinci mertebe gösterge değeri,  $\theta_i$ 'nin denklem (3.35)'de verilen koşulu sağlamaması durumunda ikinci mertebe etkileri yürürlükteki betonarme ve çelik yapı yönetmeliklerine göre değerlendirilecektir.

TS 500'e göre, yanal öteleme ölçütü olarak, yapı sistemi içinde yatay kuvvetlere karşı yeterli rijitlik sağlayan perde duvar veya benzeri elemanlar varsa, yanal ötelemenin önlenmiş olduğu varsayılabilir. Doğrusal malzeme davranışı varsayımı ile yatay ve düşey yükler altında yapılan ikinci mertebe yapısal çözümlemeden elde edilen kolon uç momentlerinin, aynı varsayımlar ve yükler altında yapılan birinci mertebe çözümlemesinden elde edilen kolon uç momentlerinden en çok %5 kadar farklı olduğu durumlarda, yanal ötelenmenin önlenmiş olduğu kabul edilebilir. İkinci mertebe çözümlemesi yapılamıyorsa, yapının herhangi bir katı için taşıyıcı sistemin bütünü göz önünde tutularak hesaplanan stabilite (duraylılık) göstergesi aşağıda denklem (3.36)'da belirtilen sınırı aşmadığı durumlarda da, o katta yeterli rijitlik bulunduğu ve yanal ötelemenin önlenmiş olduğu varsayılabilir.

$$\varphi = 1.5 \Delta_i \frac{\sum \frac{N_{di}}{l_i}}{V_{fi}} \leq 0.05 \quad (3.36)$$

Bu hesaplarda, çatlama kesit varsayımı ve  $F_d = 1.0 G + 1.0 Q + 1.0 E$  ve  $F_d = 1.0 G + 1.3 Q + 1.3 W$  yük birleşimlerinden bulunan değerlerden elverişsiz olanı temel alınmalıdır.

TS 500'de narinlik etkisi, bir kolonda, şekil değiştirme nedeniyle ortaya çıkan ikinci mertebe momentinin, kolonun tasarımında veya çözümlenmesinde göz önüne alınmasını gerektirecek düzeyde oluşmasına yol açan davranıştır şeklinde tanımlanmıştır. TS 500 e göre, narinlik oranı (  $l_k / i$  ) değerinin aşağıda verilen sınırları aşmadığı durumlarda, narinlik etkisi ihmal edilebilir ve tasarımda kullanılacak moment (hesap momenti), yapısal çözümlemede elde edilen uç momentlerinden en büyüğü olarak alınabilir. Narinlik oranı hesabında, eylemsizlik yarıçapı  $i$ , dikdörtgen kesitler için eğilme yönündeki kesit boyunun %30 u, dairesel kolonlar için çapın %25 i kadar alınabilir. Diğer kesitlerin eylemsizlik yarıçapı hesabında, tüm beton kesiti temel alınmalıdır.

a) Yanal ötelenmesi önlenmiş kat kolonlarında,

$$(l_k / i) \leq 34 - 12 (M_1/M_2) \leq 40 \quad (3.37)$$

koşulu sağlanıyorsa, narinlik etkisi ihmal edilebilir.

$M_1$  ve  $M_2$  her bir yük birleşimi için yapısal çözümlerlerden elde edilen kolon uç momentleridir ( $M_1 \leq M_2$ ).  $M_1$  ve  $M_2$  kolonun aynı yüzünde basınç oluşturuyorsa (tek eğrilikli kolon), ( $M_1/M_2$ ) oranı pozitif, tersi durumlarda ( çift eğrilikli kolon) bu oran negatif alınır.

b) Yanal ötelenmesi önlenmemiş kat kolonlarında,

$$(l_k / i) \leq 22 \quad (3.38)$$

koşulu sağlanıyorsa, narinlik etkisi ihmal edilebilir.

Eksenel basınç ile birlikte eğilme de taşıyan betonarme elemanların boyutlandırılıp donatılması, aşağıda verilen yük birleşimleri altında, doğrusal olmayan malzeme davranışını, çatlamayı, betonun sünme ve büzülmesini göz önünde bulunduran ikinci mertebe yapısal çözümlerlerden elde edilen eksenel kuvvet ve moment değerlerine göre yapılır. Yük birleşimleri;

Yalnız düşey yükler için,

$$F_d = 1.4 G + 1.6 Q \quad (3.39)$$

$$F_d = 1.4 G + 1.6 Q + 1.2 T \quad (3.40)$$

Denklem (3.40)'daki T, sıcaklık değişimi, büzülme, farklı oturma vb. şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler nedeniyle oluşan yük etkisidir. Bu yük birleşimi bu tür etkilerin ihmal edilemeyeceği durumlarda göz önüne alınmalıdır.

Rüzgar yükünün söz konusu olduğu durumlarda, denklem (3.39) ve (3.40) ile birlikte,

$$F_d = 1.0 G + 1.3 Q + 1.3 W \text{ ve } F_d = 0.9 G + 1.3 W \quad (3.41)$$

Deprem yükünün söz konusu olduğu durumlarda, denklem (3.39) ve (3.40) ile birlikte,

$$F_d = 1.0 G + 1.0 Q + 1.0 E \text{ ve } F_d = 0.9 G + 1.0 E \quad (3.42)$$

Yanal toprak itkisi bulunan durumlarda, denklem (3.39) ve denklem (3.40) ile birlikte,

$$F_d = 1.4 G + 1.6 Q + 1.6 H \text{ ve } F_d = 0.9 G + 1.6 H \quad (3.43)$$

Akışkan basıncı bulunan durumlarda, bu basınç '1.4' yük katsayısı ile çarpılarak içinde hareketli yük bulunan tüm yük birleşimlerine eklenir.

Ancak narinlik oranının  $(l_k / i) \leq 100$  sınırını aşmadığı elemanların hesabında, Moment Büyütme Yöntemi (Yaklaşık Yöntem) kullanılabilir. Kesiti ve eksenel kuvveti yüksekliği boyunca değişmeyen kolonlara uygulanabilen bu yaklaşık yöntemde, tasarımda kullanılacak tasarım momenti, doğrusal elastik davranış varsayımlarına dayalı çözümlemeden elde edilen ve  $(e_{\min} = 15 \text{ mm} + 0.03 h)$  minimum dışmerkezlik koşulunu sağlamak zorunda olan en büyük kolon uç momentinin bir çarpan ile büyütülmesi ile bulunur.

TS 500'de moment büyütme katsayısı iki durum için şu şekilde tanımlanmıştır.

a) Yanal ötelenmesi önlenmiş kat kolonlarında:

$$\beta = \frac{C_m}{1 - \frac{N_d}{N_k}} \geq 1.0 \quad (3.44)$$

$$C_m = 0.6 + 0.4 (M_1/M_2) \geq 0.4 ; \quad M_1 \leq M_2 \quad (3.45)$$

Burada,  $C_m$  burkulmada moment katsayısı, (3.45) denklemiyle hesaplanırken  $(M_1/M_2)$  oranı tek eğrilikli kolonlarda pozitif, çift eğrilikli kolonlarda negatif alınır. Kolon uçları arasına etkiyen herhangi bir yatay yük var ise,  $C_m = 1.0$  alınır. Tasarımda kullanılacak tasarım momenti aşağıdaki denklemden alınır.

$$M_d = \beta M_2 \quad (3.46)$$

Burada  $M_2$  ,  $(e_{\min} = 15 \text{ mm} + 0.03 h)$  denklemindeki minimum dışmerkezlik temel alınarak bulunan moment değerinden az olamaz. Burada  $h$ , kolonun eğilme düzlemindeki kesit boyudur.

b) Yanal ötelenmesi önlenmemiş kat kolonlarında; Tüm kat kolonları için,

$$\beta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum N_d}{\sum N_k}} \geq 1.0 \quad (3.47)$$

Burada  $\sum N_d$  ve  $\sum N_k$  , o kattaki basınç elemanlarının taşıdıkları eksenel tasarım yüklerinin toplamı ve kolon kritik yüklerinin toplamıdır. Bu değerler aşağıdaki koşulu sağlamalıdır. Eğer sağlamıyorsa kolon boyotları büyütülmelidir.

$$\sum N_d \leq 0.45 \sum N_k \quad (3.48)$$

Yanal ötelenmesi önlenmiş kat kolonlarının her biri için ayrıca bireysel  $\beta$  değerleri de hesaplanır. Bu hesaplarda  $C_m = 1.0$  alınmalıdır. Hesap momentinin bulunmasında,  $\beta$  ve  $\beta_s$  değerlerinden büyük olanı kullanılır ( $M_d = \beta M_2$  ve  $\beta_s M_2$  den büyük olanı). Ancak, serbest boy ile bulunan narinlik oranı,

$$\left( \frac{l_k}{i} \right) > \frac{35}{\sqrt{\frac{N_d}{f_{ck} A_c}}} \quad (3.49)$$

olan kolonların hesap momentinin bulunmasında,  $\beta$  ve  $\beta_s$  değerlerinin çarpımı kullanılır ( $M_d = \beta \beta_s M_2$  ).

İki eksenli doğrultusunda eğilme taşıyan basınç elemanları için her iki doğrultudaki momentler  $\beta$  katsayıları ile ayrı ayrı büyütülmeli ve hesapta bu momentler esas alınmalıdır [4].

TS 500'de kolon etkili boyunun hesaplanması ile ilgili açıklamalar da yer almaktadır. Kolon serbest boyu, döşemeler, kirişler veya kolona yanal destek sağlayan diğer elemanlar arasındaki uzaklıktır. Kolon başlığı veya guse bulunan durumlarda, kolon serbest boyu, başlık veya guse alt yüzünden ölçülür. Daha güvenilir bir çözümleme yönteminin kullanılmadığı durumlarda, kolon etkili boyu, kolon serbest boyunun kolon uçlarındaki dönmenin engellenmesi ile ilişkili olan ve aşağıda tanımlanan 'k' katsayısıyla çarpılmasıyla elde edilebilir.

$$l_k = k * l_n \quad (3.50)$$

Kolon etkili boyu katsayısı 'k' yanal ötelenmesi önlenmiş ve önlenmemiş kat kolonları için aşağıda denklem (3.51) ve denklem (3.52)'de farklı şekillerde tanımlanmıştır.

a) Yanal ötelenmesi önlenmiş kat kolonları için:

$$k = 0.7 + 0.05(\alpha_1 + \alpha_2) \leq (0.85 + 0.05\alpha_1) \leq 1.0 \quad (3.51)$$

Hesap yapılmamışsa, yanal ötelenmesi önlenmiş kat kolonlarında,  $k = 1.0$  alınır.

b) Yanal ötelenmesi önlenmemiş kat kolonları için:

$$\begin{aligned} \alpha_m < 2 & \text{ ise, } k = \frac{20 - \alpha_m}{20} \sqrt{1 + \alpha_m} \\ \alpha_m \geq 2 & \text{ ise, } k = 0.9 \sqrt{1 + \alpha_m} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Bir ucu mafsallı olan yanal ötelenmesi önlenmemiş kolonlarda, ( $k = 2 + 0.3\alpha_2$ ) alınır.

Denklem (3.51) ve (3.52)'de kullanılacak olan ' $\alpha$ ' değerleri aşağıda denklem (3.53)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\alpha_{1,2} = \frac{\sum \left( \frac{I}{l} \right)_{\text{kolon}}}{\sum \left( \frac{I}{l} \right)_{\text{kiriş}}} ; \quad \alpha_m = 0.5(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (3.53)$$

$\alpha$  oranlarının hesabında, yalnızca eğilme doğrultusundaki kirişler dikkate alınır ve kirişler için çatlamış kesit, kolonlar için tüm (çatlamamış) kesit eylemsizlik momentleri kullanılır. Daha güvenilir bir hesap yapılmamışsa, çatlamış kesit eylemsizlik momenti, çatlamamış kesit eylemsizlik momentinin yarısı kadar alınabilir. Tablalı kiriş eylemsizlik momenti hesabında, tabla da göz önüne alınmalıdır [4].

#### 4. P-DELTA ETKİSİ HESAP YÖNTEMLERİ

Günümüzde trendin daha esnek ve narin olan yüksek yapılara doğru olması sebebiyle potansiyel P-Delta etkileri önem kazanmaktadır. Bu durum basit ve doğru P-Delta analiz yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu bölümde, çeşitli P-Delta hesap yöntemleri açıklanarak yeterlilikleri ve sonuca yaklaşıklıkları bakımından karşılaştırılmıştır. Bu hesap yöntemleri, iteratif P-Delta analizi, iteratif ağırlık yükü yöntemi, büyültme katsayısı yöntemi, direkt yöntem ve negatif rijitlikli elaman yöntemidir. Bu yöntemlere ilave olarak P-Delta etkilerini hesaba katabilen bilgisayar yazılımları ve yönetmeliklerde yer alan kriterler ile de P-Delta etkileri dikkate alınabilir. Yöntemlerdeki farklılıklar, yöntemlerin sonuca yaklaşıklığı, kullanım kolaylığı, elle veya bilgisayar destekli hesaplamalara uygunluğu, tüm yapı tiplerine veya sadece belli yapı tiplerine uygulanabilirliği koşullarına göre karşılaştırılmıştır.

II. mertebe davranışın hesaplanmasında birçok teknik geliştirilmiştir. Bazı teknikler problemi geometrik nonlineerite olarak ele alır ve sayısal açıdan yetersiz olabilecek iteratif çözüm yöntemleri önerir. Ayrıca bu iteratif çözüm yöntemleri, P-Delta etkisinden dolayı titreşim periyodunun uzadığı dinamik analiz için uygun değildir[3].

Bina türü yapılarda P-Delta problemi lineerleştirilebilir. Bu tip yapılarda yapı ağırlığı yanal hareket boyunca sabittir ve yapısal yer değiştirmeler yapısal boyutlara oranla küçük varsayılacağından P-Delta etkileri iterasyon yapılmadan direkt ve kesin olarak elde edilebilir. İlave sayısal hesaplamalar ihmal edilebilir seviyededir.

Bir kattaki eksenel kuvvet o kat seviyesi üzerindeki bina ağırlığına eşit olduğundan ve yanal yük etkisi altında değişmediğinden dolayı bu yöntemde iterasyon gerekmez. Böylece yanal yüke dayalı kolon geometrik rijitlik kısmı ihmal edilebilir ve sadece yapı ağırlığından kaynaklanan eksenel kuvvetler, tüm yapı geometrik rijitlik matrisi hesabında kullanılır. P-Delta etkileri temel analitik formüller ile statik ve dinamik analize dahil edilebilir. Böylece yapısal yer değiştirmeler, mod biçimleri ve frekanslar otomatik olarak yapıdaki yumuşamanın göstergesi olarak elde edilir.

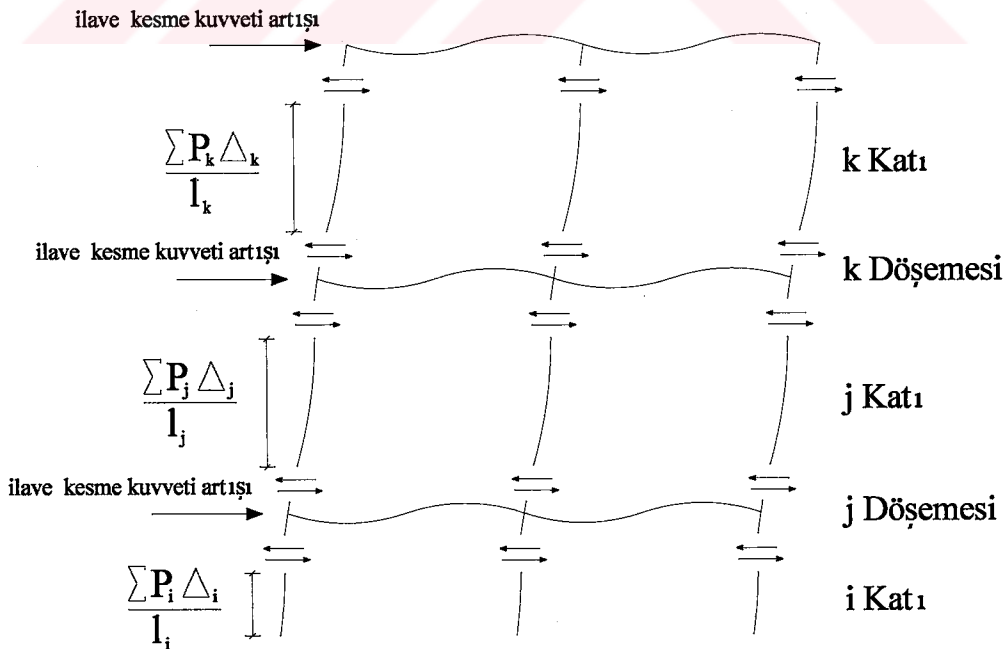
#### 4.1 İteratif P-Delta Analizi

Bir çerçeve düşey ve yatay yükler etkisi altında şekil 4.1'deki gibi deformasyon yaptığında kolon uç momentleri denklem (4.1)'deki gibi dengelenmelidir.

$$\sum (M_{top} + M_{btm}) = V l_c + \sum P \Delta \quad (4.1)$$

Burada,  $\Delta$  katın üst seviyesinin alt seviyesine göre göreceli olarak yanal yer değiştirmesidir.  $(M_{top}, M_{btm})$  ifadeleri ise sırasıyla kolon üst ve alt ucundaki momentlerdir. Kattaki  $\sum P \Delta$  momenti, şekil 4.3'den görüleceği gibi,  $[(\sum P) \Delta] / l_c$  şeklinde ifade edilen kesme kuvvetleriyle temsil edilebilir. Burada,  $l_c$  şekil 4.2'de görüldüğü gibi kat yüksekliğini temsil eder. Bu kesme kuvvetleri denklem (4.2)'de görüldüğü gibi devrilme momentleri meydana getirirler.

$$\frac{\left( \frac{\sum P \Delta}{l_c} \right)}{(1/l_c)} = (\sum P) \Delta \quad (4.2)$$

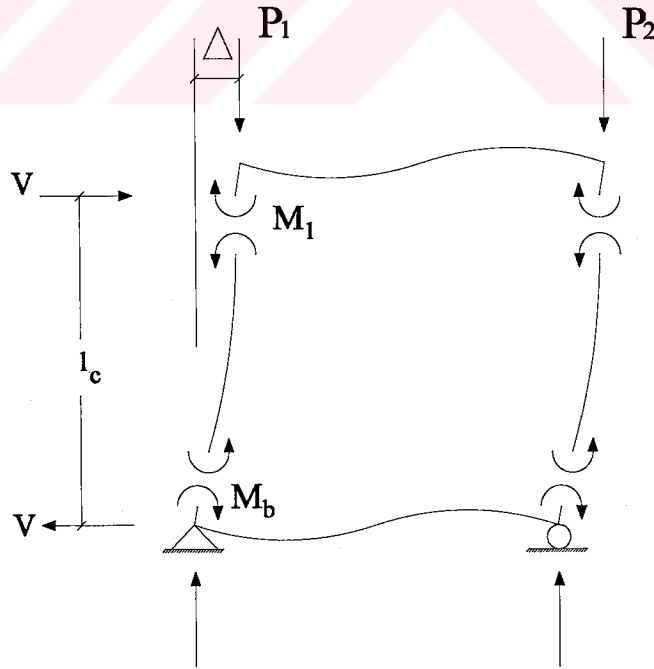


Şekil 4.1 Katlardaki ilave kesme kuvveti artışları

Şekil 4.1’de iki farklı kattaki kat kesme kuvvetleri görülebilir. Bu şekilden ve denklem (4.3)’den görülebileceği gibi herhangi bir j katında kolonlardaki kesme kuvvetleri cebirsel toplamının bir alt kattaki kolonlardaki kesme kuvvetleri cebirsel toplamından çıkartılmasıyla j katına ait ilave kesme kuvveti artışı elde edilmiş olur.

$$(\text{İlave kesme kuvveti artışı})_j = \frac{(\sum P_i)\Delta_i}{l_i} - \frac{(\sum P_j)\Delta_j}{l_j} \quad (4.3)$$

İlave kesme kuvveti artışları her kat seviyesinde mevcut kat kesme kuvvetlerine eklenerek yapı tekrar analiz edilir ve bu analiz sonucu yeni yanal deplasmanlar ve daha büyük kolon momentleri elde edilir. Eğer deplasmanlardaki artış %5 mertebelerinde ise yeni  $\Sigma P\Delta/l$  kuvvetleri ve kesme kuvveti artışları hesaplanarak yapı tekrar analiz edilir. Bu işlem yeterli yaklaşıklık elde edilinceye kadar devam ettirilir. Böylece bu yöntemle elde edilen sonuç moment ve deplasmanlara P-Delta etkisi dahil edilmiş olur. Genelde iki ya da üç iterasyon yeterlidir. Eğer beş iterasyondan sonra yeterli yaklaşıklık elde edilemiyorsa bu, yapının stabil olmadığı anlamına gelebilir. Bu yöntem ikinci mertebeye hesap yöntemleriyle karşılaştırılabilir doğrulukta iyi sonuçlar verse de yüksek yapılar için çok zaman alan bir işlemdir.



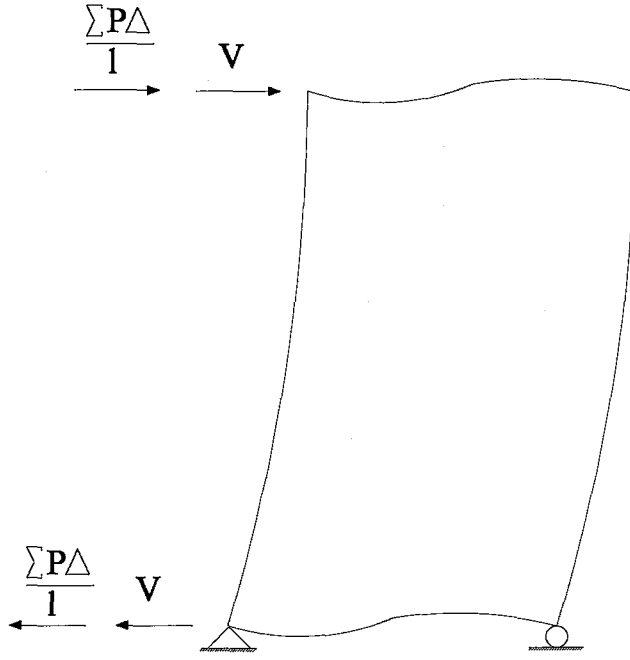
Şekil 4.2 Çerçeveadaki kolon momentleri

Yapı rijitliklerindeki düzensizlikler veya uygulanan yüklerdeki düzensizlikler sebebiyle denklem (4.3) ile elde edilen kesme kuvveti artışı negatif değerde olabilir. Böyle bir durumda bu kuvvet sisteme zıt yönde etkir.

Bu yöntemde bir düzeltme yapılması mantıksal olarak gereklidir. Bunun açıklaması olarak, şekil 4.4'de görüldüğü gibi bir kolona ait P-Delta moment diyagramı, şekil değiştirmiş bir kolonla aynı biçimdedir. Ayrıca  $P\Delta/l$  kesme kuvvetlerinden oluşan moment diyagramı yine şekil 4.4'de görülen V.1 moment diyagramıyla benzer şekilde lineerdir. Sonuç olarak aynı şekildeki P-Delta moment diyagramının alanı, yine aynı şekildeki (V.1) moment diyagramı alanından daha büyüktür. Moment alanları teoreminden açıkça görüleceği gibi gerçek deplasmanlar  $P\Delta/l$  kesme kuvvetlerinden kaynaklanacak olanlardan daha büyüktür. Deformasyondaki artış sıfırdan %22 oranlarında, kolon rijitliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Ortalama makul değer %15 seviyesindedir. Arttırılmış deplasmanlar kat kesme kuvvetlerinin denklem (4.4)'deki şekliyle alınmasıyla hesaba katılabilir.

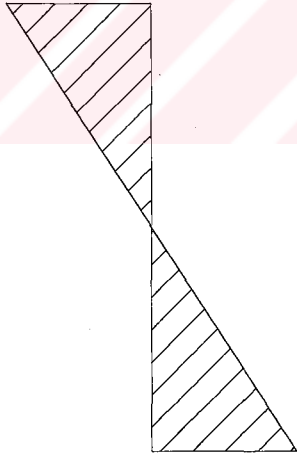
$$\gamma \frac{\sum P\Delta}{l} \quad (4.4)$$

Burada,  $\gamma$  esneklik faktörü olup, değeri 1.0~1.22 arasında değişebilmektedir. Genellikle düzenli çerçeveler için 1.15 alınabilir. Maalesef ikinci mertebe analizi yapan birçok ticari analiz programı bu düzeltmeyi içermemektedir [13].

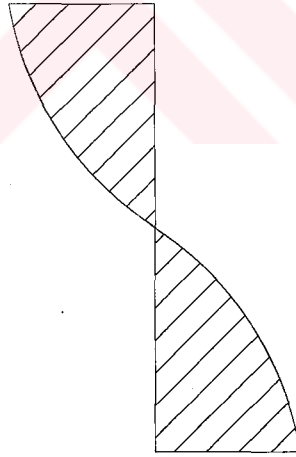


Şekil 4.3 Kattaki P-Delta etkisinden oluşan eşdeğer kesme kuvvetleri

V.1 momentleri



P-Delta momentleri

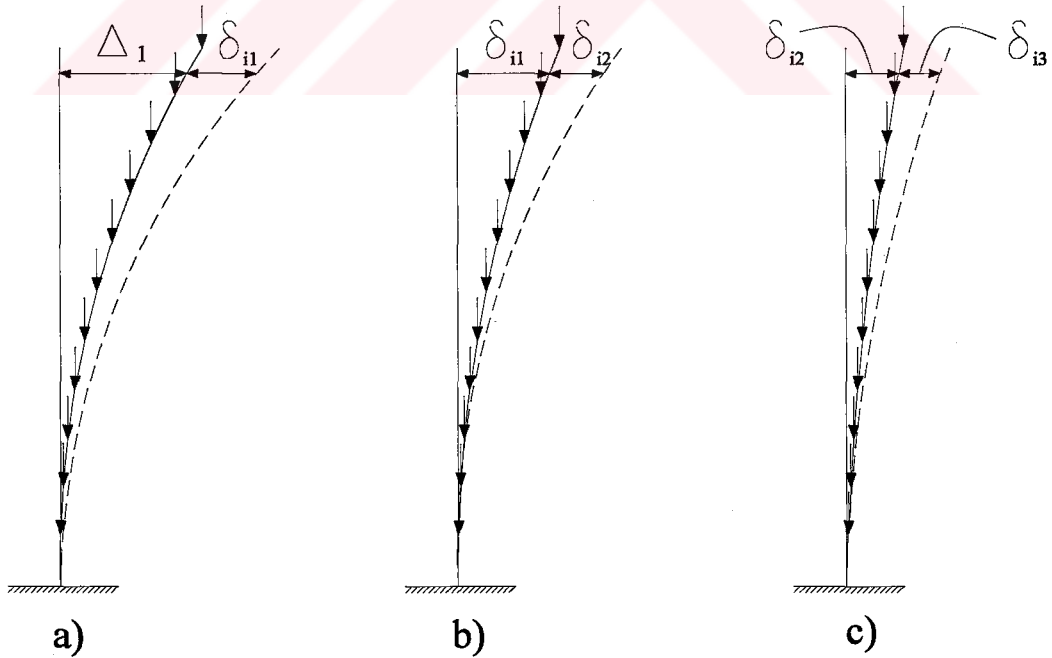


Şekil 4.4 Birincil momentler ve P-Delta momentleri

## 4.2 İteratif Ağırlık Yüğü Yöntemi

İteratif yöntemin geniş hesaplamalarından kaçınmak için, bilgisayar uygulamalarına yönelik, daha basit ve daha gerçekçi bir P-Delta analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, herhangi bir çerçeve analiz programı kullanılarak yapıya birinci mertebe yanal yük analizi uygulanır. Daha sonra birinci mertebe analiz sonucu  $\Delta_i$  deplasmanını yapmış olan yüksüz yapıya ağırlık yükleri uygulanarak deplasmandaki artış miktarı,  $\delta_{i1}$  şekil 4.5a'da görüldüğü gibi elde edilir. Deplasmandaki bir sonraki artış miktarı,  $\delta_{i2}$  yi elde etmek için ağırlık yükleri ilk artış deplasmanı da ilave edilmiş olan sisteme uygulanır. Bu izahı şekil 4.5b'de görebiliriz. Bu işlem şekil 4.5c'de görüldüğü gibi deplasmandaki artış miktarı ihmal edilebilir düzeye gelinceye kadar tekrarlanır. Yapının i katına ait, P-Delta etkisini içeren sonuç deplasman değeri  $\Delta_i^*$ , denklem (4.5)'de görüldüğü gibi birinci mertebe deplasman değeri ve ilave deplasmanların toplamıdır.

$$\Delta_i^* = \Delta_i + \delta_{i1} + \delta_{i2} + \delta_{i3} + \dots \quad (4.5)$$

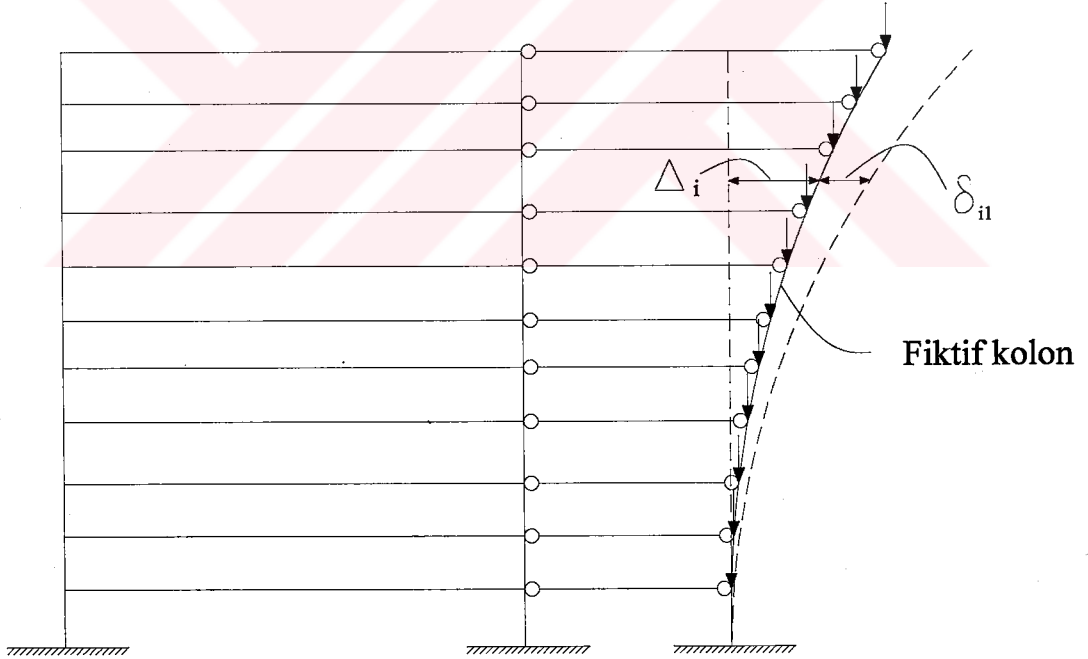


Şekil 4.5 Şekil değiştirmiş geometriye uygulanan ağırlık yükleri ve ilave deplasmanlar

Bu yöntemde, düşey yükler etkisi en son şekil değiştirmiş konuma etkemediğinden iterasyon gereklidir. Yapının  $i$  katına ait P-Delta etkisini içeren sonuç momenti  $M_i^*$ , denklem (4.6)'da görüldüğü gibi, birinci mertbe moment değeri  $M_i$  ve ilave artışlardan kaynaklanan  $\delta M_i$  momentlerinin toplamıyla bulunur.

$$M_i^* = M_i + \delta M_{i1} + \delta M_{i2} + \delta M_{i3} + \dots \quad (4.6)$$

Pratikte bu yöntem, şekil 4.6'de görülen, yapıya eksenel rijit bağlantılarla bağlanmış, sıfır eksenel rijitlikli yapı yüksekliğinde fiktif bir kolon eklenmesiyle basitleştirilebilir. Böylelikle, yukarıda açıklanan iterasyonlar, yapının her katına ait ağırlık yükü, şekil değiştirmiş konumdaki fiktif kolonun ilgili katlarına uygulanarak gerçekleştirilir. Bu yöntemle, tüm yapının koordinatları yerine sadece fiktif kolonun koordinatları değiştirilir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar bölüm 4.1'de açıklanan iteratif P-Delta analizi yönteminde elde edilen sonuçlarla aynı olmasına rağmen bu yöntemde hesap süresi iteratif P-Delta analizindeki üçte biri kadardır [2].



Şekil 4.6 Şekil değiştirmiş fiktif kolona uygulanan ağırlık yükleri

### 4.3 Büyültme Katsayısı Yöntemi

Bu yöntem, birinci mertebe yanal yük analizinden elde edilen deplasman ve momentlerin bir büyültme katsayısı ile büyültülmesine dayanan yaklaşık bir yöntemdir. Büyültme katsayısı şekil 4.7’de düzgün yayılı yük etkisi ve eksenel yük altında deformasyon yapmış konsol göz önünde bulundurularak türetilir. Deformasyon eğrisinin diferansiyel denkleminin çözümünden konsolun serbest ucundaki, P-delta etkisini içeren deplasman denklem (4.7) deki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta^* = \Delta \left( \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cr}}} \right) \quad (4.7)$$

Burada,

$\Delta^*$  = P-Delta etkilerini içeren, konsolun serbest ucundaki son deplasman değeri

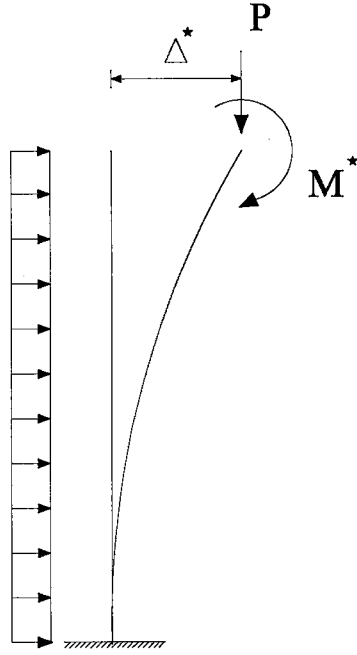
$\Delta$  = birinci mertebe deplasman değeri

P = konsolun serbest ucundaki eksenel yük

$P_{cr}$  = konsolun elastik burkulma yüküdür.

Denklem (4.7)’ye göre eksenel P yükü etkisindeki elemanın düzgün yayılı yanal yüklerden kaynaklanan serbest uç deplasmanı denklem (4.8)’deki yaklaşık büyültme katsayısıyla büyültülür.

$$F = \frac{1}{1 - \frac{P}{P_{cr}}} \quad (4.8)$$



Şekil 4.7 Eğilme kolonu

Büyültme katsayısı yöntemi, şekil 4.8’de görüldüğü gibi ağırlık yükleri yapı yüksekliği boyunca yayılmış yüksek yapılara da uygulanabilir. Denklem (4.7) konsolun serbest ucundaki maksimum deplasmanı verse de, pratikte bunun yapının yüksekliği boyunca herhangi bir noktada, büyük hata oluşmadan uygulanabileceği varsayılabilir. Böylece, yapının bir i katına ait son deplasman değeri denklem (4.9)’da olduğu gibidir.

$$\Delta_i^* = \Delta_i \left( \frac{1}{1 - \frac{P_o}{P_{ocr}}} \right) \quad (4.9)$$

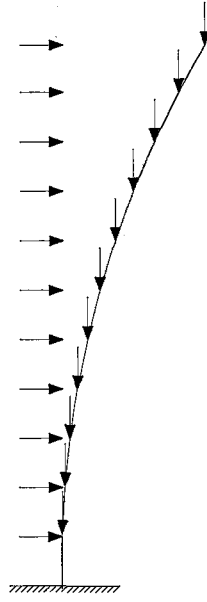
Burada,

$\Delta_i^*$  = Yapının i katına ait, P-Delta etkilerini içeren son deplasman değeri

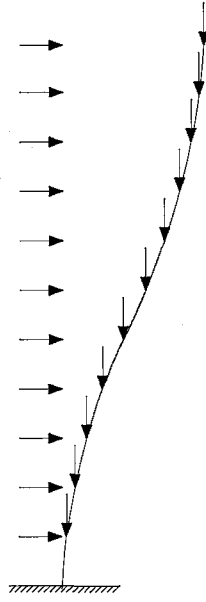
$\Delta_i$  = Yapının i katına ait, birinci mertebe deplasman değeri

$P_o$  = yapının en alt seviyesindeki toplam ağırlık yükü

$P_{ocr}$  = yapının en alt seviyesindeki elastik burkulma yüküdür.



a) Eğilme kolonu



b) Kayma kolonu

Şekil 4.8 Ağırlığı üniform yayılı konsol

Düşey yükler altında, eğilme kolonunun burkulması şeklinde burkulan yapılar için elastik burkulma yükü denklem (4.10)'daki gibidir.

$$P_{ocr} = \frac{7.83EI_o}{L^2} (1 - 0.3\beta) \quad (4.10)$$

Burada,

$EI_o$  = yapının en alt seviyesindeki eğilme rijitliği

$EI_o(1-\beta)$  = yapının en üst seviyesindeki eğilme rijitliği

$L$  = yapının toplam yüksekliğidir.

Öncelikli olarak kesme modunda deformasyon yapan rijit çerçeveler için burkulma yükü, kolonların tabanda ankastre bağlı olduğu durum için denklem (4.11a)'daki gibidir. Kolonların tabanda mafsallı bağlı olması durumunda ise burkulma yükü denklem 4.11b'deki gibidir.

$$P_{ocr} = \frac{12E \left( 1 + \frac{C_1}{6G_1} \right)}{h_1 \left( \frac{1}{C_1} + \frac{2}{3G_1} \right)} \quad (4.11a)$$

$$P_{ocr} = \frac{12E}{h_1 \left( \frac{4}{C_1} + \frac{2}{3G_1} \right)} \quad (4.11b)$$

Burada,

E = elastisite modülü

$h_1$  = ilk katın yüksekliği

$C_1 = \Sigma(I_c/h)_1$  birinci kattaki tüm kolonlar için

$G_1 = \Sigma(I_g/l)_1$  değeri ile ifade edilir.

Burkulmaya eğilme ve kesme modlarının katkıları düşünüldüğünde  $P_{ocr}$  denklem (4.12)'deki ifadeyle yaklaşık olarak bulunabilir.

$$\frac{1}{P_{ocr}} = \frac{1}{P_{of}} + \frac{1}{P_{os}} \quad (4.12)$$

Burada,

$P_{ocr}$  = birleştirilmiş modlardaki burkulma yükü

$P_{of}$  = eğilme modundaki burkulma yükü

$P_{os}$  = kesme modundaki burkulma yükü

P-Delta etkisi yanal deplasmanlar yanında iç momentlerde de artışa sebebiyet verir ve deplasmanlar için kullanılan büyüme katsayısı denklem (4.13)'de görüldüğü gibi benzer şekildedir.

$$M_i^* = M_i \left( \frac{1}{1 - \frac{P_o}{P_{ocr}}} \right) \quad (4.13)$$

Burada,

$M_i^*$  = i katına ait, P-Delta etkilerini içeren son moment değeri

$M_i$  = i katına ait birinci mertebeye moment değeridir.

Büyültme katsayısı yöntemi, P-Delta etkilerini elde etmede hızlı fakat yaklaşık bir yöntemdir. P-Delta etkilerinin büyüklüğünün hesaplanmasında pratik bir yöntem olmaktan çok bu etkilerin önemli seviyede olup olmadığının belirlenmesinde kullanışlıdır [2].

#### 4.4 Direkt Yöntem

Bu yöntemde, yukarıda açıklanan iteratif yöntemlerdeki iterasyonlar, birinci mertebeye yanal yük analizinden elde edilen sonuçların, katların rijitliğine ve ağırlık yüklerine bağlı bir katsayı ile ikinci mertebeye direkt olarak uyarlanmasıyla ihmal edilebilir. İteratif yöntemin geliştirilmesinde gösterildiği gibi, yapının i katına ait deplasman yapmış kolona etkiyen toplam düşey yük  $P_i$  nin etkisiyle i katına ait dış kesme kuvveti artışı denklem (4.14)'deki gibidir.

$$\delta S_i = \frac{P_i \delta_i^*}{h_i} \quad (4.14)$$

Burada,

$\delta_i^*$  = yapının i katına ait, P-Delta etkilerini içeren sonuç deplasman değeridir.

Sadece yatay yükler bulunduğu zaman çerçevenin i katındaki kayma rijitliği denklem (4.15)'de olduğu gibidir.

$$K_{si} = \frac{S_i}{\delta_i} \quad (4.15)$$

Burada,  $\delta_i$  = yapının i katına ait birinci mertebeye deplasman değeridir.

Sonuç deplasmanı yapmış durumdaki P-Delta etkisi, i katına ait başlangıç kesme kuvveti  $S_i$  ve kesme kuvveti artışı  $\delta S_i$  ile temsil edilerek i katına ait toplam kesme kuvveti denklem (4.16)'deki gibidir.

$$S_i^* = S_i + \delta_i S_i = S_i + \frac{P_i \delta_i^*}{h_i} \quad (4.16)$$

Sistemin yanal deplasmanının yalnızca kesme kuvvetiyle orantılı olduğu varsayılırsa  $S_i^*$  denklem (4.17)'deki gibi yazılabilir.

$$S_i^* = S_i + \frac{P_i \delta_i^*}{h_i} = \delta_i^* + K_{si} \quad (4.17)$$

Denklem (4.17)'nin denklem (4.16)'da yerine yazılmasıyla  $i$  katındaki P-Delta etkilerini içeren sonuç öteleme değeri denklem (4.18)'deki gibi elde edilebilir.

$$\delta_i^* = \frac{\left[ S_i + \left( \frac{P_i \delta_i^*}{h_i} \right) \right]}{K_{si}} \quad (4.18)$$

Denklem (4.15)'deki  $K_{si}$  değeri bu ifadede yerine yazılırsa sonuç kat ötelemesi denklem (4.19)'deki gibi olur.

$$\delta_i^* = \frac{\delta_i}{\left[ 1 - \left( \frac{P_i \delta_i^*}{S_i h_i} \right) \right]} \quad (4.19)$$

Böylelikle  $i$  katına ait toplam yanal yer değiştirme denklem (4.20)'deki gibi olur.

$$\Delta_i^* = \sum_{j=1}^i \delta_j^* \quad (4.20)$$

Denklem (4.19) ve denklem (4.20) kullanılarak P-Delta etkilerini içeren yaklaşık sonuç yer değiştirmeler, birinci mertebe yanal yük analizinden bulunabilir. Denklem

(4.19)'daki  $1 - \left( \frac{P_i \delta_i^*}{S_i h_i} \right)$  faktörü, ağırlık yükünün lineer olmayan bir fonksiyonu olarak

yapı yüksekliği boyunca değişiklik gösterir.

Benzer şekilde  $i$  katına ait elemanlardaki P-Delta etkilerini içeren sonuç moment değeri, birinci mertebe yanal yük analizinden elde edilen momentler  $M_i$  ile yaklaşık olarak denklem (4.21)'deki gibi hesaplanabilir.

$$M_i^* = \frac{M_i}{\left[ 1 - \left( \frac{P_i \delta_i^*}{S_i h_i} \right) \right]} \quad (4.21)$$

Direkt yöntem yüksek olmayan ve orta yükseklikteki rijit çerçeveler için doğru ve yeterli sonuçlar verir. Fakat yöntemin türetilmesinde, denklem (4.17)'deki, kat ötelemelerinin yalnızca kat kesme kuvvetleriyle orantılı olduğu varsayımı sebebiyle bu yöntem önemli eğilme deformasyonu sergileyen yapılarda geçerli değildir. Ayrıca bu yöntemin kullanımı öncelikle kayma modunda deformasyon yapan yapılarla sınırlıdır [2].

#### 4.5 Negatif Rijitlikli Eleman Yöntemi

Bu yöntem göre, yapıya yanal yük analizi uygulandığında, deplasman ve momentlerin P-Delta etkilerini içermesi için yapısal model değiştirilmelidir. Bu değiştirme işlemi, yapıya kat ağırlık yüküyle orantılı negatif rijitlikli fiktif kolonlar eklenmesiyle gerçekleştirilir. Bu değişikliğin sonucu olarak her kattaki yanal rijitlik azalacaktır ve dolayısıyla deplasmanlarda ve eleman momentlerinde artış meydana gelecektir. Bu etkiler yanal yükün olduğu kadar ağırlık yüklerinin de bir fonksiyonu olacaktır.

Benzer bir yöntemde, P-Delta etkisi ile yapının yanal rijitliğini azaltmak amaçla katlara negatif rijitlikli fiktif diyagonal elemanlar ilave edilir. Bu yöntemin uygulanabilirliği kolonların eksenel deformasyonları ihmal edilebilir seviyede olan yapılarla sınırlıdır. Bunun sebebi, fiktif diyagonal elemanların bu deformasyonları etkileyen rijitlik ve kuvvetlerin düşey bileşenlerini ortaya çıkartmasıdır.

Ağırlık yüklerinin P-Delta etkilerine denk olan yatay yük artışları  $H'$ , iteratif yöntemlerdeki gibi hesaplanır ve denklem (4.22)'deki gibi matris formda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} H_1' \\ H_2' \\ H_3' \\ \vdots \\ H_i' \\ \vdots \\ H_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_0}{h_0} + \frac{P_1}{h_1} & -\frac{P_1}{h_1} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ -\frac{P_1}{h_1} & \frac{P_1}{h_1} + \frac{P_2}{h_2} & -\frac{P_2}{h_2} & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & -\frac{P_2}{h_2} & \frac{P_2}{h_2} + \frac{P_3}{h_3} & -\frac{P_3}{h_3} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{P_{i-1}}{h_{i-1}} + \frac{P_{i1}}{h_i} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{P_{n-1}}{h_{n-1}} + \frac{P_{n1}}{h_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1^* \\ \Delta_2^* \\ \Delta_3^* \\ \vdots \\ \Delta_i^* \\ \vdots \\ \Delta_n^* \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Denklem (4.22)'de verilen ifade denklem (4.23)'deki formda yazılabilir.

$$\{H'\} = [K_g] \{\Delta^*\} \quad (4.23)$$

Burada,

$P_i$  = i katındaki kolon aksenal kuvveti toplamı

$H_i$  = i katı yüksekliği

$\Delta_i^*$  = i katına ait P-Delta etkilerini içeren sonuç yanal deplasman değeri

$K_g$  = geometrik rijitlik matrisidir.

Ağırlık yüklerinden kaynaklanan yatay yük artışlarının, yapıya etkiyen yanal kuvvet  $H'$ 'ye eklenmesiyle denklem (4.24)'deki ifade elde edilir.

$$\{H\} + \{H'\} = [K] \{\Delta^*\} \quad (4.24)$$

Burada,  $[K]$  = birinci mertebe yanal rijitlik matrisidir.

Denklem (4.23)'ün denklem (4.24)'de yerine yazılıp yeniden düzenlenmesiyle sistemin denge denklemi denklem (4.25)'deki gibi yazılabilir.

$$\{H\} = [K - K_g] \{\Delta^*\} = [K_s] \{\Delta^*\} \quad (4.25)$$

Burada,  $[K_s]$  = ikinci mertebe yanal rijitlik matrisidir.

Meydana gelen ilave kesme kuvvetleri,  $V_{ia}$ , denklem (4.26)'da görüldüğü gibi  $(\Delta_{i+1}-\Delta_i)$  deplasmanı ve  $P_i/h_i$  rijitliğiyle ifade edilebilir.

$$V_{ia} = \frac{P_i}{h_i} (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \quad (4.26)$$

Böylelikle, tüm yapı yüksekliği boyunca yapıya eksenel rijit bağlantılarla bağlı, şekil 4.9'da görüldüğü gibi  $(-P_i/h_i)$  rijitlikli fiktif kolonlar tanımlanarak yapılan birinci mertebe bilgisayar programı denklem (4.25)'de bulunan ikinci mertebe rijitlik matrisinin terimlerini oluşturacaktır. Bir  $i$  katına ait kesme kolonlarının gerekli rijitliği denklem (4.27)'de olduğu gibi ifade edilir.

$$\frac{GA_{si}}{h_i} = \frac{-P_i}{h_i} \quad (4.27)$$

Burada,

$A_{si} = (-P_i/G)$  olmak üzere  $i$  katındaki fiktif kayma kolonu alanı

$G$  = fiktif kayma kolonunun kayma modülüdür.



Şekil 4.9 Fiktif kayma kolonu modeli

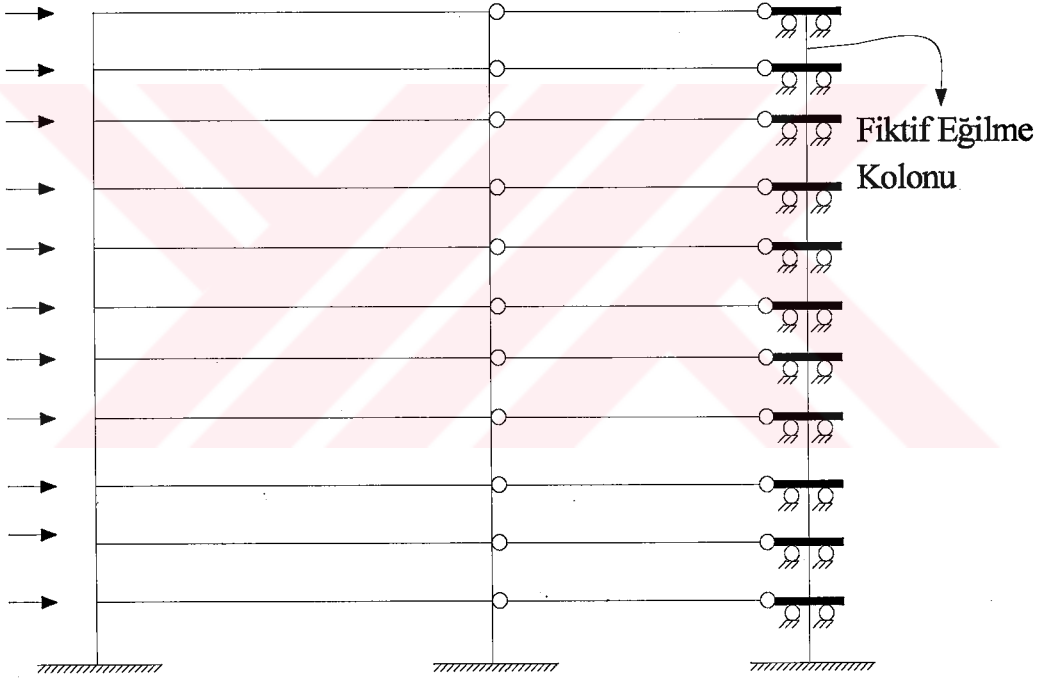
Eğer analiz programı kayma alanı uygulaması içermiyorsa, aynı sonuçlar şekil 4.10'da görülen dönmesi engellenmiş, yanal hareketi serbest bir eğilme kolonu kullanılmasıyla elde edilebilir. Bu eğilme kolonunun yanal rijitliği denklem (4.28)'de verilmiştir.

$$\frac{12EI_i}{h_i^3} = -\frac{P_i}{h_i} \quad (4.28)$$

Burada,

$I_i = (-P_i h_i^2)/12E$  olmak üzere  $i$  katına ait fiktif kolonun eğilme ataleti

$E$  = fiktif kolonun elastisite modülüdür.



Şekil 4.10 Fiktif eğilme kolonu modeli

Negatif rijitlikli eleman yöntemi P-Delta etkilerinin değerlendirilmesinde doğru ve yeterli sonuçlar vermekte ve iterasyon gerektirmemektedir. Bu yöntem Rutenberg tarafından asimetrik üç boyutlu yapılarda direkt ikinci mertebe analizi yapabilecek şekilde geliştirilmiştir. Böyle durumlarda yapının geometrik rijitliği, negatif yanal rijitlikli ve negatif burulma rijitlikli bir fiktif kolon olarak modellenir ve her kattaki kolon yüklerinin merkezine yerleştirilir.

Kolonun şekil değiştirmiş geometrisine etkiyen ağırlık yükleri iki farklı ikinci mertebe etkiye sebebiyet verir. En önemli olan ikinci mertebe etkisi, şimdiye kadar anlatılmış olan, kat deplasmanları üzerine eksantrik olarak etkiyen ağırlık yüklerinin ürettiği uç momentleridir. Diğer ikinci mertebe etkisi ise kolon yüklerinden meydana gelen kolon eğilme rijitliğindeki azalmadır.

Yapının şekil değiştirmiş geometrisi üzerine etkiyen eksenel yüklerin sebep olduğu ilave moment ve deplasmanları içeren, denge denklemlerini yine şekil değiştirmiş geometri üzerinde kuran ikinci mertebe bilgisayar programları mevcuttur. Bu tür programlar yukarıda açıklanan iki P-Delta etkisini de hesaba katmak için ikinci mertebe rijitlik matrisini formüle eder. Bu programlar iteratif olup gerçekleştirilmesi negatif rijitlikli eleman yöntemine göre daha zahmetlidir.

Rutenberg kolon eğilme etkilerini de hesaba katmak için negatif rijitlikli eleman yöntemini geliştirmiştir. Bu etkilerin yaklaşık olarak, fiktif elemanın negatif rijitliğinin bir katsayı ile çarpılmasıyla hesaba katılacağını belirtir. Bu katsayı eğilme kolonundaki kesme kuvvetinin, düz kolondaki kesme kuvvetine oranı olarak alınabileceğini belirtmiştir.

Kolon eğilmesinden oluşan bu ilave etkiler en uç durumda bile P-Delta etkilerinin %20 si kadardır ve pratikte birçok tasarımda önem teşkil etmez. Genellikle ağırlık yüklerinin düşey eksantrikliğini göz önünde bulundurmak yeterlidir [2].

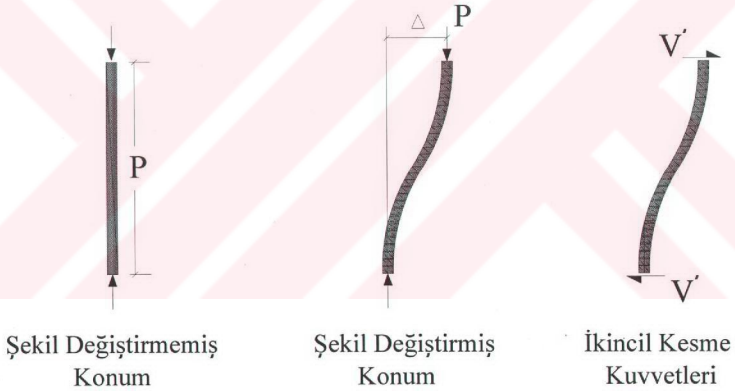
Negatif rijitlikli eleman yöntemine benzer bir yaklaşım, düşey yüklerin ikinci mertebe etkisinin hesaba katılmasında, düşey kolonların eğilme rijitliğinin ( $Ph^2/10$ ) mertebesinde azaltılıp birinci mertebe analizi yapmaktır. Bunun sonucu olarak yanal deplasmanlar artacak ve düşey yüklerin ikinci mertebe etkisi hesaba katılmış olacaktır [8].

#### 4.6 P-Delta Analizi Yapabilen Bilgisayar Yazılımları

P-Delta etkilerinin değerlendirilmesinde bir başka yaklaşım da ikinci mertebe etkileri hesaba katan bilgisayar analiz programları kullanmaktır. Günümüzde yapılardaki ikinci mertebe etkileri hesaplama yetisine sahip, ticari ulaşılabilirliği olan pek çok bilgisayar yazılım paketi vardır. Bu programlar yukarıda bahsedilen farklı P-Delta

hesap yaklaşımlarından herhangi birini kullanıyor olabilirler. Fakat, bilgisayar yazılım analizlerinin sonuçları birbirleriyle ve basitleştirilmiş el hesaplamalarıyla karşılaştırıldığında, bazı durumlarda, moment büyültme katsayısı yöntemi kullanılarak ulaşılmış sonuçlardan önemli farklılıklar gösterebilirler. Sonuçlar tutarlı olmadığı için, her programın hangi çözüm yöntemini kullandığını bilmek gerekir. Böylelikle kısıtlamalar bilinebilir ve uygun bir analiz yapılabilir [1]. Çerçevelerin her elemanındaki ikinci mertebe momentlerini belirlemek için ticari ulaşılabilirliği olan beş adet yapısal analiz programından bahsedilecektir.

**RISA-3D.** Dikkate alınan birinci yapısal analiz programı RISA-3D, ikinci mertebe momentlerini iteratif bir yöntemle hesaplar. Bu çözüm yöntemi, ikinci mertebe momentlerinin şekil 4.11'te görüldüğü gibi ikincil kesme kuvvetlerinin hesaplanması yoluyla hesaba katılması bakımından İteratif P-Delta Hesap Yöntemi'ne benzemektedir.



**Şekil 4.11: RISA- 3D P-Delta analizi**

Yöntem, modeli orijinal uygulanmış yüklerle çözerek başlar ve daha sonra şekil 4.11'te de görüldüğü gibi modeldeki her eleman için aşağıdaki eşitliğe göre ikincil kesme kuvveti,  $V'$ , hesaplanır. Sonra hesaplanmış ikincil kesme kuvvetleri orijinal yüklere eklenir ve model yeniden çözülür. Yeni çözümdeki yer değiştirmeler önceki çözümde elde edilen yer değiştirmelerle karşılaştırılır ve bu karşılaştırma kabul edilebilir bir yaklaşıma (% 0.05) ulaşana kadar işlemler tekrarlanır. Program, yöntemi denetler ve eğer çözümde büyük bir farklılık görülürse otomatik olarak

durur. Yer deşiştirmeler maksimum orijinal yer deşiştirmenin 1000 katından daha büyük bir hale gelirse , program modelin stabil olmadığını kabul eder. Bu çözüm yöntemi sadece çerçeve etkilerini ( $P-\Delta$  ) açıklar ve bireysel eleman etkilerini ( $P-\delta$ ) açıklamaya vakıf değildir. Tüm ikinci mertebe etkilerini daha yetkin bir biçimde ele almak için eleman zincirine ek düğüm noktaları sokulabilir, böylelikle düğüm noktaları da deformasyon yapacak ve  $P-\Delta$  etkisi hesaplanabilecektir.

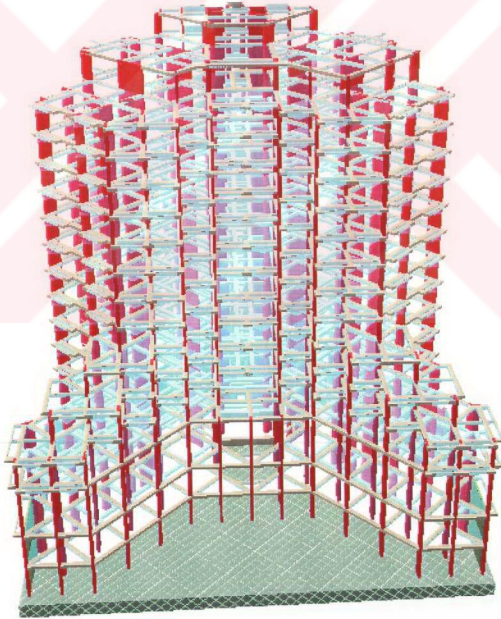
**ROBOT Millennium.** Bu yazılım P-Delta analizi için kapsamlı bir teorik temel sunarak çerçeve ( $P-\Delta$ ) etkilerini ele almak için her yük kademesindeki geometri ve rijitlik matrislerini güncelleştiren iteratif bir yöntem kullanır. Ayrıca, eleman etkilerini ( $P-\delta$ ), stabilite fonksiyonlarını analiz yöntemine dahil ederek ele alır.

**SAP2000 Plus.** SAP2000 Plus'ın kullanım kılavuzu elemanlardaki P- Delta eksensel kuvvetlerini belirlemek için iteratif analiz gerektiğini belirtmektedir. Bu program, her bir çerçeve elemanındaki eksensel kuvvetin, yapının bir ön analiziyle tahmin edildiğini açıklamaktadır. Daha sonra, eksensel kuvvetler dikkate alınarak denge denklemleri tekrar çözölür ve bu durum elemanlarda farklı eksensel kuvvetler yaratabilir. Eksensel kuvvetler ve deformasyonlar tipik bir 0.01 toleransına yaklaşana kadar ek iterasyonlar yapılır. Kullanma kılavuzu ayrıca SAP2000'in hem çerçeve ( $P-\Delta$ ) hem de üye ( $P-\delta$ ) P-Delta etkilerini açıklamaya vakıf olmasına rağmen, çerçeve etkilerinin belirlenmesi için programın kullanılmasını fakat eleman etkilerini belirlemek için uygulanabilir moment büyölme faktörlerinin kullanılmasını önerir.

**STAAD – III.** STAAD-III yazılımı da bir ikinci mertebe, P-Delta analizi gerçekleştirmeye vakıftır. Basitleştirilmiş çözüm yöntemi, ikincil etkileri dahil etmek için yeniden gözden geçirilip düzeltilmiş yük vektörleri kullanır. Önce, deformasyonlar, orijinal uygulanmış yüklere dayanarak hesaplanır. Sonra, ikincil yüklemeye yaratmak için deformasyonlar orijinal uygulanmış yüklerle birleştirilir. Yeni yüklemeye dayanarak, ikincil etkileri dahil etmek için yük vektörü yeniden gözden geçirilip düzenlenir. Son olarak, yeniden gözden geçirilip düzenlenmiş yük vektörleri yeni bir rijitlik analizinde kullanılır ve yeni eleman kuvvetleri ve reaksiyonları, yeni sapmalara dayanarak hesaplanır. Bu çözüm yöntemi sadece çerçeve P-Delta etkilerini açıklar ve bireysel üye etkilerini ( $P-\delta$ ) değerlendirmeye vakıf değildir [1].

## 5. P-DELTA ETKİLİ YAPI ANALİZİ

STA4 CAD bilgisayar yazılımı kullanılarak, görünüşü şekil 5.1 de verilen, 2 bodrum kat + 1 zemin kat + 14 normal kattan oluşan toplam 17 katlı betonarme çerçeve+perde taşıyıcı sistemli bir otel yapısının analizi yapılmıştır. Analiz önce P-Delta etkileri değerlendirmeye katılmadan daha sonra P-Delta etkileri hesaba dahil edilerek yapıp ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapı modeli ve analizine ait diğer bilgiler ekler kısmında verilmiştir.



Şekil 5.1 Yapının ön görünüşü



Tablo 5.1 P-Delta etkisi dahil edilmeyen duruma ait deprem kuvveti

DEPREM KUVVETİ (t)

Deprem tepe yükü  $F_{tx} = 103.60$   $F_{ty} = 101.41$  (t)

| X YÖNÜ    |              |                  |             | Y YÖNÜ       |                  |             |          |
|-----------|--------------|------------------|-------------|--------------|------------------|-------------|----------|
| Kat (dyf) | Modal Analiz | Eşdeğer dep.yön. | Deprem yükü | Modal Analiz | Eşdeğer dep.yön. | Deprem yükü | Kat tipi |
| 17        | 21.258       | 116.980          | 28.424      | 22.179       | 116.203          | 31.830      | UST KAT  |
| 16        | 67.154       | 52.741           | 89.792      | 69.144       | 58.299           | 99.231      | NORMAL   |
| 15        | 88.125       | 89.122           | 117.832     | 89.788       | 98.513           | 128.857     | NORMAL   |
| 14        | 65.832       | 82.231           | 88.024      | 66.254       | 90.896           | 95.083      | NORMAL   |
| 13        | 50.372       | 75.340           | 67.353      | 49.427       | 83.279           | 70.934      | NORMAL   |
| 12        | 40.887       | 68.449           | 54.671      | 39.756       | 75.662           | 57.054      | NORMAL   |
| 11        | 35.121       | 61.558           | 46.960      | 34.136       | 68.045           | 48.990      | NORMAL   |
| 10        | 31.647       | 54.668           | 42.315      | 30.745       | 60.428           | 44.123      | NORMAL   |
| 9         | 30.806       | 47.777           | 41.191      | 30.493       | 52.811           | 43.761      | NORMAL   |
| 8         | 30.640       | 40.886           | 40.969      | 31.128       | 45.194           | 44.673      | NORMAL   |
| 7         | 31.015       | 35.207           | 41.470      | 32.077       | 38.917           | 46.035      | NORMAL   |
| 6         | 32.467       | 30.217           | 43.411      | 33.896       | 33.402           | 48.645      | NORMAL   |
| 5         | 33.907       | 25.705           | 45.337      | 35.850       | 28.414           | 51.449      | NORMAL   |
| 4         | 29.201       | 17.727           | 39.044      | 31.425       | 19.595           | 45.098      | NORMAL   |
| 3         | 13.030       | 5.608            | 17.423      | 14.002       | 6.199            | 20.095      | NORMAL   |
| 2         | 21.691       | 379.689          | 21.691      | 22.206       | 379.689          | 22.206      | BODRUM   |
| 1         | 21.104       | 413.204          | 21.104      | 20.997       | 413.204          | 20.997      | BODRUM   |
| Σ         | 644.258      | 1597.110         | 847.012     | 653.503      | 1668.753         | 919.063     | GENEL    |
|           | 42.795       | 792.893          | 42.795      | 43.203       | 792.893          | 43.203      | BODRUM   |
|           | 601.462      | 804.217          | 804.217     | 610.300      | 875.860          | 875.860     | NORMAL   |

$V_t = W.A(t)/R_a(t) > 0,10$ . Ao.I.W 804.22 , 875.86 > 551.98  
X Deprem kontrol:  $1.00 \times 804.217 = 804.217 > 601.462 >>> 804.217$   
Y Deprem kontrol:  $1.00 \times 875.860 = 875.860 > 610.300 >>> 875.860$

Tablo 5.2 P-Delta etkisi hesaba dahil edildiği duruma ait deprem kuvveti

DEPREM KUVVETİ (t)

Deprem tepe yükü  $F_{tx} = 103.44$   $F_{ty} = 101.39$  (t)

| X YÖNÜ    |              |                  |             | Y YÖNÜ       |                  |             |          |
|-----------|--------------|------------------|-------------|--------------|------------------|-------------|----------|
| Kat (dyf) | Modal Analiz | Eşdeğer dep.yön. | Deprem yükü | Modal Analiz | Eşdeğer dep.yön. | Deprem yükü | Kat tipi |
| 17        | 21.827       | 126.919          | 38.986      | 32.365       | 126.194          | 41.280      | UST KAT  |
| 16        | 78.058       | 63.127           | 100.380     | 80.173       | 58.376           | 108.147     | NORMAL   |
| 15        | 99.744       | 99.773           | 129.179     | 101.836      | 98.644           | 138.447     | NORMAL   |
| 14        | 66.509       | 82.832           | 88.323      | 68.405       | 91.017           | 95.675      | NORMAL   |
| 13        | 50.561       | 75.891           | 67.145      | 51.658       | 83.390           | 72.251      | NORMAL   |
| 12        | 41.013       | 68.950           | 54.465      | 41.990       | 75.763           | 58.730      | NORMAL   |
| 11        | 35.242       | 62.008           | 46.800      | 36.289       | 68.136           | 50.755      | NORMAL   |
| 10        | 31.809       | 55.067           | 42.242      | 32.651       | 60.508           | 45.667      | NORMAL   |
| 9         | 30.958       | 48.126           | 41.112      | 31.909       | 52.881           | 44.630      | NORMAL   |
| 8         | 30.895       | 41.185           | 41.028      | 32.028       | 45.254           | 44.796      | NORMAL   |
| 7         | 31.405       | 35.465           | 41.705      | 32.536       | 38.969           | 45.506      | NORMAL   |
| 6         | 32.950       | 30.438           | 43.756      | 34.029       | 33.446           | 47.595      | NORMAL   |
| 5         | 34.660       | 25.893           | 46.028      | 35.808       | 28.452           | 50.082      | NORMAL   |
| 4         | 30.205       | 17.856           | 40.111      | 31.322       | 19.621           | 43.808      | NORMAL   |
| 3         | 13.493       | 5.649            | 17.918      | 13.934       | 6.208            | 19.489      | NORMAL   |
| 2         | 21.904       | 389.689          | 21.904      | 22.007       | 389.689          | 22.007      | BODRUM   |
| 1         | 30.775       | 413.204          | 20.775      | 20.602       | 423.204          | 20.602      | BODRUM   |
| Σ         | 682.008      | 1632.072         | 881.857     | 699.541      | 1699.751         | 949.466     | GENEL    |
|           | 42.679       | 792.893          | 42.679      | 42.608       | 792.893          | 42.608      | BODRUM   |
|           | 639.330      | 839.179          | 839.179     | 656.932      | 906.858          | 906.858     | NORMAL   |

$V_t = W.A(t)/R_a(t) > 0,10$ . Ao.I.W 809.18 , 906.86 > 551.98  
X Deprem kontrol:  $1.00 \times 839.179 = 839.179 > 639.330 >>> 839.179$   
Y Deprem kontrol:  $1.00 \times 906.858 = 906.858 > 626.932 >>> 906.858$

Yukarıda P- Delta etkilerinin hesaba dahil edilmediği ve edildiği durumlara ait deprem kuvvetleri sırasıyla tablo 5.1 ve 5.2 de verilmiştir. Bu tabloların incelenmesiyle P-Delta etkisinin yapıya etkileyen deprem kuvvetinde bir artışa sebebiyet olduğu görülür. Bunun neticesinde kat deplasmanlarında da bir artış meydana gelmiştir. Bu artış tablo 5.3 ve 5.4 ün incelenmesiyle görülebilir.

Tablo 5.3 P-Delta etkisi dahil edilmeyen duruma ait kat deplasmanları

| Kat Deprem deplasmanları |                |                  |                |                  |                |                  |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Kat<br>(dyf)             | 9. yükleme     |                  | 10. yükleme    |                  | 11. yükleme    |                  | 12. yükleme    |                  |
|                          | $\delta x$ (m) | $\theta z$ (rad) | $\delta x$ (m) | $\theta z$ (rad) | $\delta y$ (m) | $\theta z$ (rad) | $\delta y$ (m) | $\theta z$ (rad) |
| 17                       | 0.0686376      | 0.0012998        | 0.0677060      | 0.0001280        | -0.072742      | -0.001397        | -0.071387      | -0.000102        |
| 16                       | 0.0658092      | 0.0012313        | 0.0645763      | 0.0001146        | -0.069547      | -0.001318        | -0.067943      | -0.000085        |
| 15                       | 0.0612920      | 0.0011373        | 0.0602137      | 0.0000934        | -0.064613      | -0.001216        | -0.063207      | -0.000064        |
| 14                       | 0.0566450      | 0.0010459        | 0.0556980      | 0.0000782        | -0.059582      | -0.001115        | -0.058338      | -0.000049        |
| 13                       | 0.0517726      | 0.0009503        | 0.0509511      | 0.0000645        | -0.054343      | -0.001010        | -0.053255      | -0.000035        |
| 12                       | 0.0466767      | 0.0008503        | 0.0459750      | 0.0000521        | -0.048904      | -0.000901        | -0.047967      | -0.000023        |
| 11                       | 0.0413858      | 0.0007460        | 0.0407982      | 0.0000408        | -0.043295      | -0.000788        | -0.042505      | -0.000013        |
| 10                       | 0.0359531      | 0.0006387        | 0.0354734      | 0.0000304        | -0.037572      | -0.000673        | -0.036921      | -0.000005        |
| 9                        | 0.0304536      | 0.0005302        | 0.0300733      | 0.0000212        | -0.031810      | -0.000558        | -0.031288      | 0.000006         |
| 8                        | 0.0249839      | 0.0004236        | 0.0246918      | 0.0000137        | -0.026103      | -0.000445        | -0.025698      | 0.0000045        |
| 7                        | 0.0196684      | 0.0003227        | 0.0194492      | 0.0000085        | -0.020575      | -0.000339        | -0.020270      | 0.0000057        |
| 6                        | 0.0146645      | 0.0002331        | 0.0145004      | 0.0000070        | -0.015379      | -0.000245        | -0.015153      | 0.0000031        |
| 5                        | 0.0101333      | 0.0001582        | 0.0100030      | 0.0000090        | -0.010672      | -0.000166        | -0.010500      | 0.0000003        |
| 4                        | 0.0062415      | 0.0000989        | 0.0061340      | 0.0000131        | -0.006620      | -0.000104        | -0.006487      | -0.000010        |
| 3                        | 0.0035809      | 0.0000570        | 0.0035147      | 0.0000139        | -0.003839      | -0.000061        | -0.003758      | -0.000013        |
| 2                        | 0.0011650      | 0.0000169        | 0.0011511      | 0.0000097        | -0.001278      | -0.000018        | -0.001261      | -0.000010        |
| 1                        | 0.0003261      | 0.0000038        | 0.0003217      | 0.0000019        | -0.000359      | -0.000004        | -0.000353      | -0.000002        |

Tablo 5.4 P-Delta etkisi hesaba dahil edildiği duruma ait kat deplasmanları

| Kat Deprem deplasmanları |                |                  |                |                  |                |                  |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Kat<br>(dyf)             | 9. yükleme     |                  | 10. yükleme    |                  | 11. yükleme    |                  | 12. yükleme    |                  |
|                          | $\delta x$ (m) | $\theta z$ (rad) | $\delta x$ (m) | $\theta z$ (rad) | $\delta y$ (m) | $\theta z$ (rad) | $\delta y$ (m) | $\theta z$ (rad) |
| 17                       | 0.0707582      | 0.0015843        | 0.0700902      | 0.0002247        | -0.076179      | -0.001751        | -0.078659      | -0.000247        |
| 16                       | 0.0678899      | 0.0014125        | 0.0669469      | 0.0002084        | -0.074027      | -0.001666        | -0.072242      | -0.000224        |
| 15                       | 0.0634443      | 0.0013141        | 0.0625754      | 0.0001833        | -0.068333      | -0.001654        | -0.069550      | -0.000195        |
| 14                       | 0.0588360      | 0.0012176        | 0.0580389      | 0.0001636        | -0.064395      | -0.001443        | -0.064683      | -0.000169        |
| 13                       | 0.0539520      | 0.0011161        | 0.0532601      | 0.0001446        | -0.058190      | -0.001327        | -0.058587      | -0.000145        |
| 12                       | 0.0468388      | 0.0009095        | 0.0462510      | 0.0001262        | -0.052787      | -0.001206        | -0.052281      | -0.000121        |
| 11                       | 0.0415315      | 0.0007981        | 0.0410418      | 0.0000984        | -0.043212      | -0.000981        | -0.042795      | -0.000099        |
| 10                       | 0.0360842      | 0.0006834        | 0.0356854      | 0.0000713        | -0.037520      | -0.000752        | -0.037182      | -0.000079        |
| 9                        | 0.0305718      | 0.0005676        | 0.0302551      | 0.0000553        | -0.031785      | -0.000624        | -0.031517      | -0.000061        |
| 8                        | 0.0250906      | 0.0004537        | 0.0248447      | 0.0000412        | -0.026104      | -0.000498        | -0.025892      | -0.000045        |
| 7                        | 0.0197645      | 0.0003460        | 0.0195750      | 0.0000298        | -0.020599      | -0.000380        | -0.020429      | -0.000033        |
| 6                        | 0.0147492      | 0.0002502        | 0.0146006      | 0.0000226        | -0.015420      | -0.000275        | -0.015279      | -0.000025        |
| 5                        | 0.0102032      | 0.0001698        | 0.0100796      | 0.0000196        | -0.010722      | -0.000187        | -0.010595      | -0.000022        |
| 4                        | 0.0062926      | 0.0001060        | 0.0061892      | 0.0000196        | -0.006668      | -0.000117        | -0.006557      | -0.000022        |
| 3                        | 0.0036197      | 0.0000612        | 0.0035527      | 0.0000177        | -0.003885      | -0.000068        | -0.003808      | -0.000020        |
| 2                        | 0.0011944      | 0.0000185        | 0.0011718      | 0.0000113        | -0.001326      | -0.000021        | -0.001294      | -0.000013        |
| 1                        | 0.0003348      | 0.0000045        | 0.0003273      | 0.0000025        | -0.000375      | -0.000005        | -0.000363      | -0.000003        |

Eklerde tablo A.2 ve tablo A.3’de sırasıyla P-Delta etkilerini içermeyen ve içeren, dört farklı deprem yüklemesinden elde edilen, her kata ait stabilite indeksi değeri  $\theta_i$  ve her kata ait kolon ve perdelerde hesaplanan görelî kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri  $(\Delta_i)_{\max}$  ve bunun kat yüksekliğine oranları görülmektedir. Elde edilen bu değerlerin maksimumu bölüm 2’de denklem (2.21) ile verilen ikinci mertebe gösterge değeri ile aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır. Ayrıca ikinci mertebe etkilerinin artmasını önlemek amacıyla ABYYHY’de belirtilen ve burada denklem 2.23 ile verilen kısıtlamalar ile karşılaştırma yapılmıştır. Burada denklem 2.23’deki kısıtlamalardan elverişsiz olanı  $\frac{\Delta_{i,\max}}{h_i} \leq (0.02/R)$  dir. Bunun sebebi, yapı

perde+çerçeve taşıyıcı sistemli olduğundan taşıyıcı sistem davranış katsayısı  $R = 7$  alınarak çözüm yapılmış olmasıdır. Dolayısıyla  $(0.02/R)=0.0028$  olmuştur.

P-Delta etkisi dikkate alınmadığı hesap sonuçlarından;

$$\max \theta_i = 0.03545 < 0.12$$

$$\max \frac{(\Delta_i)_{\max}}{h_i} = 0.0056 > 0.0028$$

P-Delta etkisi dikkate alındığı hesap sonuçlarından;

$$\max \theta_i = 0.03581 < 0.12$$

$$\max \frac{(\Delta_i)_{\max}}{h_i} = 0.006 > 0.0028$$

Burada her iki analiz sonucunda da denklem (2.23)’ün sağlanmadığı görülmektedir. Fakat eklerde sunulan  $(\Delta_i)_{\max}/h_i$  değerlerine dikkat edilirse bu koşulun sadece yapının en üst kat seviyesinde sağlanmadığı görülür ve şekil 5.1’deki yapı ön görünüşünden de açıkça görüleceği gibi bu kat seviyesi asansör kovanının en üst seviyesine tekabül etmektedir. Dolayısıyla bu 17. kat seviyesi tüm yapı davranışını karakterize etmez. Yine de bu kısımda hasar oluşmasını önlemek amaçlı rijitleştirici önlemler alınmasında fayda vardır.

Tablo 5.5 P-Delta etkisi dahil edilmeyen duruma ait taban toplam momentleri

DEPREM PERDELERİ TABAN MOMENT KONTROLÜ  
Kat deprem momentleri (tm)

| Kat | H (m)  | F <sub>x</sub> | F <sub>x</sub> . H | F <sub>y</sub> | F <sub>y</sub> . H |
|-----|--------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 17  | 44.10  | 28.42          | 1253.48            | 31.83          | 1403.72            |
| 16  | 41.80  | 89.79          | 3753.31            | 99.23          | 4147.86            |
| 15  | 38.80  | 117.83         | 4571.90            | 128.86         | 4999.65            |
| 14  | 35.80  | 88.02          | 3151.25            | 95.08          | 3403.98            |
| 13  | 32.80  | 67.35          | 2209.17            | 70.93          | 2326.65            |
| 12  | 29.80  | 54.67          | 1629.18            | 57.05          | 1700.22            |
| 11  | 26.80  | 46.96          | 1258.54            | 48.99          | 1312.92            |
| 10  | 23.80  | 42.32          | 1007.11            | 44.12          | 1050.14            |
| 9   | 20.80  | 41.19          | 856.77             | 43.76          | 910.24             |
| 8   | 17.80  | 40.97          | 729.25             | 44.67          | 795.17             |
| 7   | 14.80  | 41.47          | 613.76             | 46.03          | 681.31             |
| 6   | 11.80  | 43.41          | 512.25             | 48.65          | 574.01             |
| 5   | 8.80   | 45.34          | 398.97             | 51.45          | 452.75             |
| 4   | 5.80   | 39.04          | 226.46             | 45.10          | 261.57             |
| 3   | 3.30   | 17.42          | 57.50              | 20.10          | 66.31              |
| 2   | BODRUM | -              | -                  | -              | -                  |
| 1   | BODRUM | -              | -                  | -              | -                  |

M<sub>dx</sub>= 22228.89 M<sub>dy</sub>= 24086.51

Tablo 5.6 P-Delta etkisi dahil edilmediği duruma ait perde toplam momentleri

Perde taban momentleri (tm)

M : Perde ve Panel deprem momentleri

ΣM<sub>k</sub> : Perdelerde; bağlı olduğu kirişlerin deprem momentlerinin toplamı

Panellerde ise; başlık kolonlarından oluşan deprem momentlerinin toplamıdır.

| Perde | M <sub>x</sub> | ΣM <sub>kx</sub> = | ΣM <sub>xx</sub> | M <sub>y</sub> | ΣM <sub>ky</sub> = | ΣM <sub>yy</sub> |
|-------|----------------|--------------------|------------------|----------------|--------------------|------------------|
| S3004 | 5.62           | 206.12             | 211.74           | 65.60          | 280.70             | 346.30           |
| S3005 | 5.51           | 160.03             | 165.54           | 74.98          | 325.05             | 400.03           |
| S3006 | 3.24           | 169.70             | 172.94           | 79.71          | 327.89             | 407.60           |
| S3007 | 146.95         | 259.13             | 406.07           | 190.06         | 249.25             | 439.31           |
| S3017 | 12.11          | 253.45             | 265.56           | 997.19         | 634.50             | 1631.69          |
| S3018 | 15.42          | 483.33             | 498.74           | 1129.80        | 632.41             | 1762.21          |
| S3019 | 109.56         | 591.34             | 700.90           | 3.27           | 91.97              | 95.24            |
| S3020 | 109.82         | 612.79             | 722.61           | 3.49           | 95.70              | 99.19            |
| S3024 | 185.25         | 235.33             | 420.58           | 152.43         | 271.07             | 423.50           |
| S3035 | 63.29          | 268.76             | 332.05           | 5.99           | 214.88             | 220.87           |
| S3037 | 962.11         | 579.60             | 1541.70          | 12.66          | 261.93             | 274.59           |
| S3048 | 72.31          | 308.62             | 380.93           | 5.88           | 163.07             | 168.95           |
| S3050 | 1089.60        | 608.32             | 1697.91          | 16.28          | 495.34             | 511.62           |
| S3051 | 3.15           | 87.34              | 90.48            | 113.79         | 619.49             | 733.28           |
| S3052 | 76.72          | 299.00             | 375.72           | 3.42           | 169.55             | 172.96           |
| S3056 | 3.36           | 90.82              | 94.18            | 114.06         | 640.39             | 754.45           |
| S4040 | 59.59          | 206.15             | 265.74           | 76.18          | 244.11             | 320.29           |
| S4046 | 73.13          | 209.47             | 282.60           | 60.01          | 196.44             | 256.45           |
| S3003 | 126.81         | 261.63             | 388.44           | 78.95          | 172.72             | 251.67           |
| S3008 | 68.96          | 239.92             | 308.88           | 74.27          | 215.80             | 290.07           |
| S3009 | 1655.87        | 585.80             | 2241.67          | 2354.92        | 666.68             | 3021.61          |
| S3013 | 72.50          | 171.70             | 244.20           | 87.37          | 151.51             | 238.88           |
| S3014 | 87.23          | 148.39             | 235.61           | 75.80          | 181.48             | 257.28           |
| S3015 | 817.44         | 701.63             | 1519.07          | 1000.62        | 658.31             | 1658.93          |
| S3025 | 76.48          | 166.40             | 242.88           | 131.99         | 273.20             | 405.18           |
| S3057 | 71.65          | 204.53             | 276.18           | 71.16          | 248.13             | 319.29           |

TOPLAM 5973.68 14082.95 6979.89 15461.46  
X yönü  $\alpha_m = 14082.95 / 22228.89 = 0.63$  Y yönü  $\alpha_m = 15461.46 / 24086.51 = 0.64$

Tablo 5.7 P-Delta etkisi dahil edilen duruma ait taban toplam momentleri

DEPREM PERDELERİ TABAN MOMENT KONTROLÜ  
Kat deprem momenti (tm)

| Kat | H (m)  | Fx     | Fx . H  | Fy     | Fy . H  |
|-----|--------|--------|---------|--------|---------|
| 17  | 44.10  | 28.99  | 1778.28 | 31.28  | 1879.45 |
| 16  | 41.80  | 90.38  | 4277.90 | 98.15  | 4602.55 |
| 15  | 38.80  | 119.18 | 4624.14 | 128.45 | 4983.73 |
| 14  | 35.80  | 88.32  | 3161.96 | 95.68  | 3425.17 |
| 13  | 32.80  | 67.14  | 2202.35 | 72.25  | 2369.83 |
| 12  | 29.80  | 54.46  | 1623.05 | 58.73  | 1750.14 |
| 11  | 26.80  | 46.80  | 1254.25 | 50.76  | 1360.24 |
| 10  | 23.80  | 42.24  | 1005.36 | 45.67  | 1086.88 |
| 9   | 20.80  | 41.11  | 855.13  | 44.63  | 928.29  |
| 8   | 17.80  | 41.03  | 730.30  | 44.80  | 797.37  |
| 7   | 14.80  | 41.71  | 617.24  | 45.51  | 673.49  |
| 6   | 11.80  | 43.76  | 516.33  | 47.59  | 561.62  |
| 5   | 8.80   | 46.03  | 405.04  | 50.08  | 440.73  |
| 4   | 5.80   | 40.11  | 232.64  | 43.81  | 254.09  |
| 3   | 3.30   | 17.92  | 59.13   | 19.49  | 64.31   |
| 2   | BODRUM | -      | -       | -      | -       |
| 1   | BODRUM | -      | -       | -      | -       |

Mdx= 24343.10 Mdy= 26177.88

Tablo 5.8 P-Delta etkisi dahil edilen duruma ait perde toplam momentleri

Perde taban momenti (tm)

M : Perde ve Panel deprem momenti

ΣMk : Perdelerde; bağlı olduğu kirişlerin deprem momentlerinin toplamı

Panellerde ise; başlık kolonlarından oluşan deprem momentlerinin toplamıdır.

| Perde | Mx      | ΣMk =  | ΣMr     | My      | ΣMyk = | ΣMr     |
|-------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
| S3004 | 5.57    | 203.24 | 208.81  | 66.14   | 284.56 | 350.70  |
| S3005 | 5.46    | 157.22 | 162.68  | 76.49   | 333.87 | 510.36  |
| S3006 | 3.21    | 167.59 | 170.80  | 81.70   | 337.80 | 519.50  |
| S3007 | 145.91  | 255.89 | 401.80  | 193.91  | 250.77 | 544.68  |
| S3017 | 12.08   | 253.27 | 265.36  | 1005.80 | 643.26 | 1649.06 |
| S3018 | 15.41   | 483.13 | 498.54  | 1152.36 | 649.31 | 2301.68 |
| S3019 | 109.42  | 591.08 | 700.50  | 3.35    | 94.71  | 98.06   |
| S3020 | 109.68  | 612.38 | 722.06  | 3.59    | 98.91  | 102.50  |
| S3024 | 187.81  | 236.79 | 424.59  | 149.65  | 262.97 | 512.62  |
| S3035 | 63.77   | 271.66 | 335.42  | 5.85    | 208.14 | 214.00  |
| S3037 | 969.47  | 585.86 | 2055.34 | 12.53   | 260.06 | 272.59  |
| S3048 | 73.32   | 314.24 | 387.56  | 5.74    | 156.94 | 162.69  |
| S3050 | 1104.77 | 619.22 | 2223.99 | 16.16   | 492.13 | 508.28  |
| S3051 | 3.20    | 89.05  | 92.24   | 112.88  | 615.70 | 728.58  |
| S3052 | 78.00   | 304.97 | 382.97  | 3.33    | 164.76 | 168.09  |
| S3056 | 3.42    | 92.79  | 96.21   | 113.13  | 636.20 | 749.34  |
| S4040 | 59.55   | 208.20 | 267.76  | 77.28   | 249.75 | 327.03  |
| S4046 | 73.94   | 212.90 | 286.84  | 59.57   | 199.36 | 258.93  |
| S3003 | 125.15  | 257.82 | 382.97  | 81.45   | 170.78 | 252.24  |
| S3008 | 67.14   | 237.76 | 304.89  | 77.33   | 223.83 | 301.16  |
| S3009 | 1650.20 | 582.48 | 2732.68 | 2355.33 | 655.69 | 3511.02 |
| S3013 | 72.78   | 167.44 | 240.22  | 87.31   | 144.44 | 231.75  |
| S3014 | 87.45   | 145.42 | 232.88  | 75.89   | 172.85 | 248.75  |
| S3015 | 818.23  | 699.08 | 2017.31 | 983.79  | 647.14 | 2130.92 |
| S3025 | 78.02   | 165.95 | 243.96  | 128.06  | 264.18 | 392.25  |
| S3057 | 73.47   | 209.38 | 282.84  | 67.27   | 242.66 | 309.93  |

TOPLAM 5996.42 16121.21 6995.92 17456.71

X yönü  $\alpha_m = 16121.21 / 24343.1 = 0.66$

Y yönü  $\alpha_m = 17456.71 / 26177.88 = 0.67$

İki farklı analizden elde edilen momentler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Tablo 5.9 Analiz sonuçları taban momentleri özet tablosu

| P-Delta Etkisiz Analizden Elde Edilen Taban Toplam Momentleri |                    |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| X Yönü (tm)                                                   | Y Yönü (tm)        |
| $M_{dx} = 22222.8$                                            | $M_{dy} = 24086.5$ |
| P-Delta Etkili Analizden Elde Edilen Taban Toplam Momentleri  |                    |
| X Yönü (tm)                                                   | Y Yönü (tm)        |
| $M_{dx} = 24343.1$                                            | $M_{dy} = 26177.8$ |

Tablo 5.10 Analiz sonuçları perdelerine gelen toplam moment özet tablosu

| P-Delta Etkisiz Analiz Sonucu Perdelerine Gelen Toplam Moment |                    |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| X Yönü (tm)                                                   | Y Yönü (tm)        |
| $M_{xr} = 14082.9$                                            | $M_{yr} = 15461.4$ |
| P-Delta Etkili Analiz Sonucu Perdelerine Gelen Toplam Moment  |                    |
| X Yönü (tm)                                                   | Y Yönü (tm)        |
| $M_{xr} = 16121.2$                                            | $M_{yr} = 17456.7$ |

Burada öncelikle P-Delta etkisini içermeyen ve sonra bu etkileri içeren analiz sonuçlarından elde edilen toplam moment değerlerinden açıkça görülmektedir ki P-Delta etkileri perde ve yapı taban momentlerinde artış meydana getirmiştir. Bu yapı için artış miktarı %10 mertebesindedir.

P-Delta etkisinin sayısal olarak hesaplamasına bir uygulama olarak analizi yapılan yapının 9. katına ait stabilite indeksi değeri ele alınan yönetmeliklere göre aşağıdaki gibi ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılacak olan ağırlık kuvvetleri tablo 5.11'den alınmıştır.

### Yapının 9. Katındaki P-Delta Etkisinin UBC'ye Göre Hesaplanması

Uniform Building Code ikinci mertebe etkilerin değerlendirilmesinde, ikincil momentlerin birincil momentlere oranı şeklinde ifade edilen bir stabilite indeksi tanımlar. Daha önce denklem (3.1)'de verilen bu ifade yapının 9. katı için aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta = \frac{M_s}{M_p} = \frac{P_x \Delta_x}{F_x H_x} = \frac{P_9 \Delta_9}{F_9 H_9} \quad (5.1)$$

Yapının 9.katına ait birincil momentler, bu kata etkiyen yanal kuvvet ile bu katın yüksekliğinin çarpımıdır. Bu kata etkiyen yanal kuvvet tablo 5.5'den hesaplanabilir,

$$F_9 = (28.42+89.79+117.83+88.02+67.35+54.67+46.96+42.32+41.19) = 576.4 \text{ ton}$$

Yapının 9.kat yüksekliği ise  $H_9=3$  metre dir.

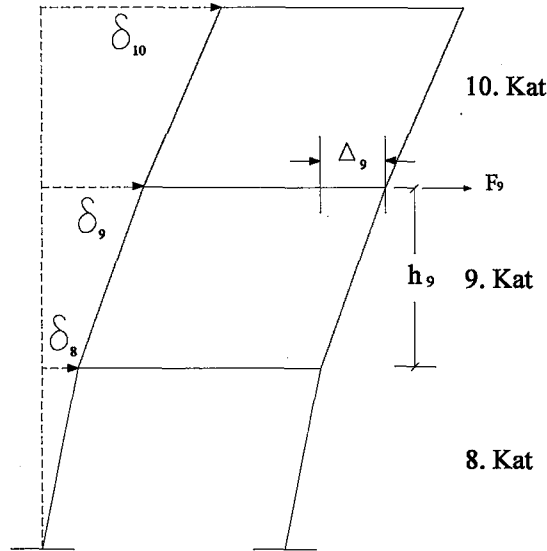
Yapının aynı katına ait ikincil moment ifadesi ise bu kat seviyesi ve üzerindeki toplam ağırlık yükü değeri ile aşağıdaki şekilden de görülen görelî kat ötelemesi değerinin çarpımıyla elde edilir. Burada tablo 5.3 ve tablo 5.11'den yararlanılarak,

$$\Delta_9 = \delta_9 - \delta_8 = 0.0304536 - 0.0249839$$

= 0.0054697 metre olarak elde edilir ve toplam ağırlık yükü ifadesi ise,

$$P_9 = (1206.69*7)+676.13+167.36+(3.4.67*7)+123.09+13.64$$

= 11559.7 ton olarak elde edilir.



Şekil 5.3 Yapının 9. katındaki rölatif yer değiştirme

Elde edilen bu değerlerin denklem (5.1)'de yerine koyulmasıyla, ikincil momentlerin birincil momentlere oranını ifade eden bir stabilite indeksi,

$$\theta_9 = \frac{M_s}{M_p} = \frac{P_9 \Delta_9}{F_9 H_9} = \frac{11559.7 * 0.0054697}{576.4 * 3} = 0.03656 \leq 0.1 \text{ olarak bulunur.}$$

### Yapının 9. Katındaki P-Delta Etkisinin ABYYHY'e Göre Hesaplanması

ABYYHY ikinci mertebe etkilerinin değerlendirilmeye alınıp alınmaması hususunda, burada daha önce denklem (3.34) ve (3.35)'de verilen iki kriter belirtmiştir. Bu kriterler yapının 9.katın esas alınmak suretiyle analiz sonuçlarına dayanılarak aşağıdaki gibi irdelenebilir.

$$\begin{aligned} (\Delta_9)_{\max} / h_9 &\leq 0.0035 \\ (\Delta_9)_{\max} / h_9 &\leq 0.02 / R \end{aligned} \quad (5.2a)$$

$$\theta_i = \frac{(\Delta_9)_{\text{ort}} \sum_{j=9}^{17} W_j}{V_9 h_9} \leq 0.12 \quad (5.2b)$$

Daha öncede belirtildiği gibi yapı perde+çerçeve taşıyıcı sistemli olduğundan R=7 alınarak çözüm yapılmıştır. Dolayısıyla yukarıdaki şartlardan elverişsiz olanı (0.02/R) değeri olmaktadır. Yukarıda bulunan kısıtların değerlendirilmesi için öncelikle 9.katına ait maksimum ve ortalama görelî kat ötelemesi ifadesi tablo EkA.3'deki +%5 Y yönü yüklemesi sonuçlarından alınmıştır. Buna göre,

9. kattaki ortalama görelî kat ötelemesi  $(\Delta_9)_{\text{ort}} = 0.0061447$  metre ve  
9.kattaki maksimum görelî kat ötelemesi  $(\Delta_9)_{\max} = 0.0084792$  metre dir.  
Burada 9.katın yüksekliği 3 metre ve  $(0.02/R) = 0.02 / 7 = 0.00285$  dir.

$$\begin{aligned} (\Delta_9)_{\max} / h_9 &= 0.0061447 / 3 \\ &= 0.002048 \leq (0.02 / R) = 0.00285 \end{aligned}$$

Yapının 9.katındaki  $\theta_9$  değerinin hesaplanması için yapının 9.katına etkiyen toplam ağırlık yükü  $\sum_{j=9}^N W_j$  ifadesiyle hesaplanır. Bu kat ve üzerindeki kat seviyelerindeki ölü ve hareketli yükler tablo 5.11'den alınmıştır.

$$\sum_{j=9}^{17} W_j = (1206.69 * 7) + 676.13 + 167.36 + (304.67 * 7) + 123.09 + 13.64 = 11559.7 \text{ ton}$$

9. kata ait kat kesme kuvveti, tablo 5.5 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$V_9 = (28.42+89.79+117.83+88.02+67.35+54.67+46.96+42.32+41.19) = \mathbf{576.4 \text{ ton}}$$

Yapının 9. kata etkiyen ağırlık yükü ile birlikte bu katın yüksekliği olan '3 metre', bu kata ait ortalama rölatif yer değiştirme '0.0061447' metre ve bu kata etkiyen kat kesme kuvveti '576.4 ton' değerleri denklem (5.2b)'de yerine yazılırsa,

$$\theta_9 = \frac{(0.0061447) * 11559.7}{576.4 * 3} = \mathbf{0.040109 \leq 0.12} \text{ olarak bulunur.}$$

### Yapının 9. Katındaki P-Delta Etkisinin Yeni Zelanda Yönetmeliğine Göre Hesaplanması

Yeni Zelanda Yönetmeliği P-Delta etkilerinin değerlendirilmesinde aşağıdaki kriteri sunar.

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} \leq \frac{V_i}{7.5 \sum_{j=i}^N W_j} \quad (5.3)$$

Bunu ifadeyi yapının 9. katına uyarlayacak olursak,

$$u_i = u_9 = \text{9.kata ait yanal öteleme değeri} = \mathbf{0.0304536 \text{ metre}}$$

$$u_{i-1} = u_8 = \text{8.kata ait yanal öteleme değeri} = \mathbf{0.0249839 \text{ metre}}$$

$$h_i = h_9 = \text{9.katın yerden yüksekliği} = \mathbf{28.2 \text{ metre}}$$

$$h_{i-1} = h_8 = \text{8.katın yerden yüksekliği} = \mathbf{25.2 \text{ metre}}$$

$$V_i = V_9 = \text{9. kata etkiyen kat kesme kuvveti}$$

$$= (28.42+89.79+117.83+88.02+67.35+54.67+46.96+42.32+41.1) = \mathbf{576.4 \text{ ton}}$$

$$7.5 \sum_{j=i}^N W_j = 7.5 \sum_{j=9}^{17} W_j = 7.5 \{ (1206.69 * 7) + 676.13 + 167.36 + (3.4.67 * 7) + 123.09 + 13.64 \}$$

$$= \mathbf{86697.75 \text{ ton}}$$

Bu ifadeler denklem (5.3)'de yerine koyulacak olursa,

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{h_i - h_{i-1}} = \frac{0.0304536 - 0.0249839}{28.2 - 25.20} = \mathbf{0.001823}$$

$$\frac{V_i}{7.5 \sum_{j=i}^N W_j} = \frac{576.4}{86697.75} = \mathbf{0.006648}$$

Buradan görülebileceği gibi  $\mathbf{0.001823 < 0.006648}$  dir.

## Yapının 9. Katındaki P-Delta Etkisinin Yunanistan Yönetmeliğine Göre Hesaplanması

Yunanistan yönetmeliği P-Delta etkilerinin değerlendirilmesinde, bir yönde etkiyen sismik kuvvetlerin, sismik kuvvetlerin yatay bileşeninden dolayı %30 arttırılmasını öngörür ve ikinci mertebe etkisini aşağıdaki parametreye bağlar.

$$\theta_i = \frac{N_i q \Delta_i}{V_i L_i} \quad (5.4)$$

Bunu ifadeyi yapının 9. katına uyarlayacak olursak,

$\Delta_i = \Delta_9$  =Yapının 9.katına ait göreceli kat deplasmanı = **0.0054697 metre**

$N_i = N_9$  = Yapının 9.katına etkiyen toplam sismik kütle

$$= W_9 + W_{10} + W_{11} + W_{12} + W_{13} + W_{14} + W_{15} + W_{16}$$

$$= (1206.69 * 7) + 676.1 + 167.36 + (304.67 * 7) + 123.09 + 13.64 = \mathbf{11559.7 \text{ ton}}$$

$q$  = Yapı tepkisi düzeltme katsayısı **3.5** (Perde+Çerçeve taşıyıcı sistem)

$V_i = V_9$  = 9. kata etkiyen %30 arttırılmış kat kesme kuvveti

$$= 1.3(28.42 + 89.79 + 117.83 + 88.02 + 67.35 + 54.67 + 46.96 + 42.32 + 41.19) = \mathbf{749.3 \text{ ton}}$$

Bu ifadeleri denklem (5.4)'de yerine koyarsak,

$$\theta_i = \frac{N_9 q \Delta_9}{V_9 L_9} = \frac{11559.7 * 3.5 * 0.0054697}{749.3 * 3} = \mathbf{0.09844 < 0.1}$$

## Yapının 9. Katındaki P-Delta Etkisinin Diğer Yönetmeliklere Göre Hesaplanması

Eurocode 8, Porto Rico, Fransa ve Arjantin Yönetmeliklerinde P-Delta etkisinin belirlenmesi amacıyla stabilite katsayıları tanımlanmıştır. Bu katsayı kata etkiyen toplam ağırlık yükü ile kat rölatif yer değiştirmesi çapılmasıyla elde edilen ikincil momentin, kata etkiyen kesme kuvveti ile kat yüksekliğinin çarpımından oluşan birincil momente oranıdır. Yönetmeliklerde bu oran hep aynı olmasına rağmen yönetmeliklerin kullandığı bazı notasyonlar farklıdır. Dolayısıyla notasyonlar farklıda olsa momentlerin oranı aynı olduğundan sonuçlar da aynı olacaktır. Bu katsayılar aşağıda sırasıyla elde edilmiştir.

**Eurocode 8'e göre,**

$$d_r = d_9 = 9. \text{ kata ait göreceli kat deplasmanı} = 0.0304536 - 0.0249839 = \mathbf{0.0054697 \text{ metre}}$$

$$P_{\text{tot}} = \text{deprem durumunda göz önüne alınan katta ve üstündeki toplam düşey yükler} \\ = (1206.69 * 7) + 676.1 + 167.36 + (304.67 * 7) + 123.09 + 13.64 = \mathbf{11559.7 \text{ ton}}$$

$$h = 9. \text{ kat yüksekliği} = \mathbf{3 \text{ metre}}$$

$$V_{\text{tot}} = 9 \text{ kata ait toplam deprem kat kesme kuvveti} \\ = 28.42 + 89.79 + 117.83 + 88.02 + 67.35 + 54.67 + 46.96 + 42.32 + 41.1 = \mathbf{576.4 \text{ ton}}$$

Bu değerler yönetmelikteki ifade de yerine koyulursa,

$$\theta = \frac{P_{\text{tot}} d_r}{V_{\text{tot}} h} = \frac{11559.7 * 0.0054697}{576.4 * 3} = \mathbf{0.03656} \leq 0.1 \text{ olarak bulunur.}$$

**Porto Rico yönetmeliğine göre,**

$$P_x = P_9 = \text{göz önüne alınan kat üzerindeki toplam ağırlık}$$

$$= \sum_{i=9}^{17} W_i = (1206.69 * 7) + 676.1 + 167.36 + (304.67 * 7) + 123.09 + 13.6 = \mathbf{11559.7 \text{ ton}}$$

$$\Delta = \text{gözönüne alına kattaki rölatif kat ötelemesi} = 0.0304536 - 0.024983 = \mathbf{0.0054697 \text{ m}}$$

$$V_x = V_9 = \text{göz önüne alına kattaki kat kesme kuvveti} \\ = 28.42 + 89.79 + 117.83 + 88.02 + 67.35 + 54.67 + 46.96 + 42.32 + 41.1 = \mathbf{576.4 \text{ ton}}$$

$$H_x = H_9 = 9. \text{ katın yüksekliği} = \mathbf{3 \text{ metre}}$$

Bu değerler yönetmelikteki ifade de yerine koyulursa,

$$\theta_x = \frac{P_x \Delta}{V_x H_x} = \frac{P_9 \Delta}{V_9 H_9} = \frac{11559.7 * 0.0054697}{576.4 * 3} = \mathbf{0.03656} \leq 0.1 \text{ olarak bulunur.}$$

**Fransa yönetmeliğine göre,**

$$P_r = P_9 = 9. \text{ kat ve üzerindeki toplam sismik ağırlık}$$

$$= (1206.69 * 7) + 676.1 + 167.36 + (304.67 * 7) + 123.09 + 13.64 = \mathbf{11559.7 \text{ ton}}$$

$$\Delta_r = \Delta_9 = 9. \text{ katın rölatif yanal ötelemesi} = \mathbf{0.0054697 \text{ metre}}$$

$$F_r = F_9 = 9. \text{ kata etkiyen kat kesme kuvveti}$$

$$= 28.42 + 89.79 + 117.83 + 88.02 + 67.35 + 54.67 + 46.96 + 42.32 + 41.1 = \mathbf{576.4 \text{ ton}}$$

$$h_r = h_9 = 9. \text{ katın yüksekliği} = \mathbf{3 \text{ metre}}$$

Bu değerler yönetmelikteki ifade de yerine koyulursa,

$$\theta = \frac{\Delta_r P_r}{h_r F_r} = \frac{\Delta_9 P_9}{h_9 F_9} = \frac{0.0054697 * 11559.7}{3 * 576.4} = 0.03656 \leq 0.05 \text{ olarak bulunur.}$$

**Arjantin yönetmeliğine göre,**

$\beta_i = \beta_9 = 9$ . kata ait P-Delta katsayısı

$\Delta_i = \Delta_9 = 9$ . kata ait rölatif yanal öteleme = **0.0054697 metre**

$V_i = V_9 = 9$ . kata ait sismik kesme kuvveti

$$= 28.42 + 89.79 + 117.83 + 88.02 + 67.35 + 54.67 + 46.96 + 42.32 + 41.1 = 576.4 \text{ ton}$$

$H_i = H_9 = 9$ . katın yüksekliği = **3 metre**

$P_i = P_9 = 9$ . katın ve üzerindeki katlardaki toplam sismik ağırlık

$$= (1206.69 * 7) + 676.1 + 167.36 + (304.67 * 7) + 123.09 + 13.64 = 11559.7 \text{ ton}$$

Bu değerler yönetmelikteki ifade de yerine koyulursa,

$$\beta_i = \frac{P_i \Delta_i}{V_i H_i} = \frac{11559.7 * 0.0054697}{576.4 * 3} = 0.03656 \leq 0.08 \text{ olarak bulunur.}$$

**Tablo 5.11 Kat kütlesi ve rijitlik merkezi değerleri**

**KAT KÜTLESİ ve RİJİTLİK MERKEZİ (t)**

| Kat<br>(dyf) | H<br>(m) | Wg      | Wq     | Xg<br>(m) | Xr<br>(m) | Yg<br>(m) | Yr<br>(m) | ΣWk      |
|--------------|----------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 17           | 51.50    | 167.36  | 13.64  | 11.95     | 11.83     | 11.93     | 10.96     | 171.457  |
| 16           | 49.20    | 676.13  | 123.09 | 17.41     | 16.35     | 15.53     | 17.16     | 713.061  |
| 15           | 46.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.43     | 20.31     | 17.40     | 1298.094 |
| 14           | 43.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.95     | 20.31     | 17.93     | 1298.094 |
| 13           | 40.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.93     | 20.31     | 18.00     | 1298.094 |
| 12           | 37.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.93     | 20.31     | 18.00     | 1298.094 |
| 11           | 34.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.93     | 20.31     | 18.00     | 1298.094 |
| 10           | 31.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.93     | 20.31     | 18.00     | 1298.094 |
| 9            | 28.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.93     | 20.31     | 18.00     | 1298.094 |
| 8            | 25.20    | 1206.69 | 304.67 | 20.05     | 17.94     | 20.31     | 18.01     | 1298.094 |
| 7            | 22.20    | 1252.59 | 305.97 | 20.56     | 17.99     | 20.73     | 18.06     | 1344.385 |
| 6            | 19.20    | 1351.07 | 320.44 | 21.32     | 18.09     | 21.50     | 18.14     | 1447.201 |
| 5            | 16.20    | 1539.28 | 371.70 | 22.83     | 18.35     | 23.19     | 18.37     | 1650.792 |
| 4            | 13.20    | 1603.49 | 412.45 | 23.56     | 18.74     | 23.63     | 18.79     | 1727.230 |
| 3            | 10.70    | 882.08  | 261.31 | 20.15     | 18.54     | 20.73     | 18.59     | 960.469  |
| 2            | 7.40     | 1699.43 | 663.37 | 23.06     | 11.72     | 23.10     | 10.77     | 1898.444 |
| 1            | 3.70     | 1869.03 | 656.64 | 23.13     | 12.88     | 23.15     | 11.30     | 2066.021 |

$$\Sigma Wt = 22363.815$$

Tablo 5.12 Analiz sonucu elde edilen stabilite indeksi değerleri

| Katlar | Analiz sonucu elde edilen $\max \theta_i$ | Amerika UBC<br>$\theta = \frac{M_s}{M_p} = \frac{P_x \Delta_x}{F_x H_x}$ | ABYYHY<br>$(\Delta_i)_{ort} \sum_{j=1}^N W_j$<br>$\theta_i = \frac{V_i h_i}{V_i h_i}$ | Arjantin<br>$\beta_i = \frac{P_i \Delta_i}{V_i H_i}$ | Yunanistan<br>$\theta_i = \frac{N_i q \Delta_i}{V_i L_i}$ | Fransa<br>$\theta = \frac{\Delta_r P_r}{h_r F_r}$ | Eurocode 8, $\theta$<br>Porto Rico, $\theta_x$<br>$\theta = \frac{P_{tot} d_r}{V_{tot} h}, \theta_x = \frac{P_x \Delta}{V_x H_x}$ |
|--------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17     | 0.03288                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 16     | 0.01465                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 15     | 0.01710                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 14     | 0.01893                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 13     | 0.02226                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 12     | 0.02580                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 11     | 0.02910                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 10     | 0.03191                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 9      | 0.03386                                   | 0.03656<0.1                                                              | 0.040109<0.12                                                                         | 0.03656<0.08                                         | 0.0984<0.10                                               | 0.0365<0.05                                       | 0.03656<0.10                                                                                                                      |
| 8      | 0.03478                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 7      | 0.03581                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 6      | 0.03476                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 5      | 0.03255                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 4      | 0.02699                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 3      | 0.01819                                   | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 2      | 0.0000                                    | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |
| 1      | 0.0000                                    | <0.1                                                                     | <0.12                                                                                 | <0.08                                                | <0.10                                                     | <0.05                                             | <0.10                                                                                                                             |

Yukarıdaki tabloda, incelenen yönetmeliklere göre hesaplanmış yapının 9. katındaki stabilite indeksi değerleri yer almaktadır. Bunlara ilave olarak tüm yapının analizi sonucu elde edilen yapının her katına ait stabilite indeksi değerleri görölmektedir. Bu değerler analiz başlangıcında belirtilen, sırasıyla X ve Y yönlerine %5 dışmerkezlikle ayrı ayrı uygulanan dört farklı yükleme sonuçlarından elde edilen stabilite indeksi değerlerinin her bir kat için maksimum değerini temsil etmektedir ve Ek A.2 ile Ek A.3'den alınan değerlerdir. Karşılaştırma olması bakımından bazı yönetmeliklerde belirtilen stabilite indeksleriyle kıyaslandığında, yapının hiçbir katında bu değerlerin aşılmadığı görölmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi P-Delta etkileri yapıya etkiyen kuvvetlerde, yapı kat deplasmanlarında ve toplam taban momentlerinde artış meydana getirmiştir. Bu artışlar tabloların ve eklerin incelenmesiyle açıkça görölmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde yapı malzemelerinin dayanımlarındaki gelişmeler oranında rijitliklerinde gelişme sağlanmadığından yapılar daha esnek olmakta ve trendin daha esnek ve narin olan yüksek yapılara doğru olması sebebiyle de potansiyel P-Delta etkileri önem kazanmaktadır. Bu durum basit ve doğru P-Delta analiz yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. İyi tasarlanmış bir yapı genellikle iyi bir rijitlik/ağırlık oranına sahiptir ve bu tip yapılarda önemli P-Delta etkileri meydana gelmez. P-Delta etkilerini içeren ve içermeyen iki farklı analiz sonucu P-Delta etkilerinin büyüklüğü görülebilir. Eğer aynı yanal yük için yanal yer değiştirme %5 ten fazla ise, temel tasarımın fazla esnek olduğu ve yapının yeniden tasarlanması gerektiği düşünülebilir. Fakat, yanal rijitliğine oranla büyük ağırlık yükü etkisindeki yapılarda P-Delta etkilerinin katılımı oldukça artar ve bazı durumlarda yer değiştirmeleri ve eleman kuvvetlerini %25 veya daha fazla oranlarda arttırabilir. Aşırı P-Delta etkileri çözümlemede stabilite yetersizliği ortaya çıkartabilir ve bu davranış belirgin bir biçimde ilave rijitliğe ihtiyacı olan zayıf tasarlanmış yapıların göstergesidir.

Yapı analizinde P-Delta etkilerini hesaba katan geleneksel yöntemler iteratif tekniklere dayanır. Bu iteratif teknikler oldukça zaman alıcıdır ve yalnızca statik analizde kullanılabilir. Bina türü yapılarda, yapı ağırlığı yanal yük ve yer değiştirmelerden bağımsız olarak sabittir. Buna dayanarak yapıdaki P-Delta etkileri lineerize edilebilir ve denge denklemleri şekil değiştirmiş geometri üzerinde kurularak problem iterasyon yapmadan kesin olarak bulunabilir. P-delta etkilerini yapısal rijitlik matrisine geometrik rijitlik düzeltmesi şeklinde katabilecek bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yöntem, statik analizde ve P-Delta etkilerinden dolayı mod biçimlerinin değiştiği ve periyotların büyüdüğü dinamik analizde kullanılabilir.

Denge denklemlerini yapının şekil değiştirmiş geometrisi üzerine kuran ikinci mertebe bilgisayar programları P-Delta etkilerinin elde edilmesinde en doğru yoldur. Fakat ikinci mertebe analiz yapabilen bilgisayar programlarını tek bir kavram olarak ele almak pek doğru olmaz. Günümüzde P-Delta etkilerini hesaplama yetisine sahip

pek çok bilgisayar yazılım paketi vardır ve bu yazılımlar burada açıklanmış olan P-Delta hesap yaklaşımlarından herhangi birini kullanıyor olabilir. Bunun neticesinde farklı ikinci merteye analiz programları, aynı bir yapı için farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple hangi yazılımın hangi çözüm yöntemini kullandığını bilmek gerekir, böylelikle kısıtlamalar bilinebilir ve uygun bir analiz yapılabilir. Ayrıca yapıya uygun bir analiz prosedürü uygulayabilmek için yapının geometrisi ve yükleme durumu değerlendirilmelidir. İkinci merteye analiz, yapının uygun tasarımı ve tam bir analiz için gereklidir. Bilgisayar programları analizin yoğunluğunu azaltsa da mühendisin çözüm yöntemini anlaması ve ikinci merteye momentleri dikkatlice değerlendirmesi önemlidir.

Birinci merteye bilgisayar analiz programı, negatif eleman özelliklerini dikkate alabiliyorsa, P-delta etkilerinin değerlendirilmesinde negatif rijitlikli eleman yöntemi en iyi yöntemdir. Kolon eğilmesinden kaynaklanan etkilerinin dahil edilmediği durumlarda bile iterasyon gerektirmez. Yalnızca elde edilen sonuçlar, ikinci merteye analizi yapabilen programlardan elde edilen sonuçlara göre biraz küçüktür. Bu yöntem kayma modunda, eğilme modunda veya bu modların kombinasyonlarında deformasyon yapan yapılarda kullanılabilir.

Birinci merteye bilgisayar analiz programının negatif eleman özelliklerini değerlendirmeye katamaması durumunda, eğilme deformasyonu yapan ve yüksek çerçevelerde iteratif ağırlık yükü kullanılması uygundur. Bu yöntem, ağırlık yüklerinin eşdeğer kesme kuvvetlerine dönüştürüldüğü iteratif P-Delta analiz yöntemiyle aynı sonuçları vermekte ve bu yöntemle göre daha kolay ve hızlı bir biçimde uygulanabilmektedir. İteratif ağırlık yükü yöntemi aynı zamanda tüm yapı tiplerine de uygulanabilir.

Yanal yük analizi sonuçlarının nonlinear bir katsayı ile büyütülmesi esasına dayanan direkt yöntem de P-Delta etkisi değerlendirilmesinde yeterli ve doğru sonuçlar vermektedir. Fakat direkt yöntem yalnızca kayma modunda deformasyon yapan, yüksek olmayan ve orta yükseklikteki rijit çerçeveler için geçerlidir. Yöntemin türetilmesindeki, kat ötelemelerinin yalnızca kata etkiyen kesme kuvvetiyle orantılı olduğu varsayımı, önemli eğilme davranışı gerçekleştiren yapılarda geçerli değildir. Direkt yöntem kayma modunda deformasyon yapan orta yükseklikteki yapılar için

oldukça etkili sonuçlar verse de daha yüksek yapılar için iteratif ağırlık yükü yöntemi daha doğru yanıtlar verir ve ayrıca daha hızlı bir yöntemdir.

Ağırlık yüklerinin eşdeğer kesme kuvvetlerine dönüştürüldüğü iteratif P-Delta analizi yöntemi, eğilme ve kayma deformasyonu yapan yapılar için oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Fakat bu yöntemin yüksek yapılara uygulanması oldukça zaman alan bir işlemdir.

P-Delta etkilerinin değerlendirilmesinde büyültme katsayısı yöntemi hızlı fakat yaklaşık bir yöntemdir. Pratikte bu yöntem P-Delta etkilerinin yapı için önemli mertebede olup olmadığının belirlenmesi ve daha doğru P-Delta analiz yönteminin kullanılması gerekip gerekmediğinin belirlenmesinde kullanılır.

P-Delta etkileri sistemlerin elastik ve elastik ötesi rijitliklerinde düşüş meydana getirir ve buna paralel olarak yapıda deplasman artışına sebebiyet verir. Deformasyonlar ve ağırlık yükleri arasındaki nonlineer ilişki den dolayı göçme durumundaki yükler P-Delta analizinde kullanılmaz. Analizde kabul edilen eleman rijitlikleri göz önünde bulundurulan yükleme seviyesiyle ilişkili olmalıdır.

Ayrıca yapılan çalışmalar, taban izolasyonlu sistemlerde P-Delta etkisi hesaba katıldığında, deprem etkisi altında, taban izolasyonunda büyük deplasmanlar oluşurken katlar arası rölatif deplasmanların büyük ölçüde azaldığını göstermiştir. Dolayısıyla taban izolasyonlu sistemlerde P-Delta etkisini ihmal etmek mümkün değildir. Taban izolasyonunda oluşan fazla deplasmanlar eklenecek pasif kütle sönümleyici ile kolaylıkla azaltılabilmektedir.

Ayrıca kolon eğilmesinden oluşan ikinci mertebe etkileri de mevcuttur fakat bu ilave etkiler en uç durumda bile P-Delta etkilerinin %20 si kadardır ve pratikte birçok tasarımda önem teşkil etmez. Genellikle ağırlık yüklerinin düşey eksantrikliğini göz önünde bulundurmak yeterlidir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Schimizze, A.M.**, 2001. Comparison of P-Delta analyses of plane frame using commercial atructural analysis programs and current AISC design, *PhD Thesis*, State University and Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA 24061.
- [2] **Gaiotti , R., Smith, B.S.**, 1996. P-Delta analysis of building structures, *ASCE Journal of Structural Engineering*, **115**, 755-770.
- [3] **Sap2000 Concrete Design Manual**, 1997. Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.
- [4] **TS-500**, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [5] **Mertol, A. ve Mertol, H.C.**, 2002. Deprem Mühendisliği Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Ankara.
- [6] **Akiyama, H.**, 1985. Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings, University of Tokyo Pres, Tokyo
- [7] **MacRae, G.A. and Priestly, G.N. and Tao J.**, 1993. P- $\Delta$  design in seismic regions, *Structural Systems Research Project Technical Report*, SSRP-93/05, Universiy of California, San Diego La Jolla, California.
- [8] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [9] **Aldemir, Ü., Çelik, M. ve Bakioğlu, M.**, 1997. Depreme dayanıklı taban izolasyonlu yapılarda P-Delta, *Prof. Dr. A. Rifat Yarar Sempozyumu*, İTÜ, İstanbul, 10 Aralık, s. 15-24.
- [10] **Williams A.**, 2001. Seismic Design of Buildings and Bridges. Engineering Press, Texas. ,

- [11] **Paz, M.**, 1994. International Handbook of Earthquake Engineering. ITP Press, Kentucky.
- [12] **Deprem Yönetmeliği**, 1997. Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*,
- [13] **Macgregor J.G.**, 1997. Reinforced Concrete Mechanics and Design, University of Alberta, Prentice-Hall International .
- [14] **Hu, Y.X. and Liu, S.C. and Dong W.**, 1996. Earthquake Engineering. Chapman and Hall Press, London.
- [15] **Andrews A. L.**, 1977. Slenderness Effects in Earthquake Resisting Frames, *Bull. NZNSEE*, **10(3)**, 154-158.
- [16] **MacRae G. A., Carr A. J. and Walpole W. R.**, 1990. The Seismic Response of Steel Frames, *Research Report, 90-6*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.
- [17] **Moss P. J. and Carr A. J.**, 1980. The Effects of Large Displacements on the Earthquake Response of Tall Structures, *Bull. NZNSEE*, **13(4)**, 317-328.
- [18] **Paulay T.**, 1978. A Consideration of P- $\Delta$  Effects in Ductile Reinforced Concrete Frames, *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **11(3)**, 151-160.

## EKLER

Tablo A.1 Lineer olan ve olmayan sistemler genel özet tablosu

|                                                           | LINEER OLMAYAN SİSTEMLER                                                            |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                           | Lineer Sistemler                                                                    | Malzeme bakımından<br>(1)                                                           | Geometri değişimi bakımından                                                        |                                                                                     | İki bakımından                                                                       |                                                                                       |
|                                                           |                                                                                     |                                                                                     | ikinci merteye<br>(2.1)                                                             | sonlu deplasman<br>(2.2)                                                            | (3.1)                                                                                | (3.2)                                                                                 |
| malzemede iç kuvvet-şekil değiş-tirme (bünye denklemleri) | Lineer Elastik                                                                      | Lineer Elastik değil                                                                | Lineer Elastik                                                                      | Lineer Elastik                                                                      | Lineer Elastik değil                                                                 | Lineer Elastik değil                                                                  |
| Denge denklemlerinde yer değiş-tirmeler                   | Küçük                                                                               | Küçük                                                                               | Küçük değil                                                                         | Küçük değil                                                                         | Küçük değil                                                                          | Küçük değil                                                                           |
| Geometrik süreklilik denklemlerinde yer değıstirmeler     | Küçük                                                                               | Küçük                                                                               | Küçük                                                                               | Küçük değil                                                                         | Küçük                                                                                | Küçük değil                                                                           |
| $P$ -D bağıntısı                                          |  |  |  |  |  |  |

## Ek A.2 P-Delta etkilerini içermeyen $\pm 5$ X ve Y yönü yüklemeleri sonuçları

### X YÖNÜ (+%5)

| Kat | $\Delta X$ düst (m) | $\Delta X$ dalt (m) | $\Delta X$ ort | nbi  | nki  | $\Delta X/h$ | $\theta_i$ | kat tipi   |
|-----|---------------------|---------------------|----------------|------|------|--------------|------------|------------|
| 17  | 0.0120665           | 0.0130063           | 0.0125364      | 1.04 | 0.00 | 0.00565      | 0.03288    | Normal kat |
| 16  | 0.0029807           | 0.0055478           | 0.0042642      | 1.30 | 0.34 | 0.00185      | 0.01064    | Normal kat |
| 15  | 0.0032603           | 0.0066641           | 0.0049622      | 1.34 | 1.16 | 0.00222      | 0.01529    | Normal kat |
| 14  | 0.0034240           | 0.0069794           | 0.0052017      | 1.34 | 1.05 | 0.00233      | 0.01862    | Normal kat |
| 13  | 0.0035798           | 0.0073011           | 0.0054405      | 1.34 | 1.05 | 0.00243      | 0.02214    | Normal kat |
| 12  | 0.0037102           | 0.0075905           | 0.0056504      | 1.34 | 1.04 | 0.00253      | 0.02566    | Normal kat |
| 11  | 0.0038051           | 0.0078003           | 0.0058027      | 1.34 | 1.03 | 0.00260      | 0.02893    | Normal kat |
| 10  | 0.0038555           | 0.0078911           | 0.0058733      | 1.34 | 1.01 | 0.00263      | 0.03172    | Normal kat |
| 9   | 0.0038529           | 0.0078217           | 0.0058373      | 1.34 | 0.99 | 0.00261      | 0.03365    | Normal kat |
| 8   | 0.0038005           | 0.0075557           | 0.0056781      | 1.33 | 0.97 | 0.00252      | 0.03454    | Normal kat |
| 7   | 0.0036490           | 0.0074621           | 0.0055555      | 1.34 | 0.98 | 0.00249      | 0.03545    | Normal kat |
| 6   | 0.0034143           | 0.0070036           | 0.0052089      | 1.34 | 0.94 | 0.00233      | 0.03476    | Normal kat |
| 5   | 0.0030297           | 0.0061738           | 0.0046017      | 1.34 | 0.88 | 0.00206      | 0.03223    | Normal kat |
| 4   | 0.0019897           | 0.0079676           | 0.0049787      | 1.60 | 1.08 | 0.00137      | 0.02659    | Normal kat |
| 3   | 0.0016283           | 0.0035518           | 0.0025900      | 1.37 | 0.52 | 0.00108      | 0.01796    | Normal kat |
| 2   | 0.0007512           | 0.0014465           | 0.0010988      | 1.32 | 0.00 | 0.00039      | 0.00000    | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003003           | 0.0005039           | 0.0004021      | 1.25 | 0.00 | 0.00014      | 0.00000    | Bodrum kat |

### X YÖNÜ (-%5)

| Kat | $\Delta X$ düst (m) | $\Delta X$ dalt (m) | $\Delta X$ ort | nbi  | nki  | $\Delta X/h$ | $\theta_i$ | kat tipi   |
|-----|---------------------|---------------------|----------------|------|------|--------------|------------|------------|
| 17  | 0.0039482           | 0.0041319           | 0.0040400      | 1.02 | 0.00 | 0.00180      | 0.01060    | Normal kat |
| 16  | 0.0040314           | 0.0046095           | 0.0043205      | 1.07 | 1.07 | 0.00154      | 0.01078    | Normal kat |
| 15  | 0.0042848           | 0.0048515           | 0.0045681      | 1.06 | 1.06 | 0.00162      | 0.01408    | Normal kat |
| 14  | 0.0045393           | 0.0050489           | 0.0047941      | 1.05 | 1.05 | 0.00168      | 0.01716    | Normal kat |
| 13  | 0.0047890           | 0.0052484           | 0.0050187      | 1.05 | 1.05 | 0.00175      | 0.02042    | Normal kat |
| 12  | 0.0050046           | 0.0054272           | 0.0052159      | 1.04 | 1.04 | 0.00181      | 0.02368    | Normal kat |
| 11  | 0.0051674           | 0.0055540           | 0.0053607      | 1.04 | 1.03 | 0.00185      | 0.02673    | Normal kat |
| 10  | 0.0052607           | 0.0056028           | 0.0054318      | 1.03 | 1.01 | 0.00187      | 0.02933    | Normal kat |
| 9   | 0.0052675           | 0.0055474           | 0.0054075      | 1.03 | 1.00 | 0.00185      | 0.03117    | Normal kat |
| 8   | 0.0051647           | 0.0053567           | 0.0052607      | 1.02 | 0.97 | 0.00179      | 0.03200    | Normal kat |
| 7   | 0.0049262           | 0.0049901           | 0.0049581      | 1.01 | 0.94 | 0.00166      | 0.03163    | Normal kat |
| 6   | 0.0045295           | 0.0044332           | 0.0044813      | 1.01 | 0.90 | 0.00151      | 0.02990    | Normal kat |
| 5   | 0.0039387           | 0.0037212           | 0.0038300      | 1.03 | 0.85 | 0.00131      | 0.02682    | Normal kat |
| 4   | 0.0026297           | 0.0050196           | 0.0038246      | 1.31 | 1.00 | 0.00105      | 0.02043    | Normal kat |
| 3   | 0.0022098           | 0.0024079           | 0.0023088      | 1.04 | 0.60 | 0.00073      | 0.01601    | Normal kat |
| 2   | 0.0007769           | 0.0011933           | 0.0009851      | 1.21 | 0.00 | 0.00032      | 0.00000    | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003091           | 0.0004087           | 0.0003589      | 1.14 | 0.00 | 0.00011      | 0.00000    | Bodrum kat |

## Y YÖNÜ (+%5)

| Kat | ΔY dsol (m) | ΔY dsağ (m) | ΔY ort    | nbi  | nki  | ΔY/h    | θi      | kat tipi   |
|-----|-------------|-------------|-----------|------|------|---------|---------|------------|
| 17  | 0.0113216   | 0.0124995   | 0.0119106 | 1.05 | 0.00 | 0.00543 | 0.02789 | Normal kat |
| 16  | 0.0030017   | 0.0062313   | 0.0046165 | 1.35 | 0.39 | 0.00208 | 0.01039 | Normal kat |
| 15  | 0.0034686   | 0.0072210   | 0.0053448 | 1.35 | 1.16 | 0.00241 | 0.01496 | Normal kat |
| 14  | 0.0036159   | 0.0075157   | 0.0055658 | 1.35 | 1.04 | 0.00251 | 0.01819 | Normal kat |
| 13  | 0.0037523   | 0.0078051   | 0.0057787 | 1.35 | 1.04 | 0.00260 | 0.02161 | Normal kat |
| 12  | 0.0038639   | 0.0080546   | 0.0059593 | 1.35 | 1.03 | 0.00268 | 0.02499 | Normal kat |
| 11  | 0.0039413   | 0.0082210   | 0.0060812 | 1.35 | 1.02 | 0.00274 | 0.02810 | Normal kat |
| 10  | 0.0039763   | 0.0082673   | 0.0061218 | 1.35 | 1.01 | 0.00276 | 0.03072 | Normal kat |
| 9   | 0.0039610   | 0.0081549   | 0.0060580 | 1.35 | 0.99 | 0.00272 | 0.03248 | Normal kat |
| 8   | 0.0038956   | 0.0078460   | 0.0058708 | 1.34 | 0.97 | 0.00262 | 0.03319 | Normal kat |
| 7   | 0.0037441   | 0.0077435   | 0.0057438 | 1.35 | 0.98 | 0.00258 | 0.03399 | Normal kat |
| 6   | 0.0035135   | 0.0072615   | 0.0053875 | 1.35 | 0.94 | 0.00242 | 0.03326 | Normal kat |
| 5   | 0.0031281   | 0.0064137   | 0.0047709 | 1.34 | 0.89 | 0.00214 | 0.03082 | Normal kat |
| 4   | 0.0020691   | 0.0083638   | 0.0052164 | 1.60 | 1.09 | 0.00144 | 0.02561 | Normal kat |
| 3   | 0.0017135   | 0.0037441   | 0.0027288 | 1.37 | 0.52 | 0.00113 | 0.01737 | Normal kat |
| 2   | 0.0008186   | 0.0015800   | 0.0011993 | 1.32 | 0.00 | 0.00043 | 0.00000 | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003290   | 0.0005540   | 0.0004415 | 1.25 | 0.00 | 0.00015 | 0.00000 | Bodrum kat |

## Y YÖNÜ (-%5)

| Kat | ΔY dsol (m) | ΔY dsağ (m) | ΔY ort    | nbi  | nki  | ΔY/h    | θi      | kat tipi   |
|-----|-------------|-------------|-----------|------|------|---------|---------|------------|
| 17  | 0.0038697   | 0.0041220   | 0.0039958 | 1.03 | 0.00 | 0.00179 | 0.00936 | Normal kat |
| 16  | 0.0043927   | 0.0050470   | 0.0047198 | 1.07 | 1.18 | 0.00168 | 0.01062 | Normal kat |
| 15  | 0.0046253   | 0.0052102   | 0.0049178 | 1.06 | 1.04 | 0.00174 | 0.01377 | Normal kat |
| 14  | 0.0048700   | 0.0053801   | 0.0051251 | 1.05 | 1.04 | 0.00179 | 0.01675 | Normal kat |
| 13  | 0.0051065   | 0.0055423   | 0.0053244 | 1.04 | 1.04 | 0.00185 | 0.01991 | Normal kat |
| 12  | 0.0053085   | 0.0056784   | 0.0054935 | 1.03 | 1.03 | 0.00189 | 0.02304 | Normal kat |
| 11  | 0.0054574   | 0.0057614   | 0.0056094 | 1.03 | 1.02 | 0.00192 | 0.02592 | Normal kat |
| 10  | 0.0055365   | 0.0057682   | 0.0056524 | 1.02 | 1.01 | 0.00192 | 0.02836 | Normal kat |
| 9   | 0.0055290   | 0.0056753   | 0.0056022 | 1.01 | 0.99 | 0.00189 | 0.03004 | Normal kat |
| 8   | 0.0054091   | 0.0054539   | 0.0054315 | 1.00 | 0.97 | 0.00182 | 0.03070 | Normal kat |
| 7   | 0.0051580   | 0.0050455   | 0.0051017 | 1.01 | 0.94 | 0.00172 | 0.03019 | Normal kat |
| 6   | 0.0047486   | 0.0044567   | 0.0046027 | 1.03 | 0.90 | 0.00158 | 0.02841 | Normal kat |
| 5   | 0.0041368   | 0.0037322   | 0.0039345 | 1.05 | 0.85 | 0.00138 | 0.02542 | Normal kat |
| 4   | 0.0027744   | 0.0051280   | 0.0039512 | 1.30 | 1.00 | 0.00111 | 0.01940 | Normal kat |
| 3   | 0.0023549   | 0.0024913   | 0.0024231 | 1.03 | 0.61 | 0.00075 | 0.01543 | Normal kat |
| 2   | 0.0008478   | 0.0013025   | 0.0010751 | 1.21 | 0.00 | 0.00035 | 0.00000 | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003390   | 0.0004497   | 0.0003944 | 1.14 | 0.00 | 0.00012 | 0.00000 | Bodrum kat |

Ek A.3 P-Delta etkilerini içeren  $\pm 5\%$  X ve Y yönü yüklemeleri sonuçları

X YÖNÜ (+5)

| Kat | $\Delta X$ düst (m) | $\Delta X$ dalt (m) | $\Delta X$ ort | nbi  | nki  | $\Delta X/h$ | $\theta_i$ | kat tipi   |
|-----|---------------------|---------------------|----------------|------|------|--------------|------------|------------|
| 17  | 0.0105463           | 0.0138317           | 0.0110390      | 1.04 | 0.00 | 0.00601      | 0.02839    | Normal kat |
| 16  | 0.0033412           | 0.0060294           | 0.0046853      | 1.29 | 0.42 | 0.00201      | 0.01157    | Normal kat |
| 15  | 0.0038126           | 0.0074036           | 0.0056081      | 1.32 | 1.20 | 0.00247      | 0.01710    | Normal kat |
| 14  | 0.0034440           | 0.0072202           | 0.0053321      | 1.35 | 0.95 | 0.00241      | 0.01893    | Normal kat |
| 13  | 0.0035208           | 0.0074892           | 0.0055050      | 1.36 | 1.03 | 0.00250      | 0.02226    | Normal kat |
| 12  | 0.0036395           | 0.0077835           | 0.0057115      | 1.36 | 1.04 | 0.00259      | 0.02580    | Normal kat |
| 11  | 0.0037294           | 0.0079973           | 0.0058633      | 1.36 | 1.03 | 0.00267      | 0.02910    | Normal kat |
| 10  | 0.0037779           | 0.0080875           | 0.0059327      | 1.36 | 1.01 | 0.00270      | 0.03191    | Normal kat |
| 9   | 0.0037768           | 0.0080138           | 0.0058953      | 1.36 | 0.99 | 0.00267      | 0.03386    | Normal kat |
| 8   | 0.0037318           | 0.0077415           | 0.0057367      | 1.35 | 0.97 | 0.00258      | 0.03478    | Normal kat |
| 7   | 0.0035943           | 0.0076726           | 0.0056335      | 1.36 | 0.98 | 0.00256      | 0.03581    | Normal kat |
| 6   | 0.0033695           | 0.0072205           | 0.0052950      | 1.36 | 0.94 | 0.00241      | 0.03520    | Normal kat |
| 5   | 0.0029770           | 0.0063610           | 0.0046690      | 1.36 | 0.88 | 0.00212      | 0.03255    | Normal kat |
| 4   | 0.0019531           | 0.0082120           | 0.0050825      | 1.62 | 1.09 | 0.00142      | 0.02699    | Normal kat |
| 3   | 0.0016170           | 0.0036617           | 0.0026393      | 1.39 | 0.52 | 0.00111      | 0.01819    | Normal kat |
| 2   | 0.0007533           | 0.0014983           | 0.0011258      | 1.33 | 0.00 | 0.00040      | 0.00000    | Bodrum kat |
| 1   | 0.0002976           | 0.0005362           | 0.0004169      | 1.29 | 0.00 | 0.00014      | 0.00000    | Bodrum kat |

X YÖNÜ (-5)

| Kat | $\Delta X$ düst (m) | $\Delta X$ dalt (m) | $\Delta X$ ort | nbi  | nki  | $\Delta X/h$ | $\theta_i$ | kat tipi   |
|-----|---------------------|---------------------|----------------|------|------|--------------|------------|------------|
| 17  | 0.0042072           | 0.0044307           | 0.0043189      | 1.03 | 0.00 | 0.00193      | 0.01111    | Normal kat |
| 16  | 0.0040559           | 0.0047404           | 0.0043981      | 1.08 | 1.02 | 0.00158      | 0.01086    | Normal kat |
| 15  | 0.0043294           | 0.0050624           | 0.0046959      | 1.08 | 1.07 | 0.00169      | 0.01432    | Normal kat |
| 14  | 0.0045039           | 0.0052124           | 0.0048581      | 1.07 | 1.03 | 0.00174      | 0.01724    | Normal kat |
| 13  | 0.0047344           | 0.0054185           | 0.0050764      | 1.07 | 1.04 | 0.00181      | 0.02052    | Normal kat |
| 12  | 0.0049422           | 0.0056057           | 0.0052739      | 1.06 | 1.04 | 0.00187      | 0.02382    | Normal kat |
| 11  | 0.0051003           | 0.0057364           | 0.0054184      | 1.06 | 1.03 | 0.00191      | 0.02689    | Normal kat |
| 10  | 0.0051916           | 0.0057847           | 0.0054882      | 1.05 | 1.01 | 0.00193      | 0.02952    | Normal kat |
| 9   | 0.0051990           | 0.0057244           | 0.0054617      | 1.05 | 1.00 | 0.00191      | 0.03137    | Normal kat |
| 8   | 0.0051004           | 0.0055253           | 0.0053129      | 1.04 | 0.97 | 0.00184      | 0.03221    | Normal kat |
| 7   | 0.0048679           | 0.0051743           | 0.0050211      | 1.03 | 0.95 | 0.00172      | 0.03192    | Normal kat |
| 6   | 0.0044805           | 0.0046232           | 0.0045518      | 1.02 | 0.91 | 0.00154      | 0.03026    | Normal kat |
| 5   | 0.0038985           | 0.0038991           | 0.0038988      | 1.00 | 0.86 | 0.00130      | 0.02718    | Normal kat |
| 4   | 0.0026021           | 0.0052381           | 0.0039201      | 1.34 | 1.01 | 0.00104      | 0.02082    | Normal kat |
| 3   | 0.0021933           | 0.0024999           | 0.0023466      | 1.07 | 0.60 | 0.00076      | 0.01617    | Normal kat |
| 2   | 0.0007782           | 0.0012420           | 0.0010101      | 1.23 | 0.00 | 0.00034      | 0.00000    | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003065           | 0.0004401           | 0.0003733      | 1.18 | 0.00 | 0.00012      | 0.00000    | Bodrum kat |

Y YÖNÜ (+%5)

| Kat | $\Delta Y$ dsol (m) | $\Delta Y$ dsağ (m) | $\Delta Y$ ort | nbi  | nki  | $\Delta Y/h$ | $\theta_i$ | kat tipi   |
|-----|---------------------|---------------------|----------------|------|------|--------------|------------|------------|
| 17  | 0.0090565           | 0.0103336           | 0.0096950      | 1.07 | 0.00 | 0.00449      | 0.02311    | Normal kat |
| 16  | 0.0046779           | 0.0081880           | 0.0064330      | 1.27 | 0.66 | 0.00273      | 0.01465    | Normal kat |
| 15  | 0.0039833           | 0.0081095           | 0.0060464      | 1.34 | 0.94 | 0.00270      | 0.01706    | Normal kat |
| 14  | 0.0034521           | 0.0077716           | 0.0056119      | 1.38 | 0.93 | 0.00259      | 0.01842    | Normal kat |
| 13  | 0.0036018           | 0.0081068           | 0.0058543      | 1.38 | 1.04 | 0.00270      | 0.02190    | Normal kat |
| 12  | 0.0037044           | 0.0083693           | 0.0060369      | 1.39 | 1.03 | 0.00279      | 0.02524    | Normal kat |
| 11  | 0.0037809           | 0.0085465           | 0.0061637      | 1.39 | 1.02 | 0.00285      | 0.02831    | Normal kat |
| 10  | 0.0038185           | 0.0085963           | 0.0062074      | 1.38 | 1.01 | 0.00287      | 0.03089    | Normal kat |
| 9   | 0.0038102           | 0.0084792           | 0.0061447      | 1.38 | 0.99 | 0.00283      | 0.03265    | Normal kat |
| 8   | 0.0037616           | 0.0081615           | 0.0059616      | 1.37 | 0.97 | 0.00272      | 0.03341    | Normal kat |
| 7   | 0.0036343           | 0.0081005           | 0.0058674      | 1.38 | 0.98 | 0.00270      | 0.03446    | Normal kat |
| 6   | 0.0034248           | 0.0076310           | 0.0055279      | 1.38 | 0.94 | 0.00254      | 0.03394    | Normal kat |
| 5   | 0.0030287           | 0.0067347           | 0.0048817      | 1.38 | 0.88 | 0.00224      | 0.03143    | Normal kat |
| 4   | 0.0019956           | 0.0087825           | 0.0053891      | 1.63 | 1.10 | 0.00151      | 0.02641    | Normal kat |
| 3   | 0.0016832           | 0.0039324           | 0.0028078      | 1.40 | 0.52 | 0.00119      | 0.01785    | Normal kat |
| 2   | 0.0008185           | 0.0016706           | 0.0012446      | 1.34 | 0.00 | 0.00045      | 0.00000    | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003205           | 0.0006138           | 0.0004672      | 1.31 | 0.00 | 0.00017      | 0.00000    | Bodrum kat |

Y YÖNÜ (-%5)

| Kat | $\Delta Y$ dsol (m) | $\Delta Y$ dsağ (m) | $\Delta Y$ ort | nbi  | nki  | $\Delta Y/h$ | $\theta_i$ | kat tipi   |
|-----|---------------------|---------------------|----------------|------|------|--------------|------------|------------|
| 17  | 0.0042339           | 0.0045828           | 0.0044084      | 1.04 | 0.00 | 0.00199      | 0.01051    | Normal kat |
| 16  | 0.0045124           | 0.0054392           | 0.0049758      | 1.09 | 1.13 | 0.00181      | 0.01134    | Normal kat |
| 15  | 0.0045874           | 0.0055347           | 0.0050611      | 1.09 | 1.02 | 0.00184      | 0.01428    | Normal kat |
| 14  | 0.0047270           | 0.0056418           | 0.0051844      | 1.09 | 1.02 | 0.00188      | 0.01701    | Normal kat |
| 13  | 0.0049586           | 0.0058267           | 0.0053927      | 1.08 | 1.04 | 0.00194      | 0.02017    | Normal kat |
| 12  | 0.0051578           | 0.0059760           | 0.0055669      | 1.07 | 1.03 | 0.00199      | 0.02327    | Normal kat |
| 11  | 0.0053082           | 0.0060665           | 0.0056874      | 1.07 | 1.02 | 0.00202      | 0.02612    | Normal kat |
| 10  | 0.0053917           | 0.0060741           | 0.0057329      | 1.06 | 1.01 | 0.00202      | 0.02853    | Normal kat |
| 9   | 0.0053907           | 0.0059743           | 0.0056825      | 1.05 | 0.99 | 0.00199      | 0.03019    | Normal kat |
| 8   | 0.0052813           | 0.0057389           | 0.0055101      | 1.04 | 0.97 | 0.00191      | 0.03088    | Normal kat |
| 7   | 0.0050416           | 0.0053591           | 0.0052003      | 1.03 | 0.94 | 0.00179      | 0.03054    | Normal kat |
| 6   | 0.0046479           | 0.0047812           | 0.0047145      | 1.01 | 0.91 | 0.00159      | 0.02894    | Normal kat |
| 5   | 0.0040500           | 0.0040396           | 0.0040448      | 1.00 | 0.86 | 0.00135      | 0.02604    | Normal kat |
| 4   | 0.0027109           | 0.0055152           | 0.0041131      | 1.34 | 1.02 | 0.00108      | 0.02016    | Normal kat |
| 3   | 0.0023103           | 0.0026548           | 0.0024825      | 1.07 | 0.60 | 0.00080      | 0.01579    | Normal kat |
| 2   | 0.0008451           | 0.0013892           | 0.0011172      | 1.24 | 0.00 | 0.00038      | 0.00000    | Bodrum kat |
| 1   | 0.0003305           | 0.0005092           | 0.0004199      | 1.21 | 0.00 | 0.00014      | 0.00000    | Bodrum kat |

## Yapı modeli ve analizine ait diğer bilgiler

STA4-CAD PROGRAMI

ÇOK KATLI BETONARME YAPILARIN STATİK ve BETONARME ANALİZ PROGRAMI Ver.11.0 (code:FSZ)

PROJE İSMİ.....:OTEL YAPISI  
KAT ADEDİ.....: 17  
Bir kattaki KOLON SAYISI.....: 85  
X yönü aks sayısı.....: 86  
Y yönü aks sayısı.....: 95  
DEPREM KATSAYISI.....(Ao): .3  
YAPI TİPİ KATSAYISI.....(R): 7  
YAPI ÖNEM KATSAYISI.....(I): 1  
ZEMİN HAKİM TİTREŞİM PERİYODU..(Ta/Tb): .15 / .6  
HAREKETLİ YÜK KATSAYISI.....: 1  
SIFIR RÖLATİF HAREKET YÜKSEKLİĞİ (m):7.40  
ZEMİN EMNİYET GERİLMESİ..... (t/m²):15.0  
ZEMİN YATAK KATSAYISI..... (t/m³):1500.0  
BETON YOĞUNLUĞU.....(t/m³):2.5  
DEPREM STANDARDI .....:TDY97 CODE  
BETONARME HESAP YÖNTEMİ .....:TAŞIMA GÜCÜ YÖNTEMİ TS500-2000  
BETONARME KESİT DONATI HESAP YÖNTEMİ .....:BRÜT KESİTE GÖRE  
DEPREM HESABI YÖNTEMİ .....:MOD SÜPERPOZİSYONU İLE DİNAMİK ANALİZ  
TEMEL ANALİZ OPSİYONU.....:TEMEİLLER DİKKATE ALINMADAN, YAPI ANALİZİ  
Zemin gerilmesi hareketli yük azaltma değeri:1.00  
Zemin gerilmesi deprem azaltması.....:50  
Zemin gerilmesi rüzgar azaltması.....:25  
Kolonun oturduğu kiriş tesir çarpanı.....: 1.5  
Kiriş & Kolon rijitlik bölgesi opsiyonu.....: Yarım Rijit davranış  
Kiriş uçlarında elastik ankastrelik opsiyonu : Elastik ankastre

BETON ve ÇELİK MALZEME BİLGİLERİ (kg/cm²)

| Yapı Elemanı   | Malzeme | Elastisite Modülü<br>E G |        | Beton dayanım<br>gerilmesi | Çelik akma<br>(Genel) | gerilmesi<br>(Etraye) |
|----------------|---------|--------------------------|--------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Döşeme         | BS25    | 302500                   | 121000 | 250                        | 4200                  | 4200                  |
| Temel          | BS25    | 302500                   | 121000 | 250                        | 4200                  | 4200                  |
| Kiriş\Kolon E1 | BS25    | 302500                   | 121000 | 250                        | 4200                  | 4200                  |
| Kiriş\Kolon E2 | BS25    | 302500                   | 121000 | 250                        | 4200                  | 4200                  |

BETONARME HESAP YÜK KOMBİNASYONU

| Ölü yük<br>Cg | Hareketli<br>yük Cq | Zemin<br>Cs | Deprem<br>± Ce | Rüzgar<br>± Cw |
|---------------|---------------------|-------------|----------------|----------------|
| 1.40          | 1.60                | 0.00        | 0.00           | 0.00           |
| 1.40          | 1.60                | 1.60        | 0.00           | 0.00           |
| 1.40          | 0.00                | 0.00        | 0.00           | 0.00           |
| 1.00          | 1.00                | 0.00        | 1.00           | 0.00           |
| 1.00          | 1.00                | 1.00        | 1.00           | 0.00           |
| 0.90          | 0.00                | 0.00        | 1.00           | 0.00           |
| 1.00          | 1.30                | 0.00        | 0.00           | 1.30           |
| 1.00          | 1.30                | 1.00        | 0.00           | 1.30           |
| 0.90          | 0.00                | 0.00        | 0.00           | 1.30           |
| 0.90          | 0.00                | 0.90        | 0.00           | 1.30           |

CODE:TS500T.COD

## ÖZGEÇMİŞ

Barış KANDİŞ 03.01.1981 tarihinde Çayeli’nde doğmuştur. İlkokul eğitimini Deniz-iş İlköğretim Okulunda, orta okul eğitimini Hasantan İlköğretim Okulu ve lise eğitimini Koşuyolu Kazım İşmen Lisesi’nde tamamladıktan sonra 1997 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 2001 yılında buradan mezun olduktan sonra aynı sene İTÜ vakfında İngilizce eğitimi alıp 2002 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem Mühendisliği bölümünde yüksek lisans çalışmalarına başlamıştır. Yüksek lisans tez çalışmasını Sn. Prof. Dr. Ertaç ERGÜVEN danışmanlığında gerçekleştirmiştir.

