

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONARME YAPILARIN PATLAMALAR KARŞISINDAKİ  
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Mustafa CÖMERT**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

**HAZİRAN 2010**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONARME YAPILARIN PATLAMALAR KARŞISINDAKİ  
PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Mustafa CÖMERT  
501071079**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Alper İLKİ (İTÜ)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zekai CELEP (İTÜ)**

**Doç. Dr. Hilmi LUŞ (BÜ)**

**HAZİRAN 2010**



## ÖNSÖZ

Öncelikle bu tezin oluşmasını sağlayan ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan sayın hocam Doç. Dr. Alper İlki'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecindeki değerli katkıları için; İstanbul Kültür Üniversitesindeki ve İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarındaki tüm dostlarıma, tezin çeşitli aşamalarında benimle kıymetli görüşlerini paylaşan Denizhan Uluğtekin'e teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren aileme, tezin hazırlanması sırasında gösterdiği sabır ve verdiği desteklerinden dolayı Arzu Karasu'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

Tezimin ülkemde bilgiye katkı sağlaması dileğiyle.

Haziran 2010

Mustafa Cömert



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                | iii       |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                          | v         |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                      | vii       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                        | ix        |
| SEMBOL LİSTESİ .....                                                                      | xi        |
| ÖZET.....                                                                                 | xv        |
| SUMMARY.....                                                                              | xvii      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| 1.1 Tanım ve Geçmişte Yaşanan Bazı Olaylar.....                                           | 1         |
| 1.2 Çalışmanın Amacı.....                                                                 | 3         |
| 1.3 Literatür İncelemesi.....                                                             | 4         |
| <b>2. PATLAYICILAR VE PATLAMALARIN ETKİLERİ .....</b>                                     | <b>9</b>  |
| 2.1 Patlayıcılar.....                                                                     | 9         |
| 2.2 Patlamaların Etkileri.....                                                            | 10        |
| 2.2.1 Serbest ortamlarda yaşanan patlamaların etkileri.....                               | 11        |
| 2.2.1.1 Yerden belirli bir yükseklikte yaşanan patlamalar .....                           | 13        |
| 2.2.1.2 Yerin yüzeyinde yaşanan patlamalar .....                                          | 15        |
| 2.2.1.3 Serbest ortamlarda yaşanan patlamaların oluşturduğu yüklerin yapıya etkimesi..... | 18        |
| 2.2.2 Kapalı ortamlarda yaşanan patlamaların etkileri.....                                | 22        |
| 2.2.3 Patlama sonucunda oluşan yer hareketlerinin yapıya etkileri.....                    | 25        |
| <b>3. ELEMANLARIN MODELLENMESİ.....</b>                                                   | <b>27</b> |
| 3.1 Tek Serbestlik Dereceli Model.....                                                    | 27        |
| 3.2 Yük – Yerdeğiştirme İlişkisi.....                                                     | 30        |
| 3.2.1 Elastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi.....                                           | 30        |
| 3.2.2 Elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi.....                                     | 32        |
| <b>4. BETONARME ELEMANLARIN DAVRANIŞI .....</b>                                           | <b>35</b> |
| 4.1 Dinamik Yüklemenin Malzeme Üzerinde Etkisi.....                                       | 37        |
| 4.2 Eğilme Etkisi Altındaki Elemanlar.....                                                | 40        |
| 4.3 Kesme Etkisi Altındaki Elemanlar.....                                                 | 45        |
| 4.3.1 Diyagonal kesme.....                                                                | 45        |
| 4.3.2 Direk kesme.....                                                                    | 47        |
| 4.4 Betonarme Yapılar için Donatı Detayları.....                                          | 48        |
| 4.4.1 Bindirme boyu önerileri.....                                                        | 48        |
| 4.4.2 Perdelerde sargılama donatıları.....                                                | 49        |
| 4.4.3 Birleşim detayları.....                                                             | 50        |
| <b>5. YAPISAL ÇÖZÜMLEME .....</b>                                                         | <b>53</b> |
| <b>6. BETONARME ELEMANLAR İÇİN PERFORMANS SEVİYELERİ.....</b>                             | <b>59</b> |
| <b>7. KÜRESEL BARUT ÜRETİM TESİSİ ÖRNEĞİ (GERÇEK BİR OLAY) ...</b>                        | <b>61</b> |
| 7.1 Yapıların Detayları.....                                                              | 61        |

|                       |                                                              |           |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.2                   | Hasar Detayları.....                                         | 64        |
| 7.3                   | Patlayıcı Tipi ve Patlama Yükleri.....                       | 65        |
| 7.4                   | Tek Serbestlik Dereceli Denklik.....                         | 71        |
| 7.5                   | Temsili Duvarın Kapasitesi.....                              | 73        |
| 7.6                   | Patlama Yüklerinin İstemi ve Kapasite Karşılaştırılması..... | 77        |
| 7.7                   | Sonuçlar.....                                                | 78        |
| <b>8.</b>             | <b>TİPİK BİR BETONARME BİNA ÖRNEĞİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ.</b> | <b>79</b> |
| 8.1                   | Yapının ve Patlamaların Detayları.....                       | 79        |
| 8.2                   | Analiz.....                                                  | 80        |
| 8.3                   | Tek Serbestlik Dereceli Eşitlik ve Yapısal Kapasite.....     | 82        |
| 8.4                   | Performans Seviyeleri.....                                   | 86        |
| 8.5                   | Analiz Sonuçları.....                                        | 86        |
| 8.6                   | Sonuçlar.....                                                | 88        |
| <b>9.</b>             | <b>GENEL SONUÇLAR .....</b>                                  | <b>89</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b> |                                                              | <b>91</b> |
| <b>EK A .....</b>     |                                                              | <b>95</b> |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1: Çeşitli patlayıcıların tipik karakteristik özellikleri [2] .....           | 10 |
| Çizelge 2.2: Üst, yan ve arka yüzeyler için sürüklenme katsayıları [2] .....            | 22 |
| Çizelge 4.1: Farklı etkiler altındaki bir elemanda dinamik artış katsayıları [11] ..... | 40 |
| Çizelge 4.2: $K_i$ sabit değerleri [23] .....                                           | 48 |
| Çizelge 7.1: Üretici tarafından verilen küresel barut içeriği [26] .....                | 69 |
| Çizelge 7.2: Nitroselüloz ve nitrogliserin için yanma enerjileri [36] .....             | 69 |
| Çizelge 7.3: Nitrojen oranının nitroselüloz üzerindeki etkisi [36] .....                | 69 |
| Çizelge 7.4: Karışım binası için geometrik parametreler .....                           | 70 |
| Çizelge 7.5: Tek serbestlik dereceli sisteme dönüşüm faktörleri .....                   | 72 |
| Çizelge 7.6: Şekildeğiştirme hızları ve dinamik artış katsayıları .....                 | 75 |
| Çizelge 7.7: Korugan duvarlar için tasarım abağı parametreleri .....                    | 77 |
| Çizelge 8.1: Kolonlar için tek serbestlik dereceli sisteme dönüşüm faktörleri [7]....   | 83 |
| Çizelge 8.2: Deprem yönetmeliğine göre hesaplanmış kesit hasar sınırları .....          | 86 |
| Çizelge A.1: Tek serbestlik dereceli sistem dönüşüm katsayıları [7] .....               | 95 |
| Çizelge A.2: Mesnet şartlarına ve yüklemeye bağlı eğilme rijitlikleri [7] .....         | 96 |
| Çizelge A.3: Mesnet şartlarına ve yüklemeye dinamik mesnet tepkileri [7] .....          | 97 |



## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1: 1995 de New York’da yer alan Federal Murrah binasına terörist saldırı ....            | 2  |
| Şekil 1.2: 2008 de İstanbul’da patlayıcı deposunda kaza sebepli patlama [4] .....                | 2  |
| Şekil 2.1: Açık havadaki patlamanın tipik basınç değişimi fonksiyonu [11] .....                  | 12 |
| Şekil 2.2: Yansıma sırasında tipik basınç değişimi fonksiyonu [11] .....                         | 13 |
| Şekil 2.3: Yansıyan basınç katsayısı ile izdüşüm açısı arasındaki ilişki [29] .....              | 13 |
| Şekil 2.4: Yerden yüksekte yaşanan bir patlama ve çevreye etkileri [11] .....                    | 14 |
| Şekil 2.5: Yerden yüksekte yaşanan bir patlamanın şok önü parametreleri [23] .....               | 15 |
| Şekil 2.6: Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlama ve çevresel etkileri [11] .....                   | 16 |
| Şekil 2.7: Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlamada yansıma açılarının tayini [5] .....             | 17 |
| Şekil 2.8: Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlamanın şok önü parametreleri [23] .....               | 17 |
| Şekil 2.9: Dinamik basıncının aşırı basınç ile değişimi [23] .....                               | 18 |
| Şekil 2.10: Açık havada yaşanan patlamanın yarattığı basıncın yapıya etkileri [29] .....         | 19 |
| Şekil 2.11: Yapının ön yüzüne gelen basıncın fonksiyonu [11] .....                               | 20 |
| Şekil 2.12: Üst ve yan duvarlara gelen basıncın fonksiyonu [11] .....                            | 21 |
| Şekil 2.13: $c_E$ katsayısının ve $D/L_b$ nin şok dalgası-yapı açıklığına oranı [2] .....        | 21 |
| Şekil 2.14: Yapının arka yüzeyine gelen basıncın değişimi [11] .....                             | 22 |
| Şekil 2.15: Kapalı ortamda yaşanan patlamalarda basıncın zamanla değişimi [11] ..                | 23 |
| Şekil 2.16: Kapalı ortamda yaşanan patlamada basıncın duvarlara etkileri [2] .....               | 24 |
| Şekil 3.1: Yapı elemanının tek serbestlik dereceli sisteme dönüşümü .....                        | 27 |
| Şekil 3.2: Düzgün yayılı yüklenmiş basit bir basit kirişin elastik yerdeğiştirmesi ....          | 31 |
| Şekil 3.3: TSD eşlenik sistemin elastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi .....                       | 32 |
| Şekil 3.4: Düzgün yayılı yüklenmiş basit bir basit kirişin plastik yerdeğiştirmesi ...           | 32 |
| Şekil 3.5: TSD eşlenik sistemin ideal elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi .....           | 34 |
| Şekil 4.1: S220a ve S420a çeliğinin gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri .....                   | 35 |
| Şekil 4.2: Betonun gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri [40] .....                               | 36 |
| Şekil 4.3: Sargılamının beton davranışına etkisi [40] .....                                      | 36 |
| Şekil 4.4: Betonun üç eksenli gerilme altında davranışı [31, 40] .....                           | 37 |
| Şekil 4.5: Şekildeğiştirme hızına bağlı olarak yük çeşitleri [26] .....                          | 38 |
| Şekil 4.6: Şekildeğiştirme hızının a) beton, b) çelik malzeme davranışına etkisi .....           | 38 |
| Şekil 4.7: Betonun basınç altında dinamik artış katsayısı [23] .....                             | 38 |
| Şekil 4.8: Betonun yarmada çekme altında dinamik artış katsayısı [23] .....                      | 39 |
| Şekil 4.9: Betonarme kesitte taşıma gücü hesabı .....                                            | 41 |
| Şekil 4.10: Betonarme kesitte moment – eğrilik ilişkisi .....                                    | 41 |
| Şekil 4.11: Betonarme kesitte eksenel yükün eğilme sünekliğine etkisi .....                      | 42 |
| Şekil 4.12: Betonarme kesitte eksenel yük – moment kapasitesi etkileşimi .....                   | 43 |
| Şekil 4.13: Düzgün yayılı yük altındaki basit kiriş .....                                        | 43 |
| Şekil 4.14: Tek serbestlik dereceli sistem ve tipik ideal patlama yükü fonksiyonu ..             | 43 |
| Şekil 4.15: Betonarme kesitte şekildeğiştirme ve şekildeğiştirme hızı değişimi kabulü [25] ..... | 44 |
| Şekil 4.16: Betonarme kirişte oluşan eşgerilme eğrileri [31] .....                               | 46 |
| Şekil 4.17: Direk kesme kırılması .....                                                          | 47 |
| Şekil 4.18: Perde enkesitinde bağ donatı detayı [11] .....                                       | 49 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.19: Tek çirozlu sargılama detayı [11].....                                                       | 50 |
| Şekil 4.20: Payandalı perde birleşiminde bağ donatısı detayları [11] .....                               | 50 |
| Şekil 4.21: Payandasız birleşimde bağ donatısı detayları [11] .....                                      | 51 |
| Şekil 4.22: Çirozla sargılanmış payandalı perde birleşim detayı [11] .....                               | 51 |
| Şekil 4.23: Uzak tasarım bölgesi için donatı detayı önerileri [11] .....                                 | 52 |
| Şekil 5.1: Genel yük fonksiyonu.....                                                                     | 54 |
| Şekil 5.2: Üçgensel patlama yüklemesi altında elastoplastik sistemlerde süneklik istemi [12].....        | 56 |
| Şekil 5.3: Üçgensel patlama yüklemesi altında elastoplastik sistemlerde maksimum tepki süresi [12] ..... | 57 |
| Şekil 5.4: Basit mesnetli kirişte atalet etkileri ve serbest cisim diyagramı.....                        | 58 |
| Şekil 5.5: Yarım kirişin serbest cisim diyagramı.....                                                    | 58 |
| Şekil 6.1: TM5-1300 e göre performans seviyeleri .....                                                   | 59 |
| Şekil 6.2: Türk deprem yönetmeliğine göre performans seviyeleri [34] .....                               | 60 |
| Şekil 7.1: Patlamanın yaşandığı binaların birbirine uzaklıkları.....                                     | 61 |
| Şekil 7.2: Karışım binası ve geçici depo binasının genel görünümüleri .....                              | 62 |
| Şekil 7.3: Geçici depo binasının patlamadan sonraki görüntüsü .....                                      | 62 |
| Şekil 7.4: Karışım binasının düşey kesit detayları.....                                                  | 63 |
| Şekil 7.5: Betonarme perdelerin kesit detayı .....                                                       | 63 |
| Şekil 7.6: Tipik perde birleşim detayı.....                                                              | 64 |
| Şekil 7.7: Karışım binası korugan perdelerinin hasar detayları.....                                      | 64 |
| Şekil 7.8: 1. Kenar korugan perdelerinin hasar resimleri .....                                           | 66 |
| Şekil 7.9: 2. Kenar korugan hasar resimleri.....                                                         | 67 |
| Şekil 7.10: 1. Arka korugan hasar resimleri .....                                                        | 68 |
| Şekil 7.11: Maksimum yansıyan basınç için doğrusal olmayan interpolasyon .....                           | 71 |
| Şekil 7.12: (a) Kenar koruganlar ve (b) 1 . arka korugan için patlama yükleri .....                      | 71 |
| Şekil 7.13: Koruganların temsili perdeye dönüşümü.....                                                   | 72 |
| Şekil 7.14: Tek serbestlik dereceli denklik.....                                                         | 72 |
| Şekil 7.15: Temsili perde kesitinde şekildeğiştirme ve şekildeğiştirme hızı dağılımı .....               | 73 |
| Şekil 7.16: Dinamik ve statik malzeme davranışları .....                                                 | 75 |
| Şekil 7.17: Koruganların moment – eğrilik ilişkileri.....                                                | 76 |
| Şekil 7.18: Koruganların yük – yerdeğiştirme ilişkileri .....                                            | 77 |
| Şekil 8.1: (a) Yapının yola göre konumu, (b) yapının planda görünümü .....                               | 79 |
| Şekil 8.2: Betonarme kolonların kesit detayı.....                                                        | 80 |
| Şekil 8.3: (a) Birinci saldırı senaryosu (b) ikinci saldırı senaryosu .....                              | 80 |
| Şekil 8.4: Birinci saldırı senaryosuna göre ölçeklenmiş mesafe bilgileri.....                            | 81 |
| Şekil 8.5: İkinci saldırı senaryosuna göre ölçeklenmiş mesafe bilgileri.....                             | 81 |
| Şekil 8.6: Birinci senaryoda C6 kolonuna gelen basınç etkileri ve eğilme eksenini .....                  | 82 |
| Şekil 8.7: C5 kolonuna etkiyen teorik ve idealleştirilmiş patlama basıncı .....                          | 82 |
| Şekil 8.8: Kolonların mesnet şartları ve tek serbestlik dereceli denki .....                             | 83 |
| Şekil 8.9: Statik ve dinamik gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....                                     | 84 |
| Şekil 8.10: Farklı tarafsız eksenler (a) 0° (b) 15° (c) 30° (d) 45° .....                                | 84 |
| Şekil 8.11: Farklı tarafsız eksenler için moment – eğrilik ilişkisi .....                                | 84 |
| Şekil 8.12: Tek serbestlik dereceli sistem için yük–yerdeğiştirme ilişkisi .....                         | 85 |
| Şekil 8.13: Türk deprem yönetmeliğine göre performans seviyeleri [34] .....                              | 86 |
| Şekil 8.14: Birinci saldırı senaryosunda alt kat hasar haritası .....                                    | 87 |
| Şekil 8.15: İkinci saldırı senaryosunda alt kat hasar haritası .....                                     | 87 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                 |                                     |
|-----------------|-------------------------------------|
| $a$             | : tarafsız eksen derinliği          |
| $A_c$           | : betonun yüzey alanı               |
| $A_{sw}$        | : enine donatının kesit alanı       |
| $A_v$           | : duvardaki boşluk alan toplamı     |
| $A_{vf}$        | : kesme sürtünmesi donatı alanı     |
| $A_w$           | : duvar alan toplamı                |
| $b_w$           | : kesitin genişliği                 |
| $c$             | : sönüm oranı                       |
| $C$             | : ses hızı                          |
| $c_d$           | : sürüklenme katsayısı              |
| $c_e$           | : etkin sönüm oranı                 |
| $c_E$           | : üniform yük katsayısı             |
| $c_r$           | : yansıyan basınç katsayısı         |
| $DAK$           | : dinamik artış katsayısı           |
| $d$             | : etkin yükseklik                   |
| $d_{TNT}$       | : TNT nin biri yanma enerjisi       |
| $d_{patlayıcı}$ | : patlayıcının birim yanma enerjisi |
| $E$             | : elastisite modülü                 |
| $f(t)$          | : yük fonksiyonu                    |
| $f_e(t)$        | : etkin yük fonksiyonu              |
| $f_{ck}$        | : betonun statik basınç dayanımı    |
| $f_{ctd}$       | : betonun dinamik çekme dayanımı    |
| $f_{dc}$        | : betonun dinamik basınç dayanımı   |
| $f_{ds}$        | : çeliğin dinamik çekme dayanımı    |
| $f_e$           | : maksimum patlama yükü             |
| $f_s$           | : çeliğin statik çekme dayanımı     |
| $f_{ywd}$       | : enine donatının akma dayanımı     |
| $h_d$           | : duvarın yüksekliği                |
| $h_p$           | : patlamanın yüksekliği             |
| $I$             | : atalet momenti                    |
| $I(t)$          | : bileşke atalet kuvveti            |
| $I_r$           | : yansıyan impuls                   |
| $I_s$           | : spesifik impuls                   |
| $k$             | : rijitlik                          |
| $k_e$           | : etkin rijitlik                    |
| $k_d$           | : sönüm dönüşüm faktörü             |
| $k_l$           | : yük dönüşüm faktörü               |
| $k_m$           | : kütle dönüşüm faktörü             |
| $k_r$           | : rijitlik dönüşüm faktörü          |
| $KE$            | : kinetik enerji                    |
| $L$             | : eleman yüksekliği                 |
| $l_b$           | : bindirme boyu                     |

|                              |                                                                 |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $L_b$                        | : yapı açıklığı                                                 |
| $l_d$                        | : duvar uzunluğu                                                |
| $L_p$                        | : plastik mafsal boyu                                           |
| $L_w$                        | : şok dalgasının boyu                                           |
| $M$                          | : moment                                                        |
| $m$                          | : kütle                                                         |
| $m(x)$                       | : birim uzunluğun kütlesi                                       |
| $m_e$                        | : etkin kütle                                                   |
| $N$                          | : eksenel kuvvet                                                |
| $N_{or}$                     | : ortalama eksenel yük dayanımı                                 |
| $N_c$                        | : birim genişlikteki eksenel kuvvet                             |
| $P_g$                        | : gaz basıncı                                                   |
| $P_o$                        | : atmosfer basıncı                                              |
| $P_r$                        | : maksimum yansıyan basınç                                      |
| $P_s$                        | : stagnasyon basıncı                                            |
| $P_{so}$                     | : pozitif maksimum aşırı basınç                                 |
| $P_{so-}$                    | : negatif maksimum aşırı basınç                                 |
| $r$                          | : dik konumlanmış duvara uzaklık                                |
| $R$                          | : patlama merkezine olan uzaklık                                |
| $s$                          | : etriye aralığı                                                |
| $S$                          | : yapı yüksekliği yada genişliğinin yarısının küçük olan boyutu |
| $SE$                         | : şekildeğiştirme enerjisi                                      |
| $t$                          | : zaman                                                         |
| $t_a$                        | : patlama dalgasının ortama ulaşma süresi                       |
| $t_c$                        | : yansıyan basıncın etki süresi                                 |
| $t_d$                        | : idealleştirilmiş basıncın etkime süresi                       |
| $t_g$                        | : gaz basıncı etkime süresi                                     |
| $t_o$                        | : pozitif basıncın etkime süresi                                |
| $t_{o-}$                     | : negatif basıncın etkime süresi                                |
| $t_{of}$                     | : patlama yükünün yarattığı tüm etkime süresi                   |
| $t_{max}$                    | : maksimum tepki süresi                                         |
| $T_n$                        | : doğal titreşim periyodu                                       |
| $t_r$                        | : salt yansıyan basıncın etkime süresi                          |
| $q(x)$                       | : yapı elemanının üzerindeki yük formu                          |
| $q(t)_{max}$                 | : sabit bir x noktasına gelen maksimum yük                      |
| $q_o(t)$                     | : dinamik basınç                                                |
| $Q(t)$                       | : dinamik tekil yük eştisi                                      |
| $u$                          | : yerdeğiştirme kapasitesi                                      |
| $U$                          | : şok dalgasının hızı                                           |
| $u(t)$                       | : yerdeğiştirme                                                 |
| $\dot{u}$                    | : hız                                                           |
| $\ddot{u}$                   | : ivme                                                          |
| $u(t)_{max}$                 | : sabit bir x noktasına gelen maksimum yerdeğiştirme            |
| $\dot{U}_{\setminus t, max}$ | : sabit bir x noktasına gelen maksimum hız                      |
| $V$                          | : patlama yaşanan ortamın hacmi                                 |
| $V_c$                        | : betonun kesme kuvveti kapasitesi                              |
| $V_r$                        | : kesme kuvveti kapasitesi                                      |
| $V_v$                        | : yerin yüzeyindeki maksimum düşey hız                          |
| $V_w$                        | : etriyelerin kesme kuvveti kapasitesine katkısı                |
| $V_{dk}$                     | : direk kesme kapasitesi                                        |

|                     |                                   |
|---------------------|-----------------------------------|
| $V(t)$              | : dinamik kesme kuvveti           |
| $w$                 | : düzgün yayılı yük kapasitesi    |
| $W_E$               | : patlayıcının etkin TNT ağırlığı |
| $WE$                | : yapılan iş                      |
| $z$                 | : ölçeklenmiş mesafe              |
| $\mu$               | : süneklik                        |
| $\varepsilon$       | : şekildeğiştirme                 |
| $\dot{\varepsilon}$ | : şekildeğiştirme hızı            |
| $\omega$            | : açısal hız                      |
| $\chi$              | : eğrilik                         |
| $\phi(x)$           | : mod şekli                       |
| $\theta$            | : dönme                           |
| $\rho$              | : yerin kütle yoğunluğu           |
| $\alpha$            | : izdüşüm açısı                   |





## **BETONARME YAPILARIN PATLAMA KARŞISINDAKİ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

### **ÖZET**

Son dönemlerde terörist saldırılarda ve kaza patlamalarında dünyada bir çok insan hayatını kaybetmiş, bir çok yapı hasar alıp göçme seviyesine gelmiştir. Eğer yaşanan bu patlamalarda bu yapılar ve çevreleri muhtemel patlama etkileri göz önünde bulundurularak tasarlansaydı, ölümlerde sayılar azaltılabilir, saldırıların ve patlamaların insanlar üzerinde yarattığı ruhsal baskı oluşmayabilirdi.

Bu çalışmada betonarme yapıların adım adım patlama etkileri altında değerlendirilmesi anlatılmıştır. İlk olarak patlamaların çeşitleri ve yapılara etkileri incelenmiş, daha sonra yapıların modellenmesi ve kapasiteleri incelenmiş, son olarak yapıların patlama yükleri karşısında çözümleme yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca betonarme elemanlar için çeşitli kaynaklardan performans seviyeleri tanımlanarak muhtemel patlamalar sonunda yapıların göstereceği performanslar belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, ülkemiz şartlarını içeren iki farklı örnek sunulmuştur. Bu örneklerden birincisi, 2008 yılında yaşanan küresel barut üretim tesisi patlamasıdır. Tesis yapıları hem hasar değerlendirmesi hem de patlama yükleri çözümlemeleri bakımından detaylı bir şekilde incelenmiş, gerçek bir olay örneği olarak sunulmuştur. İkinci örnekte ülkemizde 1970 li yıllarda yapılan yapıların özelliklerini taşıyan tipik bir 4 katlı betonarme bina üzerinde saldırı senaryoları kurgulanmıştır. Yapının bu saldırı senaryoları altında gösterebileceği performansları değerlendirilmiştir.



# **PERFORMANCE BASED ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AGAINST BLAST LOADING**

## **SUMMARY**

Many people and structures have recently been subjected to explosion stemming from terrorist attacks and accidents all around the world. As a consequence of these explosions, many people were killed and many structures were damaged or collapsed. If these structures and layout of facilities were designed considering potential explosion risks, number of deaths could have been decreased and the resulting mental trauma could have been avoided.

In this study, step by step assessment procedure of reinforced concrete structures against blast loads are explained. Moreover, performance levels of reinforced concrete members are defined. Furthermore, two example cases are investigated in detail. The first example is the real explosion in a ball powder production facility. The damage details and calculations for the facility are presented in detail. The second example is a typical public building which represents the typical characteristics of reinforced concrete frame buildings constructed in 1970s. Two different potential terrorist attack scenarios are defined and performances of this building is investigated against these explosion scenarios.



## 1. GİRİŞ

### 1.1 Tanım ve Geçmişte Yaşanan Bazı Olaylar

Son yıllarda artan terörist saldırılar ve kaza sonucu yaşanan bir çok patlama ülkemizde ve dünyada (potansiyel olarak bu tür etkilere maruz kalabilecek) yeni yapılacak yapıların tasarımında bu etkilerin göz önüne alınmasının ve mevcut yapıların bu etkiler altında dayanımlarının gözden geçirilmesi gerekliliği ortaya koymuştur. Yaşanan patlamalar sonucunda bir çok insan hayatını kaybetmiş ve bir çok bina kısmen veya tamamen çökmüş ya da ağır hasarlanmıştır. Bu binaların tasarımları potansiyel patlama etkileri göz önüne alınarak yapılsaydı, yaşanan can kayıplarının bir bölümü önlenebilir, yapılar bu düzeyde hasar almayabilirdi. Kısacası yaşanan terörist saldırılar amaçlarına ulaşamayabilir, kaza sonucunda yaşanan patlamalarda ise maddi ve manevi kayıplar en aza ine bilirdi.

Terörizm insanlar için birlikte yaşamayı öğrenmeleri gereken bir gerçek haline gelmiştir. Terörist hareketlere bazı tarihsel referanslardan 2000 yıl öncesine kadar ulaşılabilse de “Terörizm” sözcüğü bugünkü anlamıyla ilk olarak 1789 Fransız Devrimi sırasında bir grup hareketi ile bağdaştırılmıştır [1]. O günden bugüne kadar insanoğlunun hayatında korku ile özdeş bir yer edinmiştir. Son yüzyılda, terörizm I. Dünya savaşında savaşa katılan ülkelerin ulusal amaçlarına, II. Dünya savaşı ve sonrasında başlayan soğuk savaş döneminde dünyadaki büyük güçlerin mücadelesine hizmet etmiş, soğuk savaşın bitmesiyle de radikal dinci ve etnik grupların dünyaya korku salmasına hizmet eder hale gelmiştir [2]. Bu tehlikeli yapı son yüzyılda geçirdiği büyük gelişmelerle bugünün dünyasındaki boyutuna ulaşmıştır. Son bir kaç on yılda ise yaşanan olayların boyutları insanları birinci dereceden etkiler hale gelmiş, insanlar arasında korku ve panik yaratıp, olumsuz ruhsal etkilere sebep olmuştur. Ülkemizde de gerek soğuk savaş yıllarında gerekse soğuk savaş sonrasında terörist hareketlerin etkisi azalmamış, aksine son yıllarda bu hareketlerin sayısı artmıştır. Son yirmi yıl içinde ülkemizde ve dünyada yaşanmış olaylar içinde en önemlileri 26 Şubat 1993 Amerika’da Dünya Ticaret Merkezine bombalı araç saldırısı, 19 Nisan 1995 Amerika’da Federal Murrah binasına bombalı araç saldırısı

(Şekil 1.1) ve ülkemizde 20 Kasım 2003 de yaşanan HSBC Bank ve konsolosluk saldırılarıdır.



**Şekil 1.1:** 1995 de New York’da yer alan Federal Murrah binasına terörist saldırı [3]

Kaza sonucunda yaşanan patlamalar özellikle kimyasal üretim yapan tesislerde, patlayıcı depolarında, dolum-boşaltım yapan yakıt tesisleri gibi bir çok yapıda bir çok sebeplerle meydana gelen patlamalardır. Bu tür patlamalarda çoğu zaman olayın yaşandığı yapı ve çevresi ağır hasar görmekte, maddi ve manevi kayıplar yaşanmaktadır. Yakın tarihte yaşanan bu tür patlamalar, 2008 yılında küresel barut üretim tesisi ve patlayıcı deposundaki patlamalardır (Şekil 1.2).



**Şekil 1.2:** 2008 de İstanbul’da patlayıcı deposunda kaza sebebiyle patlama [4]

Yapıların patlamalara karşı tasarımında temel amaç insanların hayatlarını kaybetme ihtimallerini en aza indirmek ve maddi değeri yüksek materyallerin (makina teçhizat

gibi) korunmasını sağlamaktır. Yaşanan bir patlamanın yapıya etkileri bir çok değişkene bağlıdır. Bu etkileri kabaca sıralamak gerekirse;

- Patlayıcının türü ve boyutu (ağırlığı)
- Patlamanın yeri (yapının içi yada dışı)
- Patlamanın merkezi ile yapı arasındaki mesafe
- Yapı içinde yaşanan bir patlamada patlamanın yeri (giriş kat, üst kat)
- Yapının tipi
- Yapının taşıyıcı sistemi

olarak sıralanabilir [5].

Diğer bir yandan patlama etkilerine maruz yapılarda bazı taşıyıcı sistem elemanlarının taşıyıcı özelliklerini kaybetmesiyle yapıda kısmi göçme yaşanabilmektedir. Bu kısmi göçmeye bağlı olarak yapının aşamalı şekilde tam bir göçmeye gitmesi de ihtimal dahilindedir. Yapı mühendisliği açısından değerlendirildiğinde, yapıların patlama etkisinde tasarımı, yapıların göçmesini engelleyerek can kayıplarını azaltmalıdır.

## **1.2 Çalışmanın Amacı**

Dünyada patlamaların yapılar üzerindeki etkilerinin araştırılması 1940 lı yıllarda başlamıştır [2]. Bu yıllarda dünyada süren savaş ortamı, araştırmaların askeri ve savunma tesislerinin korunması üzerine yönelmesini sağlamıştır. Özellikle son yirmi yılda sivil ortamda yaşanan saldırı ve patlama olaylarından dolayı, bu etkilere maruz kalabilecek sivil binaların da patlama etkilerine göre tasarlanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Ülkemizde bugüne kadar yapılmış, patlamaların yapılarda yarattığı etkilere değinen kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez ülkemizin yapı şartlarını ve koşullarını göz önünde bulundurarak, betonarme yapılarda patlama etkileri konusunda güncel kaynaklarla bir derleme sunmakta, ülkemizde yaşanan gerçek bir tesis patlamasını tüm ayrıntılarıyla inceleyerek, eksikliklere dikkat çekmeye çalışmaktadır. Ayrıca ülkemiz şartlarına göre yapılmış mevcut bir betonarme yapının potansiyel iki farklı saldırı senaryosuna göre performansları detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

### 1.3 Literatür İncelemesi

Bu konuda geçmişten günümüze bir çok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların başlıcaları tarihsel sıra içerisinde aşağıda verilmiştir.

Newmark (1953) yaptığı çalışmada, daha yapılarda dinamik davranış kavramının yeni oturmaya başladığı dönemde, patlama etkilerine dayanan yapı tasarımı için öneriler sunmuş, hesap adımlarını belirleyip, nümerik bağıntılarla patlama yüklerinin fonksiyonlarını tanımlamıştır. Bugün halen temelde bir çok açıdan Newmark tarafından ortaya konan yaklaşımlar kullanılmaktadır [6].

Biggs (1964), Masschasetts Institute of Technology (MIT) de verdiği dersin notlarının kitaplaştırılması sonucu, günümüze kadar aktarılan çalışmasında, pratik mühendislik için kompleks yapı örneklerinin basit tek serbestlik ya da çok serbestlik dereceli modellere dönüştürülmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım patlama etkileri altında davranışı kompleks olan bir çok yapı için doğrusal ve doğrusal olmayan özellikleri tanımlayabileceğimiz basit sistemleri kurmamızı sağlamaktadır [7].

Krauthammer ve diğerleri (1985) kutu tipi betonarme yapılarda direk kesme etkini incelemiş, yapının geliştirilmiş bir tek serbestlik dereceli denkliği ortaya koymuştur. Kendi geliştirdiği elemanın direk kesme kapasitesini hesaplayan ampirik modeli de bu çalışmada sunmuştur [8].

Amerikan ordusu (1986) konvansiyonel silahlar ve bu silahların yapılara etkileri üzerine temel yaklaşımları içeren bir tasarım kaynağı oluşturmuştur. Bu kaynak bilinen konvansiyonel patlayıcıların özelliklerini içermekte, bu patlayıcıların etkisinde koruma tasarımlarının detaylarını içermektedir [9].

Krauthammer ve diğerleri (1990) büyük bir impuls yüke maruz kalan betonarme elemanların davranışlarını sonlu elemanlar yönteminde analiz zorluğunu aşmak üzere alternatif yaklaşımla elemanın sonlu farklar yöntemi ile analizi ve modellenmesini içeren yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmada yüksek hızlı şekil değiştirme etkileri beton ve çelik için ayrı ayrı alınmamaktadır [10].

Bu konuda en kapsamlı bilgiyi içeren kaynak Amerikan ordusu, donanması ve hava kuvvetleri (1990) tarafından ortaklaşa hazırlanan ve tüm dünya ile paylaşılan, kaza sonucu oluşan patlamalara dayanıklı yapı tasarım tarifi namesidir (TM5-1300). Temel olarak kendinden önce yapılan çalışmalar genişleterek, A dan Z ye bir tasarım el



kitabı oluşturulmuştur. Bu kaynak açık ve kapalı ortamdaki patlama yüklerinin belirlenmesi, çelik, betonarme ve yığma binaların kapasitelerinin hesaplanması, tek serbestlik dereceli sistemlere dönüştürülmesi ve çözümün oluşturulması konusunda tüm detayları içermektedir. Bu tez çalışmasında, özellikle patlama yüklerinin bulunmasında bu kaynağa sürekli referans verilecektir. Ayrıca Amerikan Savunma Bakanlığı 2008 yılında bu tasarım tarifnamesinin güncel versiyonu olarak UFC 3 – 340 – 02 el kitabını hazırlamıştır. Her iki yayın da içerik açısından aynıdır [11, 12].

Avrupa Beton Komitesi (CEB) (1990) patlama gibi yüksek hızlı şekildeğiştirmeler altında betonun dayanımını belirleyecek bir model önermiştir. Bu model ile şekildeğiştirme hızına bağlı olarak betondaki basınç dayanımı artış oranı tahmin edilebilmektedir [13].

Crawford ve diğerleri (1994) depreme dayanıklı olan ve olmayan iki farklı şekilde tasarlanmış betonarme yapının patlama performansını sonlu elemanlar analizi ile belirleyip zayıflıkları giderecek güçlendirmeler yapmıştır. Bu çalışmada kapasiteleri yetersiz kolonlar sargılanarak analizler tekrarlanmıştır. Analizler sonucunda sargılamanın betonarme yapıların patlama kapasitelerini arttırdığını görülmüştür [14].

ASCE (1997) TM5-1300 ün yaklaşımını koruyarak petrokimya tesislerinin tasarımları konusunda örnekler sunan ve bu tesislerde yaşanabilecek patlamalara yoğunlaşan daha spesifik bir kaynaktır. Bu kaynakta mevcut yapıların patlama etkilerine karşı güçlendirilmesi konusu da yer almaktadır [15].

Mlakar ve diğerleri (1998) Oklohama şehrindeki Federal Murrah binasına yapılan terörist saldırı sonucunda bu yapıda oluşan hasarı incelemiş, patlama yüklerini tahmin ederek davranışı açıklamaya çalışmıştır [16].

Malvar (1998) yaptığı çalışmada yapılarda kullanılan çelik donatıların dinamik yükler altında davranışını incelemiştir. Özellikle patlama yüklerinin yapıda yarattığı etki olan yüksek hızlı şekildeğiştirme karşısında çeliğin davranışını araştırmış, şekildeğiştirme hızını çeliğin malzeme davranışına yansıtacak dinamik artış katsayıları modelini geliştirmiştir [17].

Krauthammer (1999) betonarme ve çelik yapılar için birleşim bölgesi detayları geliştirerek, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bu detayların performansını

incelemiştir. Önerilen detaylar elemanların birleşimlerden göçmesini engellemeyi amaçlamaktadır [18].

Amerikan Savunma Bakanlığının (1999) hazırladığı standard, kaza sonucunda oluşan patlama etkilerine maruz kalma potansiyeli olan üretim yapılar ve çevresi için uygun güvenlik mesafelerini tanımlamaktadır. Farklı durumlar ve farklı işlevlerdeki binalar için değerlendirmeleri, olası tehditleri ve sonuçlarını içermektedir [19].

Remennikov (2003) patlama yüklerinin yapılarda yarattığı etkiyi çeşitli kaynaklardan derleyerek, bu etkilerin sonlu elemanlar yönteminde modellenmesini basitleştirecek yaklaşımlar getirmiştir [20].

Le Blanc ve diğerleri (2006) patlamaların yapı üzerinde oluşturduğu etkileri hem sonlu elemanlar ile hem de çeşitli tasarım kaynaklarında yer alan abaklara göre hesaplayarak, bu tasarım kaynaklarının patlama yüklerini tahmin edebilme yeteneklerini incelemiştir. Bu çalışmada tasarım abaklarından oldukça yakın ve konservatif sonuçlar elde edildiği çıkarılmıştır [21].

Pandey ve diğerleri (2006) betonarme silindirik yapıların yaşanan patlamalar karşısında doğrusal olmayan davranışını incelemiş, sonlu eleman analizi için bir model geliştirmiştir [22].

Amerikan ordu mühendisleri birliği (US Corps of Engineering) patlama yükleri altında tasarım ve inceleme konusunda kapsamlı bir rapor yayınlamıştır (pdc-tr-06-01 Rev1). Bu rapor güncel kaynakların özetini içermekle birlikte SI birim sisteminde de çözümleri irdelemektedir [23].

Ngo ve diğerleri (2007) patlama yükleri ve yapılara etkileri konusunda kapsamlı bir derleme yapmıştır. Bu derlemenin sonucunda sonlu elemanlar programı ile yaşanmış patlamaların sonuçları irdelenmiştir [24].

Krauthammer (2008) tarafından yazılan kitap modern korugan yapılar için yazarın kendi yaptığı çalışmalar ile diğer çalışma ve yönetmeliklerin kapsamlı bir derlemesidir. Bu çalışmada patlamaların ortaya çıkardığı tüm tehlikeler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu kitap hem tasarım, hem değerlendirme açısından bu konuda önemli bir kaynaktır [2].

Jones ve diğerleri (2009) betonarme elemanlar için lif yaklaşımı ile şekildeğiştirme hızına bağlı olarak kesitlerin moment – eğrilik ilişkisini incelemiştir. Bu yaklaşımda

kesit içindeki farklı liflerdeki beton ve çelik donatılar için farklı şekildeğiştirme hızları dikkate alınmıştır. Daha sonra aynı eleman, daha önce Krauthammer (1990) tarafından da kullanılan sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür. Ayrıca, sonuçlar aynı grup tarafından yapılan büyük ölçekli deneyler ile karşılaştırılmıştır. Burada sonlu farklar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları deney sonuçlarına oldukça yakındır. Tek serbestlik dereceli eşlenik sistemin ise diğer yaklaşımlara göre tahmin yeteneği düşüktür [25].

Cömert ve İlki (2009a), ülkemizde bir üretim tesisinde yaşanan patlamanın betonarme korugan perdeler üzerindeki etkilerini, hasar ve yapısal performans açısından incelemiştir [26].

Cömert ve İlki (2009b) ülkemizde yapılan tipik betonarme çerçeve bir yapı için iki farklı saldırı senaryosu altında, yapının performansını belirleyen bir çalışma yapmıştır [27].

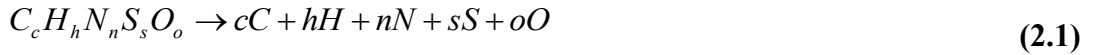


## 2. PATLAYICILAR VE PATLAMALARIN ETKİLERİ

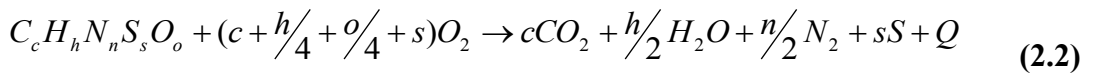
Çok hızlı, düzensiz ve gürültülü bir kimyasal değişim sonucunda katı ve likit patlayıcıların yüksek ısıda ve yoğunlukta, yüksek basınçlı bir gaz olarak çevreye yayılması olayına patlama denir. Patlamalar kökenleri açısından değerlendirildiğinde üç farklı gruba ayrılırlar. Bunlar fiziksel patlamalar, kimyasal patlamalar ve nükleer patlamalardır. Bu patlamalara örnek vermek gerekirse fiziksel patlamalar, gaz sıkışması sonucunda yaşanan patlamalar, nükleer patlamalar atom çekirdeğindeki nötron ve protonların yeniden dağılımlarının yarattığı enerji salınımı ile yaşanan patlamalar ve kimyasal patlamalar ise tepkime hızı yüksek egzotermik reaksiyonlar (karbon ve hidrojen tepkimeleri) sonucu oluşan patlamalardır [24].

### 2.1 Patlayıcılar

Yakıldığında hızla genişleyen gazlar oluşturarak, çevreye ani yüksek basınç uygulayan maddelere patlayıcı madde denir [28]. Genelde patlayıcılar karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen ve sülfürün çeşitli kombinasyonları ile oluşmaktadır [2]. Tipik bir ayrışma denklemi Denklem 2.1 deki gibi yazılabilir;



Bu patlayıcıların tipik yanma denklemini Denklem 2.2 deki gibi yazabiliriz. Bu denklemde  $Q$  yanma sonucunda açığa çıkan yanma enerjisidir.



Günümüzde en bilinen patlayıcı türleri barut, dinamit ve TNT dir. Her patlayıcının yanma esnasında açığa çıkardığı enerji birbirinden farklıdır. Dolayısıyla patlama sonrasında yarattığı etkiler de birbirinden farklı olacaktır. Bu durumun getirdiği zorlukları aşmak için patlayıcıların TNT denklikleri kullanılmaktadır. Bu denklik ile patlayıcının ağırlıkça TNT eşdeğeri hesaplanmaktadır. Patlayıcının TNT ye dönüşümünü sağlayacak faktör, patlayıcının birim yanma sırasında açığa çıkardığı enerjinin, TNT nin birim yanma sırasında açığa çıkardığı enerji ile oranlanmasıyla

elde edilir. Denklem 2.3 de bu denklik verilmiştir. Bu denklemde  $W_E$  patlayıcının TNT olarak etkin ağırlığı (kg),  $W_{patlayıcı}$  patlayıcının ağırlığı (kg),  $d_{TNT}$  TNT nin birim yanmada açığa çıkardığı yanma enerjisi olup ve değeri 4.52 MJ/kg dır [2] ve  $d_{patlayıcı}$  patlayıcının birim yanma sırasında açığa çıkardığı yanma enerjisidir. Çizelge 2.1 de günümüzde bulunan bazı patlayıcıların karakteristik özellikleri yer almaktadır.

$$W_E = \frac{d_{patlayıcı}}{d_{TNT}} W_{patlayıcı} \quad (2.3)$$

**Çizelge 2.1:** Çeşitli patlayıcıların tipik karakteristik özellikleri [2]

| Patlayıcı      | Maksimum yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | Maksimum yoğunluktaki yayılma hızı (km/sn) | Yanma enerjisi (MJ/kg) |
|----------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| Amonyum Nitrat | 1.73                                    | 8.51                                       | 1.59                   |
| C-4 Karışım    | 1.59                                    | 8.04                                       | 5.86                   |
| Nitrogliserin  | 1.6                                     | 7.58                                       | 6.3                    |
| Nitroselüloz   | 1.66                                    | 7.3                                        | 10.6                   |
| Pentolit       | 1.7                                     | 7.53                                       | 5.86                   |
| RDX            | 1.76-1.80                               | 8.70-8.75                                  | 5.13-6.19              |
| TNT            | 1.64                                    | 6.95                                       | 4.10-4.55              |

## 2.2 Patlamaların Etkileri

Yaşanan bir patlamanın yapıya etkileri iki ana grupta incelenebilir. Bunlar patlama yüklerinin yarattığı asıl etkiler (yüksek yoğunluklu patlama dalgasının etkileri) ve patlamanın yarattığı ikincil etkilerdir (yer hareketleri, parça tesiri etkisi ve yangın). Patlamanın asıl etkileri yapısal anlamda ikincil etkilere göre daha büyük etki yaratmaktadır. Bu yüzden, yapılar açısından bu etkinin incelenmesi daha anlamlı ve önceliklidir.

Patlama dalgası patlayıcının merkezinden ortaya çıkarak atmosfere küresel olarak yayılan bir şok dalgası etkisi yaratmaktadır. Bu şok dalgası patlamanın merkezinden açığa çıktığı anda maksimum basınca ve hıza sahiptir. Hareketine devam edip, patlama merkezinden uzaklaştıkça şok dalgasının yüzey alanı genişler ve bunun sonucunda basıncını ve genişleme hızını hızla kaybederek hareketini sürdürür. Şok dalgası hareketine, şok dalgasını çevreleyen hava ile denge oluşturan kadar devam edecektir.

Şok dalgasının hareketi sırasında geçtiği bir noktadaki (şok dalgasının arkasında kalan bir noktada) basınç kısa süreliğine atmosfer basıncının altına düşmektedir. Bu durum ortamda negatif bir basınç oluşarak, bir vakum etkisi oluşturmaktadır. Şok dalgasının önünde ise dalganın hareketine göre ortamda durağan olan hava sıkışarak bir duvar gibi şok dalgasıyla birlikte hareket edecektir ve atmosfer basıncına göre oldukça büyük bir pozitif basınç oluşacaktır. Şok dalgasının önündeki bu basınç ardında kalan emilim basıncına göre oldukça büyüktür.

Literatürde geçtiği adıyla şok önü parametreleri patlamadan uzaktaki bir noktada patlama dalgasının etkilerini tanımlamamıza yardımcı olacaktır. Bu parametreleri bulabilmek için öncelikle patlayıcının miktarı ve patlama ile ilgilendiğimiz nokta arasında ilişkiyi kuran ölçeklenmiş mesafe bilgisinin bulunmasına ihtiyaç vardır. Ölçeklenmiş mesafe patlamanın merkezi ile şok önü parametrelerini aradığımız nokta arasındaki mesafe ve patlayıcının ağırlığının bir fonksiyonudur. Bu ifade Denklem 2.4 de verilmiştir. Burada  $z$  ölçeklenmiş mesafe ( $m/kg^{1/3}$ ),  $R$  patlamanın merkezi ile nokta arasındaki mesafeyi ( $m$ ) vermektedir.

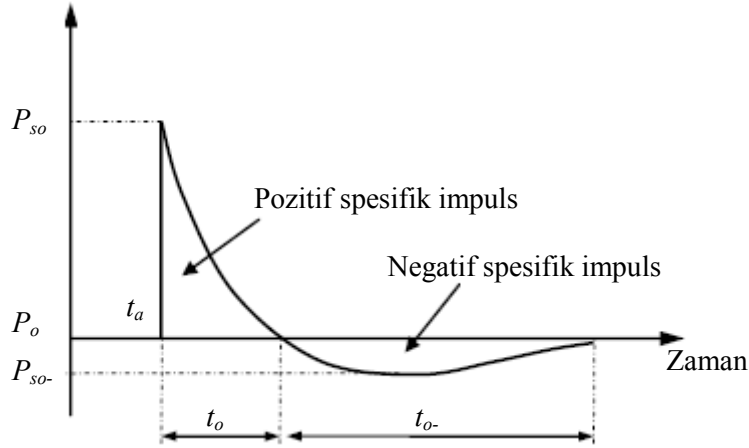
$$z = \frac{R}{W_E^{1/3}} \quad (2.4)$$

Patlamaların yaşandığı ortamlar, patlamanın merkezinden açığa çıkan şok dalgasının hareketini etkilemektedir. Şok dalgasının serbest bir ortamda yarattığı etki ile kapalı, sınırlanmış bir ortamda yarattığı etkiler birbirinden farklı olmaktadır. Örneğin, kapalı bir ortamda yaşanan patlamadan açığa çıkan şok dalgaları ortamın sınırlarından defalarca kez yansiyarak etkilerini arttırabilmektedir. Oluşan gazların ortamdaki açık havaya ulaşması ve dengenin kurulması ile etki sona ermektedir. Bu sebeple, patlamaların şok önü etkilerini belirlenirken patlamanın yaşandığı ortamın şartlarını da göz önünde bulundurmanız gerekmektedir. Temelde patlamalar, yaşandığı ortamların etkisi açısından iki farklı kategoride incelenmektedir. Bunlar, serbest ortamlarda yaşanan patlamalar ve kapalı ortamlarda yaşanan patlamalardır.

### 2.2.1 Serbest ortamlarda yaşanan patlamaların etkileri

Açık havada yaşanan bir patlamanın ardından, patlamanın merkezinden açığa çıkan şok dalgası ortamda serbest hareket edebilmektedir. Harekete başlayan bu şok dalgasının, önündeki bir noktada yarattığı basıncın zamanla değişimi Şekil 2.1 de verilmiştir. Bu şekilde görüleceği gibi, patlama sonucunda açık havada oluşan şok

etkileri; maksimum pozitif aşırı basınç ( $P_{so}$ ) ve maksimum negatif aşırı basınçtır ( $P_{so-}$ ). Burada  $t_a$  süresi şok dalgasının basınç ölçülen noktaya ulaşma süresi,  $t_o$  pozitif basınç etkisinin süresi,  $t_{o-}$  negatif kısmının süresi ve  $P_o$  atmosfer basıncıdır. Buradaki basınç değişiminin negatif kısmı şok dalgasının geçtiği bölgedeki basıncın atmosfer basıncının altına düşerek bir vakum etkisinin oluştuğunu göstermektedir. Pratik hesaplarda basınç değişiminin negatif kısmı ihmal edilebilmektedir.



**Şekil 2.1:** Açık havadaki patlamanın tipik basınç değişimi fonksiyonu [11]

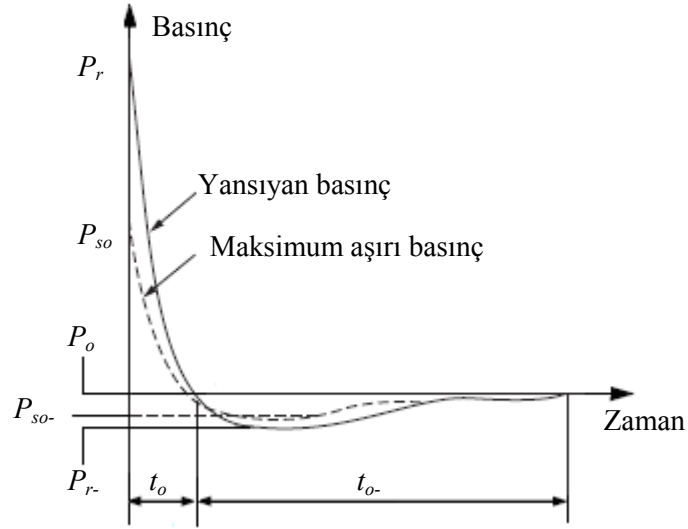
İmpuls, patlamalardan yapıya etkiyen enerjinin bir ölçüsüdür. İmpulsun matematiksel ifadesi Denklem 2.5 de verilmiştir [29]. Bu denklemden de görüleceği gibi impuls basınç-zaman değişim eğrisinin altında kalan alan ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde  $I_s$  impuls (MPa-ms),  $P(t)$  basınç fonksiyonu ve  $t$  zamandır.

$$I_s = \int P(t)dt \quad (2.5)$$

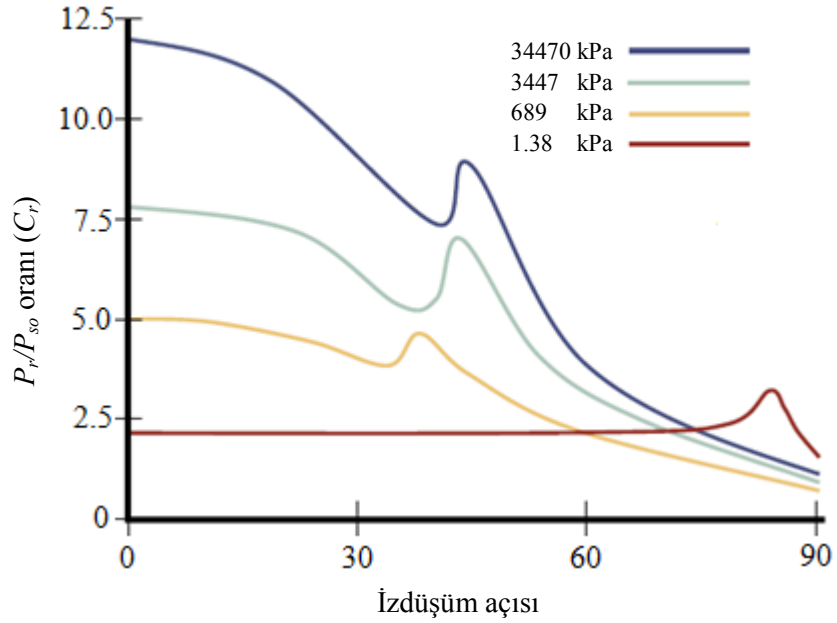
Patlamanın merkezinden yayılmaya başlayan şok dalgası bir yüzeyle karşılaştığı zaman basınç yüzeyden yansır ve arkasından gelen şok dalgası ile çarpışarak ortamda sıkışır. Bu çarpışmanın sonucunda ortamdaki basınç aniden artar ve maksimum yansıyan basınç ( $P_r$ ) oluşur. Şekil 2. 2 de aşırı basınç ile yansıyan basınç arasındaki tipik ilişki gösterilmiştir. Maksimum yansıyan basınç ile maksimum aşırı basınç arasında bir oran vardır. Bu oran ( $C_r$ ) maksimum aşırı basınç ve şok dalgasının çarptığı yüzey ile şok dalgasının yaptığı izdüşüm açısına ( $\alpha$ ) bağlıdır. Bu ilişki Denklem 2.6 da verilmiştir. Şok dalgasına dik konumlanmış bir yüzeyde ( $0^\circ$ ) yansıma maksimum, paralel konumlanmış bir yüzeyde ( $90^\circ$ ) ise minimum olmaktadır. İzdüşüm açısına ve farklı maksimum aşırı basınç ( $P_{so}$ ) seviyelerine bağlı olarak yansıyan basınç katsayısı Şekil 2.3 den bulunabilir.



$$P_r = C_r P_{so} \quad (2.6)$$



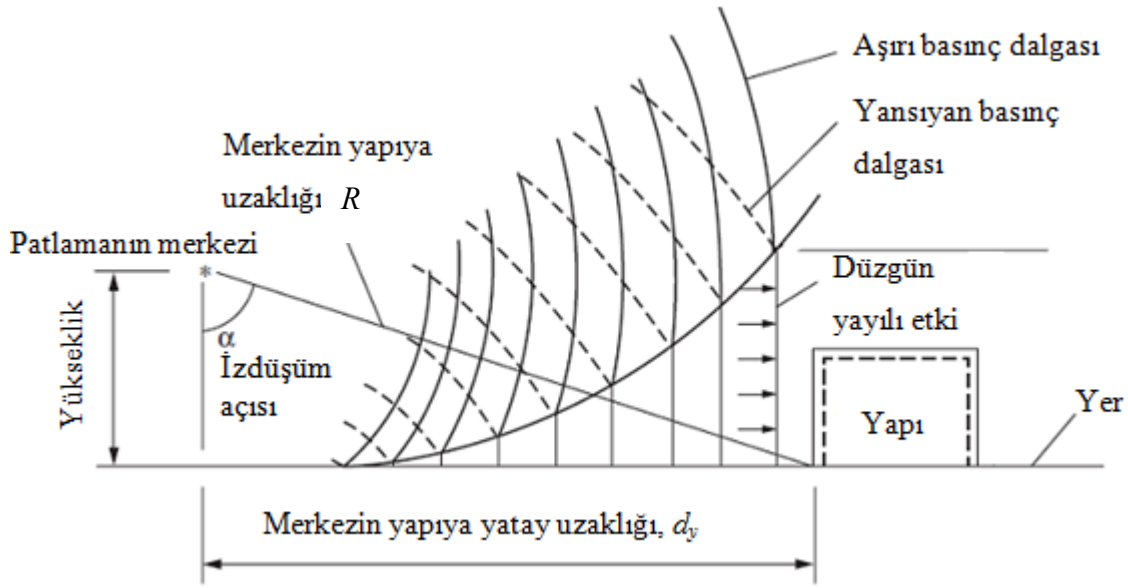
**Şekil 2.2:** Yansıma sırasında tipik basınç değişimi fonksiyonu [11]



**Şekil 2.3:** Yansıyan basınç katsayısı ile izdüşüm açısı arasındaki ilişki [29]

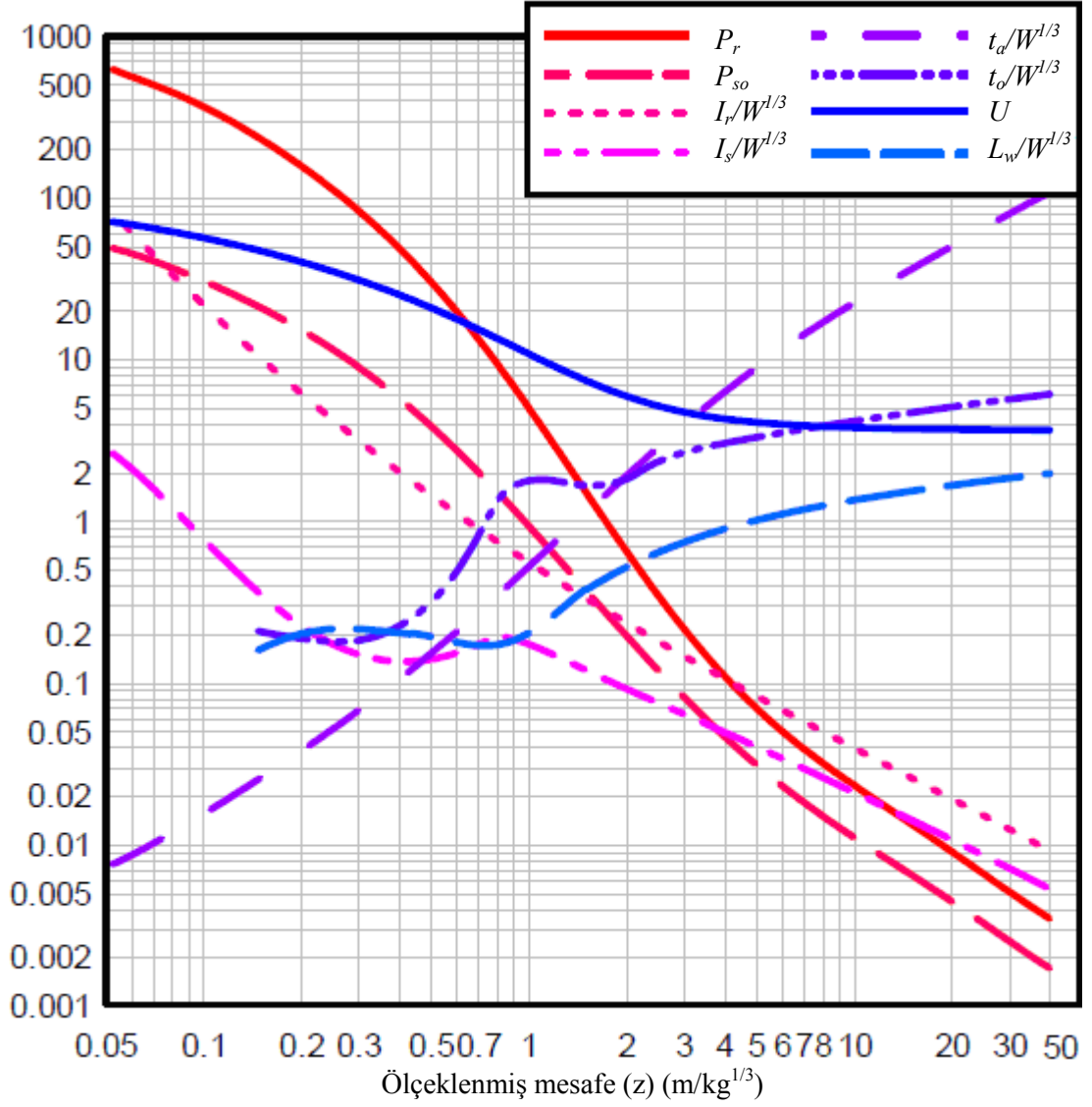
### 2.2.1.1 Yerden belirli bir yükseklikte yaşanan patlamalar

Yerden belirli bir yükseklikte yaşanan bir patlamanın yapıya ve/veya yapı elemanına belirli bir yüksekliğe kadar düzgün yayılı bir yük formunda etki ettiği kabul edilir. Yerden yüksekte yaşanan bir patlamada şok dalgasının çevreye etkileri Şekil 2.4 de verilmiştir.



**Şekil 2.4:** Yerden yüksekte yaşanan bir patlama ve çevreye etkileri [11]

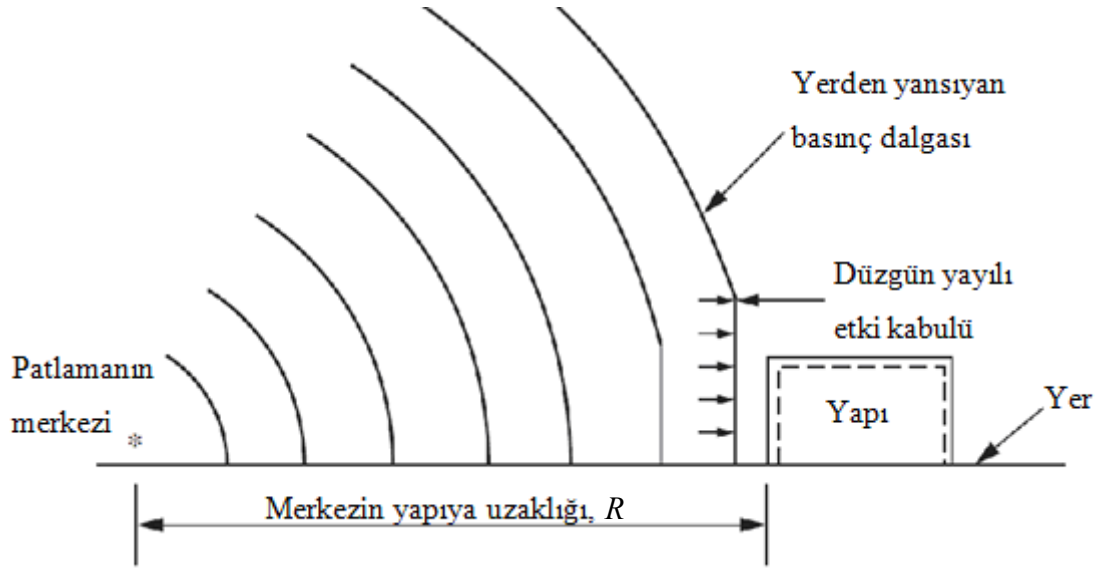
Bugüne kadar şok önü parametrelerini hesaplamak için deneysel ve teorik bir çok çalışma yapılmıştır. Patlama yüklerinin tayini bir çok farklı parametreye bağlı olduğundan bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda bir çok ampirik bağıntı ortaya çıkmıştır. Amerikan ordusunun ve Amerikan savunma bakanlığının tasarım kaynaklarında, bu konuda yapılmış en kapsamlı çalışmalar yer almaktadır. Bu kaynaklardaki veriler şok önü parametrelerinin ölçeklenmiş mesafeye bağlı olarak hesaplanmasını sağlayan abaklar şeklinde sunulmuştur. Şekil 2.5 de serbest hava ortamındaki bir patlamada şok önü parametreleri abağı verilmiştir. Bu abakta  $P_r$  şok dalgasına dik konumlanmış ( $0^\circ$ ) bir yüzeydeki yansıyan basıncı (MPa),  $P_{so}$  maksimum aşırı basıncı (MPa),  $I_r/W^{1/3}$  şok dalgasına dik konumlanmış bir yüzeydeki ölçeklenmiş birim yansıyan impulsu (MPa-ms/kg<sup>1/3</sup>),  $I_s/W^{1/3}$  pozitif ölçeklenmiş birim impulsu (MPa-ms/kg<sup>1/3</sup>),  $t_d/W^{1/3}$  şok dalgasının patlama merkezinden noktaya ölçeklenmiş ulaşma süresini (ms/kg<sup>1/3</sup>),  $t_o/W^{1/3}$  oluşan basıncın ölçeklenmiş pozitif etkiye süresini (ms/kg<sup>1/3</sup>),  $U$  şok dalgasının ortamdaki hızını (m/ms) ve  $L_w/W^{1/3}$  şok dalgasının ölçeklenmiş boyunu (m/kg<sup>1/3</sup>) vermektedir. Burada, patlayıcının ağırlığı ( $W$ ) patlayıcının TNT olarak ağırlığının belirtmektedir ( $W=W_E$ ).



**Şekil 2.5:** Yerden yüksekte yaşanan bir patlamanın şok önü parametreleri [23]

### 2.2.1.2 Yerin yüzeyinde yaşanan patlamalar

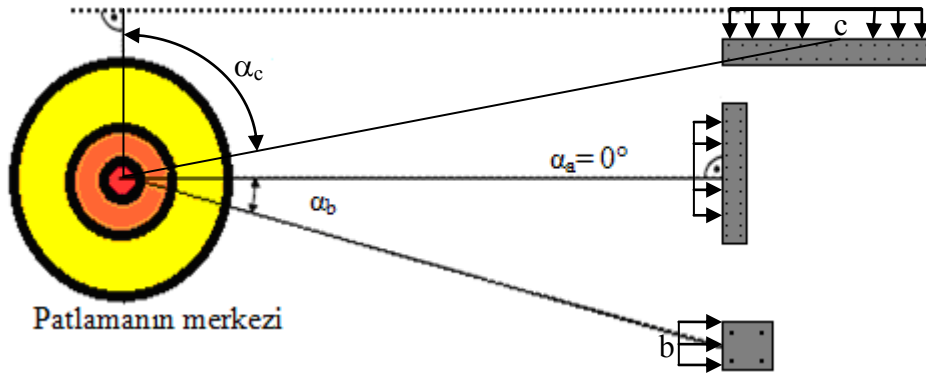
Patlama yeryüzüne yakın veya hemen toprak üstünde olursa patlama kaynağından çıkan şok dalgaları patlamanın merkezinden çıktığı andan itibaren yeryüzüne çarpar ve yerin yüzeyinden yansıyarak harekete başlar. Bu durum şok dalgalarının etkisinin yerin yüzeyinden yüksekte yaşanan bir patlamaya göre daha büyük olmasını sağlar. Bu tip bir patlama şok dalgalarının küresel olarak yayılımı ile ortamda hareket eder. Şok dalgasından oluşan basınç gerilmelerinin de serbest havada yaşanan patlamalarla aynı şekilde yapıya ve/veya yapı elemanına düzgün yayılı etkideği kabul edilir. Şekil 2.6 yüzeyde yaşanan bir patlamada şok dalgasının hareketini göstermektedir. Yeryüzüne yakın patlamalarda şok dalgası ile karşısına çıkan yüzey arasındaki izdüşüm açısı Şekil 2.7 de verildiği gibi bulunmalıdır.



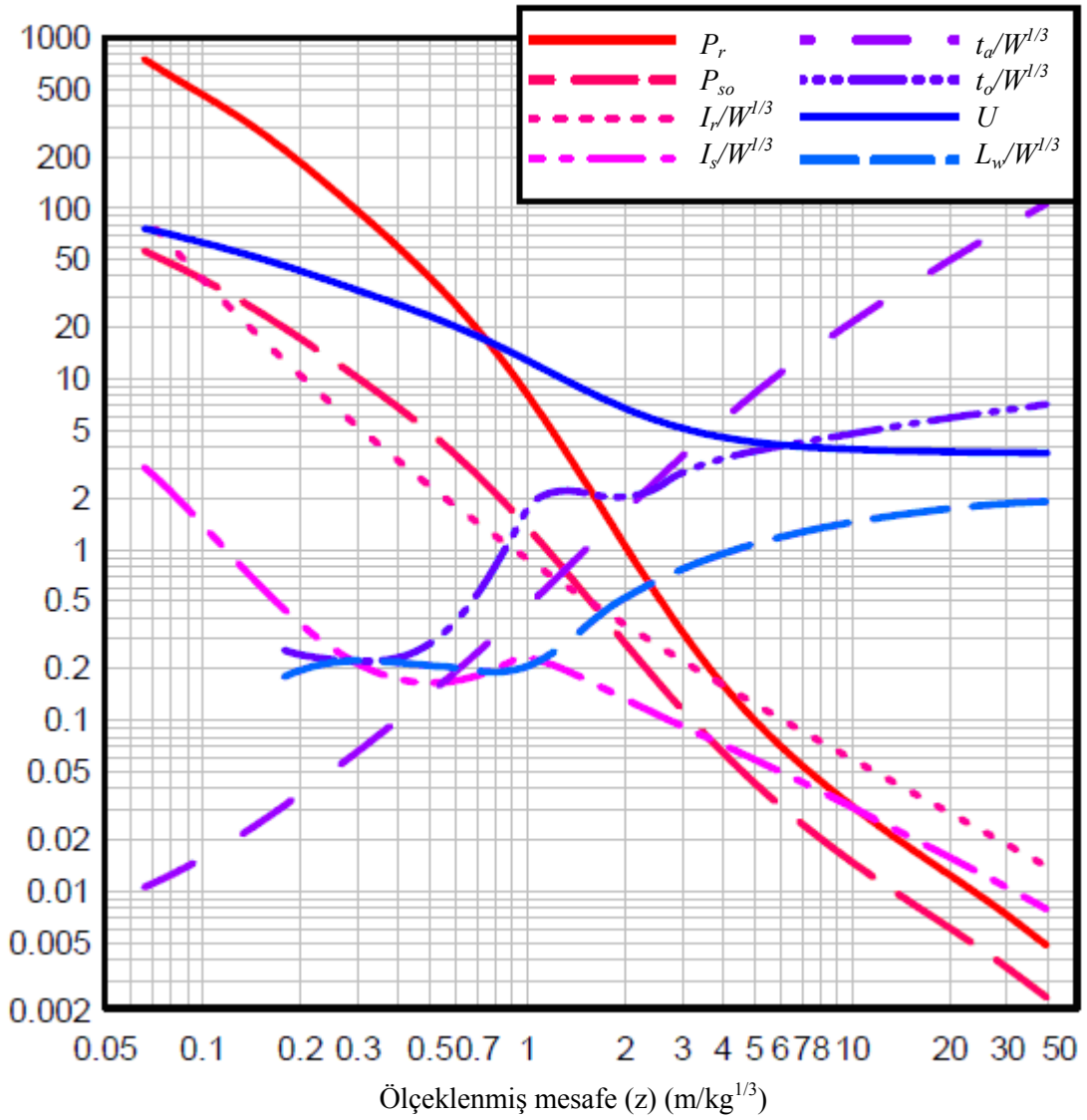
**Şekil 2.6:** Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlama ve çevresel etkileri [11]

Yerin yüzeyinde yaşanan patlamaları tanımlayacak şok önü parametrelerini bulmak için yine Amerikan ordusunun tasarım kitapları olan kaynaklardan yararlanılabilmektedir. Bu kaynaklardaki veriler şok önü parametrelerinin ölçeklenmiş mesafeye bağlı olarak bulunmasını sağlayan abaklar şeklinde sunulmuştur. Şekil 2.8 de yerin yüzeyine yakın bir patlamada şok önü parametreleri abağı verilmiştir. Bu abakta  $P_r$  şok dalgasına dik konumlanmış bir yüzeydeki yansıyan basıncı (MPa),  $P_{so}$  maksimum aşırı basıncı (MPa),  $I_r/W^{1/3}$  şok dalgasına dik konumlanmış bir yüzeydeki ölçeklenmiş birim yansıyan impulsu (MPa-ms/kg<sup>1/3</sup>),  $I_s/W^{1/3}$  pozitif ölçeklenmiş birim impulsu (MPa-ms/kg<sup>1/3</sup>),  $t_d/W^{1/3}$  şok dalgasının patlama merkezinden noktaya ölçeklenmiş ulaşma süresini (ms/kg<sup>1/3</sup>),  $t_o/W^{1/3}$  patlama basıncının ölçeklenmiş pozitif etkiye süresini (ms/kg<sup>1/3</sup>),  $U$  şok dalgasının ortamdaki hızını (m/ms) ve  $L_w/W^{1/3}$  şok dalgasının ölçeklenmiş boyunu (m/kg<sup>1/3</sup>) vermektedir. Burada, patlayıcının ağırlığı ( $W$ ) patlayıcının TNT olarak ağırlığının belirtmektedir ( $W=W_E$ ).

Serbest ortamlarda yaşanan patlamalarda bahsedilen şok önü parametrelerine ek olarak patlamadan dolayı havada oluşan dinamik etkileri de (rüzgar) göz önünde bulundurmamak gerekmektedir. Bu etki ortamdaki maksimum aşırı basıncın fonksiyonu olarak Şekil 2.9 dan hesaplanabilmektedir. Dinamik basınç etkileri hesaplara, geometrik şartlara bağlı olarak alınacak bir sürüklenme katsayısı ( $c_d$ ) ile çarpılarak eklenmelidir. Dinamik basıncın etkisi Denklem 2.7 deki gibi hesaplanmalıdır. Bu denklemde  $P_s$  durağanlık basıncı (MPa),  $P_{so}$  maksimum aşırı basınç (MPa),  $q_o$  dinamik basınçtır (MPa).

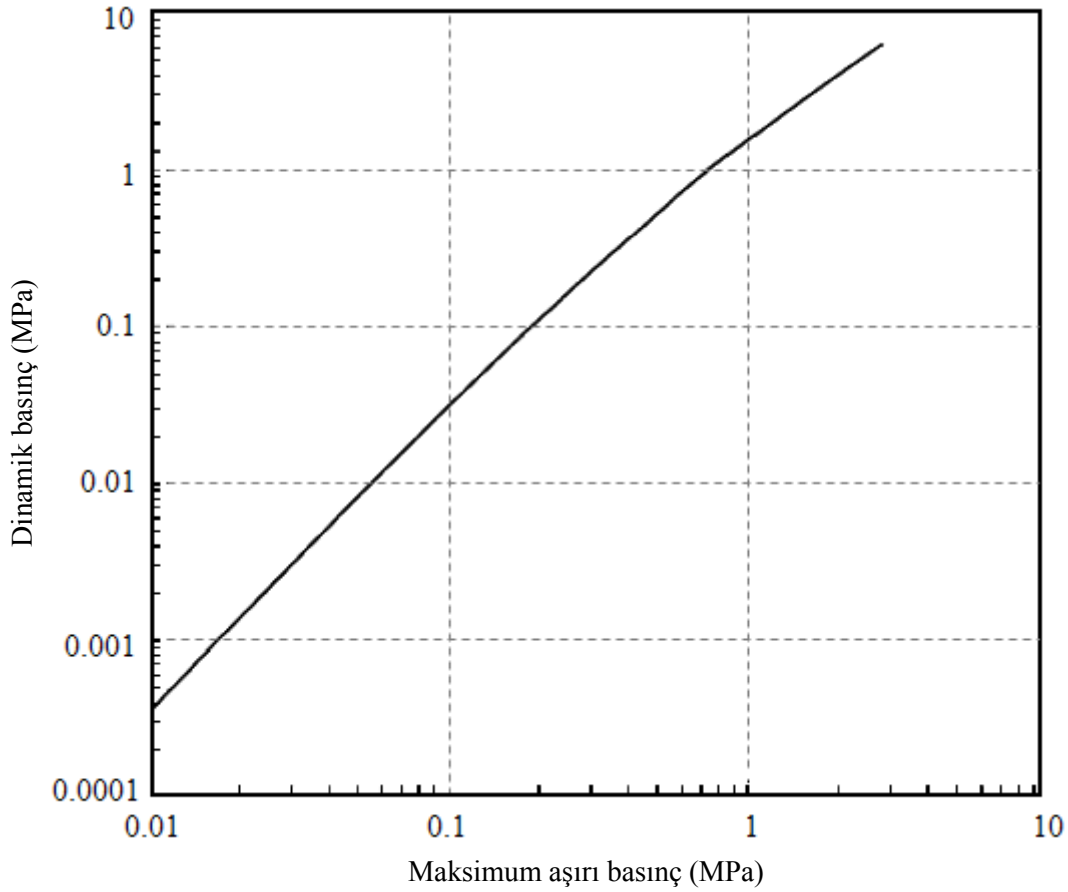


Şekil 2.7: Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlamada yansıma açılarının tayini [5]



Şekil 2.8: Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlamanın şok önü parametreleri [23]

$$P_S = P_{so} + c_d q_o \quad (2.7)$$

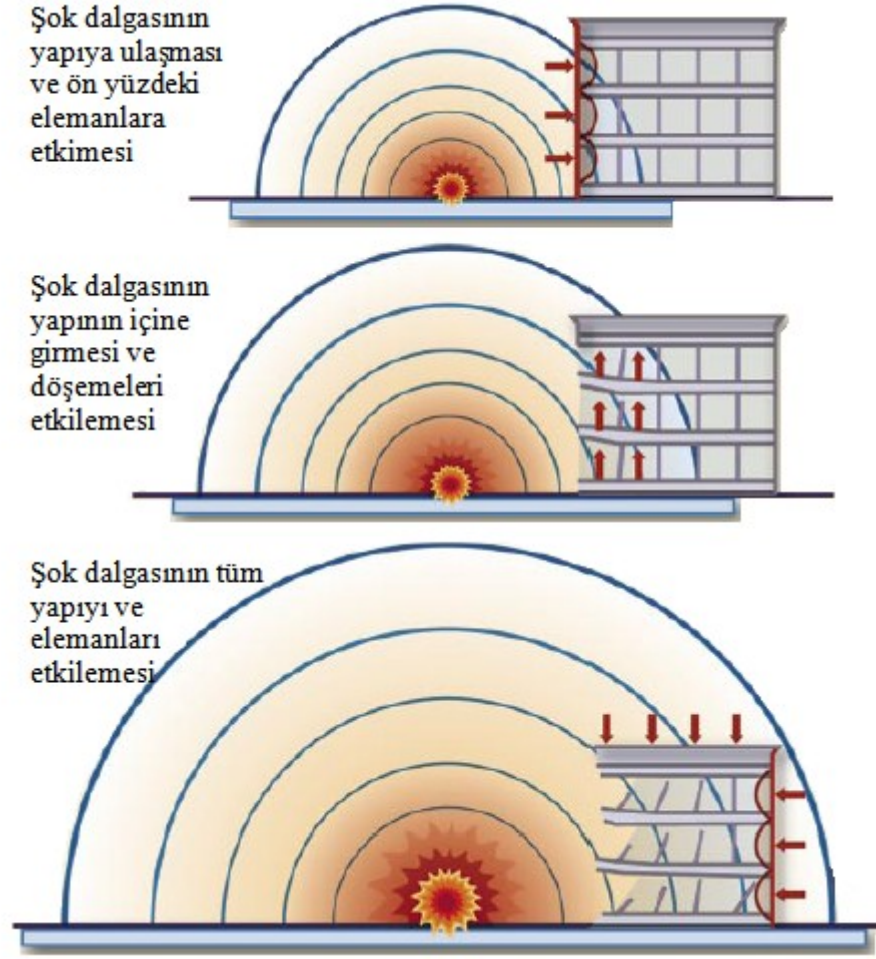


**Şekil 2.9:** Dinamik basıncının aşırı basınç ile değişimi [23]

### 2.2.1.3 Serbest ortamlarda yaşanan patlamaların oluşturduğu yüklerin yapıya etkimesi

Açık havada yaşanan bir patlamada şok dalgasının önüne gelen bir yerüstü yapısı aşırı basınç, dinamik basınç ve yansıyan basınç etkilerine maruz kalacaktır. Patlamanın merkezinden ortaya çıkan şok dalgası yapı ile karşılaştığında ortamda sıkışarak aniden büyüyerek yansıyan basıncı oluşturmaktadır. Oluşan yansıyan basınç oldukça kısa bir sürede etkisini kaybederek yerini aşırı basınç ve dinamik basınca bırakmaktadır. Aşırı basınç ve dinamik basınç da kısa sürede etkisini kaybeder ve ortamdaki basınç kısa süreliğine atmosfer basıncının altına düşerek bir emilim oluşturmaktadır. Pratik hesaplarda negatif basınç etkileri ihmal edilebilmektedir.

Ortamdaki şok önü parametreleri daha önceden anlatıldığı gibi patlamanın ve önündeki yapının konumuna, geometrisine bağlı olarak hesaplanmalıdır. Tipik bir çerçeve tarzı yapıda, yeryüzüne yakın yaşanan bir patlamanın yapıya etkileri Şekil 2.10 daki gibi olacaktır.



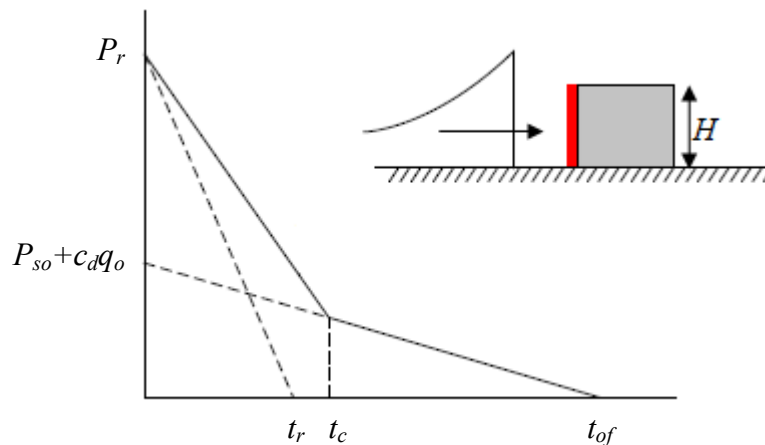
**Şekil 2.10:** Açık havada yaşanan patlamanın yarattığı basıncın yapıya etkileri [29]

Bu şekilden de görüleceği gibi yapıların patlamalar altında performansını bulurken yapının bütün bir sistem olarak değil elemanların performansları açısından değerlendirilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır. Patlamalar ortamda basınç dalgası halinde yayıldığından, yapı elemanlarının yüzeyleri ve yüzey alanları elemanların üzerlerindeki yükler açısından önemlidir. Bir diğer önemli konu da elemanların mesnetlenme şeklidir. Bu konu ileriki kısımlarda detaylı bir şekilde incelenecektir. Patlama sonucunda oluşan şok dalgasının bir yerüstü yapısı ile karşılaştığındaki hareketini detaylı olarak incelediğimizde yapı elemanlarının yüzeylerine düşen basınçların fonksiyonları Şekil 2.11 – 2.14 arasında tanımlandığı gibi olacaktır. Şekil 2.11 de yapının ön yüzüne gelen basınç fonksiyonu verilmiştir. Bu şekilde daha önceden bahsettiğimiz gibi  $P_r$  yansıyan basınç ve  $P_{so}$  maksimum aşırı basınç,  $c_d$  sürüklenme katsayısı ve  $q_o$  dinamik basınçtır. Burada  $t_c$  şok dalgasının yapı yüzeyinde yansıyan basıncı oluşturmasından bu basıncın etkisini kaybedip yüzeyde yalnızca aşırı basınç ve dinamik basıncın etkilerinin kaldığı zamana kadar geçen süreyi

$$t_c = \frac{3S}{U} \quad (2.8)$$

$$t_{of} = \frac{2I_s}{P_{so}} \quad (2.9)$$

$$t_r = \frac{2I_r}{P_r} \quad (2.10)$$



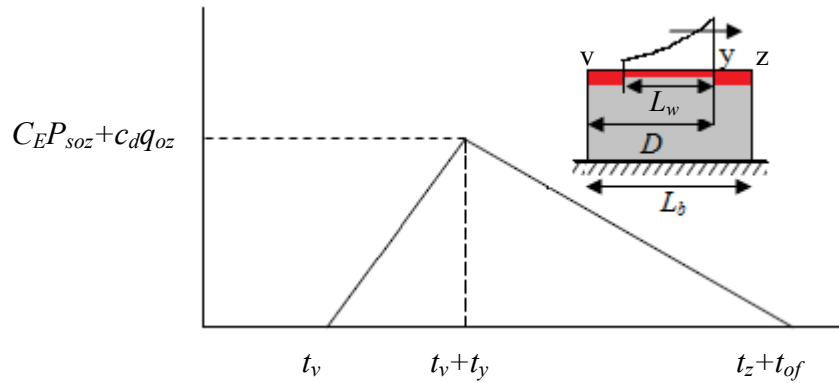
**Şekil 2.11:** Yapının ön yüzüne gelen basıncın fonksiyonu [11]

Şok dalgası ön duvarı geçip yapının veya yapı elemanının üst ve yan kısımlarına ulaştığı zaman ortamdaki basınç sıkışamayacağından bu bölgelerde yalnızca aşırı basınç ve dinamik hava basıncı etkili olacaktır. Ayrıca bu bölgelerde dinamik hava basıncı aşırı basıncı büyüten bir etki değil yüzeyde azaltıcı olarak etki yapacaktır. Çizelge 2.2 de üst, yan ve arka duvarlar için farklı basınç seviyelerindeki sürükleme katsayıları yer almaktadır. Yapının bu bölgelerindeki yükün fonksiyonunu tam olarak anlamak için hidrodinamik hesaplar yapmak gerekmektedir [2]. Bunun yerine

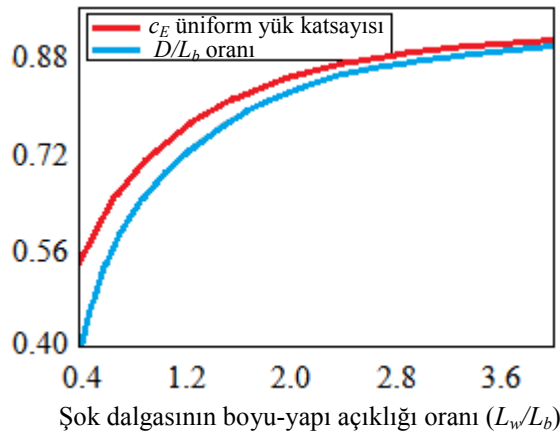


yaklaşık olarak hesap yapılması istenirse, yapının bu bölgelerinde şok dalgasının oluşturduğu yükler üniform olmayan bir şekilde dağıldığından dolayı düzgün yayılı yük kabulü yapmak için bir üniform yük katsayısı kullanılması gerekmektedir. Üst ve yan yüzeylerdeki basıncın fonksiyonu Şekil 2.12 deki gibi olacaktır. Bu şekilde  $t_v$  şok önünün v noktasına geldiği ana kadar geçen süre,  $t_y$  şok önünün v den y gelişi esnasında geçen süredir.

Hesapları basitleştirmek için burada ilk olarak v noktasındaki maksimum aşırı basınç ve dinamik basınç (sırasıyla  $P_{sov}$  ve  $q_{ov}$ ) bulunur. Maksimum aşırı basınç  $c_E$  üniform yük katsayısı ile çarpılarak yarattığı yaklaşık etki hesaplanır. Üniform yük katsayısı ( $c_E$ ), şok dalgasının boyunun ( $L_w$ ) yapı açıklığına ( $L_b$ ) oranına bağlı olarak Şekil 2.13 den hesaplanabilir. Basıncın artış süresi olan  $t_y$  Şekil 2.12 de gösterilen  $D$  uzaklığı ile şok dalgası hızının fonksiyonudur (Denklem 2.11). Bu denklemde  $D$  uzaklığı şok önü aşırı basıncının yapı yüzeyinde maksimum gerilme oluşturduğu nokta (y) ile yapı üzerinde harekete başladığı nokta (v) arasındaki yaklaşık mesafedir. Bu değer şok dalgasının boyunun yapı açıklığına oranına bağlı olarak Şekil 2.13 den bulunabilir.



**Şekil 2.12:** Üst ve yan duvarlara gelen basıncın fonksiyonu [11]



**Şekil 2.13:**  $c_E$  katsayısının ve  $D/L_b$  nin şok dalgası-yapı açıklığına oranı [2]

$$t_y = \frac{D}{U} \quad (2.11)$$

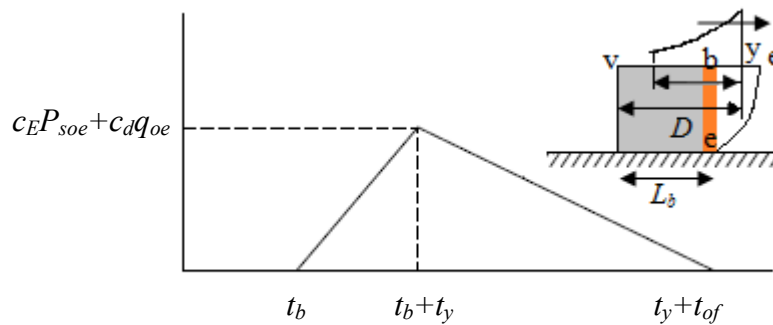
**Çizelge 2.2:** Üst, yan ve arka yüzeyler için sürüklenme katsayıları [2]

| Basınç aralığı<br>(kPa) | Sürüklenme katsayısı<br>( $c_d$ ) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 0-170                   | -0.40                             |
| 170-350                 | -0.30                             |
| 350-1000                | -0.20                             |

Yapının veya yapı elemanının arka yüzeyine gelen basınç da tıpkı üst ve yan yüzeylere gelen basınçlar gibi düzgün bir dağılıma sahip değildir. Bu yüzden basıncın etkisini hesaplayabilmek oldukça zordur. Arka yüzeye gelen basıncın etkisini de basitleştirerek çözüm yapmak istenirse, ortalama bir basınç hesaplanması gerekmektedir. Şok dalgasının arka yüzeye ulaştığı andaki basınç değişimi Şekil 2.14 deki gibidir. Arka yüzeye gelen basıncın etkisini yaklaşık olarak düzgün yayılı hale getirmek için basıncın tüm arka yüzeye etki ettiği uzaklıktaki maksimum aşırı basıncı ( $e$  noktasındaki maksimum aşırı basınç ( $P_{soe}$ )) bir katsayı ( $c_E$ ) ile çarpmak gerekmektedir. Bu katsayı şok dalgası boyu-yapı açıklık oranına bağlı olarak Şekil 2.13 den elde edilebilir.

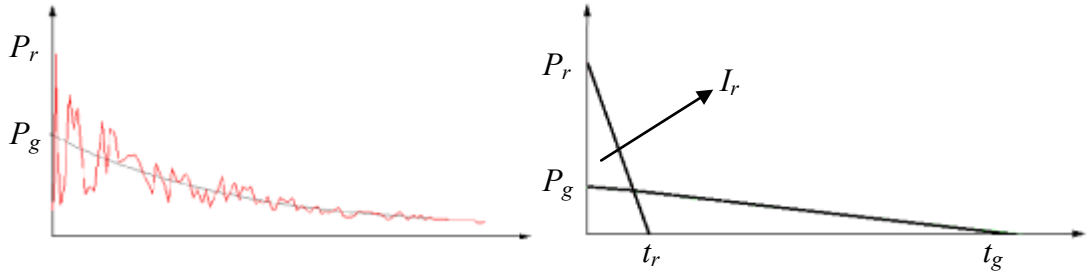
### 2.2.2 Kapalı ortamlarda yaşanan patlamaların etkileri

Kapalı ortamda yaşanan bir patlama çevresinde oldukça karmaşık bir etki yaratacaktır. Bu etkinin tam olarak tanımlanması oldukça zordur. Etkilerin anlaşılmasının kolaylaştırılması için kapalı ortamdaki bir patlamanın genelde iki aşamalı bir yükleme oluşturduğu kabul edilmektedir. Bu etkilerden birincisi ortamdaki sınırlandırıcı duvarların şok dalgasının hareketine izin vermemesinden dolayı ortamdaki duvarlardan yansyarak oluşan yansıyan basınç etkisidir. Çok kısa



**Şekil 2.14:** Yapının arka yüzeyine gelen basıncın değişimi [11]

sürekli ve büyük etkili bir basıncıdır. İkincisi ise yansıyan basınca göre uzun süreli ve düşük etkili olan bir gaz basıncıdır. Şekil 2.15 de tipik bir kapalı ortam patlamasının bir yapı elemanına uyguladığı basıncın değişimi ve idealleştirilmiş basınç grafiği verilmiştir. Bu şekilde  $P_r$  kapalı ortamdaki yaşanan patlamanın yapı üzerinde oluşturduğu yansıyan basınç,  $P_g$  patlama sonrasında ortamda açığa çıkan gaz basıncı,  $t_r$  yansıyan basıncın etkiye süresi,  $t_g$  gaz basıncının etkiye süresidir. Gaz basıncı, patlama sonucunda oluşan gazların kapalı ortamdaki açık havaya tayınine kadar ortamdaki etkisidir. Bu basıncın büyüklüğü ve etkiye süresi yapının atmosfere açık bulunan geometrisi ile ilgilidir. Atmosfere açıklığı çok büyük olan yapılarda bu gaz basıncı oluşmaz.



**Şekil 2.15:** Kapalı ortamda yaşanan patlamalarda basıncın zamanla değişimi [11]

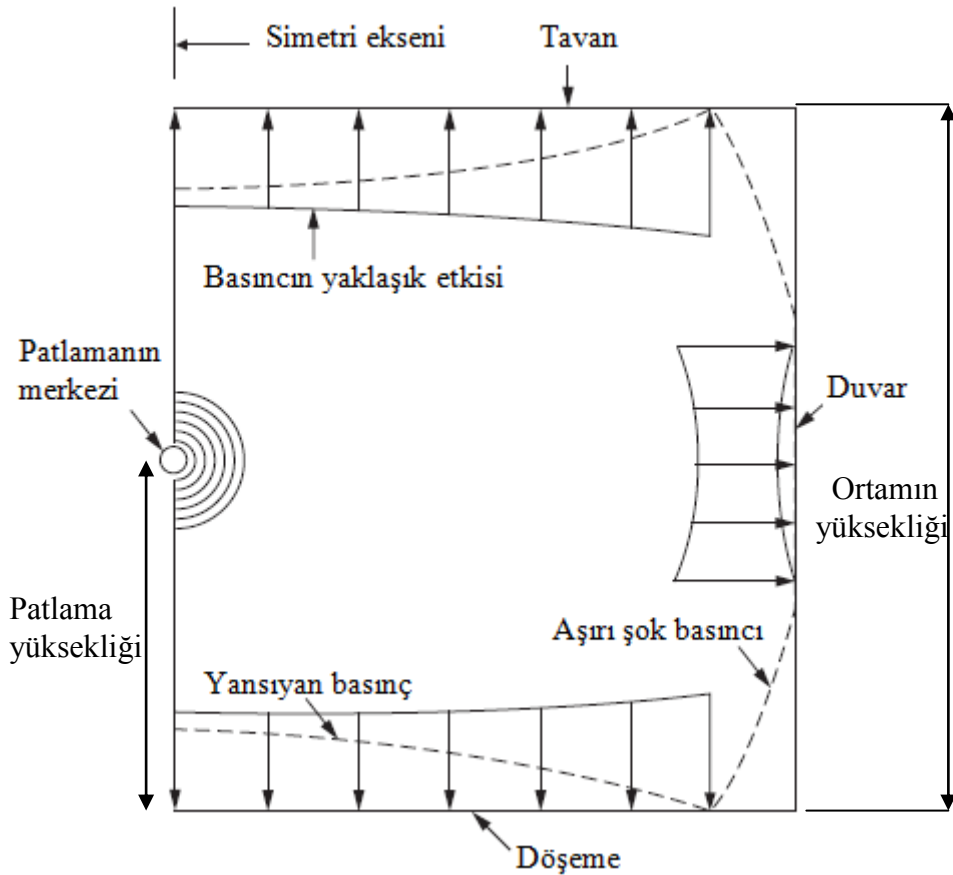
Kapalı ortamda yaşanan patlamanın ardından açığa çıkan şok dalgası ilk duvara çarpma kadar serbest ortamda yaşanan patlamalar ile aynı hareketi yapmaktadır. Daha sonra şok dalgası duvarlardan yansıyarak ortamda büyüyerek hareketine devam etmektedir. Bu etkilerin tam olarak hesaplanması için ileri düzeyde bir akışkanlar dinamiği analizine ihtiyaç vardır.

Basitleştirilmiş hesaplarda kapalı ortamda yaşanan patlamalarda da şok dalgasının duvarlar üzerinde oluşturduğu basıncın düzgün yayılı olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşım tam olarak doğru olmamakla birlikte yeterince yaklaşık sonuçlar vermektedir. Tipik bir kapalı ortam patlaması ve basıncın duvarlara yaklaşık etkileri Şekil 2.16 daki gibidir.

Kapalı ortamlarda yaşanan patlamalarda yaklaşık parametreleri bulunması için Amerikan ordusunun ve savunma bakanlığının yaptığı çalışmalar sonucunda yayınladığı kaynaklarda, farklı geometrik parametrelere bağlı olarak bu basıncın ve sonrasında açığa çıkan gaz basıncının hesaplanması için ampirik abaklar verilmiştir. Bu konuda daha detaylı bilgi ilgili kaynaklardadır [12]. Bu abakların detaylı olarak kullanımı 7. bölümdeki örnekte anlatılmıştır.

Temelde kapalı ortamları 3 farklı gruba ayırabiliriz. Bunlar; tamamen kapalı ortamlar, atmosfere açılan boşlukları küçük olan kısmi boşluklu kapalı ortamlar ve atmosfere açılan boşlukları rölatif olarak daha büyük olan tam boşluklu kapalı ortamlardır [11]. Ortamlarda oluşan gaz basıncı, bu boşlukların yapıda yarattığı geometrik koşullara göre oluşmaktadır. Daha önceden de bahsedildiği gibi tam boşluklu kapalı ortamlarda gaz basıncı oluşmamaktadır. Atmosfere boşlukları olmayan tamamen kapalı olan yapıların boşluklu yapılara göre patlama yükleri altında daha fazla etkiye kalacağı için daha dayanıklı olması gerekmektedir. Boşluklu yapılarda patlamanın yarattığı enerjinin bir kısmı yapı boşluklarındaki camları kırarak atmosfere ulaşarak absorbe edilebilir.

Yansıyan basıncın hesaplanması, yapının geometrik ve patlama parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler; şok dalgasının yüzeylerden yansıma sayısı (yapının plan geometrisine göre seçilmektedir), patlamanın yüksekliğinin ortamın yüksekliğine oranı, patlamanın merkezinin iki yönde de sınırlandırıcı duvarlara olan uzaklıkları ve ölçeklenmiş mesafedir.



**Şekil 2.16:** Kapalı ortamda yaşanan patlamada basıncın duvarlara etkileri [2]

Patlamanın ardından ortamda açığa çıkan gazların oluşturduğu yüksek sıcaklıklı basıncın değişimi Şekil 2.15 de verilmişti. Buradaki gaz basıncının ortamda kalma süresi ve büyüklüğü, patlayıcının büyüklüğü, kapalı ortamın geometrik şartları ve kapalı ortamın açıldığı açık havanın şartlarına bağlıdır. Bu parametrelerin hesaplanmasını etkileyecek parametreleri kısaca sıralarsak; patlayıcının ağırlıkça TNT karşılığı ( $W_E$ ), patlamanın yaşandığı ortamın hacmi ( $V$ ), ortamda bulunan boşluk alanları toplamının kapalı duvar alanları toplamına oranı ( $\lambda_c=A_v/A_w$ ), açık hava basıncı ( $P_o$ ) ve ses hızıdır ( $C$ ). Bu parametreleri kullanılarak daha önceden de referans verilen Amerikan ordusunun ve savunma bakanlığının kaynaklarından [11] yararlanılarak patlama sonrasında açığa çıkan gaz basınç ve ortamda kalma süresi hesaplanabilir.

### 2.2.3 Patlama sonucunda oluşan yer hareketlerinin yapıya etkileri

Patlama dalgası yapıya çarpmasıyla oluşturduğu etkiye ek olarak, yerin yüzeyine de çarparak yer sarsıntıları meydana getirebilir. Yerden belirli mesafe yüksekte yaşanan patlamalarda ve yerin yüzeyinde yaşanan patlamalarda sarsıntılar birbirinden farklı olacaktır [24].

Yerden belirli bir mesafe yüksekte yaşanan bir patlama sonucunda yer düşey doğrultuda basınca maruz kalacaktır. Amerikan ordusunun kaza patlamalarına yönelik geliştirdiği tasarım kaynağında, yerden belirli bir mesafe yüksekteki patlamalarda tek boyutta dalga boyu teorisi kullanılarak, düşey doğrultudaki maksimum yer hareketi parametreleri daha önce verilen patlama yükü parametrelerine bağlı olarak ampirik bağıntılarla ifade edilmiştir [12]. Bu bağıntılar ve daha detaylı bilgileri ilgili kaynaklardan elde edilebilir. Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlamada ise yerin yüzeyinde yatay ve düşey doğrultuda hareketler olacaktır. Aynı kaynaktan yerin yüzeyindeki maksimum yerdeğiştirme ve ivme için ampirik bağıntılar önerilmiştir [12].

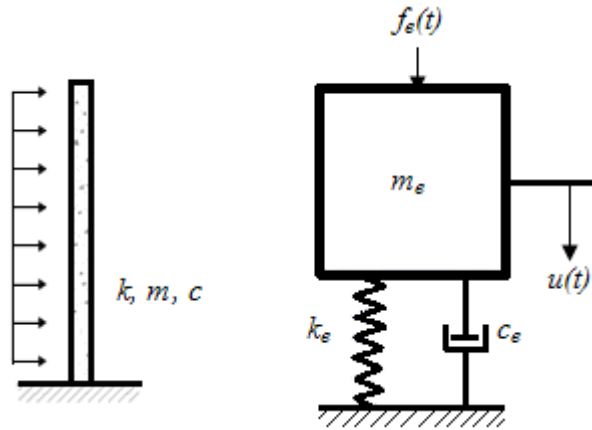
Patlama sonrasında yer sarsıntı etkilerini, özellikle patlamaya çok yakın mesafedeki yapıların sistem davranışları açısından incelenmelidir. Bunun dışındaki patlamalarda ise bu etki şok dalgasının yarattığı etkilere göre ihmal edilebilmektedir.



### 3. ELEMANLARIN MODELLENMESİ

#### 3.1 Tek Serbestlik Dereceli Model

Yapıların patlama yükleri altında analizi şekildeğiştirme hızının etkisi, doğrusal olmayan malzeme davranışının etkisi, mesnet şartlarının modellenmesi, patlama yükündeki belirsizlikler ve zamana bağlı şekildeğiştirmeler gibi oldukça karmaşık etkiler içermektedir. Bu sebeple patlama yükleri altındaki davranış bir çok parametreye bağlı kalmaktadır. Tüm bu etkileri gerçeğe en yakın şekilde modelleyebilmek gerçeğe en yakın davranışı elde etmemizi sağlayacaktır. Fakat gerçeğe en yakın şekilde model kurmak ve analiz etmek zaman alan ve her tasarımda ekonomik olarak da anlamlı olmayan bir yaklaşımdır. Bu konuda hesapları basitleştirmenin bir yolu yapı elemanlarını tek serbestlik dereceli (TSD) bir sistem olarak modellemektir. Bu yöntem çözümde hata payını arttırmakla birlikte getirdiği kolaylıktan dolayı yaygın olarak kullanılır. Bir yapı elemanının TSD sistem modeli oluşturulurken yapı elemanının kütlesi ( $m$ ), rijitliği ( $k$ ) ve sönüm ( $c$ ) gibi çözümde belirleyici özellikleri birinci derecede göz önünde bulunmalıdır. Bu sebeple TSD sistemin yaklaşık olarak doğru sonuçlar verebilmesi için yapı elemanının özellikleriyle örtüşen bir etkin kütle ( $m_e$ ), etkin rijitliğe ( $k_e$ ) ve etkin bir sönüm oranına ( $c_e$ ) sahip olması gerekmektedir.



Şekil 3.1: Yapı elemanının tek serbestlik dereceli sisteme dönüşümü

Etkin kütle ile yapı elemanının kütlesi arasında kütle dönüşüm faktörü ( $k_m$ ), rijitlikler arasında rijitlik dönüşüm katsayısı ( $k_r$ ) ve sönüm katsayısı dönüşüm faktörü ( $k_d$ ) kullanılmalıdır. Ayrıca yapı elemanına etkiyen yükleme fonksiyonunun da ( $f(t)$ ) yük dönüşüm faktörü ( $k_l$ ) ile etkin yükleme fonksiyonuna ( $f_e(t)$ ) dönüştürülmesine ihtiyaç vardır. Tek serbestlik dereceli bir sistemin zamana bağlı yerdeğiştirmesi Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 de verilen hareket denkleminin çözülmesiyle bulunmaktadır. Bu denklemde  $\ddot{u}(t)$  ivme,  $\dot{u}(t)$  hız,  $u(t)$  yerdeğiştirmeye ve  $t$  zamandır.

$$k_m m \ddot{u}(t) + k_d c \dot{u}(t) + k_r k u(t) = k_l f(t) \quad (3.1)$$

$$m_e \ddot{u}(t) + c_e \dot{u}(t) + k_e u(t) = f_e(t) \quad (3.2)$$

Bu denklemde çözümü kolaylaştırmak amacıyla elemanın sönümsüz kabul edilebilir. Bu yaklaşım, patlama yükleri altında sönümün, enerji yutma kapasitesine etkisinin rölatif olarak daha düşük olduğundan sonuçları çok etkilememektedir [23]. Bu durumda sistemin hareket denklemi Denklem 3.3 deki gibi olacaktır.

$$m_e \ddot{u}(t) + k_e u(t) = f_e(t) \quad (3.3)$$

Dönüşüm faktörleri temelde enerjinin korunumu yasası gereğince, dış kuvvetler tarafından yapılan işin ( $WE$ ), elemanda ve tek serbestlik dereceli sistemde depolanan kinetik enerji ( $KE$ ) ve şekildeğiştirme enerjisi ( $SE$ ) toplamının eşitliğine dayanmaktadır (Denklem 3.4) [23].

$$WE = KE + SE \quad (3.4)$$

Bu eşitlikle birlikte TSD sistem ile yapı elemanı arasında yapılan iş enerjisi, kinetik enerji ve şekildeğiştirme enerjisi eşit alınmaktadır. Bu eşitliklerin temeli yapı elemanının varsayılan mod şekli ile tepki vermesi göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Yapılan işlerin eşitliği kullanılarak yük dönüşüm faktörü ve rijitlik dönüşüm faktörü birbirine eşit alınabilmektedir [23]. Bu durumda Denklem 3.1 de verilen hareket denklemi Denklem 3.5 e dönüşmektedir.

$$k_m m \ddot{u}(t) + k_l k u(t) = k_l f(t) \quad (3.5)$$

Burada denklemin her iki tarafını  $k_l$  (yük dönüşüm katsayısı) ile bölersek, Denklem 3.6 ortaya çıkacaktır. Bu denklemden de anlaşılacağı gibi yapı elemanı ile TSD sistem arasında kütle  $k_m/k_l$  çarpanı ile çarpılması dönüşüm için yeterli olacaktır.



$$\frac{k_m}{k_l} m\ddot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (3.6)$$

Yük dönüşüm faktörü ( $k_l$ ), TSD sistemin ve yapı elemanının üzerindeki dış kuvvetlerin yaptığı iş enerjilerinin eşitliğine dayanmaktadır. Bu eşitlikler Denklem 3.7 ile Denklem 3.12 arasında verilmiştir. Bu denklemlerde  $WE(t)_{TSDS}$  TSD sistemde dış kuvvetlerin yaptığı iş,  $WE(t)_{YAPI}$  yapı elemanının üzerindeki dış kuvvetlerin yaptığı iş,  $q(x)$  yapı elemanı üzerindeki yükün formunun fonksiyonu,  $\varphi(x)$  yapı elemanı için kabul edilen yerdeğiştirme fonksiyonu,  $q(t)_{max}$  yapı elemanında sabit bir x noktasına gelen maksimum yük,  $u(t)_{max}$  yapı elemanında sabit bir x noktasındaki maksimum yerdeğiştirme ve  $L$  yapı elemanının yüksekliğidir.

$$WE(t)_{TSDS} = WE(t)_{YAPI} \quad (3.7)$$

$$f_e(t).u(t) = \int_0^L q(x).q(t)_{max}.u(t)_{max}.\varphi(x)dx \quad (3.8)$$

$$f_e(t) = k_l f(t) \quad (3.9)$$

$$k_l = \frac{f_e(t)}{f(t)} \quad (3.10)$$

$$k_l = \int_0^L q(x).q(t)_{max}.\varphi(x)dx \bigg/ \int_0^L q(x).q(t)_{max}dx \quad (3.11)$$

$$k_l = \int_0^L q(x).\varphi(x)dx \bigg/ \int_0^L q(x)dx \quad (3.12)$$

Kütle dönüşüm faktörü ( $k_m$ ), TSD sistemin ve yapı elemanının kinetik enerjilerinin eşitliğine dayanmaktadır. Dönüşüm formülleri Denklem 3.13 ile Denklem 3.17 arasında verilmiştir. Bu denklemlerde  $KE(t)_{TSDS}$  TSD sistemde kinetik enerjisi,  $KE(t)_{YAPI}$  yapı elemanının kinetik enerjisi,  $m(x)$  yapının birim uzunluğunun kütlesi,  $q(x)$  yapı elemanı üzerindeki sabit yükün formunun fonksiyonu,  $\varphi(x)$  yapı elemanı için kabul edilen yerdeğiştirme fonksiyonu,  $\dot{u}_{max}$  yapı elemanındaki sabit bir x noktasındaki maksimum hız ve  $\dot{u}$  TSD sistemde sabit bir x noktasındaki maksimum hızdır.

$$KE(t)_{TSDS} = KE(t)_{YAPI} \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{2} m_e \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} \int_0^L m(x) \dot{\mathcal{U}}_{\max}^2(x) dx \quad (3.14)$$

$$m_e = k_m m \quad (3.15)$$

$$k_m = \frac{m_e}{m} \quad (3.16)$$

$$k_m = \int_0^L m(x) \cdot \varphi^2(x) dx \bigg/ \int_0^L m(x) dx \quad (3.17)$$

Çeşitli mesnet ve yüklemeler altında bir çok yapı elemanı için eşlenik sistem dönüşüm faktörleri Biggs (1964) [7] tarafından verilmiştir. Ek A da bu tablolar verilmiştir.

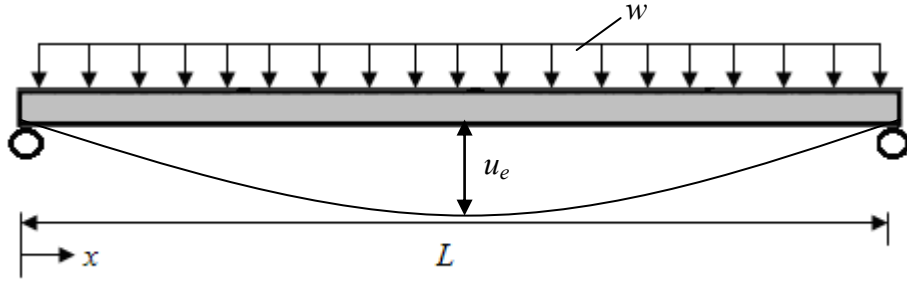
### 3.2 Yük – Yerdeğiştirme İlişkisi

Yük – yerdeğiştirme ilişkileri TSD eşlenik sistem sistemlere temsil ettiği yapı elemanının yapısal özelliklerini aktarmanın bir yoludur. Bu yöntemle çözümü aranan elemanın göçme moduna bağlı olarak (eğilme etkisinde, kesme etkisinde ya da eksenel yük etkisinde) yük ve yerdeğiştirme özellikleri TSD eşlenik sisteme tanımlanmaktadır.

TSD eşlenik sistemler yük – yerdeğiştirme ilişkileri bakımından bir çok farklı şekilde tanımlanabilmektedirler. Bunlar; elastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi, elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi, histeretik yük – yerdeğiştirme ilişkisi gibidir. Pratiklik ve sonuçların yakınlığı açısından en dengeli yöntem yük – yerdeğiştirme ilişkisinin elastoplastik tanımlanmasıdır. Bu yöntem ilk olarak Biggs (1964) tarafından geliştirilmiştir.

#### 3.2.1 Elastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi

TSD eşlenik sistemin elastik davranışını bilmek için modellediğimiz yapı elemanının göçme modunu ve dayanımını, mesnet koşullarını ve yükleme koşullarını bilmeliyiz. Örneğin Şekil 3.2 de verilen iki ucu basit mesnetli, düzgün yayılı yük için elastik yük – yerdeğiştirme ilişkisini tanımlamak istersek; öncelikle elemanının göçme modunu incelemeliyiz. Bu konuda daha detaylı bilgiler 4. bölümde bulunabilecektir. Bu kısımda göçme modunun eğilme olduğunu kabul edilecektir.



**Şekil 3. 2:** Düzgün yayılı yüklenmiş basit bir basit kirişin elastik yerdeğiştirmesi

Eğilme etkisi altındaki basit mesnetli kirişlerin elastik yerdeğiştirmesi Şekil 3.2 deki gibi olacaktır. Burada plastik mafsall yaklaşımı uygulanacaktır. Plastik mafsall, elemanın kapasitesine ilk ulaşacağı yerde tanımlanacaktır. Basit mesnetli bir kirişte ilk kapasiteye ulaşacak bölge eleman açıklığının orta noktasıdır. Düzgün yayılı yüklenecek bir kirişin orta noktasındaki eğilme momenti Denklem 3.18 de verildiğı gibi bulunabilmektedir. Bu denklemde  $M$  açıklıktaki eğilme momenti,  $w$  düzgün yayılı yükün büyüklüğü ve  $L$  elemanın açıklığıdır.

$$M = \frac{wL^2}{8} \quad (3.18)$$

Bu denklemten yararlanarak elastik eğilme momenti kapasitesi ( $M_e$ ) bilinen bir elemanın elastik olarak taşıyabileceğı maksimum düzgün yayılı yükü ( $w_e$ ) Denklem 3.19 ile bulunabilir.

$$w_e = \frac{8M_e}{L^2} \quad (3.19)$$

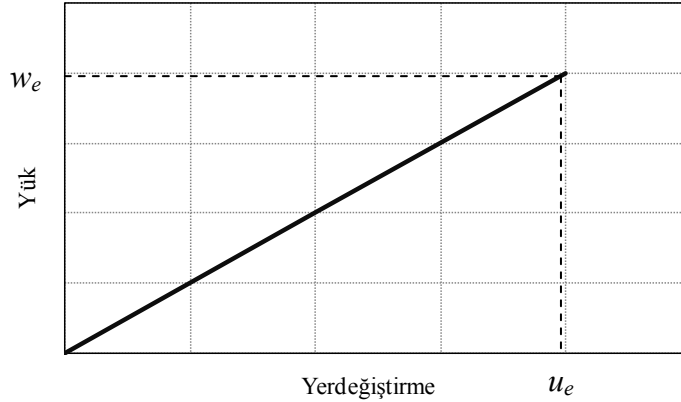
Basit mesnetli bu kirişin elastik eğilme rijitliğini Denklem 3.20 deki gibi bulabiliriz. Bu denklemde  $E$  elastisite modülü,  $I$  atalet momentidir. Burada elemanın elastik davranışı araştırıldığından kesit için çatlamamış atalet momenti kullanılabilir. Farklı mesnet şartlarına sahip elemanlar için elastik rijitlikler Ek A da verilmiştir.

$$k = \frac{384EI}{5L^4} \quad (3.20)$$

Elastik rijitliğı bulunan yapı elemanının elastik yerdeğiştirme kapasitesi Denklem 3.21 ile bulunabilir. Bu denklemde  $u_e$  elemanın elastik yerdeğiştirme kapasitesidir.

$$u_e = \frac{w_e}{k} \quad (3.21)$$

Bu durumda yapı elemanının ve TSD eşlenik sistemin yük – yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.3 deki gibi olmaktadır.

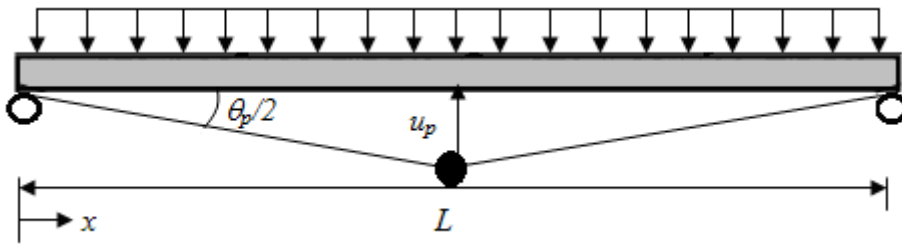


**Şekil 3. 3:** TSD eşlenik sistemin elastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi

### 3.2.2 Elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi

Yapı elemanlarının patlama yükleri altında genelde büyük doğrusal olmayan şekildeğiştirmeler yapması beklenir. Bu doğrusal olmayan davranışın gerçeğe yakın bir çözümü, sonlu elemanlar programları yardımıyla elemanın adım adım çözülmesiyle bulunabilir. Bu işlemin zorluğu, pratik hesaplarda sünekliği yüksek yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışını da göz önünde bulunduran daha gelişmiş bir TSD eşlenik modelin gelişmesini sağlamıştır. Bu model TSD eşlenik sistemin davranışını ideal elastoplastik olarak tanımlamaktadır.

Şekil 3.2 de verilen basit mesnetli kirişin açıklığındaki bölge plastik mafsallaştıktan sonra kirişin yerdeğiştirmesi Şekil 3. 4 de verilmiştir.



**Şekil 3. 4:** Düzgün yayılı yüklenmiş basit bir basit kirişin plastik yerdeğiştirmesi

Bu modelde elastik dayanım ve yerdeğiştirmesi tanımlanmış olan kirişin yapabileceği plastik yerdeğiştirme değerinin ve dolayısıyla maksimum yerdeğiştirme kapasitesini bulunması gerekmektedir. Ayrıca elastik hesap yaparken bahsedilen çatlamamış atalet momenti değeri burada etkin atalet momenti değerine

dönüşecektir. Bu değer çatlamış atalet momenti değeri ile çatlamamış atalet momenti değerlerinin arasındadır. Bu değer yaklaşık olarak çatlamamış atalet momentinin 50 % si olarak alınabilir.

Eğilme etkisi altındaki betonarme elemanlarda doğrusal olmayan davranışı en iyi moment – eğrilik ilişkisi ifade etmektedir. Burada da, yapılacak moment eğrilik analizi sonucunda, plastik mafsallaşan kesitin yapabileceği plastik eğrilik kapasitesi kullanılabilir. Plastik eğrilik kapasitesi ( $\chi_p$ ) Denklem 3.22 de verildiği gibi maksimum eğrilik kapasitesinden ( $\chi_{max}$ ) elastik eğrilik kapasitesinin ( $\chi_e$ ) çıkarılmasıyla bulunur.

$$\chi_p = \chi_{max} - \chi_e \quad (3.22)$$

Elemanın doğrusal olmayan davranışının belirlenmesinde bir diğer önemli parametre de plastik mafsalın plastik dönme kapasitesidir. Plastik dönme kapasitesi Denklem 3.23 de verildiği gibi hesaplanabilir. Bu denklemde  $L_p$  plastik mafsal boyudur. Bu konuda birçok çalışma olmakla birlikte ülkemizdeki afet şartnamesinde bu değer kesitin etkin yüksekliğinin yarısı olarak verilmiştir ( $L_p=0.5d$ ).

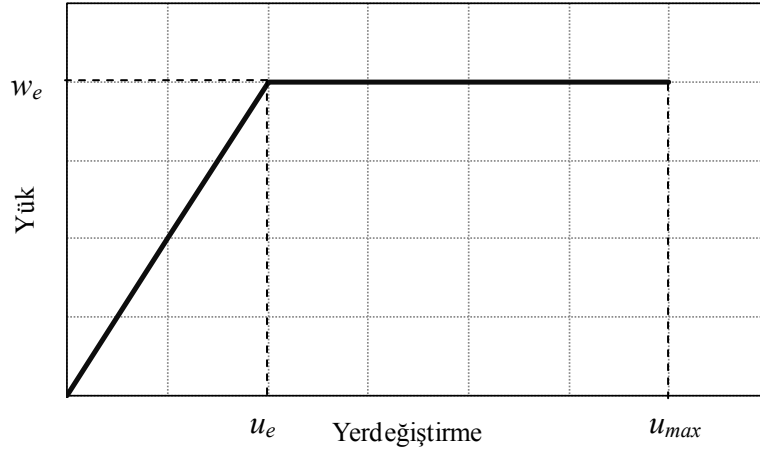
$$\theta_p = \chi_p L_p \quad (3.23)$$

Elde edilen plastik dönme kapasitesinden, Şekil 3.4 de verilmiş olan geometrik eşitlikler ile kesitin plastik yerdeğiştirme kapasitesi Denklem 3.24 den hesaplanabilir.

$$u_p = \theta_p \frac{L}{4} \quad (3.24)$$

Bulunan plastik yerdeğiştirme kapasitesi daha önce bulunan elastik yerdeğiştirme kapasitesi ile toplanarak elemanın maksimum yerdeğiştirme kapasitesi bulunur (Denklem 3.25). Bu durumda betonarme elemanın ideal elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.5 deki gibi olacaktır.

$$u_{max} = u_e + u_p \quad (3.25)$$

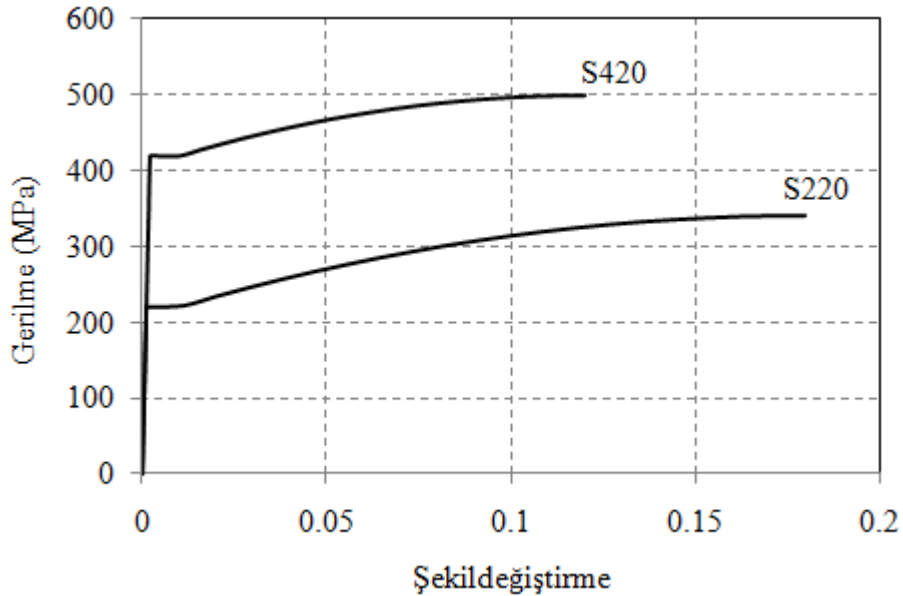


**Şekil 3. 5:** TSD eşlenik sistemin ideal elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisi

#### 4. BETONARME ELEMANLARIN DAVRANIŞI

Betonarme, betonun ve çeliğin 20. yüzyılın başlarında mucizevi şekilde birlikte kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkışından günümüze kadar bu malzemenin yapılarda kullanımı artmış ve bugün yeri doldurulamaz bir malzeme olmuştur. Betonarmenin bugün en çok kullanılan yapı malzemesi olmasının en önemli nedenleri, ekonomikliğini kaybetmemesi ve gelişen teknolojiye ayak uydurarak diğer yapı malzemeleriyle rekabet etmesidir.

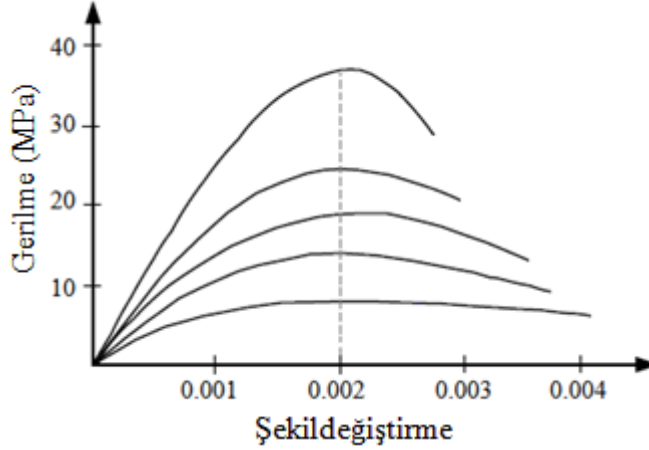
Bu kısımda beton, çeliğin ve dolayısıyla betonarmenin patlamalar gibi yüksek hızlara sahip yüklemeler altında davranışlarını incelenecektir. Ülkemizde bugün yeni betonarme yapıların inşaatında en çok kullanılan çelik türü S420a sıcakta işlenmiş, 420 MPa teorik akma dayanımına sahip çeliktir. Ayrıca 1990 lı yıllara kadar ülkemizde yapılan yapıların büyük bir çoğunluğunda ise S220a sıcakta işlenmiş, 220 MPa teorik akma dayanımına sahip çelik kullanılmıştır. Bu iki çelik türü için gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 4.1 de verilmiştir.



**Şekil 4.1:** S220a ve S420a çeliğinin gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri

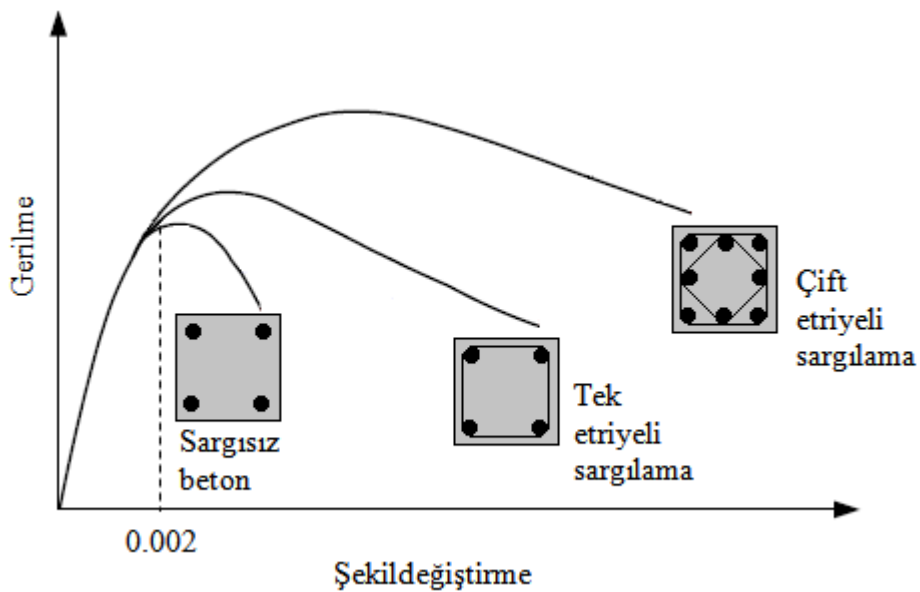
Betonun tipik gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 4.2 de verilmiştir. Ülkemizde bugün kalite standardı yüksek beton üretilip yapılarda kullanılırken, 1990-2000 li yılların öncesinde kullanılan betonların kalite standartları düşüktür (basınç

dayanımları~10 MPa). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları yönetmeliğine (TS500) [30] göre betonun elastisite modülü Denklem 4.1 de verildiği gibi hesaplanacaktır. Burada  $E_c$  betonun elastisite modülü (MPa),  $f_{ck}$  betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımıdır (MPa). Ayrıca poisson oranı da 20% ( $\nu=0.20$ ) kabul edilir [30].



**Şekil 4.2:** Betonun gerilme – şekil değiştirme ilişkileri [40]

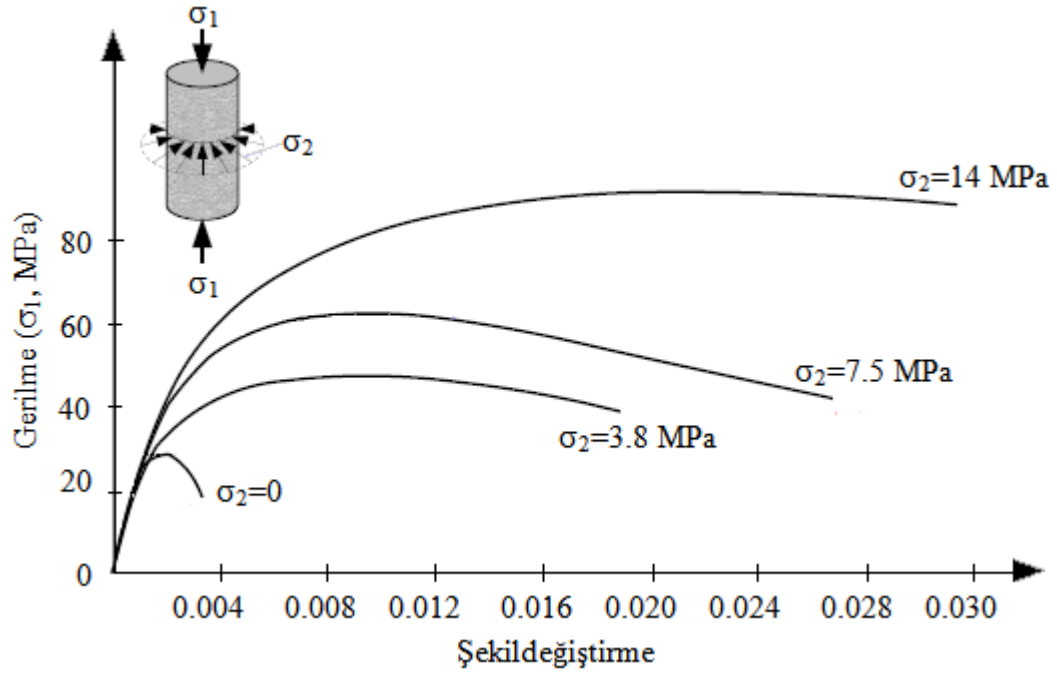
Betonda sargılama önemli bir parametredir. Betonda sargılama etriye, çiroz ve kompozit malzemelerle yapılabilmektedir. Sargılanmış betonda basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesi sargısız betona göre artmaktadır. Şekil 4.3 de betonda sargılamanın gerilme – şekil değiştirme davranışına etkisi gösterilmektedir. Ayrıca sargılamanın etkisini daha da iyi gösterecek olan, betonun üç eksenli gerilme altındaki gerilme – şekil değiştirme ilişkileri Şekil 4.4 de verilmiştir.



**Şekil 4.3:** Sargılamanın beton davranışına etkisi [40]



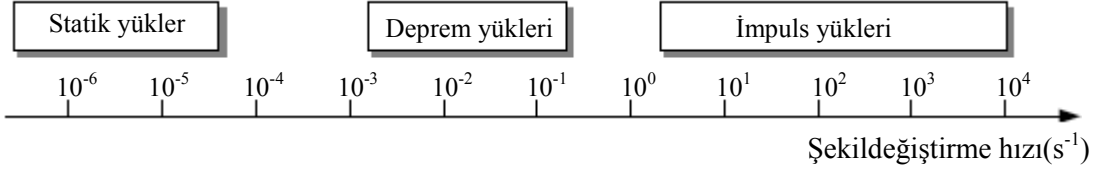
$$E_c = 14000 + 3250\sqrt{f_{ck}} \quad (4.1)$$



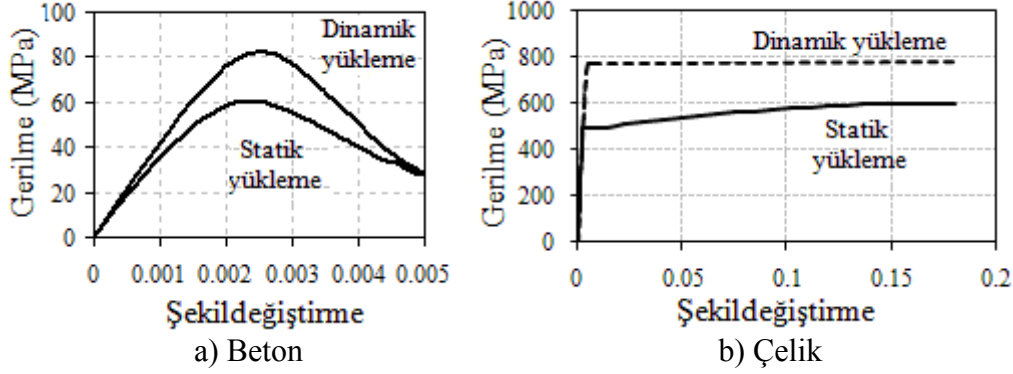
Şekil 4.4: Betonun üç eksenli gerilme altında davranışı [31, 40]

#### 4.1 Dinamik Yüklemenin Malzeme Üzerinde Etkisi

Patlama etkileri altındaki beton ve çeliğin, deprem ve rüzgar yükleri altında olduğu gibi tekrarlı yüklere maruz kalması çok mümkün değildir. Daha önceki bölümlerde bahsettiğimiz üzere patlamaların yarattığı basınç gerilmelerinin etkiye süresi oldukça kısadır. Yani elemanlar statik yüklemeye göre 100000 kattan daha fazla hızlı yüklenebilmektedir. Yaklaşık şekildeğiştirme hızlarına bağlı olarak yükleme çeşitleri Şekil 4.5 de verilmiştir. Beton ve çelik malzemelerde şekildeğiştirme hızının kapasiteye etkisi halen bir çok araştırmanın konusudur [2]. Bu bölümde bugüne kadar yapılan çalışmalar incelenmiş, şekildeğiştirme hızının eğilme ve kesme kapasitesinde yarattığı farklılıklar araştırılmıştır. Geçmiş bilgilerden edinilen temel doğru, şekildeğiştirme hızının artmasının malzemenin dayanımında artışa neden olduğudur. Bu konuda çeşitli tasarım kitaplarında büyütme katsayıları verilmiştir. Bunlar genel olarak güvenli tarafta kalmak için verilen tasarım katsayılarıdır. Şekil 4.6 da tipik bir patlama yüklemesi altında tipik beton ve çeliğin gerilme – şekildeğiştirme davranışlarının değişimi verilmiştir.



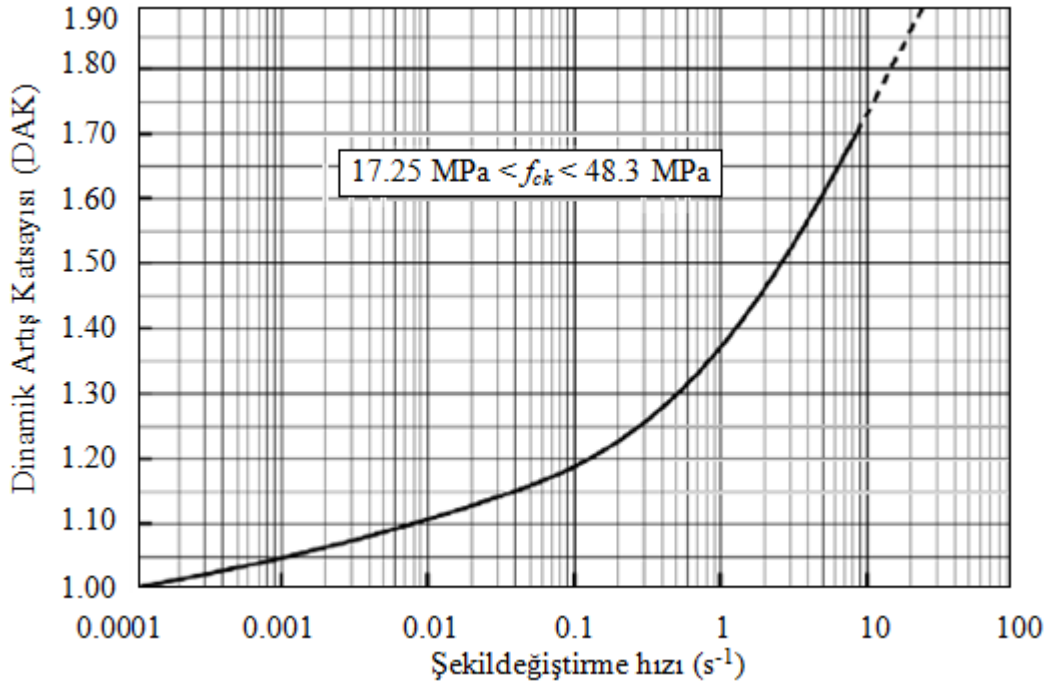
Şekil 4.5: Şekildeğiştirme hızına bağlı olarak yük çeşitleri [26]



Şekil 4.6: Şekildeğiştirme hızının a) beton, b) çelik malzeme davranışına etkisi [26]

Betonun dinamik dayanımı ile statik dayanımı arasındaki ilişki Denklem 4.2 de verilmiştir [23]. Bu denklemde  $f_{dc}$  betonun dinamik basınç dayanımı,  $f_{ck}$  betonun statik basınç dayanımı ve DAK dinamik artış katsayısıdır. Şekil 4.7 de betonun basınç altında şekildeğiştirme hızına bağlı olarak dinamik artış katsayıları değişimi verilmiştir [23].

$$f_{dc} = f_{ck} DAK_{beton} \quad (4.2)$$



Şekil 4.7: Betonun basınç altında dinamik artış katsayısı [23]

Betonun şekildeğiştirme hızına bağlı olarak “Dinamik Artış Katsayısını ( $DAK_{beton}$ )” veren bağıntı CEB (1990) [13] tarafından verilmiştir. Bu katsayı ile betonun statik basınç dayanımı çarpılarak betonun dinamik basınç dayanımı bulunmaktadır. Dinamik Artış Katsayısı ve betonun dinamik basınç dayanımının hesaplanması Denklem 4.3 ile Denklem 4.6 arasında verilmiştir. Bu denklemlerde  $f_{ck}$  betonun statik basınç dayanımı (MPa),  $\dot{\epsilon}_c$  betonun şekildeğiştirme hızı ( $s^{-1}$ ),  $\dot{\epsilon}_{c,statik}$  statik şekildeğiştirme hızıdır ve  $3 \times 10^{-5} s^{-1}$  dir.

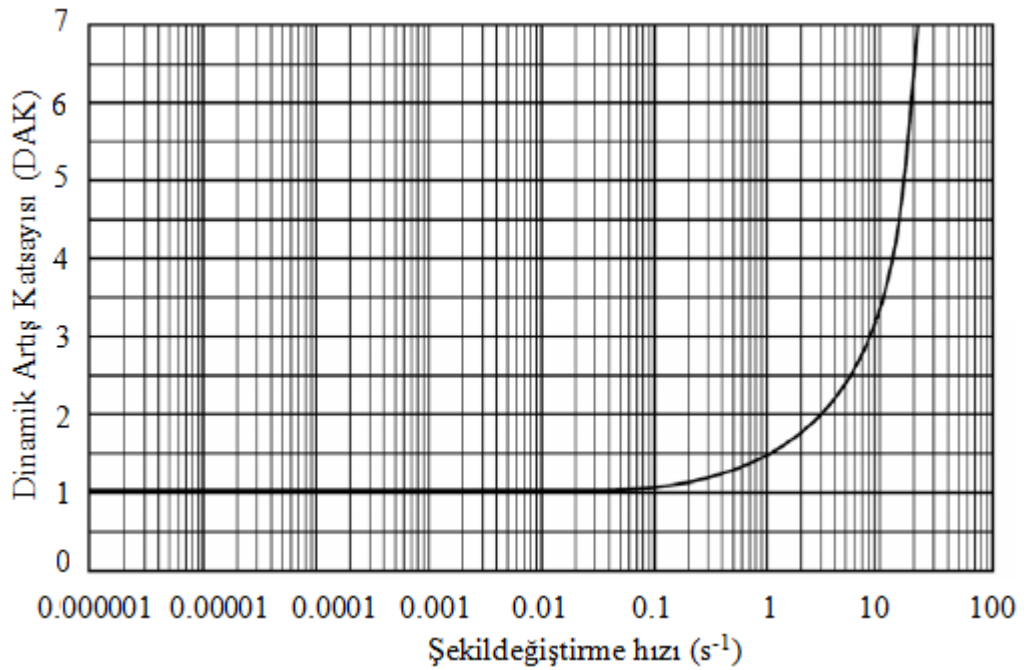
$$DAK_{beton} = \left( \frac{\dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_{c,statik}} \right)^{1.076 \sim 1.1} \quad (4.3)$$

$$DAK_{beton} = \gamma \left( \frac{\dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_{c,statik}} \right)^{1/3} \quad (4.4)$$

$$\gamma = 10^{6.15\alpha_s - 2} \quad (4.5)$$

$$\alpha_s = 1 / (5 + 9f_{ck} / 10) \quad (4.6)$$

Şekil 4.8 de betonun yarmada çekme altında şekildeğiştirme hızına bağlı olarak dinamik artış katsayıları değişimi verilmiştir. Bu grafikten de görüleceği gibi şekildeğiştirme hızının  $0.1 s^{-1}$  değerine kadar çekme dayanımı çok küçük artışlar göstermekte bu değer üstünde ise oldukça hızlı bir şekilde artmaktadır.



**Şekil 4.8:** Betonun yarmada çekme altında dinamik artış katsayısı [23]

Çeliğin şekildeğiştirme hızına bağlı olarak “Dinamik Artış Katsayısı ( $DAK_{çelik}$ )” Malvar (1998) tarafından verilmiştir [17]. Bu bağıntılar Denklem 4.7 ile Denklem 4.10 arasında verilmiştir. Bu denklemlerde  $\dot{\epsilon}$  çeliğin şekildeğiştirme hızı ( $s^{-1}$ ),  $f_{ds}$  çeliğin dinamik şekildeğiştirme hızı altında dayanımı (MPa),  $f_s$  çeliğin statik şekildeğiştirme hızı altında dayanımıdır (MPa).

$$DAK_{çelik} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}} \right) \quad (4.7)$$

$$\alpha = 0.074 - 0.04 \frac{f_s}{414} \quad (\text{akma dayanımı için}) \quad (4.8)$$

$$\alpha = 0.019 - 0.009 \frac{f_s}{414} \quad (\text{kopma dayanımı için}) \quad (4.9)$$

$$f_{ds} = f_s \times DAK_{çelik} \quad (4.10)$$

Ayrıca tasarım için Amerikan ordusu ve savunma bakanlığı (1990) tarafından farklı göçme modlarına sahip elemanlar için tasarım dinamik artış katsayıları verilmiştir [11]. Bu katsayılar Çizelge 4.1 de verilmiştir. Bu tablodaki yakın mesafe ile uzak mesafe arasındaki limit, ölçeklenmiş mesafe cinsinden 1.2 ( $z = 1.2 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) dir [23].

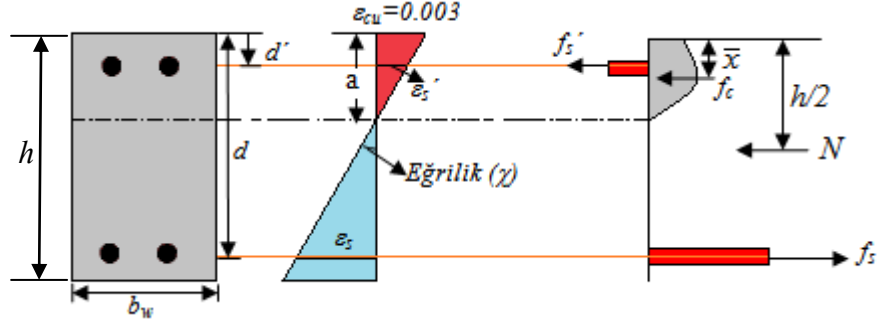
**Çizelge 4.1:** Farklı etkiler altındaki bir elemanda dinamik artış katsayıları [11]

|                  | Uzak mesafede |       |       | Yakın mesafede |       |       |
|------------------|---------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
|                  | Çelik donatı  |       | Beton | Çelik donatı   |       | Beton |
|                  | Akma          | Kopma |       | Akma           | Kopma |       |
| Eğilme etkisinde | 1.17          | 1.05  | 1.19  | 1.23           | 1.05  | 1.25  |
| Diagonal çekme   | 1.00          | --    | 1.19  | 1.10           | 1.00  | 1.00  |
| Direk kesme      | 1.10          | 1.00  | 1.10  | 1.10           | 1.00  | 1.10  |
| Yapışma          | 1.17          | 1.05  | 1.00  | 1.23           | 1.05  | 1.00  |
| Basınç           | 1.10          | ---   | 1.12  | 1.13           | ---   | 1.16  |

## 4.2 Eğilme Etkisi Altındaki Elemanlar

Ülkemiz deprem ülkesi olduğundan, ülkemizde yapılacak yapılarda kapasite tasarımı ilkelerinin uygulanması zorunlu kılınmıştır. Bu yüzden yeni yapılacak olan yapılarda betonarme kolon, kiriş ve döşeme gibi elemanların göçme modları eğilme etkisinde olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Betonarme elemanların eğilme kapasitelerini taşıma gücü yöntemi ile hesaplanmaktadır (Şekil 4.9). Patlama yükleri altındaki tipik bir betonarme kesitin dinamik taşıma kapasitesi ( $M_{rd}$ ) Denklem 4.11

deki gibi hesaplanacaktır. Bu denklemde  $d$  kesitin etkin derinliği,  $d'$  paspayı kalınlığı,  $N$  eksenel yük,  $h$  kesit yüksekliği ve  $\bar{x}$  basınç bloğunun ağırlık merkezinin kesit en dış basınç lifinden mesafesidir.

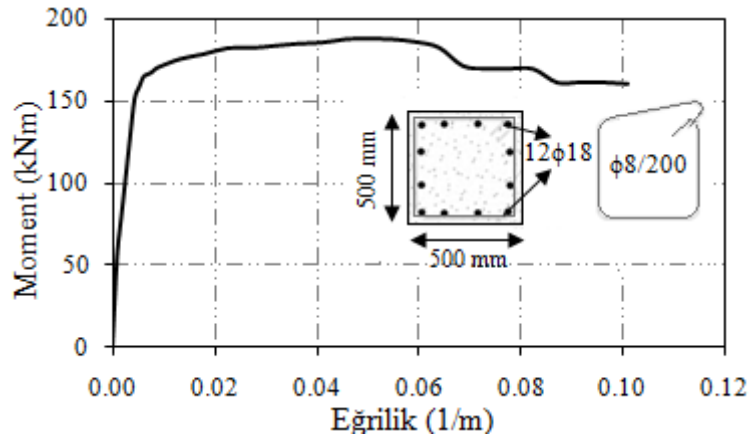


Şekil 4.9: Betonarme kesitte taşıma gücü hesabı

$$M_{rd} = f_c b_w (d - \bar{x}) + f_s' (d - d') - N(h/2 - d') \quad (4.11)$$

Eğilme etkisi altındaki bir kesitin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışı, en sağlıklı biçimde gerçekçi malzeme davranışları kullanılarak çizilmiş moment - eğrilik ilişkisi ile gösterilebilir. Tipik bir betonarme kesitin moment – eğrilik ilişkisi Şekil 4.10 daki gibidir. Moment – eğrilik ilişkisinin altında kalan alan kesitin enerji yutma kapasitesini vermektedir. Alan ne kadar büyük olursa, kesit göçene kadar o kadar yüksek enerji yutacaktır. Betonarme kesitlerin süneklik düzeyi, “Eğrilik süneklik katsayısı” ile belirlenir. Eğrilik süneklik katsayısı Denklem 4.12 de verilmiştir. Bu denklemde  $\mu_e$  eğrilik süneklik katsayısı,  $\chi_e$  elastik eğrilik kapasitesi ve  $\chi_{max}$  maksimum eğrilik kapasitesidir.

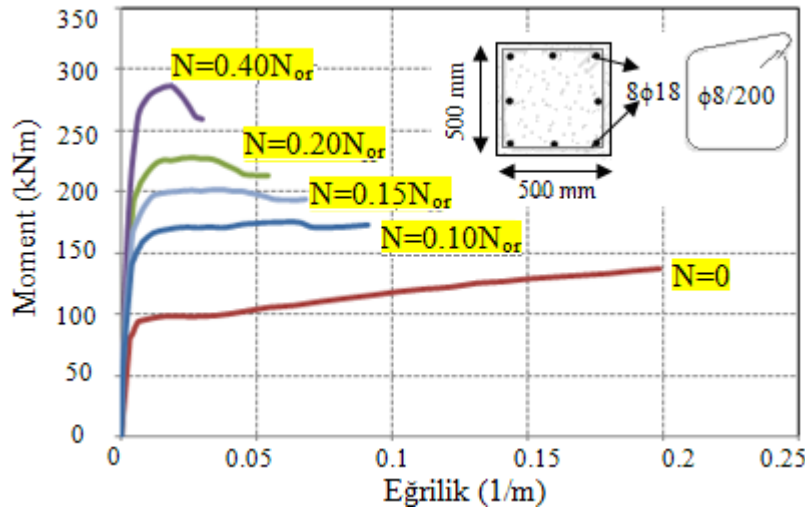
$$\mu_e = \frac{\chi_{max}}{\chi_e} \quad (4.12)$$



Şekil 4.10: Betonarme kesitte moment – eğrilik ilişkisi

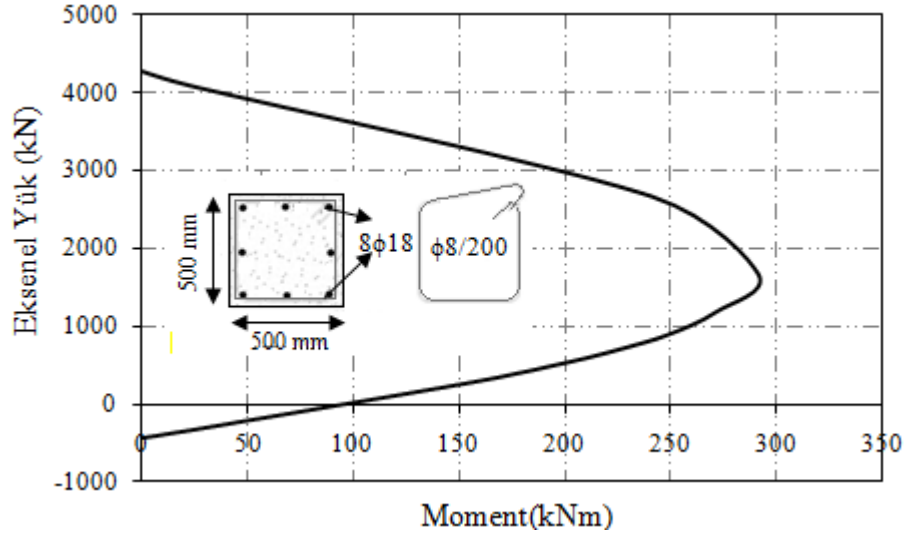
Büyük bir patlamanın etkisine maruz kalan bir yapının, doğrusal bölgede kalması oldukça zordur ve ekonomik açıdan makul değildir. Bu durumda yapı stabilitesini kaybetmeden, betonarme kesitlerin doğrusal olmayan bölgede enerji yutma özelliğinden yararlanılmalıdır.

Kirişler eksenel yük seviyesinin düşük olduğu elemanlardır. Yapının stabilitesi açısından birinci derecede önemli olan kolonlar ise eğilme etkisinin yanında eksenel yüke de maruz kalırlar. Elemanın üzerindeki eksenel yükün seviyesi betonarme kesitlerin moment – eğrilik ilişkisi üzerinde etkilidir. Eksenel yükün fazla olması kesitin süneklik düzeyini azaltır. Farklı eksenel yük seviyesine bağlı olarak moment – eğrilik ilişkileri Şekil 4.11 de verilmiştir. Burada  $N_{or}$  kesitin salt eksenel yük kapasitesi,  $N$  eksenel yüküdür. Ayrıca betonarme kolonların eksenel yük ve moment altındaki davranışları bir akma yüzeyi ile ifade edilmektedir. Bu akma yüzeyi farklı eksenel yüklere maruz kalabilecek kesitlerin analizi için kullanılabilir. Şekil 4.12 de tipik bir kesit için eksenel yük – moment kapasitesi etkileşimi verilmiştir.



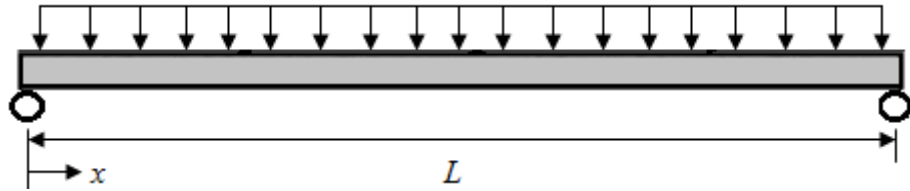
**Şekil 4.11:** Betonarme kesitte eksenel yükün eğilme sünekliğine etkisi

Patlama sonucunda açığa çıkan gazların oluşturduğu yüksek hızlı dinamik yükler betonarme elemanların kapasitelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Detaylı bir hesap yapmak gerekirse, eğilme etkisi altındaki elemanlarda basınç bölgesindeki beton ve çekme bölgesindeki çeliğin şekildeğiştirme hızları birbirinden farklıdır. Jones ve diğerleri (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, eğilme altındaki bir kesitin farklı liflerindeki şekildeğiştirmelere bağlı olarak şekildeğiştirme hızlarının hesabı verilmiştir [25].

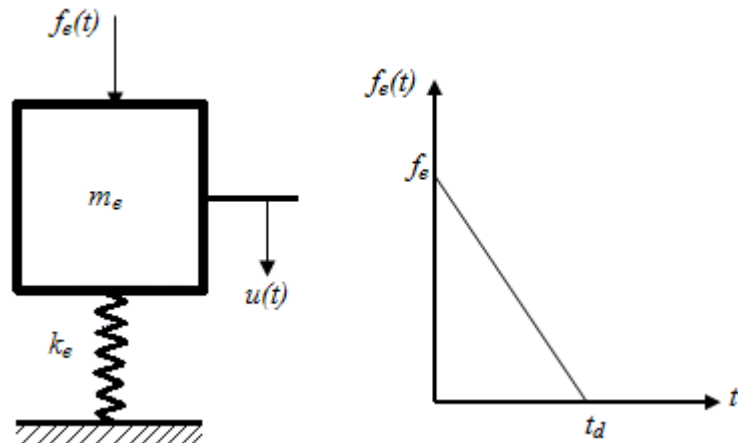


**Şekil 4.12:** Betonarme kesitte eksenel yük – moment kapasitesi etkileşimi

Şekil 4.13 de verilen düzgün yayılı yüklü eğilme etkisi altındaki basit mesnetli betonarme bir kirişteki kritik kesitin şekildeğiştirme hızının hesap adımlarını gösterilebilir. Öncelikle bu yayılı kütleye sahip kiriş, tek serbestlik dereceli eşlenik sisteme çevrilmelidir. Elde edilen tek serbestlik dereceli sistemin, Şekil 4.14 de verilmiş tipik idealleştirilmiş bir patlama yükü altında yerdeğiştirme çözümü Denklem 4.13 de verilmiştir [32]. Bu denklemde  $f_e$  tek serbestlik dereceli sisteme etkileyen maksimum yük,  $\omega$  tek serbestlik dereceli sistemin açısal hızı,  $t_d$  idealleştirilmiş üçgen patlama yükünün etkime süresidir.



**Şekil 4.13:** Düzgün yayılı yük altındaki basit kiriş



**Şekil 4.14:** Tek serbestlik dereceli sistem ve tipik ideal patlama yükü fonksiyonu

$$u(t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (4.13)$$

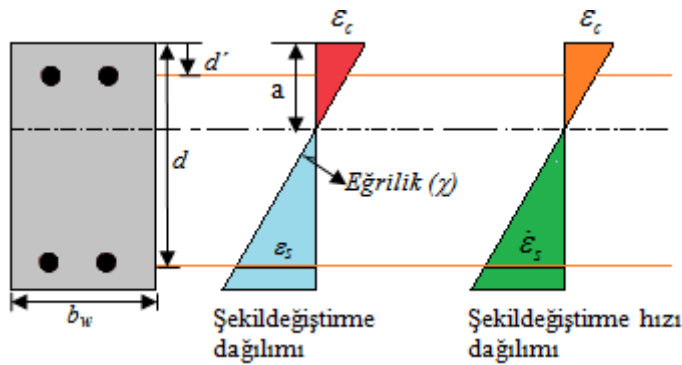
Bu yerdeğiştirme çözümü sistemin zamana bağlı çözümüdür. Kirişin yerdeğiştirmesi, buna ek olarak elastik yerdeğiştirme tepkisiyle alakalıdır. Bu yerdeğiştirme modu elemanın mesnetlerine, rijitliğine göre değişmektedir. Bu durumda yukarıda verilen basit mesnetli bir kirişin mod şekline ve zamana bağlı yerdeğiştirme çözümü Denklem 4.14 deki gibi olacaktır. Bu denklemde  $u(t)_{L/2}$  yerdeğiştirmenin kirişin orta noktasındaki zamana bağlı çözümü,  $x$  sol mesnete olan mesafedir.

$$u(x, t) = u(t)_{L/2} \sin \pi \frac{x}{L} \quad (4.14)$$

Eğilme altındaki bir elemanda düzlem kesitler düzlem kalır varsayımı (Bernoulli hipotezi) ile sol mesnetten  $x$  mesafese uzaklıktaki bir kesitin elastik eğriligi Denklem 4.15 ile Denklem 4.16 arasındaki gibi elde edilir. Kesitin şekildeğiştirme dağılımı doğrusal kabul edilirse (Şekil 4.15), en dış lifteki betonun şekildeğiştirmesi ve çekme altındaki çeliğin şekildeğiştirmesi Denklem 4.17 ve Denklem 4.18 den bulunur [25].

$$\chi(x, t) = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \quad (4.15)$$

$$\chi(x, t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \frac{\pi^2}{L^2} \sin \pi \frac{x}{L} \quad (4.16)$$



**Şekil 4.15:** Betonarme kesitte şekildeğiştirme ve şekildeğiştirme hızı değişimi kabulü [25]

$$\varepsilon_c(x, t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \frac{\pi^2}{L^2} \sin \pi \frac{x}{L} (a) \quad (4.17)$$



$$\varepsilon_s(x, t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \frac{\pi^2}{L^2} \sin \pi \frac{x}{L} (d - a) \quad (4.18)$$

Şekildeğiştirmenin zamana göre birinci türevi şekildeğiştirme hızını verecektir. Denklem 4.19 ve Denklem 4.20 en dış lifteki beton ve çekme donatısının şekildeğiştirme hızını vermektedir.

$$\dot{\varepsilon}_{s, \text{beton}} = \frac{\pi^2}{L^2} \sin \pi \frac{x}{L} (a) \quad (4.19)$$

$$\dot{\varepsilon}_{s, \text{beton}} = \frac{\pi^2}{L^2} \sin \pi \frac{x}{L} (d - a) \quad (4.20)$$

Denklem 4.19 ve 4.20 de verilen ifadeler Denklem 4.13 de verilen ifadenin türevi ile genişletilirse Denklem 4.21 ve Denklem 4.22 elde edilir.

$$\dot{\varepsilon}_{s, \text{beton}} = \frac{\pi^2}{L^2} \frac{f_e}{k_e} \left( \omega \sin \omega t + \frac{1}{t_d} \cos \omega t - \frac{1}{t_d} \right) \sin \pi \frac{x}{L} (a) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (4.21)$$

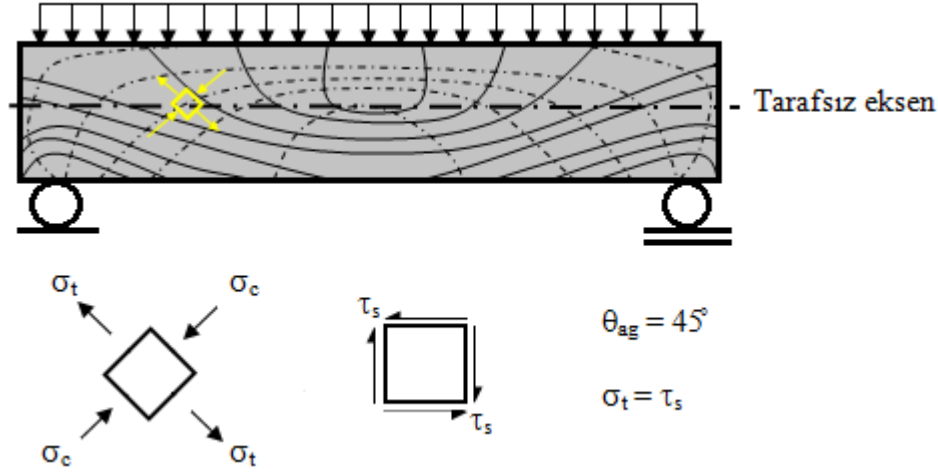
$$\dot{\varepsilon}_{s, \text{beton}} = \frac{\pi^2}{L^2} \frac{f_e}{k_e} \left( \omega \sin \omega t + \frac{1}{t_d} \cos \omega t - \frac{1}{t_d} \right) \sin \pi \frac{x}{L} (d - a) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (4.22)$$

### 4.3 Kesme Etkisi Altındaki Elemanlar

Betonarme yapılarda iki farklı kesme davranışından bahsetmek mümkündür. Bunlar diyagonal kesme (eğik çekme veya basınç ve zımbalama) ve direk kesmedir (dinamik kesme) [2]. Bu iki kesme davranışını ayrı ayrı incelemek gerekmektedir.

#### 4.3.1 Diyagonal kesme

Betonarme elemanlarda büyük sorunlara yol açan ve gevrek bir kırılmaya sebep olan diyagonal kesme, eleman üzerinde eğik çatlaklar oluşturmaktadır. Bu çatlaklar detaylı incelendiğinde bunların aslında kesme gerilmelerinden değil, asal çekme gerilmelerinden kaynaklandığı görülür. Şekil 4. 16 da düzgün yayılı yüklenmiş bir kirişte oluşan çekme ve basınç eşgerilme eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerde düz çizgiler asal çekmeleri ( $\sigma_t$ ), kesik çizgiler ise asal basınç gerilmelerini ( $\sigma_c$ ) belirtmektedir. Burada tarafsız eksen üzerindeki bir noktada asal çekme ve asal basınç gerilmeleri yatay eksenle  $45^\circ$  açı ( $\theta_{ag}$ ) yapmaktadır ve kesme gerilmeleri ( $\tau_s$ ) ile çekme gerilmeleri birbirine eşittir.



**Şekil 4.16:** Betonarme kirişte oluşan eşgerilme eğrileri [31]

Betonarme elemanların kesme kuvveti kapasitesi beton ve elemana yerleştirilmiş enine çelik donatının katkılarının toplamı ile hesaplanır (Denklem 4.23). Burada  $V_r$  elemanın kesme kuvveti kapasitesi,  $V_c$  TS 500 e göre betonun kesme kuvveti kapasitesine katkısı,  $V_w$  is yine TS 500 e göre etriyelerin katkısıdır. TS 500 e göre betonun kesme kuvvetine katkısı Denklem 4.24 ile hesaplanabilir. Bu denklemde  $f_{ctd}$  betonun hesap çekme dayanımı,  $b_w$  elemanın genişliği,  $d$  eleman kesitinin etkin yüksekliği,  $\psi$  eksenel gerilme katsayısıdır.  $\psi$ , eksenel gerilmenin 0.5 MPa dan küçük olduğu durumlarda 1.0 ( $\psi=1$ ) alınabilir. Eğer eksenel gerilme 0.5 MPa dan büyük ise eksenel gerilmenin çekme ya da basınç olması durumuna göre Denklem 4.25 veya Denklem 4.26 dan hesaplanabilir. Bu denklemlerde  $N$  eksenel yük (N),  $A_c$  kesitteki betonun yüzey alanıdır ( $\text{mm}^2$ ). Eksenel yük basınç ve çekmede pozitif (+) alınacaktır.

$$V_r = V_c + V_w \quad (4.23)$$

$$V_c = 0.52 f_{ctd} b_w d (\psi) \quad (4.24)$$

$$\psi = 1 - 0.3 \frac{N}{A_c} \quad (4.25)$$

$$\psi = 1 + 0.07 \frac{N}{A_c} \quad (4.26)$$

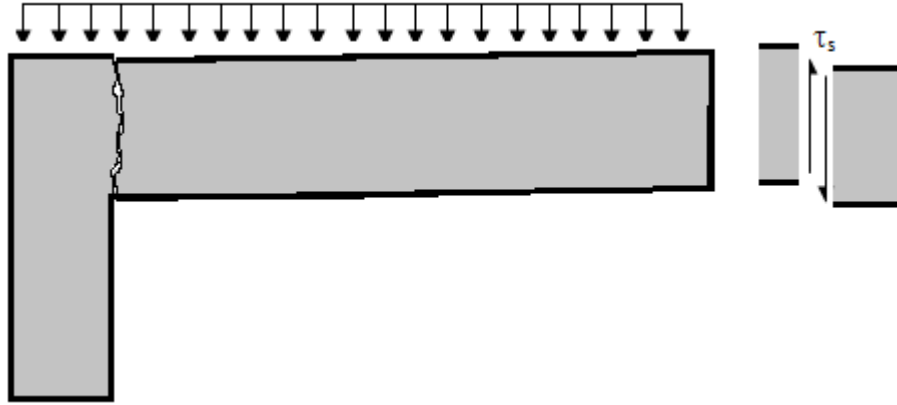
Elemandaki enine donatının kesme kuvveti kapasitesine katkısı ( $V_w$ ) TS 500 de verilen Denklem 4.27 ile hesaplanmalıdır [30]. Bu denklemde  $A_{sw}$  enine donatının kesit alanı toplamı,  $f_{ywd}$  enine donatının hesap akma dayanımı,  $s$  enine donatının

aralığıdır. Bu konuda daha detaylı bilgi, ilgili yönetmelik ve dökümanlarda bulunabilir.

$$V_w = \frac{A_{sw} f_{yw} d}{s} \quad (4.27)$$

#### 4.3.2 Direk kesme

Betonarme bir elemanda tek bir lokal kesitte yaşanabilecek kesme kırılmasıdır. Bu kırılma eleman açıklığına dik yönde elemanın kesiti boyunca süren bir kırılmadır [23]. Kesit geometrisindeki süreksizliklerin olduğu noktalarda ya da çok hızlı yüklenen yüklerle görülebilir [2]. Şekil 4.17 de tipik bir direk kesme kırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Direk kesme kırılması

Direk kesme kırılması patlamanın merkezine yakın konumlanmış yüksek hızlı büyük bir gerilme dalgasına maruz kalan elemanlarda görülebilir. Yüksek hızlı yükleme durumunda elemanlarda direk kesme kırılmasının görülmesi için, statik durumda elemanın direk kesme dayanımı açısından kritik olması şart değildir. Eğilme etkisinde kritik olacak şekilde tasarlanmış bir eleman da yüksek hızlı çok büyük yükler altında direk kesme kırılması yaşayabilmektedir. Bir kesitin direk kesme gerilme kapasitesi Denklem 4.28 de verildiği gibi hesaplanabilmektedir [23]. Bu denklemde  $f_{dc}$  betonun dinamik basınç dayanımı,  $N_c$  birim genişlikteki aksenal kuvvet,  $A_{vf}$  kesme sürtünmesi donatısı alanı,  $f_{ds}$  çeliğin dinamik akma dayanımı,  $d$  kesitin etkin derinliği,  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  elemanın beton döküm şartlarına bağlı olarak Çizelge 4.2 den seçilecek katsayılarıdır [23].

$$\tau_{sd} = K_1 f_{dc} + \frac{K_2}{d} (N_c + A_{vf} f_{ds}) \leq K_3 f_{dc} \quad (4.28)$$

**Çizelge 4.2:**  $K_i$  sabit değerleri [23]

| Durum                                                                                                       | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Birdöküm beton (monolitik)                                                                                  | 0.14  | 1.2   | 0.6   |
| Sertleşmiş beton ile yeni betonun<br>birleştiği yüzeylerde<br>pürüzlendirilmiş yüzey<br>(pürüz $\geq 5$ mm) | 0.12  | 1.1   | 0.6   |
| Pürüzlendirilmemiş yüzey                                                                                    | 0.00  | 1.0   | 0.4   |

Kesme gerilme kapasitesi bulunan elemanın kesme kuvveti kapasitesi ( $V_{dk}$ ) Denklem 4.29 dan hesaplanacaktır. Burada  $b$  kesit genişliğidir.

$$V_{dk} = \tau_{sd} b d \quad (4.29)$$

#### 4.4 Betonarme Yapılar için Donatı Detayları

Betonarme yapıların patlama yükleri karşısında iyi donatılandırılması gerekmektedir. Çeşitli kaynaklarda betonarme yapılar için çeşitli donatılandırma önerileri yapılmıştır. Donatı detaylandırmaları aşağıda incelenmiştir.

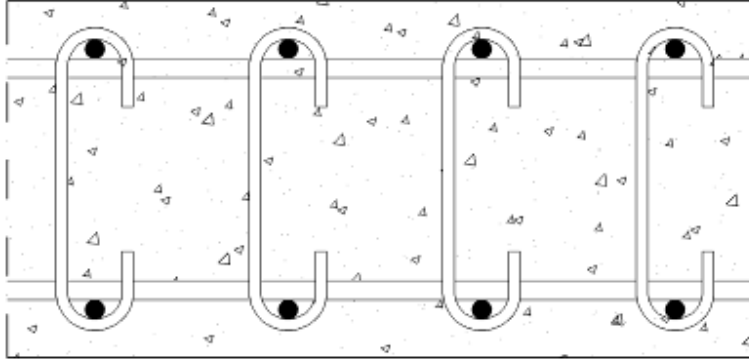
##### 4.4.1 Bindirme boyu önerileri

Patlama etkilerini yaşaması muhtemel yapıların tasarımlarında bindirme boyları neredeyse en önemli yeri tutmaktadır. Bu konuda Amerikan ordusunun kaza patlamaları altındaki yapı tasarım kaynaklarında bindirme boyunun sismik etkiler altındaki yapıların bindirme boylarından 1.3 kat daha uzun bırakılması önerilmektedir. Sismik etkiler altındaki bindirme boyu hesabının, betonarme yapılar için tasarım yönetmeliği olan ACI-318 e göre yapılması istenmektedir. ACI yönetmeliğinin önerdiği bindirme boyu bağıntısı Denklem 4.30 da verilmiştir. Burada  $K_{tr}$ , sargılama donatısının etkisi,  $\psi_t$  bindirme bölgesi ile ilgili katsayı,  $\psi_e$  donatı kaplaması ile ilgili katsayı,  $\psi_s$  donatı çapının etkinliği ile ilgili katsayı,  $c_B$  paspayı kalınlığıyla ilgili katsayı,  $\phi$  donatı çapı,  $f_{ck}$  betonun statik basınç dayanımı ve  $\lambda$  betonun özelliği ile ilgili bir katsayıdır (hafif ağırlıklı beton olması, normal ağırlıklı beton olması gibi). Bizim ülkemizde betonarme yapılara ait yapım yönetmeliği olan TS500 e göre nervürlü donatılar için önerilen bindirme boyu bağıntısı Denklem 4.31 de verilmiştir. Bu denklemde  $l_b$  bindirme boyu,  $f_{sd}$  çeliğin tasarım akma dayanımı ve  $f_{ctd}$  betonun çekme tasarım dayanımıdır. Ayrıca aynı kaynakta bindirme boylarının,

$$l_b = \left( \frac{3}{40} \frac{f_{sd}}{\lambda \sqrt{f_{ck}}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left( \frac{c_B + K_{tr}}{\phi} \right)} \right) \phi \quad (4.30)$$

49

Şekil 4.19 da verilmiştir. Burada her düşey donatı karşılıklı olarak bağlanmak zorundadır.

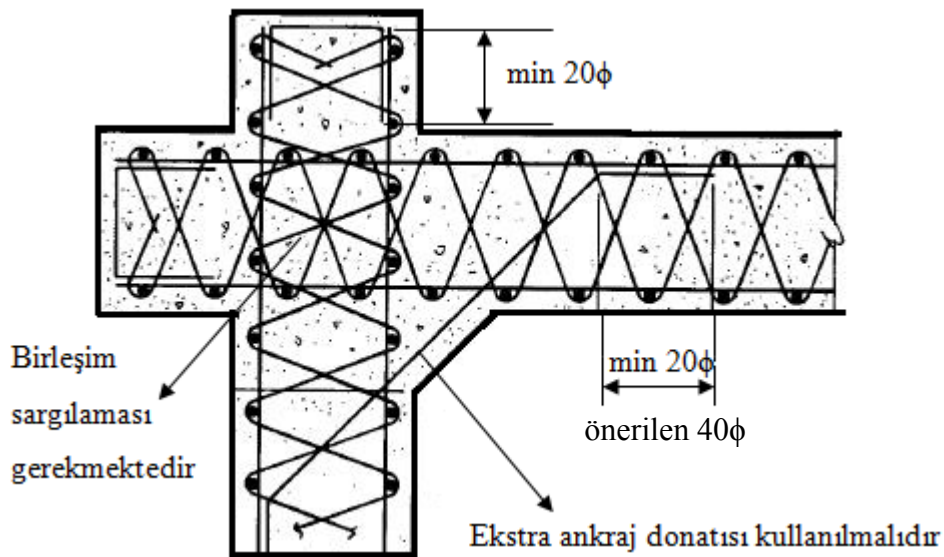


Şekil 4.19: Tek çirozlu sargılama detayı [11]

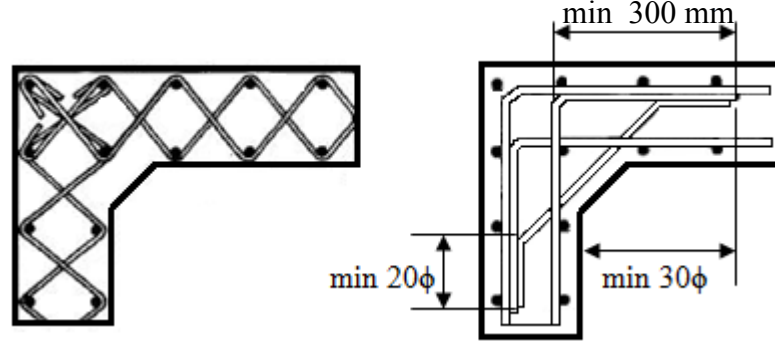
#### 4.4.3 Birleşim detayları

Yapı elemanlarının birbirine bağlandığı noktalar yapı elemanlarının patlama performansları açısından büyük öneme sahiptir. TM5-1300 [11] tarafından yakın tasarım mesafesindeki yapılar için yine ölçeklenmiş mesafeye bağlı olarak birbirinden farklı detaylar önerilmiştir.

Ölçeklenmiş mesafenin  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  den küçük olduğu durumlarda bağ donatılarının kullanılması önerilmektedir. Bağ donatılı perdeli bir yapının birleşim bölgeleri payandalı ve panyandasız olmak üzere iki şekilde düzenlenebilir. Panyadalı birleşim detayları Şekil 4.20, payandasız birleşimler için detaylar Şekil 4.21 de verilmiştir. Burada bindirme boyları enine donatıların çapları ile orantılıdır.

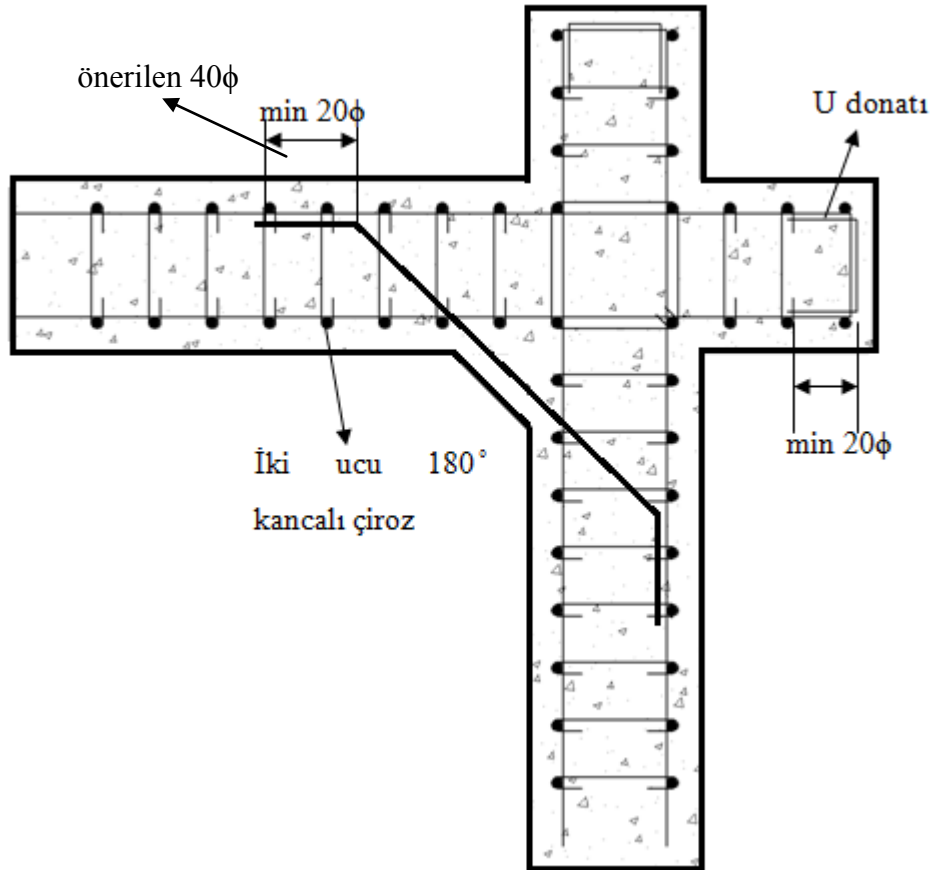


Şekil 4.20: Payandalı perde birleşiminde bağ donatısı detayları [11]



**Şekil 4.21:** Payandasız birleşimde bağ donatısı detayları [11]

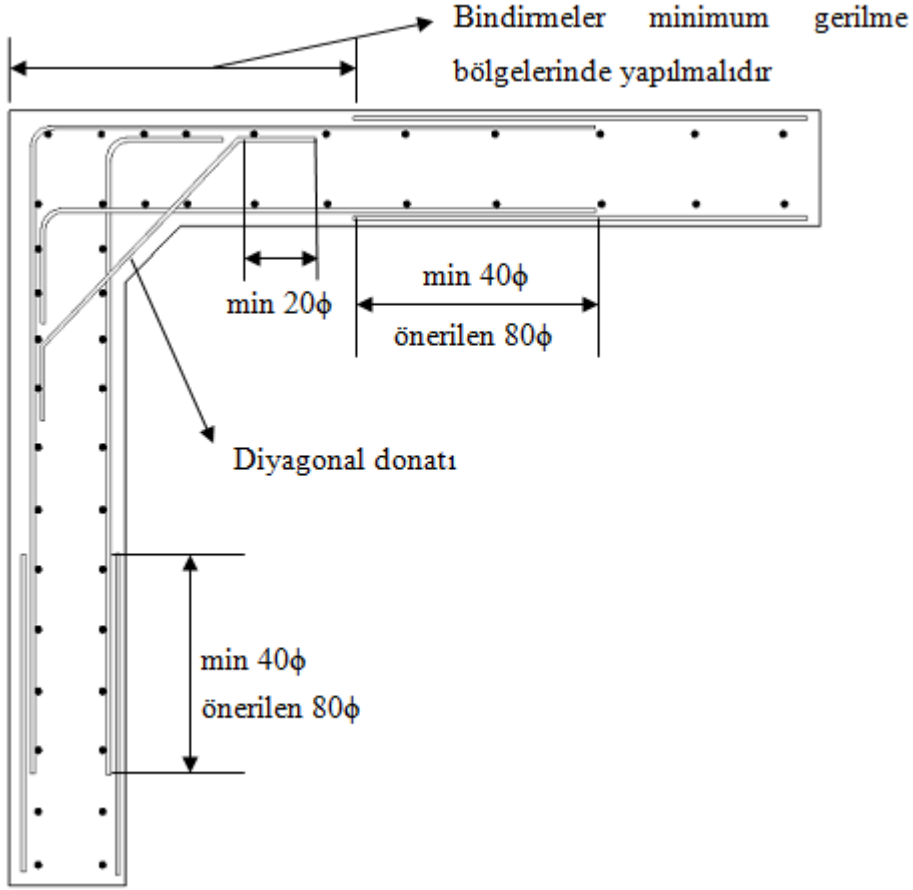
Ölçeklenmiş mesafenin  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  den büyük olduğu durumlarda bağ donatılarının yerine çiroz kullanılması önerilmektedir. Bu tip donatılandırılmış payandalı perdeli bir yapının birleşim bölgesinin detayları Şekil 4.22 de verilmiştir. Burada da bindirme boyları enine donatıların çapları ile orantılıdır.



**Şekil 4.22:** Çirozla sargılanmış payandalı perde birleşim detayı [11]

Uzak tasarım mesafeleri için uyulması gereken minimum şartlar Şekil 4.23 de verilmiştir. Şekil 4.23 den de farkedileceği gibi uzak mesafe tasarımlarında köşe birleşimlerde kullanılan diyagonal donatı için önerilen kenetlenme boyları, yakın

mesafe tasarımlarında önerilen kenetlenme boylarına göre daha büyüktür. Bu durumun uzak mesafe tasarımlarında betonun sargılanması için bir öneri yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 4.23:** Uzak tasarım bölgesi için donatı detayı önerileri [11]



## 5. YAPISAL ÇÖZÜMLEME

Patlama yükleri oldukça yüksek enerjiye sahip ve birkaç milisaniye içerisinde etkisini gösteren yüklerdir. Bu yüklerin yarattıkları etkiler de statik ve deprem gibi nispeten düşük hıza sahip yüklere göre oldukça farklıdır. Bu yüzden tasarım yapılırken bu yüklemenin kısa süreli olmasının getirdiği davranış farklılıkları mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Tek serbestlik dereceli olarak modellenmiş olan bir yapı elemanının dinamik hareket denklemi Denklem 5.1 de verilmiştir. Bu denklemde  $m_e$  tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi,  $c_e$  sönüm,  $k_e$  rijitliği ve  $f_e$  yükleme fonksiyonudur. Hareket denklemi Denklem 5.2 de verilen dönüşüm kullanılarak Denklem 5.3 deki gibi yazılabilir. Bu denklemde  $\omega$  açısal hızı,  $\xi$  sistemin sönüm oranıdır.

$$m_e \ddot{u}(t) + c_e \dot{u}(t) + k_e u(t) = f_e(t) \quad (5.1)$$

$$c_e = 2\xi m_e \omega \quad (5.2)$$

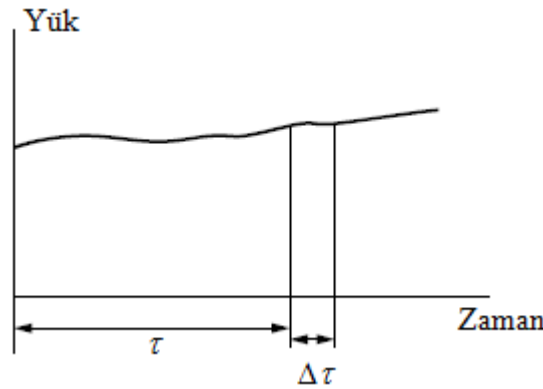
$$\ddot{u}(t) + 2\xi \omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = f_e(t) / m_e \quad (5.3)$$

Patlama yüklerine maruz kalacak bir sistemin sönüm oranının seçiminde çeşitli yaklaşımlar vardır. Pratikte yapılan analizlerde sistemin sönümsüz olduğu kabul edilerek hesaplar basitleştirilmektedir. Fakat, bazı özel çözümlerde sistemin sönümlü olarak çözülmesi istenebilir. Bu konuda daha önceki kaynaklarda betonarme yapıların patlama yükleri altındaki sönüm oranı %1 olarak önerilmiştir [11]. Daha sonradan geliştirilen bazı kaynaklarda ise sönüm oranının deprem yüklemesinde alınan oranla aynı alınması gerektiği belirtilmektedir [23]. Bu konuda seçim, analizi yapacak olan tasarımcıya bırakılmıştır.

Denklem 5.1 de verilen hareket denkleminin iki çözümü vardır. Bu çözümler denklemin homojen çözümü ve özel çözümüdür. Denklemin homojen çözümü kullanılarak tek serbestlik dereceli sistemin tepki modları, açısal hız ( $\omega$ ) ve periyot ( $T_n$ ) gibi dinamik karakterleri elde edilir. Denklem 5.4 de homojen çözüm sonucunda elde edilen sistemin doğal periyot denklemi verilmiştir.

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{k_e}} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5.4)$$

Hareket denkleminin özel çözümü, zorlanmış titreşim etkileri altındaki çözümdür. Patlama yükleri etkisi altındaki elastik sistemler için bu denklemin çözümünün bir yolu Duhammel integralidir. Denklem 5.5 de bu integralden yararlanarak sönümlü bir tek serbestlik dereceli sistemin Şekil 5.1 de verilen genel bir yüklemedeki  $\Delta\tau$  zaman dilimine karşı gelen yükler altında hareket denkleminin genel çözümü verilmiştir [2]. Burada  $F(\tau)$  yük fonksiyonu,  $\xi$  sönüm oranıdır.



**Şekil 5.1:** Genel yük fonksiyonu

$$u(t) = \frac{1}{m_e \omega} \int_0^{t_d} F(\tau) e^{-\xi \omega (t-\tau)} \sin(\omega(t-\tau)) d\tau \quad (5.5)$$

Bu çözüm biraz daha özelleştirilirse, şok yükü olarak tanımlanan ve Şekil 4.13 de verilen yükler altında sönümsüz elastik bir sistemin hareket denkleminin çözümü Denklem 5.6 deki gibidir. Burada  $f_{em}$  tek serbestlik dereceli sistemdeki  $t=0$  anındaki maksimum patlama yükü,  $k_e$  sistemin elastik rijitliği,  $t_d$  patlama yükünün etkiye süresidir.

$$u(t) = \frac{f_{em}}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (5.6)$$

Tek serbestlik dereceli sistemlerin elastik ötesi davranışı Bölüm 3 de belirtildiği gibi elastoplastik olarak tanımlanabilmektedir. Elastoplastik davranışa sahip sistemleri patlama yükleri altında göz önüne aldığımızda süneklik istemi kavramı ortaya çıkmaktadır. Denklem 5.7 de süneklik isteminin denklemleri verilmiştir. Bu denklemde  $u_e$  sistemin elastik deplasman kapasitesi,  $u_{t,max}$  patlama yükünün sistemden talep ettiği yerdeğiştirmedir.

$$\mu = \frac{u_{t,\max}}{u_e} \quad (5.7)$$

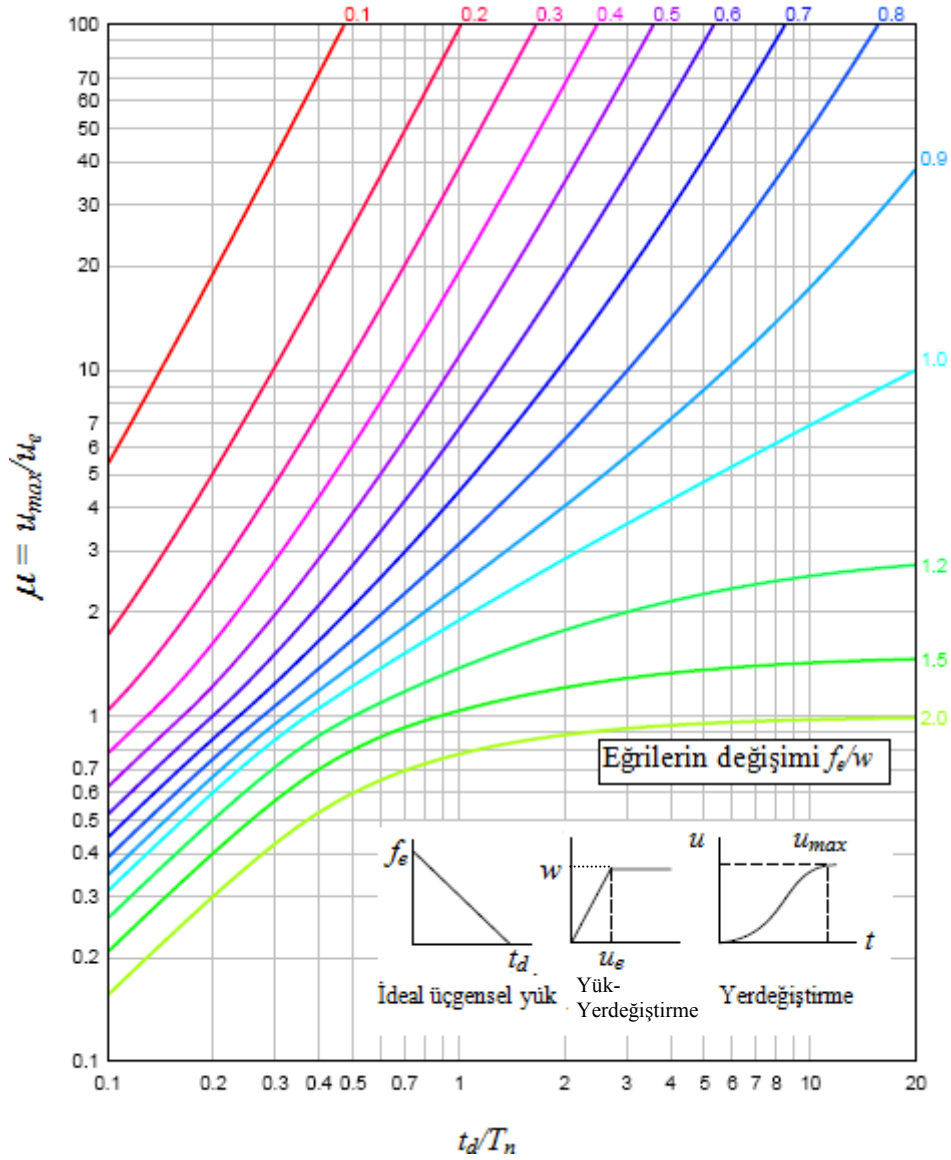
Doğrusal olmayan sistemlerde kapalı formdaki hareket denkleminin çözümü daha önce bahsedilen yöntemlerle mümkün olmaz. Bu sistemlerin nümerik çözümü için etkili bir nümerik integrasyon yöntemine ihtiyaç vardır. Bu yöntemlerden birisi Newmark (1962) tarafından önerilen  $\beta$  (beta) metodudur [33]. Bu yöntemin uygulama adımları özetle aşağıdaki gibidir [2];

1.  $t = t_i$  anı için  $u$ ,  $\dot{u}$ ,  $\ddot{u}$  değerlerinin bilindiği kabul edilir,
2.  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ , bununla birlikte  $t=t_{i+1}$  için  $\ddot{u}_{i+1}$  değeri tahmin edilir,
3.  $t=t_{i+1}$  için hız değeri  $\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \ddot{u}_{i+1} \frac{\Delta t}{2}$  formülünden hesaplanır,
4.  $t=t_{i+1}$  için yerdeğiştirme değeri  $u_{i+1} \cong u_i + \dot{u}_i \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{u}_{i+1} \Delta t^2$  formülünden hesaplanır,
5. Bulunan  $u_{i+1}$  ve  $\dot{u}_{i+1}$  değerleri hareket denkleminde yerine yazılarak yeni bir  $\ddot{u}_{i+1}$  değeri hesaplanır,
6. 2. aşamada tahmin edilen  $\ddot{u}_{i+1}$  değerinin 5. aşamada hesaplanan  $\ddot{u}_{i+1}$  değeri ile yeterli yakınlığa sahip olmadığı kontrol edilir. Eğer yakınlık yeterli değilse 2. aşamadan 6. aşamaya kadar olan işlemler tekrarlanarak yakınlık sağlanmaya çalışılır. 2. aşamada tekrardan tahmin edilen değerde 5. aşamada hesaplanan değer yol gösterecektir.

İkinci aşamada seçilen ivmenin ( $\ddot{u}_{i+1}$ ) zaman artımı ( $\Delta t$ ) ile doğrusal değiştiği kabul edilirse ve  $\beta=1/4$  alınırsa üçüncü aşamadaki hızın ( $\dot{u}_{i+1}$ ) zaman artımına göre değişimi de doğrusal olacaktır. Ayrıca  $\beta=1/6$  alınırsa, hızın değişimi parabolik olacaktır. Bu sebeple  $1/4$  ile  $1/6$  arasındaki  $\beta$  değişimi ile çözüm yakınsar ve stabil olacaktır.  $\Delta t \leq 0.1T_n$  olduğu durumlarda  $\beta=1/6$  değeri kullanılırsa yakınsaklık hızı büyük olacaktır [2].

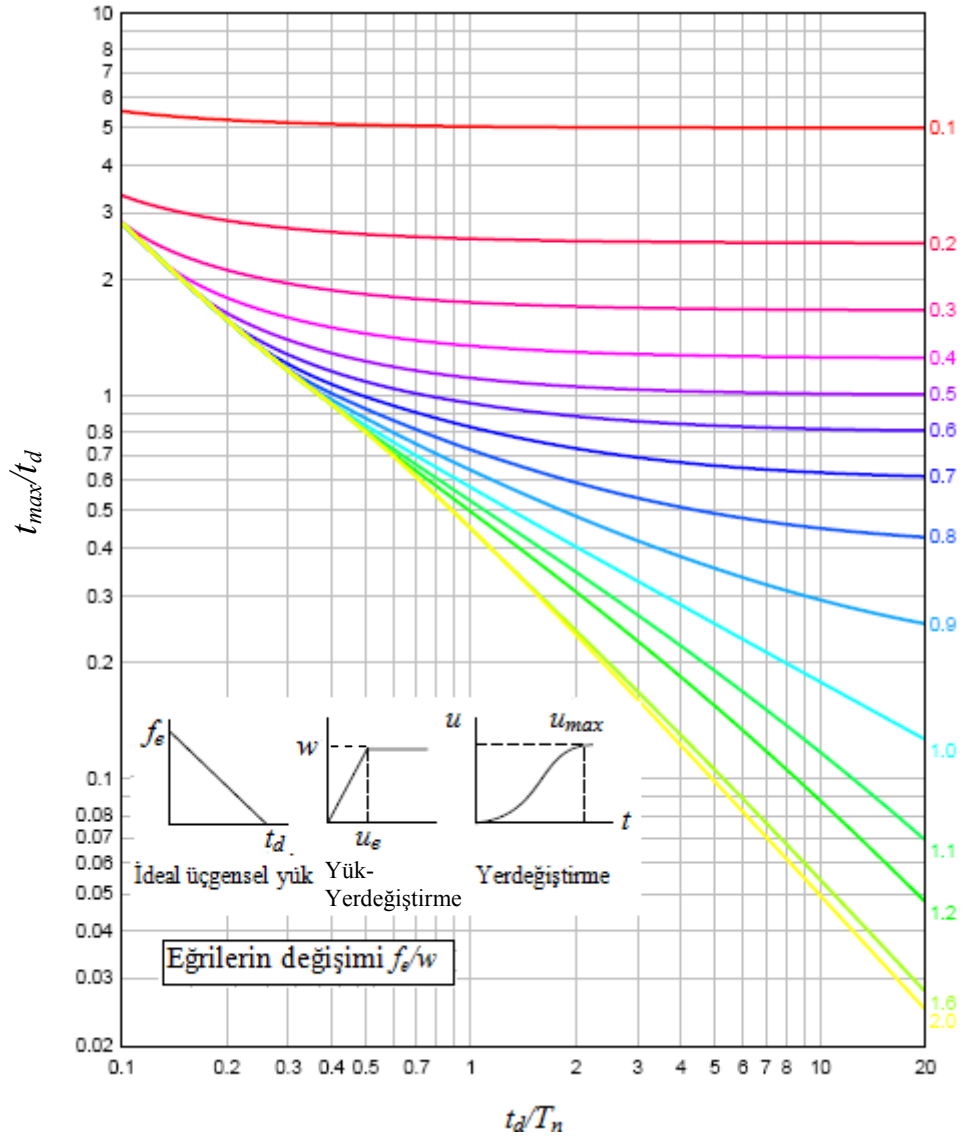
Elastoplastik yük – yerdeğiştirme ilişkisine sahip tek serbestlik dereceli sistemler için pratik uygulamalara yönelik geliştirilen bir diğer yöntem de abaklarla çözüm yaklaşımıdır. Amerikan ordu mühendisleri [12] tarafından geliştirilen bu abaklar

sayesinde sönümsüz tek serbestlik dereceli elastoplastik sistemin idealleştirilmiş üçgensel patlama yükleri altında süneklik istemi kolaylıkla bulunabilmektedir. Şekil 5.2 de bu abak verilmiştir. Bu abağın yatay eksen patlama yükünün süresi ile tek serbestlik dereceli sistemin periyodunun oranına, eğrilerdeki değişimler ise patlama yükünün  $t=0$  anındaki maksimum değerinin tek serbestlik dereceli sistemin elastik yük taşıma kapasitesi oranına bağlıdır.



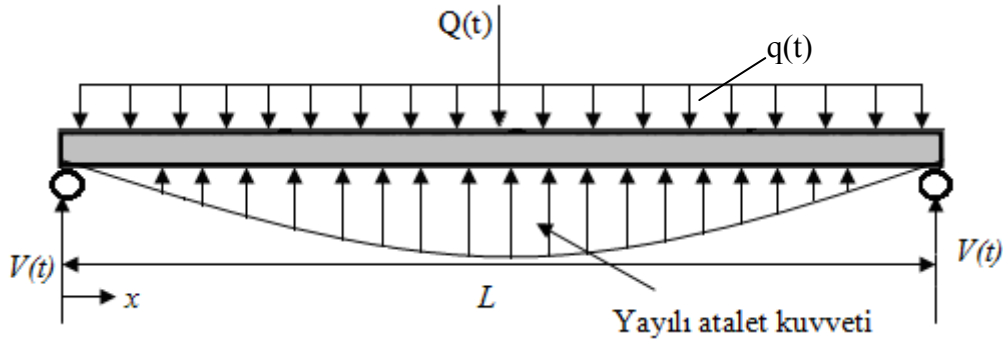
**Şekil 5.2:** Üçgensel patlama yükleme altında elastoplastik sistemlerde süneklik istemi [12]

Ayrıca tek serbestlik dereceli sistemin maksimum yerdeğiştirmeye ulaşana kadar geçen tepki süresini Şekil 5.3 de verilen abak yardımıyla bulabiliriz [12]. Bu abakta  $t_{max}$  maksimum tepki süresidir.

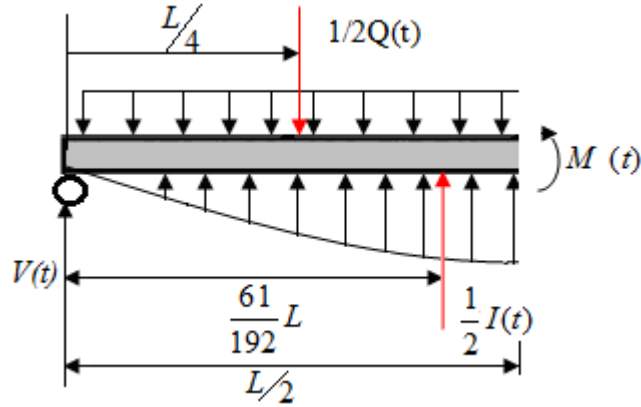


**Şekil 5.3:** Üçgensel patlama yüklemesi altında elastoplastik sistemlerde maksimum tepki süresi [12]

Patlama gibi dinamik yüklemelerde bir diğer önemli konu da elemanın mesnet tepkileridir. Statik mesnet tepkilerine ek olarak atalet kuvvetlerinin yarattığı etkileri de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu etkileri açıklamak için Biggs (1964) tarafından basit mesnetli bir kiriş için sunulan serbest cisim diyagramı Şekil 5.4 de verilmiştir [7]. Kiriş açıklığının orta noktasındaki kesme kuvvetinin sıfır olmasından dolayı Şekil 5.5 de verilen yarım kiriş üzerindeki atalet kuvvetinin bileşkesinin etki ettiği nokta etrafında yazılan moment denge denklemi Denklem 5.8 da verilmiştir [23]. Burada  $V(t)$  dinamik mesnet tepkisi,  $I(t)$  bileşke atalet kuvveti,  $M(t)$  elemanın orta noktasındaki moment,  $Q(t)$  patlama yükünün tekil yük bileşkesidir ( $Q(t)=q(t)L$ ).



**Şekil 5.4:** Basit mesnetli kirişte atalet etkileri ve serbest cisim diyagramı



**Şekil 5.5:** Yarım kirişin serbest cisim diyagramı

$$V(t) \frac{61}{192} L - M(t) - 0.5 f(t) L \left( \frac{61}{192} L - 0.25L \right) = 0 \quad (5.8)$$

Basit mesnetli kirişin moment dayanımı ( $M_o$ ) ile düzgün yayılı yük kapasitesi ( $w(t)$ ) arasındaki ilişki Denklem 5.9 de verilmiştir. Bu denklem ile Denklem 5.8 den elde edilen açıklık momenti birbirine eşitlenirse dinamik mesnet tepkisi ( $V(t)$ ) Denklem 5.10 daki gibi elde edilir [23].

$$M_o = \frac{w(t)L}{8} \quad (5.9)$$

$$V(t) = 0.39w(t) + 0.11Q(t) \quad (5.10)$$

Farklı mesnet şartlarına ve yükleme durumlarına sahip çeşitli elemanlar için genel dinamik mesnet tepkisi Denklem 5.11 formunda olacaktır. Bu denklemde  $C_1$  farklı mesnet ve yükleme durumları için verilen düzgün yayılı yük kapasitesi katsayısı,  $C_2$  hesaplanan patlama yükü katsayısıdır. Her iki katsayıda farklı mesnet durumları için Ek A da verilmiştir.

$$V(t) = C_1 w(t) + C_2 Q(t) \quad (5.11)$$

## 6. BETONARME ELEMANLAR İÇİN PERFORMANS SEVİYELERİ

Yapıların performansa dayalı değerlendirilmesi fikri patlamaya göre yapı tasarımında köklü bir geçmişe sahiptir. Bugüne kadar patlamaya yönelik olarak ortaya çıkan tüm tasarım kaynakları yapıların performansları için limitler koyma gereksinimi duymuşlardır [2, 11, 12, 15]. Amerikan ordusunun yapıların kaza yükleri altında tasarımını içeren tarifnamesi TM5-1300 (1990) tarafından elemanların performansları kesit dönmeleri açısından üç farklı seviye ile tanımlanmıştır [11]. Bu performans seviyeleri aşağıdaki gibidir;

Hafif hasar limiti (HH): Bu limit en dış basınç lifindeki betonun yaklaşık olarak ezilmesine karşı gelen kesit dönmesi sınırıdır.

$$\theta \leq 2^\circ \text{ (0.017 rad)}$$

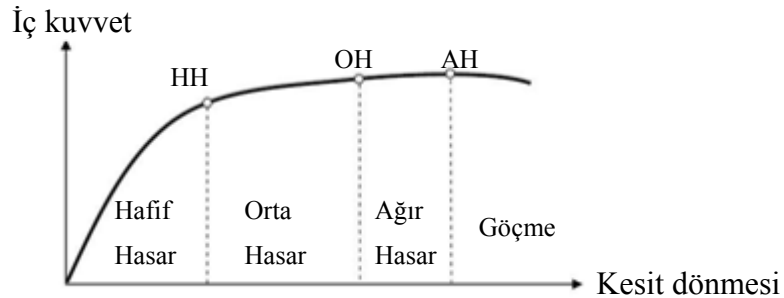
Orta hasar limiti (OH): Bu limitte beton ezilmiş kontrol donatıya geçmiştir.

$$\theta \leq 5^\circ \text{ (0.043 rad)}$$

Ağır hasar limiti (AH): Bu limit yapının göçme sınırı olarak nitelenmektedir.

$$\theta \leq 12^\circ \text{ (0.10 rad)}$$

Bu kesit dönme limitleri arasında kalan bölgelerdeki hasar seviyeleri Şekil 6.1 de verilmiştir.



Şekil 6.1: TM5-1300 e göre performans seviyeleri

Ayrıca ülkemizde 2007 yılında yürürlüğe giren deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik ile birlikte de betonarme yapılar için performans

seviyeleri tanımlanmıştır [34]. Betonarme yapılar için kesit hasarı açısından tanımlanan bu performans limit aşağıdaki gibidir;

Kesit Minimum Hasar Sınırı (MN) için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ( $\epsilon_{cu}$ ) ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi ( $\epsilon_s$ ) üst sınırları:

$$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0.0035 ; (\epsilon_s)_{MN} = 0.010$$

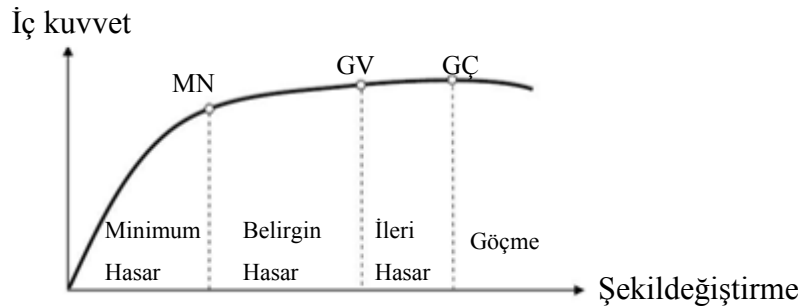
Kesit Güvenlik Sınırı (GV) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ( $\epsilon_{cg}$ ) ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları:

$$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0.0035 + 0.01 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.0135 ; (\epsilon_s)_{GV} = 0.040$$

Kesit Göçme Sınırı (GÇ) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi üst sınırları:

$$(\epsilon_{cg})_{GC} = 0.004 + 0.014 (\rho_s / \rho_{sm}) \leq 0.018 ; (\epsilon_s)_{GC} = 0.060$$

Bu ifadelerde  $\rho_s$  kesitte var olan hacimsel enine donatı oranı ve  $\rho_{sm}$  deprem yönetmeliğine göre kesite konulması gereken minimum hacimsel enine donatı oranıdır. Kesit hasar limitleri arasında kalan bölgelerdeki hasar performans seviyeleri Şekil 6.2 de verilmiştir.

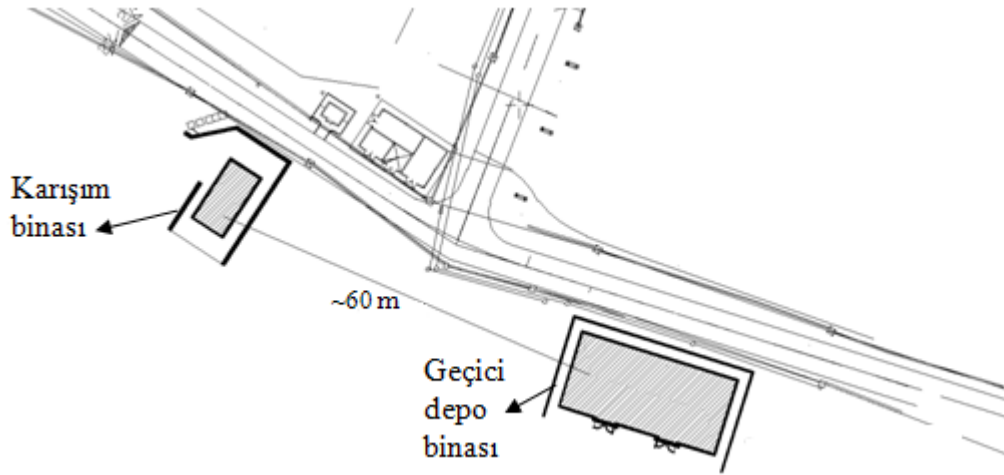


**Şekil 6.2:** Türk deprem yönetmeliğine göre performans seviyeleri [34]



## 7. KÜRESEL BARUT ÜRETİM TESİSİ ÖRNEĞİ (GERÇEK BİR OLAY)

Geçtiğimiz dönemde, bir küresel barut üretim tesisinde iki büyük patlama yaşanmıştır [26]. İlk patlama 2800 kg yüksek yoğunlukta nitroselüloz içeren küresel barut komponentlerinin karışımı esnasında karışım binasında yaşanmış, ikinci patlama karışım binasına yaklaşık 60 m uzaklıkta bulunan (Şekil 7.1) geçici depo binasında 17000 kg karışıma hazır komponentin yanmasıyla meydana gelmiştir. Bu olaylar sonucunda 3 kişi hayatını kaybetmiş, geçici depo binası tamamen yıkılmış, karışım binası ise kısmi olarak yıkılmıştır. Bu çalışmada kısmi yıkıma uğrayan karışım binasının koruyucu betonarme perdeleri patlama yükleri açısından, hasar durumu ve yapı karakteristikleri açısından gerek yerinde yapılan gözlemler, gerekse analitik hesaplarla irdelenecektir.

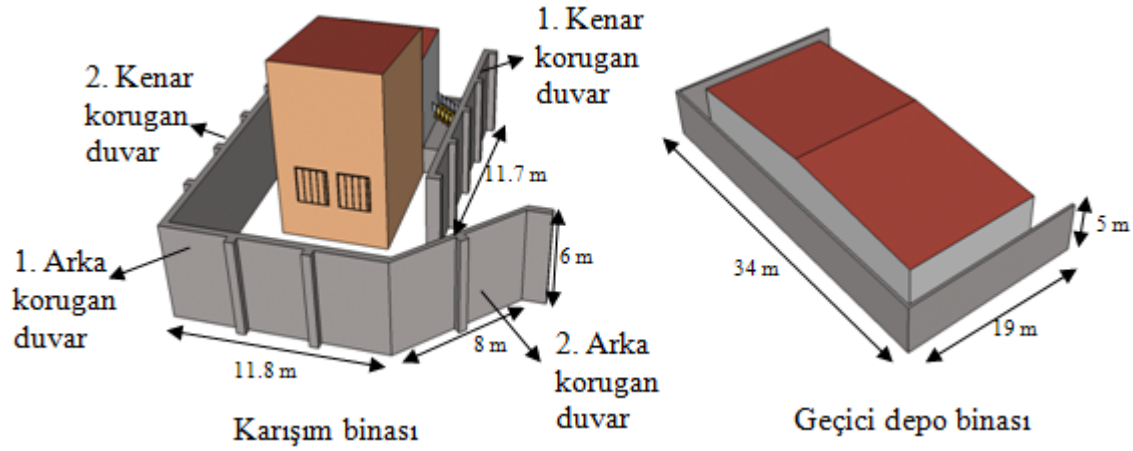


Şekil 7.1: Patlamanın yaşandığı binaların birbirine uzaklıkları

### 7.1 Yapıların Detayları

Daha önce de belirtildiği gibi patlama yaşanan iki yapı arasındaki mesafe yaklaşık olarak 60 m dir. Her iki yapı da çelik konstrüksüyon bir servis yapısı ve onu koruyan betonarme koruganlardan yapılmıştır. Bu yapıların genel görünimleri Şekil 7.2 de verilmiştir. Geçici depo binasındaki 200 mm kalınlığındaki betonarme perde duvarlar ve hafif çelik depo yapısı 17000 kg patlayıcının yanmasıyla oluşan patlama sonucunda tamamen yıkılmış ve parçalanmıştır (Şekil 7.3). Bu yapıdan yerinden

detaylı bilgi toplanılamadığı için bu çalışmada özellikle karışım binası üzerinde durulmuştur.

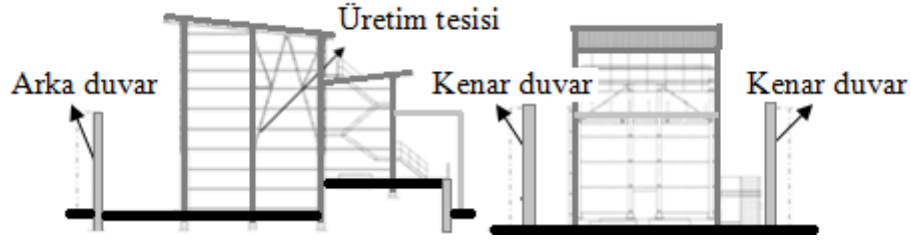


**Şekil 7.2:** Karışım binası ve geçici depo binasının genel görünüşleri



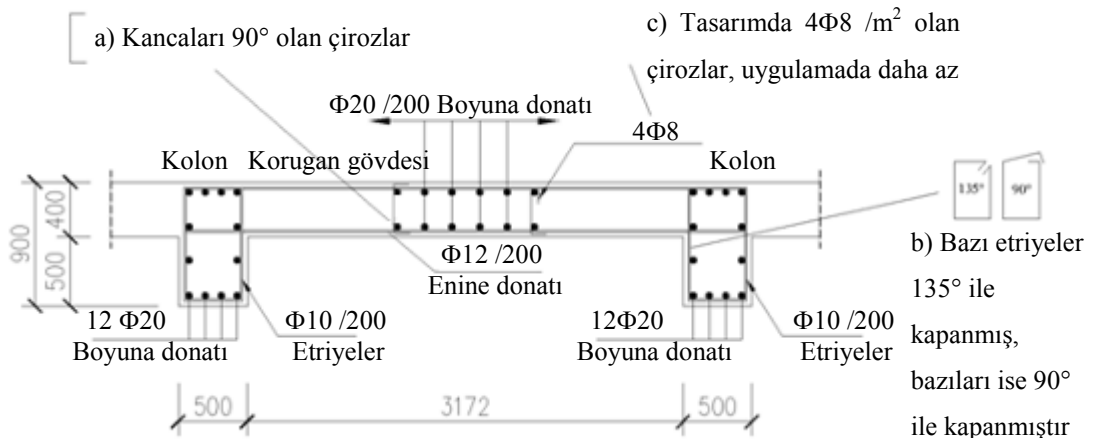
**Şekil 7.3:** Geçici depo binasının patlamadan sonraki görüntüsü

Karışım binasının düşey kesitleri Şekil 7.4 de verilmiştir. Bu yapının betonarme perdelerinin yapısal detayları tasarım çizimleri ve yerinde yapılan gözlemlerden elde edilmiştir. Ayrıca bu yapıda yıkılmadan kalan kısımlardan birçok çelik donatı ve beton numuneler alınıp, laboratuvarında malzeme testleri yapılmıştır. Bu testlerden betonun ortalama basınç dayanımı 45 MPa, çeliğin ortalama akma dayanımı ise 490 MPa olarak bulunmuştur [26]. Bu değerler tasarım için öngörülen değerlerin üzerindedir (beton için 25 MPa, çelik için 420 MPa).

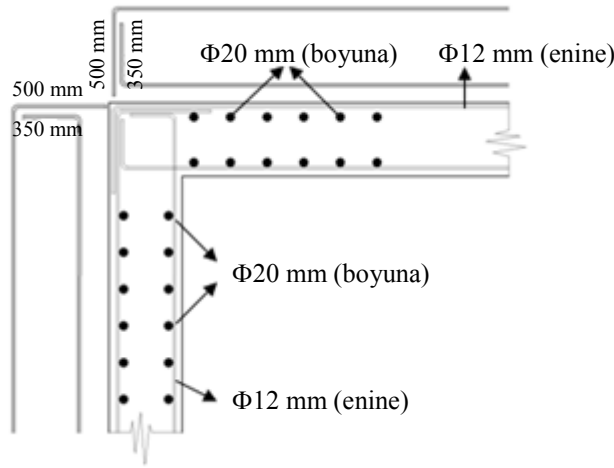


**Şekil 7.4:** Karışım binasının düşey kesit detayları

Betonarme korugan perdelerin yerindeki gözlemlerle ve elde edilen belgelerle doğrulanan tipik kesit detayı Şekil 7.5 de verilmiştir. Bu detaylarda göze çarpan uygulama hataları a) perdelerde çiroz ve etriyelerin bir çoğunda uygulanan 90° lik kancalardır; b) başlık kolonlarındaki 90° kancalı etriyeler; c) perdelerde yetersiz çirozların kullanılmasıdır. Bu detaylar Şekil 7.5 de verilmiştir. Bunlara ek olarak, tasarım ve detaylandırma aşamasında herhangi bir patlama olabileceği ihtimalinin dikkate alınmamış olduğu düşünülmektedir. Bunun en basit göstergesi perdelerin birleşimleridir. Şekil 7.6 da tipik birleşim detayı verilmiştir. Bu detay patlama etkileri için oldukça zayıf bir detaydır. Bölüm 4 de patlama etkilerine maruz kalabilecek bir yapı elemanı için önerilen minimum birleşim ve sargılama donatısı detayları verilmiştir. Bölüm 4 den de görüleceği gibi donatı uygulamasının detayları ölçeklenmiş mesafe değerine göre değişmektedir. Karışım binasında kenar korugan duvarlar için bu değer 0.42 ( $z=0.42 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) ve 1. Arka korugan duvar için ise 1.1 ( $z=1.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) dir. Bölüm 4 de bu ölçeklenmiş mesafeler için önerilen minimum şartlar ile karşılaştırıldığında detayların yetersizliği açıkça ortaya çıkmaktadır.



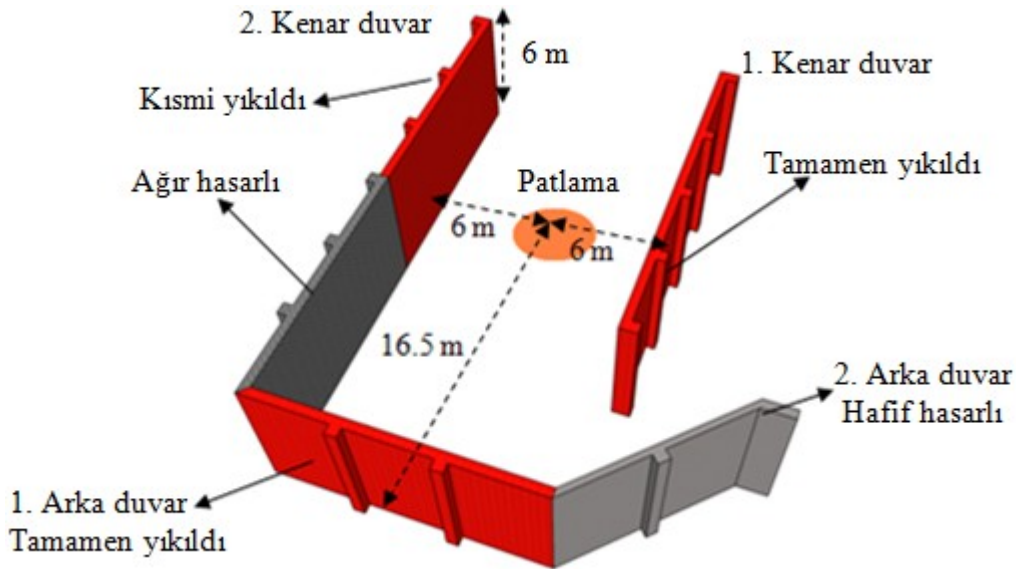
**Şekil 7.5:** Betonarme perdelerin kesit detayı



**Şekil 7.6:** Tipik perde birleşim detayı

## 7.2 Hasar Detayları

Karıştırıcı binasında patlama sırasında çelik bir karıştırıcının içinde 2800 kg lık patlayıcı yeralmaktaydı. Bu karıştırıcının yan koruganlara uzaklığı yaklaşık 6 m, arkasındaki korugana uzaklığı yaklaşık 16.5 m dir. Patlama sonucunda, 1. arka korugan duvar ve 1. kenar korugan duvar tamamen yıkılmış, 2. kenar korugan duvar kısmi olarak yıkılmıştır. Bu detaylar Şekil 7.7 de verilmiştir.



**Şekil 7.7:** Karışım binası korugan perdelerinin hasar detayları

1. Kenar korugan duvardan hasar fotoğrafları Şekil 7.8 de verilmiştir. Yerinde yapılan gözlemlerde elde edilen bulgular şu şekildedir; korugan perde duvar düzlemi dışına devrilmiştir, boyuna ve enine donatılar betondan sıyrılmış ve beton

ayrışmıştır, birçok bölgede beton ezilmiş ve parçalanmıştır, perdelerin tabanında bazı boyuna donatılar kopmuştur.

2. Kenar korugan duvar kısmi olarak yıkılmıştır (Şekil 7.9). Bu ayrım yaklaşık olarak duvarın yatayda ortasında gerçekleşmiştir. Burada önemli bulgu, bu ayrımın yaşandığı bölgenin projeye göre enine donatıların bindirme bölgesi olmasıdır. Bu durum yerinde yapılan gözlemlerle de doğrulanmıştır. Bu konuda çeşitli tasarım kitaplarında patlama yükleri altında tasarım için bindirmeli eklerin mümkün olduğunca minimum gerilme bölgelerinde yapılması istenilmektedir. Amerikan ordu kaynaklarında ise bu konuda ACI 318 [35] betonarme tasarım yönetmeliğinin deprem bölgeleri için önerdiği bindirme boyunun 1.3 kat büyütülmesi öngörülmüştür [12]. Mevcut duvar için ACI tarafından önerilen bindirme boyu hesaplanıldığında, gerekli bindirme boyunun 826 mm olması gerekmektedir. Yerinde yapılan gözlemlerde bu bindirme boyunun 1200 mm civarında olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut bindirme boyunun tasarım kaynakları tarafından önerilen bindirme boyundan büyük olmasına rağmen yerinde yapılan gözlemlerde bindirme bölgelerinin davranışını olumsuz yönde etkileyecek bulgulara rastlanmıştır. Bunlar paspaylarının yetersizliği ( $<10$  mm) ve bindirme bölgesindeki yetersiz enine donatı düzeni gibi donatı ile beton arasındaki aderansı etkileyecek zayıflıklardır.

1. Arka korugan duvarın hasarı 1. kenar korugan duvarın hasarına benzemektedir. Bu duvarın hasar durumu Şekil 7.10 da verilmiştir. Gözlenen hasar durumları şu şekildedir; duvar dışa doğru devrilmiştir, donatıların büyük kısmı betondan sıyrılmıştır. Ayrıca bu duvar 2. kenar korugan duvar ve 2. arka korugan kenar duvara birleşiminden sıyrılmıştır. Bu birleşimler Bölüm 4 de verilen minimum şartları sağlamamaktadır. Bu bölgenin ölçeklenmiş mesafesi 1.1 ( $z=1.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) dir. Bu ölçeklenmiş mesafe değeri birleşim bölgelerinin yakın mesafe bir patlama için detaylandırılması gerektiği anlamını taşımaktadır. Gerçek durumda ise birleşim detayları Şekil 7.6 da verildiği gibidir. Mevcut durum Bölüm 4 de önerilen minimum gereksinimlerle karşılaştırıldığında yetersiz olduğu açıktır.

### 7.3 Patlayıcı Tipi ve Patlama Yükleri

Küresel barut bir dumansız barut türüdür. Dumansız barut ise en önemli mühimmat malzemelerinden biridir. Küresel barut üreticileri tarafından verilen içeriği Çizelge 7.1 de verilmiştir.



**Şekil 7.8:** 1. Kenar korugan perdelerinin hasar resimleri





Şekil 7.9: 2. Kenar korugan hasar resimleri



**Şekil 7.10:** 1. Arka korugan hasar resimleri



**Çizelge 7.1:** Üretici tarafından verilen küresel barut içeriği [26]

| Komponent       | Oran % |
|-----------------|--------|
| Nitroselüloz    | 83.84  |
| Nitrogliserin   | 10.09  |
| Dipenilamin     | 0.94   |
| Dibütilfalat    | 4.65   |
| Grafit          | 0.28   |
| Potasyum nitrat | 0.28   |
| Su              | 0.67   |
| Alkol           | 0.17   |

İçerikteki nitroselüloz ve nitrogliserinin yanma sırasında açığa çıkardığı yanma enerjileri Çizelge 7.2 de verilmiştir. Bu komponentlerin içerdiği nitrojen oranı yanma enerjileri açısından önemli bir parametredir. Nitrojenin etkileri Çizelge 7.3 de verilmiştir. Bu patlayıcılar yandıklarında CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> ve NO açığa çıkmaktadır [36].

**Çizelge 7.2:** Nitroselüloz ve nitrogliserin için yanma enerjileri [36]

| Bileşen                        | Parlama ısısı (kcal/kg) | Yanma ısısı (kcal/kg) | Aktivasyon enerjisi (kcal/mol) |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Nitroselüloz (%14.14 nitrojen) | 2232                    | 1160                  | 49                             |
| Nitrogliserin                  | --                      | 1500                  | 40.39                          |

**Çizelge 7.3:** Nitrojen oranının nitroselüloz üzerindeki etkisi [36]

| Nitrojen oranı %        | 12.6  | 13.15 | 14   |
|-------------------------|-------|-------|------|
| Parlama ısısı (kcal/kg) | 2414  | 2345  | 2237 |
| Yanma ısısı (kcal/kg)   | 934.5 | 1016  | 1140 |

Patlama yüklerinin tayininde patlayıcının TNT eşitliği kullanılmaktadır. Bu eşitlik birim yanmada açığa çıkardıkları enerjilerin oranı ile bulunmaktadır (Denklemler 7.1). Daha önceden de bahsedildiği gibi TNT nin yanma enerjisi 4.3 MJ/kg dır. Bu çalışmada küresel barutun yanmasının açığa çıkardığı enerji 4 MJ/kg kabul edilmiştir.

$$W_E = \frac{d_{\text{küreselbarut}}}{d_{\text{TNT}}} W_{\text{küreselbarut}} \quad (7.1)$$

Karışım binasında yaşanan patlama kapalı ortamda yaşanan bir patlamadır. Bu patlamanın etkilerinin hesaplanması ölçeklenmiş mesafe ( $z$ ) ve sınırlama etkisini belirleyecek bazı geometrik parametrelere bağlıdır. Ölçeklenmiş mesafe daha önce de verildiği gibi patlayıcının TNT denki ağırlığı ( $W_E$ ) ile duvarın patlama merkezine olan uzaklığının ( $R$ ) bir fonksiyonudur (Denklem 7.2).

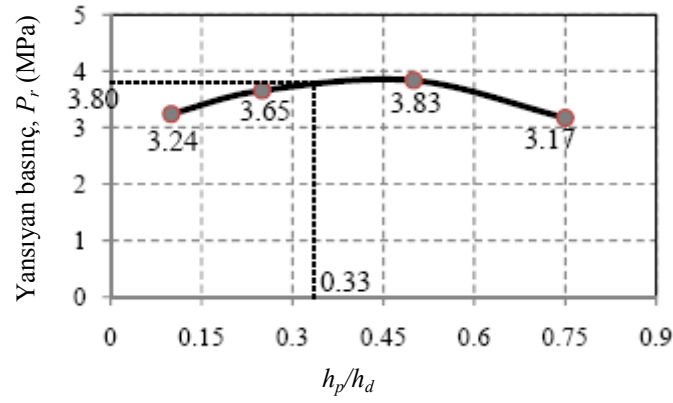
$$z = \frac{R}{W_E^{1/3}} \quad (7.2)$$

Bu konudaki teknik kaynaklardan biri olan UFC 3 – 340- 02 [12] ye ve onun önceki versiyonları olan kaynaklara göre kapalı ortamda yaşanan bir patlamada sınırlama etkisinin belirleyecek olan geometrik parametreler;  $l_d/R$ ,  $r/l_d$ ,  $l_d/h_d$  ve  $h_p/h_d$  oranıdır: Burada  $l_d$  patlama yükü aranan duvarın uzunluğu,  $r$  duvara dik konumlanmış en yakın duvarın patlama merkezine olan uzaklığı,  $h_d$  duvarın yer seviyesinden yüksekliği,  $h_p$  patlamanın yer seviyesinden yüksekliğidir. Karışım binasının duvarları için bu parametreler Çizelge 7.4 de verilmiştir.

**Çizelge 7.4:** Karışım binası için geometrik parametreler

|                       | $l_d/R$ | $l_d/h_d$ | $r/l_d$ | $z$ (m/kg <sup>1/3</sup> ) | $h_p/h_d$ |
|-----------------------|---------|-----------|---------|----------------------------|-----------|
| 1. Arka korugan duvar | 0.70    | 2.00      | 0.50    | 1.21                       | 0.33      |
| Kenar korugan duvar   | 3.75    | 3.25      | 0.75    | 0.43                       | 0.33      |

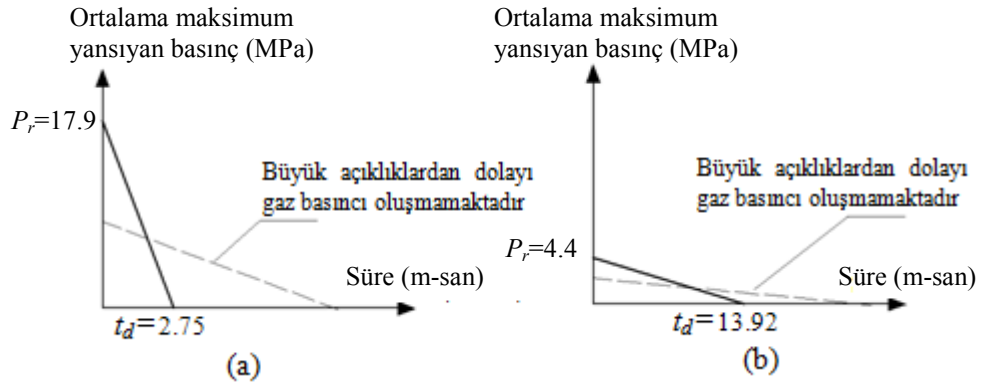
Bu parametreler hesaplandıktan sonra yine UFC 3 – 340-02 tarafından verilen abakların yardımıyla ortalama maksimum yansıyan basınç ve ortalama yansıyan impuls değerleri bulunmuştur. Bu değerler abaklarda  $l_d/h_d$  ve  $h_p/h_d$  oranının bazı değerleri için verilmiştir. Hesabı yapılan tam değerleri bulmak için  $l_d/h_d$  değerleri arasında doğrusal interpolasyon,  $h_p/h_d$  değerleri arasında ise doğrusal olmayan interpolasyona ihtiyaç vardır. Bu işlemler hem maksimum yansıyan basınç ( $P_r$ ) hemde yansıyan impuls ( $I_r$ ) için yapılmıştır. Maksimum yansıyan basınç için yapılmış tipik bir doğrusal olmayan interpolasyon Şekil 7.11 de verilmiştir.



**Şekil 7.11:** Maksimum yansıyan basınç için doğrusal olmayan interpolasyon

Kapalı ortamda yaşanan patlamanın oluşturduğu patlama yükünün etkiye süresi ( $t_d$ ) Denklem 7.3 ile bulunmuştur. Buna göre 2800 kg lık küresel barutun yanmasıyla meydana gelen patlamada, kenar korugan duvarlar ve 1. arka korugan duvar için hesaplanan basınç – zaman ilişkisi Şekil 7.12 de verilmiştir. Ayrıca bu şekillerden de farkedilebileceği gibi gaz basıncı dikkate alınmamıştır. Bunun sebebi yapının açık havaya olan boşluklarının oldukça fazla olmasından dolayı gaz basıncının oluşmadığının kabul edilmiş olmasıdır.

$$t_d = \frac{2I_r}{P_r} \quad (7.3)$$



**Şekil 7.12:** (a) Kenar koruganlar ve (b) 1. arka korugan için patlama yükleri

#### 7.4 Tek Serbestlik Dereceli Denklik

Öncelikle korugan duvarları yeterli düzeyde temsil edecek bir duvar parçası seçilmiştir. Bu temsili duvar bir betonarme kolon ve iki yanında korugan perde gövdesinden oluşmaktadır (Şekil 7.13). Bu temsili konsol perde duvar, kütle ve

The diagram illustrates the reduction of a wall for analysis. On the left, a wall of length 11.5 m and height 6 m is shown. An arrow points to the right, where a reduced wall of length 3.5 m and height 6 m is shown.

Diagram of a mass-spring system. A vertical wall on the left is labeled with stiffness  $k$  and mass  $m$ . A horizontal spring with stiffness  $k_s$  connects the wall to a mass  $m_s$  on wheels.

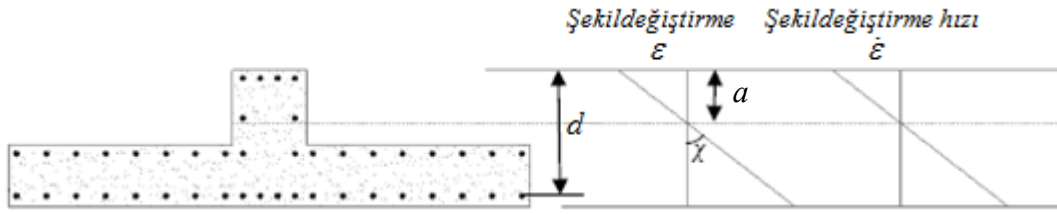
tildiği gibi bu dönüşüm kütle için kinetik enerjiyi tanımlayan bir dönüşüm faktörüyle ( $k_m$ ), rijitlik ise yapıyı tanımlayan bir dönüşüm faktörüyle ( $k_r$ ) yapılmıştır. Bu dönüşüm faktörünün rölatif olarak düşük olmasından dolayı hesaplanan dönüşüm faktörleri Çizelge 7.5'te görülmektedir. Sistemin bu dönüşüm faktörleri kullanılarak elde edilen 7.3 deki gibi olacaktır. Bu denklemde

| Çizelge 7.5: Tek serbestlik dereceli sisteme dönüşüm faktörleri |               |               |
|-----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                                                                 | Elastik bölge | Plastik bölge |
| Kütle faktörü, $k_m$                                            | 0.26          | 0.33          |
| Yük faktörü, $k_l$                                              | 0.40          | 0.50          |

|                      | Elastik bölge | Plastik bölge |
|----------------------|---------------|---------------|
| Kütle faktörü, $k_m$ | 0.26          | 0.33          |
| Yük faktörü, $k_l$   | 0.40          | 0.50          |

## 7.5 Temsili Duvarın Kapasitesi

Temsili duvarın yapısal kapasitesini bulmak için dayanım hiyerarşisine (eksenel yük kapasitesi > kesme kapasitesi > eğilme kapasitesi) bağlı olarak eğilme analizi yapılmıştır. Hesaplarda korugan perdelerdeki sargı donatılarının yetersizliğinden dolayı Mander sargısız beton modeli [37] ve pekleşmeli elastoplastik çelik modeli kullanılmıştır. Patlama yüklerinin yarattığı yüksek şekildeğiştirme hızının etkilerini göz önüne almak için, eğilme analizinde malzemelerin dinamik gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri kullanılmıştır. Kesiti Şekil 7.15 de verilen temsili duvarda en dış lifteki betonun ve çekmedeki çelik çubuğun şekildeğiştirme hızlarının kolaylıkla bulunabilmesi için kesitin şekildeğiştirme dağılımı doğrusal kabul edilmiştir. Tek serbestlik dereceli bir sistemin Denklem 3.3 de verilen hareket denkleminin Şekil 7.12 deki gibi bir üçgensel patlama yükü altında çözümü Denklem 7.4 de verilmiştir [32]. Burada  $f_e$  tek serbestlik dereceli sistemin maksimum patlama yükü,  $k_e$  tek serbestlik dereceli sistemin elastik rijitliği,  $\omega$  açısal hız,  $t_d$  patlama yükü etkime süresidir.



**Şekil 7.15:** Temsili perde kesitinde şekildeğiştirme ve şekildeğiştirme hızı dağılımı

$$u(t) = \frac{f_{em}}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (7.4)$$

Bu yerdeğiştirme çözümü sistemin zamana bağlı çözümüdür. Temsili perdenin yerdeğiştirmesi, buna ek olarak elastik yerdeğiştirme tepkisiyle alakalıdır. Bu durumda konsol temsili perdenin yerdeğiştirme fonksiyonuna ve zamana bağlı yerdeğiştirme çözümü Denklem 7.5 deki gibi olacaktır. Bu denklemde  $u(t)_L$  temsili perdenin tepe noktasının zamana bağlı yerdeğiştirme çözümü,  $x$  mesnete olan mesafe,  $L$  temsili perdenin yüksekliğidir.

$$u(x, t) = u(t)_L \frac{x^2}{L^2} \quad (7.5)$$

Eğilme altındaki bir elemanda eğilmeden önce düzlem kesitler, eğilmeden sonra düzlem kalır varsayımı (Bernoulli hipotezi) ile taban mesnetinden  $x$  mesafe uzaklıktaki bir kesitin elastik eğriliği Denklem 7.6 ve Denklem 7.7 yardımıyla elde edilir. Daha önce belirtildiği gibi kesitin şekildeğiştirme dağılımı doğrusal edilirse (Şekil 7.15), en dış lifteki betonun kısalma şekildeğiştirmesi ve çekme altındaki çeliğin şekildeğiştirmesi Denklem 7.8 ve Denklem 7.9 den bulunur.

$$\chi(x,t) = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (7.6)$$

$$\chi(x,t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \frac{2}{L^2} \quad (7.7)$$

$$\varepsilon_c(x,t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \frac{2}{L^2} (a) \quad (7.8)$$

$$\varepsilon_s(x,t) = \frac{f_e}{k_e} \left( 1 - \cos \omega t + \frac{1}{\omega t_d} \sin \omega t - \frac{t}{t_d} \right) \frac{2}{L^2} (d-a) \quad (7.9)$$

Şekildeğiştirmenin zamana göre birinci türevi şekildeğiştirme hızını verecektir. Denklem 7.10 ve Denklem 7.11 en dış lifteki beton ve çekme donatısının şekildeğiştirme hızını vermektedir [25].

$$\dot{\varepsilon}_c(x,t) = \frac{2}{L^2} \frac{f_e}{k_e} \left( \omega \sin \omega t + \frac{1}{t_d} \cos \omega t - \frac{1}{t_d} \right) (a) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (7.10)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(x,t) = \frac{2}{L^2} \frac{f_e}{k_e} \left( \omega \sin \omega t + \frac{1}{t_d} \cos \omega t - \frac{1}{t_d} \right) (d-a) \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (7.11)$$

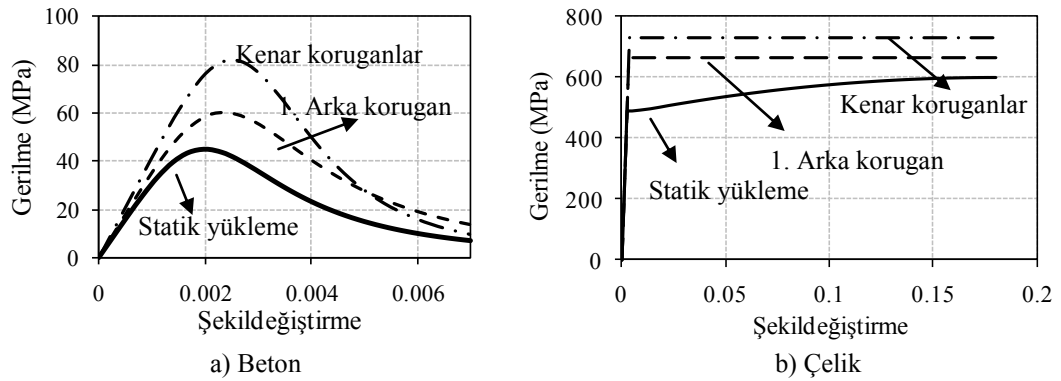
Betonun ve çeliğin şekildeğiştirme hızına bağlı olarak “Dinamik Artış Katsayılarını ( $DAK_{beton}$ ,  $DAK_{çelik}$ )” veren bağıntılar Bölüm 4 de detaylı anlatılmıştır. Betonun şekildeğiştirme hızına bağlı olarak Dinamik Artış Katsayısı Denklem 4.3 ile Denklem 4.6 arasında verilmiştir. Çeliğin şekildeğiştirme hızına bağlı olarak Dinamik Artış Katsayısı ise Denklem 4.7 ile Denklem 4.10 arasında verilmiştir.

Kenar korugan duvarlar ve 1. arka korugan duvar için Bölüm 4 de verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanan şekildeğiştirme hızları ve dinamik artış katsayıları Çizelge 7.6 da verilmiştir. Bu tablodaki şekildeğiştirme hızları ve dinamik artış katsayıları maksimum değerlerdir. Beton ve çeliğin elde edilen dinamik dayanımlarla çizilen gerilme – şekildeğiştirme eğrileri Şekil 7.16 de verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği

gibi yüksek şekildeğiştirme hızı betonda dayanım ve rijitlik artışı sağlamakta, çelikte ise akma ve çekme dayanımında artış sağlamaktadır. Burada çelik donatı akma dayanımında sağlanan artış kopma dayanımına göre daha büyüktür. Betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri sargısız Mander modeli [37] kullanılarak çizilmiştir. Bu modelde maksimum gerilme kapasitesine karşı gelen şekildeğiştirme değerleri eşit kabul edilmiştir. Çeliğin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ise pekleşmeli elastoplastik çelik modeli yardımıyla çizilmiştir.

**Çizelge 7.6:** Şekildeğiştirme hızları ve dinamik artış katsayıları

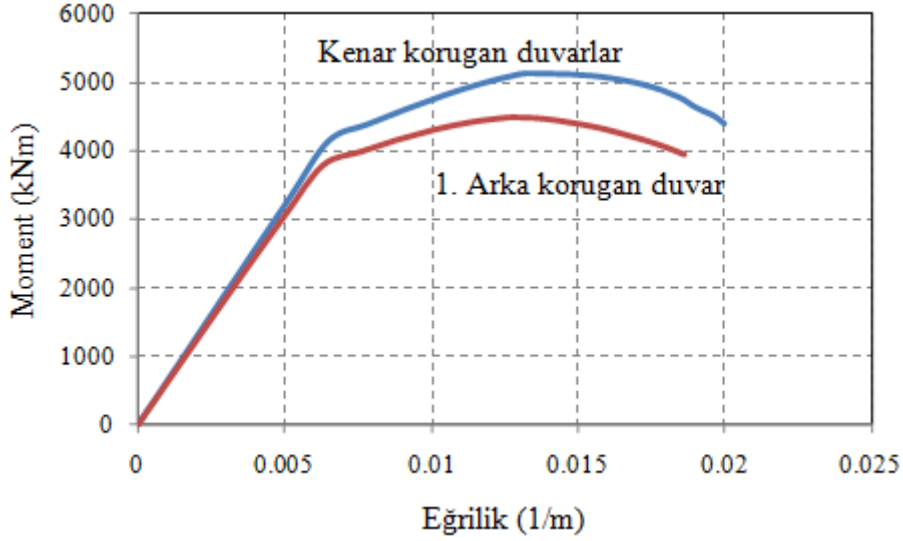
|                  | Şekildeğiştirme hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) ( $s^{-1}$ ) |        | Dinamik Artış Katsayıları |        |       |
|------------------|--------------------------------------------------------|--------|---------------------------|--------|-------|
|                  | Beton                                                  | Donatı | Beton                     | Donatı |       |
|                  |                                                        |        |                           | Akma   | Kopma |
| 1. Arka korugan  | 8                                                      | 9      | 1.33                      | 1.36   | 1.08  |
| Kenar koruganlar | 72                                                     | 79     | 1.78                      | 1.46   | 1.12  |



**Şekil 7.16:** Dinamik ve statik malzeme davranışları

Konsol temsili perdenin patlama yükleri altında doğrusal olmayan eğilme davranışını anlamak için dinamik malzeme davranışları kullanılarak moment – eğrilik ilişkisi çizilmiştir (Şekil 7.17). Her iki korugan perde için moment-eğrilik analizine çekirdek betonun en dış basınç lifindeki şekildeğiştirme % 0.7 olana kadar devam edilmiştir. Daha sonra bu moment eğrilik ilişkisi, Denklem 7.12 ile Denklem 7.17 arasındaki denklemler kullanılarak tek serbestlik dereceli sistemin yük–yerdeğiştirme ilişkisine döndürülmüştür. Bu denklemlerde,  $w_e$  temsili perdenin eğilme altında taşıyacağı maksimum elastik yük (kN/m),  $M_e$  temsili perdenin moment kapasitesi (kNm),  $u_e$  elastik yerdeğiştirme kapasitesi (m),  $L$  temsili duvarın yüksekliği (m),  $k$  temsili duvarın elastik rijitliği (kN/m/m),  $E$  elastisite modülü and  $I_{eff}$  temsili duvar kesitinin etkin atalet momenti (bu çalışmada brüt atalet momentinin 50% si alınmıştır),  $w_{max}$

duvarın taşıyacağı maksimum düzgün yayılı yük (kN/m),  $M_{max}$  kesitin taşıyacağı maksimum moment (kNm),  $u_{plastik}$  kırılma noktasındaki plastik yerdeğiştirme kapasitesi (m),  $\theta_p$  plastik dönme kapasitesi (rad),  $\chi_p$  plastik eğrilik kapasitesi (1/m), ve  $L_p$  temsili perdenin plastik mafsal boyudur (m). Bu çalışmada, plastik mafsal boyu kolon ve perde göz önünde bulundurularak 0.5 m kabul edilmiştir.



Şekil 7.17: Koruganların moment – eğrilik ilişkileri

$$w_e = \frac{2M_e}{L^2} \quad (7.12)$$

$$u_e = \frac{w_e}{k} \quad (7.13)$$

$$k = \frac{8EI_{eff}}{L^4} \quad (7.14)$$

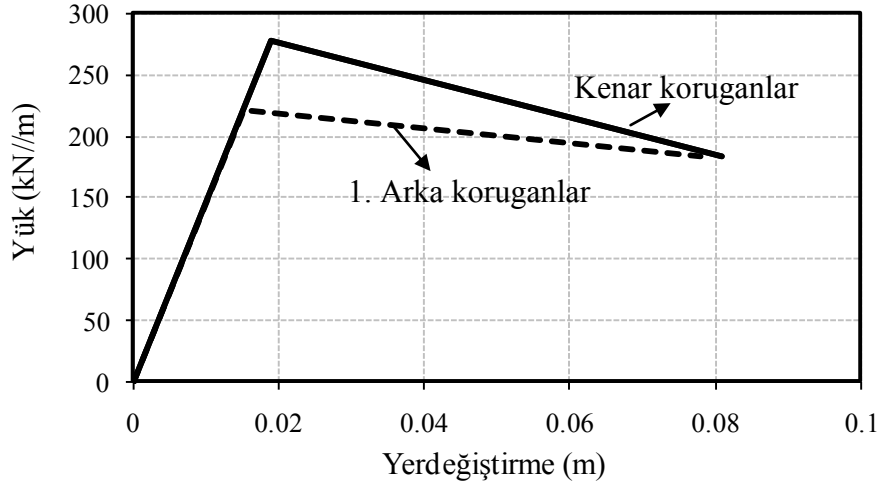
$$w_{max} = \frac{2M_{max}}{L^2} \quad (7.15)$$

$$u_{plastik} = \theta_p \times \left( L - \frac{L_p}{2} \right) \quad (7.16)$$

$$\theta_p = \chi_p L_p \quad (7.17)$$

Her iki korugan perdenin de şekildeğiştirme hızlarına bağlı olarak hesaplanmış olan iki doğrulu yük – yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 7. 18 de verilmiştir.





**Şekil 7.18:** Koruganların yük – yerdeğiştirme ilişkileri

## 7.6 Patlama Yüklerinin İstemi ve Kapasite Karşılaştırılması

Her iki korugan perde için patlama yüklerinin talebi iki farklı metotla hesaplanmıştır. Bunlardan birincisi Bölüm 5 de detayları verilen abak yöntemi ile çözüm, ikincisi hareket denkleminin nümerik iterasyon ile çözülmesidir. Nümerik iterasyon için NONLIN bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu program FEMA tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır [38]. Birinci çözüm iki farklı parametreye bağlıdır. Bu parametreler yapı kapasitesinin patlama yükü istemine oranı ve patlama yükü etkiye süresinin tek serbestlik dereceli sistemin doğal titreşim periyoduna oranıdır. Bu iki parametreyi Bölüm 5 de verilen abakta kullanarak, patlamanın yapıdan talep ettiği süneklik oranını bulabilmekteyiz. Bu işlem yapıldığında kesişimin abağa göre hesaplanabilen en büyük süneklik talebini aşarak abağın dışına çıktığı (kesişimin bulunduğu bölgede süneklik talebi 100 den büyüktür) görülmüştür. Çizelge 7. 7 de her iki korugan içinde abağa giriş parametreleri ve süneklik talepleri verilmiştir.

**Çizelge 7.7:** Korugan duvarlar için tasarım abağı parametreleri

|                  | $t_d$ (m-san) | $T_n$ (san) | $t_d/T_n$ | $w/f_e$ | Süneklik istemi |
|------------------|---------------|-------------|-----------|---------|-----------------|
| 1. Arka korugan  | 13.92         | 0.18        | 0.077     | % 1.3   | >100            |
| Kenar koruganlar | 2.75          | 0.18        | 0.015     | % 0.3   | >100            |

İkinci analizde ise NONLIN bilgisayar programı ile tek serbestlik dereceli sistemimizin patlama yükü analizi yapılmıştır. Bu programdan elde edilen sonuçlar

da abaklardan elde ettiğimiz sonuçlarla örtüşmektedir. Diğer bir deyişle patlamanın koruganlardan süneklik talebi 100 den fazladır.

## **7.7 Sonuçlar**

Yapılan analizlerden ve yerinde yapılan hasar gözlemlerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Yapılan analizler gösteriyor ki patlamaların bu tip konulanmış ve detaylandırılmış korugan perdelerden süneklik ve dayanım talebi anlamlı değerlerin oldukça üstündedir. Bu durum olası patlama yüklerinin tasarım aşamasında dikkate alınmamasının ve zayıf donatı detaylarının kaçınılmaz bir sonucu olmuştur.

Patlama sonrasında yerinde yapılan hasar gözlemleri ile tezin içinde detaylarıyla anlatılan teorik hesaplar birbirleriyle uyum içindedir. Yapı elemanlarının nerdeyse tamamı göçme bölgesine ulaşmıştır.

Koruganlarda kullanılan donatı detayları patlama yüklerine karşı koyabilmek için yetersizdir. İlgili kaynaklarca (TM5-1300, UFC3- 340-01) önerilen minimum enine donatı detaylarını ve birleşim bölgesi donatı detaylarını sağlamamaktadır.

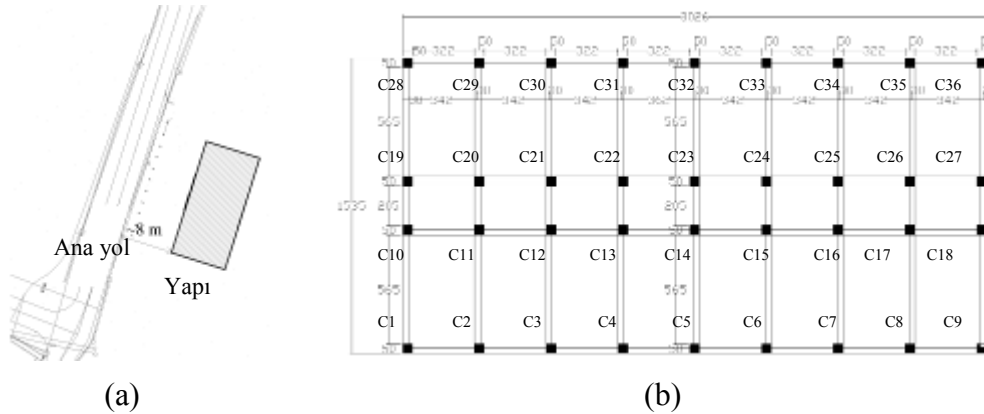
Gelecekte bu tür olayların yaşanmaması için, bu tür tesislerin tasarımlarında patlama yükü etkilerinin ve donatı detaylarının göz önünde bulundurulması şiddetle tavsiye edilmektedir.

## 8. TİPİK BİR BETONARME BİNA ÖRNEĞİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu örnek Türkiye’de 1970 lerde yapılmış tipik çerçeve taşıyıcı sistemli betonarme bir yapının iki farklı potansiyel terörist saldırı altında yapısal performansını içermektedir. Bu farklı saldırı senaryoları, saldırının yapıldığı konumun yapıya uzaklığına göre seçilmiştir. TM5-1300 e göre saldırılarda yaşanan patlamaların yapıya etkileri hesaplanmış ve doğrusal olmayan malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak yapının performansı incelenmiştir [27].

### 8.1 Yapının ve Patlamaların Detayları

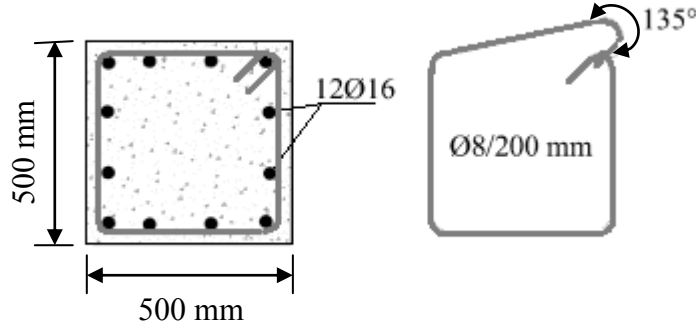
İncelenen yapı 1970 li yıllarda İstanbul’da yapılmış yapıların karakteristik özelliklerini taşıyan 4 katlı betonarme bir yapıdır. Yapının ana caddeye olan uzaklığı yaklaşık 8 m dir ve önünde potansiyel saldırı risklerine karşı yapıyı koruyabilecek herhangi bir korugan yapı bulunmamaktadır. Şekil 8.1 de yapının yola göre konumu ve plandaki görünümü verilmiştir.



**Şekil 8.1:** (a) Yapının yola göre konumu, (b) yapının planda görünümü

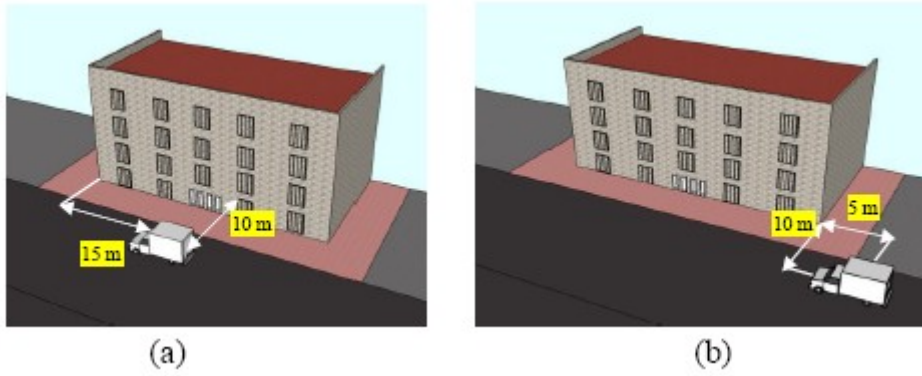
Yapıların patlama etkileri altında tepkilerini ve hasar dağılımını anlayabilmek için kolon, kiriş ve döşemelerin davranışlarını incelemek önem taşımaktadır. Bu çalışmada yapının patlama etkilerine ilk maruz kalacak olan elemanları olan dış aks kolonları birinci derecede önemli elemanlar olarak seçilip, detaylı olarak incelenmiştir. Yapıdaki tüm kolonların tipik bir kesit geometrisine ve donatı detayına sahip olduğu kabul edilmiştir. Şekil 8.2 de yapının tipik kolon detayı verilmiştir.

1970 li yıllarda yapılan yapıları temsil etmesi açısından, beton basınç dayanımı 14 MPa, donatıların akma dayanımı 220 MPa olarak dikkate alınmıştır [27].



**Şekil 8.2:** Betonarme kolonların kesit detayı

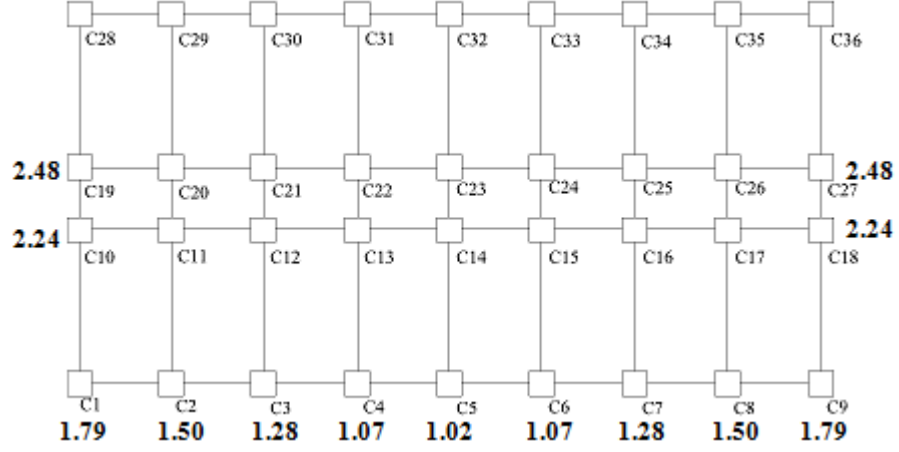
Betonarme yapının patlamaya karşı davranışını incelemek için iki farklı potansiyel saldırı senaryosu oluşturulmuştur. Birinci saldırı senaryosu yaklaşık 1000 kg TNT yüklü bir kamyonun yapının yaklaşık orta noktasında ana yol üzerinde patlatılması, ikinci saldırı senaryosu ise aynı miktarda patlayıcının yapının köşesinde yol üzerinde patlatılması olarak seçilmiştir. Saldırı senaryolarının detayları Şekil 8.3 de verilmiştir.



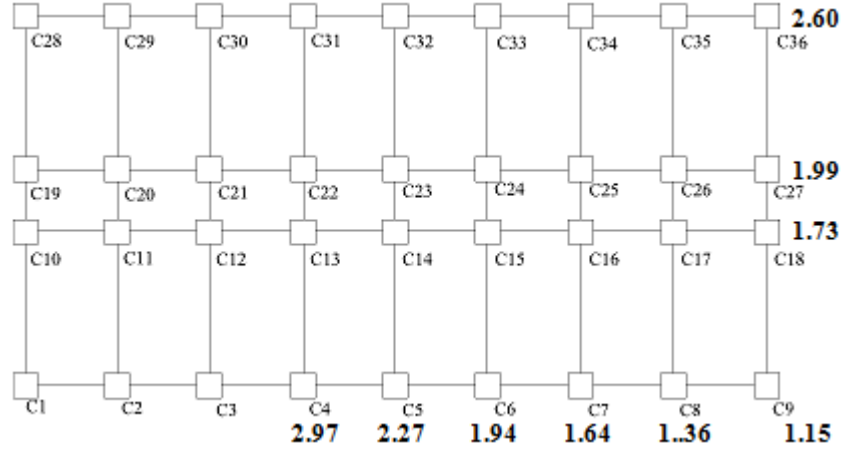
**Şekil 8.3:** (a) Birinci saldırı senaryosu (b) ikinci saldırı senaryosu

## 8.2 Analiz

Bu çalışmada her iki senaryoda yaşanan patlamanın kolonlara etkileri Bölüm 2 de verilen algoritma ve abaklar ile hesaplanmıştır. Her iki patlama da yerin yüzeyinde yaşanan patlamalardır. Daha önce de belirtildiği gibi patlamaların etkilerinin hesaplanabilmesi için ölçeklenmiş mesafenin hesaplanması gerekmektedir. Birinci ve ikinci saldırı senaryoları için hesaplanan ölçeklenmiş mesafeler Şekil 8.4 ve Şekil 8.5 de verilmiştir.

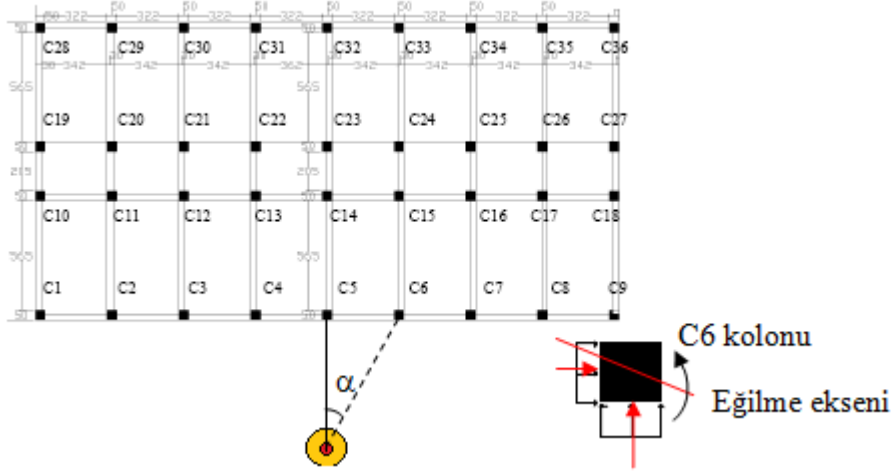


**Şekil 8.4:** Birinci saldırı senaryosuna göre ölçeklenmiş mesafe bilgileri



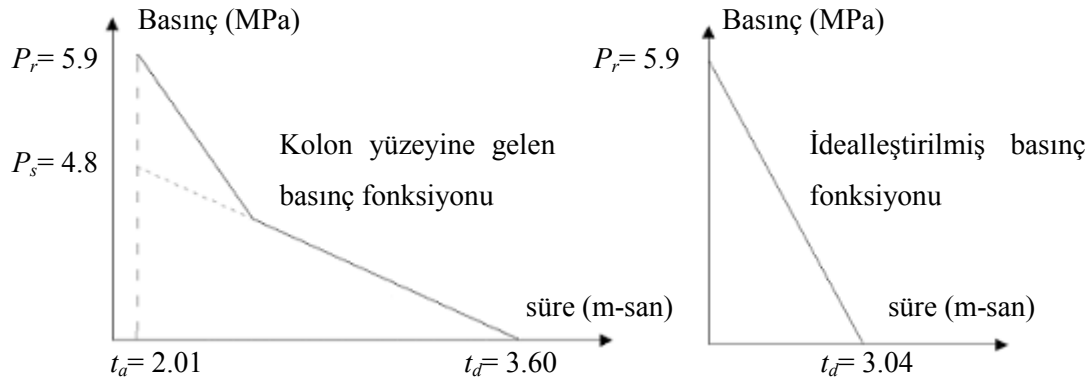
**Şekil 8.5:** İkinci saldırı senaryosuna göre ölçeklenmiş mesafe bilgileri

Yerin yüzeyinde yaşanan bir patlamada şok dalgası hareketine başladığı andan itibaren yerin yüzeyine çarpar ve yansıyarak hareketine devam eder. Hareketi sırasında bir yüzey ya da bir nesne ile karşılaştığında yüzeyden yansır ve yansıyan basıncı oluşturur. Yansıyan basıncın büyüklüğü yüzeyin şok dalgası ile yaptığı izdüşüm açısı ve yüzeye çarpan maksimum aşırı basıncın büyüklüğüne bağlıdır. Bu örnekte kolonların hemen hemen tümünde maksimum aşırı basınç iki yüzeyden yansımaktadır ve iki yüzeyde yansıyan basınç oluşmaktadır. Diğer bir deyiş ile neredeyse kolonların tümü bileşik eğilme etkisine maruz kalmaktadır. Örnek olmak üzere Şekil 8.6 da birinci saldırı senaryosunda C6 kolonu için iki ekseninde gelen basınç yükleri gösterilmiştir.



**Şekil 8.6:** Birinci senaryoda C6 kolonuna gelen basınç etkileri ve eğilme eksenini

Şekil 8.7 de C5 kolonu (izdüşüm açısı  $\alpha = 0^\circ$ ) için Bölüm 2 ye göre hesaplanmış basınç değişimi gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 8.7 de hesapları basitleştirmek için kullanılan idealleştirilmiş basınç değişimi fonksiyonu da verilmiştir. Basınç fonksiyonunun altında kalan alan impuls değerini vermektedir. Bu idealleştirme de maksimum yansıyan basıncı sabit tutarak basınç fonksiyonunun altında kalan alanların eşitliği ile sağlanmaktadır (İmpuls eşitliği). Bu hesaplar tüm alt kat kolonları için ayrı ayrı yapılmıştır.

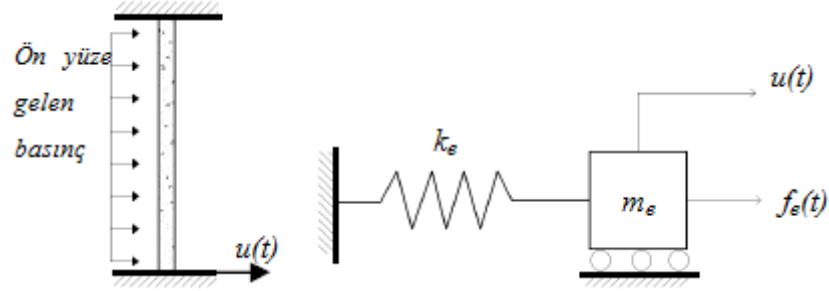


**Şekil 8.7:** C5 kolonuna etkiyen teorik ve idealleştirilmiş patlama basıncı

### 8.3 Tek Serbestlik Dereceli Eşitlik ve Yapısal Kapasite

Kolonların patlama yükleri karşısında yapısal davranışını anlamak için tek serbestlik dereceli modelini oluşturarak dinamik analiz yapmak gerekmektedir. Analizde kolonlar iki uçtan ankastre mesnetli olarak kabul edilmiştir. Bu varsayım kesin doğru olmamakla birlikte yeterli bindirme boyu sağlandığında gerçeğe yakın sonuçlar

vermektedir. Şekil 8.8 de kolonların mesnet şartları ve doğrusal olmayan tek serbestlik dereceli eşleniği verilmiştir.



**Şekil 8.8:** Kolonların mesnet şartları ve tek serbestlik dereceli denki

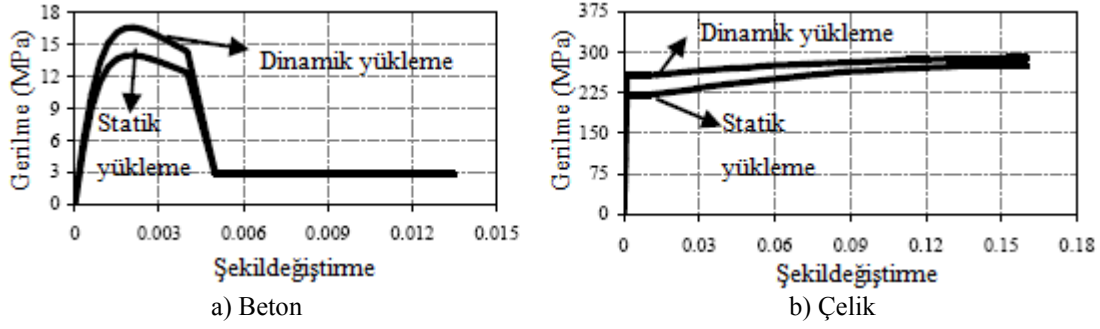
Tek serbestlik dereceli sisteme dönüşüm adımları Bölüm 3 de anlatılmıştır. İki ucu ankastre mesnetli ve yayılı yük altındaki elemanlarda kütle ve yük için dönüşüm faktörleri Tablo 8.1 de verilmiştir. Oluşturulan tek serbestlik dereceli sistemin patlama yükleri altında çözümü için Denklem 8.1 de verilen hareket denkleminin çözümü gerekmektedir. Bu denklemde sönüm oranı rölatif olarak katkısının az olmasından dolayı sıfır alınmıştır.

**Çizelge 8.1:** Kolonlar için tek serbestlik dereceli sisteme dönüşüm faktörleri [7]

|                  | Kütle dönüşüm<br>faktörü ( $K_m$ ) | Yük dönüşüm<br>faktörü ( $K_l$ ) |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Elastik davranış | 0.41                               | 0.53                             |
| Plastik davranış | 0.33                               | 0.50                             |

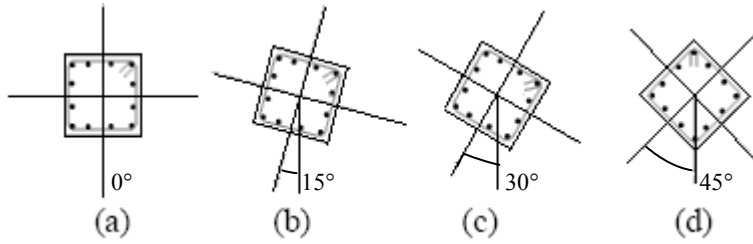
$$m_e \ddot{u}(t) = f_e(t) \quad (8.1)$$

Kolonların kapasitelerini bulmak için dayanım hiyerarşisi kullanılarak kesit analizi yapılmıştır. Tüm kolonlar eğilme kapasiteleri açısından kritiktir. Bu sebeple moment-eğrilik analizi yapılmıştır. Moment-eğrilik analizinde Mander sargısız beton modeli [37] ve elastoplastik pekleşmeli çelik modeli kullanılmıştır. Şekildeğiştirme hızının etkisini göz önünde bulundurmak için malzemelerin dayanımları Amerikan ordusunun tasarım kaynakları [12] tarafından önerilen dinamik artış katsayıları (Çizelge 4.1) ile çarpılarak dinamik malzeme dayanımları elde edilmiştir. Statik ve dinamik beton davranışları Mander sargısız beton modelinde maksimum dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeler eşit kabul edilerek çizilmiştir (Şekil 8.9). Çelik malzemenin davranışı ise pekleşmeli elastoplastik malzeme modeli kullanılarak dinamik artış katsayılarının akma ve kopma dayanımına ayrı ayrı etkilmesiyle elde edilmiştir (Şekil 8.9).

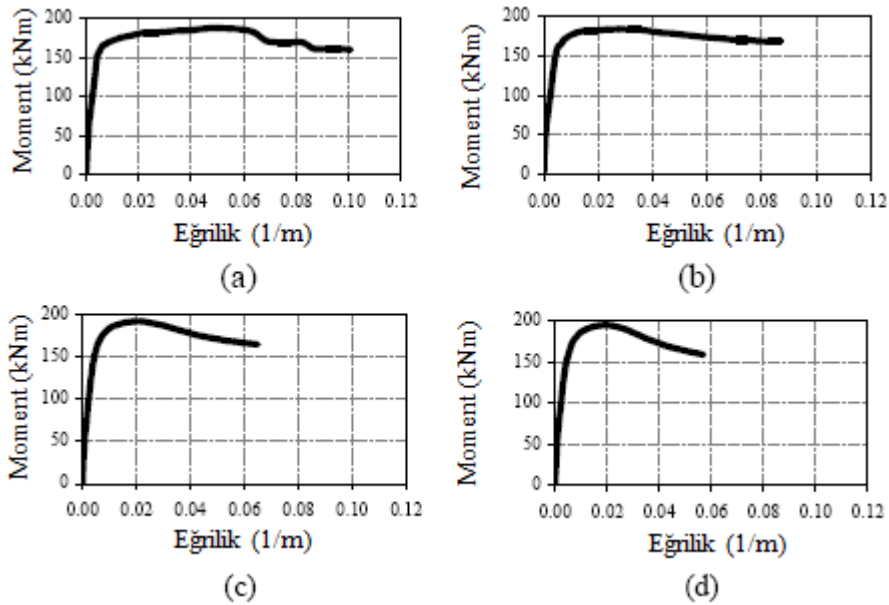


**Şekil 8.9:** Statik ve dinamik gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Patlama yükleri kolonların herbirine farklı açılarda etkidiği için elemanlarında farklı eğilme eksenlerindeki kapasitelerini hesaplamak gerekmektedir. Hesapları basitleştirmek amacıyla dört farklı eğilme eksenı açısı için moment - eğrilik analizi yapılmıştır. Patlamadan gelen yüklerin açısı bu dört eksenenden yakın olanına yuvarlanarak hesaplar yapılmıştır. Şekil 8.10 ve Şekil 8.11 de farklı eğilme eksenleri ve bu eksenlerdeki moment - eğrilik ilişkileri verilmiştir.



**Şekil 8.10:** Farklı tarafsız eksenler (a) 0° (b) 15° (c) 30° (d) 45°



**Şekil 8.11:** Farklı tarafsız eksenler için moment - eğrilik ilişkisi



Moment-eğrilik analizlerine çekirdek betonunun en dış lifindeki basınç şekildeğiştirmesi % 0.7 olana kadar devam edilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi farklı tarafsız eksenlerdeki moment kapasiteleri birbirine yakındır. Buna ters olarak süneklik kapasiteleri birbirinden farklıdır. Bu ilişkileri kullanarak tek serbestlik dereceli sistemin yük–yerdeğiştirme ilişkisini hesaplayabiliriz. Yük–yerdeğiştirme ilişkisi Denklem 8.2 ile Denklem 8.5 arasında verilen bağıntılar ile hesaplanabilir. Bu denklemlerde  $w_e$  elastik yük kapasitesi,  $M_e$  elastik moment kapasitesi,  $k$  rijitlik,  $E$  elastik modül,  $I$  atalet momenti (yaklaşık olarak  $0.5 I_{brüt}$  alınmıştır) ve  $L$  kolonun yüksekliğidir.

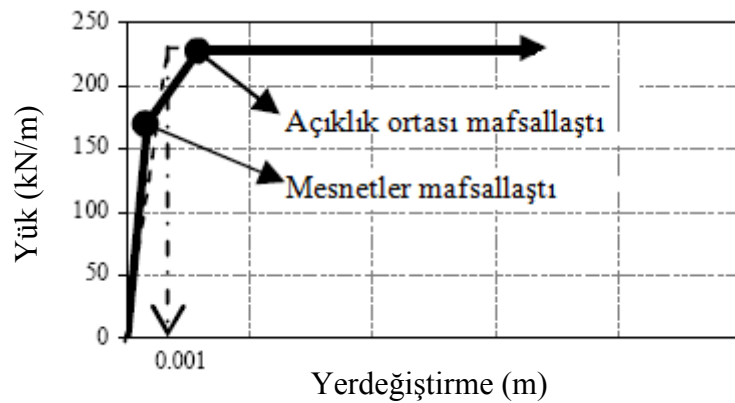
$$w_e = \frac{12M_e}{L^2} \quad (8.2)$$

$$u_e = \frac{w_e}{k} \quad (8.3)$$

$$k = \frac{384EI}{L^3} \quad \text{mesnetler mafsallaşmadan önce} \quad (8.4)$$

$$k = \frac{384EI}{5L^3} \quad \text{mesnetler mafsallaştıktan sonra} \quad (8.5)$$

Şekil 8.11 de verilen moment–eğrilik ilişkilerinden, farklı tarafsız eksen açılarında elastik moment kapasitesinin yaklaşık olduğu görülmektedir. Bu yüzden hesapları basitleştirmek için dört farklı tarafsız eksen için de aynı moment kapasitesi kullanılıp, süneklik kapasitelerindeki farklar korunmuştur. Denklem 8.2 ile Denklem 8.5 arasındaki bağıntılar kullanılarak elde edilen elastoplastik yük–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 8.12 de verilmiştir. Bu ilişki enerji yutma kapasiteleri korunarak iki doğrulu forma getirilmiştir.



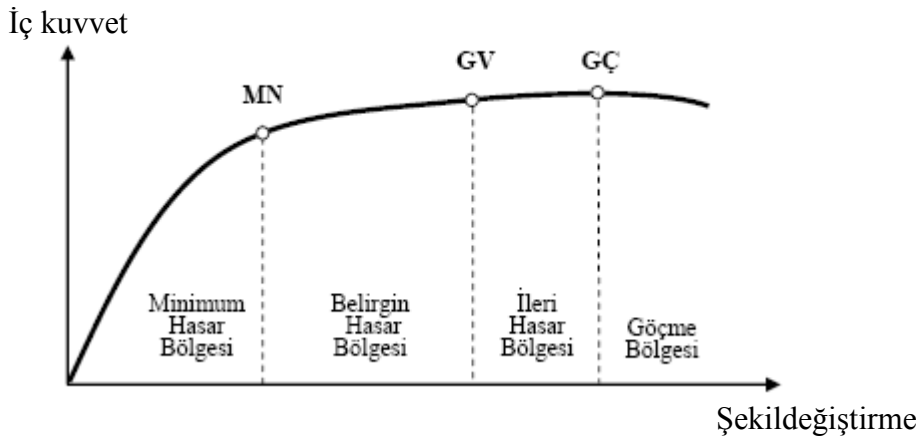
**Şekil 8.12:** Tek serbestlik dereceli sistem için yük–yerdeğiştirme ilişkisi

## 8.4 Performans Seviyeleri

Bu örnekte Türkiye’de uygulanan deprem yönetmeliğinin mevcut betonarme yapılar için önerdiği performans seviyeleri dikkate alınmıştır [34]. Bu performans seviyelerinin detayları Bölüm 6 da verilmiştir. Bu örnekte yer alan betonarme kolon kesitinin farklı tarafsız eksen açıları için süneklik ve öteleme oranı açısından performans seviyeleri Çizelge 8.2 de verilmiştir. Kesit hasar limitleri arasında kalan bölgelerdeki hasar performans seviyeleri Şekil 8.13 de verilmiştir.

**Çizelge 8.2:** Deprem yönetmeliğine göre hesaplanmış kesit hasar sınırları

|                 | Minimum hasar sınırı |         | Güvenlik sınırı    |         | Göçme sınırı       |         |
|-----------------|----------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
|                 | Süneklik ( $\mu$ )   | Öteleme | Süneklik ( $\mu$ ) | Öteleme | Süneklik ( $\mu$ ) | Öteleme |
| 0 ve 90 derece  | 12                   | 0.0068  | 32                 | 0.0180  | 40                 | 0.0228  |
| 15 ve 75 derece | 11                   | 0.0063  | 26                 | 0.0150  | 30                 | 0.0172  |
| 30 ve 60 derece | 8                    | 0.0047  | 19                 | 0.0110  | 23                 | 0.0135  |
| 45 derece       | 8                    | 0.0046  | 17                 | 0.0097  | 20                 | 0.0117  |

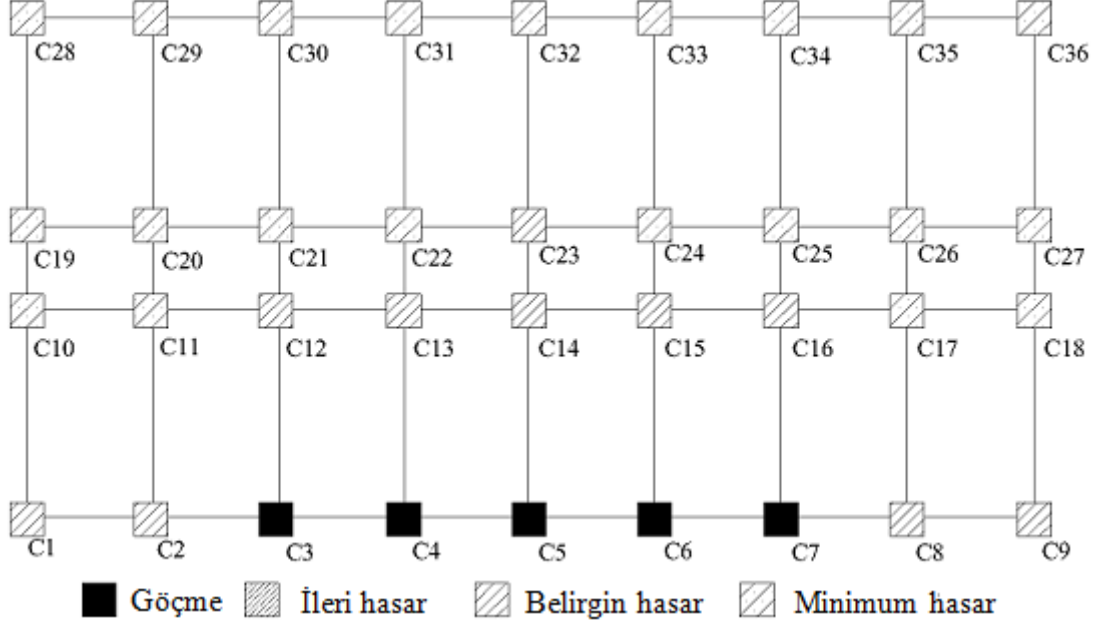


**Şekil 8.13:** Türk deprem yönetmeliğine göre performans seviyeleri [34]

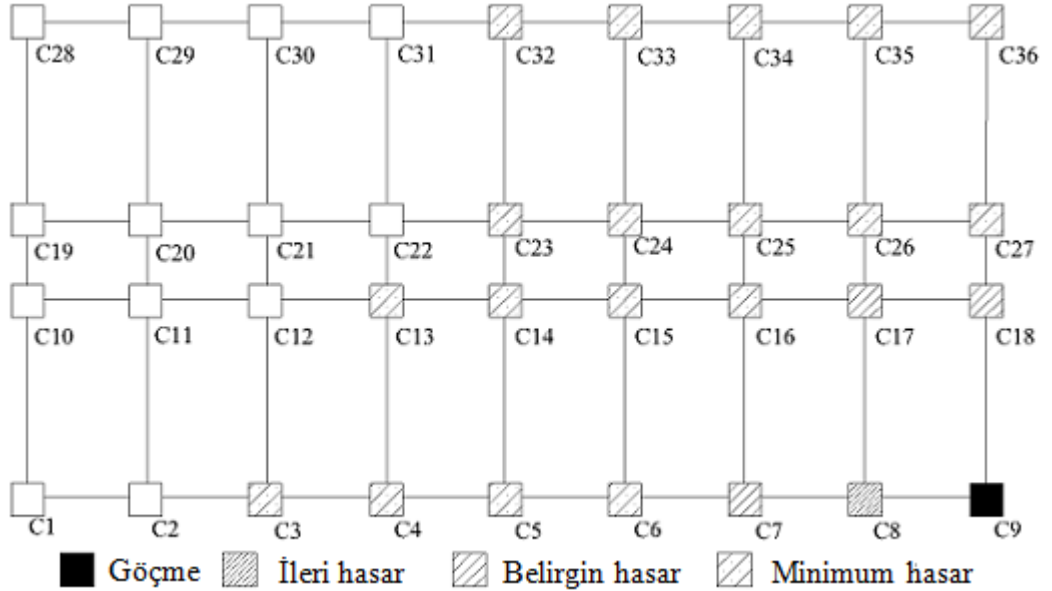
## 8.5 Analiz Sonuçları

Analizde nümerik iterasyon NONLIN bilgisayar programı ile yapılmıştır [38]. NONLIN programı adım adım hareket denklemini iterasyon ile çözmektedir. Nümerik iterasyonun teorik alt yapısı için Clough ve Penzien (1993) tarafından yapılmış olan yararlanılabilir [32]. Tüm alt kat kolonları için analiz tekrarlanmıştır. Elde edilen süneklik istemleri, Türk deprem yönetmeliğine göre hesaplanan performans seviyeleri (Çizelge 8.2) ile karşılaştırılarak elemanların performans seviyeleri belirlenmiştir.

Dış aks kolonları direk olarak patlama yüklerine maruz kalacaktır. İç akslardaki kolonlara gelecek yükler, içerdeki bölücü duvarlar ve diğer engelleyici etmenlere bağlı olduğundan bu kolonların performans seviyeleri için net çıkarımlarda bulunmak oldukça zordur. İç kolonlara gelen patlama yüklerini engelleyecek herhangi bir etmen olmadığını kabul edersek; birinci saldırı senaryosunda tüm alt kat



Şekil 8.14: Birinci saldırı senaryosunda alt kat hasar haritası



Şekil 8.15: İkinci saldırı senaryosunda alt kat hasar haritası

kolonlarında hasar oluşmaktadır. Bu kolonlardan beş tane göçme bölgesinde, dokuz kolon belirgin hasar bölgesinde, diğer kolonlar ise minimum hasarlıdır. İkinci saldırı

senaryosunda bir kolon göçme bölgesinde, bir kolon ileri hasarlı, üç kolon belirgin hasarlı ve onsekiz kolon minimum hasarlıdır. Her iki farklı senaryo içinde alt kat kolonlarının hasar haritası Şekil 8.14 ve Şekil 8.15 de verilmiştir.

## **8.6 Sonuçlar**

Her iki saldırı senaryosunda da, yapıda ciddi hasarlar oluşmaktadır. Birinci saldırı senaryosunda ilk aksta beş adet kolon göçmüştür. Bu aksın çökmesi muhtemeldir. İkinci saldırı senaryosunda da bir kolon göçmüş, bir kolon ağır hasarlıdır. Bu bölgede de kısmi bir göçme yaşanması muhtemeldir.

## 9. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, betonarme yapıların patlama etkileri altındaki performanslarının değerlendirilmesi için hesap adımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. İlk olarak patlamaların çeşitleri ve yapılara etkileri, daha sonra yapıların modellenmesi ve kapasiteleri ve son olarak da yapıların patlama yükleri altındaki çözümleme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bunlara ek olarak, betonarme elemanlar için performans seviyeleri tanımlanarak, muhtemel patlamalar sonunda yapıların göstereceği performanslar belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada ülkemiz şartlarını içeren iki farklı örnek de sunulmuştur. Bu örneklerden birincisi, 2008 yılında yaşanan bir küresel barut üretim tesisi patlamasıdır. Bu patlama sonucunda; tesis binalarının büyük bir kısmı yıkılmış veya ağır hasar görmüştür. Bu tesis yapıları hem hasar değerlendirmesi hem de patlama yükleri çözümlemeleri bakımından detaylı bir şekilde incelenmiştir. İkinci örnekte ise ülkemizde 1970 li yıllarda yapılan yapıların özelliklerini taşıyan tipik bir 4 katlı betonarme bina üzerinde saldırı senaryoları kurgulanmıştır. Yapının bu saldırı senaryoları altında gösterebileceği performanslar değerlendirilmiştir.

Küresel barut üretim tesisinde yaşanan patlama sonrasında, tesis yapılarının hasar detayları ve yapıların, patlama yüklerine dayanıklılığı açısından eksiklikleri yerinde yapılan gözlemlerle araştırılmıştır. Ayrıca, yapıların malzeme karakteristikleri yerinden alınan malzeme numuneleri ile belirlenmiştir. Daha sonra; teorik hesaplarla patlamanın yapı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş, elde edilen sonuçlar yerinden elde edilen gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar şu şekildedir;

- Yapıların tasarımlarında muhtemel patlama etkilerinin göz önünde bulundurulmadığı düşünülmektedir,
- Yapılan analizler göstermektedir ki patlamaların bu tip konumlanmış ve detaylandırılmış korugan perdelerden süneklik ve dayanım talebi anlamlı değerlerin oldukça üstündedir. Bu durum, olası patlama yüklerinin tasarım aşamasında dikkate alınmamasının ve zayıf donatı detaylarının kaçınılmaz bir sonucu olmuştur,
- Patlama sonrasında yerinde yapılan hasar gözlemleri ile tezin içinde detaylarıyla anlatılan teorik hesaplar birbirleriyle uyum içindedir,

- Korugan perdelerde kullanılan donatı detayları patlama yüklerine karşı koyabilmek için yetersizdir. İlgili kaynaklarca (TM5-1300, UFC3- 340-01) önerilen minimum enine donatı detaylarını ve birleşim bölgesi donatı detaylarını sağlamamaktadır.

İkinci örnek olan betonarme yapı tamamen hayal ürünüdür. Ülkemizde 1970 li yıllarda yapılan yapıların karakteristik özelliklerini taşıyan bir 4 katlı betonarme binadır. Bu karakteristik özellikler düşük dayanımlı beton ve yetersiz kesit detaylarıdır. Bu betonarme yapı için karşılaşılmaması muhtemel iki farklı saldırı senaryosu geliştirilmiştir. Senaryolar bir kamyonu yüklü 1000 kg TNT patlayıcının yapının önünde ve köşesindeki noktalarda patlamasıyla oluşturulmuştur. Bu çalışmada yapının bu saldırı senaryoları altında göstereceği performanslar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Patlayıcının yapının önünde patlamasıyla oluşan senaryoda tüm alt kat kolonlarında hasar oluşmaktadır. Bu kolonlardan beş tane göçme bölgesine, dokuz kolon belirgin hasar bölgesine, diğer kolonlar ise minimum hasar bölgesine ulaşmıştır.
- Patlayıcının yapının köşesinde patlamasıyla oluşan saldırı senaryosunda ise bir kolon göçme bölgesine, bir kolon ileri derecede hasar bölgesine, üç kolon belirgin hasar bölgesine ve onsekiz kolon minimum hasar bölgesine ulaşmıştır.

Her iki saldırı senaryosunda da yapıda ciddi hasarlar oluşmaktadır. Patlayıcının yapının önünde patlamasıyla oluşan saldırı senaryosunda ilk aksta beş adet kolon göçmüştür. Bu aksın çökmesi muhtemeldir. Patlamanın yapının köşesinde olması durumunda ise bir kolon göçmüş, bir kolon ağır hasarlıdır. Bu bölgede de kısmi bir göçme yaşanması muhtemeldir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Kim Campbell**, 2001. "When is 'terrorist' a subjective term?". *Christian Science Monitor*. <http://www.csmonitor.com/2001/0927/p16s2-wogi.html>. Retrieved 2010-01-11.
- [2] **Krauthammer, T.**, 2008. "Modern protective structures.", *CRC Press*, New York, USA.
- [3] **www.thewebfairy.com**, Internet haber sitesinden indirilen fotoğraftır.
- [4] **www.cnnturk.com**, Internet haber sitesinden indirilen fotoğraftır.
- [5] **Omer Salem, A. Y.**, 2007. "Vulnerability of buildings to blast loads and progressive collapse", Master Tezi, *University of Ottawa*, Canada.
- [6] **Newmark, N. M.**, 1953. "An engineering approach to blast resistant design." *ASCE Transactions*, New York, USA.
- [7] **Biggs, J. M.**, 1964) "Introduction to structural dynamics.", *McGraw-Hill Book Company*, New York, USA.
- [8] **Krauthammer, T., Bazeos, N., ve Holmquist, T. J.**, 1986. "Modified SDOF analysis of RC box-type structures.", *ASCE Structural Journal*, 112, 726-744.
- [9] **Department of Army.**, 1986. "Fundamentals of protective design for conventional weapons effects.", Technical Manual TM5-855-1, Washington, USA.
- [10] **Krauthammer, T., Shahriar S., ve Shanaa H. M.**, 1990. "Response of reinforced concrete elements to severe impulsive loads.", *ASCE Structural Journal*, 116, 1061-1079.
- [11] **Department of Army, Navy ve Air Force.**, 1990. "Structures to resist the effects of accidental explosion." Technical Manual TM5 – 1300 (NAVFAC P-397, AFR 88-22), Washington, USA.
- [12] **Department of Defense.**, 2008. "Structures to resist the effects of accidental explosions." UFC 3-340-02, Washington, USA.
- [13] **Comité Euro-International du Béton (CEB).**, 1993. "CEB-FIP model code 1990.", *Redwood Books*, Wiltshire, UK.
- [14] **Crawford, J. E., Malvar, L. J., Wesevich, J. W., Valancius, J., ve Reynolds, A. D.**, 1997. "Retrofit of reinforced concrete structures to resist blast effects", *ACI Structural Journal*, 94, 371-377.
- [15] **ASCE**, 1997. "Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities.", New York, USA.
- [16] **Mlakar, P. F., Corley, W. G., Sozen, M. A., ve Thornton, C. H.**, 1998. "The Oklahoma city bombing: Analysis of blast damage to the Murrah building", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 12, 113-119.
- [17] **Malvar, L. J.**, 1998. "Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars.", *ACI Materials Journal*, 95, 609-616.
- [18] **Krauthammer, T.**, 1999. "Blast-resistant structural concrete and steel connections.", *International Journal of Impact Engineering*, 22, 887-910.

- [19] **Department of Defense.**, 1999. "DOD Ammunition and explosive safety standards." DOD 6055.9-STD, Washington, USA.
- [20] **Remennikov, A. M.**, 2003. "A review of methods for predicting bomb blast effects on building.", *Journal of Battlefield Technology*, 6, 5-10.
- [21] **Le Blanc, G., Adoum, M., ve Lapoujade, V.**, 2006. "External blast load structures – Empirical approach", *5th European LS-DYNA Users Conference*.
- [22] **Pandey, A. K., Kumar, R., Paul, D. K., ve Trikha, D. N.**, 2006. "Non-linear response of reinforced concrete containment structure under blast loading.", *Nuclear Engineering and Design*, 236, 993-1002.
- [23] **US Army Corps of Engineers.**, 2008. "Methodology manual for the single degree of freedom blast effects design spreadsheets." PDC TR-06-01 Rev1, Washington, USA.
- [24] **Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., ve Ramsay, J.**, 2007. "Blast loading and blast effects on structures – an overview", *EJSE Special Issue*.
- [25] **Jones, J., Wu, C., Oehlers, D. J., Whittaker, A. S., Sun, W., Marks, S., ve Coppala, R.**, 2009, "Finite difference analysis of simply supported RC slabs for blast loadings.", *Engineering Structures*, 31, 2825-2832.
- [26] **Cömert, M., ve İlki, A.**, 2009. "The Explosion Performance of a Ball Powder Production Facility," *ASCE J. Perf. Const. Facilities*, Online published: 29 December 2009, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000108.
- [27] **Cömert, M., ve İlki, A.**, 2009. "Blast Resistance Assessment of a Typical Public Building in Turkey", *UACEG2009: International Conference on Civil Engineering*, Sofia, Bulgaria.
- [28] **Koçmaz, Z.**, 2004. "Patlama yüklerine dayanıklı yapı tasarımı", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye*.
- [29] **FEMA.**, 2003. "Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings.", USA.
- [30] **Türk Standardları Enstitüsü**, 2000. "Betonarme yapıların hesap ve yapım kuralları.", TS500, Ankara.
- [31] **Celep, Z.**, 2009. "Betonarme Yapılar (Beşinci Baskı)." *Beta Dağıtım*, İstanbul.
- [32] **Clough, R. W., ve Penzien, J.**, 1993. "Dynamics of Structures 3<sup>rd</sup> edition.", *Computers & Structures, Inc.*, Berkeley, USA.
- [33] **Newmark, N.M.**, 1962. "A Method of Computation for Structural Dynamics", *ASCE Transactions*, 127, 1406.
- [34] **Bayındırlık ve İskan Bakanlığı**, 2007. "Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik", Ankara.
- [35] **American Concrete Institute (ACI).**, 2008. "Building Code Requirements for Structural Concrete.", *ACI 318-08, ACI Committee 318 and Commentary*, Detroit, USA.
- [36] **Yinon, Z., ve Zitrin, S.**, 1996. "Modern methods and applications in analysis of explosives.", *John Wiley & Sons*, New York, USA.
- [37] **Mander, J. B., Priestley, M.J. N., ve Park, R.** 1988. "Theoretical stress-strain model for confined concrete.", *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114(8), 1804-1826.
- [38] **NONLIN, Ver. 6.01.** 1996. Federal Emergency Management Agency Training Center, Maryland, and Advanced Structural Concepts, Inc., Golden, Colorado, USA.

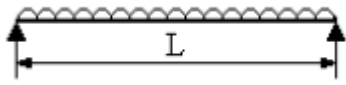
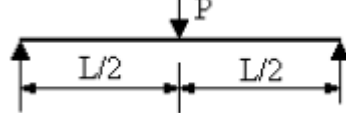
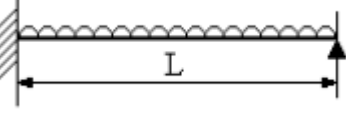
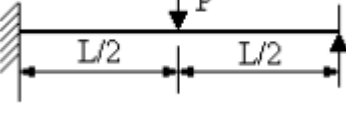
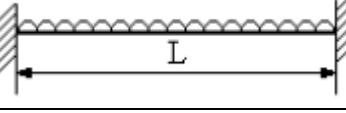
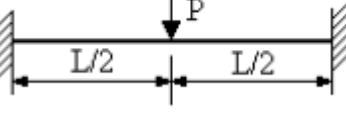
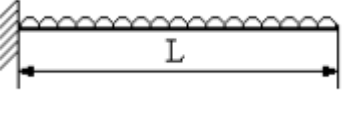
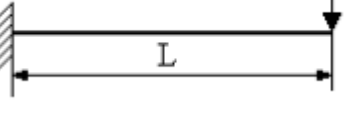
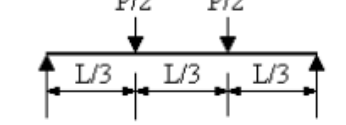


- [39] **NONLIN, Ver. 6. 01. Users Manuals I&II.** 1996. Federal Emergency Management Agency Training Center, Maryland, and Advanced Structural Concepts, Inc., Golden, Colorado, USA.
- [40] **Ersoy, U., ve Özcebe, G.,** 2004. “Betonarme.” *Evrin Yayınları*, İstanbul.

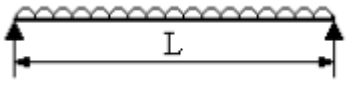
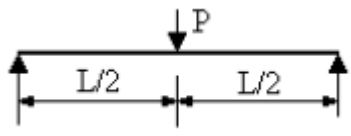
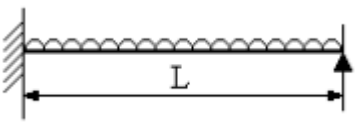
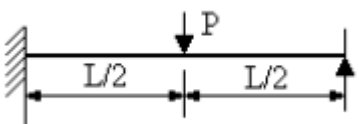
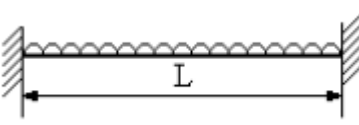
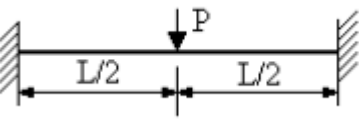
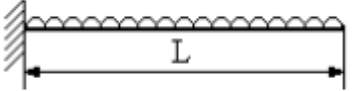
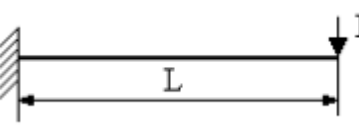
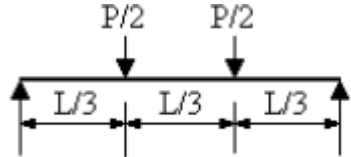


## EK A

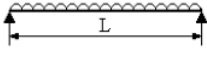
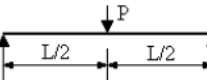
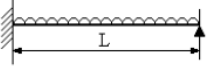
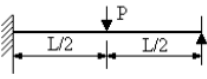
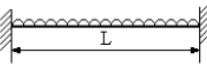
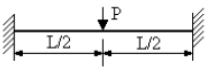
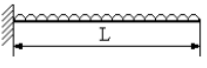
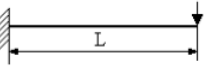
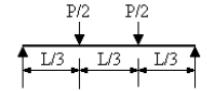
**Çizelge A.1:** Tek serbestlik dereceli sistem dönüşüm katsayıları [7]

| Mesnet şartları ve yükler                                                           | Davranış bölgesi    | Yük dönüşüm faktörü ( $k_l$ ) | Kütle dönüşüm faktörü ( $k_m$ ) | Yük - kütle faktörleri oranı ( $k_l/k_m$ ) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
|    | Elastik bölge       | 0.64                          | 0.50                            | 0.78                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 0.50                          | 0.33                            | 0.66                                       |
|    | Elastik bölge       | 1.00                          | 0.49                            | 0.49                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 1.00                          | 0.33                            | 0.33                                       |
|  | Elastik bölge       | 0.58                          | 0.45                            | 0.78                                       |
|                                                                                     | Elastoplastik bölge | 0.64                          | 0.50                            | 0.78                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 0.50                          | 0.33                            | 0.66                                       |
|  | Elastik bölge       | 1.00                          | 0.43                            | 0.43                                       |
|                                                                                     | Elastoplastik bölge | 1.00                          | 0.49                            | 0.49                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 1.00                          | 0.33                            | 0.33                                       |
|  | Elastik bölge       | 0.53                          | 0.41                            | 0.77                                       |
|                                                                                     | Elastoplastik bölge | 0.64                          | 0.50                            | 0.78                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 0.50                          | 0.33                            | 0.66                                       |
|  | Elastik bölge       | 1.00                          | 0.37                            | 0.37                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 1.00                          | 0.33                            | 0.33                                       |
|  | Elastik bölge       | 0.40                          | 0.26                            | 0.65                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 0.50                          | 0.33                            | 0.66                                       |
|  | Elastik bölge       | 1.00                          | 0.24                            | 0.24                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 1.00                          | 0.33                            | 0.33                                       |
|  | Elastik bölge       | 0.87                          | 0.52                            | 0.60                                       |
|                                                                                     | Plastik bölge       | 1.00                          | 0.56                            | 0.56                                       |

**Çizelge A.2:** Mesnet şartlarına ve yüklemeye bağlı eğilme rijitlikleri [7]

| Mesnet şartları ve yükler                                                           | Elastik rijitlik, $K$ | Elastoplastik rijitlik |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
|    | $\frac{384EI}{5L^4}$  |                        |
|    | $\frac{48EI}{L^3}$    |                        |
|    | $\frac{185EI}{L^4}$   | $\frac{384EI}{5L^4}$   |
|   | $\frac{107EI}{L^3}$   | $\frac{48EI}{L^3}$     |
|  | $\frac{384EI}{L^4}$   | $\frac{384EI}{5L^4}$   |
|  | $\frac{192EI}{L^3}$   | $\frac{48EI}{L^3}$     |
|  | $\frac{8EI}{L^4}$     |                        |
|  | $\frac{3EI}{L^3}$     |                        |
|  | $\frac{56.4EI}{L^3}$  |                        |

**Çizelge A.3:** Mesnet şartlarına ve yüklemeye dinamik mesnet tepkileri [7]

| Mesnet şartları ve yükler                                                           | Elastik tepki                                                              | Elastoplastik tepki   | Plastik tepki         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|    | $0.39w(t) + 0.11Q(t)$                                                      |                       | $0.38w(t) + 0.12Q(t)$ |
|    | $0.78w(t) - 0.28Q(t)$                                                      |                       | $0.75w(t) + 0.25Q(t)$ |
|    | Sol mesnet<br>$0.43w(t) + 0.19Q(t)$<br>Sağ mesnet<br>$0.39w(t) + 0.11Q(t)$ | $0.39w(t) + 0.11Q(t)$ | $0.38w(t) + 0.12Q(t)$ |
|   | Sol mesnet<br>$0.54w(t) + 0.14Q(t)$<br>Sağ mesnet<br>$0.25w(t) + 0.07Q(t)$ | $0.78w(t) - 0.28Q(t)$ | $0.75w(t) - 0.25Q(t)$ |
|  | $0.36w(t) + 0.14Q(t)$                                                      | $0.39w(t) + 0.11Q(t)$ | $0.38w(t) + 0.12Q(t)$ |
|  | $0.71w(t) - 0.21Q(t)$                                                      |                       | $0.75w(t) - 0.25Q(t)$ |
|  |                                                                            |                       |                       |
|  |                                                                            |                       |                       |
|  | $0.53w(t) - 0.03Q(t)$                                                      |                       | $0.52w(t) - 0.02Q(t)$ |



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Mustafa Cömert

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Gaziosmanpaşa / 01. 01. 1985

**Adres:** Zuhuratbaba mah. Yeniyol sok. No: 2/3 Bakırköy İSTANBUL

**Lisans Üniversitesi:** Kocaeli Üniversitesi

### Yayın Listesi:

**Comert, M.**, ve A. Ilki, "The Explosion Performance of a Ball Powder Production Facility," *ASCE J. Perf. Const. Facilities*, Online yayınlandı: 29 Aralık 2009, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000108. Temmuz-Ağustos ayında yayınlanacaktır.

**Comert, M.**, Goksu, C., Ilki, A., "External Confinement of Concrete with Post-tensioned GFRP Sheets" *FRPRCS-9*, Sidney, Avustralya, 2009.

**Comert, M.**, ve Ilki, A. "Blast Resistance Assessment of a Typical Public Building in Turkey", *UACEG2009: International Conference on Civil Engineering*, Sofya, Bulgaristan, 2009.

**Comert, M.**, Goksu, C., and Ilki, A. "Towards a Tailored Stress-Strain Behavior for FRP Confined Low Strength Concrete" *Third International fib Congress*, Washington DC, USA, 2010.

Turk, A. M., **Comert, M.**, and Cosgun, C. "Increasing Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings by the use of FRP and Steel Fuse Elements" *Third International fib Congress*, Washington DC, USA, 2010.

**Comert M.**, Goksu C., Cosgun C., Ozubek M., Ilki A. "Increasing Deformability of FRP Confined Low and Medium Strength Concrete through a Cement Based Mortar Layer" *9<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering*, Trabzon, 2010.