T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PATLAMALARIN MÜHENDİSLİK YAPILARININ DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

Ahmet Tuğrul TOY

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Barış SEVİM

Ocak, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PATLAMALARIN MÜHENDİSLİK YAPILARININ DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

Ahmet Tuğrul TOY tarafından hazırlanan tez çalışması 10.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Barış SEVİM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Barış SEVİM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Pof. Dr. Kadir GÜLER, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yusuf AYVAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ali SARI, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Barış SEVİM sorumluluğunda, tarafımca hazırlanan "Patlamaların Mühendislik Yapılarının Davranışlarına Etkisi" başlıklı çalışmada, veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet Tuğrul TOY

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün 2015-05-01-DOP02 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Eşime

ve

Kızıma

TEŞEKKÜR

Öncelikle, uzun doktora sürecimin tamamında birçok kişiye desteklerinden ötürü teşekkürü borç bilirim. Doktora tez çalışmam, sizlerin desteği olmadan, tamamlanması mümkün değildi.

Doktora tez çalışma sürecimde; tecrübesi, bilgisi, desteği ve yapmış olduğu yapıcı eleştiriler ile desteğini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Barış SEVİM'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez süresince, gerek çalışmaların yürütülmesi gerek tez ilerleme raporlarının hazırlanmasında destek ve önerilerini daima ileten tez izleme komitesinde yer alan hocalarım Prof. Dr. Kadir GÜLER'e ve Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU'na ve ayrıca tez konusundaki deneyimi ve bilgisiyle desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Ali SARI'ya teşekkürü borç bilirim.

Bu süreçte, beni sürekli teşvik eden ve destekleyen tüm arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Yaşadığım süre boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda bana daima destek olan ve bu günlere gelmemi sağlayan çok sevgili anneme, çok sevgili babama, çok sevgili ablama ve çok sevgili kardeşime teşekkür ederim.

Son olarak, sevgili eşim Özge TOY'a, bu zorlu yolda göstermiş olduğu arkadaşlık, sevgi, cesaret, sabır, duygusal destek ve büyük bir anlayış için teşekkür ediyorum. Ayrıca, doktora tezim esnasında dünyaya gelen canım kızım Zeynep Su TOY'a kattıkları ekstra sorumluluk sebebiyle onları tüm sevgimle kucaklıyorum.

Onlardan aldığım destekle tezimi tamamlıyorum.

İyi ki varsınız. Hepinize teşekkürler.

Ahmet Tuğrul TOY

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ **xi**

ŞEKİL LİSTESİ **xii**

TABLO LİSTESİ **xviii**

ÖZET **xix**

ABSTRACT **xxi**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 3

1.3 Orijinal Katkı 5

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **7**

2.1 Giriş 7

2.2 Yönetmelikler ve Standartlar 7

2.3 Teorik Çalışmalar 10

2.3.1 Ampirik Formülasyonlar 10

2.3.2 Teorik ve Nümerik Çalışmalar 13

2.3.3 Deneysel ve Arazi Uygulama Çalışmaları 17

3 PATLAMA DAVRANIŞI **20**

3.1 Giriş 20

3.2 Teori 22

3.2.1 Patlama 22

3.2.2 Patlama Tipleri ve Sınıflandırması 23

3.2.3 Patlama Davranışı 25

3.2.4 Risk Sınıfları 27

3.3 Ampirik Bağıntılar 29

3.3.1 Üçüncü Kök Ölçekleme Yasası 29

3.3.2 Patlayıcı Kütlesi ve Isı Enerjisi 29

3.3.3 Brode Modeli 31

3.3.4 Newmark ve Hansen Modeli 31

3.3.5 Mills Modeli 31

3.3.6 Mays ve Smith Modeli 32

3.3.7 Biggs Modeli 33

3.3.8 Henrych Modeli 33
3.3.9 Kingery ve Bulmash Modeli 34
3.3.10 Kinney ve Graham Modeli 34
3.3.11 Sadovsky Modeli 34
3.4 UFC 3-340-02 Standartları 35
3.4.1 Yapı Yüzeyine Etkiyen Patlama Yükü 36
3.4.2 Üçgen Form 37
3.5 Sayısal Patlama Davranış Modeli 42
3.5.1 Açık ve Dolaylı Yöntemler (Explicit ve Implicit Dynamics) 44
3.6 Yapı Reaksiyonu 47
3.7 Bilgisayar Yazılımı Nümerik Modeli 50
3.8 Çözüm Ağı (Mesh) Yöntemi 53
3.8.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Ağ Üretimi 53
3.8.2 Modele Ağ Örme 54
3.9 Lagrangian ve Eulerian Denklemleri 54
3.9.1 Lagrangian Analizi 55
3.9.2 Eulerian Analizi 57
3.9.3 Keyfi Lagrangian – Eulerian Analizi (ALE) 59
3.9.4 Bağlaşık Lagrangian – Eulerian Analizi 60
4 YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER 72
4.1 Betonarme Kolon Modeli 73
4.1.1 Betonarme Kolon ve Sonlu Eleman Modeli 74
4.1.2 Okuma Noktaları 77
4.1.3 Patlama Modelleri 78
4.1.4 Bulgular ve İrdelemeler 79
4.1.5 Sonuçlar ve Değerlendirme 88
4.2 Betonarme İstinat Duvarı 90
4.2.1 Betonarme İstinat Duvarı ve Sonlu Eleman Modeli 90
4.2.2 Okuma Noktaları 93
4.2.3 Patlama Modelleri 93
4.2.4 Bulgular ve İrdelemeler 94
4.2.5 Ampirik Formüller ve UFC 3-340-02 Değerlendirmesi 98
4.2.6 Sonuçlar ve Değerlendirme 103
4.3 İki Katlı Betonarme Bina Modeli 105

4.3.1 İki Katlı Betonarme Bina ve Sonlu Eleman Modeli 105
4.3.2 Okuma Noktaları 109
4.3.3 Patlama Modelleri 111
4.3.4 Bulgular ve İrdelemeler 111
4.3.5 Sonuçlar ve Değerlendirme 119
4.4 Betonarme Köprü Modeli 121
4.4.1 Betonarme Köprü ve Sonlu Eleman Modeli 121
4.4.2 Okuma Noktaları 124
4.4.3 Patlama Modeli 124
4.4.4 Bulgular ve İrdelemeler 125
4.4.5 Sonuçlar ve Değerlendirme 131
4.5 Beton Ağırlık Baraj Modeli 132
4.5.1 Beton Ağırlık Barajı ve Sonlu Eleman Modeli 133
4.5.2 Okuma Noktaları 135
4.5.3 Patlama Modeli 136
4.5.4 Bulgular ve İrdelemeler 136
4.5.5 Sonuçlar ve Değerlendirme 146
4.6 Beş Katlı Betonarme Bina Modeli 147
4.6.1 Beş Katlı Betonarme Bina ve Sonlu Eleman Modeli 147
4.6.2 Okuma Noktaları 152
4.6.3 Patlama Modelleri 152
4.6.4 Bulgular ve İrdelemeler 153
4.6.5 Sonuçlar ve Değerlendirme 159
4.7 Üç Farklı Betonarme Duvar Modeli 162
4.7.1 Sonlu Eleman Modeli 162
4.7.2 Okuma Noktaları 165
4.7.3 Patlama Modelleri 166
4.7.4 Bulgular 167
4.7.5 İrdelemeler 203
4.7.6 Sonuçlar ve Değerlendirme 209
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **211**
KAYNAKÇA **217**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **226**

SİMGE LİSTESİ

P	Basınç (MPa)
br^2	Birim kare
q_s	Dinamik basınç değeri (MPa)
C_D	Direnç katsayısı
Ø	Donatı çapı (mm)
E	Elastisite Modülü
C_E-	Eşdeğer negatif yük faktörü
C_E	Eşdeğer pozitif yük faktörü
t_{rf}	Fiktif zaman (ms)
g	Gram
i_s	İmpuls (ms)
I	İtme (momentum)
kN	Kilonewton
KPa	Kilopascal (kN/m^2)
H^d_{exp}	Kullanılan patlayıcının birim kg'da ki ısı enerjisini
MPa	Megapascal (N/mm^2)
m	Metre
m^2	Metrekare
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
m.sec	Milisaniye
uJ	Mikro joule
t_{rf}-	Negatif faz (ms)
t_o-	Negatif faz süreci (ms)
i_s-	Negatif fazın impuls değeri
P_{so}-	Negatif pik basıncı ifade eder (MPa)
P_o	Ortam basıncı (MPa)
Z	Ölçeklendirilmiş uzaklık ($m/kg^{1/3}$)
Pa	Pascal (N/m^2)
L_w	Patlama dalga boyu (m)
R	Patlayıcının yapıya olan uzaklığı (m)
t_A	Patlamanın oluşma anı (ms)

P_{so}	Pik basınç (MPa)
F_m	Pik kuvvet
U_s	Patlama anında ilk çıkan dalganın hızı
W	Patlayıcı kütlesi (kg)
i_s	Pozitif fazın impuls değeri
t_d	Pozitif faz süresi (ms)
t_o	Pozitif faz süreci (ms)
cm^2	Santimetrekare
cm^3	Santimetreküp
C_r	Ses hızı
α_0	Ses hızı, (m/s)
R	S/G oranı; G, ise yapı yüzeyinin en uzun kenarı (H veya W/2)
t_c	Şeffaflaştırma süresi (ms)
U	Şok dalgası hızı (m/ms)
W_e	TNT eşdeğer kütlesini (kg)
H^d_{TNT}	TNT'nin birim kg'da ki ısı enerjisini (MJ/kg)
Pr	Yansıyan basınç (MPa)
i_r	Yansıyan impuls, ms
S	Yapı yüzeyinin en kısa uzunluğu (H veya W/2)
T	Yapı titreşiminin doğal periyodu
ω	Yapı titreşiminin doğal açısal frekansı

KISALTMA LİSTESİ

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ANFO	Ammoniumnitrate-fueloil
ASCE	American Society of Civil Engineers
ANSYS	Analysis System
AUTODYN	Autodyn System
FEMA	Federal Emergency Management Agency (ABD, Acil Durum Yönetim Kurumu)
ILO	International Labour Organization
W	Patlayıcı kütlesi
R	Patlayıcı ile yapı arasındaki uzaklık
ESLTR	Protective Construction Design Manual
SDOF	Tek Serbestlik Dereceli Sistem
DAHS CWE	The Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects
NCHRP	The National Cooperative Highway Research Program
TNT	Trinitrotoluen
TS	Türk Standartları
UFC	Unified Facilities Criteria

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 The Alfred P. Murrah Federal Binası, Oklahoma City, A.B.D. (terör saldırısı) [111] 20

Şekil 3.2 HSBC Binası, İstanbul, Türkiye (terör saldırısı) [111] 21

Şekil 3.3 11 Eylül 2001 tarihinde Dünya Ticaret Merkezi'ne yapılan terör saldırısı [111] 21

Şekil 3.4 Doğalgaz, kazan dairesi vb patlamalara ilişkin örnekler [112] 22

Şekil 3.5 Emniyet mesafesi [8] 23

Şekil 3.6 Harici patlamalar [16] 24

Şekil 3.7 Dâhili patlama sınıflandırması [16] 24

Şekil 3.8 Patlama yüküne bağlı, basinç – uzaklik grafiği [1],[2],[10] 25

Şekil 3.9 Patlama yükü altında basınç – zaman grafiği [1],[2] 26

Şekil 3.10 Güvenli olan ve güvenli olmayan yapı tasarımları [113] 28

Şekil 3.11 TNT patlayıcısının serbest patlama durumunda, pozitif faz etkisi altındaki parametreler [1] 36

Şekil 3.12 İdealleştirilmiş patlama – zaman grafiği [1],[2] 37

Şekil 3.13 İdeal üçgen form ile hazırlanan basınç–zaman grafiği [1],[2] 37

Şekil 3.14 Yansıyan pik basınç- ses hızı grafiği [1] 39

Şekil 3.15 Pik dinamik basınç – pik gelen basınç grafiği [1],[53] 39

Şekil 3.16 TNT'nin infilak etmesiyle oluşan şok dalgasının negatif fazında oluşan parametreler [1],[53] 40

Şekil 3.17 C_E, C_E-, t_d ve t_{of} parametrelerini gösteren grafikler [1],[53] 41

Şekil 3.18 Açıya bağlı ölçeklendirilmiş yansıma basıncı hesabı [1],[53] 42

Şekil 3.19 Açıya bağlı ölçeklendirilmiş yansıma impuls hesabı [1],[53] 42

Şekil 3.20 ANSYS yazılımı, problem çözme seviyelerini [116],[117] 43

Şekil 3.21 Açık ve dolaylı yöntem çizelgesi [116] 44

Şekil 3.22 Karakteristik eleman ağ durum tanımı [116],[118] 46

Şekil 3.23 İdealize edilmiş yapı [41] 48

Şekil 3.24 İdealize edilmiş patlama dalgası [41] 48

Şekil 3.25 Pik basınç zaman grafiği (şeffaflaştırma süresi ile birlikte) [2] 51

Şekil 3.26 Şeffaflaştırma süresinin patlama analizine dâhil edilmesi ve edilmemesi durumunda bir kabuk elemanın yüzeyinde kaydedilen basınç değerleri [114],[115] 52
Şekil 3.27 Lagrangian analizinde ağ yapısının deformasyonu [123] 55
Şekil 3.28 Lagrangian analizinin şematik çevrim gösterimi [123] 56
Şekil 3.29 Atılan bir cisim sonrası ağ sisteminde oluşan deformasyon [123].57
Şekil 3.30 Eulerian analizinde sabit ağ boyunca oluşan malzeme akışı[123] 58
Şekil 3.31 ALE metodu ile ideal olarak yapılan ağların modellenmesi [123].60
Şekil 3.32 Bağlaşık eulerian – lagrangian metodu [32] 63
Şekil 3.33 Bağlaşık eulerian – lagrangian alanı için Olovsson tarafından geliştirilen ceza metodu (penalty method) [36] 64
Şekil 3.34 Zapotec metodu (bağlaşık eulerian – lagrangian) [38] 68
Şekil 3.35 SHISM metodu [39] 71
Şekil 4.1 Deneysel çalışma sahası ve patlamanın gerçekleşeme anı [93] 73
Şekil 4.2 Yüksek ve sınırlı sünekliğe sahip kolonların donatı detayları[93] .74
Şekil 4.3 Betonarme kolonların sonlu eleman modeli 76
Şekil 4.4 Sonlu eleman modeli ve ölçü noktalarının konumları.....77
Şekil 4.5 Model no.1 ve patlama etkisi.....78
Şekil 4.6 Kolonun ön-alt bölgesine etkiyen patlama basıncı 79
Şekil 4.7 Kolonun ön-üst bölgesine etkiyen patlama basıncı.....80
Şekil 4.8 Kolonun arka-alt bölgesine etkiyen patlama basıncı 81
Şekil 4.9 Kolonun arka-üst bölgesine etkiyen patlama basıncı.....81
Şekil 4.10 Kolonların ön yüzünde (model no 2) oluşan patlama basınçları...82
Şekil 4.11 Kolonların ön yüzünde (model no 3) oluşan patlama basınçları...83
Şekil 4.12 Kolonlarda oluşan hasar durumları.....84
Şekil 4.13 Kolonlarda oluşan yerdeğiştirmeler 85
Şekil 4.14 Kolonlarda oluşan gerilme (von mises) diyagramları.....86
Şekil 4.15 Kolonlarda oluşan gerilme değerleri.....87
Şekil 4.16 Otoyol boyunca sık rastlanan betonarme duvar örneği [126] 90
Şekil 4.17 Betonarme istinat duvarının geometrik özellikleri (cm).....91
Şekil 4.18 Seçilen istinat duvarının üç boyutlu sonlu eleman modeli 92
Şekil 4.19 Üç boyutlu sonlu eleman modelinin tasarımı.....92
Şekil 4.20 Okuma noktaları, geometri ve konumlandırma ölçüleri.....93

Şekil 4.21 SEM ve patlayıcının yandan görünüşü; model-1 ve model-2.....94
Şekil 4.22 Patlama sonrası basınç diyagramları; model-1, model-2.....95
Şekil 4.23 Patlama sonrası yapı ve malzeme durumları; model-1, model-2...95
Şekil 4.24 Patlama sonrası yerdeğiştirme diyagramları; model-1, model-2 ...96
Şekil 4.25 Toplam (salınan ve soğurulan) enerji; model-1, model-2 97
Şekil 4.26 Betonarme duvar üzerinde oluşan gelen gerilme diyagramları.....97
Şekil 4.27 Okuma noktaları üzerinde meydana gelen gerilme değerleri.....98
Şekil 4.28 "Z" parametresine karşılık gelen basınç değerleri grafiği 100
Şekil 4.29 "Z" İdeal eşdeğer üçgen form grafiği 103
Şekil 4.30 Terör saldırısına maruz kalmış bir yapı [128].....105
Şekil 4.31 İki katlı binanı boyutları (12m × 8m × 8m) 106
Şekil 4.32 Kolon ve kiriş en kesit boyutları ve düzeni (cm) 107
Şekil 4.33 İki katlı betonarme yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli.....108
Şekil 4.34 Sonlu eleman modeline (katı model) ilişkin mesh geometrisi.....108
Şekil 4.35 Akışkan-Hava modeline ilişkin mesh geometrisi 109
Şekil 4.36 Yapı üzerine yerleştirilen okuma noktaları 110
Şekil 4.37 Taşıyıcı elemanlar ve numaralandırması.....110
Şekil 4.38 Patlayıcı malzemenin (TNT) yapı içindeki konumu 111
Şekil 4.39 Basınç gerilmesi diyagramları.....112
Şekil 4.40 #1 ve #8 numaralı ölçü noktalarındaki basınç-zaman grafiği.....112
Şekil 4.41 Yapısal davranış diyagramları.....114
Şekil 4.42 Patlama sonrası yapı durumları 114
Şekil 4.43 Yerdeğiştirme diyagramları 115
Şekil 4.44 #1 ve #9 nolu okuma noktaları, yerdeğiştirme-zaman grafiği....116
Şekil 4.45 Toplam enerji-zaman grafiği.....117
Şekil 4.46 Taşıyıcı sistem üzerinde meydana gelen gerilme diyagramları....118
Şekil 4.47 Betonarme karayolu köprüsü.....121
Şekil 4.48 Betonarme karayolu köprüsünün geometrik ölçüleri 122
Şekil 4.49 Kolon ve kiriş en kesit detayları (m) 122
Şekil 4.50 Karayolu köprüsü modeline yerleştirilen okuma noktaları.....123
Şekil 4.51 Karayolu köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli 124
Şekil 4.52 Patlama sonrası yapıda oluşan basınç diyagramı 125

Şekil 4.53 Okuma noktaları üzerinde oluşan basınç – zaman grafiği.....126
Şekil 4.54 Patlama sonrası oluşan yapısal davranış diyagramı 127
Şekil 4.55 Okuma noktaları üzerinde oluşan hasar durumu-zaman grafiği .128
Şekil 4.56 Okuma noktaları üzerinde oluşan yerdeğiştirme-zaman grafiği..129
Şekil 4.57 Toplam enerji – zaman grafiği 130
Şekil 4.58 Beton ağırlık barajı [131] 132
Şekil 4.59 Baraja ait gövde kesiti ve patlayıcı konumu [132],[133] 134
Şekil 4.60 Barajın sonlu eleman modeli 135
Şekil 4.61 Okuma noktalarının sonlu eleman üzerinde gösterimi.....136
Şekil 4.62 Patlama analizi sonrası oluşan basınç diyagramı 137
Şekil 4.63 Gövde yüksekliği boyunca etki eden basınç grafiği 137
Şekil 4.64 Kret genişliği boyunca etki eden basınç grafiği 138
Şekil 4.65 Okuma noktaları, basınç gerilmelerinin karşılaştırmalı grafiği....140
Şekil 4.66 Hidrostatik etki altında oluşan yerdeğiştirme diyagramı.....141
Şekil 4.67 Hidrostatik ve patlama etkisi altındaki yerdeğiştirme diyagramı.141
Şekil 4.68 Gövde yüksekliği boyunca oluşan yerdeğiştirme grafiği.....142
Şekil 4.69 Kret uzunluğu boyunca oluşan yerdeğiştirme grafiği 142
Şekil 4.70 Hidrostatik etki altında oluşan von-misses gerilme diyagramı 143
Şekil 4.71 Hidrostatik etki ve patlama etkisi altında oluşan gerilme diyagramı 143
Şekil 4.72 Gövde yüksekliği boyunca oluşan gerilme grafiği 144
Şekil 4.73 Kret uzunluğu boyunca oluşan gerilme grafiği.....144
Şekil 4.74 Hidrostatik etki altında oluşan şekil değiştirme diyagramı.....145
Şekil 4.75 Hidrostatik ve patlama etkisi altında oluşan şekil değiştirme diyagramı 145
Şekil 4.76 Patlama etkisine maruz kalmış bir yapı 148
Şekil 4.77 Betonarme kolon, perde ve kirişlere ait kesit detayları 150
Şekil 4.78 Beş katlı binaya ait; a) Boyutları, b) Sonlu eleman modeli 150
Şekil 4.79 Beş katlı bina modeline ait; a) Sonlu eleman modeli, b) 1. patlama durumu ve patlayıcıların yeri, c) 2. patlama durumu ve patlayıcıların yeri.....151
Şekil 4.80 Kolon noktalarının konumlarını gösteren çizim 152

Şekil 4.81 Sonlu eleman modeli ve taşıyıcı sistem üzerinde oluşan basınç (MPa) diyagramı; a) 1. durum patlama analizi, b) 2. durum patlama analizi 153

Şekil 4.82 Sırasıyla, 1. durum patlama analizi ve 2. durum patlama analizi sonrası taşıyıcı sistem üzerinde oluşan basınç değerleri 154

Şekil 4.83 Sonlu eleman modeli ve taşıyıcı sistem üzerinde oluşan hasar durum diyagramı; a) 1. durum patlama analizi, b) 2. durum patlama analizi 155

Şekil 4.84 Sonlu eleman modeli ve taşıyıcı sistem üzerinde oluşan yerdeğiştirmeler; a) Statik analiz, b) 1. patlama durumu, c) 2. patlama durumu 155

Şekil 4.85 Statik analiz, 1. patlama durumu ve 2. patlama durumunda oluşan yerdeğiştirme değerleri 156

Şekil 4.86 Sonlu eleman modeli üzerinde oluşan gerilme diyagramı; a) Statik analiz, b) 1. durum patlama analizi, c) 2. durum patlama analizi sonrası d) Donatı üzerinde meydana gelen gerilmeler 157

Şekil 4.87 Statik analiz, 1. ve 2. patlama durumunda oluşan gerilme değerleri 158

Şekil 4.88 Patlama ile birlikte salınan ve soğurulan enerji değerleri.....159

Şekil 4.89 Üç duvar modeli ile patlayıcının konumu ve uzaklıkları 163

Şekil 4.90 Üç boyutlu sonlu eleman modeli 164

Şekil 4.91 Sonlu eleman modeline ilişkin mesh geometrisi 165

Şekil 4.92 Sonlu eleman modelleri üzerine yerleştirilen okuma noktaları ...166

Şekil 4.93 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları 168

Şekil 4.94 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği 169

Şekil 4.95 Yapısal davranış diyagramları 170

Şekil 4.96 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları.....170

Şekil 4.97 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği 171

Şekil 4.98 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları 172

Şekil 4.99 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği 173

Şekil 4.100 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları 174

Şekil 4.101 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği 175

Şekil 4.102 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları.....176

Şekil 4.103 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği 177

Şekil 4.104 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları 178

Şekil 4.105 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği 179
Şekil 4.106 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları 180
Şekil 4.107 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği 181
Şekil 4.108 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları.....182
Şekil 4.109 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği 183
Şekil 4.110 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları 184
Şekil 4.111 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği 185
Şekil 4.112 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları 186
Şekil 4.113 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği 187
Şekil 4.114 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları.....188
Şekil 4.115 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği 189
Şekil 4.116 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları 190
Şekil 4.117 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği 191
Şekil 4.118 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları 192
Şekil 4.119 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği 193
Şekil 4.120 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları.....194
Şekil 4.121 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği 195
Şekil 4.122 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları 196
Şekil 4.123 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği 197
Şekil 4.124 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları 198
Şekil 4.125 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği 199
Şekil 4.126 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları.....200
Şekil 4.127 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği 201
Şekil 4.128 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları 202
Şekil 4.129 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği 203
Şekil 4.130 Patlama basıncı grafiği (2 nolu okuma noktası).....204
Şekil 4.131 Patlama basıncı grafiği (3 nolu okuma noktası).....205
Şekil 4.132 Yerdeğiştirme grafiği (2 nolu okuma noktası) 205
Şekil 4.133 Yerdeğiştirme grafiği (2 nolu okuma noktası) 206
Şekil 4.134 Gerilme grafiği (2 nolu okuma noktası).....207
Şekil 4.135 Gerilme grafiği (2 nolu okuma noktası).....208
Şekil 4.136 Etkin plastik şekil değiştirme grafiği (2 nolu okuma noktası) 209

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Genel yapılara ilişkin risk kıstasları [113] 27

Tablo 3.2 Modern ve endüstriyel yapılara ilişkin risk kıstasları [113] 28

Tablo 3.3 Cam panellere ilişkin risk kıstasları [113] 28

Tablo 3.4 Sık kullanılan patlayıcıların eşdeğer TNT dönüşümleri [10] 30

Tablo 3.5 Bazı araçların tahmini yük kapasiteleri [10] 30

Tablo 3.6 P_r (yansıyan basınç, MPa) değeri için W-R eşleşme tablosu [10] 32

Tablo 3.7 Polinomdaki (A, B, C, D ve E) sabitlerini içeren tablo [22] 34

Tablo 3.8 Direnç katsayı değerleri (C_D) [1] 41

Tablo 4.1 Sonlu eleman modelindeki malzemelerin mekanik özellikleri 75

Tablo 4.2 Modelde kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri 91

Tablo 4.3 X yönünde meydana gelen yerdeğiştirmeler 96

Tablo 4.4 Okuma noktaları için hesaplanan patlama basınçları (model-1) (MPa) 99

Tablo 4.5 Okuma noktaları için hesaplanan patlama basınçları (model-2) (MPa) 99

Tablo 4.6 Modelde kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri 107

Tablo 4.7 Okuma noktaları ve numaralandırılmış taşıyıcı elemanlar 110

Tablo 4.8 Patlama durumları için okuma noktaları patlama basınçları 113

Tablo 4.9 Patlama durumları için okuma noktalarındaki yerdeğiştirmeler 116

Tablo 4.10 Patlama sonrası ortaya çıkan ve soğrulan enerji 118

Tablo 4.11 Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri 124

Tablo 4.12 Okuma noktalarına etkiyen patlama basınçları 126

Tablo 4.13 Okuma noktalarında oluşan yerdeğiştirmeler 129

Tablo 4.14 Açığa çıkan ve soğurulan edilen enerji 130

Tablo 4.15 Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri 134

Tablo 4.16 Okuma noktalarında oluşan patlama basınçları (MPa) 139

Tablo 4.17 Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri 149

Tablo 4.18 Modelde kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri 164

Tablo 4.19 Patlama modellerini gösterir çizelge 167

ÖZET

Patlamaların Mühendislik Yapılarının Davranışlarına Etkisi

Ahmet Tuğrul TOY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Barış SEVİM

Mühendislik alanında yapıların (bina, köprü, istinat duvarı, baraj vb.) statik hesaplamaların projelendirmesi ile başlayan süreç, şantiye uygulamaları ile devam etmektedir. Bu hesaplamalarda standart olarak; ölü yük, hareketli yük, deprem yükü ve rüzgâr yükü olarak tanımlanmakta ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılmaktadır. Ancak son yıllarda patlama yükünün de yapıları etkileyen önemli bir yük olduğu hatta mühendislik yapılarına hasar vererek yıktığı bir gerçektir. Bu patlama yükü karşımıza; gerek terör saldırısı, gerekse binalardaki doğalgaz patlamasıyla ile ortaya çıkmaktadır. Patlama yükünü, yapıların tasarımı aşamasında hesaplara dâhil edilmesi ilave ekonomik maliyet ortaya çıkarsa da, mühendislik yapıları, çoğu zaman bu yüke karşı hazırlıksız olduğundan hasarların ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Patlama yükünün araştırmasına yönelik; yüz yıl kadar önce çalışmalar başlamıştır, bu çalışmalar; deneysel uygulamalara dayanmaktadır. Bu çalışmalarından, günümüzde kabul gören çalışmalara kadar, patlama yükünün kati davranışı modeli ortaya konulamamıştır. Bunun sebebi; basınç değerlerinin çok yüksek olması, iyi bir davranış modelinin olmaması, ani basınçtan dolayı oluşan kırılmalar

olarak gösterilebilir. Patlama süresi ise; yapı içinde gerçekleştiği durumlarda 3 milisaniye mertebesinden, açık hava patlamalarında 100 milisaniye'ye çıkabilmektedir.

Bu tez çalışmasında; patlama etkisi ve oluşturduğu yükün, çeşitli mühendislik yapıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda; patlama yükü çözümü yapabilen bilgisayar yazılımı kullanılmış olup, yazılımdan alınan veriler ile ampirik ifadeler karşılaştırılırmıştır. Ayrıca; ABD Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanan UFC 3-340-02 standartları doğrultusunda, patlama yükü parametreleri hesaplanarak, yapının davranışı irdelenmiştir. Bu tez, patlama yükünün, mühendislik yapıları üzerindeki etkisi ile mühendislik yapılarının ve taşıyıcı sistem elemanlarının, patlama yüküne nasıl tepki verdiği ayrıca, patlayıcı kütlesi ile patlayıcının yapıya olan mesafesinde meydana gelen değişmelerin patlama yükünü ve yapıda oluşturduğu etki araştırılmıştır. Yapıların tasarımı esnasında, patlama yükü verilerinin hesaba dâhil edilmesi, proje maliyetine ilave etki getireceği tartışmasız bir gerçektir. Ancak bazı kritik öneme sahip yapıların; hastane, askeri, kamu vb. projelendirme aşamasında patlama yükünün dâhil edilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: patlama, patlama yükü, açık yöntem, ANSYS, AUTODYN, sonlu eleman modeli

ABSTRACT

Blasting Effects on the Response of Engineering Structures

Ahmet Tuğrul TOY

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Barış SEVİM

The design of static calculation process of the engineering structures (such as; buildings, bridges, retaining walls, dams etc.) proceeds with the construction area works. The calculations generally involves; dead load, live load, earthquake load and wind load; the analysis are made through these definitions. However, in recent years boast load has become an important parameter which affects structures adversely, yet more inflicts high damages on the structural members moreover it may pull down the building. The bloat load occurs itself with a terror attack, also occurs with the explosion of natural gas in the buildings. However, including the blast load parameters in the design phase of the project brings additional cost; engineering structures are damaged inevitably due to be caught unprepared to explosion.

Researchers have studied the principles of blast load for about a hundred year. Those researches are proposed as empirical equations, which are all based on experimental studies. All studies, from the first ones to the newest studies, which are well accepted, no failure behaviour model has been proposed yet. The reason

of that is, can be explained as; overpressures may develop, cracked structural members due to sudden and overpressure. Indoor explosions occurs in around 3 milliseconds while outdoor explosions, duration occurs around 100 milliseconds.

In this study, blast load and its effects on the engineering structures are studied. Within this scope, a software named ANSYS AUTODYN software has been used in order to compare the results of mathematical proposal equations and software results. Moreover, the studies of UFC 3-340-02, which was published by USA Ministry of Defense which accepted as standards in blast engineering, has been also calculated and examined. In this thesis; blast load and its effects on engineering structures, the response of the structural members and examining of the explosion effect due to the change of the charge weight amount and the distance between the building and the explosive material. However, including the blast parameters in the design process, increases the cost of the project, it is examined that to consider the blast load parameters of the design of important structures (such as; public buildings, hospitals, military buildings) is necessary.

Keywords: Blasting, blast load, explicit analysis, ANSYS, AUTODYN, finite element model

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Dünyada gelişen teknoloji ve savaş sanayi patlayıcı maddelerin çeşidinin ve etkisinin artmasına neden olmaktadır. Bununla terörist güçler ve devletler tarafından yapılan bombalı saldırılar savaş organizasyonu haline gelmiştir. Yapıların içinde veya hemen yanında oluşan patlama, yapıların taşıyıcı sisteminde büyük hasarlar oluşturmakta, hatta yıkımlara sebep olmaktadır. Bu yıkımlar can kaybını da beraberinde getirir.

Patlayıcılar yapılar üzerinde doğrudan ve dolaylı etki oluştururlar: doğrudan etkiler; yapıların yıkılması, çökmesi (kısmi ya da tamamıyla), yangın ve duman kaynaklı etkiler ve patlama esnasında insan hayatlarının yok olmasına, sakat kalmasına veya yaralanmalara yol açabilir. Dolaylı etki ise; zamanlı tahliyenin engellenmesi ve bununla birlikte oluşabilecek can kayıplarının artması olarak tanımlanabilir.

Bununla birlikte; gaz ve kimyasal patlayıcılar büyük dinamik yük oluştururlar ki oluşan dinamik yükler birçok binanın proje aşamasında hesaplanan tasarım yükünden daha büyüktür. Oluşan bu tip büyük yükleme koşullarından dolayı yaklaşık 30 yıldır patlamadan kaynaklanan yüklere yönelik yapısal analizler geliştirilmektedir. Patlayıcı yüke yönelik analizi ve tasarımı, patlayıcının mantığını tam olarak anlayabilmek ve değişik yapısal elemanların dinamik davranışlarının bilinmesi gerekir.

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de artmakta olan ve patlayıcı ile yapılan terörist saldırılar göz önüne alındığında bu konunun ülkemiz açısından da yüksek derecede önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılar inşa aşaması ve kullanım aşamasında birçok yüke maruz kalırlar. Yapılardan beklenen bu yükleri emniyetli bir şekilde zemin ortamına aktarmaktır. Bunun için de yapılara gelen yükün türünün, şiddetinin ve karakteristiğinin

yeterince bilinmesi gerekir. Yapılara gelen yükler genel olarak statik ve dinamik yükler olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Yapının kendi ağırlığı üzerindeki sabit ve hareketli yükler statik yük sınıfına girer. Dinamik yüklerin statik yüklerden temel farkı, oluşan etkilerin çok kısa bir zaman diliminde meydana gelmesi ve yapılarda bu yüklere karşı koyacak atalet kuvvetlerinin ortaya çıkmasıdır. Dinamik etkiler yapılar üzerinde büyük yük oluşturmakla birlikte bu yükler kimi zaman depremlerden, şiddetli rüzgârların oluşturacağı kasırga ve hortumlardan veya deprem ve rüzgâr eksisiyle denizden kıyıya doğru gelen büyük genlikli su dalgalarından meydana gelir.

Yapılar üzerinde etki oluşturabilecek diğer önemli bir yük kaynağı da patlamalardır. Bir savaş sırasında atılan bombalar, terörist saldırılarda kullanılan farklı tipteki patlayıcıların infilak etmesi veya doğalgaz sıkışması sonucu oluşan patlamalar can kayıplarına ve yaralanmalara sebep olabileceği gibi yapılar üzerinde de olumsuz etkiler meydana getirirler. Bu nedenle patlama etkilerinin yapılar üzerindeki davranışlarının araştırılması gerekir.

Son yıllarda terörizm tüm dünya genelinde en büyük problemlerden biri haline gelmiştir, bu nedenle terör saldırılarına karşı tam korunma, kesin çözüm beklenmektedir. Patlayıcının fitilinin ateşlenmesiyle birlikte içinde bulunduğu ortam (içinde bulunan yapıları ve insanları) etkiler. Araştırmacılar patlama yüküne karşı korunmanın arttırılması adına, günümüze kadar ve deneysel sonuçlara dayanan değişik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir

Karmaşık yapılar bilgisayar analiz programları yardımı ile (AUTODYN, LS-DYNA vs.) kolayca ve hızlıca (ampirik formüllere göre) çözülebilir. Fakat geçmiş yıllarda bilgisayar analiz programlarının mevcut olmadığı dönemlerde) çözümler ampirik ifadeler ile yapılmaktaydı ve bu nedenle birçok araştırmacı tarafından patlama yüküne yönelik çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar 1950 yılı itibariyle patlama yükünün belirlenmesine yönelik ciddi oranda çalışmalar yapılmış

Patlama yükünün hesabı ve araştırması yıllar boyunca devam etmiştir, halen de etmektedir. Patlama yükünün hesabı için bazı metotlar bulunmaktadır. Bunlar; ampirik metot, deneysel metot ve bilgisayar analiz metot olarak sıralanabilir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında araştırılması yapılan mühendislik yapılarında; patlayıcı malzemenin (TNT) kütlesindeki değişiklik, patlayıcı malzeme ile yapı arasındaki uzaklıkta meydana gelen değişim ve malzeme özelliklerindeki farklılık temel alınarak; ANSYS yazılımı ve ANSYS AUTODYN yazılımından faydalanıldığı gibi, tarihsel süreçte araştırmacıların deneysel çalışmalar sonucu elde ettiği matematiksel ifadeler (ampirik formüller), bazı standart niteliğinde yayımlanan çalışmalar UFC 3-340-02, TM 5-1300 ile hesaplamalar yapılarak sonuçların karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, farklı inşaat mühendisliği yapılarının patlama yükleri altındaki davranışlarının, açık yöntemi dikkate alan ileri dinamik analizlerle araştırılmasıdır. Yapılan literatür araştırmasında; teorik bilgilerin ağırlıklı olduğu buna karşın verilen açık yöntem analizlerinin ve uygulamalarının (explicit analysis) kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu sebepten ötürü 7 farklı mühendislik yapısı üzerinde çalışma yapılmış olup detaylı açık yöntem (explicit) analizlerine, ampirik formülasyon uygulamalarına ve UFC 3-340-02 standartları çözümleri üzerine yoğunlaşılmıştır.

Bu tez çalışması toplamda 4 bölümden oluşmaktadır. Teze ait organizasyon özeti şu şekilde oluşturulmuştur:

2. Bölüm: Tez konusu ile ilgili detaylı literatür araştırmaları bu bölümde sunulmuştur. Bu bölümde; patlama yükünün davranışı, tarih boyunca yapılmış ampirik araştırmalar, yayımlanmış el kitapları ve standartlar, farklı mühendislik yapıları üzerindeki patlama yükünün etkisi, yapılmış deneysel çalışmalar ve sonuçların teorik çalışmalar ile değerlendirilmesi gibi konulara ait kapsamlı literatür bilgileri sunulmaktadır.

3. Bölüm: Bu bölümde; patlama yükünün davranışı, tarih boyunca araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ve matematiksel ifadeler (ampirik formüller), Amerikan Donanması tarafından hazırlanan ve tüm dünyada yaygın bir şekilde standart olarak kabul gören ve patlama yüküne ilişkin tüm detayları içeren UFC 3-340-02 incelenmiştir.

4. Bölüm: Bu bölümde; tez kapsamında yapılan çalışmalar, bulgular ve irdelemelere yer verilmiş olup;

Deneysel çalışma yapılan bir yüksek lisans tezi incelenmiştir. Tez çalışmasına göre yüksek ve normal sünekliğe sahip 2 betonarme kolonun arasına yerleştirilen patlayıcının kolonlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında ise; yapılan bu deney çalışmasındaki kolon ve patlayıcı malzeme ANSYS Workbench Yazılımı ve ANSYS AUTODYN Yazılımı üzerinde denk bir şekilde modellenmiş olup patlama ortamı bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Ayrıca ampirik formüller de kullanılmış olup tüm sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

İki katli betonarme bir bina seçilmiş ve patlama nedeniyle oluşan etkiler araştırılmıştır. Betonarme bina daha önce terörist saldırıya uğramış bir binadan esinlenerek tercih edilmiştir ve seçilen yapıyı 3 farklı kütlede (100kg, 250 kg ve 500 kg) TNT patlayıcı etkisine maruz bırakılarak; yapının, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların maruz kaldığı basınç, hasar, deplasman ve etkiler araştırılarak karşılaştırılmıştır.

Şehirlerarası karayollarında sıkça rastlanan betonarme istinat duvarı örneği modellenmiştir. ANSYS ve ANSYS AUTODYN Yazılımları ortamında bire bir modellenen sonlu eleman ayrıca UFC 3-340-02 standartları doğrultusunda ayrıca ele alınmıştır.

Türkiye otoyollarında sıkça rastlanan bir sanat yapısı olan ve aktif olarak hizmet veren bir karayolu köprüsü model alınarak tasarlanmıştır. Temel kolonlarından birisinin temeline TNT tipi patlayıcı malzeme etki ettirilmiştir. Buna göre; 3 açıklıklı karayolu köprüsü ANSYS Yazılımı üzerinde modellenerek, patlama analizleri ANSYS AUTODYN Yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Basınç. yerdeğiştirme, hasar ve açığa çıkan patlama enerjisinin ne şekilde absorbe olduğu araştırılmıştır.

Enerji üretimini karşılamak üzere inşa edilmiş olan bir beton ağırlık barajı incelenmiştir. Bilgisayar yazılımı ortamında sonlu eleman modeli bire bir oluşturulmuş olup, Baraj gövdesine TNT tipi patlayıcı etki ettirilmiştir. Sonuç olarak; basınç, yerdeğiştirme, şekil değiştirme değerleri elde edilmiş olup aynı değerler; ampirik formülasyon ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Çok katlı betonarme yapılara örnek olarak, beş katli betonarme bir bina seçilmiş ve 2 farklı patlama durumu altında oluşan etkiler araştırılmıştır. ANSYS yazılımı, Explicit Dynamics Modülü ile hazırlanan Sonlu Eleman Modeli (SEM) ile hazırlanan ve AUTODYN yazılımı ile patlayıcı analizi hazırlanan betonarme binanın zemin katındaki kolonların altına yerleştirilen çok sayıdaki patlayıcıya karşı yapının bütün olarak nasıl davrandığı araştırılmış olup binanın olası bir durumda, kontrollü yıkılma durumu incelenmiştir.

Son olarak; üç adet betonarme duvar modeli, üç farklı kütleli patlayıcı yüküne maruz bırakılmış olup toplam altı patlama durumu üzerinde çalışılmıştır. Bu duvar yüzeyleri, düz, iç bükey ve dış bükey olarak tasarlanmıştır. Modellenen üç duvar modelinin tam ortasında 3 farklı kütlede TNT patlayıcı, ANSYS AUTODYN yazılımında, süresi 5 milisaniye olacak şekilde patlatılarak modellenmiştir. Patlama etkisi sonucu meydan gelen etkiler grafikler ve kontur diyagramları ile sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında, farklı mühendislik yapılarına ait sonlu eleman modelleri, açık yöntem (explicit) analizleri ile modellenerek patlama yükü altındaki davranışları incelenmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Yapılan literatür incelemelerinde görüldüğü üzere, patlama yükünün yapılar üzerindeki hasar verici etkiye sahip olduğu bir gerçektir. Bu hasara sebep ise; özellikle binaların statik hesaplarında patlama yükünün hesaba katılmaması nedenlerden biridir. Etki eden patlama yükünde, özellikle bulunduğu katta (çoğunlukla bodrum katı) betonarme kolonlara yüksek miktarda kesme kuvveti uygulamaktadır ki, yüksek miktarda kesme kuvvetine bırakılan kolonlarda kırılma ve parçalanmalar sık görülürr. Ayrıca, patlama yükünün etki ettiği betonarme kirişleri, tasarımına uygun olmayan bir yükle karşılaşmaktadır ki kirişlere yerçekiminin aksi yönünde (+Y) etki eden aşırı yüksek kuvvet, kirişlerin açıklık ortasından ve kolon bağlantı noktalarından kırılmasına neden olmaktadır.

Bununla birlikte, literatürde incelemesi yapılan mühendislik yapılarına ek olarak; farklı türdeki mühendislik yapıların da incelenmesinin gerekli olduğu kanısına varılmış olup bu tez çalışmasında bu yönde analizler yapılmıştır. Bu kapsamda,

literatürde araştırılması yapılan modellerden; betonarme, istinat duvarı, sanat yapısı, baraj modeli, çok katlı bina ve parametrik çalışmaların açık yöntem (explicit method) araştırmalarının kısıtlı olduğu görülmüş olup bu yönde çalışmalara ağırlık verilmiştir.

Dolayısıyla; yapılan literatür araştırmalarının ışığında; patlama yüküne ilişkin günümüzde dahi net bir davranış modeli henüz bulunmamaktadır, tarih boyunca oluşturulmuş olan tüm önermeler, yapılmış olan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında literatürde irdelemesi detaylı yapılmamış olan kapsamlı mühendislik yapılarının patlama yükü karşısındaki davranışı açık yöntem (explicit analiz) ile detaylı bir şekilde irdelenerek mühendislik yapıları kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır.

2
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Yapıların bir patlama karşısında dinamik karakteristiklerinin, davranışlarının ve tepkilerinin belirlenmesinde deneysel metotlar sağlıklı sonuçlar vermekte, ancak deneysel yöntemlerin uygulanması; çok yüksek maliyet, deneylerin yapılabileceği uygun araziler, yorucu işlemler ve resmi izinler gerektirmektedir. Deneysel yöntemler yerine, deneysel sonuçlara yakın ve güvenilir sonuçlar elde edilebilen deneysel sonuçlardan elde edilmiş ampirik formüller ve bilgisayar analiz programları kullanılabilir. Yeterli sayıda ve mevcut bulunan bilgisayar analiz programları ile yapı bilgisayar ortamında tasarlanarak patlama etkisi simule edilebilir ve gerçeğe çok yakın sonuçlar alınabilir. Ayrıca bu konu üzerine oluşturulmuş yönetmelik niteliği taşıyan kaynaklar da yapının tasarımı ve güvenlik yöntemleri hakkında; tarifler, formüller ve yönergeler sunmaktadır.

Literatür araştırması kapsamında; patlamaların çevreye, insanlara ve yapılara (bina, köprü ve yeraltı yapıları) olan (değişik mesafelerdeki ve değişik büyüklüklerdeki patlayıcılar ile) etkileri ampirik formüller ve bilgisayar analiz programı yardımı ile hesaplanarak, davranışları araştırılacaktır. Ayrıca yapılarda, patlayıcıya karşı alınabilecek önlemler, proje aşamasında yapı taşıyıcı elemanlarının tasarımı ve güvenlik önlemleri araştırılacaktır.

Patlamaların yapılara olan etkileri konusunda; yönetmelikler, teorik çalışmalar ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Bu kapsamda binalar, köprüler ve yeraltı yapılarına ilişkin çalışmalar ele alınmaktadır.

2.2 Yönetmelikler ve Standartlar

Yapıların patlama etkisi karşısındaki davranışı ile ilgili yönetmelik niteliği taşıyan standart çalışmaları bulunmaktadır. Bunlardan ABD ordusu tarafından hazırlanan el kitapları ve FEMA yönetmelik niteliği taşımaktadır, bunun sebebi hemen hemen her araştırmacının çalışmalarında bu el kitaplarını referans almaları ve

patlayıcılar, yapı ve elemanlarının davranışları, tarif, formül ve yönerge bakımından en kapsamlı kaynak olmasıdır. Bu kapsamda;

Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions [1]; ABD Ordusu tarafından hazırlanan bu kapsamlı çalışma;

Düşük veya yüksek fark etmeksizin her basınç sınıfı için kullanılır; en sık, güncel ve yaygın kullanılan kaynaklardan biridir; tüm askeri ve sivil yapılar ile insan ve değerli eşyaların korunmasına yönelik olarak patlayıcılara karşı yapıların tasarımı için oluşturulmuştur; adım – adım analiz ve tasarım prosedürleri içerir; patlama yükü ve şok yükü hesap yöntemlerini; dinamik analiz prensiplerini; çok sayıda önlem, tolerans ve kırılganlıklara ilişkin önlemleri (örneğin; şok izolasyonu); pencere ve kapı gibi açıklıkların patlayıcı güvenliği; gibi bilgiler içerir; patlama yükünün her parametresi için tablo ya da grafiksel olarak düzenlemeler yapılmış olup, parametrelerin nümerik değerleri kolaylıkla tespit edilebilir.

Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM 5-1300 (U.S. Departments of the Army, Navy, and Air Force [2]; ABD Ordusu tarafından hazırlanan bu çalışma:

Düşük basınç; en sık ve yaygın kullanılan kaynaklardan biridir; tüm askeri ve sivil yapılar ile insan ve değerli eşyaların korunmasına yönelik olarak patlayıcılara karşı yapıların tasarımı için oluşturulmuştur; adım – adım analiz ve tasarım prosedürlerini; patlama yükü ve şok yükü hesap yöntemlerini; dinamik analiz prensiplerini; çok sayıda önlem, tolerans ve kırılganlıklara ilişkin önlemleri (örneğin; şok izolasyonu); pencere ve kapı gibi açıklıkların patlayıcı güvenliği gibi bilgiler içerir.

Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures, DOE/TIC-11268 (U.S. Department of Energy [3]; ABD Ordusu tarafından hazırlanan bu kılavuza göre: Mevcut binaların patlama etkisine karşı dayanıklı ve dirençli olarak güçlendirilebilmesi için tasarımcılara rehber niteliğindedir.

Protective Construction Design Manual, ESLTR-87-57 (Air Force Engineering and Services Center [4]; ABD Ordusu tarafından hazırlanan bu El Kitabı ise: Sığınma ve korunma yapılarının (nükleer olmayan silahlara karşı) analizi, tasarımı, yapısal

dinamiği ve sığınma ve korunma yapılarının güçlendirilmesine yönelik bilgiler içerir.

Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, TM 5-855-1 (U.S. Department of the Army [5]; ABD Ordusu tarafından hazırlanan bu El Kitabı: Konvansiyonel silahlara karşı sığınma ve korunma yapılarının tasarımı, analizi ve bu yapıların güçlendirilmesini içerir.

The Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects (DAHS CWE) [6]: ABD Ordusu tarafından hazırlanmıştır; TM 5-855-1 El Kitabını hazırlayan ekip tarafından hazırlanmıştır, konvansiyonel silahlara karşı yapıların tasarımına ilişkin yönergeleri içerir.

Structural Design for Physical Security—State of the Practice Report (ASCE) [7]: ABD Ordusu tarafından hazırlanmıştır; Bu El Kitabı, yapıların güçlendirilmesini hedefleyen şehir plancıları için kapsamlı yönergeler içerir.

FEMA 426 [8] ve FEMA 427 [9]: Terörist saldırılar karşısında; yapıların, yaşam alanlarının, kamu ve ticaret alanlarının, yapı elemanlarının güvenliğine ve korunmasına yönelik; tarif, formül, yönerge ve tasarım kıstaslarını içeren kapsamlı bir el kitabıdır. Aynı zamanda patlayıcı türlerini, silahlarını ve patlayıcı şekillerini de sınıflandırarak hangi patlama türlerinde ne yapılması gerektiğini detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Mays ve Smith [10] tarafından hazırlanan “Blast Effects on Buildings”; Shepherd [11] tarafından hazırlanan “Structural Response to Explosions” ve Dusenberry [12] tarafından hazırlanan Handbook For Blast-Resistant Design Of Buildings isimli el kitapları: patlayıcı yükünün tanımı, patlayıcı çeşitleri, patlama biçimleri, tarihte geçmiş yıllarda meydana gelen büyük patlamalar ve bu patlamaların binaya, çevreye ve insanlara yaptığı etkiler, yapıların patlayıcı yüküne gösterdiği tepkiler, ampirik formülasyonlar ile yapı davranışının tayini, tarif, formül ve yapıların proje aşamasında tasarımına yönelik detaylı çalışmaları içerir.

2012 yılında Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından kanunlaştırılarak yürürlüğe giren ve iş güvenliği ile ilgili kıstasları düzenleyen 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununa göre farklı branşlarda duyulan ihtiyaca binaen yönetmelikler çıkarılmış olup eksik görülen konulara ilişkin halen yönetmelikler

çıkmaya devem etmekte ve bu süreç “Uluslararası Çalışma Örgütü’ne (ILO – International Labour Organization) göre güncelleştirilmektedir. Buna göre “Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Çalışanların Korunması Hakkındaki Yönetmelik” [13] yayımlanmış olup bu yönetmeliğin amacı; çalışanları sağlık ve güvenlik yönünden işyerlerinde oluşabilecek patlayıcı ortamların tehlikelerinden korumak için alınması gereken önlemlere ilişkin usul ve esasları düzenlemektir. Ayrıca, N. Eğri [14] tarafından yapılan çalışmada ise (patlayıcı ortamlarda iş güvenliği) patlayıcı maddeler hakkında bilgiler, patlayıcı ortamlar, çevre ve insan güvenliği için talimatlar bulunmaktadır.

2.3 Teorik Çalışmalar

2.3.1 Ampirik Formülasyonlar

Patlayıcıların yapı davranışlarına etkileri üzerine geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda patlayıcıların ve yapıların parametrelerine ilişkin yaygın olarak kullanılmakta olan sonuçlara ulaşılmıştır.

Hopkinson-Cranz [15] tarafından yapılan çalışmaya göre; patlama yükünün değerlerinin hesabı bazı temel parametrelere bağlıdır, bunlar; uzaklık ve patlayıcı kütlesidir. Bu temel parametreler kombine edilerek tek bir parametreye dönüştürülmüş olup bu teoreme “Üçüncü Kök Ölçekleme Kuramı” denir ve Hopkinson ve Cranz tarafından bulunmuştur. Yapılan araştırmaların çoğu bu teoremden elde edilen değeri Z (ölçeklendirilmiş uzaklık) temel alınarak oluşturulmuştur.

Yandzio vd. [16] tarafından yapılan çalışmada ise patlayıcı malzeme davranışı, patlama esnasında meydana gelen ısı değişimleri ve şok dalga hareketi, yapıların ve taşıyıcı sistem elemanlarının patlama yükü karşısında gösterdiği davranış araştırılarak analiz edilmiştir.

Brode [17] yaptığı çalışmada, küresel patlamadan dolayı oluşan ve yaklaşık pik basınç (P_{so}) değerinin ölçeklenmiş uzaklığa bağlı olduğunu ifade etmiştir. (Z=R/W1/3) ölçeklenmiş uzaklık, (R) patlayıcının yapıya uzaklığı ve (W) ise

patlayıcının kütlesi olmak üzere P_{so}'nun 10 bar'dan (1 MPa) büyük ve 10 bar'dan (1 MPa) küçük olmak üzere düzenlenmiş 2 ayrı denklem düzenlenmiştir.

Newmark ve Hansen [18] tarafından yapılan çalışmada ise zeminde oluşan patlamanın pik basınç değeri bar cinsinden ifade edilmiştir, bu basınç ifadesinin fonksiyonu yine uzaklık (R) ve patlayıcı kütlesi (W) cinsinden ifade edilmiştir.

Mills [19] tarafından yapılan çalışmada ise: pik basınç (P_{so}), kPa cinsinden ifade edilmiş olup, patlama yükü fonksiyonu; W, TNT patlayıcısının kg cinsinden ağırlığı ve Z parametreleri ile ifade edilmiştir.

Biggs [20] tarafından, yapılar Tek Serbestlik Dereceli Sistem gibi düşünülerek patlayıcının bazı formülasyonlar geliştirilmiştir. Sönümsüz, elastik Tek Serbestlik Dereceli Sistemin hareket denklemini şu şekilde tanımlamıştır; (t_d: pozitif faz süresi, F_m: pik kuvvet)

Henrych [21] tarafından önerilen bağıntıda ise (P_s) parametresinin hesabı Brode tarafından önerilen bağıntı ile benzerlikler gösterse de, yapılan çalışmalarda sonuçların deneysel, AUTODYN yazılımı ve UFC 3-340-02 sonuçları ile yakınlık gösterdiği görülmüştür. Yaptığı çalışmanın sonucu olarak, ölçeklendirilmiş uzaklığın (Z) mesafesine bağlı olarak 3 farklı denklem önerir.

Kingery ve Bulmash [22] yaptığı çalışmalarda yapı yüzeyine temas eden en büyük patlama yükü hesabı için Z değerine bağlı olarak çok fazla sabit içeren polinom denklemi önermiştir. (hatta AUTODYN yazılımının da hesap için kullandığı denklemlerden biridir)

Kinney ve Graham [23] tarafından yürütülen çalışmada, patlama esnasında yapı üzerinde oluşan pik basıncı (bar) tarif eden bir formülasyon önermiştir. Hazırlanan çalışmaya göre; havada meydana gelen parlamaların davranışı, patlama dalgasının havada yayılması ve şok teorisi hakkında çalışmalar yapmıştır.

Sadovsky [24] tarafından yapılan çalışmada ise; patlama esnasında yapı üzerinde oluşan pik basıncı (MPa) bir polinom olarak ifade etmiştir. Sadovsky, patlama etkisinin havada yayılımı ve yapı üzerindeki mekanik etkileri, yaptığı deneysel çalışmaların sonucunda, oluşturmuştur.

Glassdone ve Dolan [25], Remennikov [26] ve Garwin [27] tarafından zeminde meydana gelen patlamaların yayılması, şok dalgasının oluşturduğu rüzgârın hızı, yapıya ve çevreye etkileri üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır.

Birnbaum vd. [28] tarafından yapılan araştırmada Lagrangian metodu ile hücrelerin nasıl tanımlandığını, ağ hücresindeki madde tanımları, şekil değiştirme halleri ve ağ içerisindeki maddenin koordinat, hız, kuvvet, kütle, gerilme, şekil değiştirme, basınç, enerji ve yoğunluk parametrelerinin tanımlarını üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır.

Zukas [29] tarafından yürütülen çalışmada ise, Lagrangian metodu ile yapılan problemlerin analizlerindeki dezavantajların (büyük açısal deformasyon) giderilmesi ve sistemin onarılmasına yönelik önerilerde bulunarak çözüm yöntemi geliştirmiştir.

Youngs [30] tarafından yürütülen çalışmada; patlama ile üretilen gaz ile birlikte oluşan yayılma neticesinde, bir eleman içerisinde oluşabilen birden fazla maddenin hacim oranı tekniği ile ele alınması ve komşu hücrelerle arasında oluşan etkileşim ve bilgi serilerinin oluşumu ile ilgili çalışma yürütmüştür.

LS-DYNA [31] ANSYS yazılımının bir modülü olup, patlama analizlerini çözebilmektedir. Buna göre, katı ve akışkan sonlu eleman modelleri ile oluşturulan sistemin çözümünü bir bağlaşık yöntem önererek çözümler ve bu çözümleme için bir ara yüz sistemi kullanarak katı ve akışkan malzemeden oluşan karmaşık sistemi çözebilir.

Noh [32], Hancock [33], Panton [34], Benson [35], Olovosson [36], Hallquist [37], Vaughan vd. [38], Budge [39], Brown vd. [40] tarafından açıklanan yönteme göre; Keyfi Lagrangian-Eulerian Çözücü (ALE) tarafından gerçekleştirilen analizlerden farklı olarak; katı ve akışkan malzemelerden oluşan karmaşık sistemlerin çözümünde bağlaşık Lagrangian-Eulerian Çözücü olarak adlandırılan metodu kullanarak sistemin çözülmesini sağlaması ve katı sistem ile akışkan sistem algoritmasının oluşturularak karmaşık sistem çözümlerini oluşturularak, yöntem önerir.

2.3.2 Teorik ve Nümerik Çalışmalar

Ngo vd. [41] tarafından yapılan çalışmada patlayıcılar, patlayıcıların davranışı, özellikleri, yayılmaları, binanın patlayıcı yüke tepkisi, dinamik hareketleri, farklı mesafelerdeki patlamanın etkisi gibi detaylı bir çalışma yapılmıştır. Burada yapı ampirik formüller ve bilgisayar ortamında oluşturulan model ile taşıyıcı elemanın davranışları incelenmiştir. Yapılan örnek uygulama ile farklı ebatlardaki kolonun patlamaya karşı olan davranışı incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Patlama yükü ve yapılar üzerindeki etkisi anlattıkları çalışmalarında, şehri merkezlerinde patlayıcı yüklü kamyonlarla yapılan terörist saldırılara dikkat çekmiş ve bu konuda genel bir değerlendirmede bulunmuşlardır. Çalışmada, Patlamanın doğasını ve hava ortamında patlama dalgalarının yayılma mekanizmasını irdelemiş, yapısal davranışı ve patlama yüklerinin tahmini ile ilgili farklı yöntemlerden bahsetmişledir.

Yapılan çalışmaya göre; zemin kat yüksekliği 6,4 m olan çok katlı bir binaya ait kolonlar incelenmiş olup iki farklı basınç mukavemeti ve iki farklı etriye sargı sıklaştırma durumuna göre incelenmiştir.

Draganic ve Sigmund [42]; yaptıkları çalışmada ampirik formülasyonlar ve bilgisayar analiz programı ile binanın patlamaya karşı olan tepkisini incelenmiştir. Ayrıca terörist saldırısı durumunda kullanılan araçlara ilişkin patlayıcı yükleme kapasitelerini içeren bir araştırma da mevcuttur.

Koccaz vd. [43], Vijayaraghavan vd. [44], Goel [45], Remennikov [46] ve Topçu [47] tarafından yapılan çalışmada ise: patlayıcıların yapısı, türleri, yayılma şekli ve davranışları; yapıya, taşıyıcı elemanlara, çevreye ve insanlara olan etkileri ve alınabilecek önlemlere ilişkin önerilere yer verilmiştir.

Kieval [48], Kazi ve Muley [49], Ackland vd. [50], Van der Meer [51], Moon [52], Mays ve Smith [10], Karlos vd. [53] tarafından yapılan çalışmalarda yapıların patlama yükünün tanımı, ampirik formüller ile çözüm önerileri, binaların patlama yüküne karşı davranışı bilgisayar analiz programları ile modellenerek yapının tepkisi ve dinamik hareketlerinin belirlenmesi çalışılmıştır.

Toy ve Sevim [54] tarafından yapılan çalışmada, Türkiyede sık rastlanan ve terör saldırısına maruz kalmış 2 katlı bir yapının AUTODYN yazılımı ortamında Sonlu Eleman Modeli oluşturularak patlama yüküne maruz bırakılmıştır. 500 kg, 250 kg ve 100 kg olmak üzere 3 farklı patlayıcı altında araştırma yapılmış olup yapının taşıyıcı sistemi, yapısal ve yapısal olmayan elemanlarının davranışları araştırılmıştır.

Fairlie [55] tarafından yapılan çalışmada: patlayıcıların; havada, yer altında ve sudaki davranışlarının nümerik modeli; askeri, tahribat ve yıkım sırasında oluşan şekil değiştirme etkileri incelenmiştir. Verilen örnekte cadde ortasındaki patlamanın bloklar ve yapılara etkisi ve bu yapılar arasından nasıl ilerlediği anlatılmıştır.

Svantesson [56] tarafından tamamlanan tez çalışmasında; 1000 kg lık bir patlayıcının betonarme yapının elemanları üzerindeki etkileri incelenmiş olup patlama analizleri Abaqus ve LSDYNA bilgisayar analiz programlarında çalışmalar yapılmıştır. Ele alınana yapı 3 katlı betonarme bir yapı olup sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Nicholls vd. [57] hazırlamış oldukları çalışmada, patlama titreşimlerini ve onların yapı davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlarıdır. Yapılan araştırmada, patlama esnasında oluşacak parçacık hızının yaklaşık 5 cm/s ve yapı üzerindeki hava basıncı etkisinin 3.5 kN/m^2 seviyelerin kadar olması durumunda yapıların güvenli tarafta kalacağı, daha büyük değerler içinse yapılarda hasarlar meydana gelebileceğini belirtmişleridir.

Gad vd. [58] yaptıkları çalışmada, maden ocağı yakınlarındaki tek katlı bir binada patlama esnasında oluşan etkileri araştırmışlardır. Bina bir yıl boyunca yer parçacık hızı 1.5-222 mm/s olan patlamalar esnasında ivmeölçerlerle izlenmiştir. Binada patlama öncesi ve sonrası çatlak durumları incelenmiş olup ve parçacık hızı ile çatlak oluşumu arasında bir prosedür geliştirilmeye çalışılmıştır.

Nateghi vd. [59] patlama nedeniyle oluşan dalgaların yer altı yapılarının betonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada patlama dalgalarının kontrol edilmesi yöntemler geliştirilmiş ve dalgaların negatif etkisi yok edilmeye çalışılmıştır.

NCHRP Report 645 [60], Marchand vd. [61] karayolunun sanat yapıları ile (köprüler) geçişi bazı elverişsiz arazi koşulları göz önüne alındığında, kaçınılmaz olmaktadır. Bu çalışmada: köprülerin, dikdörtgen ve dairesel kesitli betonarme kolonlarının patlama yükü altındaki tepkileri; bu kolonların patlama yüküne karşı tasarımı ve detaylandırması; yükleme altında kolon davranışının bilgisayar ortamında simule edilmesi ve deneysel olarak kolon davranışlarının incelenmiş olup yapılan deneylerdeki numunelerin patlama yükü sonucu aldığı hasarlar gözlemlenmiştir. Ayrıca: yapının; basınç-zaman, impuls-zaman, basınç-zaman ve donatının; çekme-şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara ilişkin yapı elemanının patlama yüküne karşı tasarımı kriterleri oluşturulmuştur.

Wei vd. [62 – 63] Betonarme köprü tabliyelerini, deneysel olarak patlama yüküne maruz bırakarak dinamik davranışlarını, aynı tabliyeler bilgisayar programı ile analiz edilerek döşeme tepkileri incelenmiş olup elde edilen deneysel ve bilgisayar analiz raporları doğrultusunda yapı elemanının patlama yükü karşısında davranışı irdelenmiştir.

Son ve Asl [64], Fujikura vd. [65] geniş açıklıklı çelik köprülerde bilgisayar programı ile dikdörtgen ve dairesel kesitli kolonların ve döşemelerin patlama yüküne karşı tepkilerini araştırmak için dinamik analizi gerçekleştirmiş olup yapılan deneysel çalışmalar ile sonuçlar tablo halinde karşılaştırılmıştır. Ayrıca terörist saldırılara karşı yapıda alınması gereken önlemler, patlama yüküne karşı yüksek dayanımlı malzeme seçimi ve boyutlandırma talimatları işlenmiştir.

Deng ve Xian [66], Yi vd. [67] asma ve çelik köprülerin patlama karşısındaki tepkisi ve dinamik analizi, bilgisayar programı ile simülasyon ve ampirik formülasyonlar ile yapılarak değerler kıyaslanmıştır. Ayrıca taşıyıcı elemanların göçme durumları da incelenmiştir. Buna göre çelik elemanlar patlama yükü karşısında eğilme etkisi altında kaldığı vurgulanmıştır.

Birhane [68] tarafından hazırlanan tezde tarihi taş köprülerin (demiryolu geçişi) patlama yüküne karşı tepkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada tarihi köprüde kullanılan taş malzemelerin davranışlarından değişik taşıyıcı sistemlere (kemer tipi) kadar detaylı bir çalışma yapılmıştır. Burada köprünün ve taşıyıcı

malzemeleri deneylere tabi tutularak deneysel veriler oluşturulmuş olup ayrıca bilgisayar programı ile modeli oluşturularak eşdeğer statik ve dinamik tepkiler ile taşıyıcı elemanların yerdeğiştirme hızları, davranış kriterleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre harçlı birleşim kemerler, klasik taşlı birleşime göre daha elastik davranış gösterirler ayrıca hem statik yükler hem de patlama yükünden kaynaklanan dinamik yüklere karşı daha yüksek direnç gösterdiği tespit edilmiştir.

De ve Zimmie [69], Ambrosini ve Luccioni [70], Han ve Liu [71], Olarewaju vd. [72], Ren vd. [73] yeraltı yapılarına ilişkin (metro) yapılan çalışmalarda, bilgisayar ortamında oluşturulan yeraltı metro modeline metronun içinden ya da yerüstünde zeminde yapılan patlamaların yapıda oluşturduğu dinamik tepkiler araştırılmıştır. Burada zemin türünün de etkisiyle yeraltı yapılarının patlayıcı yüke olan tepkisi yerüstü yapılarından daha farklı olarak gerçekleşmektedir. Bilgisayarda oluşturulan modeller analiz edilerek yapının davranışının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Anil ve Zhihua [74] tarafından yapılan çalışmada ise, ampirik formüller ve bilgisayar destekli analiz üzerine yoğunlaşmıştır. Bir karayolu köprüsü, patlama yükü altında bilgisayar yazılımı yardımı ile modellenmiş ardından ampirik formüller yardımı ile parametreler hesaplanarak elde ettiği tüm sonuçlar irdelenmiştir.

Karlos ve Solomos [75], Acosta [76] tarafından yapılan çalışmada ise yapıların patlayıcı karşısındaki davranışlarının UFC 3-340-02 standartları doğrultusunda davranışları incelenerek, patlama yükü parametreleri teorik olarak araştırılmıştır.

Bayraktar vd. [77] tarafından araştırma neticesinde; beton ağırlık barajların patlama yükü etkisi altındaki davranışları incelenmiş ve patlama etkisinin sebep olduğu titreşimler ataştırılmış ve baraj gövdesinde modal analizi araştırılmıştır.

Toy ve Sevim [78] tarafından yapılan çalışmada, karayolu kenarlarında sıklıkla karşılaşılan yapılardan olan ve yol güvenliğini sağlamak için arazi yapısını tutan betonarme bir istinat duvarının sonlu eleman modeli AUTODYN yazılımı ile oluşturularak, yapıya farklı uzaklıklarda tatbik ettirilen TNT tipi patlayıcının yapı gövdesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Burada yapının davranışı incelenmiş olup,

patlama parametreleri: AUTODYN, UFC 3-340-02 ve ampirik formülasyonlar ile hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sevim ve Toy [79] tarafından yapılan çalışmada ise beton yapı olan Ankara Sarıyar Barajı ANSYS AUTODYN yazılımı ortamında Sonlu Elemen modeline dönüştürülmüş ve patlama etkisine maruz bırakılmıştır. Patlama etkisinin ardından beton gövdenin davranışları araştırılmış olup; etki eden basınç, oluşan hasar, gerilmeler ve yerdeğiştirmeler araştırılmıştır.

Toy ve Sevim [80] 3 açıklıklı ve hâlihazırda hizmet vermekte olan bir betonarme viyadüğün ANSYS AUTODYN ortamında Sonlu Eleman Modelini oluşturularak kolon ayaklarından birisine 4 tonluk bir patlayıcının etki etmesi sonucu kolonda, köprüde ve diğer taşıyıcı elemanlarda oluşan davranışları incelenmiş ve elde edilmiştir.

Tripathy vd. [81] yaptıkları çalışmada patlama etkilerinin yeryüzü yapılarına olumsuz etkileri olabileceğini vurgulamış, bu kapsamda Hindistan'da bulunan 85 yıllık bir yığma barajın ve etrafındaki kayalık kısma dökülen beton üzerinde patlamalar sonucu oluşan etkileri araştırmışlarıdır.

2.3.3 Deneysel ve Arazi Uygulama Çalışmaları

Alia ve Souli [82], Ambrosini vd. [83], Cheeseman vd [84], An vd. [85], Balden ve Nurick [86] tarafından yapılan deneysel çalışmalarda gömülü bulunan kara mayınlarının zemine, insanlara, araçlara ve yapılara olan etkisi ve verdiği hasarlar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; zemine yerleştirilen patlayıcıların (50 kg'dan 500 kg'a kadar test edilmiştir) zeminde açtığı kraterin çapını veren bir bağıntıya ulaşılmıştır.

Lu [87 – 88], Elgy vd. [89], Grujicic vd. [90 – 91], Wang vd. [92] tarafından yapılan çalışmalarda patlayıcı özellikteki silahların askeri ve sivil yapılara etkisi, yeraltı yapılarına olan etkisi, oluşan patlamaların mevcut zeminde oluşturduğu etkiler, oluşan patlamaların verdiği zararlar ve çevresel etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre: kuru kum tabakası momentumun ve enerjinin yapıya aktarımını daha kolay bir şekilde yaparken; suya doygun kum tabakası, enerji ve

momentum aktarımında daha elastik ve doygun sudan kaynaklı olarak daha kontrollü davranabilmektedir.

Siba [93] tarafından yapılan deneysel çalışmaya göre, üretilen yüksek ve normal sünekliğe sahip 2 kolonun arasına yerleştirilen ANFO tipi patlayıcı ve patlama sonucunda kolonlarda oluşan davranışlar irdelenmiştir. Buna göre; yüksek ve normal sünekliğe sahip kolonların arasındaki değişkenlik gösteren mesafe ve patlayıcının değişkenlik gösteren W (kütle) parametreleri ile birlik te birden çok farklı patlatma kombinasyonu elde etmiştir. Bunun sonucunda kolonlarda oluşan yerdeğiştirmeler, kolon yüzeyinde oluşan patlama basınçları gibi parametrelerin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Ambrosini vd. [94 – 95], Swinton ve Berger [96], Hlady [97] ise kara mayınını hem toprak altında hem de toprak üstünde patlatarak; yapılara ve zemine verdiği etkiyi flash X-Ray cihazı ile kayıt ederek sonuçları araştırmışlardır. Bu kayıtlara göre zeminin durumuna (örneğin, suya doygunluk), yapısına ve özelliklerine göre (göre patlayıcının zeminde açtığı derinliğin değiştiği gözlemlenmiştir.

Cooper [98 – 99], Patton ve Taylor [100], Formby [101]; tarafından yapılan deneylerde yapı elemanlarını patlayıcı etkisi altında teste tabi tutarak hasar ölçümleri yapmışlardır. Yapılan ölçümlerde kolon, kiriş ve döşemelerde patlama yükünün yayılım yönünden kaynaklanan hasarlar araştırılmıştır.

Fujikura vd [102]; ise yapı elemanlarının patlama basıncı etkisinde verdiği tepkiler ve hasarları, deneyler ve bilgisayar analiz programı ile model üzerinde oluşan tepkileri araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; beton dolgulu çelik tüpler araştırılmış olup bu malzeme ile yapılan kolonların; patlama esnasında parçalanma, delinme gibi etkilere daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel çalışmalar göstermiştir ki, patlama esnasında sistem mükemmel bir şekilde plastik davranış sergileyerek, patlama yükünü yapıya içsel yerdeğiştirme enerjisi olarak dönüştürerek gönderir. Bu da patlayıcıya karşı yapının daha dirençli olmasını sağlamaktadır.

Kandil vd [103], Ji ve Hao [104], Vangipuram vd [105] tarafından yürütülen çalışmalarda, bir yapının patlama yükü altındaki davranışlarını; dolaylı yöntem (implicit method) ve açık yöntem (explicit method) ile analizlerini

gerçekleştirmişlerdir. Dolaylı yöntem olarak sadovskiy metdodu, Hindistan standartları ve freilander metotları ile analizler gerçekleştirilmiş olup, açık yöntem olarak bilgisayar yazılımların kullanılmış olup sonuçlar grafik üzerinde karşılaştırılmıştır.

Friedlander [106] tarafından yürütülen çalışmada; yapı yüzeyine gelen şok dalgasının oluşturduğu basınç tayinine ilişkin bir fonksiyon önermiş olup, (t_c) şeffaflaştırma süresi, geliş açısı, impuls (itme) gibi parametrelerin tayinine ilişkin çalışmalar yürütmüştür.

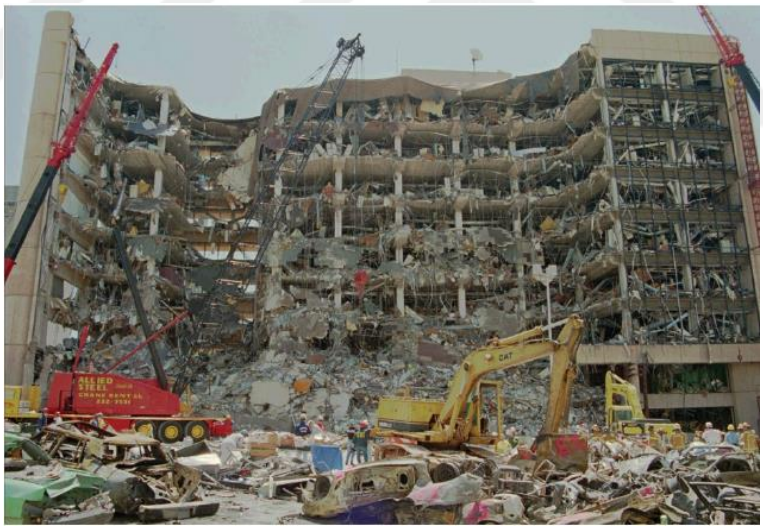
Sarı [107], Sarı vd [108 – 109] tarafından yürütülen çalışmalarda ise, betonarme ve çelik taşıyıcı sistemlerde patlayıcı yükü altındaki yapıların davranışı modelleri ve taşıyıcı sistemlerin patlama yüküne karşı davranışları, risk durumları ve verdikleri tepkiler üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

Sarı ve Barker [110] tarafından yapılan deneysel çalışmada ise bir ofis konteyneri 1000 lbs (453,6 kg) TNT patlayıcıya eşdeğer bir patlayıcı ile 110 ft mesafede patlama gerçekleştirilerek yapısal ve yapısal olmayan elemanların verdiği tepkiler üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

3
PATLAMA DAVRANIŞI

3.1 Giriş

Son yıllarda terörizm tüm dünya genelinde en büyük problemlerden biri haline gelmiştir, bu nedenle terör saldırılarına karşı tam korunma kesin çözüm beklemektedir. Patlayıcının fitilinin ateşlenmesiyle birlikte içinde bulunduğu ortam (içinde bulunan yapıları ve insanları) etkiler. Şekil 3.1'de [111] 19 Nisan 1995 yılında, The Alfred P. Murrah Federal Binası, Oklahoma City, A.B.D. de, toplam 2300 kg'lık suni gübre (amonyum nitrat), nitrometan, dizel yakıt karışımından oluşan patlayıcı ile terörist saldırısı gerçekleştirilmiş olup 168 kişi hayatını kaybetmiş ve 680 kişi yaralanmıştır.



Şekil 3.1 The Alfred P. Murrah Federal Binası, Oklahoma City, A.B.D. (terör saldırısı) [111]

Şekil 3.2'de [111] 20 Kasım 2003'de, İstanbul'da HSBC Genel Müdürlük Binası'na toplam 2350 kg'lık nitrik asit, hidrojen peroksit, aseton, beher ve suni gübre karışımı patlayıcı ile terör saldırısı düzenlenmiş olup patlamanın sonucunda 17 vatandaşımız hayatını kaybetmiş ve 205 vatandaşımız yaralanmıştır.



Şekil 3.2 HSBC Binası, İstanbul, Türkiye (terör saldırısı) [111]

Şekil 3.3'de [111] ise 11 Eylül 2001 tarihinde, Dünya Ticaret Merkezi'ne Boeing 767 tipi 2 adet uçak ile yapılan terörist saldırı sonucunda 2977 kişi hayatını kaybetmiş ve 6000'den fazla kişi yaralanmıştır. Bu saldırı sonucunda tüm dünyada etkisi hissedilmiştir. Mühendislik açısından değerlendirilirse, taşıyıcı sistemlere ilişkin tasarımlar, uzun süre tartışmaya açılmıştır.



Şekil 3.3 11 Eylül 2001 tarihinde, Dünya Ticaret Merkezi'ne yapılan terör saldırısı [111]

Patlama yükü sadece kendini terörist saldırı sonucu göstermeyebilir; doğalgaz patlaması, enerji odası, kazan dairesi patlaması ya da atık su giderindeki gaz sıkışmasından kaynaklı patlama (Şekil 3.4) ile de gösterebilir.



Şekil 3.4 Doğalgaz, kazan dairesi vb patlamalara ilişkin örnekler [112]

Araştırmacılar patlama yüküne karşı korunmanın artırılması adına, günümüze kadar ve deneysel sonuçlara dayanan değişik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Karmaşık yapılar bilgisayar analiz programları yardımı ile (AUTODYN, LS-DYNA vs.) kolayca ve hızlıca (ampirik formüllere göre) çözülebilir. Fakat geçmiş yıllarda bilgisayar analiz programlarının mevcut olmadığı dönemlerde) çözümler ampirik formülasyonlar ile yapılmaktaydı ve bu nedenle birçok araştırmacı tarafından patlama yüküne yönelik çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar 1950 yılı itibariyle patlama yükünün belirlenmesine yönelik ciddi oranda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

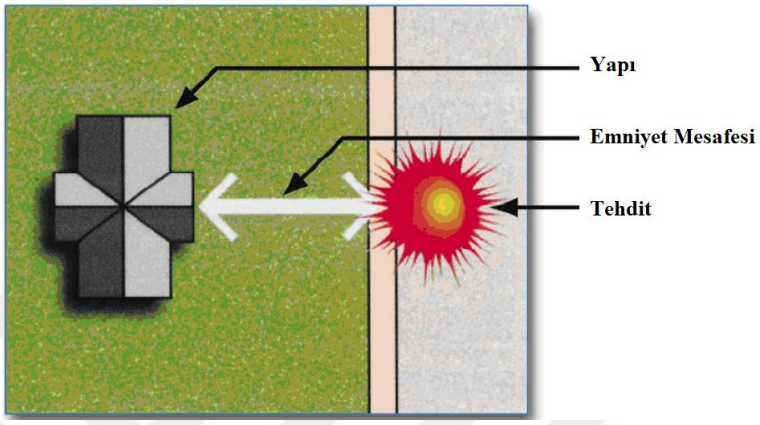
3.2 Teori

3.2.1 Patlama

Basitçe, bir patlama, kısa bir süre içinde büyük ölçekte kimyasal reaksiyonlarla bir enerji salınımı olarak ele alınır. Bu ani enerji salınımı, çevredeki havayı yüksek bir sıcaklığa (tipik olarak 3000 °C'de) ve çok yüksek bir basınca (yaklaşık 3×10^7 Pa) dönüştürür [18]. Şok dalgaları daha sonra çok yüksek hızda (7000 m/s) hareket eden yüksek basınçlı gazın olayın kaynağından uzak bölgelere yayılmasıyla oluşturulur [1],[2].

Emniyet Mesafesi

Tüm patlama parametreleri, patlama ile salınan enerji miktarına (veya yük ağırlığına) ve patlamanın başlangıcından belirli bir hedef için mevcut olan mesafeye bağlıdır. Bu nedenle, mesafe önemlidir ve emniyet mesafesi (standoff distance) olarak adlandırılır. Grafiksel olarak Şekil 3.5'de gösterilir [8].



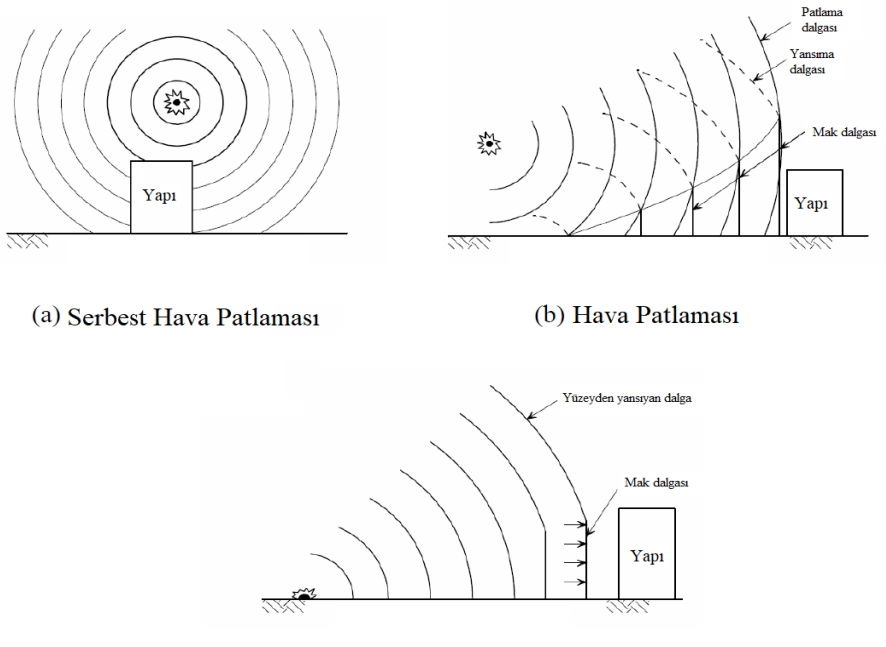
Şekil 3.5 Emniyet mesafesi [8]

3.2.2 Patlama Tipleri ve Sınıflandırması

Patlamalar; harici patlama ve dâhili, patlama olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır [1],[2],[8],[9].

İç patlamalar, kapalı bir konteyner veya bina içinde iç patlamalar meydana gelirken, dış patlamalar ise açık bir ortamda dışarıdaki patlamalardır. Daha fazla sınıflandırma yapmak gerekirse harici patlamalar; serbest patlama, sınırlanmış patlama ve bir yapıya bağlanmış patlama olarak sınıflandırılabilir [16].

Serbest patlamalarda üç tür patlama vardır: serbest hava patlaması, hava patlaması ve yüzey patlaması. Patlama, yer seviyesinden yüksek serbest havada meydana gelirse, serbest hava patlama patlaması olarak sınıflandırılır (Şekil 3.6-a). Hava patlaması yer seviyesinden yüksek serbest havada meydana gelse de, patlama dalgalarının yer yansımaları nedeniyle gerçekleşir (Şekil 3.6-b). Patlama, yer yüzeyine yakın veya yer yüzeyinde gerçekleştiğinde bir yüzey patlaması (Şekil 3.6-c) meydana gelir [16].

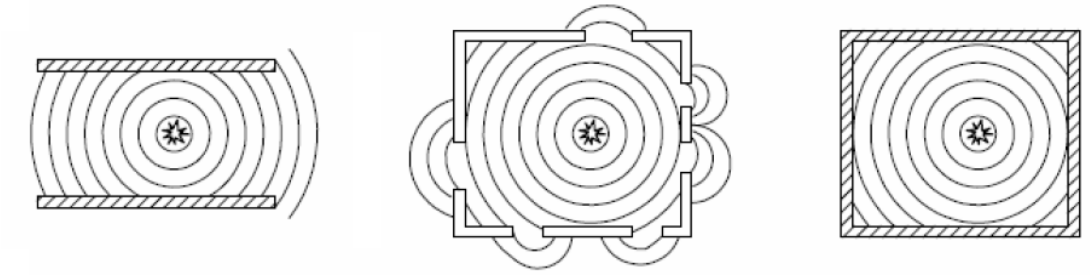


(a) Serbest Hava Patlaması (b) Hava Patlaması

(c) Yüzey Patlaması

Şekil 3.6 Harici patlamalar [16]

Bir yapı içerisinde; dâhili ya da kapalı bir patlama meydana geldiğinde, patlama; tamamen havalandırılmış, kısmen havalandırılmış ve tamamen kapalı olarak sınıflandırılabilir. Atmosfere bir veya daha fazla açık yüzeye sahip bir yapı içinde, tamamen havalandırılmış ya da sınırlı bir patlama yaratılır. Havalandırılan yüzeyler tamamen kapalı bir sistemden daha sınırlıysa, kısmen havalandırılmış sınırlı bir patlama olduğu söylenir. Tamamen kapalı bir sistemde meydana gelirse, tamamen kapalı bir patlama haline gelir (Şekil 3.7), bunların her birini basit ayrı diyagramlarla gösterir [16].

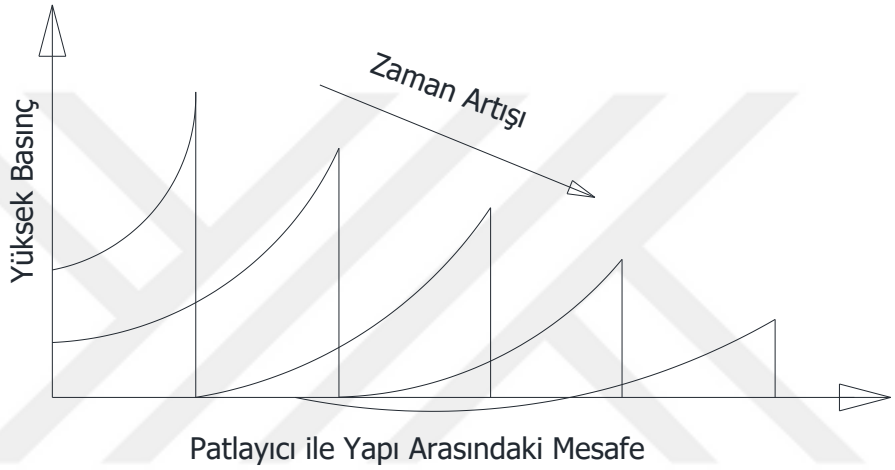


(a) Tamamen havalandırılmış (b) Kısmen havalandırılmış (c) Tamamen kapalı

Şekil 3.7 Dâhili patlama sınıflandırması [16]

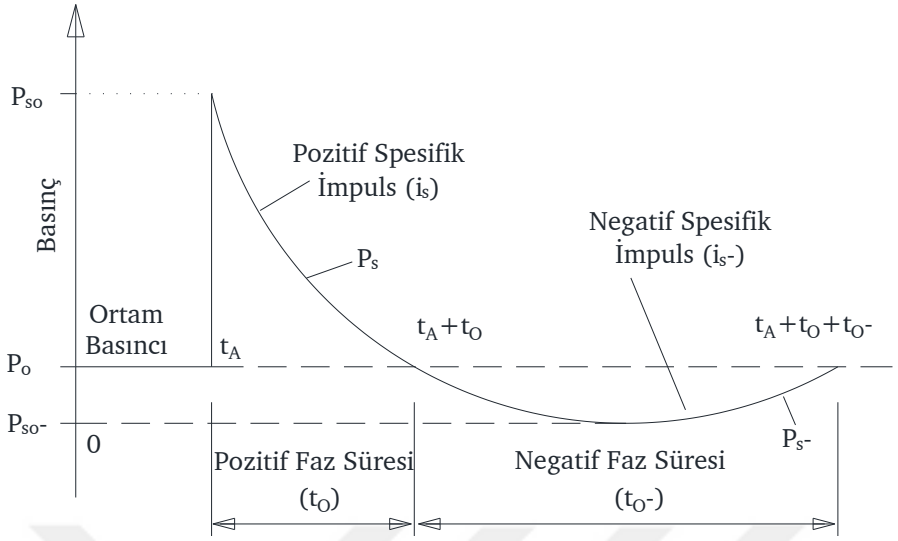
3.2.3 Patlama Davranışı

Hava patlayıcı dalgalarının karakteristiği gözlemlendiğinde; patlayıcının fiziksel özelliklerinden etkilendiği görülmüştür. Şekil 3.8'de tipik patlama basıncı profili görülmektedir; oluşan patlama ile birlikte basıncın aniden pik noktaya ulaştığı görülür. Ardından belirli bir zaman sonra ise pik basınç ortam basıncına kadar düşerek negatif basınca ulaşır (vakum) Ve atmosfer basıncı seviyesine geri döner (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Patlama yüküne bağlı, basinç – uzaklik grafiği [1],[2],[10]

Meydana gelen pik noktaları (P_{so}); patlama esnasında sok dalgaları yansıtıcı faktör ile karşılaşırsa (örneğin yapı elemanı) büyür. Yansıtıcı faktörler sok dalgasının yoğunluğuna bağlıdır. Büyük patlamalarda yansıtıcılar basıncın artmasına sebebiyet verir. Şekil 3.9 incelendiği zaman iki önemli faz gözlenir. P_o ortam basıncının üzerinde kalan dilim t_o (pozitif faz süreci) iken P_o'nun altında kalan dilim ise t_o- (negatif faz süreci) adını alır. Negatif faz süreci (t_o-) pozitif faza göre daha uzun sürer ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. R uzaklığı artarsa pozitif faz süreci de artar (düşük genlik ve uzun süreli sok dalgası). Patlayıcı hedefe yakın durumda ise; patlama yüksek etkide, yüksek yoğunlukta oluşur ve basınç yapının lokal bölgesine etkir. Patlayıcı hedeften uzaklaştıkça yoğunluk düşer ve uzun süreli üniform basınç tüm yapıya etkir. Sonuçta tüm yapı sok dalgası tarafından yansıtma ve dağıtma etkisi ile birlikte yutulur. Negatif fazda iken zayıflayan yapı vakum etkisi dâhilinde moloz darbelerine maruz kalarak ekstra hasar alabilir.



Şekil 3.9 Patlama yükü altında basınç – zaman grafiği [1],[2]

Patlama pik basınç – zaman davranışı, sonsuz hedef boyutları varsayılarak, yalnızca pozitif faz dikkate alınarak Friedlander denklemi (3.1) ile matematiksel olarak temsil edilebilir [109]:

$$P(t) = P_{so}\left(1 - \frac{1}{t_o}\right) exp\left(\frac{-bt}{t_o}\right) \qquad (3.1)$$

Burada;

t_o: patlamanın pozitif faz süresi, b: dalga biçimi parametresi (boyutsuz parametre), t: patlama dalgası çıktığı andan itibaren ölçülen zaman, $P(t)$: t anındaki basıncı ifade eder.

Doğrudan patlama tarafından oluşturulan şok basıncı, olay pik basınç-zaman davranışı ile temsil edilir. Ayrıca dinamik basınç denilen patlamayı takiben başka bir tür şok dalgası formu vardır. Ön dalganın arkasındaki gaz parçacıkları daha düşük hızlarda hareket ederken, arkasındaki hava kütlesinin akışı bir rüzgâr oluşturur. Dinamik basınç, şok cephesinin arkasındaki bu rüzgârla ilişkilidir. Hava yoğunluğu ve rüzgâr hızının bir fonksiyonudur. Normal atmosfer koşullarında düşük basınç aralığında, tepe dinamik basınç q_o Newmark [18] tarafından geliştirilen ampirik formül (3.2) bağıntısı kullanılarak belirlenebilir;

$$q_o = \frac{2{,}5P_{so}^2}{(7P_o + P_{so})} \quad (3.2)$$

Belirli bir yapı üzerindeki net dinamik basınç, yapının şekline ve yönüne bağlı olan bir parametre olan dinamik tepe basıncı q_o, sürükleme katsayısı, C_D ile çarpılarak hesaplanabilir [1],[2],[106].

3.2.4 Risk Sınıfları

Bir patlama gerçekleştiğinde, şok dalgaları kapı ve pencerelerden içeriye kat ederek yapı elemanlarını etkiler. Geliştirilen [1], [2] P-I (basınç – momentum) eğrileri doğrultusunda patlamadan kaynaklı hasarlar tespit edilebilmiştir. Aşağıdaki Tablolardan görüleceği üzere patlama yükü karşısında risk kıstasları ve yapının durumu ile ilgili önerilere yer verilir. Risk kıstasları [113] ile ilgili toplamda 3 kısımda incelenebilmekte olup bunlar; genel yapılar, endüstriyel yapılar ve cam paneller olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 3.1'de genel yapılara ilişkin risk kıstasları verilmiştir. Tablo 3.2'de ise çelik ve betonarme taşıyıcı sisteme sahip endüstriyel yapılara ilişkin risk kıstasları yer almaktadır. Çelik ve betonarme taşıyıcı sistemler, cam paneller gibi kırılgan malzemelere oranla patlama yüküne en az tepki veren malzemelerden olup, patlama sırasında oluşan basınç esnasında (ki öngörülen yüksek basınçlara dayanabilirler) malzemelerin elastik limitlerinin aşılmasıyla birlikte büyük plastik deformasyon kapasitesi sergileyebilirler. Bu yapılar yalnızca patlama yükünün pik seviyede olması durumunda (en az elastik limitin iki misli) yük taşıma kapasitelerini kaybederler ve yıkılırlar. Cam paneller için ise Tablo 3.3'de risk kıstasları verilmiş olup patlama esnasında genellikle şok dalgasının etkisiyle cam paneller kırıldığı gözlemlenir.

Tablo 3.1 Genel yapılara ilişkin risk kıstasları [113]

Pik Basınç (MPa)	Etki
4,5	Önemsiz yapısal hasarlar için sınır değeri. Düğüm noktaları ve bölmelerde burulma.
17,0	Büyük yapısal hasarlar için sınır değeri. Bazı taşıyıcı elemanlarda göçme.
40,0	Kısmi yıkılma için sınır değeri. Duvarların yaklaşık %50 - %75'i yıkılır ya da kullanılmaz hale gelir.

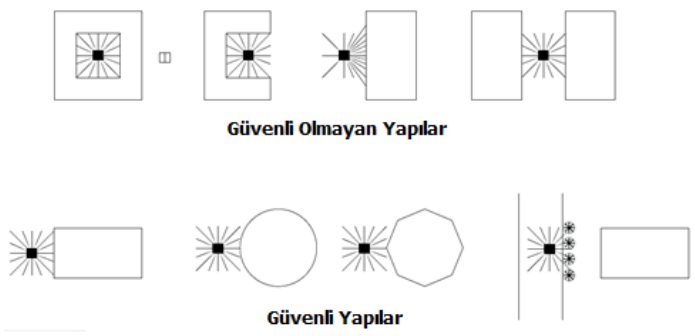
Tablo 3.2 Modern ve endüstriyel yapılara ilişkin risk kıstasları [113]

Pik Basınç (MPa)	Etki
1,5	Çelik yapılar için küçük hasar sınır değeri. Bazı kalıcı hasarlar beklenebilir.
3,0	Çelik yapılar için büyük hasar sınır değeri. Bazı elemanlarda göçme yaşanabilir.
1,7	Betonarme yapılar için küçük hasar sınır değeri. Bazı kalıcı hasarlar beklenebilir.
3,4	Betonarme yapılar için büyük hasar sınır değeri. Bazı elemanlarda göçme yaşanabilir.

Tablo 3.3 Cam panellere ilişkin risk kıstasları [113]

Pik Basınç (MPa)	Etki
1,0	Cam paneller için küçük hasar sınır değeri. Cam panellerin %5'i kırılır.
3,0	Cam paneller için büyük hasar sınır değeri. Birçok cam panel kırılır. Cam parçaları yüksek hızda saçılır.

Dr. Baker [113] tarafından hazırlanan yapı geometrilerinin tasarımına ilişkin, patlama etkisi altında yapının dirençli davranış gösterebilmesi için tasarı önerileri Şekil 3.10'te gösterilir.



Şekil 3.10 Güvenli olan ve güvenli olmayan yapı tasarımları [113]

3.3 Ampirik Bağıntılar

3.3.1 Üçüncü Kök Ölçekleme Yasası

Patlama yükünün değerlerinin hesabı temel bazı temel parametrelere bağlıdır, bunlar; uzaklık ve patlayıcı kütlesidir. Bu temel parametreler kombine edilerek tek bir parametreye dönüştürülmüş olup bu teoreme "Üçüncü Kök Ölçekleme Yasası" denir ve denklem (3.3) ile gösterilir ve Hopkinson ve Cranz [15] tarafından bulunmuştur. Yapılan araştırmaların çoğu bu teoremden elde edilen değer (Z) temel alınarak oluşturulmuştur.

$$Z = {}^{R}/_{\sqrt[3]{W}} \tag{3.3}$$

Burada; Z: ölçeklendirilmiş uzaklığı (m/kg$^{1/3}$), R: yapı ile patlayıcı arasındaki mesafeyi (m), W: patlayıcının kütlesini (TNT; kg) ifade eder.

3.3.2 Patlayıcı Kütlesi ve Isı Enerjisi

Z (ölçeklendirilmiş uzaklık) parametresinde TNT temel birimdir; eğer farklı bir patlayıcı kullanılmış ise, bu patlayıcı eşdeğer TNT kütlesine dönüştürülmelidir ve bunun hesabına ilişkin (3.4) denklemi [1],[2];

$$W_e = W_{exp} \frac{H^d_{exp}}{H^d_{TNT}} \tag{3.4}$$

Burada; W_e: TNT eşdeğer kütlesini (kg), H^d_{exp}: Kullanılan patlayıcının birim kg'da ısı enerjisini (MJ/kg), H^d_{TNT}: TNT'nin birim kg'da ısı enerjisini (MJ/kg) ifade eder.

Örneğin; Hiroşima'ya 6 Ağustos 1945 tarihinde bırakılan Little Boy isimli atom bombası, 15 kilotonluk (63 Terajoule; 10^{12} joule) bir kuvvetle patlamıştır ve atom bombalarının açığa çıkardığı enerji 5.10^5 ton TNT'ye eş değer olabilir [136].

Ayrıca Tablo 3.4'de; sık kullanılan patlayıcıların eşdeğer TNT dönüşümleri verilmiştir.

Tablo 3.4 Sık kullanılan patlayıcıların eşdeğer TNT dönüşümleri [10]

Patlayıcı	Spesifik Enerji	TNT Eşleniği
	Qx / kj/kg	Qx / QTNT
Compound B	5190	1,148
RDX	5360	1,185
HMX	5680	1,256
Nitrogliserin (sıvı)	6700	1,481
TNT	4520	1,000
Patlayıcı Gelatin	4520	1,000
60 % Nitrogliserin Dinamit	2710	0,600
Semteks	5660	1,250
C4	6057	1,340

Ayrıca; Mays ve Smith [10] tarafından yapılan çalışmalarda terörist saldırısı durumunda kullanılan araçlara ilişkin patlayıcı yükleme kapasitelerini (Tablo 3.5) içeren bir araştırma da mevcuttur.

Tablo 3.5 Bazı araçların tahmini yük kapasiteleri [10]

Araç Tipi	Yük Kapasitesi (kg)
Binek Araba Bagajı	115
Geniş Araba Bagajı	230
Kapalı Kamyonet	680
Kapalı Kamyon	2270
Römorklu Kamyon	13610
Çift Römorklu Kamyon	27220

Patlama yüküne ilişkin parametrelerin çalışmaları 1950 itibariyle hız kazanmıştır, bu yönde yapılan çalışmalar ise su şekilde listelenebilir;

3.3.3 Brode Modeli

Brode [17]; 1955 yılında yaptığı çalışmada, küresel patlamadan dolayı oluşan ve yaklaşık pik basınç (P_{so}) değerinin ölçeklenmiş uzaklığa bağlı olduğunu ifade etmiştir. ($Z=R/W^{1/3}$) ölçeklenmiş uzaklık, (R) uzaklığı ve (W) ise patlayıcının kütlesi olmak üzere P_{so}'nun 10 bar'dan (1 MPa) büyük ve 10 bar'dan (1 MPa) küçük olmak üzere düzenlenmiş iki ayrı denklem (3.5), (3.6) düzenlenmiştir.

$$P_{so} = \frac{6,7}{Z^3} + 1\ (bar)(P_{so} > 10\ bar) \tag{3.5}$$

$$P_{so} = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019\ (bar)(0,1\ bar < P_{so} < 10\ bar) \tag{3.6}$$

3.3.4 Newmark ve Hansen Modeli

Newmark ve Hansen [18]; 1961 yılında yapılan çalışmada ise zeminde oluşan patlamanın pik basınç değeri bar cinsinden ifade edilmiştir, bu basınç ifadesinin fonksiyonu denklem (3.7) yine uzaklık (R; m) ve patlayıcı kütlesi (W; kg) cinsinden ifade edilmiştir.

$$P_{so} = 6784.\frac{W}{R^3} + 93.\left(\frac{W}{R^3}\right)^{1/2}\ (bar) \tag{3.7}$$

3.3.5 Mills Modeli

Mills [19]; tarafından 1987 yılında yapılan çalışmada ise: pik basınç (P_{so}), KPa cinsinden ifade edilmiş olup, patlama yükü fonksiyonu (3.8) bağıntısı ile ifade edilir. Buna göre; W, TNT patlayıcısının kg cinsinden ağırlığı ve Z ölçeklendirilmiş uzaklık ($m/kg^{1/3}$) parametreleri ile ifade edilmiştir.

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}\ (kPa) \tag{3.8}$$

Patlama dalgasının havaya yayılmasıyla birlikte, şok dalgasının önündeki hava düşük hızla harekete başlar. Hava partiküllerinin hızı ve bundan dolayı oluşan rüzgâr basıncı, patlama dalgasının pik basıncına (P_{so}) bağlıdır. Burada oluşan rüzgârın hızı dinamik basınç dinamik basınç ile ilişkilidir. Denklem (3.9)'a göre, q_t: dinamik basınç (kPa), q_s: en büyük dinamik basıncı (kPa) ifade eder.

$$q_s = 5p_{so}^2/2(p_{so} + 7p_o)\ (kPa) \quad (3.9)$$

Eğer; patlama dalgası, yayılma doğrultusuna dik doğrultuda bir engelle karşılaşırsa; yansıtma eylemi, basıncı en büyük seviyeye yükseltir. Denklem (3.10)'a göre, P_r; yansıma basıncı (MPa) olarak tanımlanmıştır.

$$P_r = 2P_{so}\left\{\frac{7P_o+4P_{so}}{7P_o+P_{so}}\right\}\ (MPa) \quad (3.10)$$

3.3.6 Mays ve Smith Modeli

Mays ve Smith [10]; tarafından 1955 yılında yapılan çalışmada ise, patlama anında ilk çıkan dalganın hızı, U_s için denklem (3.11) ve dinamik basınç değeri, q_s içi denklem (3.12) bağıntıları önermiştir. Ayrıca P_r (yansıyan basınç) değeri için öngörülen uzaklık (R; m) ve ağırlık değerleri (W; kg) için oluşacak P_r (bar) değerlerini bir tabloya (Tablo 3.6) dönüştürmüştür.

$$U_s = a_0\sqrt{\frac{6p_s+7p_0}{7p_0}}, (m/s) \quad (3.11)$$

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s+7p_0)}, (\text{bar}) \quad (3.12)$$

Buradaki parametreler; P_s: pik basınç (bar), P_0: ortam basıncı (bar), α_0: ses hızı'nı (m/s) ifade eder.

Tablo 3.6 P_r (yansıyan basınç, MPa) değeri için W-R eşleşme tablosu [10]

W / R	100 kg TNT	500 kg TNT	1000 kg TNT	2000 kg TNT
1 m	165,8	354,5	464,5	602,9
2,5 m	34,2	89,4	130,8	188,4
5 m	6,65	24,8	29,5	60,19
10 m	0,85	4,25	8,15	14,7
15 m	0,27	1,25	2,53	5,01
20 m	0,14	0,54	1,06	2,13
25 m	0,09	0,29	0,55	1,08
30 m	0,06	0,19	0,13	0,63

3.3.7 Biggs Modeli

Biggs [20]; tarafından, 1964 yılında yapılan çalışmalara göre ise, yapılar tek serbestlik dereceli sistem gibi (SDOF) düşünülerek patlayıcının bazı önermeler geliştirilmiştir. Sönümsüz, elastik SDOF sistemin hareketi denklem (3.13) bağıntısı ile tanımlamıştır; (t_d: pozitif faz süresi (ms), F_m: pik kuvvet (N).

$$M\ddot{y} + Ky = F_m\left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \tag{3.13}$$

Yerdeğiştirme, denklem (3.14);

$$y(t) = \frac{F_m}{K}(1 - \cos\omega t) + \frac{F_m}{Kt_d}\left(\frac{\sin\omega t}{\omega} - t\right) \tag{3.14}$$

Hız, denklem (3.15);

$$\dot{y}(t) = \frac{d\dot{y}}{dt} = \frac{F_m}{K}\left[\omega\sin\omega t + \frac{1}{t_d}(\cos\omega t - 1)\right] \tag{3.15}$$

Olarak ifade edilmiştir. Burada: ω, yapı titreşiminin doğal açısal frekansı; T, yapı titreşiminin doğal periyodunu temsil eder.

3.3.8 Henrych Modeli

Henrych [21]; 1979 yılında yaptığı çalışmalarda, önerilen bağıntıda ise (P_s) parametresinin hesabı Brode tarafından önerilen bağıntı ile benzerlikler gösterse de, yapılan çalışmalarda sonuçların deneysel, AUTODYN ve UFC 3-340-02 sonuçları ile yakınlık gösterdiği görülmüştür. Yaptığı çalışmanın sonucu olarak, ölçeklendirilmiş uzaklığın (Z; $m/kg^{1/3}$) mesafesine bağlı olarak üç farklı bağıntı denklem (3.16) önermiştir.

$$P_{so} = \frac{14{,}072}{Z} + \frac{5{,}54}{Z^2} - \frac{0{,}375}{Z^3} + \frac{0{,}00625}{Z^4}\ (0{,}05 \le Z \le 0{,}3)$$

$$P_{so} = -\frac{6{,}194}{Z} - \frac{0{,}326}{Z^2} + \frac{2{,}132}{Z^3}\ (0{,}3 \le Z \le 1) \tag{3.16}$$

$$P_{so} = \frac{0{,}662}{Z} + \frac{4{,}05}{Z^2} + \frac{3{,}288}{Z^3}\ (1 \le Z \le 10)$$

3.3.9 Kingery ve Bulmash Modeli

Kingery ve Bulmash [22]; ise 1984 yılında, yapı yüzeyine temas eden en büyük patlama yükü hesabı için Z değerine bağlı olarak çok fazla sabit içeren polinom denklemi önermiştir. (Hatta AUTODYN yazılımının da hesap için kullandığı denklemlerden biridir);

$$\Delta P_f = Exp[A + B.lnZ + C.(lnZ)^2 + D.(lnZ)^3 + E.(lnZ)^4], (kPa) \qquad (3.17)$$

(3.17) polinomundaki sabitler (A, B, C, D ve E) için ise Tablo 3.7'daki Z (ölçeklendirilmiş uzaklık) değerlerine karşılık gelen sabitler kullanılabilir.

Tablo 3.7 Polinomdaki (A, B, C, D ve E) sabitlerini içeren tablo [22]

Z ($m/kg^{1/3}$)	A	B	C	D	E
0,2 – 2,9	7,1206	-2,1069	-0,3229	0,1117	0,0685
2,9 – 23,8	7,5938	-3,0523	0,40977	0,0261	-0,01267
23,8 – 198,5	6,0636	-1,4066	0	0	0

3.3.10 Kinney ve Graham Modeli

Kinney ve Graham [23]; 1985 yılında, patlama esnasında yapı üzerinde oluşan pik basıncı (bar) tarif eden bir formülasyon; (3.18) denklemi ile ifade edilir, buna göre;

$$P_{so} = P_o \frac{808\left[1+\left(\frac{Z}{4,5}\right)^2\right]}{\left\{\left[1+\left(\frac{Z}{0,048}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{Z}{0,32}\right)^2\right]\left[1+\left(\frac{Z}{0,35}\right)^2\right]\right\}^2}, (bar) \qquad (3.18)$$

3.3.11 Sadovsky Modeli

Sadovsky [24]; 2004 yılında yapılan çalışma sonucuna göre, patlama esnasında yapı üzerinde oluşan pik basıncı (MPa) bir polinom (3.19) polinomu ile tanımlanmıştır.

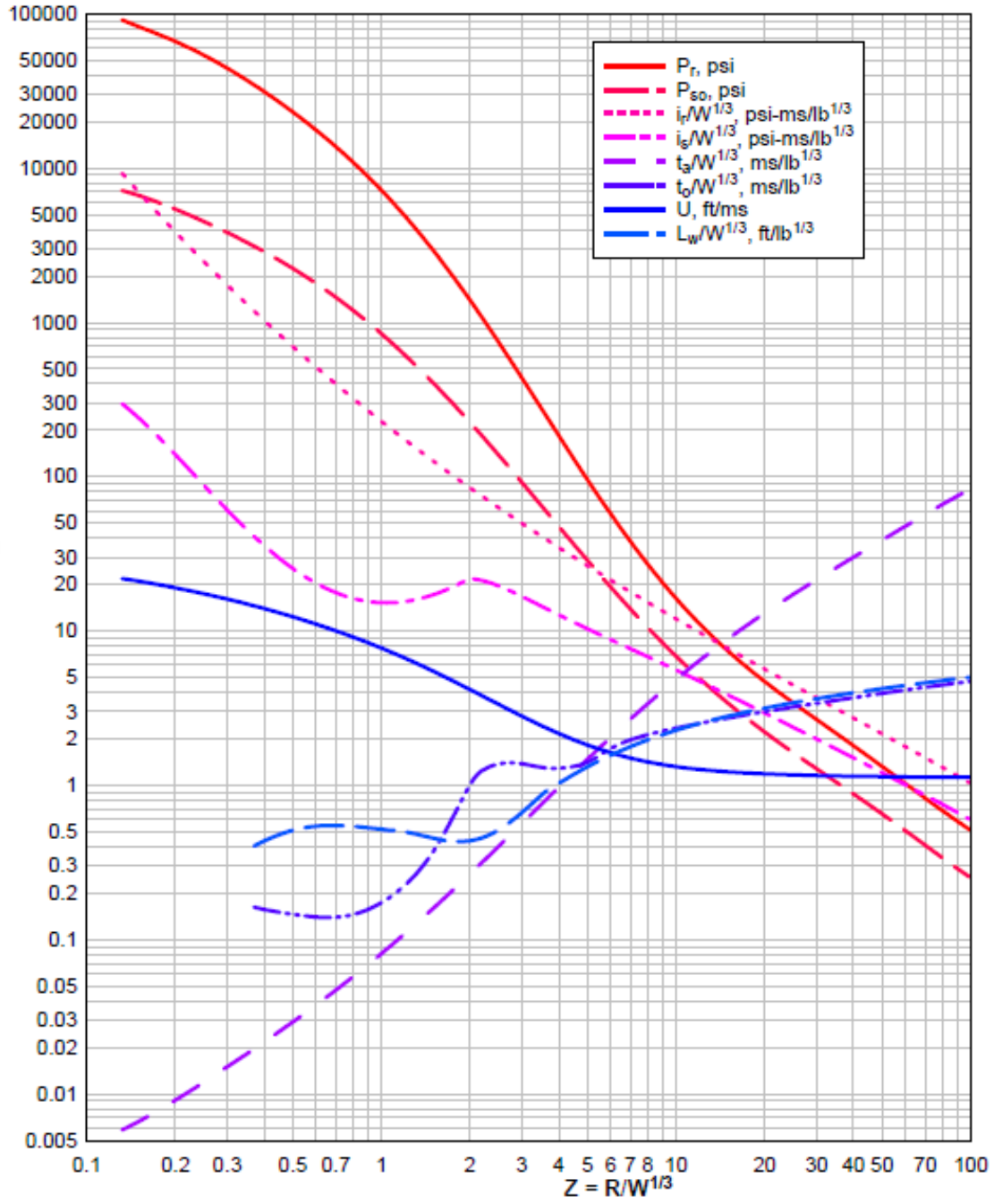
$$\Delta P_f = \frac{0,85}{Z} + \frac{0,3}{Z^2} + \frac{0,8}{Z^3}, (MPa) \qquad (3.19)$$

Olarak ölçeklendirilmiş uzaklığa (Z) bağlı olarak ifade edilmiştir. Patlama yükü parametreleri Şekil 3.9'deki grafik doğrultusunda hesaplanmakla birlikte, diğer tüm parametreler Şekil 3.11'de ile hesaplanır.

3.4 UFC 3-340-02 Standartları

Unified Facilities Criteria; ABD Ordusu tarafından hazırlanan bu kapsamlı çalışma; düşük ya da yüksek tüm basınç sınıfları için güncel ve yaygın kullanılan kaynakların başında gelir; tüm askeri ve sivil yapılar ile insan ve değerli eşyaların korunmasına yönelik olarak patlayıcılara karşı yapıların tasarımı için oluşturulmuştur. Adım – adım analiz ve tasarım prosedürleri; patlama yükü ve şok yükü hesap yöntemleri; analiz prensipleri; çok sayıda önlem, kırılganlıklara ilişkin önlemler (şok izolasyonu vb.); pencere ve kapı gibi açıklıkların güvenliği gibi bilgiler içerir. Patlama yükü parametrelerinin tespiti için Ölçeklendirilmiş uzaklık ile nümerik değerler kolaylıkla tespit edilebilir. (Şekil 3.11) [1] [53].

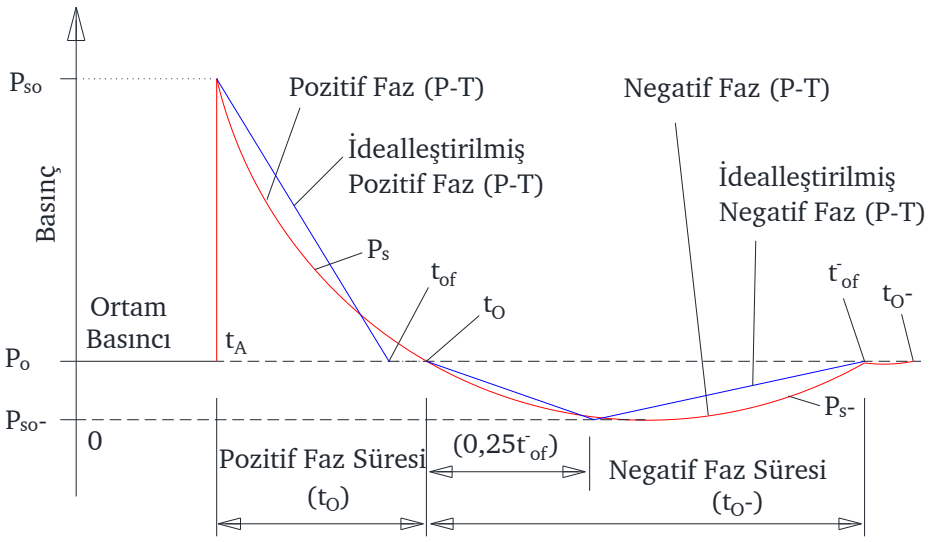
Grafikteki parametreler; U: dalgası hızı (m/ms), L_w: dalga boyu (m), P_{so}=pik basınç (bar), i_s: impuls (ms), i_r: yansıyan impuls (ms), t_o: pozitif faz süresi (ms), t_A: dalganın ulaşma süresi (ms) ve L_w: dalga boyu (ms) olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.11 TNT patlayıcısının serbest patlama durumunda, pozitif faz etkisi altındaki parametreler [1]

3.4.1 Yapı Yüzeyine Etkiyen Patlama Yükü

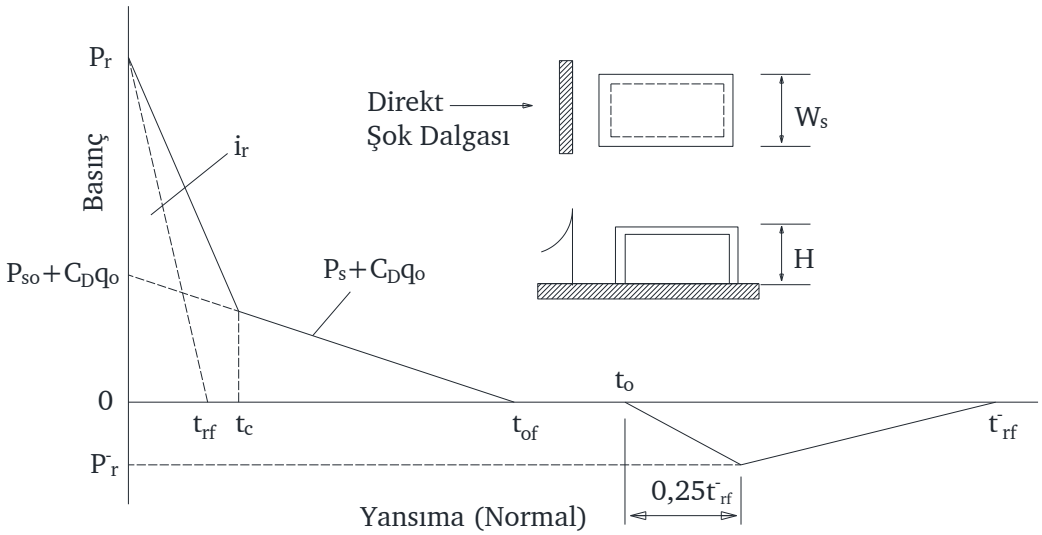
Patlama yüküne ilişkin dinamik gerilme, pik basınç gibi temel parametrelere üzerinden saptanabilir. Ayrıca patlama yüküne ilişkin diğer parametreler Şekil 3.12'deki patlama – zaman grafiği yardımı ile tespit edilebilmekte olup tüm parametreler idealleştirilmiş üçgen form grafik ile de elde edilebilir.



Şekil 3.12 İdealleştirilmiş patlama – zaman grafiği [1],[2]

3.4.2 Üçgen Form

Bir yapıya patlama yükü etki ettiğinde, şok dalgası yapıyı çevreler ve basınç etkisi uygular. Patlama yüküne ilişkin hesapların yapılması için basınç – zaman grafiği yerine idealleştirilmiş üçgen form grafiği (Şekil 3.13) yardımı ile gerekli hesaplar yapılabilir.



Şekil 3.13 İdeal üçgen form kabulü ile hazırlanan basınç – zaman grafiği [1],[2]

Üçgen form grafiğine göre; t_o pozitif faz süresinin yerini t_{of} fiktif süre (ms) almıştır ve bu fiktif süre denklem (3.20) şu şekilde tanımlanır;

$$t_{of} = \frac{2i_s}{P_{so}} \tag{3.20}$$

Burada;

i_s: pozitif fazın impuls (kPa-ms) değeri ve P_{so}: pik basıncı ifade eder.

Aynı şekilde negatif faz için fiktif süre (ms) denklem (3.21) ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$t_{of}^{-} = \frac{2i_s^{-}}{P_{so}^{-}} \tag{3.21}$$

Burada;

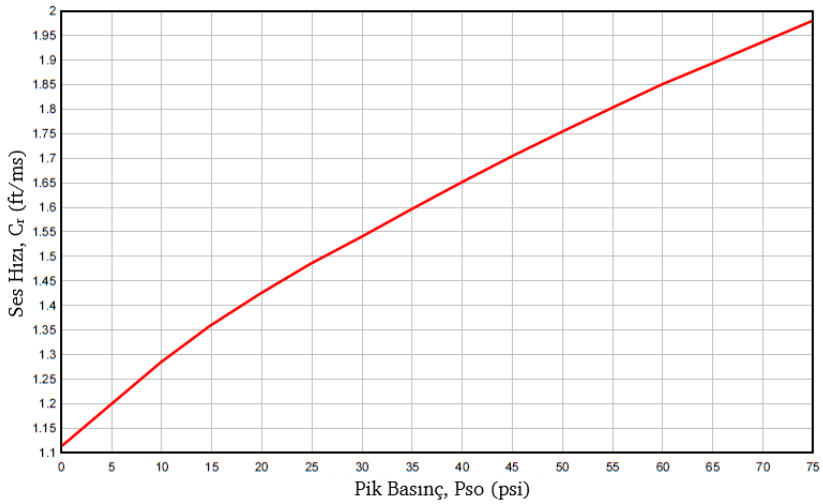
i_s-:negatif fazın impuls (kPa-ms) değerini ve P_{so}-: negatif pik basıncı (kPa) olarak tanımlanır.

Pozitif faza ait fiktif süre, negatif faza ait fiktif süreden daha kısa olmasına karşın; pozitif faza ait pik basınç ise negatif faza ait pik basınçtan daha yüksektir. Şekil 3.13'deki grafikte görülen (t_c; ms) şeffaflaştırma süresi denklem (3.22) ile şu şekilde hesaplanabilir;

$$t_C = \frac{4S}{(1+R).C_r} \tag{3.22}$$

Burada;

S: yapı yüzeyinin en kısa uzunluğu (H veya W/2), C_r: ses hızı (Şekil 3.14'daki grafik üzerinden hesaplanabilir) ve R: S/G oranı; G, ise yapı yüzeyinin en uzun kenarını (H veya W/2) ifade eder.

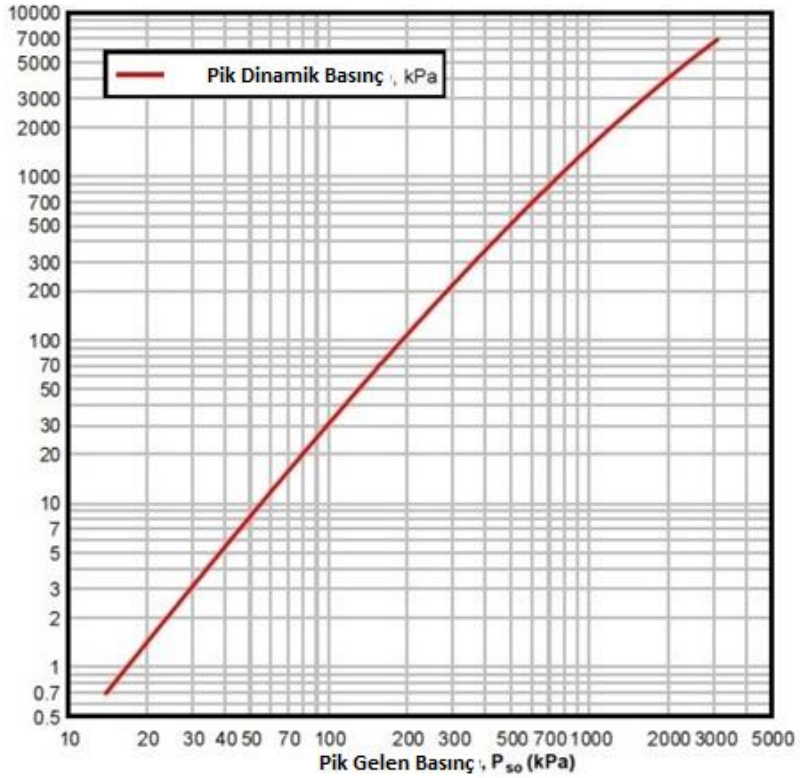


Şekil 3.14 Yansıyan pik basınç – ses hızı grafiği [1]

Fiktif zaman t_{Crf} (ms) ise (3.23) denklemi yardımıyla hesaplanabilir; (i_r ve P_r Şekil 3.11'deki grafikten elde edilebilir.)

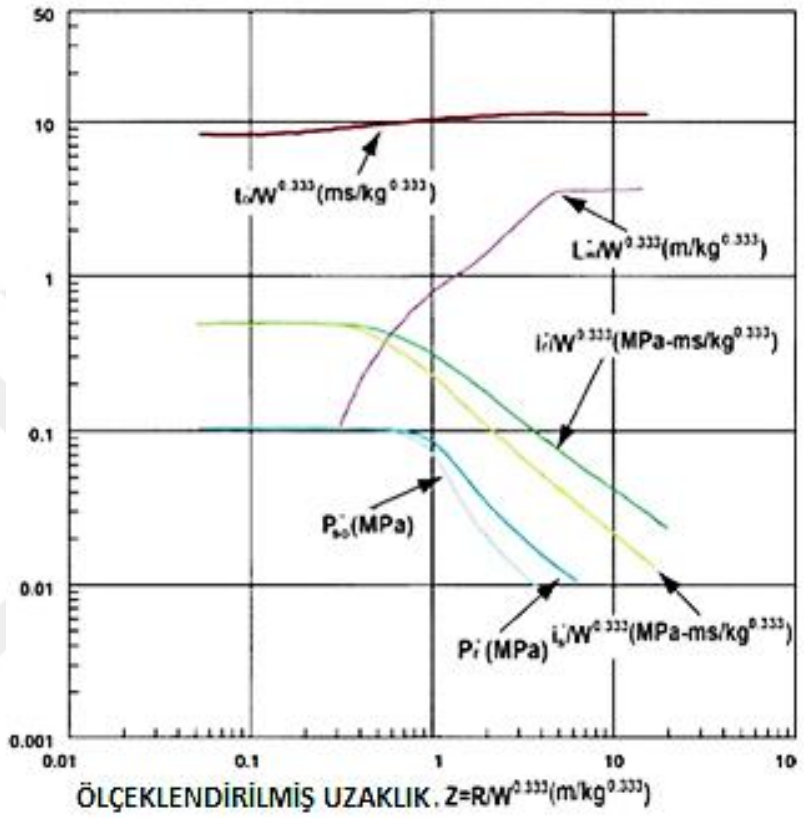
$$t_{Crf}=2_{ir}P_r \tag{3.23}$$

Pik dinamik basınç q_o (kPa) ise Şekil 3.15'deki grafik üzerinden tespit edilebilir. Şekil 3.13'daki grafikte ifade edilen $P_{so}+C_Dq_o$ değeri ise $C_D=1$ (direnç katsayısı) alınmak suretiyle tespit edilebilir.



Şekil 3.15 Pik dinamik basınç – pik gelen basınç grafiği [1],[53]

Şok dalgası bir yapıya etki ettiği zaman negatif faz evresi (t_{rf}-) pozitif faza benzer şekilde hesaplanabilir. Bazı önemli parametrelerden olan negatif pik gelen basınç, normal yansıma basıncı ve negatif ölçeklenmiş gelen basınç Şekil 3.16'de verilen grafik üzerinden okunabilir.



Şekil 3.16 TNT'nin infilak etmesiyle oluşan şok dalgasının negatif fazında oluşan parametreler [1],[53]

Negatif faz süresi t_{rf}- (ms) ise (3.24) denklemi yardımıyla hesaplanabilir;

$$t_{rf}- = 2_{ir}P_r \tag{3.24}$$

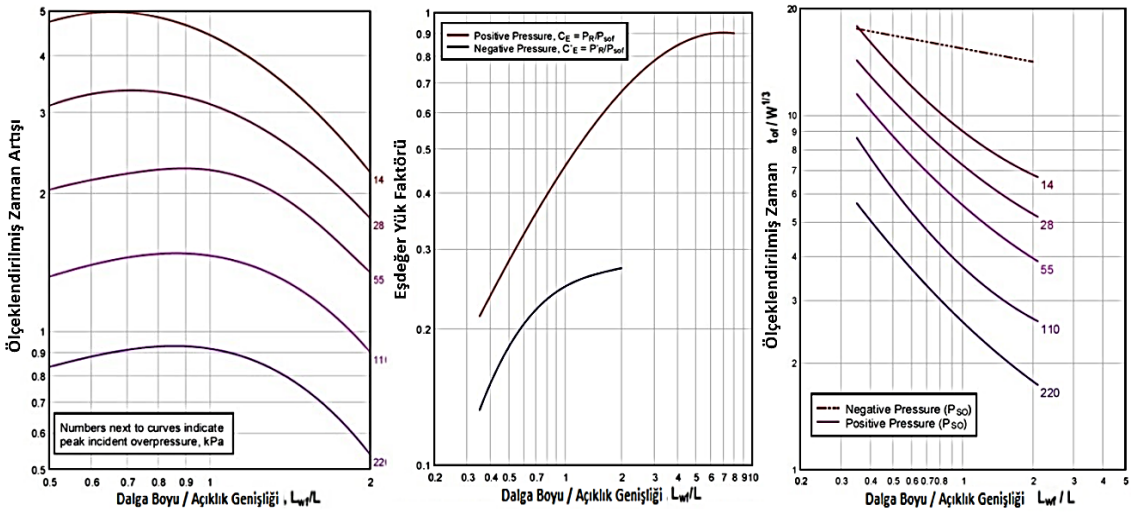
Negatif fazın hesaplanmasının ardından, en küçük pik basınç değeri üçgen form basınç zaman grafiği üzerindeki (t_o + 0,25 t_{rf}-) zamanındaki basınç değeri okunarak elde edilebilir.

Patlama yükü, yapının yan duvarlarını sarıp etki edebilir ve bu durum ise benzer bir şekilde hesaplanır. Buna göre Şekil 3.17 (a:c) grafiklerindeki parametreler; C_E (eşdeğer pozitif yük faktörü), C_E- (eşdeğer negatif yük faktörü), t_d (yetişme süresi; ms), t_{of} (pozitif faz süresi; ms)'dir. Dinamik basınç q_o Şekil 3.15'daki grafik

üzerinden ve negatif faza ait direnç katsayısı C_D ise aşağıdaki Tablo 3.8 yardımı ile tespit edilebilir.

Tablo 3.8 Direnç katsayı değerleri (C_D) [1]

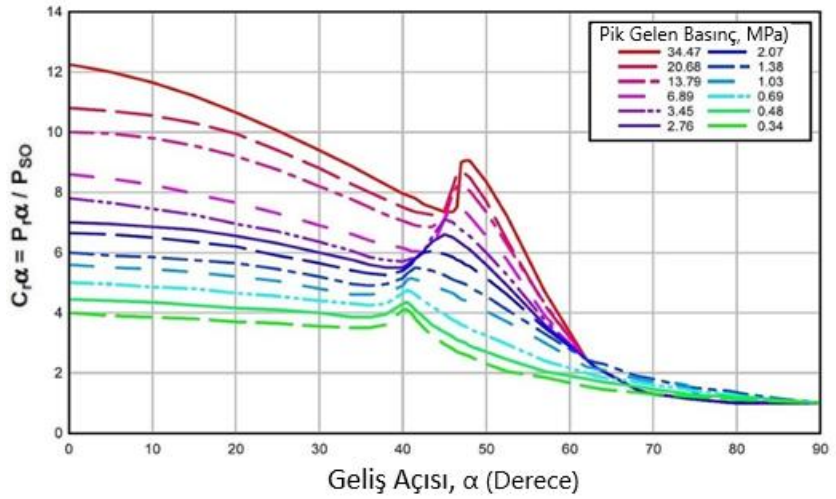
Pik Dinamik Basınç (kPa)	C_D (Direnç Katsayısı)
0-170	-0,40
170-350	-0,30
350-900	-0,20



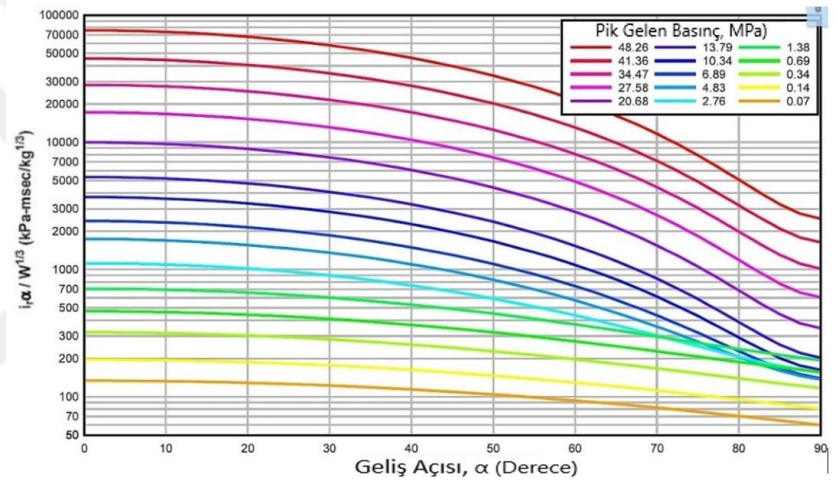
(a) yük faktörleri; C_E and C_{E^-} (b) yetişme zamanı (t_d) (c) pozitif faz süresi (t_{of})

Şekil 3.17 C_E, C_{E^-}, t_d ve t_{of} parametrelerini gösteren grafikler [1],[53]

Söz konusu yetişme zamanı (t_d; ms), (0,25 t_{of^-}) ifadesi ile hesaplanabilir; t_{of^-} ise negatif faz süresi olarak tanımlanır. Açıklanan tanımlar, denklemler ve ifadeler ile tüm patlama yükü parametreleri hesaplanabilir ve idealleştirilmiş üçgen form basınç negatif zaman grafiği çizilebilir. Şok dalgasının yapıya etkidiği açı, yapıya etkiyen basınç ve yapı ile patlayıcı arasındaki mesafe; patlama yükü parametrelerini doğrudan etkiler. Sonuç olarak, $C_r\alpha$ (açıya bağlı ölçeklendirilmiş yansıma basıncı; kPa) ve $i_r\alpha$ (açıya bağlı ölçeklendirilmiş yansıma itme; kPa-ms) parametreleri, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilen grafikler yardımı ile tespit edilebilir.



Şekil 3.18 Açıya bağlı ölçeklendirilmiş yansıma basıncı hesabı [1],[53]



Şekil 3.19 Açıya bağlı ölçeklendirilmiş yansıma impuls hesabı [1],[53]

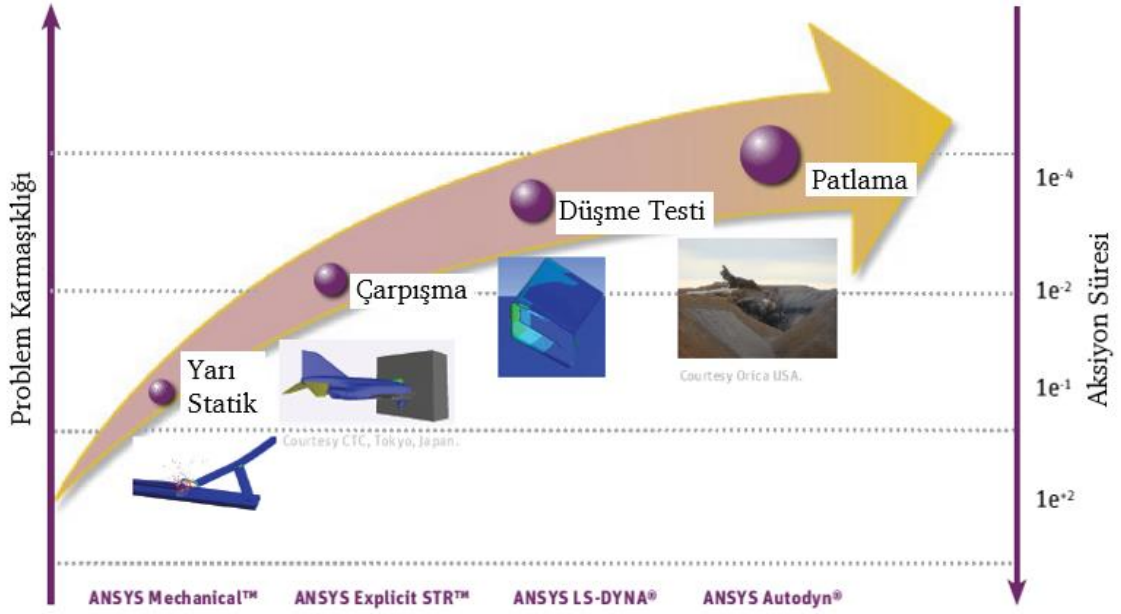
3.5 Sayısal Patlama Davranış Modeli

Bu tezin hazırlanması, üç boyutlu modellerin oluşturulması, statik – dinamik analizler, patlama yükü simülasyonu ve analizi, sonuçların irdelenmesi esnasında ağırlıklı bir şekilde ANSYS Workbench [114] ve ANSYS AUTODYN [115] Yazılımlarından faydalanılmıştır.

ANSYS Yazılımı mühendislik alanında kullanılan bir simülasyon yazılımıdır. Ürünlerin tasarım aşamasından sonra kullanılır ve ilk örnek üretilmeden önce, sanal ortamda test imkânı verir. Parçaların ve parça montajlarının üç boyutlu simülasyonları yardımıyla, ürünün mukavemet, mekanik, titreşim, akışkanlar mekaniği, hidrolik, dinamik etki, patlama, çarpışma vb yönlerden incelenmesini

sağlayarak tasarımı geliştirmeye yardımcı olur. ANSYS yazılımı sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılımdır. İncelenecek olan parçayı birçok küçük elemana bölerek işlemlerini sürdürür. ANSYS yazılımı içerisinde birçok modül barındıran bir yazılım olup bu tez çalışmasında; ANSYS Workbench ve ANSYS AUTODYN yazılımları kullanılmıştır.

ANSYS yazılımı ve modüllerin hangi seviyede çözüm sunabileceği Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.20 ANSYS yazılımı, problem çözme seviyeleri [116],[117]

Şekil 3.20'de verilen grafiğe [116] göre ANSYS Yazılımı arasında, problemlerin karmaşık seviyesi arttıkça farklı modülleri ile çözülebileceğini görülmektedir. Buna göre problem karmaşık seviyesi en düşük olan problemler ANSYS Mechanical (Implicit Dynamics) ile çözülebiliyorken; çarpışma testleri, ileri seviye doğrusal olmayan analizler için Ansys Explicit Modülüne ihtiyaç duyulmaktadır. En üst seviye olan patlama analizleri gibi yüksek dereceden karmaşık problemlerin çözümü için ise AUTODYN Modülüne ihtiyaç duyulmaktadır [116].

Bu kısımda özellikle, tezde faydalanılan bilgisayar yazılımının nasıl çalıştığı, sonlu eleman modelini nasıl çözdüğü, dolaylı ve açık yöntem ifadelerinin ne anlama geldiği ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.5.1 Açık ve Dolaylı Yöntemler (Explicit ve Implicit Dynamics)

Eğer bir modelin darbe etkisi altındaki davranışı ya da yüksek basıncın kısa süreli etkisi araştırılmak istendiğinde "açık yöntem" (explicit method) kullanılabilir. Özel problemlerin veya modelin davranışlarının nasıl olabileceği ve ne şekilde davranacağının tahmin edilmesi için ileri seviye analiz ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede, büyük yapıların şiddetli yükler altında davranışları kestirilebilir, özellikle de; büyük malzeme deformasyonu oluşturan yapılar, birbiri ile birleşim halindeki yapılar ya da yüzeyi sürekli değişken halde olan akışkanlar.

Doğrusal olmayan çözümleri yapabilen iki modülden birisi olan "açık yöntem" (diğeri de dolaylı yöntem) metotları ile şok dalgası yayılımı, büyük deformasyon ve şekil değiştirmeler, doğrusal olmayan malzeme davranışı, karmaşık birleşimler, doğrusal olmayan burkulma, çarpma testleri analizler yapılabilir. Doğrusal olmayan analizi yapabilen iki yazılımın karşılaştırması ise, Şekil 3.21'de verilmiştir.

Çözüm	Etki Hızı (m/s)	Deformasyon Hızı (/s)	Etki
Dolaylı Yöntem (İmplicit)		$< 10^{-5}$	Statik - Sünme
↓	< 50	10^{-5} - 10^{-1}	Elastik
↓	50 - 1000	10^{-1} - 10^{2}	Elastik - Plastik (malzeme mukavemeti kayda değer)
↓	1000 - 3000	10^{5} - 10^{6}	Plastik (basınç ≥ malzeme mukavemeti)
↓	3000 - 12000	10^{6} - 10^{8}	Hidrodinamik (basınç >> malzeme mukavemeti)
Açık Yöntem (Explicit)	> 12000	$< 10^{8}$	Çarpışan katıların buharlaşması

Şekil 3.21 Açık ve dolaylı yöntem çizelgesi [116]

Şekil 3.16'ye göre; malzemenin kompleks seviyesi arttıkça (elastik seviyeden, hidrodinamik seviyeye doğru), şekil değiştirme hızı yükseldikçe ve çarpma hızı arttıkça açık yöntem daha işlev kazanmaktadır [117].

Örneğin; elastik sistemler, sünme ve elasto-plastik sistemler, dolaylı yöntem ile çözülerek analiz edilebilirken; hidrodinamik etki, patlama ve çarpma etkisi gibi sistemler için açık yöntem çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır, yani şekil değiştirme hızı (strain rate) arttıkça, sistemin çözümü için açık yöntem çözümlerine duyulan gereksinim artacaktır.

3.5.1.1 Dolaylı Yöntem (Implicit Method)

Bu metodun uygulanmasında bazı matematiksel diferansiyel denklemden (3.25) faydalanılabilir, buna göre [118],[119];

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{F\} \tag{3.25}$$

Verilen bu ifade "zaman tanım alanında hesap yöntemi" (time history) metodu ve (3.26 ve 3.27) denklem takımları ile çözülebilir. Böylece;

$$\dot{D}_{n+1} = \dot{D}_n + \Delta t\left[\gamma \ddot{D}_{n+1} + (1-\gamma)\ddot{D}_n\right] \tag{3.26}$$

$$D_{n+1} = D_n + \Delta t \dot{D}_n + \frac{1}{2}\Delta t^2\left[2\beta \ddot{D}_{n+1} + (1-2\beta)\ddot{D}_n\right] \tag{3.27}$$

γ ve β parametreleri; hassasiyet, kesinlik, nümerik stabilite vb. algoritmanın karakteristiğini kontrol edebilmek için seçilmiştir. Buna "dolaylı yöntem" (implicit method) denir. Çünkü mevcut zaman adımındaki tepki sadece zamansal bilgiye bağlı olmayıp aynı zamanda mevcut bilgiye de bağlıdır ki tekrarlama adımları (iterasyon) tek bir zaman adımına ihtiyaç duyar.

3.5.1.2 Açık Yöntem (Explicit Method)

"Açık Yöntem" (Explicit Dynamics) yukarıdaki temel hareket ifadesini, denklem (3.25) (Newtonun II Yasası ve D'Alembert yasası gereği) ile çözerken (3.28) ve (3.29) denklemlerini kullanır [118],[119].

$$\dot{D}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{D}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{D}_n \Delta t \tag{3.28}$$

$$D_{n+1} = D_n + \dot{D}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \tag{3.29}$$

Buna “açık yöntem” (explicit method) denir. Çünkü mevcut zamandaki tepki “belirgin ve kesin” (explicit) olarak çözülebilir ki, herhangi bir zaman adımında tekrarlama hesabına (iterasyon) ihtiyaç duyulmaz.

3.5.1.3 Hesap Kesinliği

“Açık yöntem” enerjinin korunumu prensibini denklem (3.30) ifadesi ile, hesap kesinliğini görüntülemek için kullanılır [118],[119].

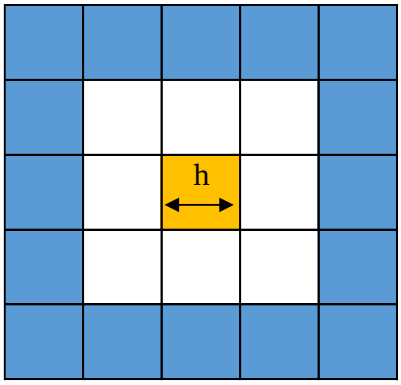
$$(Referans\ Enerji) + (Yapılan\ iş)_{referans \rightarrow mevcut} = (Mevcut\ Enerji) \qquad (3.30)$$

Bu her bir çevrimde toplam enerjiyi hesaplar. Eğer enerji hatası eşik sınıra ulaşırsa; çözüm kararsız olarak kabul edilir ve durur. Varsayılan eşik sınır değeri ise %10’dur. Enerji hatası; (3.31) bağıntısı ile şu şekilde ifade edilir.

$$Enerji\ Hatası = \frac{|(mevcut\ enerji) - (referans\ enerji) - (yapılan\ iş)_{referans \rightarrow mevcut}|}{\max(|mevcut\ enerji|, |referans\ ernerji|, |kinetik\ enerji|)} \qquad (3.31)$$

3.5.1.4 İntegrasyon Zaman Adımları

“Açık yöntem” ile zaman adımlı integrasyon; çözümün stabil ve kesinliğini garanti altına almak için, denklem (3.32) ile ifade edildiği üzere, yeterince küçük olmalıdır [118],[119].



Şekil 3.22 Karakteristik eleman ağ durum tanımı [116],[118]

$$\Delta t \leq \frac{h}{c} \qquad (3.32)$$

Burada “h” en küçük eleman boyu “c” ise elemanın içindeki dalga hızı olarak tanımlanır. Araştırmacılara (courant, Friedrichs ve Lewy) göre [118][119]; tek bir zaman adımında dalga, en küçük eleman boyundan daha fazla hareket etmemelidir. (Şekil 3.22)

Yine araştırmacılara göre, “açık yöntem” için mesh oluştururken, bir ya da iki çok küçük elemanın zaman adımını kontrol etmediğinden emin olunmalıdır.

Genel olarak bir uniform mesh boyu “açık yöntem” için makuldür. “c” dalga hızı denklem (3.33) ile ifade edilmiştir. Burada “c”;

$$c = \sqrt{E/\rho} \tag{3.33}$$

Olarak ifade edilir. Burada “E” Elastisite Modülü ve “p” ise malzeme kütle yoğunluğudur. Dolayısıyla;

$$\rho = {}^{m}/_{V} \tag{3.34}$$

Olarak denklem (3.34) ile ifade edilir. Burada “m”; kütle ve “v”; ise eleman hacmi olarak ifade edilir. Dolayısıyla yeni bağıntı, denklem (3.35) ile ifade edilmiştir.

$$\Delta t \leq h\sqrt{\frac{m}{VE}} \tag{3.35}$$

Explicit Dynamics, öncelikli olarak, süreksiz dinamik problemlerin çözümü amacıyla geliştirilmiştir.

3.6 Yapı Reaksiyonu

Eğilme kırılması, zemin seviyesinin üzerindeki betonarme yapıların en temel kırılma modlarından biri olarak tanımlanır. Ek olarak, kesme kırılması, doğrudan bir yapının kritik bölgesine uygulanan, yüksek yoğunluklu patlama basıncının neden olduğu bir diğer kırılma modu olarak da ele alınır [41].

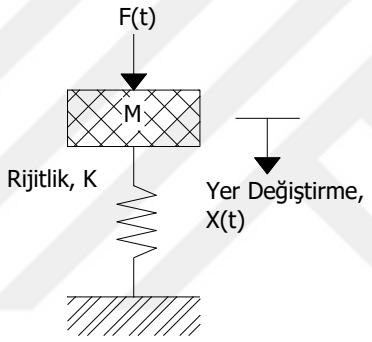
Bununla birlikte, kesme hasarları, önemli burulma deformasyonları meydana gelmeden önce, patlama yükünün erken aşamasında bir yapıda meydana gelir. Bir yapının dinamik tepkisi, herhangi bir doğal titreşim periyodu ile bir yükleme süresi arasındaki oranla ilişkilidir. Bir yapı için üç patlama tepki rejimi bu orana göre tanımlanır ve rejimler itme, yarı statik ve dinamik olarak sınıflandırılır [1],[2],[41]. Çok serbestlik derecesi (MDOF), tek serbestlik derecesi (SDOF) ve enerji yöntemleri ve statik analiz yöntemleri gibi yaklaşık yöntemler dâhil olmak üzere, geçici yükler için bir yapının tepkisini hesaplamanın birkaç yöntemi vardır [16],[120].

Yapısal analize esnek tek serbestlik derecesi yaklaşımı, patlama yüklemesi için ön tasarımda kullanılmaktadır (FEMA-426 2003)[8]. Yapı, idealleştirilmiş patlama yüklerine maruz kalan bir Tek Serbestlik Dereceli Sistem, elastik yapı olarak değerlendirilir. Gerçek yapı, ağırlıksız bir yay ile birbirine bağlanan bir yoğun kütlenin eşdeğer bir sistemi için idealleştirilmiştir (Şekil 3.23) [10],[41].

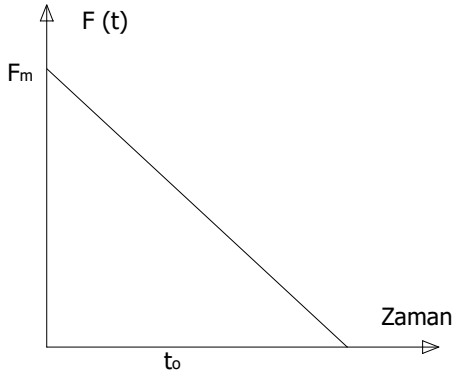
Ayrıca, pozitif patlama basınç süresi profili, denklem (3.36) ile tanımlanmıştır [16];

$$F(t) = F_m \left(1 - \frac{t}{t_o}\right) \tag{3.36}$$

Burada; F_m: A yüzey alanına uygulanan (Şekil 3.24 kuvvet zaman grafiği) pik kuvvet olarak tanımlanır.



Şekil 3.23 İdealize edilmiş yapı [41]



Şekil 3.24 İdealize edilmiş patlama dalgası. [41]

Basitleştirilmiş patlama profili Şekil 3.24'de gösterilmektedir ve patlama yükü tarafından oluşturulan itme (I); eğri altındaki alan F(t)-t_o'a göre hesaplanarak oluşturulabilir ve denklem (3.37) ile verilmiştir;

$$I = \frac{1}{2} F t_o \tag{3.37}$$

Sönümsüz elastik Tek Serbestlik Dereceli Sistem için hareket bağıntısı ile (3.38) denklemi ile şu şekilde yazılabilir [10]:

$$M\ddot{x} + Kx = F\left(1 - \frac{t}{t_o}\right) \tag{3.38}$$

M ve K sırasıyla kütle ve katılık matrisleri, x ve $\ddot{x}$ ise sırasıyla yer değiştirme ve ivmedir. Problemi pozitif faz süresinden daha kısa sürede yanıtla sınırlayarak, yukarıdaki denklem için genel çözüm "t" anında elde edilebilir. [10],[41]. Yerdeğiştirme parametresi x(t) ise denklem (3.39) ile;

$$x(t) = \frac{F_m}{K}(1 - \cos \omega t) + \frac{F_m}{K t_o}\left[\frac{\sin \omega t}{\omega} - t\right] \tag{3.39}$$

Ve hız x(t) ise, (3.40) denklemi ile;

$$\dot{x}(t) = \frac{F_m}{K}\left[\omega \sin \omega t + \frac{1}{t_o}(\cos \omega t - 1)\right] \tag{3.40}$$

Hesaplanmıştır. Burada ω, yapının doğal titreşim periyodu (3.41) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{3.41}$$

Eğer en büyük yerdeğiştirme (x_{max}), t_m anında meydana gelirse, hız 0'a denklem (3.42) ifadesinde eşit olur.

$$0 = \omega \sin(\omega t_m) + \frac{1}{t_o}\cos(\omega t_m) - \frac{1}{t_o} \tag{3.42}$$

Bu ifade basitçe denklem (3.43) ile edilebilir;

$$\omega t_m = f(\omega t_o) \tag{3.43}$$

Bu nedenle, patlama yükleri altındaki yapısal davranış ωt_o'dan etkilenir ve yükleme rejimleri daha sonra şu şekilde sınıflandırılır. [41];

$\omega t_o < 0{,}4$: momentum yükleme sistemi, $\omega t_o > 40$: yarı statik yükleme sistemi ve $0{,}4 < \omega t_o < 40$: dinamik yükleme sistemi

Yapıların deformasyonu, patlama yükü azaldıktan ve momentum yükleme sistemine tabi tutulduktan sonra meydana gelir. Yarı statik bir yükleme sistemi

altında, patlama yüklemesi uygulanırken yapı deforme olur. Yapısal deformasyon, dinamik yükleme koşullarına maruz kaldığında zamanın bir fonksiyonudur.

Kolonlar veya kirişler gibi yapısal elemanlar, patlama yüklerine maruz kaldıklarında büyük elastik olmayan deformasyonlar yaşayabilir. Denenen yapının gerçek tepkilerinin doğru analizi, adım adım sayısal araştırma prosedürü ile elde edilebilir [60],[120].

Ancak bu yaklaşım basit bir yapıya etki eden patlama yükü için ifade edilebilse de, karmaşık yapılar için titreşim ve modal analiz ifadelerinden bahsetmek doğru olmayacaktır. Buna sebep olarak; patlama yükü yapının yalnızca bir bölümüne direkt ve zamanın çok küçük bir bölümünde etki ettiğinden dolayı yapının modal titreşimlerini belirlenmesi doğru bir sonuç vermemektedir.

3.7 Bilgisayar Yazılımı Nümerik Modeli

Patlama yüküne maruz kalan yüzdeki itme, yapı kenarlarından basınç tahliyesi hesaba katılmadan belirlenir. Bir yüze uygulanan basınç yükü, patlamaya olan mesafeye, patlama dalgasının geliş açısına ve patlamaya göre yüzün yönüne bağlıdır. Geliş açısı θ, normal yüz ile yüz merkezi ile patlama merkezini birleştiren vektör arasındaki açı bularak hesaplanır. Patlamaya olan uzaklık, d, patlama merkezi ile yüzey merkezi arasındaki vektörel mesafe olarak hesaplanır.

Şeffaflaştırma süresi (t_c) dikkate alınmadığında:

Ölçeklendirilmiş mesafe (Z); anlık pik basınç(P_o'), pozitif faz süresi (t_0), varış süresi (t_{arr}) ve anlık impuls ($I_ı$) gibi patlama parametrelerini hesaplamak için kullanılır [25].

Eğer, yapı yüzeyi patlayıcı ile yüz yüze değil ise, etkiyen basınç ifadesi denklem (3.44) ile ifade edilir [106];

$$P(t) = P_0^I \left(1 - \frac{t - t_{arr}}{t_0}\right) exp\left(-\lambda_1 \frac{t - t_{arr}}{t_0}\right) \quad (3.44)$$

Burada λ sönüm parametresi ise, (3.45) bağıntısı ile ifade edilmiştir;

$$\int_{t_{arr}}^{t_{arr}+t_0} P(t)dt = I_I \quad (3.45)$$

İfadesi kapsamında; eğer (t, zamanı), (t_{arr})'dan daha küçük ise, basınç oluşmaz.

Bununla birlikte, yüzeyin patlamaya dönük olduğu belirlenirse, normal yansıyan impuls (0° geliş açısı için) I_R, [22] kapsamında bildirilen formüller ve basınç üzerinden yansıyan tepe noktası, P_O^R kullanılarak hesaplanır. Yansıyan itme; denklem (3.46)'ya göre, normal olmayan olay açıları için ise;

$$I = I_I(1 + \cos\theta - 2\cos^2\theta) + I_R\cos^2\theta \tag{3.46}$$

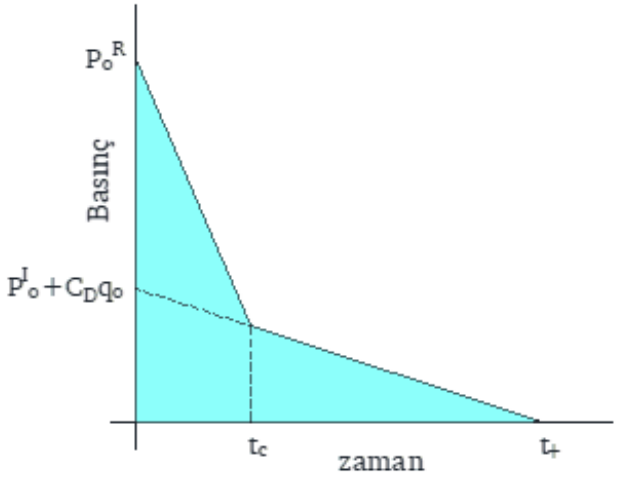
Ve etkiyen basınç ise Friedlander ifadesi için, denklem (3.47) [106] ile;

$$P(t) = P_0^R\left(1 - \frac{t-t_{arr}}{t_0}\right)exp\left(-\lambda_R\frac{t-t_{arr}}{t_0}\right) \tag{3.47}$$

Hesaplanmıştır. Burada λ_R parametresi, (3.48) denklemi ile hesaplanabilir;

$$\int_{t_{arr}}^{t_{arr}+t_0} P(t)dt = I \tag{3.48}$$

Şeffaflaştırma süresi (t_c) dikkate alındığında ise:



Şekil 3.25 Pik basınç zaman grafiği (şeffaflaştırma süresi ile birlikte) [2]

q; P_O^I ve θ kullanılarak, Şekil 3.25'den hesaplanan dinamik basınçtır ve C_D'nin 1 olduğu varsayılan sürükleme katsayısıdır. t_+ zaman ifadesi ise (3.49) denklemi ile hesaplanabilir [1],[2].

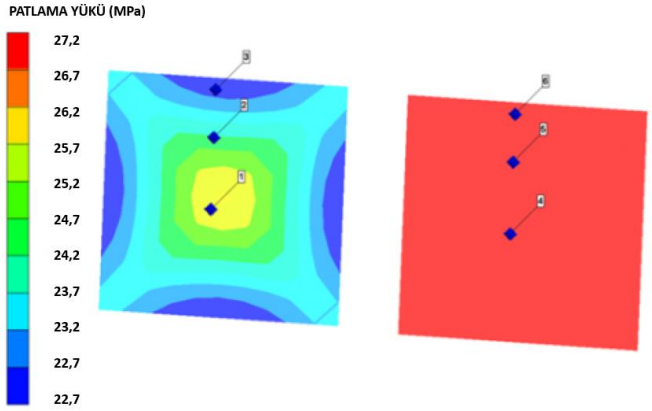
$$t_+ = {2I_I}\Big/{P_0^I} \tag{3.49}$$

Ve yüzeye etkiyen basınç ifadesi ise Friedlander denklemi (3.50) ile hesaplanır [106];

$$P(t) = P_0^R \left(1 - \frac{t - t_{arr}}{t_0}\right) exp\left(-\lambda_C \frac{t - t_{arr}}{t_0}\right) \quad (3.50)$$

Burada λ_C parametresi ise denklem (3.51) ile hesaplanmıştır;

$$\int_{t_{arr}}^{t_{arr}+t_0} P(t)dt = I_C \quad (3.51)$$



Şekil 3.26 Şeffaflaştırma süresinin patlama analizine dâhil edilmesi ve edilmemesi durumunda bir kabuk elemanın yüzeyinde oluşan patlama basınçları [114],[115]

Verilen Şekil 3.26'ya göre, şeffaflaştırma süresinin (t_c) bir kabuk elemanın yüzeyinde kaydedilen basınç değerleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Buna göre şeffaflaştırma süresi basınç değerlerinin oluşmasında etkin rol oynamaktadır.

Çevrim Adımları

ANSYS AUTODYN Yazılımında [115]; ele alınan ağ alanı, deforme olan cisimle hareket eden parçacıklarla kaplanmıştır. Tüm bitişik parçacıklarının, seçilen bir parçacığı için hesaplanmış toplam etkileşim vardır. Bu yöntemde: her zaman adımında, verilen başlangıç ve sınır koşulları için durum denklemleri, kurucu ilişkiler vb. Hız gibi hesaplanan yeni parametreler olduğu gerçeğine dayanarak hesaplamaların temel aşamaları gerçekleştirilir. Takip eden her döngüde, her nokta ve elaman için; gerilme, kuvvet, yerdeğiştirme vb. parametreler he bir patlama denklemi kullanılarak hesaplanır. [121]

Bu tez çalışmasında; çözüm yapılan bilgisayar kapasitesine bağlı olarak 10.000 döngü adımı kullanılarak analizler yapılmıştır.

3.8 Çözüm Ağı (Mesh) Yöntemi

Mesh üretme fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Mesh üretme geniş uygulama alanları için kullanılabilir. Coğrafya ve haritacılık bilimlerinde ağlar (meshler) arazi bilgilerinin kompakt bir şekilde ifade edilmesini sağlar. Bilgisayar grafiklerinde birçok nesne render edilmeden önce mesh yapısına dönüştürülür. Fakat ana kullanım alanı sonlu elemanlar yöntemi içinde kullanılmasıdır. Yüzeysel tanım aralıkları üçgen, dörtgen vb. şekillere bölünebilirken, hacimsel tanım aralıkları tetrahedra, hexahedra gibi şekillere bölünebilirler. Elemanların şekli ve dağılımı otomatik ağ (mesh) üretme algoritmaları tarafından belirlenir [122].

3.8.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Ağ Üretimi

Sonlu elemanlar yöntemi, çok çeşitli mühendislik problemine sonuç elde etmek için uygulanabilecek sayısal bir işlemdir. Kararlı rejimli, değişken rejimli, lineer, lineer olmayan durumlar için gerilme (stress) analizi, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve elektromanyetizma problemlerinin analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi; sayısal bir yöntem olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu Elemanlar Yönteminde (SEM) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, bu noktalara düğüm (node) denir.

Mesela katı modellerde her bir elemandaki yerdeğiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmelerle ilişkilidir. Düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerdeki yerdeğiştirmeleri çözmeye çalışır. Böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur. Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi düğüm noktaları için tanımlanmış şartları, nümerik lineer denklemlere çevirir. Önce bu denklemler çözülür ve bütün elemanlardaki

gerçek gerilmeleri bulmaya çalışır. Sonuç olarak model ne kadar çok sayıda elemana bölünürse o elemana uygulanan yüke göre daha gerçekçi sonuç verir [122].

3.8.2 Modele Ağ Örme

Eleman özellikleri belirlendikten sonra, model küçük elemanlara bölünür. Yani model mesh edilir. Burada önemli olan seçilen eleman kullanılarak modelin nasıl daha iyi küçük parçalara bölüneceğidir. Bazı paket programlar bunu otomatik olarak yapmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi yaklaşık çözümler üreten bir metottur. Eleman sayısı arttırılarak, eleman tipi değiştirilerek, mesh üretim yöntemi değiştirilerek veya mesh üzerinde manuel olarak oynanarak çözüm tekrarlanabilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan ANSYS yazılımı [114]; basit ve standart otomatik ağ (automatic meshing) yönteminden, yüksek ustalık isteyen ağ yöntemine kadar birçok yöntem önerilmekte olup, otomatik ağ örme yöntemi en standart olarak bu işlemi sunmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında patlama analizine uygun olması hedeflendiğinden dolayı; açık ağ yöntemi (explicit mesh) uygulanmıştır.

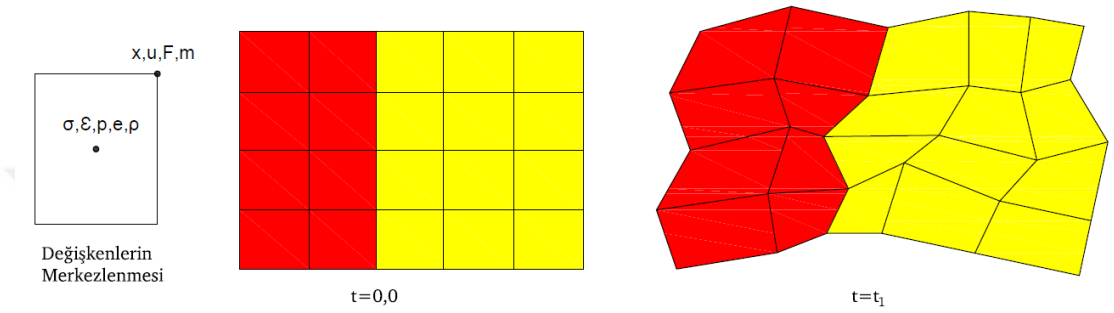
3.9 Lagrangian ve Eulerian Denklemleri

Bu tez çalışmasında mühendislik yapılarının patlama yükü karşısındaki davranışlarının incelenmesinde ANSYS ve AUTODYN yazılımlarından [114],[115] faydalanılmıştır. Patlama analizleri ve yapıların patlama yüküne karşı gösterdikleri tepkinin gözlemlendiği bu yazılımlarda; ilk olarak sonlu eleman modeli (katı model) oluşturulup ardından patlama analizi için akışkan hava modeli oluşturularak katı model ile akışkan modelin beraber çalışması sağlanarak, sistem çözülmüştür.

Bütün bu işlemlerin bilgisayar yazılım ortamında gerçekleşse de, analizin daha iyi anlaşılabilmesi adına, katı ve akışkan modele ilişkin teori ve denklemlerin irdelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır [123].

3.9.1 Lagrangian Analizi

Günümüzde birçok yapısal (katı) dinamik kodların çözümünü üretebilmek için Lagrangian analizleri kullanılır. Lagrangian analizinde; eleman içerisindeki madde, eleman içerisinde kalır ve eleman dışına çıkmaz ya da bir başka eleman içerisine girmez. Nümerik ağ (mesh) malzeme akış doğrultusunda deformasyona uğrar, öyle ki hiçbir maddenin (Şekil 3.27) iki eleman arasında nakli gerçekleşmez. [123]



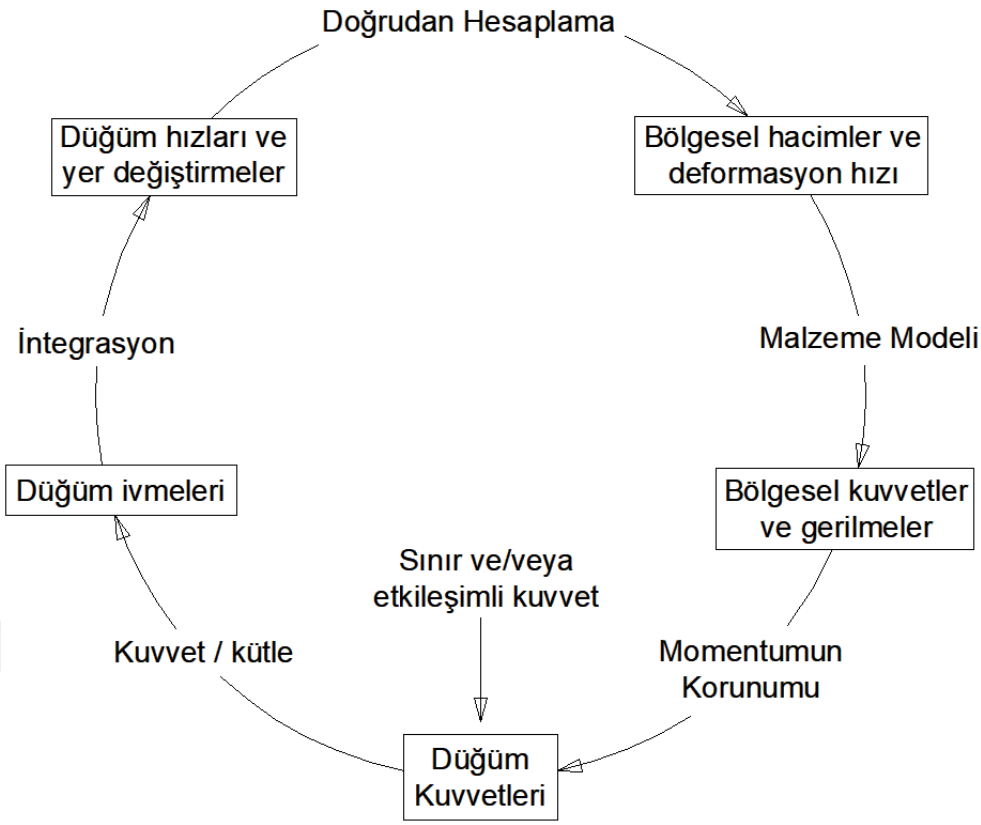
Şekil 3.27 Lagrangian analizinde ağ yapısının deformasyonu [123]

Koordinatlar x, hızlar u, kuvvetler F ve kütleler m olarak bir ağda köşe noktaları ile ilişkilendirilirken; gerilmeler σ, şekil değiştirmeler $\mathscr{E}$, basınç p, enerjiler e ve yoğunluklar ρ; ağ hücresi merkezinde tanımlanır [31]. Lagrangian analizinde, (3.52), (3.53) ve (3,54) denklem takımları ile ifade edilen korunum kanunları çerçevesinde; ağ hızı, parçacık hızına eşit ($w=u$) kabul edilir. Lagrangian analizi Şekil 3.28 üzerindeki şema ile gösterilmektedir [123].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho div(\vec{u}) + (\vec{u} - \vec{w}).grad(\rho) = 0 \tag{3.52}$$

$$\boldsymbol{\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \overline{\overline{grad}}(\vec{u})\rho(\vec{u} - \vec{w}) = div(\bar{\sigma}) + \vec{b}} \tag{3.53}$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho(\vec{u} - \vec{w}).grad(E) = \bar{\bar{\sigma}}.\overline{\overline{grad}}(\vec{u}) + \vec{b}.\vec{u} \tag{3.54}$$

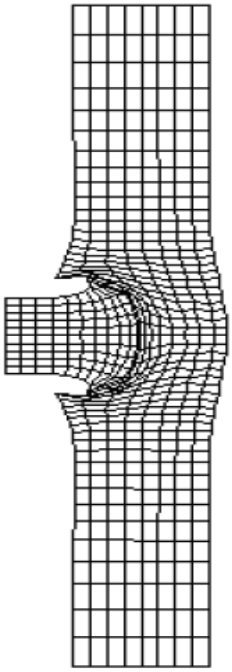


Şekil 3.28 Lagrangian analizinin şematik çevrim gösterimi [123]

Lagrangian analizini ayıran bir özellik de, serbest yüzeyler malzeme ara yüzeyleri; nümerik ağda, hücre sınırlarında meydana gelir ve analiz boyunca devam eder. Malzeme akışının ince detay izleri takip edilir ve zaman serileri (hız ve basınç gibi) kolayca elde edilebilir dolayısıyla malzeme orijinal elemanda kalmaya devam eder. Lagrangian analizi, katı cisimlerin tepkilerini hesaplamada uygun ve doğru bir yöntem olarak ifade edilir.

Lagrangian analizinin en başlıca dezavantajı, problemlerdeki kullanımı büyük açısal deformasyonlar içerir ki Şekil 3.29 de görülebileceği üzere bu durum hatalı sonuçlara sebebiyet verebilir ya da analizi sonlandırabilir. Eleman boyutu explicit analizde zaman adımını belirleyen kıstaslardan biri olduğundan, çok küçük eleman boyutu çok küçük zaman adımını belirler. Bu durum; eğer ki zaman adımı belirlenen en küçük değerin altına düştüğünde, analizin sonlandırılmasıyla bile karşılaşılabilir. Bu sorunun üstesinden tekrar alanlama (rezoning) tekniği ile gelinebilir. Burada, yüksek oranda hasar gören ağların değişkenleri geleneksel olarak zarar görmemiş ağ ile yeniden düzenlenir ki bu durumda ağların tamir edilmesi ile analiz devam eder. Bu yöntem Zukas [29] tarafından tarif edilmiştir.

Bu süreç manuel olarak yürütüldüğünden, kullanıcı yeniden ağ düzenlemesinin nerede gerekli olduğuna karar vermelidir.



Şekil 3.29 Atılan bir cisim sonrası ağ sisteminde oluşan deformasyon [123]

Lagrangian analizindeki bir diğer kusur ise, hesaba dayalı yoğunluğun temas (contact) ve darbe (impact) ile ilişkilendirilmesidir. Genellikle karmaşık mantık; boşluk açılması ve kapanması, malzeme etkileşimi, kayma temasının tespiti amacıyla kullanılır ve bu süreç bilgisayar işlemcisinin büyük miktarda zamanını kullanma eğilimindedir. [29]

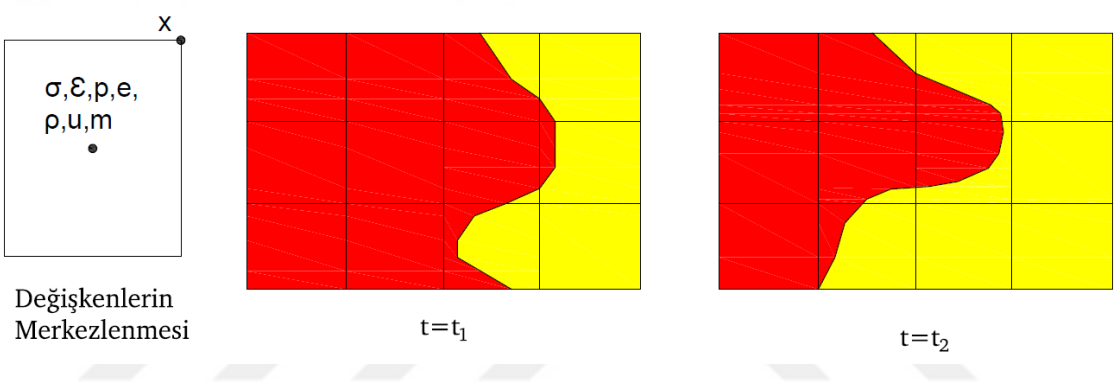
Lagrangian analizi için tanımı yapılan iki kusurun tanımı yapılmış olup bu uygulamaların çözümü için büyük kütleli akış ve akışkan yapıların etkileşimi ile sınırlıdır ki burada Lagrangian çözücüler akışkan – katı etkileşimli analiz için Eulerian çözücüler ya da Keyfi Lagrangian Eulerian yaklaşımı (ALE – Arbitrary Lagrangian Eulerianian Analysis) çözücüleri ile birlikte kullanılabilir.

3.9.2 Eulerian Analizi

Lagrangian analizinde tanımı yapılan madde aktığında deformasyona uğrayan ağ (mesh tanımının aksine) Eulerian analizinde durağan bir ağ gözünde madde akışı (Şekil 3.30) gerçekleşir. Malzemenin bir elemandan diğerine hareket ettiğinde,

malzeme özelliklerinin; zaman serileri, malzeme ara yüzleri ve serbest yüzeyler Lagrangian analizinde olduğu gibi takip edilmez. Malzeme akışı, Eulerian çözücüde akışkan malzemenin iletim algoritmasına da ihtiyaç duyar. Böylece bu durum, Lagrangian çözücüye göre daha karmaşık, daha hesaba dayalı ve zahmetli hale getirir.

Eulerian çözücü akışkan ve gaz davranışlarının modellenmesi için kullanılan uygun bir çözücüdür çünkü ağ gözü havada sabit olarak kalır. Eulerian çözücüde tüm değişkenler ağ gözünün ortasında tanımlanmıştır, bu da akışkan – katı etkileşim temelli problemlerin çözümünde diğer çözücüler ile birlikte çalışmasını kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3.30 Eulerian analizinde sabit ağ boyunca oluşan malzeme akışı [123]

Birçok Eulerian çözücü; kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerini çözmek için kontrol hacmi metodunu kullanır. Korunum kanunlarındaki hız sıfıra ($w=0$) ayarlanır. Eulerian çözücüler; her çözüm zaman adımı için iki zaman prosedürü kullanma eğilimindedir. İlk adım Lagrangian hesaba dayalı adım olup ağ gözü akışkan ile birlikte hareket eder böylece kütle korunur. Ağ hızları ve yerdeğiştirmeleri hesaplar ve düğümsel özellikler güncellenir.

Bu süreç; hasar görmemiş ağ ile sonuçlanan, yeniden düzenleme işleminin ardından, ağ deformasyonunun kabul edilebilir ya da çok hasar görmemesine kadar devam eder. Ardından malzeme, bir elemandan diğerine yatay olarak hareket eder ki bu durum yeniden düzenlenen ağ miktarı ile tespit edilir. Sonunda; Eulerian analizinin her bir zaman adımı hesabının sonunda; ağ sabit kalırken malzeme bir konumdan diğerine hareket eder.

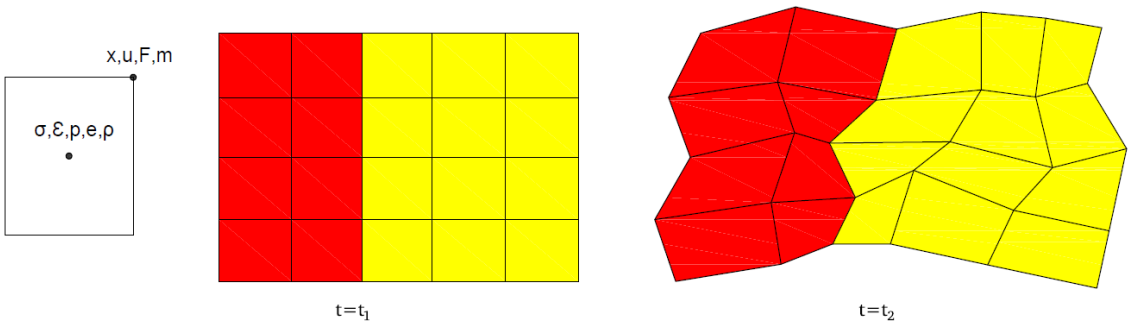
Patlama ile oluşan, hava ve infilak ile gaz üretilen bazı durumlarda, bir eleman belirli bir zamanda birden fazla malzemeye sahip olabilir. Bu tip durumlarda, çoklu malzeme; hacimsel oran tekniği ya da Youngs [30] tarafından geliştirilen ara yüz tekniği kullanılarak Eulerian tekniği ile ele alınır. Bir Eulerian hücresinin bir malzeme ara yüzeyini boylu boyunca kestiği kabul edilir. Ara yüzey; komşu hücrelerdeki hacimsel oranlarda bulunan bilgiden ve bağlı geometri serilerinin yürütülmesinden meydana gelir. Buradaki iş tanımı; çizgi kesişimlerinin belirlenmesi, akışkanlardan birini içeren poligon oluşturulması ile alanın hacminin tespitini içerir. Belirli sayıda hacim izleme metodu geliştirilmiş olur. Basit doğrusal ara yüz hesabı (SLIC – Simple Linear Interface Calculation), akışkan hacmi (VOF – Volume of Fluid) ve bölümlü doğrusal ara yüz hesabı (PLIC – Piecewise Linear Interface Calculation) metotları birçok sonlu eleman ve CFD kodlarına uygulanmıştır.

3.9.3 Keyfi Lagrangian – Eulerian Analizi (ALE)

Patlamanın nümerik olarak modellenmesi, akışkan ve yapı dinamiğinin her ikisini de ihtiva eder; şok dalgası yayılması, havanın akışkan kısmı boyunca ve yapı ile yapının tepkisinin etkileşimi ile ilgilidir. Bir önceki başlıklarda izah edildiği üzere, Lagrangian ve Eulerian çözücüler, katı ve sıvı (sırasıyla) modellenmesi için uygundur. Son yıllara Lagrangian ve Eulerian çözücüleri kombine eden yeni bir çözücü geliştirilmiştir; “Keyfi Lagrangian-Eulerian Çözücü (ALE).

Bu çözücü; yapı dinamiği ve akışkan dinamiğinin patlama problemi yönünden ikisine de hitap eden bir yeterliliğe sahiptir. Salt Eulerian çözücüden farklı olarak, düğüm noktalarının yeniden alanlandığı orijinal ağ konumlarında, ALE çözücü düğüm noktalarını en uygun pozisyona yeniden alanlama yapar. Bir yatay hareket, Lagrangian hesabına göre hesap tekniği açısından daha yorucudur ve çözücü vaktinin çoğunu malzemenin elemanlar arası iletiminin hesaplanmasında harcar. Ağ hasarı ve hesap işlem yükü arasındaki ALE çözücü yeniden alanlama algoritmasının uygunluğunun araştırmasına, malzemenin yatay hareketinin hesabı için (Kim ve Shin) ihtiyaç duyulur. ALE çözücü; Lagrangian çözücünün kusuru olan büyük deformasyonları çözebilir. Fakat Eulerian çözücünün kusuru

olan ara yüzlerin açık bir biçimde tanımlama özelliğini muhafaza eder. (Şekil 3.31)



Şekil 3.31 ALE metodu ile ideal olarak yapılan ağların modellenmesi [123]

ALE çözücü hesap adımlarında, kullanıcının girdileri ve problemin fiziki özelliklerine bağlı olarak, Lagrangian ve Eulerian gibi davranabilir. Farklı ağ yeniden alanlaması ve yatay yönde hareket algoritması farklı kodlar ile kullanılabilir. Yatay hareket algoritması. Malzeme akışının bir elemandan diğerine geçişini izler ve kaydeder. Bu eylem çoğunlukla; sabit, kararlı monoton ve korunumlu bir şekilde gerçekleşir. Akışkan elemanlardaki kütle, momentum ve enerji elemanlar arası hareket eder. Bu yöntem LS-DYNA tarafından kullanılmaktadır.

ALE çözücünün bir diğer özelliği de, bir eleman içindeki birden fazla malzemeyi ele alabilir. Patlayıcının infilak etmesiyle birlikte, çevresindeki elemanlar hava ve gaz gibi patlama ürünlerini aynı anda ihtiva edebilir. Çok malzemeli ALE çözücü, tek malzemeli ALE çözücünün aynı temel denklemleri aynı şekilde çözdüğü şekilde çözer yalnızca her bir malzeme grubu için tekrarlı çözümle yürütür. Bununla birlikte ALE hesabının zaman adımındaki çözümleme hesap yükün artmasına sebep olup mevcut çoklu malzemenin tekbir elemanda nitelendirilmesine ihtiyaç duysa da; bu durum yeniden alanlama algoritmasında güncellenmelidir.

3.9.4 Bağlaşık Lagrangian – Eulerian Analizi

Bu methoda (Coupled Lagrangian – Eulerianian Method) göre patlama dalgası bir ortam (hava veya su) boyunca ilerleyip katı bir yüzeye ulaştığında; sıvı katı

etkileşiminin ve dalgadan yüzeye aktarılan enerjinin sonucu olarak yansıma yapar. Bu tip bir davranışın düzgün bir şekilde modellenmesi için çözücüler, sıvı ve katı tepki verilerini aktarmak için, bağlaşık olmalıdır. Bu metotta; kütle, enerji ve momentum sınır koşullarında Eulerian ağından Lagrangian ağına (ve karşılıklı olarak) transfer edilir. LS-DYNA yazılımında akışkan-katı etkileşimi (Fluid-Structure İnteraction); akışkan için ALE çözücü ve katı için Lagrangian çözücü tarafından yürütülür. ALE çözücünün çalıştırdığı akışkan ağ, ana ağ (master mesh) olarak tanımlanırken; Lagrangian çözücünün yürüttüğü katı ağ, bağımlı ağ (slave mesh) olarak tanımlanır. LS-DYNA yazılımında iki bağlaşık algoritma mevcuttur; kısıtlı tabanlı (constrained-based) ve ceza tabanlı (penalty-based). Bu iki algoritma, darbe ve patlama problemleri uygulamaları için iyi seviyede algoritmalardır. Kısıtlı tabanlı algoritma; katı elemanların düğüm noktalarının hızlarını ve/veya ivmelerini tanımlar ve birbirlerini takip etmelerini sağlar. Bu birleştirme metodu; kütleyi ve momentumu korur ancak enerjiyi [31] korumaz.

Daha popüler bir yöntem olan ceza tabanlı (penalty-based) algoritma ise; akışkan (ALE) ve katı (Lagrangian) ağların, düğüm noktaları arasındaki göreceli hareketi izler ve ALE malzemesinin Lagrangian ağı boyunca uyguladığı penetrasyona direnen düğüm noktalarına ceza kuvveti (penalty force) tatbik eder. Denklem (3.63) ifadesine göre; *d*, Lagrangian düğüm ile ALE malzeme konumu arasındaki göreceli yerdeğiştirme olarak tanımlandığına göre, bağlaşık kuvvet denklem (3.55) ile tanımlanır;

$$\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{d} \tag{3.55}$$

Bu ifadede *"K"* modeli yapısal malzeme özelliğine bağlı yay sabitidir. Bu kuvvet hem bağımlı düğümlere (slave node) hem de ana bölümlere (master segment) dengenin sağlanması amacıyla tatbik edilir. Buradaki önemli nokta, akışkan-katı etkileşiminin meydana gelmesi için, Lagrangian (katı) ağın, akışkan (ALE) ağ ile üst üste çakışması gerekir.

Eulerian – Lagrangian birleşiminin uygulanması ANSYS AUTODYN [115] yazılımında LS-DYNA'dan daha basit bir şekilde yürütülür. Bir Lagrangian ara yüzünün sabit bir Eulerian ağı keyfi bir şekilde başından sonuna kadar keyfi bir şekilde kestiği kabul edilir. ANSYS AUTODYN yazılımında, Lagrangian ara yüz ile

kesişen Eulerian hücreleri, Lagrangian ağ dizesi için bir basınç sınırı olarak davranırken; Lagrangian ağ dizesi, Eulerian ağındaki malzeme akışı üzerinde geometrik bir sınır görevi görür. Lagrangian ara yüz sınırları ile komşu Eulerian ağları, Lagrangian ağ dizesiyle kısmi olarak çevrili olabilir, kontrol hacimleri ve yüzey alanları sürekli olarak değişir. Bu yöntemin uygulanmasında farklı metotlar bulunmaktadır, bunlar; Noh Metodu, Penalty (ceza) Metodu, Zapotec Metodu ve SHISM Metodu olarak tanımanmıştır.

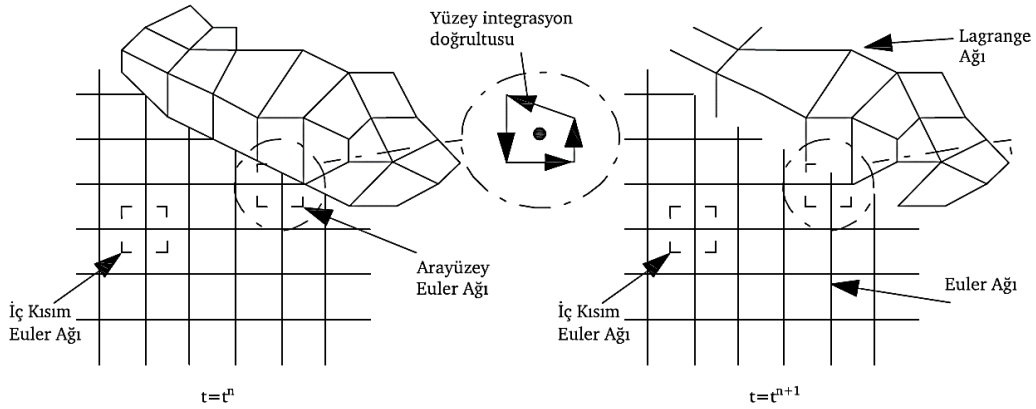
3.9.4.1 Noh Metodu

Biraz tarihli olmasına rağmen, Noh [32] tarafından açıklanan yöntem, orijinal Eulerian – Lagrangian yöntemini temsil eder ve diğer Bağlaşık Eulerian Lagrangian (Coupled Eulerianian Lagrangian) literatüründen önce gelir. Bu yöntem aynı zamanda Hancock tarafından PISCES 2DELK kodunda kullanılan algoritmanın temelini de sağlamıştır [33]. Noh'un yöntemi çerçevesinde; Eulerian ve Lagrangian alanları arasındaki bağlantıya oldukça sezgisel bir yaklaşımı temsil eder. Noh'un orijinal çalışması iki mekansal boyutta olup uygulama özellikle basit olmasa da, üç boyuta uzanmak mümkündür [124].

Noh yöntemi [32] Şekil 3.34'de şematik olarak gösterilmiştir. Bir zaman (t_n), Lagrangian alanının konumunun bilindiğini ve tüm malzemelerin durumunun, örneğin yoğunluk, basınç vb. bilindiğini varsayalım. Ayrıca, (t_n) zamanındaki Lagrangian etki alanının içinde, sınırında ve dışında olan Eulerian etki alanının alt kümesinin bilindiğini varsayalım. Noh tarafından açıklanan yöntem, bir sonraki zaman adımında (t_n+1) çözümü elde etmek için üç ayrı aşamada ilerler. İlk aşamada, Lagrangian alanının hareketi, Lagrangian alanının yüzeyine etki eden kuvvetleri hesaplamak için Eulerian malzemesindeki mevcut basınçlar kullanılarak hesaplanır. Her Eulerian hesaplaması için birkaç Lagrangian adımı atılabilir (subcycling). İkinci aşamada, Lagrangian alanının dışındaki Eulerian alanının bir kısmı Lagrangie alanının yeni konumu kullanılarak belirlenir. Eulerian ve Lagrangian alanları arasındaki ara yüzü oluşturan düzensiz şekilli Eulerian hücreleri için ayrık denklemler geliştirilmelidir. Son olarak, tarif edilen Eulerian denklemleri, bir sonraki zaman adımı sırasında Lagrangian alanı üzerinde hareket edecek yeni basınçları elde etmek için çözülür.

Ayrık Eulerian denklemleri, Şekil 3.32'de gösterildiği gibi, her bir Eulerian düğümünün etrafındaki kontrol hacmi için ayrık koruma denklemini oluşturmak için, denklem (3.56) ile ifade edilen Green teoremi kullanılarak türetilmiştir. Aynı yaklaşım, Lagrangian alanı ile arayüzü oluşturan keyfi poligonal hücreler için de kullanılır. Arayüz hücreleri için, Lagrangian sınırına karşılık gelen hücre sınırlarındaki Eulerian materyalin hızı Lagrangian sınırının hızına eşit olarak ayarlanır. Küçük Eulerian hücreler, zaman adım sınırlamalarını önlemek için komşu hücrelerle de birleştirilir.

$$\iint_A \left(\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y}\right) dxdy = \oint_{\partial A} (Mdx + Ndy) \tag{3.56}$$



Şekil 3.32 Bağlaşık eulerian – lagrangian metodu [32]

Arayüz hücreleri için ayrık Eulerian denklemlerinin geliştirilmesi, Noh'un formülasyonunda düzlem geometrisini varsayarak ve yapılandırılmış bir Eulerian ağ sistemi kullanarak basitleştirilmiştir. Noh yöntemi; denklem (3.57)'de belirtilen Gauss'un diverjans teorisini kullanarak, üç boyuta genişletilebilirken, gerekli yüzey integrallerinin tanımlanması ve hesaplanması çok daha hantal olacaktır. Ayrıca, Noh yönteminin Lagrangian alanına uygulanan kuvvetleri hesaplarken atalet etkilerini, yani eklenen kütleyi hesaba kattığı açık değildir. Eulerian materyalinin Lagrangian alanı tarafından ivmesi, Eulerian hücresindeki basınç tarafından yansıtılmaz. Bu eklenen kütle etkisi, Lagrangian etki alanına etki eden etkili kuvveti arttırmak için hareket edecektir [34].

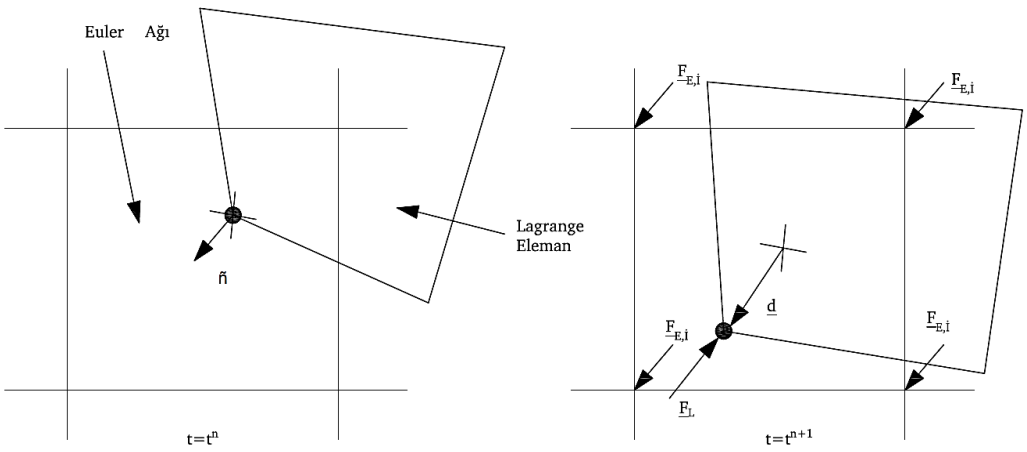
$$\iiint_V \vec{F} \cdot \vec{\nabla} dV = \oiint_A \vec{F} \cdot \hat{n} dA \tag{3.57}$$

Burada, üç boyutlu uzayda kapalı bir A yüzeyi içinde kalan V hacminde tanımlı ve ñ boyutlu; $\vec{F}(x, y, z)$ vektör alanının her bir bileşeninin kısmi türevleri sürekli ise, diverjans teoremi ile verilir.

3.9.4.2 Ceza Metodu (Penalty Method)

Noh'un yöntemi [32], Benson [35] tarafından tarif edilene benzer Lagrangian ve Eulerian alanları arasında bir bağlantı kullanılmıştır. Yani, Lagrangian sınırının hızı, Eulerian hesaplamasında kinematik bir kısıtlama sağlar ve Eulerian malzemesindeki baskılar Lagrangian alanı üzerinde kuvvetler sağlar. Alternatif bir bağlantı, genel iletişim algoritmaları ile birçok benzerliği paylaşan Olovsson [36] tarafından tanımlanmıştır.

Olovsson yöntemi [36] Şekil 3.33'de şematik olarak gösterilmiştir. Zaman adımının (t^n) başında, her Eulerian hücresinde bulunan herhangi bir Lagrangian düğümünün yeri not edilir. Önceki zaman adımında hesaplanan arayüz kuvvetleri kullanılarak, hem Lagrangian alanının hem de Eulerian materyalinin hareketi hesaplanır. Eulerian malzeme noktası ile Lagrangian düğümü arasındaki göreceli yerdeğiştirme, zaman adımının sonunda hesaplanır ve hem Lagrangian hem de Eulerian düğümlerine bir ceza kuvveti uygulanır.



Şekil 3.33 Bağlaşık eulerian – lagrangian alanı için Olovsson tarafından geliştirilen ceza metodu (penalty method) [36]

Lagrangian ve Eulerian düğüm noktalarına tatbik eden kuvvetler, ceza kuvveti (penalty force) denklem (3.58) ile hesaplanır, $\underline{F}_p$;

$$\underline{F_p} = k_p \underline{d_p} \tag{3.58}$$

Burada k_p penalty rijitliği (kısaca tanımlanacaktır) ve d_p penalty yerdeğiştirmesidir. Denklem (3.58)'de belirtilen ceza (penalty) yerdeğiştirmesi, hem Lagrangian hem de Eulerian düğümlerine uygulanan göreceli yerdeğiştirme vektörünün normal ve teğetsel bileşenlerinden (3.59) denklem takımları ile hesaplanır.

$$\underline{d}_n = \left(\underline{d} \cdot \hat{n}\right)\hat{n} \tag{3.59}$$

$$\underline{d}_t = \underline{d} - \underline{d}_n$$

Burada $\underline{d}$, Şekil 3.35'de gösterildiği gibi gerçek yerdeğiştirmedir ve ñ Lagrangian düğümündeki Lagrangian yüzeyine dışa doğru yönlendirilmiş normal vektördür. penalty kuvveti, yalnızca Eulerian malzeme noktasının ve Lagrangian düğümünün bağıl hareketi sıkıştırıcı ise uygulanır ve bu durum denklem (3.60) ile gösterilmiştir;

$$\underline{d} \cdot \underline{n} > 0 \tag{3.60}$$

Olovsson, denklem (3.58)'de gösterilen ceza yerdeğiştirmesini hesaplamak için denklem (3.61) ile ifade edilen ara yüzey sürtünmesini kullanır.

$$\underline{d}_p = \begin{cases} \underline{d}_n \ \ eğer\ \mu_f = 0 \\ \underline{d}_n + \mu_f \frac{|\underline{d}_t|}{|\underline{d}_n|}\underline{d}_t \ \ eğer\ |\underline{d}_n| < \mu_f |\underline{d}_t|, \\ \underline{d}\ eğer\ |\underline{d}_n| \geq \mu_f |\underline{d}_t| \end{cases} \tag{3.61}$$

Burada, μ_f sürtünme katsayısını ifade eder.

Denklem (3.58)'de ifade edilen penalty rijitliğinin basitçe ifadesi atalet rijitliğidir ve bu ifade (3.62) bağıntısı ile verilmiştir;

$$k_p = \varepsilon \frac{\acute{m}}{\Delta t^2} \tag{3.62}$$

Burada Δt zaman adım büyüklüğü ve ḿ ise (3.63) Lagrangian ve Eulerian kütlesinin en küçüğü olarak ifade edilir.

$$\acute{m} = \min\{m_L, m_E\} \tag{3.63}$$

Eulerian kütlesi (m_E), düğüm kütle değerlerini zaman adımının sonunda Lagrangian düğümünün konumuna eşlemek için Eulerian hücre temel fonksiyonları kullanılarak hesaplanır. Lagrangian kütlesi (m_L), basitçe Lagrangian düğümünün kütlesidir. Özünde ceza (penalty) kuvveti, probleme yeni bir yay kütle sistemi ekler. Zaman adımı sınırlamalarından kaçınmak için ceza (penalty) rijitliği, Denklem (3.70) 'da gösterildiği gibi küçük bir çarpan (ε) içerir. Bu çarpan, ceza (penalty) kuvveti tarafından temsil edilen yay kütle sisteminin doğal frekansını genel probleminkinden çok daha düşük yapar. LS-DYNA'daki temas algoritması için % 4'lük bir değer önerirken, Olovsson %5'lik bir değer önerir [37].

Ceza sertliği ve yerdeğiştirme hesaplandıktan sonra, ceza kuvveti denklemden (3.66) hesaplanabilir. Eulerian düğümlerine uygulanan ortaya çıkan kuvvetler, Eulerian hücre baz fonksiyonları; denklem (3.64) kullanılarak belirlenir.

$$\underline{F}_{E,i} = N_i \beta_i \underline{F}_p \tag{3.64}$$

Burada $\underline{F}_{E,i}$ Eulerian hücresinin i düğümüne uygulanan kuvvettir ve N_i, zaman adımının sonunda Lagrangian düğümünün konumunda değerlendirilen i. Eulerian temel fonksiyonudur. Ağırlık fonksiyonu, Eulerian düğüm kuvvetini her düğümdeki Eulerian kütlesine bağlı olarak ölçekler. $m_{E,i}$ parametresi, denklem (3.65) ile;

$$\beta_i = min\left\{1, \frac{m_{E,i}}{(N_i + 0{,}001)\tilde{m}}\right\} \tag{3.65}$$

Bu nedenle, bir Eulerian düğümüne uygulanan kuvvet, o düğümdeki kütle sıfıra gittiği için sıfıra gidecektir. Lagrangian düğümüne uygulanan kuvvet (3.66) denklemi ile ifade edilmiş olup Eulerian kuvvetlerinin toplamına eşit ve zıttır.

$$\underline{F}_L = -\sum_i \underline{F}_{\underline{F},i} \tag{3.66}$$

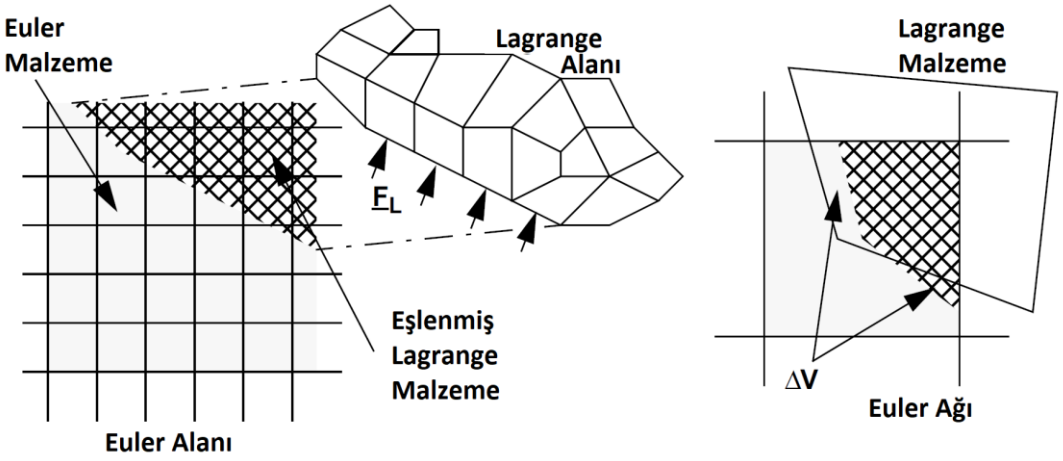
Olovsson'un yönteminde Eulerian ve Lagrangian düğümlerine uygulanan kuvvetler, Eulerian malzemesini Lagrangian yüzeyinden uzağa itme eğiliminde olacaktır. Olovsson'un yöntemi, Eulerian materyalinin Lagrangian alanına hiçbir şekilde iç içe geçmesini katı bir şekilde zorlamaz. Aslında, Eulerian ağ aralığı Lagrangian ağından çok daha azsa, Eulerian malzemesi Lagrangian yüzeyinden "sızabilir". Bunun nedeni, ince Eulerian ağ aralığı için, bir Lagrangian düğümü içermeyen ve bu nedenle herhangi bir geri yükleme kuvveti almayan Eulerian

hücrelerinin olacağıdır. Bu sorunu çözmenin çeşitli yolları düşünülebilir, örneğin düğüm konumlarından ziyade Lagrangian entegrasyon noktası konumlarını kullanarak. Lagrangian ağ aralığı Eulerian ağınınkinden çok daha azsa, aynı kütlesel sızıntı sorunu ortaya çıkmayacaktır.

3.9.4.3 Zapotec Metodu

Noh [32] ve Olovsson [36] tarafından açıklanan yöntemler, Eulerian hesaplamasında Lagrangian bölgesinin hareketini temsil etmek için açık hız veya kuvvet sınır koşullarını kullandı. Bunun aksine, Zapotec yöntemi [38], Lagrangian malzemesini her zaman diliminde doğrudan Eulerian hesaplamasına eşleştirir. Eulerianian hücreleri, bir sonraki Eulerian zaman adımını atmadan önce Lagrangian alanından Lagrangian malzeme durumunu, yani yoğunluğu, basıncı vb. devralırlar. Bu şekilde, Lagrangian hareketinin Eulerianian malzeme üzerindeki etkisi, Noh ve Olovsson tarafından açıklanan yöntemlerde olduğu gibi açıkça hesaplanmak yerine örtük olarak hesaplanır. Bununla birlikte, Eulerianian malzeme hareket nedeniyle Lagrangian alanına etki eden kuvvetleri hesaplamak hala gereklidir.

Zapotec yöntemi, Şekil 3.34'te şematik olarak açıklanmıştır. Zaman adımının (t_n) başlangıcında, Lagrangian bölgesinin konumu ve tüm Lagrangian ve Eulerianian materyallerinin durumu bilinmektedir. Zapotec yönteminin ilk adımı, Lagrangian alanındaki her bir öğe ile bu öğe ile kesişen Eulerianian hücreleri arasındaki örtüşme hacmini hesaplamaktır. Bu yapıldıktan sonra, her Eulerianian hücresindeki Lagrangian materyalinin hacim fraksiyonu bilinir. Aynı hücre içindeki Eulerian malzemesinin hacim oranı, önceki zaman adımından bilinir.



Şekil 3.34 Zapotec Metodu (Bağlaşık Eulerian – Lagrangian) [38]

İdeal olarak, Lagrangian ve Eulerianian materyallerinin hacimleri, hücrenin hacmiyle aynı olmalıdır. Açıkça anlaşılacağı gibi, Lagrangian bölgesinin hareketi Eulerian hesaplamasından bağımsız olarak hesaplandığından, bu zorunlu değildir, ancak buna yakındır. Ortaya çıkan hacim farkı; denklem (3.67) ile verilmiştir;

$$\Delta V = V_{cell} - \sum_i V_i \tag{3.67}$$

Burada; alt simge i hücredeki her bir materyali (Lagrangian veya Eulerianian) gösterir, Eulerian ve Lagrangian materyalleri arasında tahsis edilmelidir. Vaughan [38], hücredeki her malzeme için φ_i denklem (3.68) ile ifade edilmiş olup ağırlıklandırma parametresine dayanan bir dağıtım şemasını tanımlar.

$$\varphi_i = \frac{V_i^2/\rho_i}{\sum_j V_j^2/\rho_j} \tag{3.68}$$

Kapasitenin üzerinde doldurulmuş bir hücredeki her malzeme için düzeltilmiş hacim, yani $\Delta V < 0$, (3.69) bağıntısı ile belirtilmiştir;

$$\tilde{V} = V_i + \frac{\varphi_i}{\sum_j \varphi_j} \Delta V \tag{3.69}$$

Burada $\tilde{V}$, hücredeki her malzeme için düzeltilmiş hacmi gösterir. Hacim düzeltmesi, kısmi boşluk hacmine, yani $\Delta V > 0$ olan hücreler için değil, yalnızca fazla doldurulmuş hücreler için gerçekleştirilir. Denklem (3.68) ve Denklem (3.69), çok küçük hacimli malzemeleri ihmal ederken Denklem (3.67)'den kaynaklanan herhangi bir hacim değişikliğini en düşük yoğunluğa sahip malzemeye tahsis etme eğiliminde olacaktır.

Doğru hacim fraksiyonları bilindiğinde, Lagrangian materyali Eulerian hücresine eşlenir ve bu hücre Lagrangian materyal yoğunluğunu, basıncını, iç enerjisini vb. devralır. Eulerian hücresindeki basınç daha sonra tüm Eulerianan'ın hacim ortalamalı basıncından hesaplanır. ve içindeki Lagrangian malzemeleri. Ayrı malzeme basınçları, Denklem (3.68) ve Denklem (3.69) 'ten kaynaklanan malzemelerin herhangi bir ek sıkıştırması ile de artırılabilir. Diğer tüm hücre özellikleri, bireysel malzeme özelliklerinin kütle ortalamalarıdır.

Bu noktada, bir sonraki Lagrangian ve Eulerianan zaman adımları bağımsız olarak atılır. Bir sonraki adım için Lagrangian alanına etki eden kuvvetler, komşu Eulerian hücrelerindeki stres durumundan hesaplanır. Eulerian hesaplaması, haritalanan Lagrangian materyalini bir sonraki Eulerian zaman adımı hesaplamasına taşır. Daha önce tartışıldığı gibi, haritalanan Lagrangian materyalinin hareketi ve Lagrangian alanı ideal olarak tam olarak karşılık gelmelidir.

Zapotec algoritmasında, Eulerianian hesaplamasında haritalanmış Lagrangian materyalinin varlığıyla, Lagrangian-Eulerianian bağışıklığı, eylemsizlik etkileri de dâhil olmak üzere dolaylı olarak ele alınır. Ancak tersi doğru değildir ve Lagrangian etki alanına etki eden kuvveti değerlendirerek hesaba katılmalıdır. Ayrıca, yukarıda açıklanan prosedür, eklenen kütlenin Lagrangian alanı üzerindeki etkisini hesaba katmaz [34]. Vaughan [38], yukarıda açıklanan yöntemin, Lagrangian bölgesinin hızını mübağala etme eğiliminde olduğunu öne sürer. Eklenen kitle etkisinin bu tahminin bir kısmını açıklayabilmesi mümkündür.

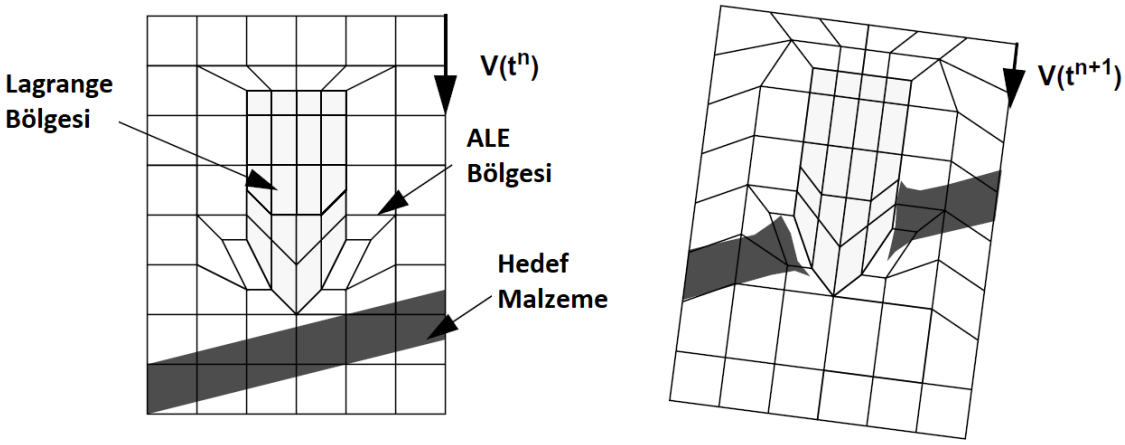
Yukarıda açıklanan Zapotec yöntemindeki zahmetli hesaplamalardan birinin Lagrangian ve Eulerianian hücreleri arasındaki hacim çakışması hesaplaması olduğuna dikkat etmek önemlidir. Bu kesişim hesaplaması için bir dört yüzlü ile bir altı yüzlü arasındaki kesişme için çok kesin bir hesaplama kullanılır. Bir tertrahedral ve bir düz, dikdörtgen katı veya paralel boru arasında daha az hassas bir kesişim kullanılarak bazı hesaplama tasarrufları elde edilebilir.

3.9.4.4 SHISM Metodu

Budge [39] tarafından önerilen SHISM yöntemi, Lagrangian ve Eulerian alanlarını açık bir şekilde birleştirmenin zorluklarından kaçınmak için keyfi Lagrangian-Eulerian (ALE) formülasyonu kullanır. ALE formülasyonu, Eulerian hedef alanı ile Lagrangian penetrator arasında sürekli bir hesaplama ağının kullanılmasına izin verir. Yukarıda tartışılan CEL (Bağlaşık Lagrangian Eulerian Metodu – Coupled Lagrangian – Eulerianian Method) yöntemlerinde kullanılan ara yüz modelleri, ayrıklaştırmaya dâhil olur ve ara yüz mekaniği çok doğal bir şekilde ele alınır.

Bununla birlikte, önceki bölümde tartışıldığı gibi, ALE yöntemleri, derin penetrasyon uygulamalarında örgü karışıklık problemlerini tamamen önleyemez. Budge, Şekil 3.35'te gösterildiği gibi ters balistik bir tarzda koşarak bu zorluğu çözer. ALE bölgesi için bir referans hızı tanımlayarak, hedefin deliciden geçmesi olarak düşünülebilir. ALE bölgesine göre Lagrangian penetranın herhangi bir göreceli hareketi, ALE bölgesindeki yeniden eşleştirme adımı ile sağlanabilir. Hedef malzemenin sağladığı penetranın herhangi bir brüt dönüşüne karşılık gelen referans hızına bir rotasyonel bileşen dâhil edilerek ilave esneklik elde edilebilir.

Ağ karışıklığından kaçınırken, SHISM yönteminin birkaç önemli sınırlaması vardır. Kalın veya yarı sonsuz bir hedef, Eulerianian alanı için bir tür giriş sınır koşulu gerektirecektir. Böyle bir koşulun karmaşık homojen olmayan hedef için veya dönen bir Eulerianian alanı için uygulanması zor olabilir. Birden fazla delicinin tek bir hedefle etkileşimi de SHISM yöntemini kullanmak zor olabilir. Son olarak, temas hesaplaması bazı eylemsizlik etkilerini hesaba katsa da, eklenen kütlenin [34] Lagrangian bölgesinin hareketi üzerindeki etkisini tam olarak hesaba katmak için SHISM yönteminde iyileştirmelere ihtiyaç duyulabilir.



Şekil 3.35 SHISM metodu [39]

Bununla birlikte, SHISM yönteminin ALE doğası, ALEGRA mimarisine doğal bir uyum sağlar ve hali hazırda uygulanmıştır. ACME paketinde sağlanan temas yeteneği kullanılarak ALE bölgesi ile Lagrangian bölgesi arasında düğümden düğüme ağ sürekliliği gerekliliğini hafifletmek için SHISM uygulamasında iyileştirmeler yapılabilir [40]. Bu iyileştirme, ağ oluşturma görevini önemli ölçüde basitleştirecektir. Penetratör / hedef ara yüzdeki etkileşim kuvvetini daha doğru bir şekilde hesaplamak için bazı ek çalışmalara ihtiyaç vardır.

4
YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER

Tezin bu bölümünde, yedi farklı mühendislik yapısının patlama davranışı ele alınmış, bunlarla ilgili yapılan çalışmalar, bulgular ve irdelemeler sunulmuştur. Bu kapsamda, mühendislik yapılarının sonlu eleman modelleri (SEM) ANSYS Workbench yazılımı, patlama analizler ise ANSYS AUTODYN yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında seçilen yapılar aşağıda sıralanmış olup her bir mühendislik yapısı kendi içerisinde ayrı başlıklar halinde ele alınmıştır.

- Betonarme Kolon Modeli
- Betonarme İstinat Duvar Modeli
- İki Katlı Betonarme Bina Modeli
- Betonarme Köprü Modeli
- Beton Ağırlık Baraj Modeli
- Beş Katlı Betonarme Bina Modeli
- Üç Farklı Betonarme Duvar Modeli

Bu bölümde; tez konusu olarak belirlenmiş bulunan, mühendislik yapılarından başlıca çalışmalar seçilmiştir. Seçilen bu mühendislik yapı örnekleri; ANSYS Yazılımı [114] ve ANSYS AUTODYN yazılımı [115] bilgisayar yazılımları, ampirik formülasyonlar (matematiksel ifadeler) ve patlama yükü standardı (UFC 3-340-02) [1] doğrultusunda patlama etkisi altındaki davranışları araştırılarak kıyaslanmış olup, uygunlukları araştırılmıştır. Bu kapsamda; istinat duvarı, betonarme kolon, iki katlı betonarme bina, köprü, baraj ve beş katlı betonarme bina modelleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, sonlu eleman modelleri ve patlama analizleri için: Dizüstü bilgisayar kullanılmış olup cihaz; i5 işlemci, 8 gb ram, 250 gb SSD bellek ve 1 gb harici ekran kartına sahiptir.

4.1 Betonarme Kolon Modeli

Bu kısımda, birisi geleneksel betonarme kurallarına göre inşa edilmiş, diğeri ise donatı sıklaştırması yapılarak daha sünek hale getirilmiş iki betonarme kolon arasında patlatma yapılarak bu iki kolonun yapısal davranışının belirlenmesi ele alınmıştır. Bu kapsamda [93] tarafından deneysel olarak yapılan çalışma dikkate alınmış ve bu çalışmanın sonuçları değerlendirme için kullanılmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmadaki kolonlar ANSYS yazılımı ile modellenerek patlama analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel patlama modeli ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca ampirik formüller ile elde edilen değerler de değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmada patlayıcı malzeme iki kolonun arasına yerleştirilerek patlama gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, bizzat deneysel uygulama yapılmamış olup, daha önceden yapılmış olan bir deneysel arazi uygulaması (betonarme kolon modeli), bilgisayar ortamında ve teorik ortamda davranışları analiz edilmiştir.

Deneysel çalışma ile [93], yapılan araştırmaya göre, iki farklı tipte kolon imal edilerek patlayıcı kolonların arasında patlatılarak etkiler ölçülmüştür. Yapı betonarme olarak imal edilmiş olup ayrıca hava ve patlayıcı ANFO madde de bulunmaktadır. Deneysel çalışma ortamı ve patlama görseli Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Deneysel çalışma sahası ve patlamanın gerçekleşeme anı [93]

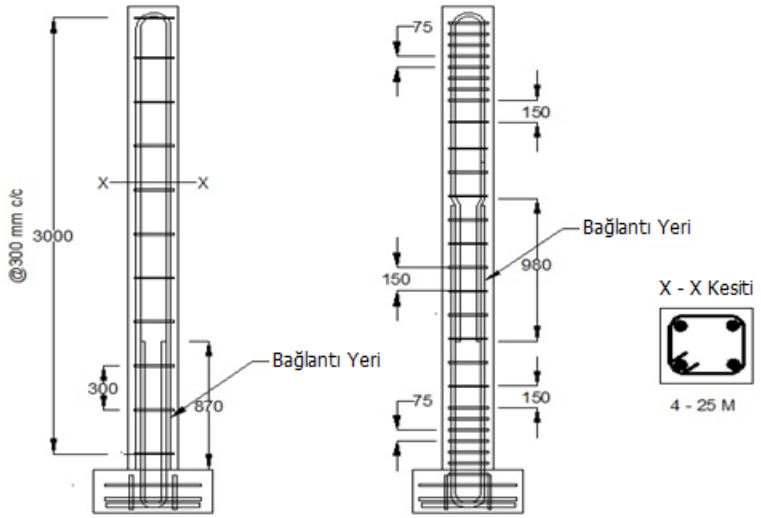
4.1.1 Betonarme Kolon ve Sonlu Eleman Modeli

Yapılmış olan deney ANSYS AUTODYN yazılımında modellenirken malzemelerin mekanik özellikleri aynı şekilde tanımlanmış olup, yapılmış olan deney sonuçları, ANSYS AUTODYN yazılımı ile alınan sonuçlar, UFC-340-02 ve bazı ampirik formülasyon ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır.

Katı modeli, ANSYS Workbench yazılımı üzerinde açık yöntem (explicit method) kullanılarak modellenmiş ve mesh aralığı 200 mm olarak seçilmiştir. Modellenen katı yapı ardından ANSYS AUTODYN yazılımına aktarılarak patlama analizine hazır hale getirilmiş ve ağ (mesh) aralığı 100 mm olarak seçilmiştir.

Yapılan deneysel çalışma incelenerek üç patlama modeli alınmış olup, bu modeller bilgisayar ortamında benzer bir şekilde modellenmiştir.

Deneysel çalışmada patlayıcı malzeme olarak ANFO tipi patlayıcı kullanılmış olup, bu patlayıcı, sonlu eleman modelinde TNT türü patlayıcıya çevrilerek analizler gerçekleştirilmiş olup Şekil 4.2'de görüleceği üzere iki farklı betonarme kolon modeli hazırlanmış olup bunlardan birincisi süneklik düzeyi yüksek kolon diğeri ise süneklik düzeyi sınırlı kolon olarak imal edilmiştir.



Şekil 4.2 Yüksek ve sınırlı sünekliğe sahip kolonların donatı detayları [93]

Kolonların boyutları ise 320×30×30 cm olarak tasarlanmış olup sadece donatı düzenlerinde değişiklik bulunmaktadır. İlk kolon süneklik düzeyi sınırlı olarak tasarlanmış olup ikincisi ise süneklik düzeyi yüksek kolon olarak imal edilmiştir. Beton malzeme modellenirken *RHT Concrete* beton modeli kullanılmış olup

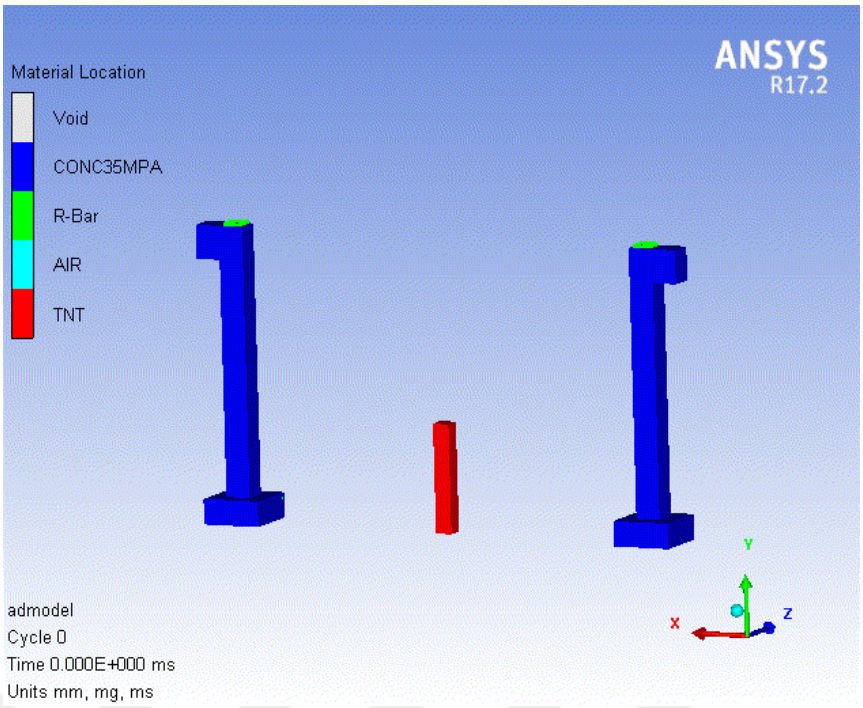
kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Her iki kolonda da boyuna donatıların çapı 19,5 mm ve akma gerilmesi ise 474,4 MPa, akma uzaması ise 0,0024 olarak seçilmiştir. Her iki kolonda da etriye donatıları kullanılmış olup mekanik özellikleri; 11,3 mm çapında, 465,2 MPa akma gerilmesine ve 0,0022 akma uzamasına sahiptir. Donatı çeliği modelinde, Johnson Cook modeli kullanılmış olup kırılma modeli olarak ise *Plastic Strain* kriteri kullanılmıştır.

Ayrıca beton malzemesi 32 MPa basınç gerilmesine sahiptir. Buna göre kullanılan malzemeler ve özellikleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Yalnızca ANFO patlayıcı malzeme TNT malzemeye eşdeğer dönüşümü yapılarak bilgisayar ortamında modelleme yapılmıştır.

Tablo 4.1 Sonlu eleman modelindeki malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Beton	Beton	$3{,}2 \times 10^4$	2,40	32	2,0
Donatı	B420C	2×10^5	7,83	420	420
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlayıcı	TNT	-	1,60	-	-

Yapılmış olan deneysel çalışmada, üç farklı patlatma modeli tercih edilmiştir: birinci modelde, 100 kg kütleli ANFO patlayıcı iki kolonun tam ortasına yerleştirilmiş olup her bir kolon patlayıcıya 2,5 m mesafeye yerleştirilmiştir. İkinci modelde; kolonların arasına 150 kg kütleli ANFO patlayıcı konulmuş olup, patlayıcı malzeme, süneklik düzeyi sınırlı kolona 1,3 m ve süneklik düzeyi yüksek kolona ise 4,1 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Üçüncü modelde ise; kolonların arasına aynı şekilde 150 kg kütleli ANFO patlayıcı konulmuş olup, patlayıcı malzeme, süneklik düzeyi yüksek kolona 1,3 m ve süneklik düzeyi sınırlı kolona ise 4,4 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Betonarme kolonların sonlu eleman model gösterimi Şekil 4.3 ile göstermiştir.



Şekil 4.3 Betonarme kolonların sonlu eleman modeli

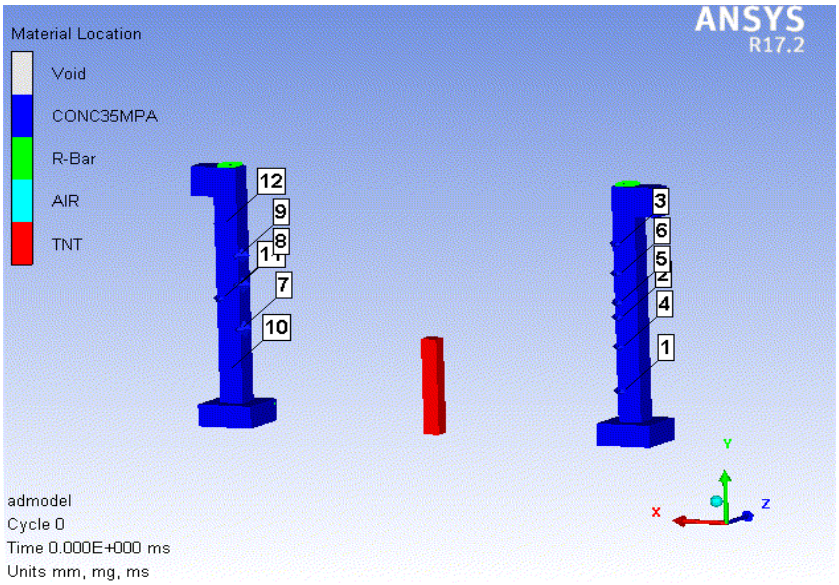
Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve patlama yüküne ilişkin tüm analizler ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. Lagrangian Model Worbench (Explicit Dynamics) yazılımı ile modellenmiştir. Lagrangian (Katı) Modele ilişkin mesh, ANSYS Workbench (Explicit Dynamics) yazılımı ile yapılmış olup, birim mesh uzunluğu ise 250 mm olarak seçilmiştir. ANSYS Workbench yazılımı üzerinde üç boyutlu Lagrangian model tasarımı, malzeme özellikleri, mesh tanımı gibi genel tasarımların tamamlanmasına müteakip, patlama analizinin yapılacağı ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde Eulerian (Akışkan – Hava) modellemesi tasarımı yapılmıştır. Buna göre üç boyutlu katı model patlama işleminin gerçekleşeceği hava modelinin içerisine yerleştirilmesi gerekir, bunun için 10.000 mm × 6.000 mm × 6.000 m ebatlarındaki bir dikdörtgenler prizması geometrili hava (akışkan) malzemenin içerisinde modellenmiştir. Lagrangian Modelde de yapıldığı gibi mesh işlemi hava modele de aynen uygulanmıştır. Uygulanan birim mesh uzunluğu ise 200 mm olarak seçilmiştir. Eulerian Modele uygulanan birim mesh uzunluğunun katı modele uygulanandan daha küçük seçilmesinin nedeni olarak; yazılım, analiz aşamasında kuvvet aktarımlarında kuvvetlerin daha doğru ve başarılı bir şekilde aktarma işleminin gerçekleşmesi için Eulerian modelde birim mesh uzunluğu daha küçük olmalıdır. Modellerde kullanılan ANFO patlayıcılar eşdeğer yöntemle

TNT'ye çevrilmiş olup: 100 kg ANFO, 83 kg TNT ve 150 kg ANFO ise 123 kg TNT tipi patlayıcıya eşdeğerdir.

4.1.2 Okuma Noktaları

Oluşturulan bu hava modeline son olarak seçilen TNT patlayıcı iki kolonun arasına yerleştirilmiştir olup 3 ayrı durum olarak incelenmiştir. Patlayıcıların modellenmesi ise şu şekilde gerçekleştirilmiştir; patlayıcı model mesh aralıklarına yerleştirilmek suretiyle modellemeler hazırlanmış olup; 13×2×2 (i.j.k) mesh aralıklarına yerleştirilerek (13×2×2=52 br², yoğunluk=1,63 gr/cm³ ve birim mesh =200mm hesabından TNT kütlesi ≈ 83 kg) olarak hesaplanmış aynı şekilde diğer TNT kütlesi de 13×3×2 (i.j.k) mesh aralıklarına yerleştirilerek (13×3×2=78 br², yoğunluk= 1,63 gr/cm³ ve birim mesh =200mm hesabından TNT kütlesi≈123 kg) olarak hesaplanmıştır.

Analizler için 3 milisaniye patlama süresi ayarlanmış olup bilgisayar özelliklerine bağlı olarak daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, daha detaylı sonuçlar almak için artırılabilir. Patlayıcının yeri ve patlamadan sonra sonuçların detaylı incelenmesi için yerleştirilen okuma noktalarının konumları Şekil 4.4'de gösterilmektedir.

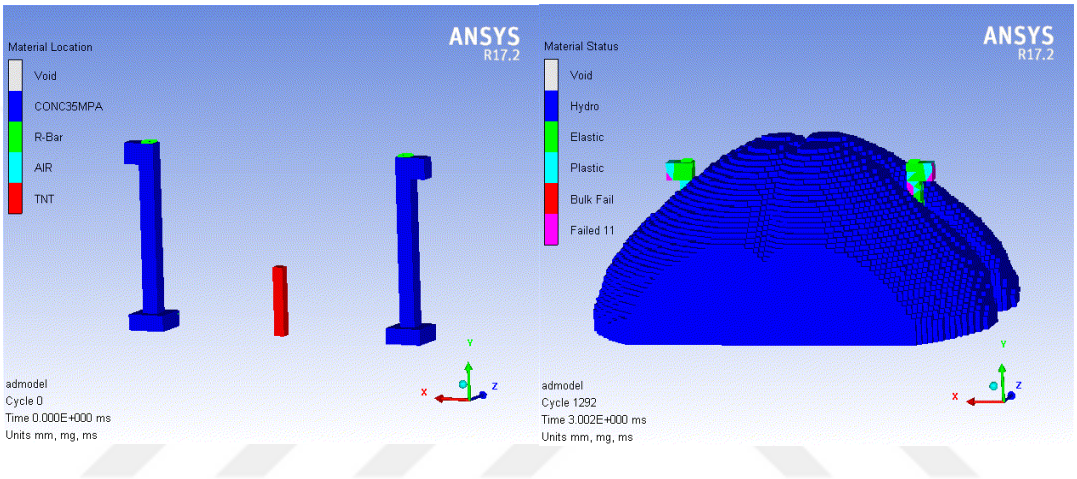


Şekil 4.4 Sonlu eleman modeli ve ölçü noktalarının konumları

4.1.3 Patlama Modelleri

Patlama Durumu 1

Bu çalışmada, 150 kg ANFO patlayıcı (≈123 kg TNT) birisi süneklik düzeyi yüksek diğeri ise süneklik düzeyi sınırlı olmak üzere iki kolonun tam ortasına yerleştirilerek patlama gerçekleştiriliştir. Patlayıcı malzemenin her bir kolona uzaklığı 2,5 m'dir. Deneysel çalışmadaki malzemelerin mekanik özellikleri ve geometrik boyutları ANSYS AUTODYN yazılımı ortamında modellenmiş yalnızca ANFO patlayıcı malzemesi yerine eşdeğer TNT malzeme kullanılmıştır. (Şekil 4.5)



Şekil 4.5 Model no.1 ve patlama etkisi

Patlama Durumu 2

Bu çalışmada ise, 150 kg ANFO patlayıcı malzeme (≈123 kg TNT) birisi süneklik düzeyi yüksek diğeri ise süneklik düzeyi sınırlı sahip olmak üzere iki kolonun arasına yerleştirilerek patlama gerçekleştiriliştir. Patlayıcı malzemenin süneklik düzeyi sınırlı kolona uzaklığı 1,3 m olacak şekilde yerleştiriliştir. Deneysel çalışmada kullanılan; malzemelerin mekanik özellikleri ve geometrik boyutları ANSYS AUTODYN yazılımı ortamında modellenmiş yalnızca ANFO patlayıcı malzemesi yerine eşdeğer TNT malzeme kullanılmıştır.

Patlama Durumu 3

Bu çalışmada ise, 150 kg ANFO patlayıcı malzeme (≈ 123 kg TNT) birisi süneklik düzeyi yüksek diğeri ise süneklik düzeyi sınırlı olmak üzere iki kolonun arasına yerleştirilerek patlama gerçekleştiriliştir. Patlayıcı malzemenin süneklik düzeyi

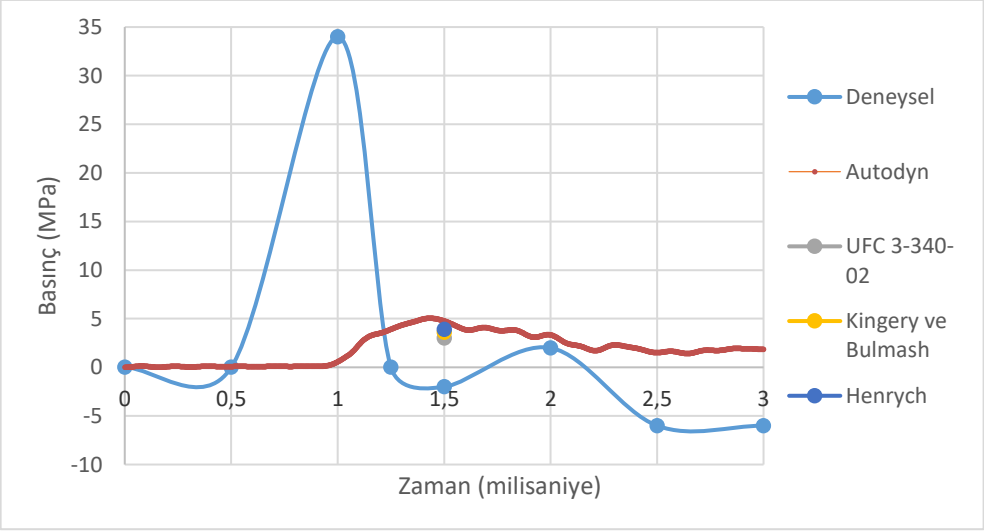
yüksek kolona uzaklığı 1,3 m olacak şekilde yerleştiriliştir. Deneysel çalışmada kullanılan; malzemelerin mekanik özellikleri ve geometrik boyutları ANSYS AUTODYN yazılımı ortamında modellenmiş yalnızca ANFO patlayıcı malzemesi yerine eşdeğer TNT malzeme kullanılmıştır.

4.1.4 Bulgular ve İrdelemeler

4.1.4.1 Patlama Basınçları

Patlama Durumu 1

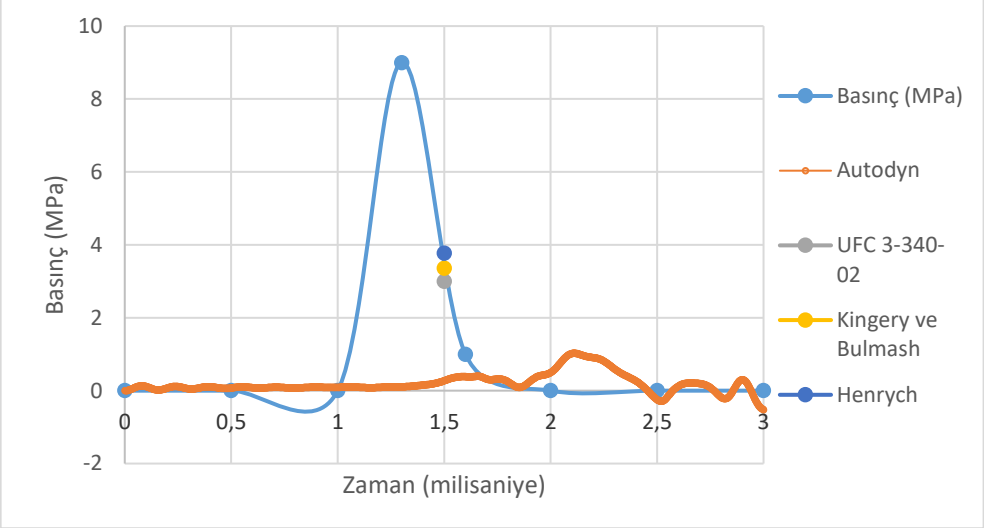
Deneysel çalışmada elde edilen basınç değerleri, ANSYS AUTODYN yazılımından elde edilen sonuçlar, ampirik formüller ve UFC-340-02 grafikleri kullanılarak okunan değerler grafik (Şekil 4.6) üzerine yerleştirilerek kıyaslama yapılmıştır. Ampirik formüller ve UFC-340-02 için ölçeklendirilmiş uzaklık (Z); 0,58 m/kg1/3 olarak hesaplanmış olup ampirik formüller için pik basıncın 1,5 milisaniyede gerçekleştiği tahmininden hareketle, ampirik formüllerden elde edilen değerler grafik üzerinde işaretlenmiştir. Şekil (4.8 – 4.9) ile verilen dört grafikten, kolonun arka yüzünde oluşan patlama için ampirik formül sonuçları verilmemiştir.



Şekil 4.6 Kolonun ön-alt bölgesine etkiyen patlama basıncı

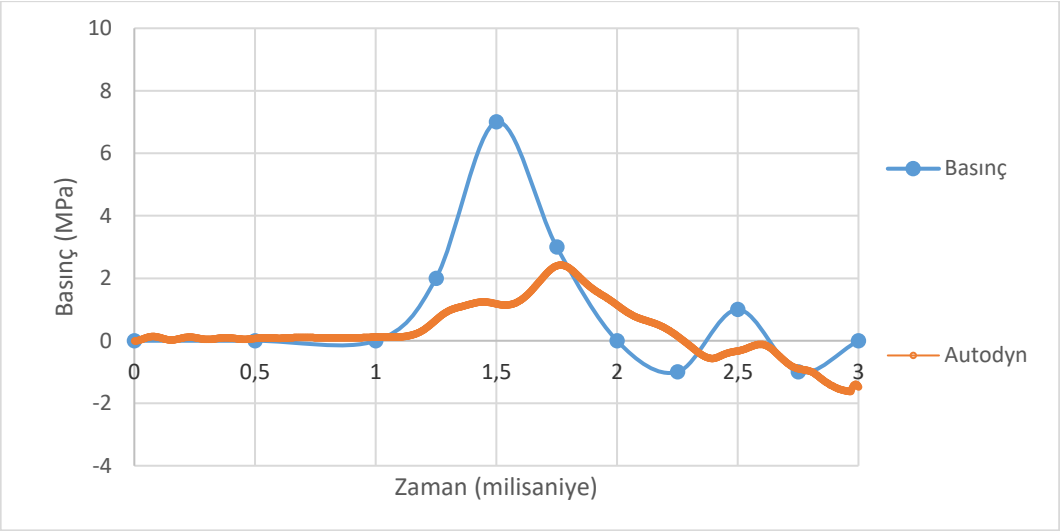
Kolonların ön alt bölgesine etkiyen basınçlar incelendiğinde; deneysel çalışmada basınç değerinin 34 MPa seviyelerinde olduğu ancak, ANSYS AUTODYN yazılımı sonuçlarına göre 5 MPa pik basıncı elde edilmiştir. Diğer taraftan ampirik sonuçlar incelendiğinde ise AUTOYN analizi sonuçları ile benzerlik göstermektedir; UFC-340-02 3 Mpa, Kingery ve Bulmash 3,6 MPa ve Henrych 3,89 MPa değerleri elde

edilmiştir. Bununla birlikte kolonun ön üst kısmında (Şekil 4.7) oluşan basınç değerleri için benzer yorum yapılabilir. ANSYS AUTODYN yazılımı ile üretilen basınç değeri 1 MPa; UFC-340-02 3 Mpa, Kingery ve Bulmash 3,36 MPa ve Henrych 3,77 MPa olarak hesaplanmış olmasına karşın deneysel veri sonuçlarına göre pik basınç 9 MPa seviyesine meydana gelmiştir.

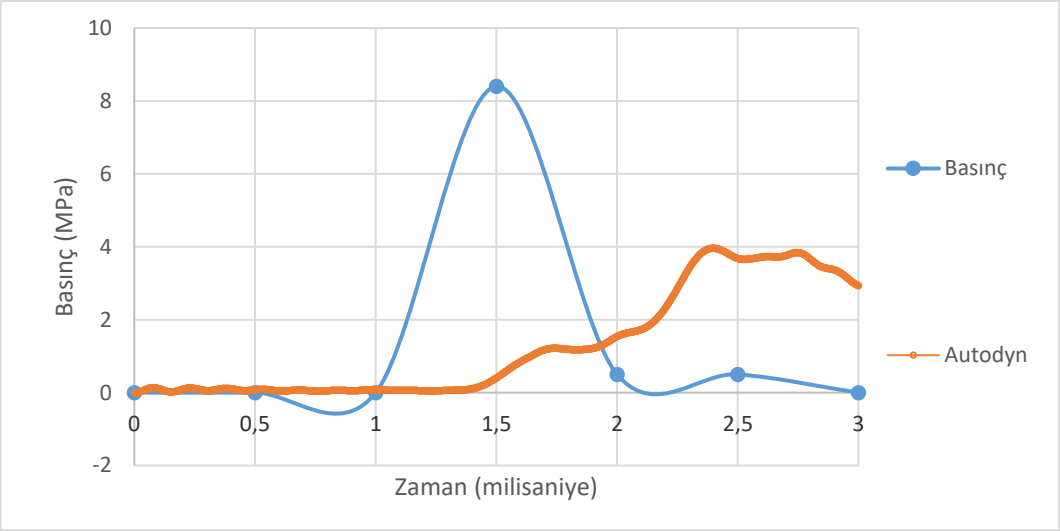


Şekil 4.7 Kolonun ön-üst bölgesine etkiyen patlama basıncı

Kolonların arka alt kısmına etkiyen basınçlar incelendiğinde ise sadece deneysel veriler ile ANSYS AUTODYN analizi verileri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8'deki grafik incelendiğinde ise, deneysel verilere göre pik basınç 7 MPa olmasına karşın, ANSYS AUTODYN verilerine göre pik basınç değeri 2,5 MPa olarak elde ediliştir. Kolonun arka üst kısmı için (Şekil 4.9) yine benzer sonuçların ortaya çıktığı görülebilir; deneysel verilere göre pik basınç 8,3 MPa olarak elde edilmiş iken AUTODYN analizi verilerine göre pik basınç değeri 4 MPa olark tespit edilmiştir. Bu verilere göre deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile ANSYS AUTODYN yazılımından elde edilen sonuçları eşleşmemesine karşın, Ampirik bağıntılar ve UFC-340-02 verileri ANSYS AUTODYN sonuçları ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.8 Kolonun arka-alt bölgesine etkiyen patlama basıncı

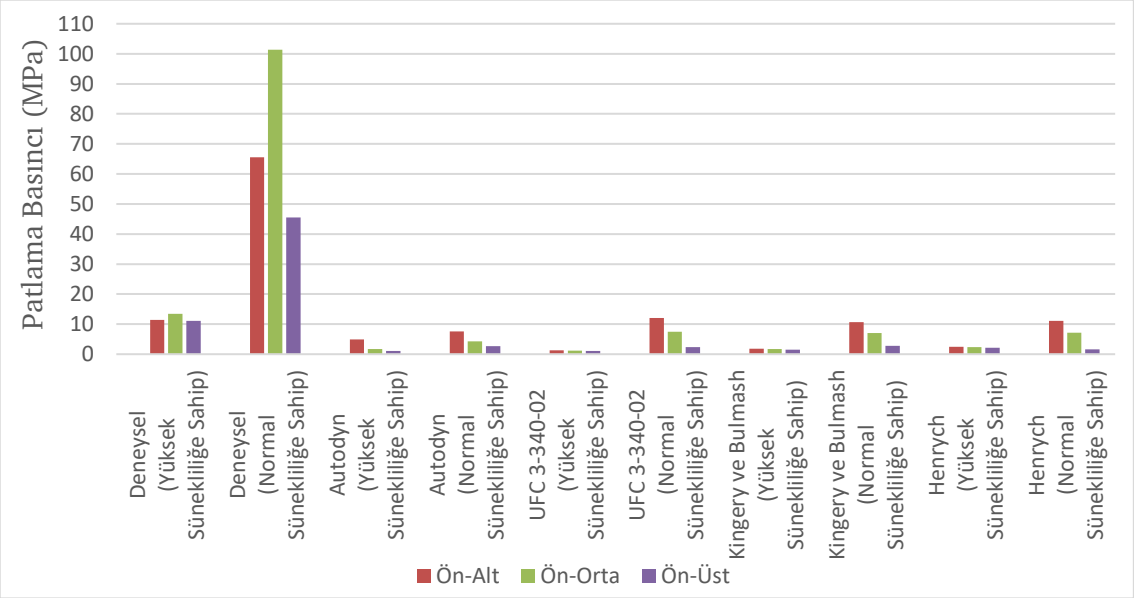


Şekil 4.9 Kolonun arka-üst bölgesine etkiyen patlama basıncı

Patlama Durumu 2

Deneysel çalışmadan edinilen patlama basınçları, ANSYS AUTODYN yazılımından elde edilen sonuçlar, ampirik formüller ve UFC-340-02 grafiklerinden okunan değerler, grafik (Şekil 4.10) üzerinde kıyaslanmıştır. Ampirik formüller ve UFC-340-02 için ölçeklendirilmiş uzaklık, süneklik düzeyi sınırlı kolon için Z: 0,25 $m/kg^{1/3}$ ve süneklik düzeyi yüksek kolon için Z: 0,99 $m/kg^{1/3}$ olarak hesaplanmış olup elde edilen tüm pik basınç değerleri çizgi grafik üzerinde gösterilmiştir. Kolonların alt, orta ve üst noktaları için etki eden basınçlar incelenmiş olup geleneksel kolon için: alt, orta ve üst noktalarda, sırasıyla; 65,6 MPa, 101,4 MPa ve 45,5 MPa olarak elde edilmiş olup, süneklik düzeyi yüksek kolon için bu

değerler sırasıyla; 11,4 MPa, 13,4 MPa ve 11,08 MPa olarak ortaya çıkmıştır. ANSYS AUTODYN yazılımına üzerinden okunan değerler ise: süneklik düzeyi sınırlı kolon için, sırasıyla; 7,6 MPa, 4,3 MPa ve 2,7 MPa iken, süneklik düzeyi yüksek kolon için; 4,9 MPa, 1,66 MPa ve 1,04 MPa olarak ortaya çıkmıştır. Buna göre; deneysel verilerden elde edilen sonuçlar daha yüksek çıkmakla beraber, pik basınç değeri kolonun orta nokrasında gerçekleşmiş ancak ANSYS AUTODYN yazılımına göre ise en büyük pik basınç değerlerinin kolonun alt noktasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Amiprik formüllerden elde edilen sonuçlara göre ise; ANSYS AUTODYN sonuçları, Ampirik ifadeler ve UFC-340-02'den elde edilen basınç sonuçlarının ise birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

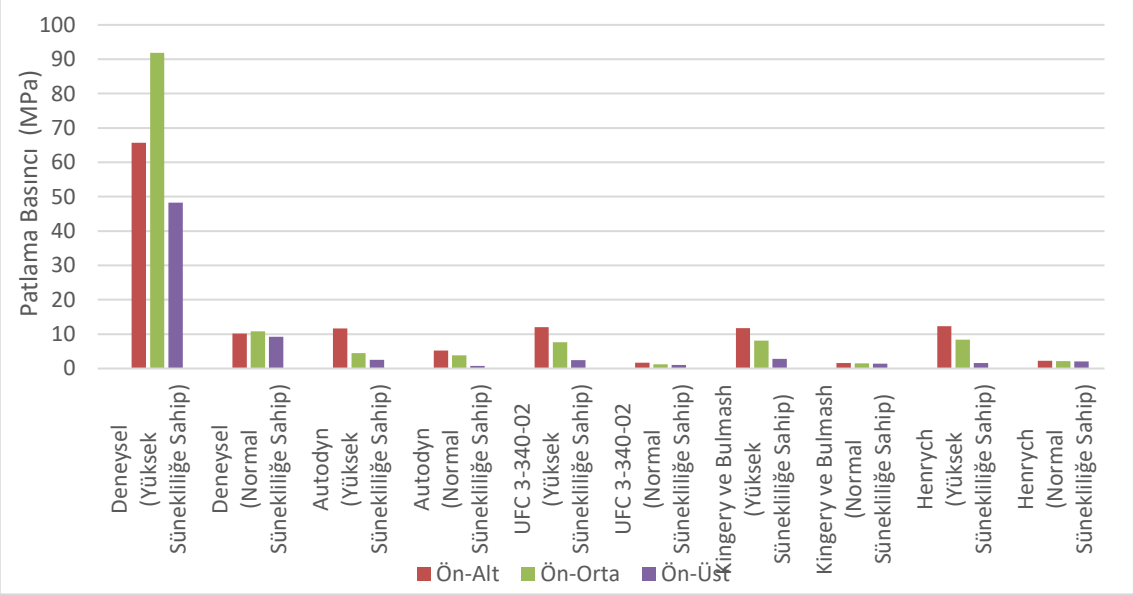


Şekil 4.10 Kolonların ön yüzünde (model no 2) oluşan patlama basınçları

Patlama Durumu 3

Deneysel çalışmadan edinilen patlama basınçları, ANSYS AUTODYN yazılımından elde edilen sonuçlar, ampirik formüller ve UFC-340-02 grafiklerinden okunan değerler grafik (Şekil 4.11) üzerinde kıyaslanmıştır. Ampirik formüller ve UFC-340-02 için ölçeklendirilmiş uzaklık süneklik düzeyi sınırlı kolon için Z: 0,25 $m/kg^{⅓}$ ve süneklik düzeyi yüksek kolon için Z: 0,99 $m/kg^{⅓}$ olarak hesaplanmış olup elde edilen tüm pik basınç değerleri çizgi grafik üzerinde gösterilmiştir. Kolonların alt, orta ve üst noktaları için etki eden basınçlar incelenmiş süneklik düzeyi yüksek kolon için: alt, orta ve üst noktalarda, sırasıyla; 65,7 MPa, 91,99

MPa ve 48,3 MPa olarak elde edilmiş olup, süneklik düzeyi sınırlı kolon için bu değerler sırasıyla; 10,2 MPa, 10,8 MPa ve 9,2 MPa olarak ortaya çıkmıştır. ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinden okunan değerler ise: süneklik düzeyi yüksek kolon için, sırasyla; 11,7 MPa, 4,5 MPa ve 2,5 MPa iken, süneklik düzeyi sınırlı kolon için; 5,2 MPa, 3,85 MPa ve 0,8 MPa olarak ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre; deneysel verilerden elde edilen sonuçlar daha yüksek çıkmakla beraber en büyük pik basınç değeri kolonun orta nokrasında gerçekleşmiş ancak ANSYS AUTODYN yazılımına göre ise en büyük pik basınç değerlerinin kolonun alt noktasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Amiprik formüllerden elde edilen sonuçlara göre ise; ANSYS AUTODYN, Ampirik ifadeler ve UFC-340-02'den elde edilen basınç sonuçlarının ise birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 Kolonların ön yüzünde (model no 3) oluşan patlama basınçları

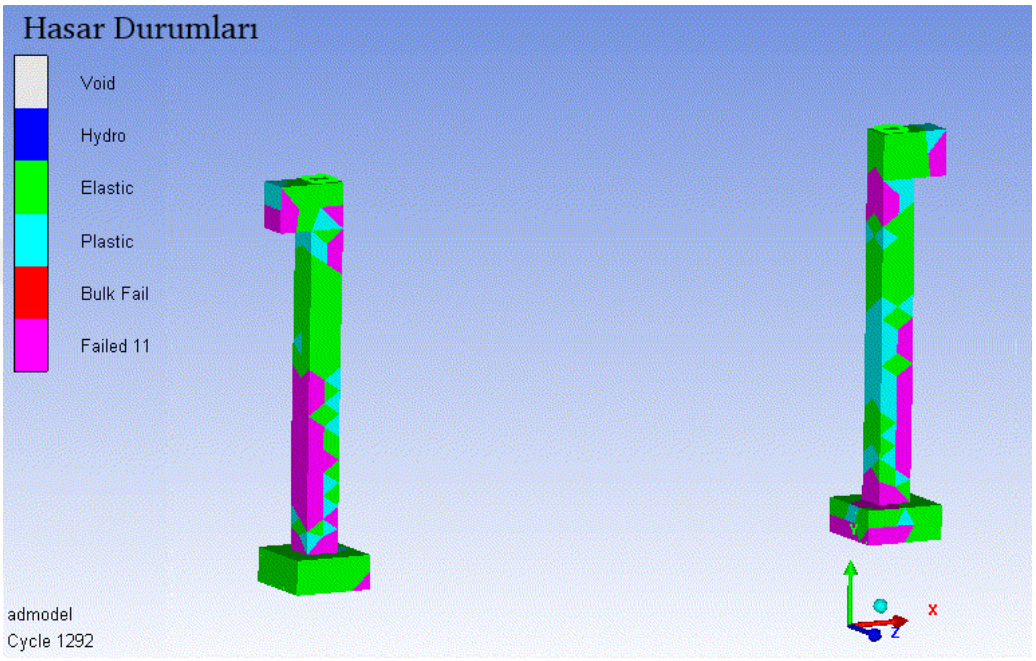
4.1.4.2 Hasar Durumları

Hasar Durumları için, patlama sonrası kolonlarda meydana gelen hasar mekanizması tetkik edilmiştir. Buna göre iki kolonun tam ortasına yerleştirilen patlayıcının infilak etmesiyle süneklik düzeyi yüksek kolonda ve süneklik düzeyi sınırlı kolonda elastik, plastik ve parçalanan bölgeler meydana gelmiştir.

Ayrıca, her iki kolonun da arka bölgesinde, zeminden 1,5 m yüksekliğe kadar olan kesiminde (Şekil 4.12) beton malzemenin parçalandığı tespit edilmiştir. Ancak

süneklik düzeyi yüksek kolon, süneklik düzeyi sınırlı kolona göre nispeten daha düşük oranda hasar aldığı gözlemlenmiştir.

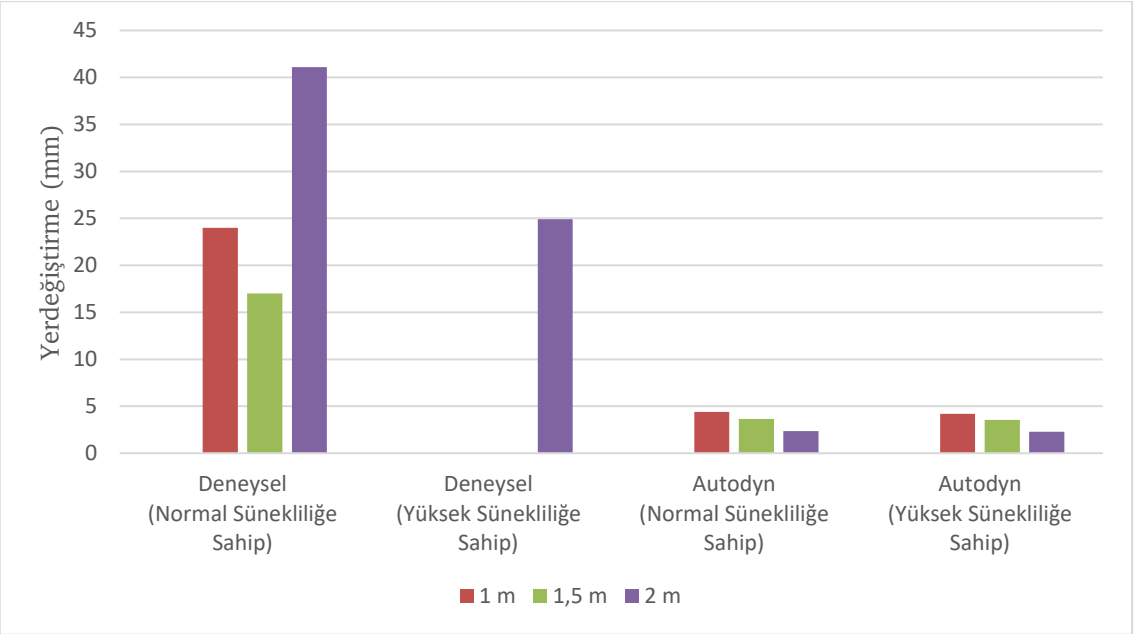
Özellikle süneklik düzeyi sınırlı kolonun temelinde meydana gelen parçalanma meydana gelmiştir. Diğer taraftan süneklik düzeyi yüksek kolonun ön yüzeyi elastik olarak çalışmaya devam ederken süneklik düzeyi sınırlı kolonun ön yüzeyinde ise plastik bölge oluşumu meydana gelmiştir.



Şekil 4.12 Kolonlarda oluşan hasar durumları

4.1.4.3 Yerdeğiştirmeler

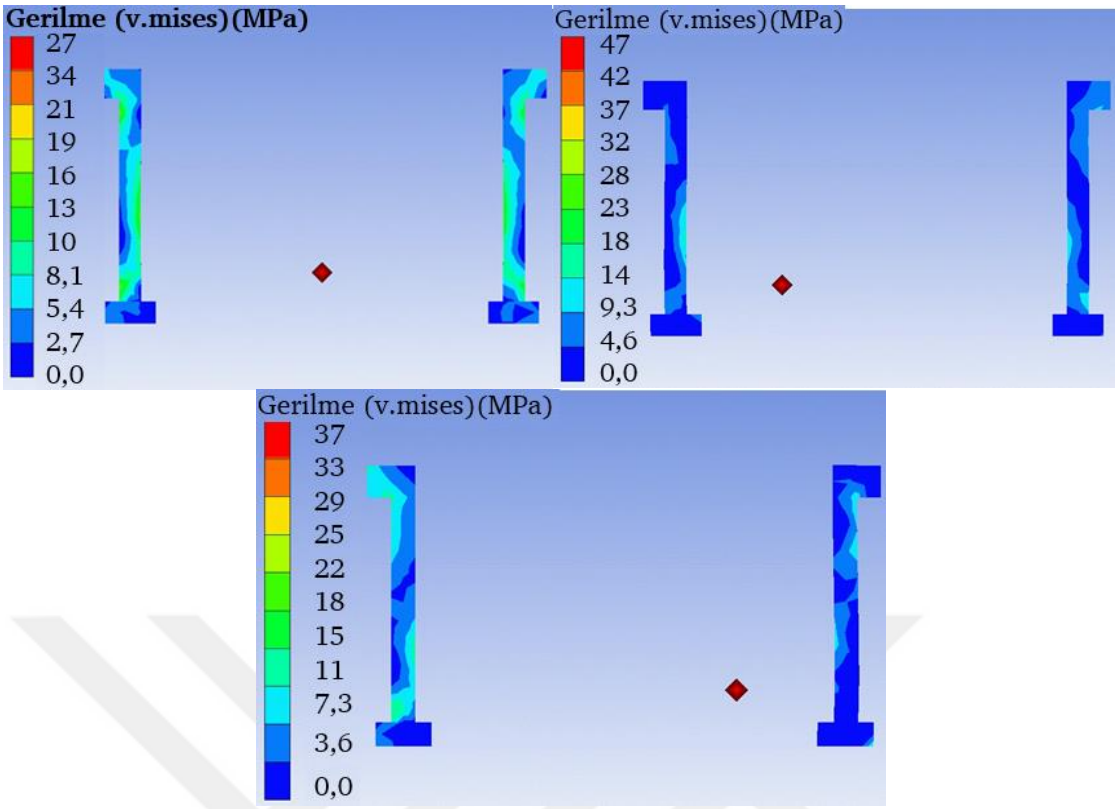
Yerdeğiştirme değerleri için kolonların 2 m, 1,5 m ve 1 m yüksekliğe konumlandırılmış bulunan okuma noktaları üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar yine Deneysel veriler ve ANSYS AUTODYN verileri üzerinden yapılmıştır. Deneysel verilere göre, süneklik düzeyi sınırlı kolon üzerinde; 2 m, 1,5 m ve 1 m yüksekliğe konumlandırılmış olan ölçü noktaları üzerinde (Şekil 4.13) sırasıyla; 41,1 mm, 17 mm ve 24 mm olarak ölçülmüş olup süneklik düzeyi yüksek kolon için yalnızca 2 m yükseklikte bulunan ölçü noktası için veri alınabilmiş olup 24,9 mm'dir. ANSYS AUTODYN yazılımına göre ise daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, süneklik düzeyi sınırlı kolon için, sırasıyla; 4,4mm, 3,66 mm ve 2,36 mm iken süneklik düzeyi yüksek kolon için; 3,2 mm, 2,55 mm ve 1,28 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.13 Kolonlarda oluşan yerdeğiştirmeler

4.1.4.4 Gerilmeler

Meydana gelen patlamanın ardından sınırlı ve yüksek süneklikli sahip kolonlara etkiyen basınç değerleri incelenmiştir. Her iki kolon üzerinde yer alan 2 m, 1,5 m ve 1 m yüksekliğe konumlandırılmış bulunan okuma noktalarından elde edilen verilere (ANSYS AUTODYN yazılımından alınan veriler) göre her bir patlama durumu için ayrı ayrı sonuçlar irdelenmiş olup gerilme değerleri Şekil 4.14'te verilen diyagram üzerinde görülmektedir.



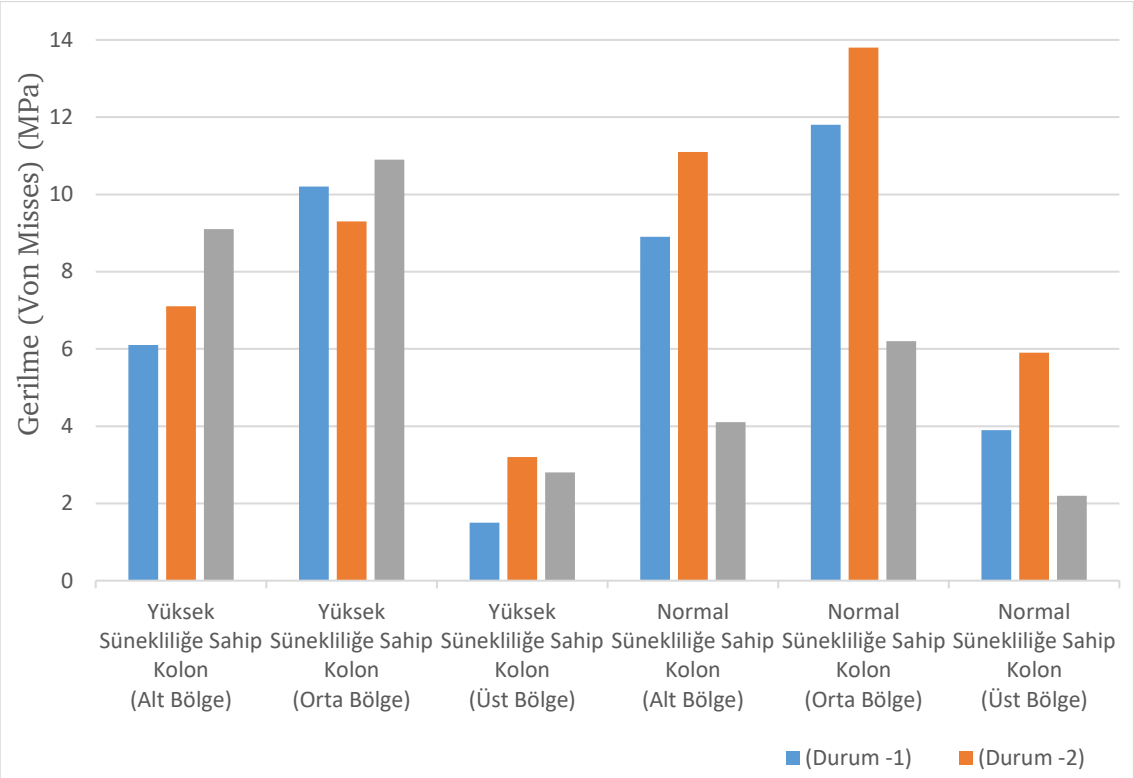
Şekil 4.14 Kolonlarda oluşan gerilme (von mises) diyagramları

Buna göre, 1. patlama durumunda, yani patlayıcının iki kolonun tam ortasında konumlandığı durumda; süneklik düzeyi yüksek kolon alt orta ve üst okuma noktalarından alınan gerilme değerleri, sırasıyla; 6,1 MPa, 10,2 MPa ve 1,5 MPa olarak oluşmuştur. Buna karşın bu değerler süneklik düzeyi sınırlı kolon için sırasıyla; 8,9 MPa, 11,8 MPa ve 3,9 MPa olarak ortaya çıkmıştır.

2. patlama durumunda ise, yani patlayıcının süneklik düzeyi sınırlı kolona yakın olarak yerleştirildiği durumda; süneklik düzeyi yüksek kolonun alt orta ve üst okuma noktalarından alınan gerilme değerleri, sırasıyla; 7,1 MPa, 9,3 MPa ve 3,2 MPa olarak oluşmuştur. Buna karşın bu değerler süneklik düzeyi sınırlı kolon için sırasıyla; ; 11,1 MPa, 13,8 MPa ve 5,9 olarak okunmuştur.

3. patlama durumu incelendiğinde, yani patlayıcının süneklik düzeyi yüksek kolona yakın olarak yerleştirildiği durumda ise; kolonun alt orta ve üst okuma noktalarından alınan gerilme değerleri, sırasıyla; 9,1 MPa, 10,9 MPa ve 2,8 MPa olarak oluşmuştur. Buna karşın bu değerler süneklik düzeyi sınırlı kolon için sırasıyla; 4,1 MPa, 6,2 MPa ve 2,2 MPa olarak okunmuştur.

Kolonlarda oluşan tüm bu değerlerin grafik olarak Şekil 4.15'de gösterilmektedir.



Şekil 4.15 Kolonlarda oluşan gerilme değerleri

4.1.4.5 Etkin Plastik Şekil Değiştirme

Patlama etkisinin ardından kolonlarda oluşan tepkinin ardından, etkin plastik şekil değiştirme sonuçları irdelenmiştir. Bir önceki sonuçlarda olduğu gibi yine kolonların 1m, 1,5m ve 2m yükseklikteki okuma noktalarından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre;

Buna göre, 1. patlama durumunda; süneklik düzeyi yüksek kolonun alt, orta ve üst okuma noktalarından alınan değerler, sırasıyla; 0,00067, 0,00043 ve 0,00017 olarak ölçülmüştür. Buna karşın bu değerler süneklik düzeyi sınırlı kolon için sırasıyla; 0,0049, 0,0013 ve 0,00025 olarak ortaya çıkmıştır.

2. patlama durumunda ise; süneklik düzeyi yüksek kolonun alt orta ve üst okuma noktalarından alınan değerler, sırasıyla; 0,00147, 0,000982 ve 0,000275 olarak oluşmuştur. Buna karşın bu değerler süneklik düzeyi sınırlı kolon için sırasıyla; 0,000481, 0,000393 ve 0,000284 olarak okunmuştur.

3. patlama durumu incelendiğinde, yani patlayıcının süneklik düzeyi yüksek kolona yakın olarak yerleştirildiği durumda ise; kolonun alt orta ve üst okuma noktalarından alınan gerilme değerleri, sırasıyla; 0,00032, 0,00028 ve 0,00017

olarak oluşmuştur. Buna karşın bu değerler süneklik düzeyi sınırlı kolon için sırasıyla; 0,000913, 0,00054 ve 0,00022 olarak okunmuştur.

4.1.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu bölümde; patlama deney çalışması tamamlanmış ve değerleri elde edilmiş bir çalışma ile aynı sistemin bilgisayar yazılımı, ampirik önermeler ve UFC-3-340-02'den elde edilen sonuçlar, karşılaştırılarak uygunluğu araştırılmıştır. Yapılmış olan deneysel arazi çalışmasında; sınırlı ve yüksek sünekliğe sahip olarak imal edilen iki ayrı kolonun patlama yükü karşısında sergilediği davranışlar gözlemlenmiş ve elde edilmiş olan sonuçlar ile UFC-3-340-02 standartları ve ampirik formüller (Kingery ve Bulmash, Henrych) doğrultusunda elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve uygunlukları irdelenmiştir.

Deneysel arazi çalışmasında kullanılan patlayıcı madde ANFO olarak seçildiği anlaşılmış olup, patlama kriterlerine uygun olarak TNT formatına dönüştürülmüştür. Deneysel arazi çalışması sırasında üretilmiş olan beton malzemenin laboratuvar ortamına uygun ve tanıma uygun şekilde boşluksuz olarak üretildiği kabul edilmiştir. Deneysel çalışmada üretilen belirli sayıda sınırlı ve yüksek sünekliğe sahip kolonlar, belirli sayıda patlama modeline tabi tutulmuştur. (patlayıcı ile kolonlar arası uzaklık ve patlayıcı kütlesi değişiklikleri ile faklı çeşitte patlama kombinasyonları oluşturulduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada yalnızca 3 adet patlama model incelenmiştir. Deneysel çalışmadan üretilmiş bulunan sonuçlar (basınç ve yerdeğiştirme) ile AUTODYN yazılımı, UFC 3-340-02 standartları ve ampirik formülasyonlar ile elde edilen sonuçların uygunlukları karşılaştırılmıştır. Ampirik formülasyonlar ile elde edilen sonuçlar grafik üzerinde 1,5 ms üzerinde işaretlemiştir. (en büyük basıcın 1,5 ms oluştuğu varsayımı yapılmıştır. Betonarme kolon modellerinin patlama analizi, 3 milisaniyelik olarak tasarlanmıştır. Yapılan çalışmanın ardından elde edilen bulgular ve değerlendirme şu şekilde sıralanmıştır;

- Deneysel sonuçların hem patlama basınçlarında hem de deplasman değerlerinde, ANSYS AUTODYN analizi ve ampirik verilerden alınan sonuçlara kıyasla daha yüksek sonuçlar vermiştir.

- Diğer taraftan ANSYS AUTODYN ve ampirik verilerden alınan sonuçlar birbirine yakın ve benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.
- Teorik hesaplamalarda; UFC 3-340-02, Kingery and Bulmash ve Henrych denklemleri ve grafikleri kullanılmıştır.
- Nümerik ve deneysel sonuçlarda pik basıncın kolon tabanında oluştuğu ancak ANSYS AUTODYN sonuçlarına göre ise pik basınç kolon ortasında oluşmuştur.
- Elde edilen yerdeğiştirme sonuçların ışığında; süneklik düzeyi yüksek kolonun yerdeğiştirme değerlerinin daha düşük, süneklik düzeyi sınırlı kolonun ise daha büyük yerdeğiştirmelere sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Süneklik düzeyi yüksek kolon donatı yapısı sayesinde daha rijit davranırken süneklik düzeyi sınırlı kolon ise daha fazla enerji soğurmuştur.
- 1 nolu patlama modeline göre, her iki betonun arka bölgesinde, eğilme etkisi ile kırılma meydana gelmiştir.
- Yapılan patlama etkisi karşılaştırmalarında; Deneysel çalışmadan elde edlien sonuçlar ile AUTODYN, UFC 3-340-02 ve ampirik bağıntılar arasında çıkan farkın sebebi ise yapılan teorik çalışmalarda pik basınç ve pozitif faz üzerinden çalışmalar yapılmış olup deneysel çalışmada ise negatif fazın da kolonlar üzerinde etkisi gerçekleşmiştir. Ayrıca günümüze kadar yapılmış olan tüm bu patlama basıncı ifadeleri ise yapılan deneysel çalışmaların sonucu olup birbirinden farklı sonuçlar vermektedir. Patlama basıncının davranışı net bir şekilde ortaya konulamadığından dolayı teorik ifadeler farklı uzaklıklarda birbirinden farklı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada; etriye sıklaştırmasının (süneklik düzeyi yüksek kolon) betonarme kolonların patlama yükü karşısındaki, davranışına doğrudan etkileyip mukavemetini arttırmakta buna karşın etriye sıklaştırması uygulanmadığı durumda (süneklik düzeyi sınırlı kolon) ise patlama yükü karşısında daha fazla deplasman yaptığı ve az direnç gösterdiği gözlemlenmiştir. Yapıya gelen kesme kuvveti karşısında kolonlarda uygulanan etriye sıklaştırması, yapı elemanının mukavemetini artırmaktadır.

4.2 Betonarme İstinat Duvarı

Bu bölümde; ülkemizde, otoyol kenarlarında sıkça rastlanan betonarme istinat duvarı model seçilmiştir. Şekil 4.16'de görüleceği üzere istinat duvarları; yapılan (toprak işi) ve yarma işleminin ardından; yolun şev tabilitesi, arazide meydana gelmesi muhtemel toprak kayması ya da heyelan gibi olayların, karayolunun güvenlik ve emniyetinin sağlanması amacıyla inşa edilmiştir. Seyir halinde bulunan, yanıcı ve patlayıcı madde taşıyan tankerlerde meydana gelmesi muhtemel bir kaza ve bunun sonucu oluşabilecek patlamanın istinat duvarına olan etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.



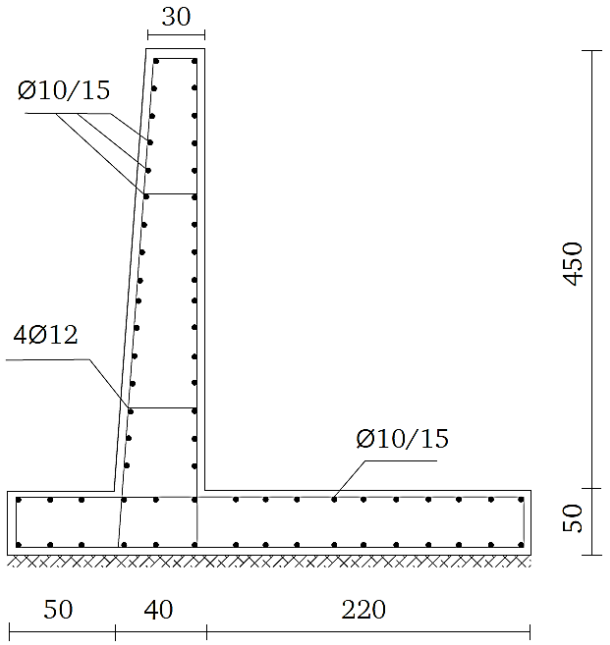
Şekil 4.16 Otoyol boyunca sık rastlanan betonarme istinat duvar örneği [126]

4.2.1 Betonarme İstinat Duvarı ve Sonlu Eleman Modeli

Şekil 4.17'de geometrik ölçüleri belirtildiği üzere duvarın yüksekliği 500 cm derinliği 300 cm ve uzunluğu ise 12 m olarak sabit yük, hareketli yük ve deprem yükleri açısından TS500/200 [125] ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [127] esaslarına uygun olarak tasarlanmıştır.

Bu bölümde, istinat duvarının karşılaştığı patlama yükü ve yapının davranışı; ANSYS Workbench [114] ve AUTODYN yazılımı [115], UFC 3-340-02 [1] standartları ve araştırmacılar tarafından önerilen ampirik formülasyonlar ile tespit edilip uygunluğu karşılaştırmıştır.

ANSYS yazılımında malzeme tanımı yapılırken: beton malzemede, *RHT Concrete* modeli kullanılmış olup kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Donatı çeliği modelinde, johnson cook modeli kullanılmış olup kırılma modeli olarak ise *Plastic Strain* kriteri kullanılmıştır.



Şekil 4.17 Betonarme istinat duvarının geometrik özellikleri (cm)

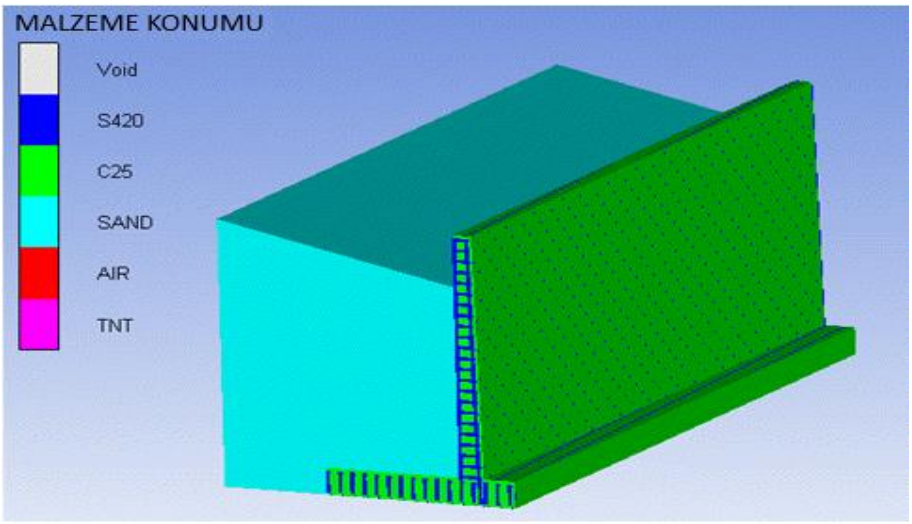
Üç boyutlu sonlu eleman modelinin oluşturulmasında kullanılan elemanların mekanik özellikleri Tablo 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2 Modelde kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri

Malzeme	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Beton	C25	3×10^4	2,40	25	2,5
Donatı	B420C	2×10^5	7,83	420	420
Yük	Kum	14	2,64		
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlayıcı	TNT	-	1,60	-	-

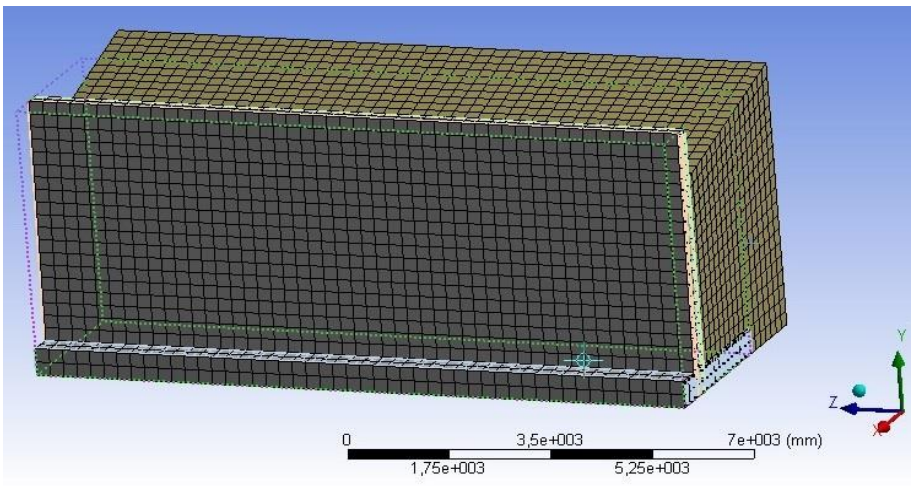
Seçilen modele denk bir model bilgisayar ortamında (ANSYS yazılımı) üç boyutlu modellenmiş olup (Şekil 4.18) olup ana malzemeler; beton ve çelik donatı olarak seçilmiştir. Ayrıca modelde hava ve TNT gibi elemanlar da yer almaktadır.

Model oluşturulurken; otoyol kenarlarında bulunan ve şev stabilitesini sağlayan istinat duvarı ve arkasında bulunan tabii zeminin kesiti alınmış olup kum malzemenin arkası ve yan kısımları ile istinat duvarının alt yüzeyi ankastre olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.18 Seçilen istinat duvarının üç boyutlu sonlu eleman modeli

Geometrik ölçülere uygun olarak, üç boyutlu model (Şekil 4.19) (beton ve donatı çelikleri) ANSYS Workbench yazılımı ortamında açık yöntem (explicit Dynamics) ile modellenmiş olup, patlama analizi iki farklı modelde ANSYS AUTODYN yazılımında yapılmıştır. Yapılan çalışmaya göre; patlayıcı malzemesi TNT olarak seçilmiş olup kullanılan kütle ise 410 kg'dır. Yapıya tatbik edilen TNT patlayıcının duvara uzaklığı ise; 1. Modelde 3,5 m, 2. Modelde ise 1,5 m olarak alınmıştır. Her iki modelde de sonlu eleman ve TNT patlayıcı kütleleri aynı olup sadece TNT patlayıcının betonarme duvara uzaklıkları farklıdır. Patlayıcının tatbik süresi ise 3 ms'dir. Duvarın arkasında 330 ton kütleli kum malzeme bulunmaktadır.



Şekil 4.19 Üç boyutlu sonlu eleman modelinin tasarımı

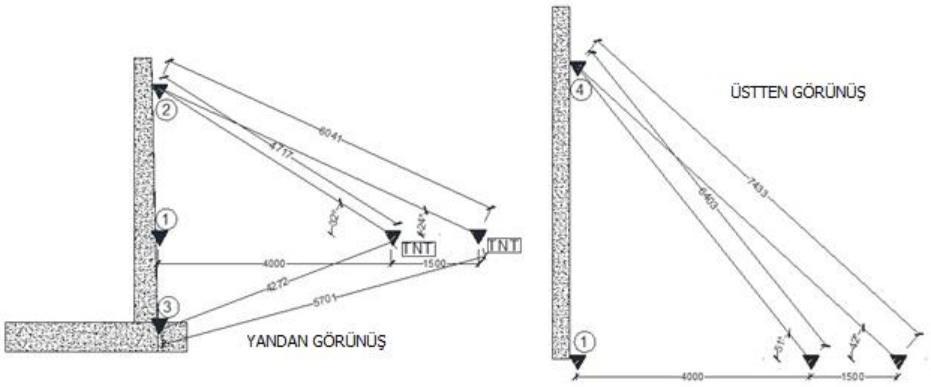
Eulerian Model, Autodyn Yazılımı üzerinde yapılmış olup, hava (akışkan) ve TNT patlayıcı malzeme tanımlanmıştır. Buna göre; üç boyutlu sonlu eleman modeli (Lagrangian model) patlamanın gerçekleştiği hava modelinin (Eulerian model) içine yerleştirilmiş olup, hava model 15.000 mm × 10.000 mm × 16.000 mm olarak tasarlanmıştır.

ANSYS yazılımı üzerinde tasarlanan Lagrangian (katı) modelin birim mesh boyutu 250 mm olarak tasarlanmış olup buna karşılık ANSYS AUTODYN yazılımında tasarlanan Eulerian (akışkan hava) modelinin birim mesh boyutu ise 200 mm olarak modellenmiştir.

ANSYS yazılımına göre; Eulerian modelin birim mesh boyutunun, kuvvet aktarımının daha iyi ve düzgün olması için Lagrangian modelden daha küçük olması gerektiği öngörülmüştür.

4.2.2 Okuma Noktaları

Sonlu eleman model üzerine, patlama analizinden sonra sonuçların daha detaylı irdelenebilmesi amacıyla 4 adet okuma noktası yerleştirilmiştir. Bu okuma noktalarının, duvarın dış yüzey ve geometrik ölçülendirme detayı Şekil 4.20'da verilmiştir.



Şekil 4.20 Okuma noktaları, geometrik detaylar ve konumlandırma ölçüleri

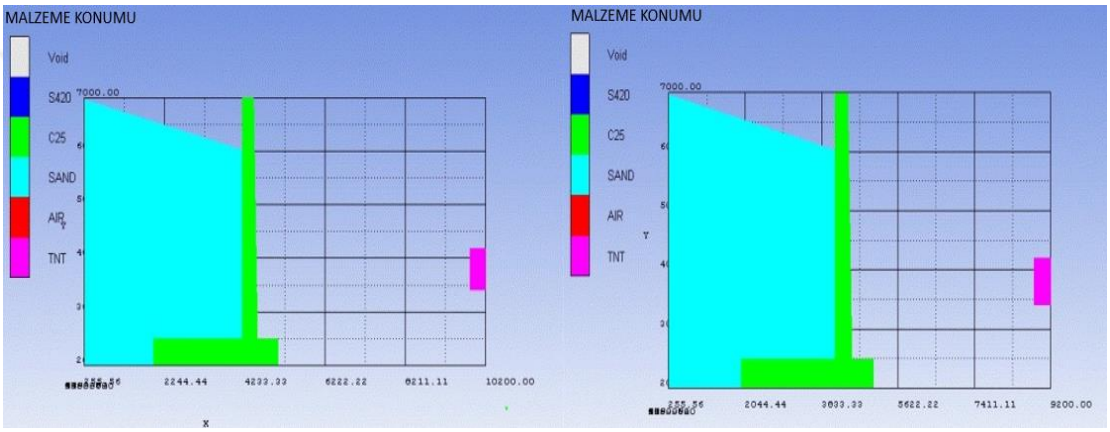
4.2.3 Patlama Modelleri

İstinat duvarının arkasında yer alan ve 330 tonluk bir kütleye sahip kum malzeme, ANSYS yazılımı ile tasarlanmış olup istinat duvarına +X yönünde kuvvet uygulamaktadır. Buna karşın istinat duvarına -X yönünde patlama yükü etki eder. Şekil 4.21 (a ve b)'de görülen patlayıcı konumlandırmasına göre iki farklı patlama

durumu incelenmiştir; bunlardan birincisinde patlayıcı ile duvar arasında 5,5 m mesafe, ikincisinde ise 4 m mesafe bulunmaktadır.

Analizler için 3 milisaniye patlama süresi ayarlanmış olup bilgisayar özelliklerine bağlı olarak daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, detaylı sonuçlar için artırılabilir.

TNT patlayıcının modellenmesi, yine bina modelinde olduğu gibi ANSYS AUTODYN yazılımı ile oluşturulan hava modelindeki birim mesh (200 mm) aralıkları kullanılmıştır. Bu yöntemden hareketle; $2\times4\times4=32$ br^2 ve TNT patlayıcının yoğunluğu ise 1,63 g/cm^3 olduğundan hareketle TNT kütlesi yaklaşık olarak 410 kg olarak hesaplanmıştır.



a) Model-1 (5,5 m) b) Model-2 (4 m)

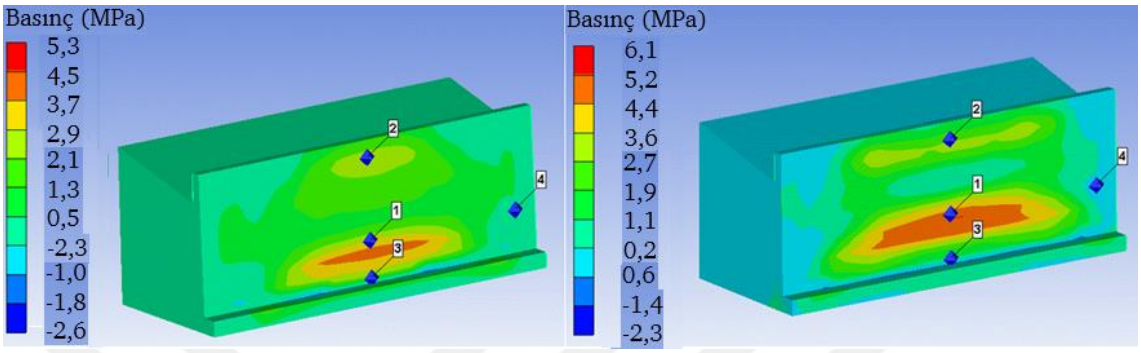
Şekil 4.21 SEM ve patlayıcının yandan görünüşü; model-1 ve model-2

4.2.4 Bulgular ve İrdelemeler

4.2.4.1 Patlama Basınçları

Analiz sonuçlarına göre, patlama etkisi sonrası (her iki model için) yapıda oluşan sonuçlar ve birçok patlama yükü parametresi ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinden kontur diyagramları yardımı ile okunabilir. Önemli patlama yükü parametrelerinden olan pik basınç değerleri ise Şekil 4.22'deki kontur diyagramları yardımı ile incelenebilir. Buna göre; patlama modeli-1'de (TNT patlayıcının yapıdan 5,5 m uzaklıkta olduğu durum); yapı üzerinde sadece duvarın alt bölgesinde en büyük patlama basıncı tespit edilmiş olup bu değer yaklaşık 4,5 MPa olmasına karşın duvarın diğer bölümlerinde basınç değerleri daha düşük seviyededir. Hatta patlayıcıya uzak olan bölümlerde ise negatif basınç (kum yükünün etkisi) tespit edilmiştir.

Ancak, patlama modeli-2'de (TNT patlayıcının yapıdan 4 m uzaklıkta olduğu durum) ise en büyük patlama basıncının, patlama modeli-1'e oranla yine aynı bölgede oluştuğu fakat basınç değerinin 5,5 – 6 MPa seviyesine çıktığı ve daha geniş alana etkidiği görülmektedir. Ayrıca patlama modeli-1'de olduğu gibi yine negatif basınç bölgeleri de tespit edilmiştir.

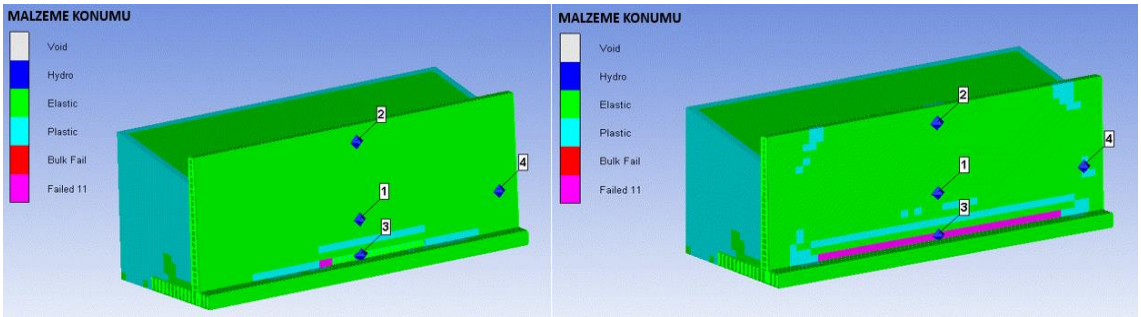


a) Model-1 (5,5 m) b) Model-2 (4 m)

Şekil 4.22 Patlama sonrası basınç diyagramları; model-1, model-2

4.2.4.2 Hasar Durumları

Her iki model için de patlama analizi gerçekleştirildiğinde, modellerde oluşan yapısal davranış Şekil 4.23'da görülmektedir: buna göre, her iki modelde de temel ile düşey gövde arasındaki kesişim bölgesindeki beton ve çelik elemanda yüksek hasar (betonda kırılma ve parçalanma, çelikte ise kopma) meydana geldiği görülmektedir. Her iki modelde de plastik bölgeler görülmekte olup Model-2'de plastik alanlar (özellikle duvar-temel kesişiminde) daha fazla olduğu görülmekle birlikte patlama modeli-1'e göre daha fazla hasar aldığı görülmektedir.

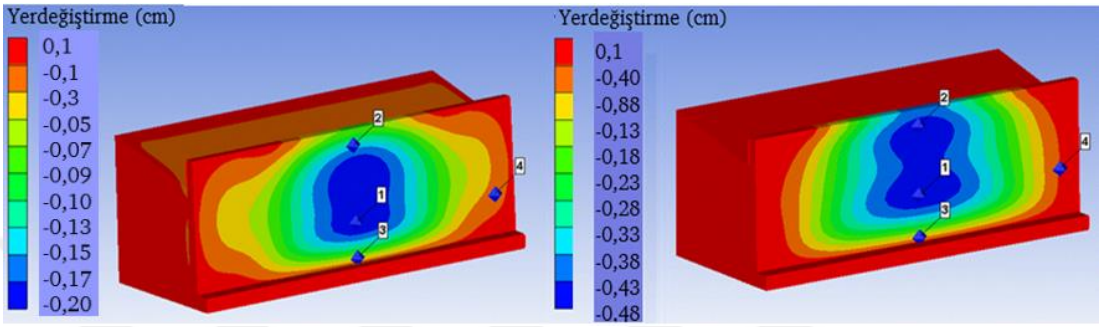


a) Model-1 (R=5,5 m) b) Model-2 (R=4 m)

Şekil 4.23 Patlama sonrası yapı ve malzeme durumları; model-1, model-2

4.2.4.3 Yerdeğiştirmeler

Benzer şekilde patlama sonrası her iki modelde de meydana gelen yerdeğiştirmeler AUTODYN yazılımı üzerinden diyagramlar yardımı ile okunabilir, buna göre istinat duvarı gövdesinde oluşan yerdeğiştirmeler Şekil 4.24'da aktarılmış olan yerdeğiştirme kontur diyagramları üzerinden değerlendirilip karşılaştırılabilir.



a) Model-1 (5,5 m) b) Model-2 (4 m)

Şekil 4.24 Patlama sonrası yerdeğiştirme diyagramları; model-1, model-2

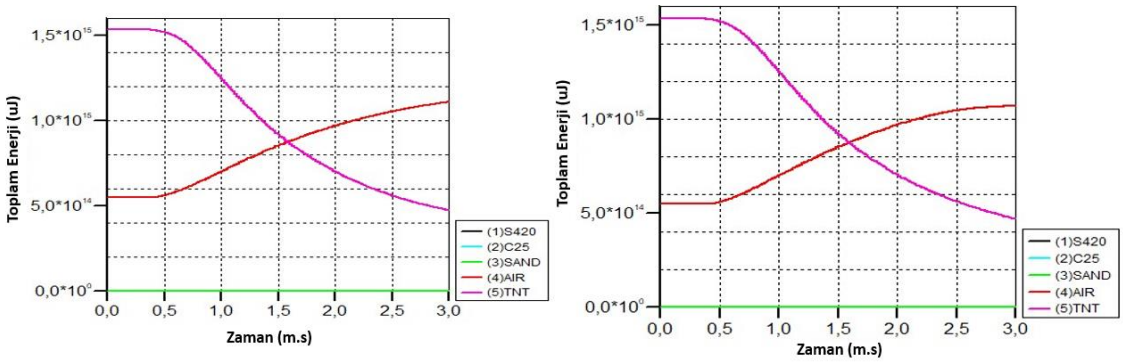
Verilen diyagramlara göre; Model-1'de TNT patlayıcı malzemeye yakın olan bölgede yerdeğiştirmeler -X doğrultusunda pik noktasına ulaşmış olup -1,94 mm olarak ölçülmüş olsa da ihmal edilebilecek seviyede küçük değerlerdir. Duvar gövdesinin patlayıcıya uzak olan bölümlerinde ise yerdeğiştirmeler +X doğrultusunda meydana gelmiş olup duvarın taşıdığı kum kütlesinin uyguladığı basıncın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan Model-2 incelendiğinde ise Model-1'e göre pik yerdeğiştirme (yine TNT patlayıcıya yakın bölgelerde) değerlerinde yükselme (-4,74 mm) göze çarpsa da yine çok küçük değerler ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde, duvar gövdesinin köşelerinde +X yönünde (kum kütlenin etkisi) yerdeğiştirmeler tespit edilmiştir. Ölçü noktalarında meydana gelen deplasman değerleri Tablo 4.3 üzerinde verilmiştir.

Tablo 4.3 X yönünde meydana gelen yerdeğiştirmeler

Ölçü No	Model-1 (mm)	Model-2 (mm)
#1	-1,94	-4,74
#2	-1,49	-4,72
#3	-0,45	-0,84
#4	-0,19	-0,30

4.2.4.4 Patlama Enerjisi

Her iki modelde de aynı kütlede TNT patlayıcı kullanılsa da, Patlayıcı ile yapı arasındaki mesafe (R), ölçeklendirilmiş uzaklığı (Z) parametresini doğrudan etkilediğinden hareketle; havanın soğurduğu enerji aynı kalmasına rağmen, yapı tarafından soğurulan enerji miktarları değişiklik gösterir. Salınan ve soğrulan enerji değerleri incelendiğinde, en yüksek soğurma hava tarafından gerçekleşmiş olup beton, çelik donatı ve kum tarafından soğrulan enerji çok düşük mertebede olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.25).

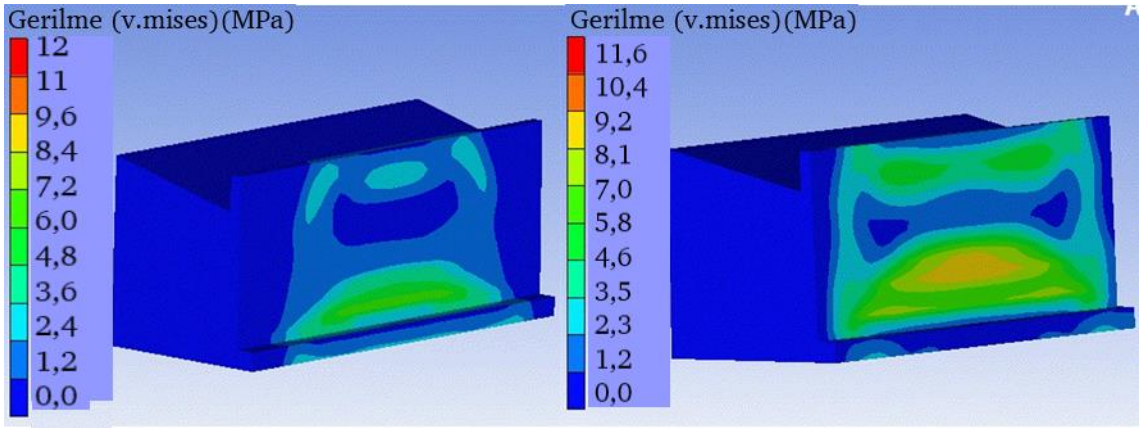


a) Model-1 (5,5 m) b) Model-2 (4 m)

Şekil 4.25 Toplam (salınan ve soğurulan) enerji; model-1, model-2

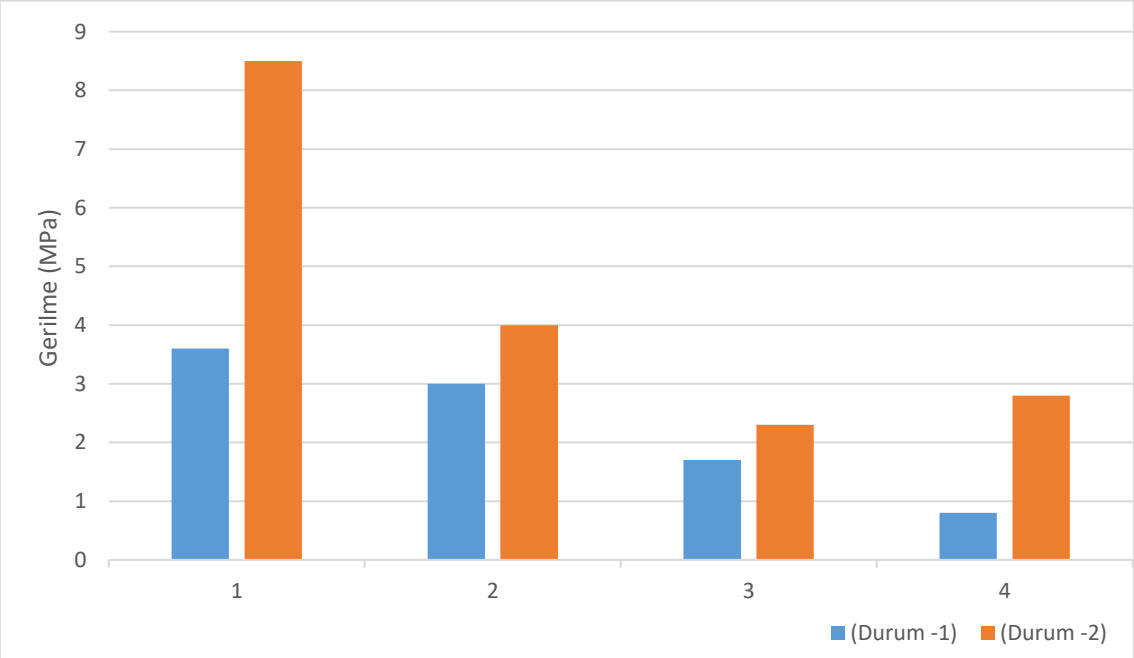
4.2.4.5 Gerilmeler

Her iki patlama durumu için, betonarme duvar yüzeyine etki eden patlama yükü altında gerilmeler meydana gelmiş olup okuma noktalarından elde edilen değerler incelenmiş olup diyagram üzerinde (Şekil 4.26) görülmektedir.



Şekil 4.26 Betonarme Duvar üzerinde meydana gelen gerilme diyagramları

Buna göre tespit edilen 4 okuma noktasında belirlenen gerilmeler ise şu şekilde meydana gelmiştir: İlk patlama modelinde (R=5,5m), okuma noktalarından okunan sonuçlar sırasıyla; 3,6 MPa, 3 MPa, 1,7 MPa ve 0,8 MPa olarak ölçülmüş olup buna karşın ikinci patlama modelinde ise, okuma noktalarından okunan sonuçlar sırasıyla; 8,5 MPa, 4 MPa, 2,3 MPa ve 2,8 MPa olarak ölçülmüş olup bu değerlerin grafik üzerinde değerlendirmesi ise Şekil 4.27 üzerinde verilmiştir.



Şekil 4.27 Okuma noktaları üzerinde meydana gelen gerilme değerleri

4.2.5 Ampirik Formüller ve UFC 3-340-02 Değerlendirmesi

Bu kısma kadar, patlayıcının yapıya etkisi ve yapının bu patlama yükü altındaki davranışları ANSYS AUTODYN yazılımı ile araştırılmış ve sonuçlar yazılım üzerinden değerlendirilmiştir. Tezin "Patlama Yükü Davranışı" başlığı altında yer alan bölümde, geçmişten günümüze kadar araştırmacıların önerdiği ampirik formüller ve ifadelerin yanında ABD Ordusunun yayımını yaptığı ve aslında tüm dünya üzerinde patlama yükü ile ilgili çalışmalarda standart olarak kabul edilen UFC 3-340-02 talimatları doğrultusunda parametreler incelenerek genel bir karşılaştırma yapılmıştır.

Buna göre; araştırmacılardan; Brode, Mills, Henrych, Kinney ve Graham, Sadovsky, Kingery ve Bulmash tarafından ifade edilen denklemlerin sonucunda ortaya çıkan patlama yükü değerleri; Hopkinson ve Cranz tarafından 1915 yılında

yaptığı “Cube Root Scaling Law” ile her bir ölçü noktası için ölçeklendirilmiş uzaklık (Z) değerleri tespit edilmiş ve tüm araştırmacıların ifade ettiği fonksiyonu (Z) olan denklemler ile hesaplanmıştır (Tablo 4.4 ve Tablo 4.5).

4.2.5.1 Karşılaştırmalı Basınç Değerleri

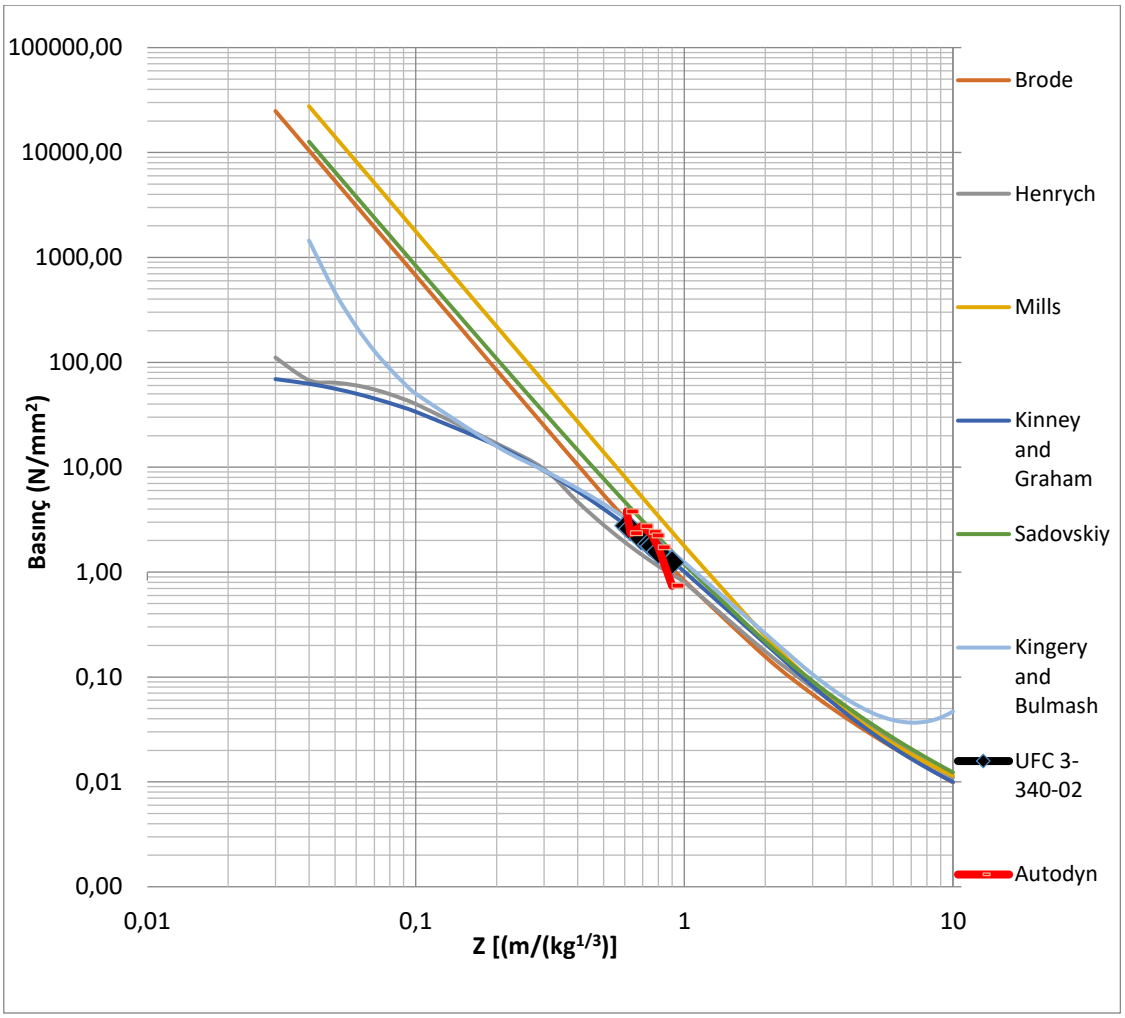
Tablo 4.4 Okuma noktaları için hesaplanan patlama basınçları (model-1) (MPa)

Ölçü No	Z	Autodyn	Brode	Henrych	Mills	Kinney Graham	Sadovskiy	Kingery Bulmash	UFC 3-340-02
1	0,74	2,41	2,40	2,10	5,81	2,31	3,46	2,72	1,84
2	0,81	1,72	1,94	1,70	4,50	1,97	2,78	2,34	1,55
3	0,77	2,23	2,21	1,94	5,30	2,17	3,18	2,57	1,77
4	1,00	0,52	1,18	1,10	2,65	1,35	1,70	1,64	0,93

Tablo 4.5 Okuma noktaları için hesaplanan patlama basınçları (model-2) (MPa)

Ölçü No	Z	Autodyn	Brode	Henrych	Mills	Kinney-Graham	Sadovsky	Kingery-Bulmash	UFC 3-340-02
1	0,61	3,78	3,18	1,89	7,84	2,81	4,55	3,24	2,77
2	0,69	2,73	2,20	1,46	5,24	2,16	3,15	2,55	2,10
3	0,64	2,33	2,75	1,70	6,70	2,54	3,94	2,96	2,58
4	0,91	0,74	1,07	1,09	2,36	1,24	1,53	1,51	1,23

Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 ile her bir ölçü noktası için hesaplanan ve gösterilen değerler Şekil 4.28’de verilen logaritmik grafik üzerinde gösterilerek sonuçlar arasında karşılaştırma yapılması hedeflenmiştir. Grafik Basınç – Z olarak hazırlanmış olup, tabloda belirtilen ölçeklendirilmiş uzaklığa (Z) karşılık gelen basınç değerleri işlenmiştir.



Şekil 4.28 "Z" parametresine karşılık gelen basınç değerleri grafiği

4.2.5.2 Ampirik Örnek (UFC 3-340-02 Standardı Çözümü)

Bu kısımda UFC 3-340-02 talimatları doğrultusunda ve tezin "Patlama Yükü ve Davranışı" başlığı altında anlatılan patlama yükü parametreleri ve "İdeal Üçgen Form" grafiği Model-1 verileri kullanılarak çizilecektir. (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20)

R (patlayıcının yapıya vektörel uzaklığı) = 5,50 m

W (TNT patlayıcının kütlesi) = 410 kg

Duvar Kalınlığı = 0,4 m

Duvar Yüksekliği = 5,0 m

Çözüm;

1. Adım :(Ölçeklendirilmiş uzaklığın hesaplanması; Z)

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} = \frac{5{,}5}{410^{1/3}} = \frac{5{,}5}{7{,}43} = 0{,}74\ kg/m^{1/3}$$

$$W^{1/3} = 7{,}43\ m^{1/3}$$

2. Adım: (P_{so}, t_A, L_w, t_0 ve is parametrelerinin 1 nolu ölçü noktası için Şekil 3.11 ile tespit edilmesi)

$$P_{so} = 1{,}84\ MPa; \qquad P_r = 11{,}7\ MPa$$

$$t_A/W^{1/3} = 0{,}318 \rightarrow 0{,}318\ .\ 7{,}43 = 2{,}36\ ms$$

$$L_w/W^{1/3} = 0{,}18 \rightarrow 0{,}18\ .\ 7{,}43 = 1{,}337\ m$$

$$t_0/W^{1/3} = 1{,}033 \rightarrow 1{,}033\ .\ 7{,}43 = 7{,}67\ ms$$

$$i_s/W^{1/3} = 189 \rightarrow 189\ .\ 7{,}43 = 1{,}4\ MPa$$

3. Adım: (Yansıyan basınç ve impuls parametrelerinin Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 ile tespit edilmesi)

Şekil 3.18 ; α=0° okunur; $C_{r\alpha} = 6{,}55$ için, $P_{so} = 1{,}84$ MPa,

$P_{r\alpha} = C_{r\alpha}\ .\ P_{so} = 6{,}55 \times 1{,}84 = 12{,}05$ MPa

Şekil 3.19 ; α=0° okunur; $i_{r\alpha} / W^{1/3} = 825$ için $P_{so} = 1{,}84$ MPa,

$i_{r\alpha} = 825 \times 7{,}43 = 6.129{,}75$ KPa $\approx 6{,}13$ MPa

4. Adım: Yapının ön kısmı için yükleme, pozitif faz)

C_r (ses hızı) $P_{so} = 1{,}84$ MPa için Şekil 5.6 den hesaplanır; $C_r \approx 1{,}2$ m/ms

Şeffaflaştırma süresi (t_c)aşağıdaki denklemler ile hesaplanır. (S; yüzeyin yüksekliği 'H' ya da genişliğin yarısı 'W/2'; değerlerinden en küçüğü) (R: S/G oranı; burada G; H ya da W/2'nin en büyük olanı)

$$t_c = \frac{4S}{(1+R)C_r} = \frac{4.0{,}4}{(1+0{,}4/6).1{,}2} = 1{,}25\ ms$$

$$t_{of} = \frac{2.i_s}{P_{so}} = 2\frac{1{,}4}{1{,}84} = 1{,}52\ ms$$

q_o dinamik basınç değeri, Şekil 3.15 yardımı ile okunur.

$$q_0 = 3{,}5\ MPa$$

Ardından; $P_{so} + C_D q_0$ ifadesi C_D is 1,0 alınarak hesaplanır.

$P_{so} + C_D q_0 = 1{,}84 + 1{,}0 \,.\, 3{,}5 = 5{,}34\ MPa$

$t_r = \dfrac{2.\, i_{r\alpha}}{P_{r\alpha}} = \dfrac{2.6{,}15}{12{,}2} = 1{,}01\ ms$

5. Adım: (Negatif faz yüklemesi)

$P_{r\alpha}$ ve $i_{r\alpha} / W^{1/3}$ için Z parametresi Şekil 3.18 den okunur.

$P_{r\alpha}$= 12,02 MPa ve Z= 0,76 <=> $i_{r\alpha} / W^{1/3}$= 825 ve Z= 0,748

Yeni Z değerleri negatif $P_{r\alpha}$ ve $i_{r\alpha} / W^{1/3}$ değerleri için Şekil 3.19 den;

Z= 0,76 => $P_{r\alpha}$= 0,09 MPa

Z= 0,748 => $i_{r\alpha} / W^{1/3}$= 0,095 böylelikle; $i_{r\alpha}$= 0,095.7,4= 0,705 MPa-ms olarak hesaplanır.

İmgesel zaman t_{rf}- hesabı için;

$t_{rf} = \dfrac{2.\, i_{r\alpha}^{-}}{P_{r\alpha}^{-}} = 2.\dfrac{0{,}705}{0{,}09} = 15{,}67\ ms$

Dolayısıyla;

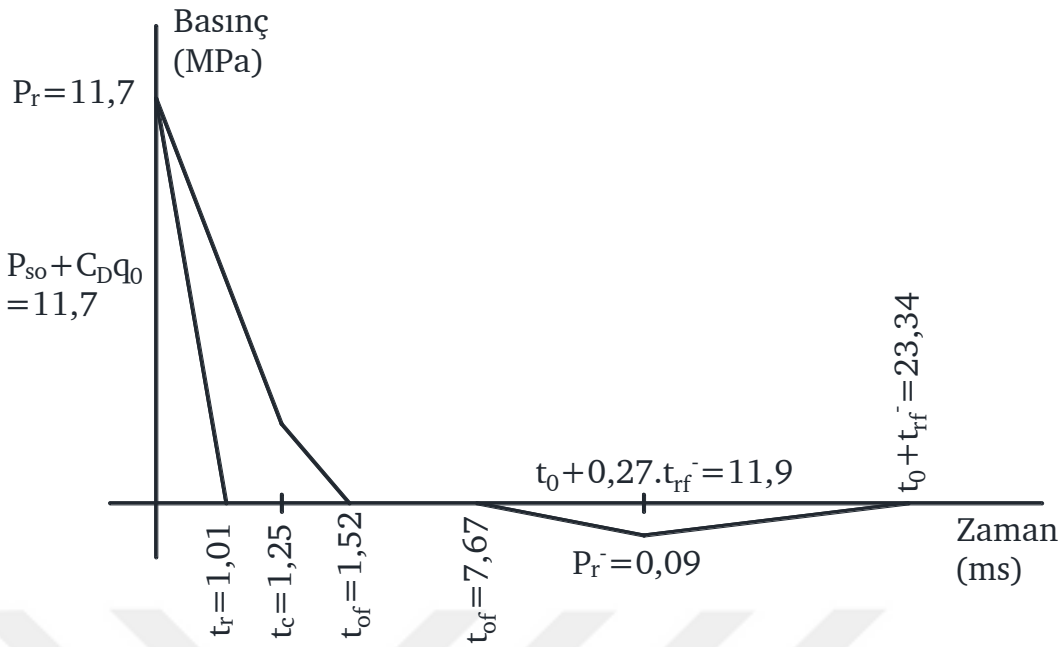
$0{,}27.\, t_{rf}^{-} = 0{,}27.15{,}67 = 4{,}23\ ms$

$t_0 = 7{,}67\ ms$ ve; $t_0 + 0{,}27.\, t_{rf}^{-} = 7{,}67 + 4{,}23 = 11{,}9\ ms$

Böylece; $t_0 + t_{rf}^{-} = 7{,}67 + 15{,}67 = 23{,}34\ ms$ olur.

4.2.5.3 İdeal Eşdeğer Üçgen Form Grafiği

Hesaplanan patlama yükü parametreleri ile ideal eşdeğer üçgen form grafiği (Şekil 4.29) çizilir;



Şekil 4.29 "Z" ideal eşdeğer üçgen form grafiği

4.2.6 Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada, patlama yüküne maruz kalan betonarme bir istinat duvarının davranışı numerik yöntemle araştırılmıştır. Çalışma kapsamında karayolu üzerine yapılan ve şev stabilitesi sağlayan bir istinat duvarı ANSYS yazılımında üç boyutlu sonlu eleman modeli (açık metot ile) oluşturulmuş ve ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde euler analiz modellemesi yapılarak patlama yüklerine maruz bırakılmıştır. Analiz sonuçları; ampirik formülasyonlar ve UFC 3-340-02 standartları doğrultusunda detaylı analiz sonuçları da kıyaslanan çalışmadan elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve uygunlukları araştırılmıştır.

Seçilen istinat duvarı modeline gerçeğine uygun olması içindoğal bir yük olarak kum kütlesi konulmuştur. Patlayıcı kütlesi olarak seçilen TNT, duvar gövdesine farklı uzaklıklarda etki ettirilerek gövdede meydana gelen gerilme, yerdeğiştirme, patlama basıncı durumları araştırılmış ve duvar gövdesinde meydana gelmesi muhtemel bir patlama yükü karşısında vereceği tepkiler irdelenmiştir. UFC 3-340-02 standartları doğrultusunda, detaylı analizler yapılarak patlama davranış grafiği çizilmiştir. Ampirik formüllerden; Brode, Henrych, Kinney ve Graham, Kingery ve Bulmash, Mills, Sadovskiy tarafından önerilen matematiksel ifadeler kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın ardından elde edilen bulgular ve sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- Büyük Z değerlerinde; ANSYS AUTODYN yazılımı ile elde edilen sonuçlar; Henrych, Kinney ve Graham, Kingery ve Bulmash, UFC 3-340-02 sonuçları ile benzerlik sağlamakta ancak diğer bağıntılar ile aralarındaki benzerlik tutarsızdır buna karşın küçük Z değerlerinde; ANSYS AUTODYN analizi ile elde edilen sonuçlar, Henrych, Kinney and Graham, Kingery ve Bulmash, UFC 3-340-02 sonuçları ile kısmi benzerlik sağlasa da Küçük Z değerleri sonuçların karşılaştırılması açısından sağlıklı olmadığı düşünülmektedir.
- Mills ve Sadovskiy ifadeleri ile elde edilen sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermemektedir.
- Ölçeklendirilmiş uzaklık (Z) büyük değerler aldığında ampirik ifadeler birbirine yakın ifadeler vermekte ancak (Z) parametresi küçüldükçe bağıntılar birbiri arasında tutarsız sonuçlar verebildiği tespit edilmiştir.
- UFC 3-340-02 kriterleri; patlama yükünün hesabında, tüm parametreler hesaplamak için en ideal standardı içermektedir.
- Tüm ampirik ifadeler incelendiğinde, birbiri ile en yakın sonuç veren ifadeler; Brode, Henrych, Kinney-Graham ve Kingery-Bulmash olmuştur.

Yapılan patlama etkisi karşılaştırmalarında; AUTODYN analizi, UFC 3-340-02 ve ampirik bağıntılar arasında çıkan farkın sebebi ise günümüze kadar yapılmış olan tüm bu patlama basıncı ifadeleri ise yapılan deneysel çalışmaların sonucu olup birbirinden farklı sonuçlar verebilmektedir. Patlama basıncının davranışı net bir şekilde ortaya konulamadığından dolayı teorik ifadeler farklı uzaklıklarda birbirinden farklı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

İstinat duvarının arkasında bulunan kum kütlesi, patlama yükü etkisiyle duvar gövdesinde meydana getirmesi muhtemel büyük deplasmanların oluşmasını büyük ölçüde engellediği görülmüştür. Özellikle şehirlerarası otoyolların inşası sırasında yapılan yarma işinin ardından yol güvenliğini sağlamak için yapılan istinat duvarları servis ömrü ve maliyetinin yanında meydana gelmesi muhtemel bir patlama durumuna (petrol, doğalgaz, yanıcı/patlayıcı malzeme taşıyan araçlar) karşı da dayanıklı inşa edilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

4.3 İki Katlı Betonarme Bina Modeli

Terör saldırıları tüm dünya genelinde en büyük problemlerden birinin başını gelmektedir. Bir terör saldırısı genellikle kendisini mühendislik yapılarına (binalar, körüler, yollar, barajlar vb) ve insanlara; patlayıcı malzeme kullanılarak yapılan saldırı ile kendi gösterir ki bu saldırı türü yıkıcı ve kalıcı hasarlar bırakabilir. Binalara yapılan saldırılarda, patlama yükü binaya ağır hasarlar verebilir; duvarları yıkar, kolonları/kirişleri parçalar ve pencereleri ise tamamıyla kırabilir. Eğer patlayıcı kütlesi yeteri kadar büyükse, yapının bile tamamıyla yıkılmasına sebep olabilir (Şekil 4.30).



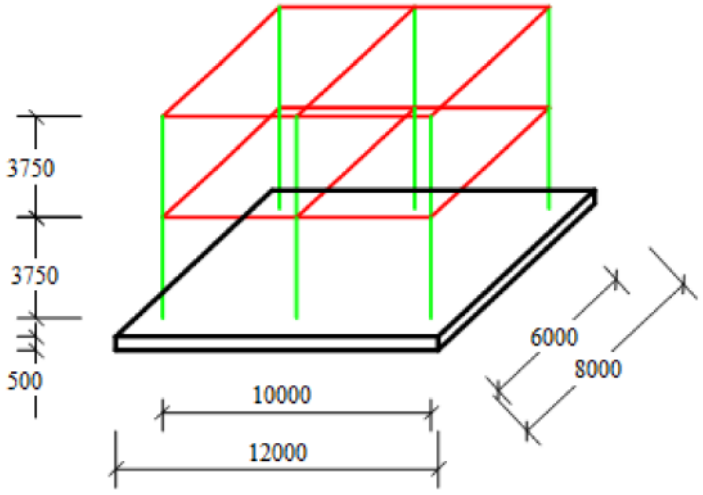
Şekil 4.30 Terör saldırısına maruz kalmış bir yapı [128]

Bu kısımda; iki katlı bir betonarme bina seçilmiş olup terörist saldırıya uğramış ve hasar görmüş bir binadan esinlenilerek tercih edilmiştir.

4.3.1 İki Katlı Betonarme Bina ve Sonlu Eleman Modeli

Söz konusu bina bir yönde iki açıklığa, diğer yönde tek açıklığa sahip olup, dolgu duvar modeliyle birlikte dikkate alınmıştır. Söz konusu binaya ait geometrik boyutlar Şekil 4.31'da verilmektedir.

Bu çalışmada; seçilen yapıyı 3 farklı kütlede (100kg, 250 kg ve 500 kg) TNT patlayıcı etkisine maruz bırakılarak; yapının, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların maruz kaldığı basınç, hasar, yerdeğiştirme ve etkiler araştırılarak karşılaştırılmıştır.

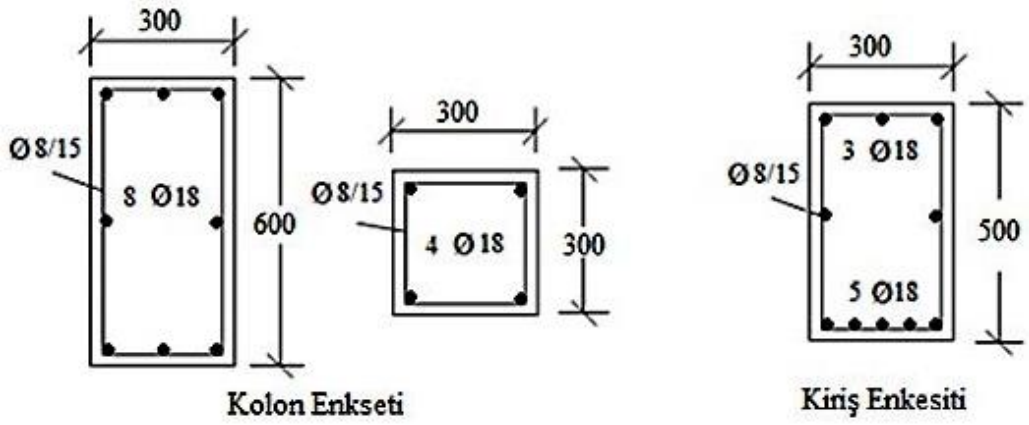


Şekil 4.31 İki katlı binanı boyutları (12m × 8m × 8m)

Binanın taşıyıcı sistemi kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve sistem olup, en kesit boyutları ve donatı düzeni Sekil 4.32'de verilmektedir.

ANSYS yazılımı üzerinde malzeme tanımı yapılırken: Beton malzemede, *RHT Concrete* beton modeli kullanılmış olup kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Donatı çeliği modelinde, Johnson Cook modeli kullanılmış olup kırılma modeli olarak ise *Plastic Strain* kriteri kullanılmıştır. Dolgu duvar olarak ise, Drucker-Prager ve Lineer EOS kriterleri kullanılarak modelleme yapılmıştır.

Buna göre bina köse kısımlarında 4 adet 60 × 30 cm² ebatlarında kolon ve kenarlarda ise 2 adet 30 × 30 cm² ebatlarında kolon olmak üzere toplam 6 adet kolon mevcuttur. 60 × 30 cm² ebatlarında modellenen kolonda boyuna donatı; 8 Ø18; 30 × 30 cm² ebatlarında modellenen kolonda boyuna donatı 4 Ø18 donatı kullanılmıştır. Eriyeler ise her iki kolon için Ø8 / 15 cm olarak tasarlanmıştır. Kirişler ise 50 × 30 cm² ebatlarında olup; çekme donatısı 5 Ø16 ve basınç donatısı 3 Ø12 olup eriye Ø8 / 15 cm olarak modellenmiştir. Döşemede; kalınlık 12 cm seçilmiş olup donatı ise Ø10 / 20 cm olarak tasarlanmıştır. Radye temel ise 8 × 12 m² ebatlarında olup kalınlığı 0,5 m seçilmiştir. Duvarlar; dolgu duvar olarak 20 cm kalınlığında tasarlanmıştır. Pencereler ve kapı ise cam olarak modellenmiş olup kalınlığı 1 cm olarak dikkate alınmıştır. Hava yaylımını gözlemlemek için ikinci kat döşemesinde 3,7 × 2 m² ebatlarında bir merdiven boşluğu bırakılmıştır.



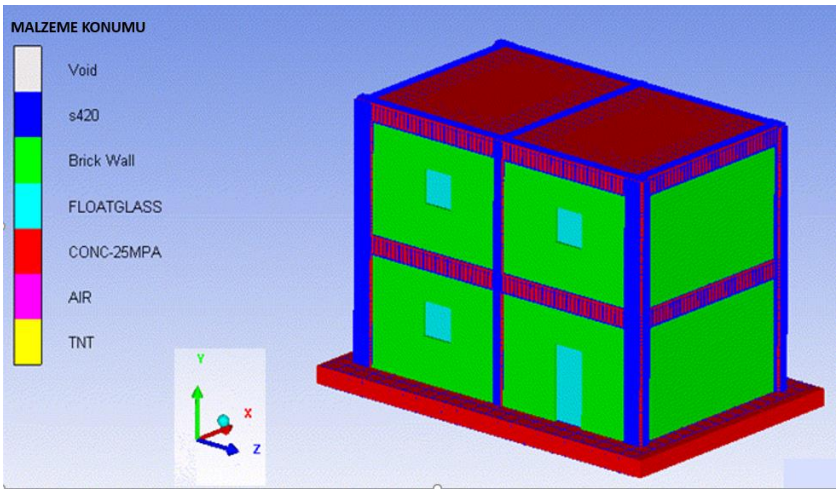
Şekil 4.32 Kolon ve kiriş en kesit boyutları ve düzeni (cm)

Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve patlama yüküne ilişkin tüm analizler ANSYS yazılımı [114] ile modellenmiştir. Buna göre kullanılan malzemeler ve özellikleri Tablo 4.6'da verilmektedir.

Tablo 4.6 Modelde kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri

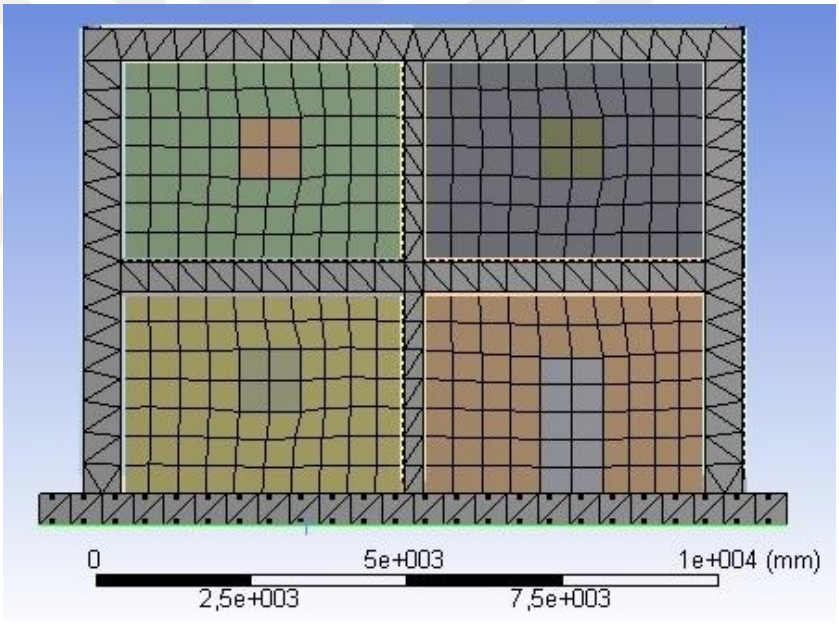
Eleman Adı	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Beton	C25	$3{,}0 \times 10^4$	2,45	25	2,5
Donatı	B420C	$2{,}1 \times 10^5$	7,83	420	420
Duvar	Dolgu	$7{,}8 \times 10^3$	2,40	5	0,5
Pencere	Cam	$4{,}5 \times 10^4$	2,20	-	-
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlama	TNT	-	1,63	-	-

Bu kabullere göre oluşturulan binanın üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 4.33'de verilmektedir.



Şekil 4.33 İki katlı betonarme yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli

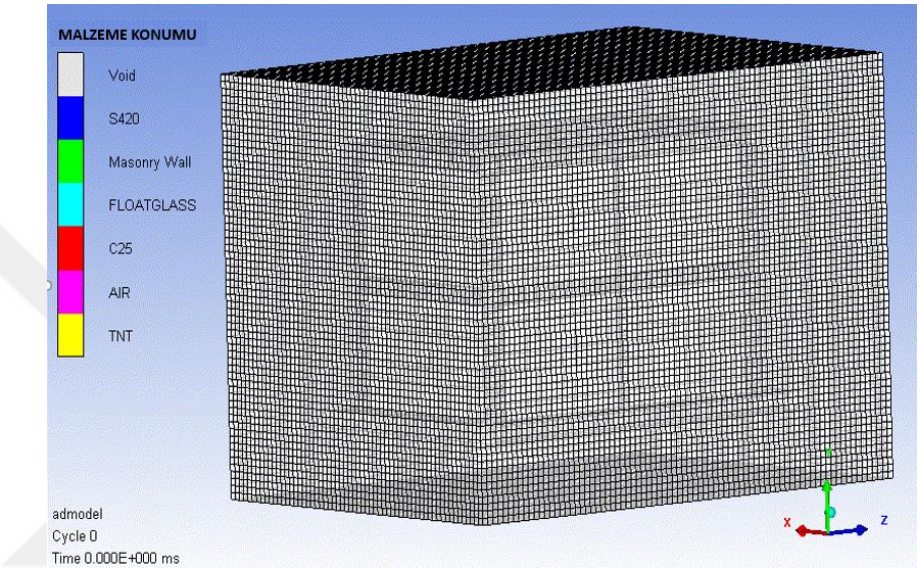
Sonlu Eleman Modele ilişkin mesh, ANSYS yazılımı (Explicit Dynamics) ile yapılmış olup, birim mesh uzunluğu ise 500 mm olarak seçilmiştir. (Şekil 4.34)



Şekil 4.34 Sonlu eleman modeline (katı model) ilişkin mesh geometrisi

ANSYS yazılımı üzerinde üç boyutlu Lagrangian (katı) model tasarımı, malzeme özellikleri, mesh tanımı gibi genel tasarımların tamamlanmasına müteakip, patlama analizinin yapılacağı ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde Akışkan – Hava (Eulerian) modellemesi tasarımı yapılmıştır. Buna göre üç boyutlu katı model patlama işleminin gerçekleşeceği hava modelinin içerisine yerleşştirilmesi gerekmektedir, bunun için 16.000 mm × 12.000 mm × 12.000 mm ebatlarındaki bir dikdörtgenler prizması geometrili hava (akışkan) malzemenin içerisinde

modellenmiştir ve Lagrangian Modelde de yapıldığı gibi mesh işlemi hava modele de aynen uygulanmıştır. Uygulanan birim mesh uzunluğu ise 200 mm olarak seçilmiş olup (Şekil 4.35) de görülmektedir. Eulerian Modele uygulanan birim mesh uzunluğunun katı modele uygulanandan daha küçük seçilmesinin nedeni olarak; yazılım, analiz aşamasında kuvvet aktarımlarında kuvvetlerin daha doğru ve başarılı bir şekilde aktarma işleminin gerçekleşmesi için Eulerian modelde birim mesh uzunluğu daha küçük olmalıdır.

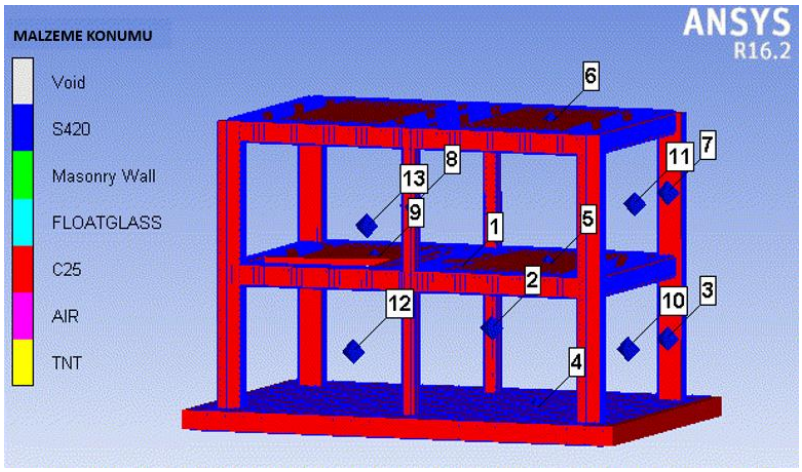


Şekil 4.35 Akışkan-Hava modeline ilişkin mesh geometrisi

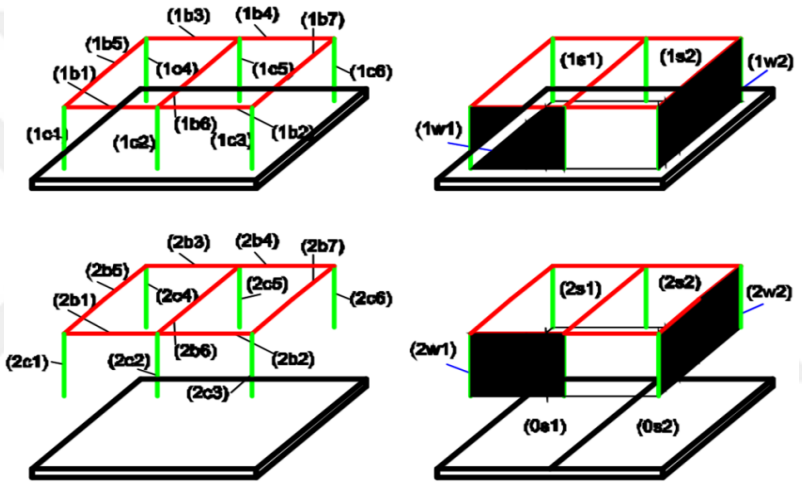
4.3.2 Okuma Noktaları

Patlama sonrası sonuçların irdelenmesi, karşılaştırma ve analizinin yapılabilmesi için toplam 13 adet okuma noktası yerleştirilmiştir. Bu yerleştirilen okuma noktaları Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de görülmekte olup ayrıca yapının taşıyıcı elemanlarına isimler verilmiştir, buna göre;

1c1: 1. Kat 1 numaralı kolon, 2b3: 2. Kat 3 numaralı kiriş, 1s2: 1. Kat döşemesi 2. Kısım, 2w1: 2. Kat 1 numaralı duvar. Şeklinde numaralandırmalar yapılarak, taşıyıcı elemanlar da ayrıca karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.36 Yapı üzerine yerleştirilen okuma noktaları



Şekil 4.37 Taşıyıcı elemanlar ve numaralandırması

Ayrıca Şekil 4.36 ve 4.37 üzerinde belirtilen ve taşıyıcı sistem elemanları üzerine yerleştirilmiş bulunan okuma noktaları Tablo 4.7 üzerindeki çizelge üzerinde detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

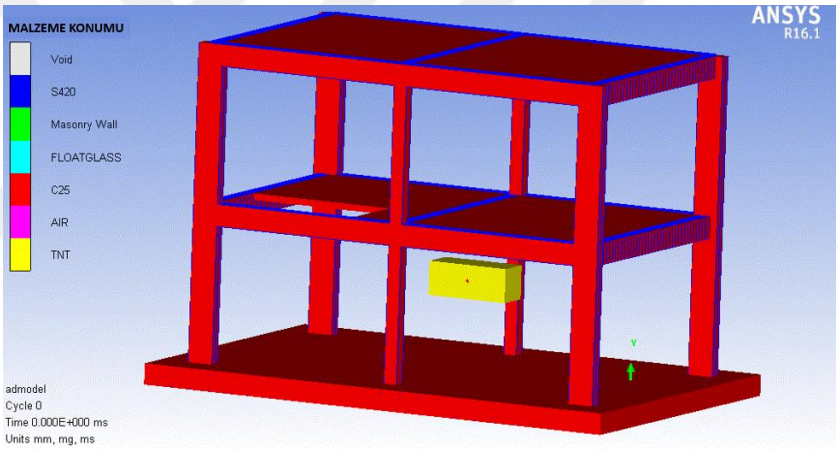
Tablo 4.7 Okuma noktaları ve numaralandırılmış taşıyıcı elemanlar

	Numaralandırılmış taşıyıcı elemanlar												
	1b6	1c5	1c6	0s2	1s2	2s2	2c6	2c2	1s1	1w2	2w2	1w1	2w1
Ölçü No	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13

4.3.3 Patlama Modelleri

Oluşturulan bu hava modeline son olarak seçilen patlayıcı bina modelinde giriş katının tam ortasına yerleştirilmiştir olup üç ayrı durum olarak incelenmiştir. Patlayıcıların modellenmesi ise şu şekilde gerçekleştirilmiştir: patlayıcı model mesh aralıklarına yerleştirilmek suretiyle modellemeler hazırlanmış olup; 5 × 4 × 2 (i.j.k) mesh aralıklarına yerleştirilerek (5 × 4 × 2 = 40 br^3; yoğunluk = 1,63 gr/cm^3 ve birim mesh =200mm hesabından TNT kütlesi ≈ 500 kg) olarak hesaplanmış aynı şekilde diğer TNT kütleleri de sırasıyla (i.j.k) 5 × 2 × 2 = 20 br^3 (250 kg TNT) ve (i.j.k) 2 × 2 × 2 = 8 br^3 (100 kg TNT) olarak tasarlanmıştır.

Analizler için 3 milisaniye patlama süresi ayarlanmış olup bilgisayar özelliklerine bağlı olarak daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, daha detaylı sonuçlar almak için artırılabilir. Patlayıcının yeri Şekil 4.38'da gösterilmektedir.



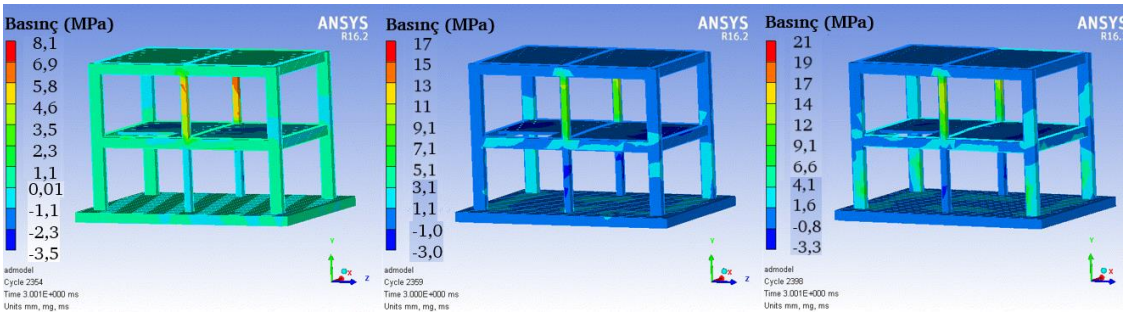
Şekil 4.38 Patlayıcı malzemenin (TNT) yapı içindeki konumu

4.3.4 Bulgular ve İrdelemeler

4.3.4.1 Patlama Basınçları

Patlama analizleri sonrası kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.39) tüm patlama durumları için, en büyük basınç değerleri (patlayıcıya en yakın elemanlar olmasının da etkisiyle) sırasıyla 5 MPa, 9,5 MPa ve 15 MPa olduğu ve bu değerlerin; 1c2 ve 1c5 numaralı kolonlarda oluştuğu görülmektedir. 2. Kat kolonlarında (2c2 ve 2c5) ise durum biraz daha farklı olmaktadır bu değerler bu kolonlarda sırasıyla; -0,5 MPa, -1 MPa ve -2 MPa olarak ölçülmüştür, bunun nedeni olarak: patlamanın oluşturduğu basınç etkisi o denli

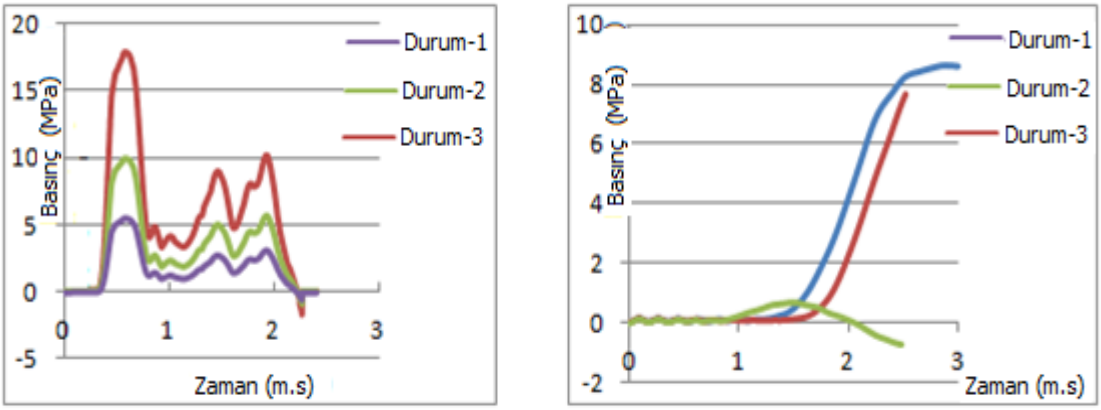
ani ve büyüktür ki 2. Kat kolonlarında ters etki oluşturmuş ve değerlerin (-) yönde çıkmasına sebebiyet vermiştir.



a) Durum-1 b) Durum-2 c) Durum-3

Şekil 4.39 Basınç gerilmesi diyagramları; model-1, model-2 ve model-3

Tüm Durumlara ilişkin en kritik ölçü noktaları olan #1 ve #8 numaralı elemanlarda (kiriş ve kolon) basınç-zaman grafiği Şekil 4.39 üzerine gösterilmiştir. Şekil 4.40-a'da verilen grafiğe göre (1b6 numaralı kiriş) en büyük değerler, ölçü noktaları üzerinde; 3 Durum için sırasıyla 6,10 MPa, 9,80 MPa ve 17,90 MPa olarak ölçülmüştür. Diğer Şekil 4.40-b'deki grafikte ise (1c2 numaralı kolon) en büyük değerler, ölçü noktaları üzerinde; 0,69 MPa, 7,67 MPa ve 8,68 MPa olduğu görülmektedir.



a) b)

Şekil 4.40 #1 ve #8 numaralı ölçü noktalarındaki basınç-zaman grafiği

Durum-1, Durum-2 ve Durum-3'de ölçü noktalarında oluşan basınç değerlerine ilişkin tüm değerler Tablo 4.8 üzerinde gösterilmektedir. Tablo 4.8'ya göre en büyük basınç değerleri Durum-3'de oluştuğu görülebilir ayrıca en büyük basınç değerleri ise sırasıyla #1, #8 ve #4 numaralı ölçü noktalarında tespit edilmiştir.

Tablo 4.8 Patlama durumları için okuma noktaları patlama basınçları

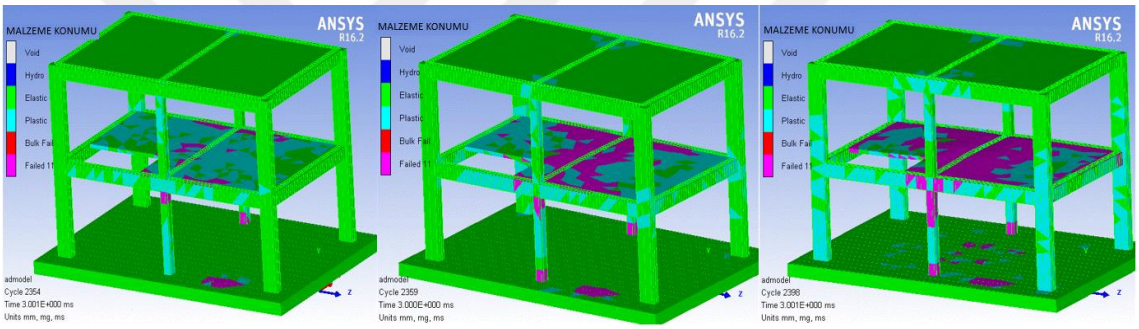
Ölçü No	Patlama Modeli 1 Etkiyen En Büyük Patlama Basıncı (MPa)	Patlama Modeli 2 Etkiyen En Büyük Patlama Basıncı (MPa)	Patlama Modeli 3 Etkiyen En Büyük Patlama Basıncı (MPa)
#1	6,12	9,81	17,90
#2	1,17	2,41	3,93
#3	0,33	2,19	5,63
#4	1,08	2,59	7,74
#5	1,20	2,15	3,92
#6	0,14	0,09	0,18
#7	0,11	0,14	1,52
#8	0,69	7,67	8,64
#9	1,60	4,44	5,25
#10	0,21	2,19	4,18
#11	0,14	0,14	0,14
#12	1,50	3,27	5,52
#13	0,61	0,61	0,66

Tüm basınç sonuçları irdelendiğinde; 100 kg TNT patlayıcı sadece #1 üzerinde kısmi hasara/parçalanmaya yol açabiliyorken, 250 kg TNT ise #1, #8, #9 ve #12 numaralı elemanlarda kırılma ya da parçalanmaya yol açabilmektedir. Diğer taraftan 500 kg TNT ise #1, #2, #3, #4, #5, #8, #9, #10 ve #12 numaralı elemanlarda hasar ya da parçalanmalara yol açmaktadır.

4.3.4.2 Hasar Durumları

Patlama sonrasında yapı ve yapı elemanlarının davranışlarında bazı değişiklikler gözlemlenmiştir. Her bir patlama durumu için yapı ve yapı elemanlarının davranışları Şekil 4.41'da aktarılan kontur diyagramları üzerinden yorumlanabilir. Şekil 4.41-a'da görüleceği üzere 100 kg TNT patlayıcının yapı üzerinde oluşturduğu hasarlar gözlemlenmektedir, buna göre diğer patlama durumları ile karşılaştırıldığında yapı hasarının en az olduğu sistemdir. Yalnızca, 1. Kat 30 × 30 cm ebadındaki kolonlar, kirişler ve döşeme üzerinde kısmi plastik alanlar

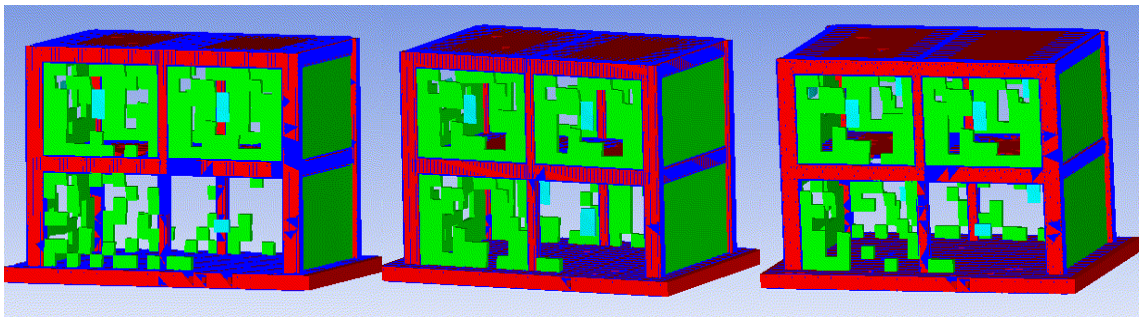
oluştuğu gözlemlenmekte olup diğer tüm elemanlar elastik davranış göstermektedir. Şekil 4.41-b de görülmekte olan 250 kg TNT patlayıcının yapı üzerinde oluşturulduğu hasarlar incelendiğinde ise 1. Katta bulunan döşeme tablası ve 30 × 30cm lik kolonlar üzerinde kısmi kırılmalar gözlemlenmiş, ayrıca kirişlerde ve diğer kolonlarda ise plastik bölgeler tespit edilmiştir. 500 kg TNT patlayıcının yapı üzerinde oluşturduğu hasarlar (Şekil 4.41-c) incelendiğinde ise; 1. Katta bulunan döşeme tablası ve 30 × 30cm lik kolonlar üzerinde kırılmalar, diğer kolonlar ve kirişler üzerinde plastik bölgeler tespit edilse de 2. Kat yapı elemanları elastik davranış göstermektedir. Ancak 500 kg TNT diğer durumlara nazaran yapı üzerinde kalıcı ve ağır hasar oluşturabilecek etkiyi gösterdiği düşünülmektedir. Tüm bu patlama durumlarında, 1. Kat duvarları ve pencerelerin tamamının parçalandığı gözlemlenmiştir.



a) Model-1 b) Model-2 c) Model-3

Şekil 4.41 Yapısal davranış diyagramları

Ayrıca; Şekil 4.42'de sırasıyla tüm patlama durumları altında duvar ve pencerelerde oluşan deformasyonlara ait kontur diyagramları gösterilmiştir.



a) Model-1 b) Durum-2 c) Durum-3

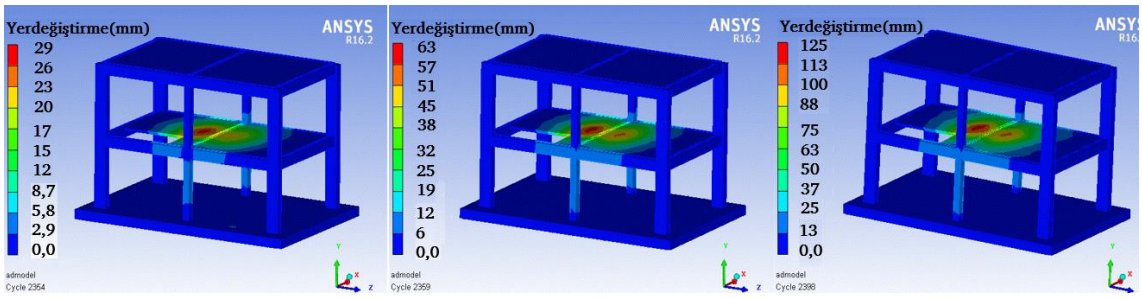
Şekil 4.42 Patlama sonrası yapı durumları

Buna göre; tüm patlama durumları için; 1w2 ve 2w2 numaralı duvarlar hariç tüm duvarlar parçalanmıştır ya da ağır hasar görmüştür. Ayrıca pencerelerin de tamamıyla parçalandığı görülmektedir.

Patlama analizleri 3 ms olarak ayarlanmış olup patlayıcıların cinsi TNT dir. TNT patlama analizlerinde standart patlayıcı türü olup diğer türdeki patlayıcılar ise TNT eşleniğine dönüştürülüp analizler yapılmalıdır. Deformasyonlar incelendiğinde; patlayıcıya yakın olan kolonlar, kirişler ve döşemenin en çok hasar alan elemanlar olduğu görülebilir, öyle ki patlama şok dalgası etkidiğinde bu malzemeler parçalanmaktadır.

4.3.4.3 Yerdeğiştirmeler

Her bir patlama Durumu için yapı elemanları üzerinde yerdeğiştirmeler meydana gelmiştir ve bu yerdeğiştirme değerleri Şekil 4.43'de verilen kontur diyagramları üzerinden tespit edilebilir. Her bir patlama kontur diyagramından görüleceği üzere en büyük yerdeğiştirme 1b1 numaralı kiriş üzerinde meydana gelmiş olup meydana gelen yerdeğiştirme değeri ise sırasıyla; 21mm, 42mm ve 81 mm olarak tespit edilmiştir. Meydana gelen diğer büyük yerdeğiştirmeler ise; 1. Kat, 1. Kısım döşemesinde ve 1. Kat 1w1 numaralı duvar üzerinde oluşmuştur bu değerler ise sırasıyla 13mm, 33 mm ve 53 mm olarak tespit edilmiştir. Bu yerdeğiştirme değerleri, yapıya etkiyen patlama yükünün; yapıyı ve/veya yapı elemanlarını parçalayacak kadar güçlü olabileceği anlamına gelmektedir.

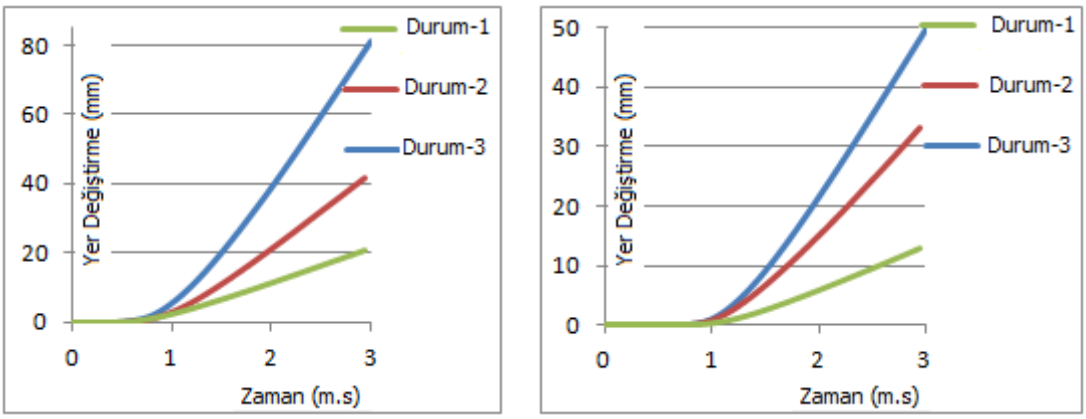


a) Model-1 b) Model-2 c) Model-3

Şekil 4.43 Yerdeğiştirme diyagramları

Ayrıca her bir duruma ait yerdeğiştirmeler (mutlak değer) ve ayrı ayrı yerdeğiştirme – zaman grafikleri ise Şekil 4.44'da görülmektedir. Buna göre en

büyük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği #1 numaralı ve #9 numaralı ölçü noktası üzerinde oluşan değerler karşılaştırılmıştır.



a) b)

Şekil 4.44 #1 ve #9 numaralı okuma noktaları, yerdeğiştirme – zaman grafiği

Ayrıca, yapı üzerine yerleştirilen tüm ölçü noktaları için her bir patlama durumu için Tablo 4.9 üzerinde gösterilmiştir. Buna göre;

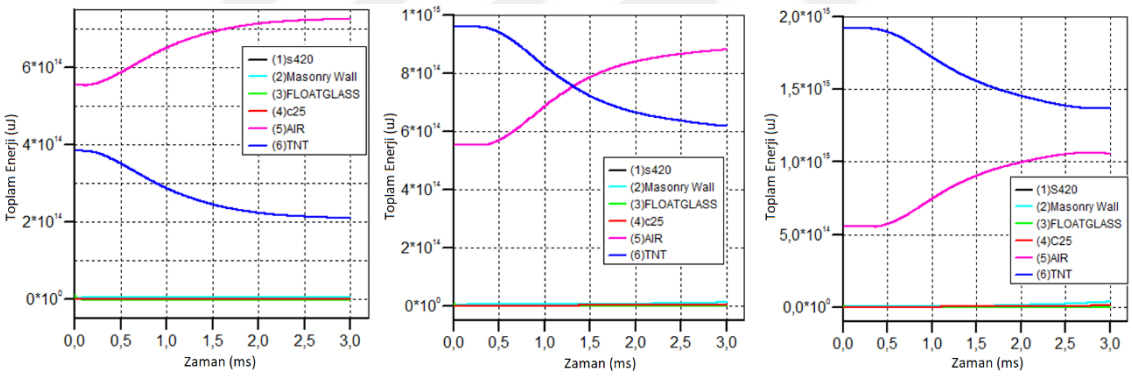
Tablo 4.9 Patlama durumları için okuma noktalarındaki yerdeğiştirmeler

Ölçü No	Durum 1 (Yerdeğiştirme, mm)	Durum 2 (Yerdeğiştirme, mm)	Durum 3 (Yerdeğiştirme, mm)
#1	21,00	42,00	81,00
#2	5,10	11,00	21,00
#3	0,02	1,50	3,50
#4	0,03	0,75	0,15
#5	9,00	16,00	27,00
#6	0,04	0,04	0,04
#7	0,05	0,06	0,08
#8	3,60	1,90	3,70
#9	13,00	33,00	50,00
#10	0,04	1,80	13,00
#11	0,05	0,04	0,05
#12	13,00	32,00	56,00
#13	1,30	3,60	7,50

Tüm patlama durumları göz önüne alınıp yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında; 100 kg TNT patlayıcı sadece #1 (kiriş), #9 (döşeme) ve #12 (duvar) numaralı ölçü noktaları üzerinde dahi ihmal edilebilir büyüklükte çatlak ve hasarlar oluşturabiliyorken; 250 kg TNT #1, #9,#12 ve #5 numaralı ölçü noktaları üzerindeki elemanlarda hasar oluşturabilir. Bununla birlikte, 500 kg TNT ise söz konusu ölçü noktaları üzerindeki elemanlarda parçalanma ya da ağır hasar meydana getirebilir.

4.3.4.4 Patlama Enerjisi

Patlama esnasında, TNT malzeme ortama büyük bir enerji yaymaktadır ve bu enerji; beton, donatı, duvarlar, pencere ve hava tarafından soğurulur. Eğer ki, patlayıcı kütlesi çok büyük olursa ve yaydığı bu enerji hava ve yapı elemanları tarafından soğurulamaz, bu da yapıda ağır hasarlar ile sonuçlanır. Her üç patlama durumuna ilişkin TNT malzemenin yaydığı enerji ve yapı elemanları tarafından bu enerjinin ne kadarının soğurulduğu Şekil 4.45 üzerinde görülmektedir.



a) Model-1 b) Model-2 c) Model-3

Şekil 4.45 Toplam Enerji – Zaman Grafiği

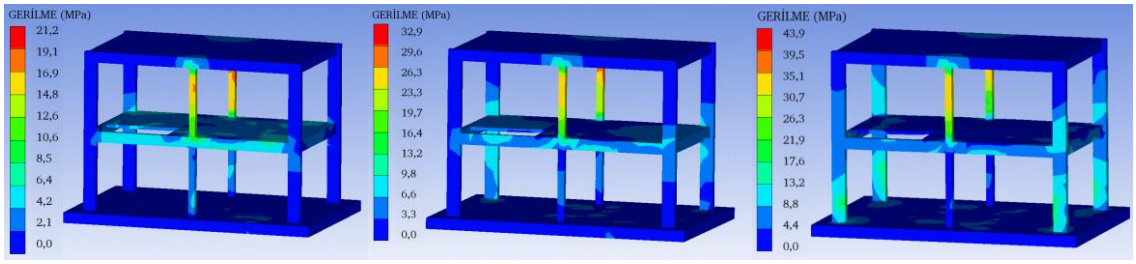
Ayrıca Tablo 4.10 üzerinde de her bir patlama durumu için TNT tarafından salınan patlama enerjisi ile yapısal ve yapısal olmayan elemanlar tarafından soğrulan ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tablo 4.10 Patlama sonrası ortaya çıkan ve soğrulan enerji

Malzeme	Durum 1 (Enerji uJ)	Durum 2 (Enerji uJ)	Durum 3 (Enerji uJ)
Donatı	$1{,}90.10^{10}$	$1{,}20.10^{11}$	$4{,}70.10^{11}$
Beton	$5{,}01.10^{11}$	$2{,}52.10^{12}$	$9{,}37.10^{12}$
Pencere	$5{,}73.10^{12}$	$1{,}02.10^{13}$	$1{,}02.10^{13}$
Duvar	$1{,}02.10^{13}$	$1{,}16.10^{13}$	$3{,}65.10^{13}$
Hava	$7{,}26.10^{14}$	$8{,}81.10^{14}$	$1{,}06.10^{15}$
TNT	$2{,}10.10^{14}$	$6{,}18.10^{14}$	$1{,}37.10^{15}$

4.3.4.5 Gerilmeler

Binaların içinde meydana gelen patlamaların ardından taşıyıcı sistem üzerindeki gerilmeler ANSYS AUTODYN yazılımı ile okunmuş olup, yapı elemanları üzerinde bulunan okuma noktaları vasıtası ile bu değerler okunmuştur. Her 3 patlama durumu için elde edilen gerilme (von mises) diyagramları Şekil 4.46'de gösterilmektedir.



Şekil 4.46 Taşıyıcı sistem üzerinde meydana gelen gerilme diyagramları; model-1, model-2 ve model-3

Kontur diyagramları incelendiğinde, 500 kg TNT'nin taşıyıcı sistemde meydana getirdiği gerilmelerin en yüksek olduğu görülmüştür. Dikkat çeken nokta ise ikinci kat kolonlarında meydana gelmiştir. Patlama etkisinin maydana getirdiği itme kuvveti, döşemeyi yerçekiminin aksi yönünde hareket ettirerek gerilmelerin 30 – 35 Mpa mertebesine ulaştırmıştır. Bu değer kolon için yıkıcı etki anlamına gelmektedir.

4.3.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

3 farklı kütleli patlayıcı ile yapılan analiz sonuçlarına göre sonuçlar irdelenmiştir. Seçilen model, saldırıya maruz kalan binaya denk olarak seçilmiştir. Döşemedeki merdiven boşluğu, patlama yükü dalgasının üst katlara ne şekilde ulaştığının araştırılması için tasarlanmıştır. Seçilen cam ve duvar kalınlıkları ülkemizde şantiye uygulamalarında kullanılan yaygın malzeme kesitlerine uygun seçilmiş olup çatıya gerek görülmemiştir. Saldırının, binanın giriş katında yapıldığı varsayıldığından, patlayıcı malzeme giriş katının ortasında olacak şekilde modellenmiştir. Yapılan çalışmanın ardından elde edilen bulgular ve sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- Analiz sonucuna göre (0,5 ton TNT) 1c2 ve 1c5 numaralı kolonların tamamen parçalandığı; 2. ve 3. Analiz sonuçlarına göre ise bu kolonlarda kısmi hasarların meydana geldiği görülmektedir.
- Tüm analiz sonuçlarında donatı çeliğin yüksek hasar almadığı hasar sadece beton malzeme üzerinde gerçekleşmiştir.
- 3 analiz sonucunda da; pencerelerin tamamen, 1w1 ve 1w2 numaralı duvarlar hariç tüm duvarların parçalandığı görülmektendir.
- Katta bulunan 30×30 ebadındaki kolonların ikisinde de betonun ve donatının tamamına yakın oranında parçalandığı ve şekil değiştirdiği; 60×30 ebadındaki 2 adet kolonda tamamına yakın oranda parçalanma gözlemlenmektedir.
- Kat kirişler ve döşeme betonu ise tamamıyla parçalanmış olup donatılarda şekil değiştirmeler yüksek oranda gözlemlenmekte olup yer yer kırılmalar da tespit edilmiştir.
- Kat üst döşeme betonunda (merdiven boşluğuna göre aynı taraftaki) küçük parçalanmalar görülmektedir.
- Kat kolonlarda ise 1. Kat kolonlarına göre göreceli olarak büyük olmasa da beton elemanlarda parçalanmalar görülmektedir.
- Radye temelde ise beton elemanda yer yer parçalanmalar gözlemlenmiştir.
- Yapı bir bütün olarak ele alındığında, patlayıcı malzeme kütlesi arttıkça yapının taşıyıcı sistemi yüksek oranda hasar aldığı gözlemlenmiştir. 100 kg

TNT, sadece giriş katta kısmi hasar verirken, 250 kg TNT üst kat kolon ve kirişleri etkilediği, 500 kg TNT ise yapıya ağır hasar verdiği görülmüştür.

Hastane, askeri bina, okul gibi kamu yapıları; gerek terör saldırısı, gerekse meydana gelebilecek kazalardan (doğalgaz, kazan dairesi patlamaları vb.) ötürü kritik öneme sahiptir. Bina içinde meydana gelebilecek patlamalarda ise; patlama yükü, kolonlara aşırı büyük miktarda kesme kuvveti olarak, kirişlere ise yerçekiminin aksi istikametinde (+Y) etkiyerek, taşıyıcı sistemin göçmesine neden olabilmektedir. Bu sebepten dolayı bu tip kamu yapılarının; patlayıcıdan korunması için gerekli tedbirlerin alınması ayrıca tasarım aşamasında patlama yüklerinin de statik hesaplara dâhil edilmesi doğru olacaktır.

4.4 Betonarme Köprü Modeli

Bu sonlu eleman modelinde; Türkiye otoyollarında sıkça rastlanan bir sanat yapısı olup inşası yapılarak hizmet veren bir karayolu köprüsü (Şekil 4.46) model alınarak tasarlanmıştır. Köprünün taşıyıcı kolon çevresinde meydana gelmesi muhtemel metan gazı patlamasına karşı bu mühendislik yapısı araştırılmıştır. Köprüler ve viyadükler gibi sanat yapılarının; trafik yükü ve ulaşım konusundaki kritik öneminden dolayı Ancak patlama teorisinde patlayıcı kütlesi standardı TNT olarak kabul edildiğinden, seçilen model üzerindeki araştırma bu yönde yapılmıştır.

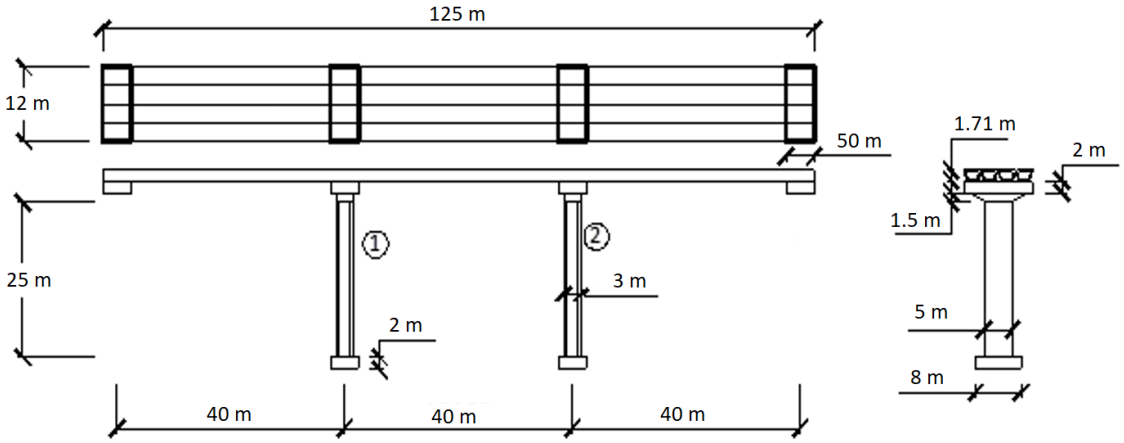
4.4.1 Betonarme Köprü ve Sonlu Eleman Modeli

Seçilen karayolu köprüsü modeli, Türkiye sıkça inşası yapılan modellerden birisi olup (Şekil 4.47); üç açıklığa sahip betonarme bir karayolu köprüsü modelidir.



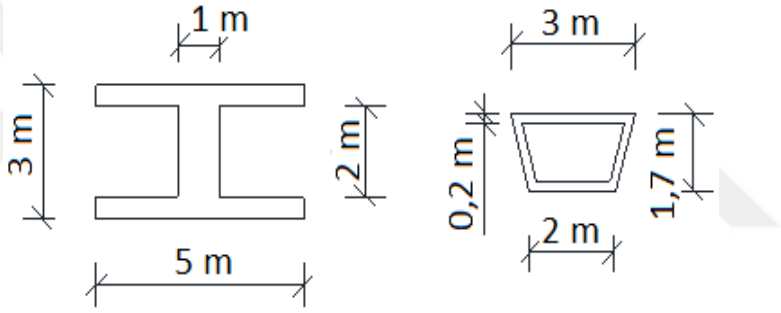
Şekil 4.47 Betonarme karayolu köprüsü

Betonarme köprünün sonlu eleman modeli ANSYS Workbench yazılımında yapılmış olup açık yöntem (explicit Dynamics) ile oluşturulmuştur. Patlayıcı ve akışkan hava modeli ise AUTODYN yazılımında yapılmış olup eulerian metot ile modellenmiştir. Karayolu köprüsünün iki ayak arası açıklığı; 40 m olarak tasarlanmış, Şekil 4.48'de de görüleceği üzere karayolu köprüsünün taşıyıcı elemanlarının kesitleri verilmiş olup kolonlar (I) kesitlidir. Kolon yükseklikleri 23 m ve kolon altında bulunan her bir temel ise 5 m genişlik 8 m uzunluk ve 2 m yükseklik ebatlarında tasarlanmış ve kiriş yüksekliği, 1,71 m olarak seçilmiştir.



Şekil 4.48 Betonarme karayolu köprüsünün geometrik ölçüleri

Betonarme köprünün en kesit detayları Şekil 4.49'de görülmektedir. Kolonlar I kesit ve kirişler ise trapez kutu kesit betonarme malzeme seçilmiş olup modelleme bu doğrultuda yapılmıştır.



Şekil 4.49 Kolon ve kiriş en kesit detayları (m)

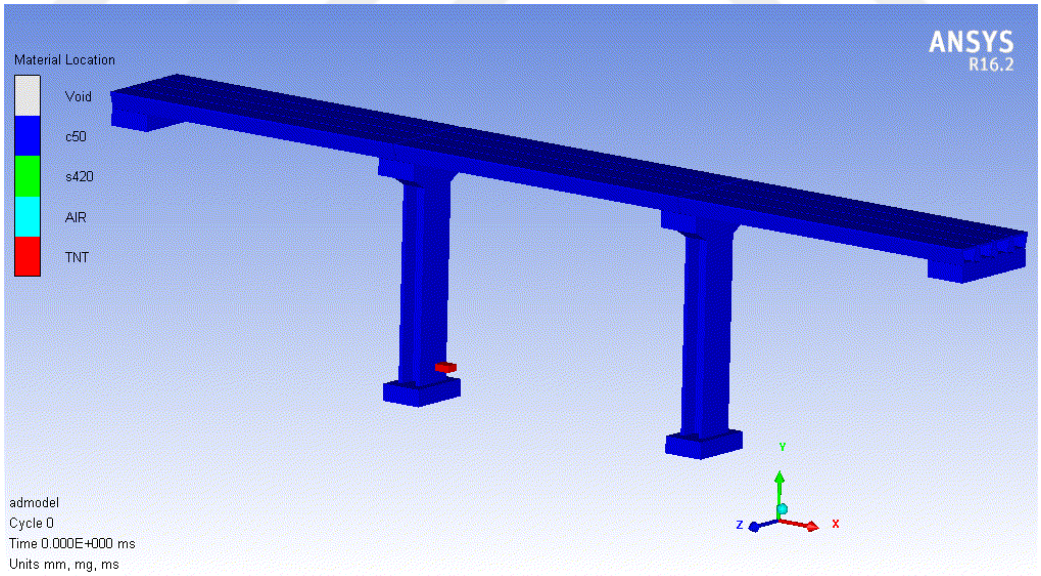
Geometrik özellikleri verilmiş olan otoyolu köprüsünde analiz için 4 ton TNT patlayıcı kullanılmış olup patlayıcı Şekil 4.48'de görüleceği üzere 1 numaralı kolonun en alt noktasına konumlandırılmıştır. Analizler tüm tez çalışmasında olduğu gibi ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde yapılmış olup patlama süresi 3 milisaniye olarak belirlenmiştir. Modelde kullanılan malzeme (beton, çelik, TNT, hava) özellikleri ise Tablo 4.11'de verilmiştir.

ANSYS yazılımı üzerinde üç boyutlu Lagrangian (katı) model tasarımı, malzeme özellikleri, mesh tanımı gibi genel tasarımların tamamlanmasına müteakip, patlama analizinin yapılacağı ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde Akışkan – Hava (Eulerian) modellemesi tasarımı yapılmıştır.

Buna göre üç boyutlu katı model patlama işleminin gerçekleşeceği hava modelinin içerisine yerleşştirilmesi gerekmektedir, bunun için 130.000 mm × 30.000 mm × 20.000 mm ebatlarındaki bir dikdörtgenler prizması geometrili hava (akışkan) malzemenin içerisinde modellenmiştir ve Lagrangian Modelde de yapıldığı gibi mesh işlemi hava modele de aynen uygulanmıştır. Uygulanan birim mesh uzunluğu ise 5000 mm olarak seçilmiş olup (Şekil 4.35) de görülmektedir. Eulerian Modele uygulanan birim mesh uzunluğunun katı modele uygulanandan daha küçük seçilmesinin nedeni olarak; yazılım, analiz aşamasında kuvvet aktarımlarında kuvvetlerin daha doğru ve başarılı bir şekilde aktarma işleminin gerçekleşmesi için Eulerian modelde birim mesh uzunluğu daha küçük olmalıdır.

ANSYS yazılımı üzerinde malzeme tanımı yapılırken: Beton malzemede, *RHT Concrete* beton modeli kullanılmış olup kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Donatı çeliği modelinde, Johnson Cook modeli kullanılmış olup kırılma modeli olarak ise *Plastic Strain* kriteri kullanılmıştır.

Hazırlanan sonlu eleman modeli ise Şekil 4.50'da verilmiştir.



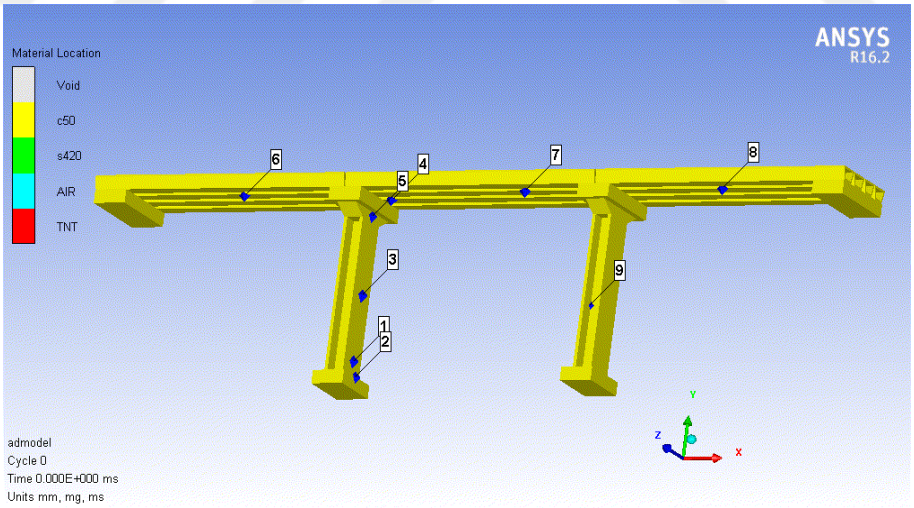
Şekil 4.50 Karayolu köprüsünün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Tablo 4.11 Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Beton	C50	$3{,}7 \times 10^4$	2,40	50	5
Donatı	B420C	2×10^5	7,83	420	420
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlayıcı	TNT	-	1,63	-	-

4.4.2 Okuma Noktaları

Patlama analizinden hemen önce, patlama analizine ilişkin sonuçların irdelenebilmesi için toplam 9 adet okuma noktası (Şekil 4.51) yerleştirilmiştir. Bu noktalar, patlama etkisi sebebiyle patlama etkisine maruz kalan kolonda oluşması muhtemel reaksiyon ve dolayısıyla kirişlerin ve diğer kolonun bu durumdan ne şekilde etkilendiğinin gözlemlenmesi amacıyla seçilmiştir.



Şekil 4.51 Karayolu köprüsü modeline yerleştirilen okuma noktaları

4.4.3 Patlama Modeli

Buna göre; 3 açıklıklı karayolu köprüsü ANSYS yazılımı [114] ile modellenmiş, patlama analizleri ise ANSYS AUTODYN yazılımı [115] kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.50'de de görüleceği üzere karayolu köprüsüne ait yapı elemanları ölçüleri

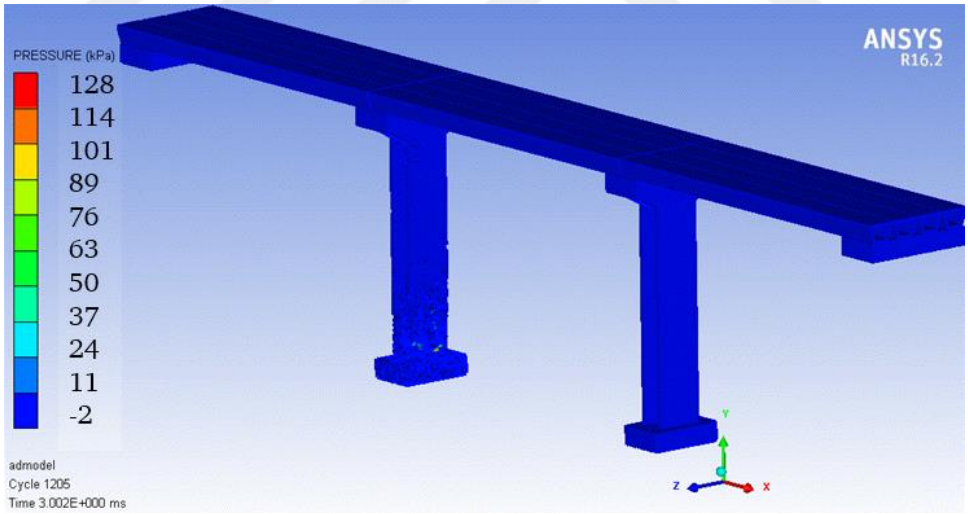
doğrultusunda ANSYS yazılımı ile sonlu eleman modeli gerçeğine uygun bir şekilde modellenmiştir.

Analizler için 3 milisaniye patlama süresi ayarlanmış olup bilgisayar özelliklerine bağlı olarak daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, daha detaylı sonuçlar almak için artırılabilir.

4.4.4 Bulgular ve İrdelemeler

4.4.4.1 Patlama Basınçları

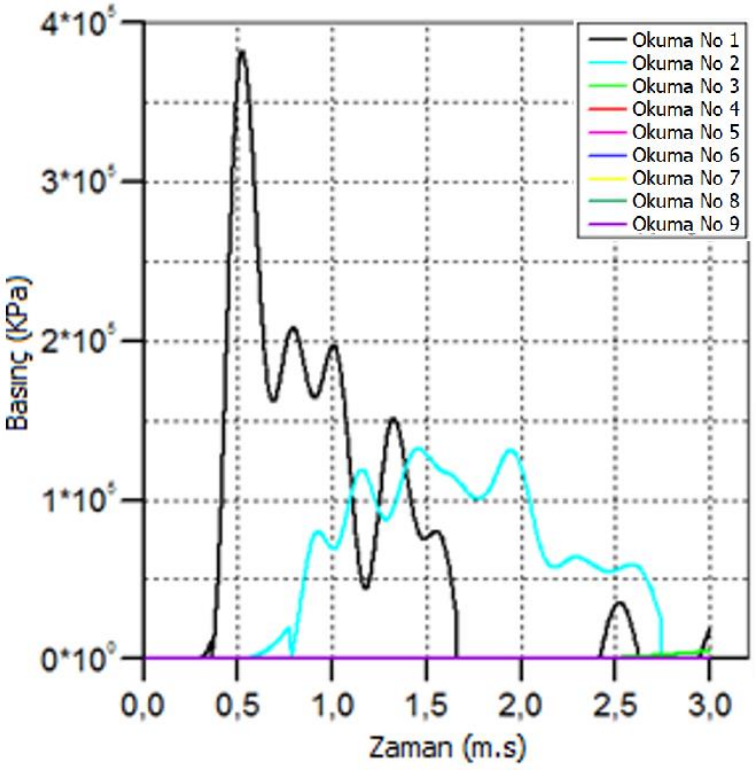
Patlama sonrası yapı üzerine etkiyen basınç değerleri (Şekil 4.52) incelendiğinde ise, tüm kayda değer basınç değerleri patlamanın yaşandığı kolonun alt bölgesi ile temel üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Buna göre en yüksek değer kolonun alt bölgesinde yaklaşık 127 MPa olarak tahmin edilmektedir. Bu değer kolona -X yönünde etki etmiş olup, kolon için ciddi tehlike oluşturabilecek çok büyük bir değer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte diğer kolon ve kirişlerin patlama yükünden etkilenmediği görülebilir.



Şekil 4.52 Patlama sonrası yapıda oluşan basınç diyagramı

Ölçüm noktaları üzerinden detaylı inceleme yapıldığında ise değerlerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna güre ölçüm noktalarında oluşan detaylı değerler Tablo 4.12 üzerine listelenmiş olup grafik (Şekil 4.53) üzerinde de görülmektedir. Tablo ve grafik incelendiğinde ise; sadece patlamanın olduğu kolon üzerinde kayda değer sonuçlara rastlanmakla birlikte diğer ölçü noktalarında ise sonuçlar ihmal edilebilir.

Patlayıcı malzeme TNT ye en yakın olan ölçü noktasının kaydettiği değer ise çok daha yüksek çıkmış olup bu değer 381,92 MPa, temele etkiyen basınç ise 132,11 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.53 Okuma noktaları üzerinde oluşan basınç – zaman grafiği

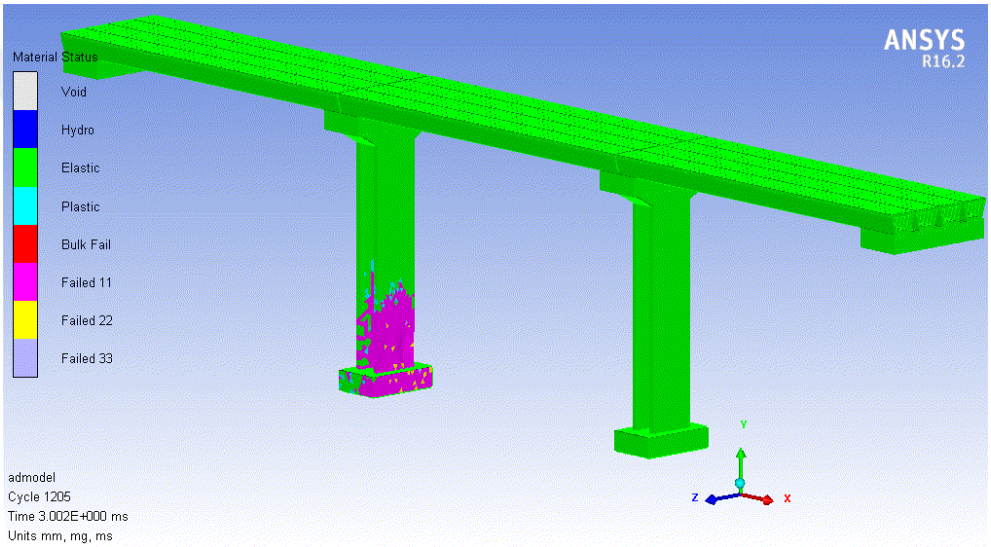
Tablo 4.12 Okuma noktalarına etkiyen patlama basınçları

Ölçü No	Basınç (MPa)
#1	381,92
#2	132,11
#3	2,02
#4	0,12
#5	0,11
#6	0, 00
#7	0, 00
#8	0, 00
#9	0,13

4.4.4.2 Hasar Durumları

Patlama analizi yapıldıktan sonra yapıda meydana gelen değişimler, yapı ve/veya taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen durumu (elastik, plastik bölgeler, kırılan çöken bölgeler) Şekil 4.54'da verilen kontur diyagramı ile gösterilmektedir.

Taşıyıcı elemanların durumunu gösteren kontur diyagramına göre; sadece patlamanın olduğu bölgenin (kolonun alt bölgesi ile temelin) ağır hasar alarak kırıldığı, bununla birlikte diğer elemanların (diğer kolon ve kirişlerin) ise neredeyse hiç hasar almadığı ve elastik durumunu koruduğu görülmektedir.

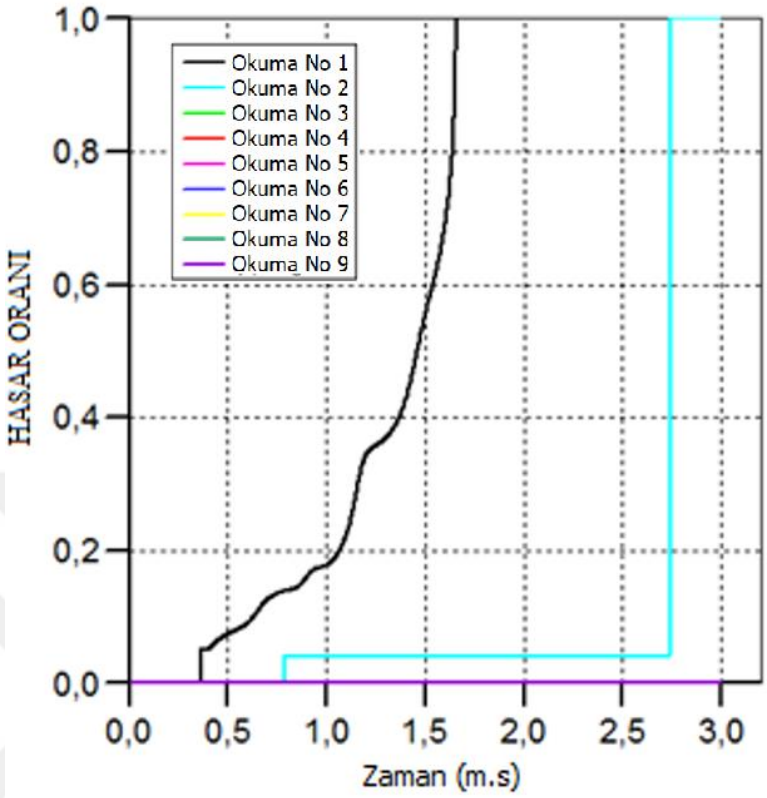


Şekil 4.54 Patlama sonrası oluşan yapısal davranış diyagramı

Yapılan analizlerde irdelenen bir diğer sonuç ise hasar değerleri olmuştur. Hasa değerleri, ölçü noktaları üzerinden irdelendiğinde (Şekil 4.55) ise #1 ve #2 no'lu ölçüm noktalarında değerler ölçülmüştür. Grafik incelendiğinde ise en kritik noktalar olan #1 ve #2 numaralı ölçü noktalarında hasar yüzdeleri patlamanın meydana gelmesiyle birlikte ani bir şekilde %100'e ulaştığı görülmektedir. Diğer ölçü noktalarından alınan sonuçlar ise grafik üzerinden de anlaşılacağı üzere çok küçük olup ihmal edilebilir.

Patlamanın gerçekleştiği kolon bölgesinde meydana gelen kırılmalar sebebiyle, bu bölgede yaşanan malzeme kaybı dolayısıyla, kolonun taşıyıcılığını kaybetmesi sebebiyle, taşıyıcı sisteme ilişkin gelişmiş göçme analizi (progressive collapse)

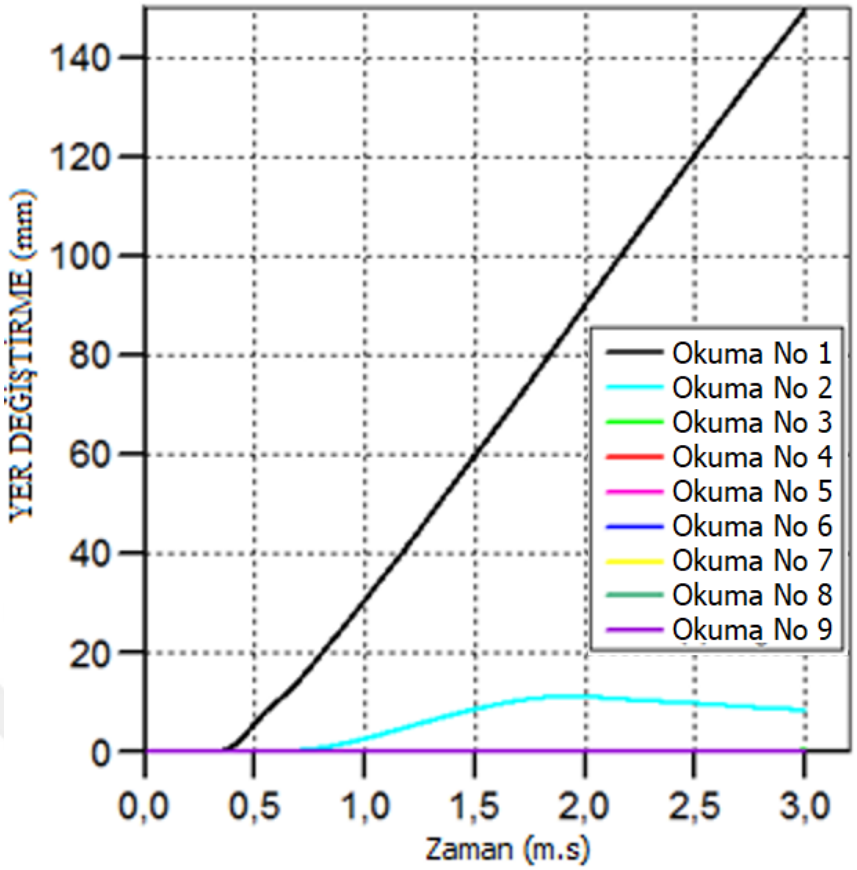
yapılması gerekmektedir. Bu sayede, taşıyıcı sistemin patlama sonrası hangi seviyede hizmet vereceği hakkında fikir sahibi olunabilir.



Şekil 4.55 Okuma noktaları üzerinde oluşan hasar durumu-zaman grafiği

4.4.4.3 Yerdeğiştirmeler

Patlama sonrası oluşan yerdeğiştirme değerleri incelendiğinde ise (Şekil 4.56) yine #1 ve #2 no'lu ölçü noktalarında göze çarpan sonuçlar ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre; #1 no'lu ölçüm noktasında 14,5 cm ile en büyük değer ölçülmüş olup bu değeri #2 no'lu ölçüm noktası 11 cm ile takip etmektedir. Daha önceki değerlerde olduğu gibi diğer ölçü noktalarındaki değerler (Tablo 4.13) çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.



Şekil 4.56 Okuma noktaları üzerinde oluşan yerdeğiştirme – zaman grafiği

Tablo 4.13 Okuma noktalarında oluşan yerdeğiştirmeler

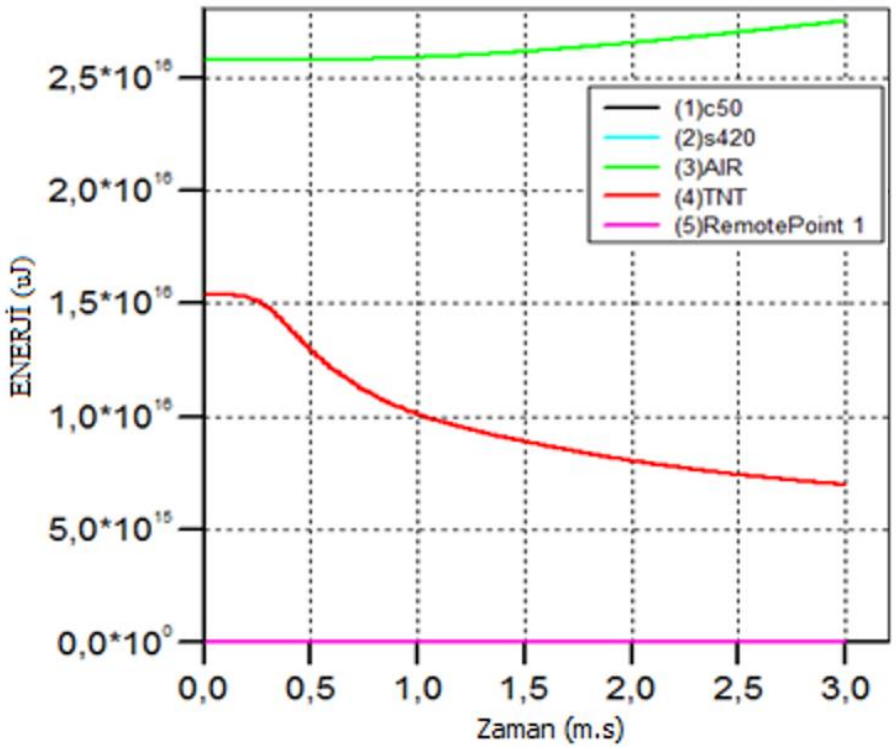
Ölçü No	Yerdeğiştirme (mm)
#1	145,00
#2	11,00
#3	0,07
#4	0,05
#5	0,04
#6	0,03
#7	0,03
#8	0,03
#9	0,03

4.4.4.4 Patlama Enerjisi

Patlama esnasında, TNT büyük bir miktar enerji açığa çıkarır. Açığa çıkan enerjinin bir kısmı yapı elemanları tarafından yutulabilir. Bu değerler Tablo 4.14'da görülen bu sonuçlar grafik (Şekil 4.57) üzerinde irdelendiğinde ise sonuçlar daha iyi yorumlanabilir. Buna göre TNT tarafından açığı çıkan $1{,}53.10^{16}$ μJ enerjinin neredeyse tamamını hava absorbe edilerek enerji seviyesini $2.8516.10^{16}$ μJ değerine çıkarmaktadır. Yapı elemanlarının (beton ve donatı) havaya nazaran çok daha küçük miktarlarda enerji absorbe ettiği görülmektedir.

Tablo 4.14 Açığa çıkan ve soğurulan edilen enerji

Eleman	Enerji (μJ)
Beton	$8{,}9363.10^{13}$
Donatı	$4{,}3817.10^{12}$
Hava	$2{,}8516.10^{16}$
TNT	$1{,}5360.10^{16}$



Şekil 4.57 Toplam enerji – zaman grafiği

4.4.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

ANSYS yazılımı üzerinde sonlu eleman modeli oluşturulan karayolu köprüsünün ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde patlama analizleri gerçekleştirilmiştir. Patlayıcı malzeme olarak 4 ton TNT malzeme kullanılmış olup patlama süresi ise 3 milisaniye olarak belirlenmiştir. Oluşabilmesi muhtemel bir metan gazı patlaması sebebiyle oluşturulmuş bu patlama modeline göre, standartlara uygun olarak TNT patlayıcı malzemesi uygun görülmüştür. Atıksı hatları ya da çöp toplama merkezlerinde oluşması muhtemel metan gazı sıkışmasının yanında bu tip sanat yapıları saldırılara karşı savunmasız durumdadır. Seçilen köprü modelinin taşıyıcı sistemine denk bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapılan çalışmanın ardından elde edilen bulgular ve sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- Sadece patlamanın gerçekleştiği kolon tabanın bölgesinde en büyük hasar değerini alarak parçalanmıştır.
- Diğer elemanların aldıkları hasar ihmal edilebilir seviyededir.
- Kolon – Temel noktasında 132 MPa patlama basınç değeri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler geniş açıklıklı bir köprü için çok kritik değerlerdir.
- Oluşan patlama dalgası köprü kirişlerine ulaşamasa da kolonun alt noktasında oluşturduğu yüksek basınç sebebiyle, bu sanat yapısının zaman içerisinde çevresel etkilerin de etkisiyle yıkılabileceği düşünülmektedir.

Büyük miktarda patlayıcılar yapıyı tamamıyla parçalayabilmektedir. Günümüzde sanat yapıları, gerek şehir içi gerekse şehirlerarası ulaşımın en önemli, inşa edilmesi zaman alan ve ekonomik olarak maliyetli parçalarından birisidir. Karayolu köprüleri, viyadükler gibi sanat yapılarının taşıyıcı ayakları çevresinde; atıksu hattı, doğalgaz hattı, petrol hattı vb. bulunmaması, sanat yapılarının güvenliği açısından doğru olacaktır.

4.5 Beton Ağırlık Baraj Modeli

Barajlar mühendislik yapıları içerisinde en kritik öneme sahip yapılardan birisidir dolayısıyla baraj gövdesini etkileyecek bir şekilde oluşan patlama; çevreye, yakın bölgede bulunan yerleşim yerine büyük zarar vermekle kalmayıp ekonomik olarak da ciddi kayıp yaşanmasına sebep olur. Tarihte de bazı örnekler mevcuttur; 2. Dünya Savaşı sırasında gerçekleşen bu olayda, İngiltere ve ABD 1944 yılında Hurricane Harekâtı [129] adını verdikleri saldırı sırasında, Almanya'nın Mönhe, Eder ve Sorpe barajları hedef alınmış ve yapılan hava saldırılarında Mönhe ve Eder Barajları yıkılmıştır. Barajların yıkılmasıyla birlikte 1294 kişi taşkında boğulmuş, çok sayıda hayvan telef olmuş 11 fabrika ve 92 ev yıkılmıştır [130]. Bu vahim olay barajların ne denli kritik bir önemde olduğunun bir ispatı niteliğindedir.

Gerçekleşen bu baraj yıkılmalarında patlayıcı su içerisinde infilak etmiş olup patlayıcı etkisi ve hidrostatik etki barajların yıkılmasına neden olmuştur. Bu çalışmada ise patlayıcı, verilen örneğin aksine seçilen beton gövdeli bir barajın mansap tarafında modellenmiş olup barajların ne denli önemli olduğunu betimlemek için seçilmiştir. Seçilen beton gövdeli barajın farklı uzaklıklardaki patlama etkisine karşı davranışını araştırılmıştır olup Şekil 4.58'de gösterilen baraj örnek olarak seçilmiştir.



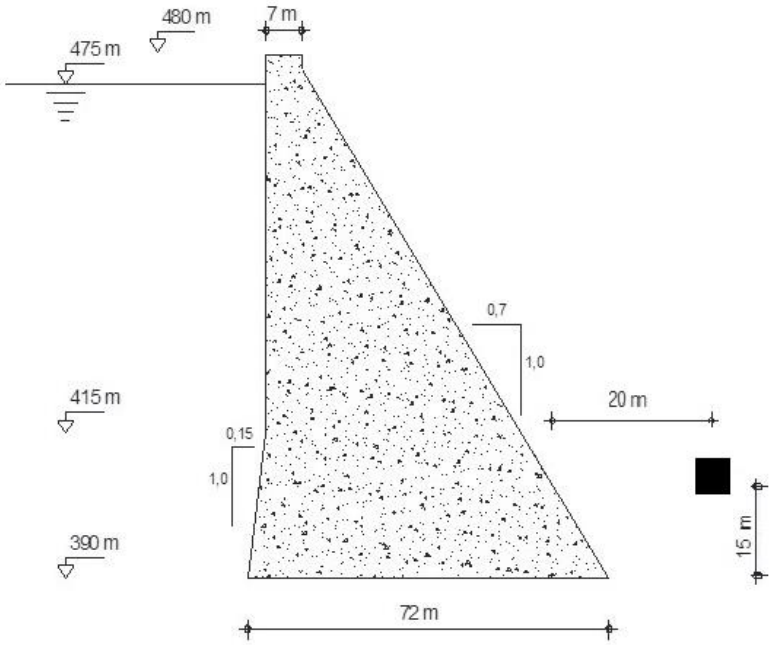
Şekil 4.58 Beton ağırlık barajı [131]

4.5.1 Beton Ağırlık Barajı ve Sonlu Eleman Modeli

Barajın geometrik özellikleri ise; rezervuar yüksekliği 85 m, rezervuar uzunluğu 255 m, taban genişliği 72 m ve tepe genişliği 7 m olarak girilmiştir. Barajın sonlu eleman modeli ANSYS Workbench yazılımı [114] ile açık yöntem (explicit Dynamics) kullanılarak hazırlanmış olup, patlama yükü de ANSYS AUTODYN yazılımı [115] ile eulerian metodu ile analiz edilmiştir. Ayrıca çıkan sonuçlar araştırmacılar tarafından önerilen ampirik formüller ve UFC 3-340-02 şablonları ile ölçülen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Patlama süresi 40 ms olarak seçilmiş olup; basınç, yerdeğiştirme, şekil değiştirme ve gerilme parametreleri irdelenmiştir.

Baraj 1900 hm^3 su tutma kapasitesine sahip olup Şekil 4.59'de görüleceği üzere H = 85 m gövde yüksekliğine ve 255 m (3H) rezervuar uzunluğuna sahiptir. Beton gövdenin taban genişliği 72 m ve üst noktanın genişliği ise 7 m olup Şekilde sonlu eleman modeli görülmektedir [132],[133].

ANSYS yazılımı üzerinde üç boyutlu Lagrangian (katı) model tasarımı, malzeme özellikleri, mesh tanımı gibi genel tasarımların tamamlanmasına müteakip, patlama analizinin yapılacağı ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde Akışkan – Hava (Eulerian) modellemesi tasarımı yapılmıştır. Buna göre üç boyutlu katı model patlama işleminin gerçekleşeceği hava modelinin içerisine yerleşştirilmesi gerekmektedir, bunun için 100.000 mm × 90.000 mm × 90.000 mm ebatlarındaki bir dikdörtgenler prizması geometrili hava (akışkan) malzemenin içerisinde modellenmiştir ve Lagrangian Modelde de yapıldığı gibi mesh işlemi hava modele de aynen uygulanmıştır. Uygulanan birim mesh uzunluğu ise 5000 mm olarak seçilmiş olup (Şekil 4.35) de görülmektedir. Eulerian Modele uygulanan birim mesh uzunluğunun katı modele uygulanandan daha küçük seçilmesinin nedeni olarak; yazılım, analiz aşamasında kuvvet aktarımlarında kuvvetlerin daha doğru ve başarılı bir şekilde aktarma işleminin gerçekleşmesi için Eulerian modelde birim mesh uzunluğu daha küçük olmalıdır.



Şekil 4.59 Baraja ait gövde kesiti ve patlayıcı konumu [132],[133]

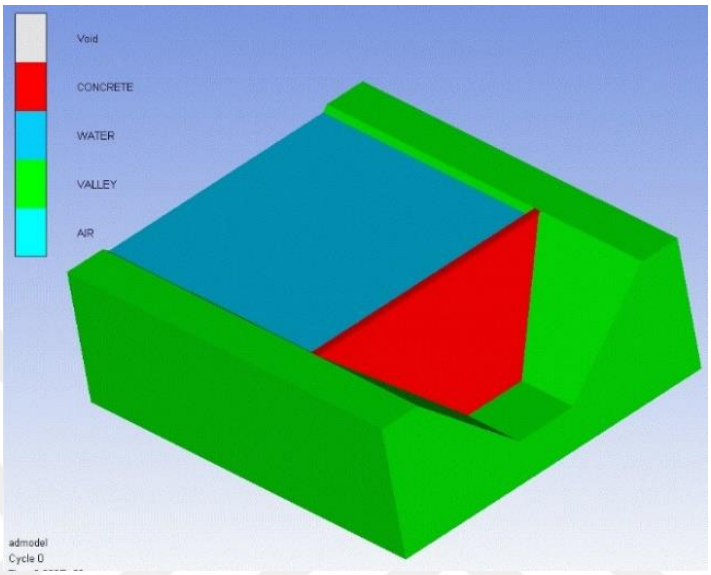
ANSYS yazılımı üzerinde malzeme tanımı yapılırken: Beton malzemede, *RHT Concrete* beton modeli kullanılmış olup kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Donatı çeliği modelinde, Johnson Cook modeli kullanılmış olup kırılma modeli olarak ise *Plastic Strain* kriteri kullanılmıştır.

Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinde kullanılan elemanların mekanik özellikleri Tablo 4.15'de verilmektedir [134].

Tablo 4.15 Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Beton	C20	2×10^4	2,40	20	2,0
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlayıcı	TNT	-	1,60	-	-

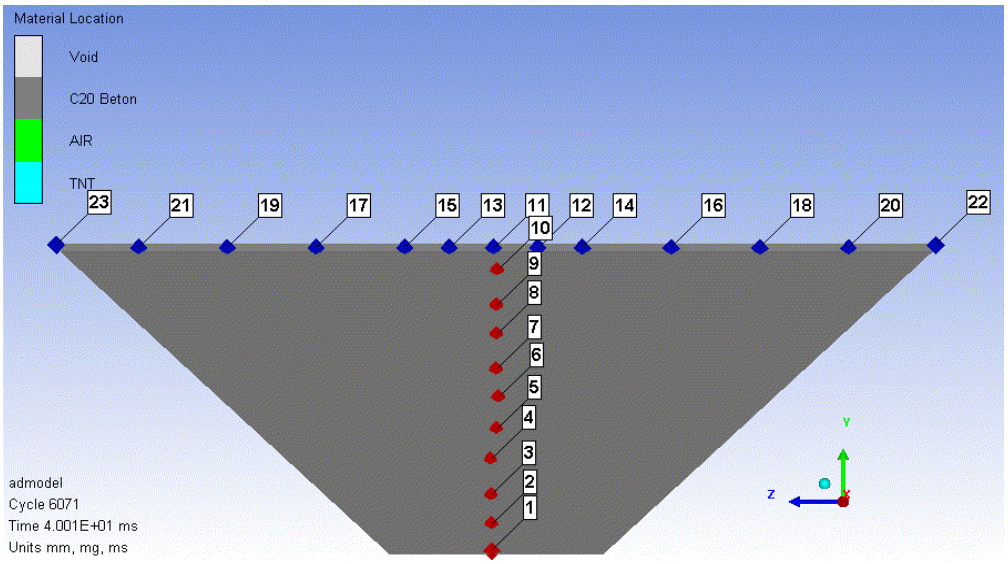
Geometrik ölçülere uygun olarak, Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli (beton, su ve vadiden oluşan) H=85m gövde yüksekliğine ve 255m (3H) rezervuar uzunluğuna sahiptir, beton gövdenin taban genişliği 72 m ve üst noktanın genişliği ise 7 m olarak; ANSYS yazılımı ortamında modellenmiş olup (Şekil 4.60), patlama analizi için üç boyutlu model ANSYS AUTODYN yazılımında oluşturulmuştur.



Şekil 4.60 Barajın sonlu eleman modeli

4.5.2 Okuma Noktaları

Patlama analizinden önce 23 adet ölçü beton gövde üzerine yatay ve düşey olarak yerleştirilerek patlama analizinden sonra basınç, yerdeğiştirme, gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri okunmuştur. Okuma noktalarının yeri Şekil 4.61 üzerinde görülmekte olup bu okuma noktaları gövdenin tabanından kret üst noktasına kadar düşey olarak ve kret genişliği boyunca üst noktada yatay olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 4.61 Okuma noktalarının sonlu eleman üzerinde gösterimi

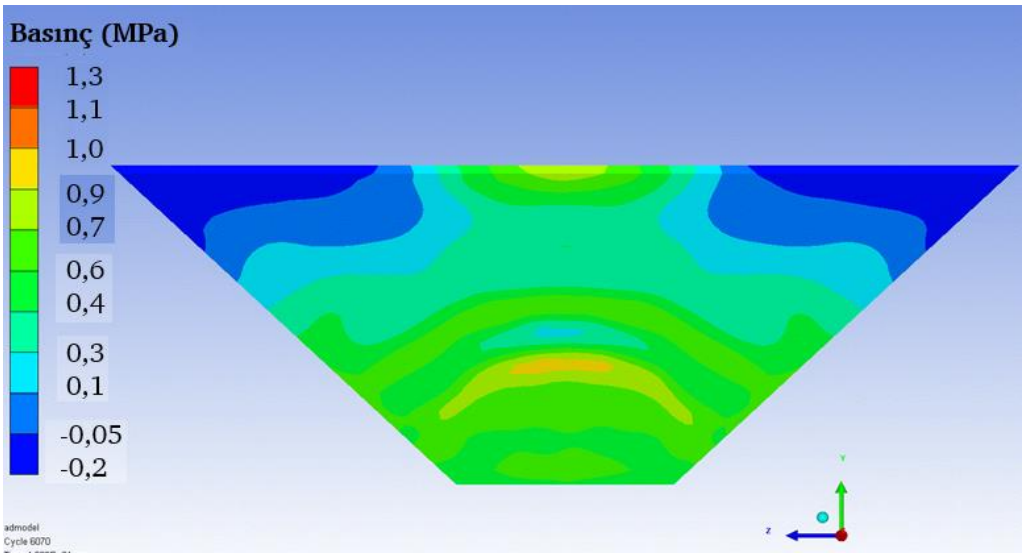
4.5.3 Patlama Modeli

Yapılan çalışmaya göre; patlayıcı malzemesi TNT olarak seçilmiş olup kullanılan kütle ise 13 ton'dur. Yapıya tatbik edilen TNT patlayıcının yerden 15 m yükseklikte konumlandırılmış olup baraj mansabına uzaklığı ise R = 20 m olarak alınmış ve patlayıcının tatbik süresi ise 40 ms olarak belirlenmiştir. Bu tip serbest hava patlamalarında infilak süreleri 100 milisaniye mertebelerine kadar çıkabilmektedir. Bilgisayar özelliklerine bağlı olarak, daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, daha detaylı sonuçlar almak için artırılabilir.

4.5.4 Bulgular ve İrdelemeler

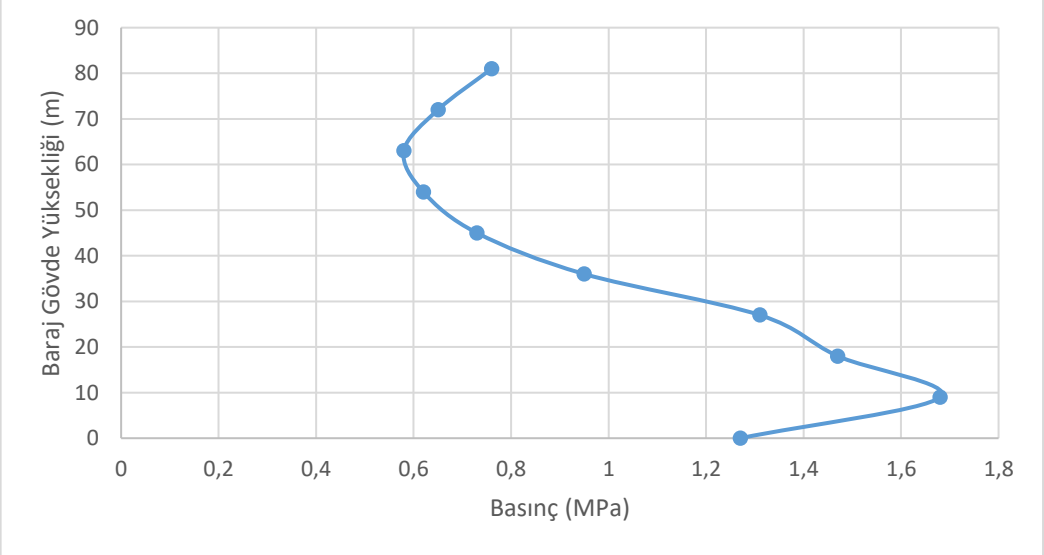
4.5.4.1 Patlama Basınçları

Patlama analizinin ardından beton gövde üzerinde oluşan basınç değerleri ölçü noktaları için elde edilmiştir. Şekil 4.62'de analiz sonucu baraj gövdesinde oluşan basınç kontur diyagramı görünmektedir. Diyagram üzerinde 2 ve 3 no'lu ölçü noktalarında sırasıyla 1,68 ve 1,47 MPa olarak basınç gerilmeleri elde edilmiş olup bu değerler beton üzerinde hasar oluşturacak kadar ciddi büyüklükte etki oluşturmamaktadır. Kret üst noktalarına doğru oluşan basınç değeri azalırken kret üst noktasında basınç değerleri en düşük değer olarak elde edilmiştir.

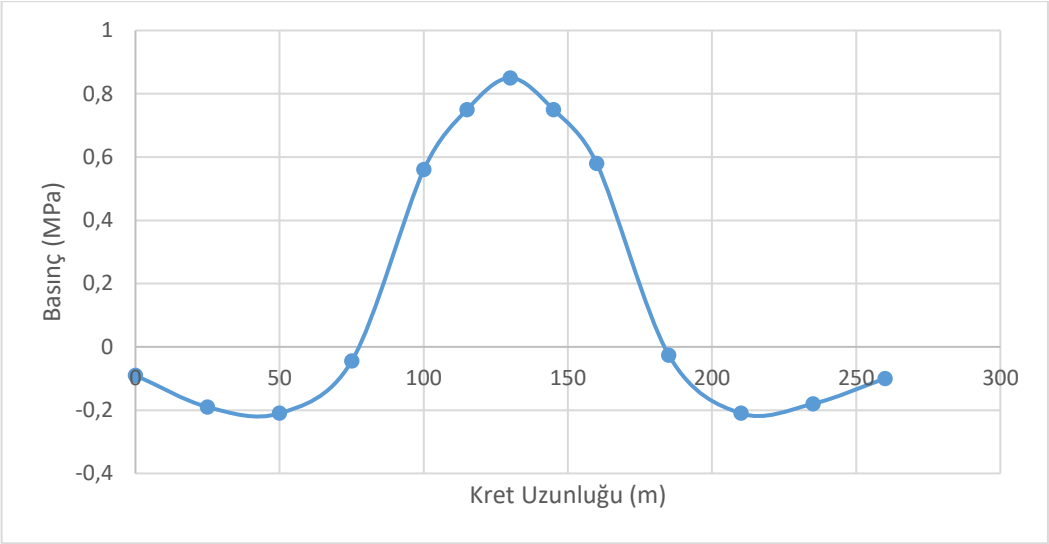


Şekil 4.62 Patlama analizi sonrası oluşan basınç diyagramı

Ölçü noktalarında oluşan basınç gerilmelerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 4.63'da kret uzunluğu boyunca değişimi ise Şekil 4.63'de verilmiştir. Şekil 4.64'e göre, 2 numaralı ölçü noktasında en yüksek basınç değeri elde edilirken, bu değerler kret noktasına doğru çıktıkça azalmaktadır. Bununla birlikte kret üst noktasında oluşan basınç değerleri ise simetrik dağılım göstermekte olup, vadi yamaçlarına yakın olan bölgelerde basınçlar negatif ve küçük değer almaktadır.



Şekil 4.63 Gövde yüksekliği boyunca etki eden basınç grafiği



Şekil 4.64 Kret genişliği boyunca etki eden basınç grafiği

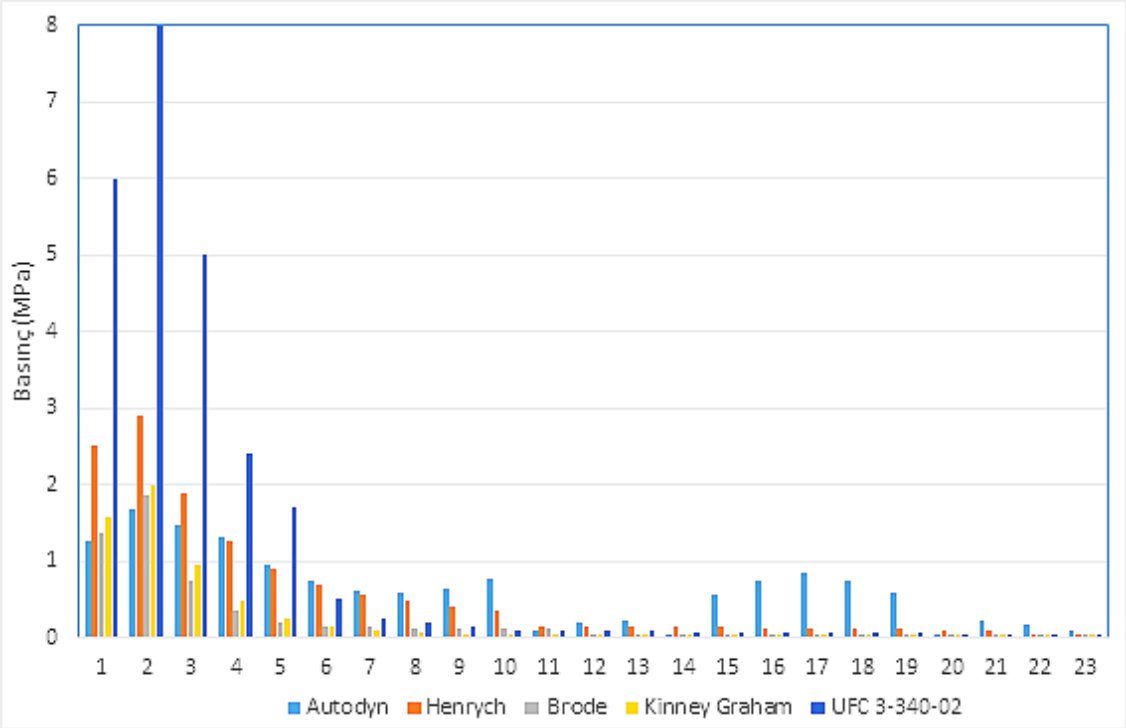
Analizden elde edilen en büyük patlama basınçlar Tablo 4.16'da listelenmiş olup ölçü noktalarına ilişkin ölçeklendirilmiş uzaklık (Z) değerlerine göre değerler verilmiştir. Tablo 4.16'da ayrıca ANSYS AUTODYN yazılımı tarafından üretilmiş en büyük basınç değerleri, araştırmacılar tarafından ampirik formasyona bağlı olarak üretilen değerler ve UFC-3-340-02 şablonlarından okunan değerler ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.16 Okuma noktalarında oluşan patlama basınçları (MPa)

Ölçü Noktaları	Autodyn	Henrych	Brode	Kinney Graham	UFC 3-340-02
1	1,27	2,52	1,37	1,58	6,0
2	1,68	2,91	1,87	1,98	8,0
3	1,47	1,88	0,73	0,96	5,0
4	1,31	1,27	0,34	0,47	2,4
5	0,95	0,90	0,20	0,24	1,7
6	0,73	0,69	0,15	0,14	0,5
7	0,62	0,55	0,13	0,09	0,25
8	0,58	0,47	0,12	0,06	0,2
9	0,65	0,40	0,11	0,05	0,13
10	0,76	0,35	0,11	0,04	0,09
11	0,09	0,14	0,11	0,04	0,09
12	0,19	0,14	0,03	0,04	0,08
13	0,21	0,14	0,03	0,04	0,08
14	0,045	0,14	0,03	0,03	0,07
15	0,56	0,14	0,03	0,03	0,07
16	0,75	0,12	0,03	0,03	0,07
17	0,85	0,12	0,03	0,03	0,07
18	0,75	0,11	0,02	0,02	0,06
19	0,58	0,11	0,02	0,02	0,06
20	0,026	0,10	0,02	0,02	0,04
21	0,21	0,10	0,02	0,02	0,04
22	0,18	0,02	0,02	0,02	0,02
23	0,1	0,02	0,02	0,02	0,02

Tablo 4.16'da ANSYS AUTODYN yazılımından alınan değerler, UFC-3-340-02 şablonlarından okunan değerler ve Z (ölçeklendirilmiş uzaklık) değerine göre ampirik formüller ile üretilen değerler listelenmiştir. Tablonun anlam

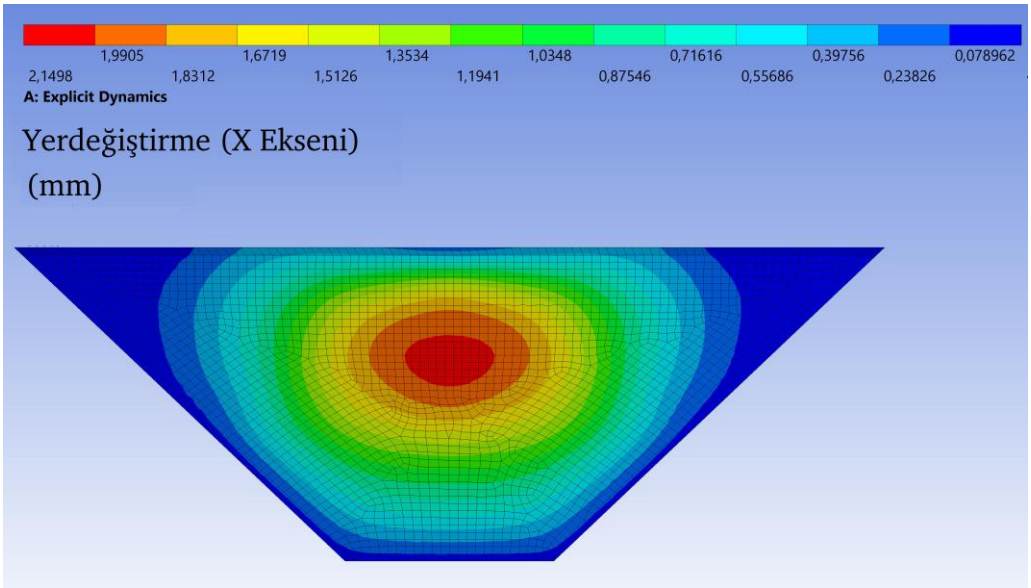
kazanabilmesi için Şekil 4.65'daki grafiğe dönüştürülmüş olup, bu grafiğe göre; ilk 3 nokta için; UFC-3-340-02 değerleri yüksek sonuç vermekte ve diğer değerlerle benzerlik göstermemektedir. 4:23 noktalarında ise sonuçlar benzerlik göstermekte olup yalnızca kret üst noktasında ANSYS AUTODYN yazılımından elde edilen sonuçlar yüksek değer vermekte olup yine de sonuçlar arası farkın yüksek olmadığını söylemek doğru olacaktır.



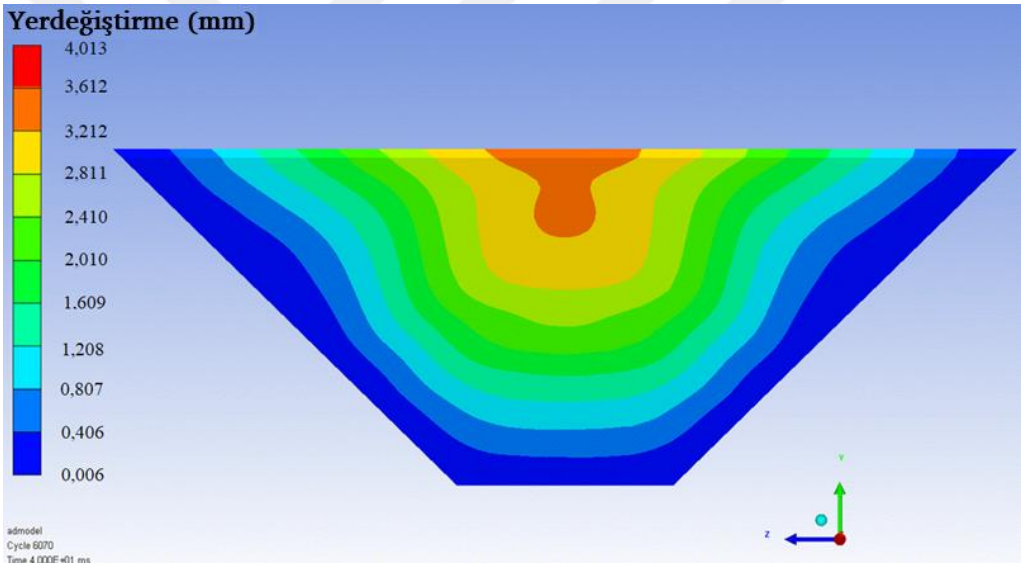
Şekil 4.65 Okuma noktaları, basınç gerilmelerinin karşılaştırmalı grafiği

4.5.4.2 Yerdeğiştirmeler

Su kütlesinin etkisiyle oluşan hidrostatik gerilme ve baraj gövdesine etki eden patlama yükünün etkisiyle oluşan yerdeğiştirmeler ise ayrı ayrı Şekil 4.66 ve Şekil 4.67 diyagramları üzerinde görülmektedir.

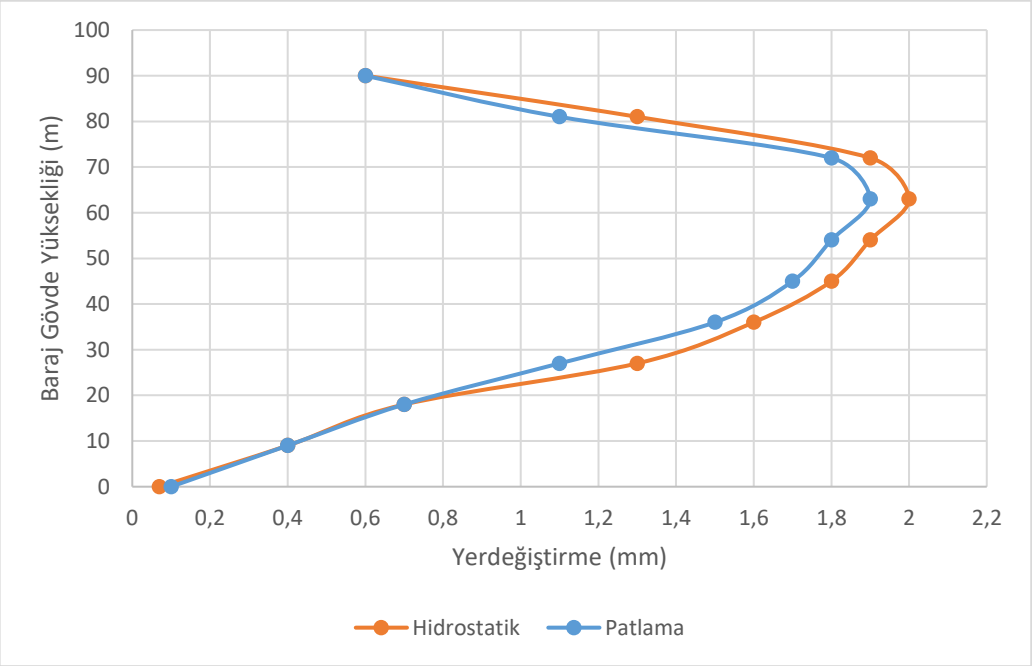


Şekil 4.66 Hidrostatik etki altında oluşan yerdeğiştirme diyagramı

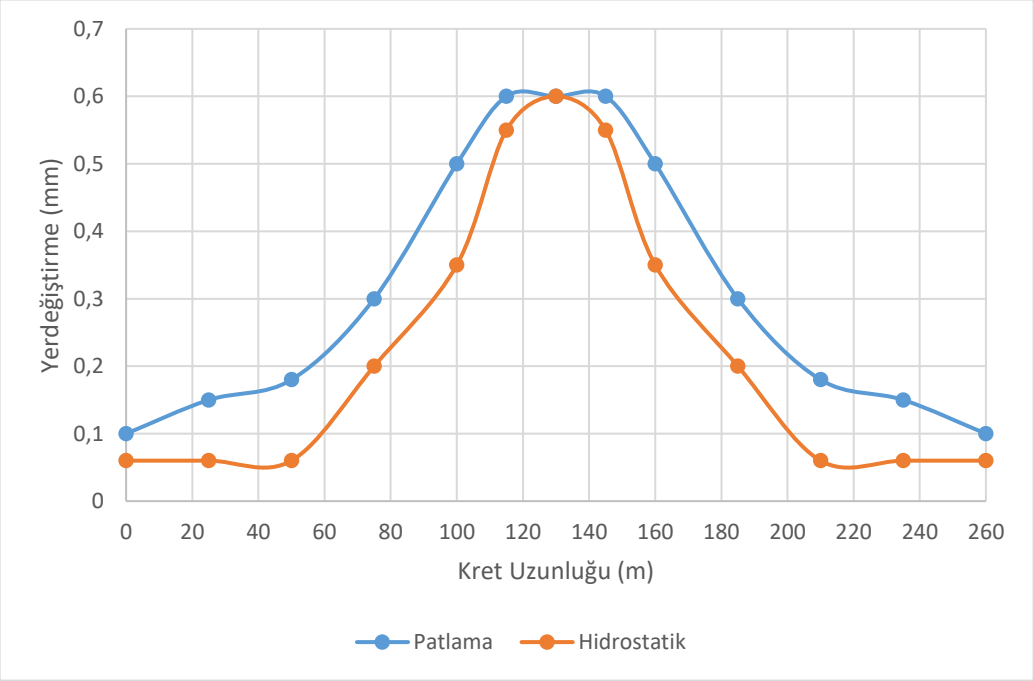


Şekil 4.67 Hidrostatik ve patlama etkisi altındaki yerdeğiştirme diyagramı

Buna göre hidrostatik ve patlama etkisi altında oluşan yer değiştirme diyagramı sırasıyla ANSYS ve AUTODYN yazılımları bilgisayar analizleri sonucu ile elde edilmiştir. Patlama analizi sonucunda oluşan en büyük ve en küçük değerler kontur diyagramı üzerinde renkler ile ayırt edilmekte olup buna göre baraj gövdesinin tepe noktasına doğru yerdeğiştirmelerin artmaya başladığı ve 55. – 60. m yükseklikte yerdeğiştirmenin en büyük değerine ulaştığı, ardından tekrar azalma eğiliminde olduğu görülmektedir



Şekil 4.68 Gövde yüksekliği boyunca oluşan yerdeğiştirme grafiği



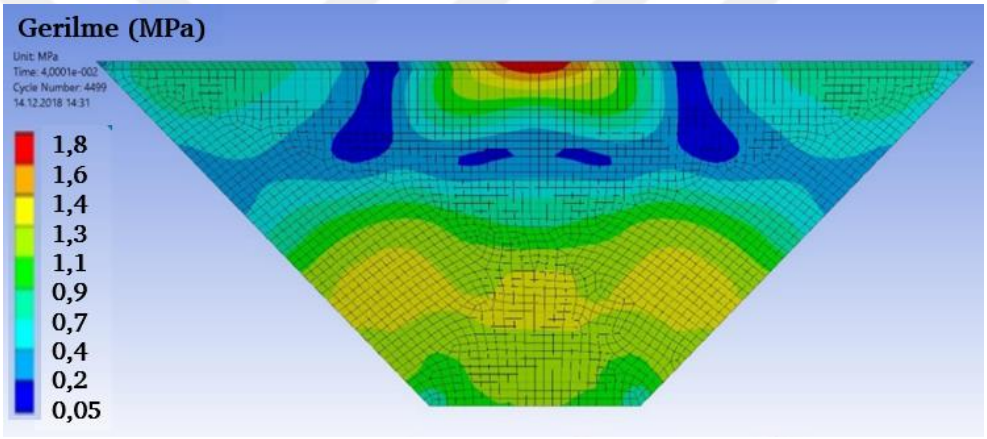
Şekil 4.69 Kret uzunluğu boyunca oluşan yerdeğiştirme grafiği

Şekil 4.68 ve 4.69'de görüleceği üzere; Workbench Software'dan alınan diyagram (yalnızca hidrostatik etki) ile ANSYS AUTODYN yazılımından alınan diyagram (patlama ve hidrostatik etki) sonuçları grafiğe aktarılmış olup gövde yüksekliği boyunca oluşan yerdeğiştirmeler ile kret genişliği boyunca oluşan

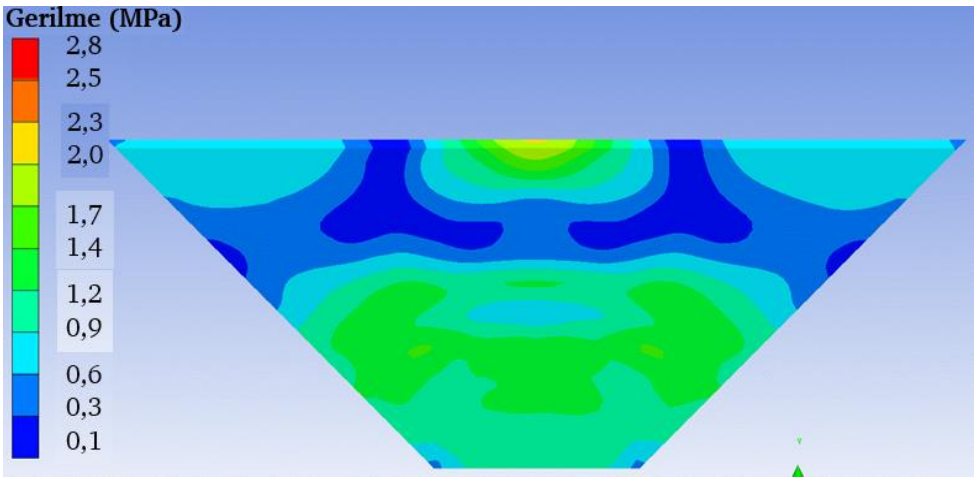
yerdeğiştirmelerden görüleceği üzere patlama etkisi ile oluşan eğri ve hidrostatik etkisi ile oluşan eğri arasındaki fark gövde yüksekliği boyunca büyük değişim göstermediği, yalnızca tepe noktasında hidrostatik etkiden dolayı oluşan yerdeğiştirmenin azalarak arttığı görülmekte, patlama etkisinin eğrisi ise doğrusala yakın artış göstermektedir. Diğer yandan kret üst noktasında oluşan yatay şekil değiştirme grafiği incelendiğinde; hem hidrostatik etki altında oluşan şekil değiştirme eğrisi, hem de patlama yükü etkisi altında oluşan eğrinin simetrik etki gösterdiği görülmektedir.

4.5.4.3 Gerilmeler

Baraj gövdesinde meydana gelen şekil değiştirmeler, hidrostatik ve patlama yükü etkisi altında ayrı ayrı incelenerek sonuçlar diyagram üzerine aktarılmıştır.

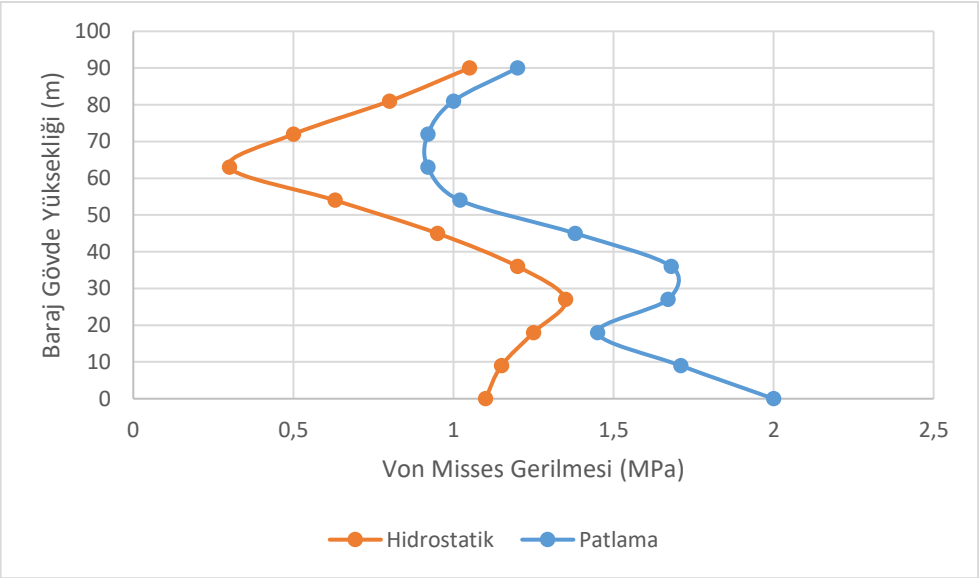


Şekil 4.70 Hidrostatik etki altında oluşan gerilme diyagramı

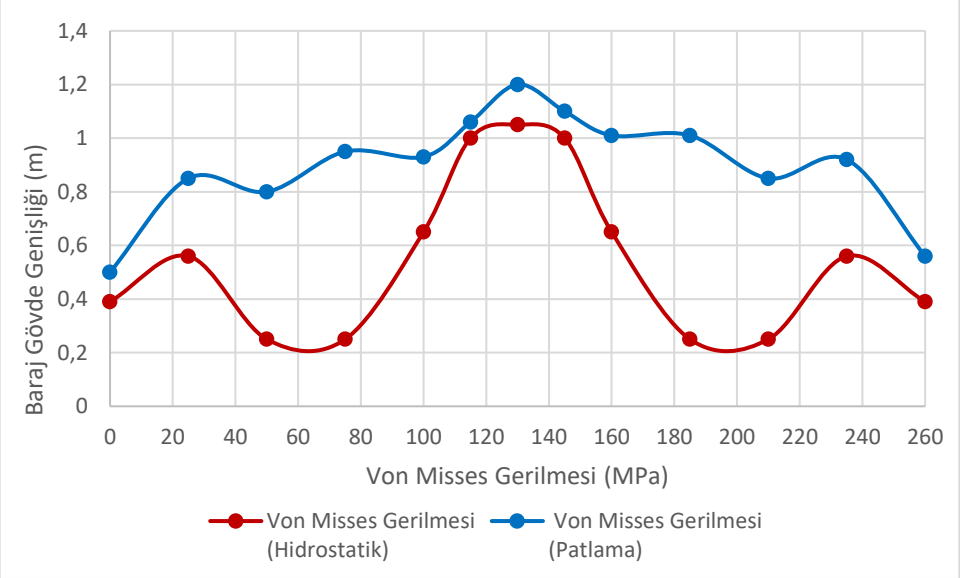


Şekil 4.71 Hidrostatik etki ve patlama etkisi altında oluşan gerilme diyagramı

Şekil 4.70 ve 4.71 ye göre hidrostatik ve patlama etkisi altında oluşan von-misses diyagramı sırasıyla ANSYS ve AUTODYN yazılımları ile elde edilmiş olup patlama analizi sonucunda oluşan en büyük ve en küçük değerler kontur diyagramı üzerinde renkler ile ayırt edilmektedir, buna göre bu değerlerin grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 4.72 Gövde yüksekliği boyunca oluşan gerilme grafiği



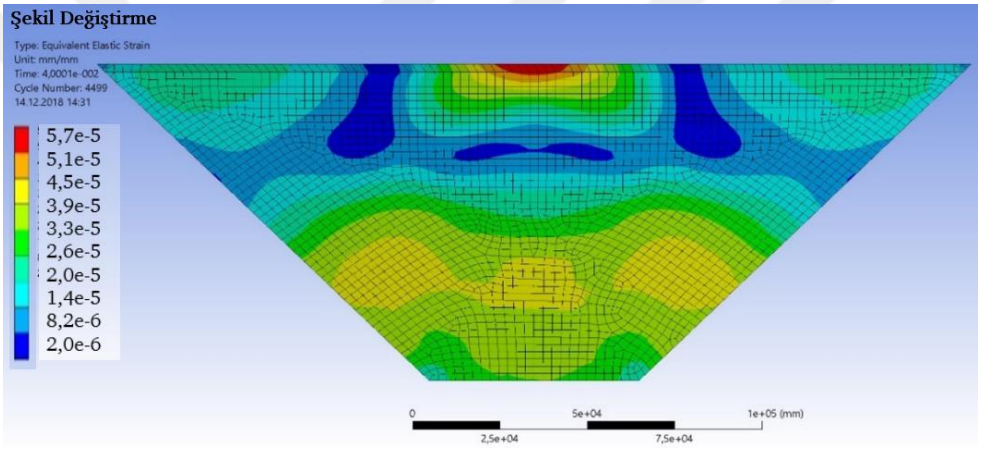
Şekil 4.73 Kret uzunluğu boyunca oluşan gerilme grafiği

Grafiğe aktarılan değerler; Şekil 4.72 ve 4.73'de görüleceği üzere, gövde yüksekliği boyunca alt noktalarda en büyük gerilme göze çarparken, kret üst

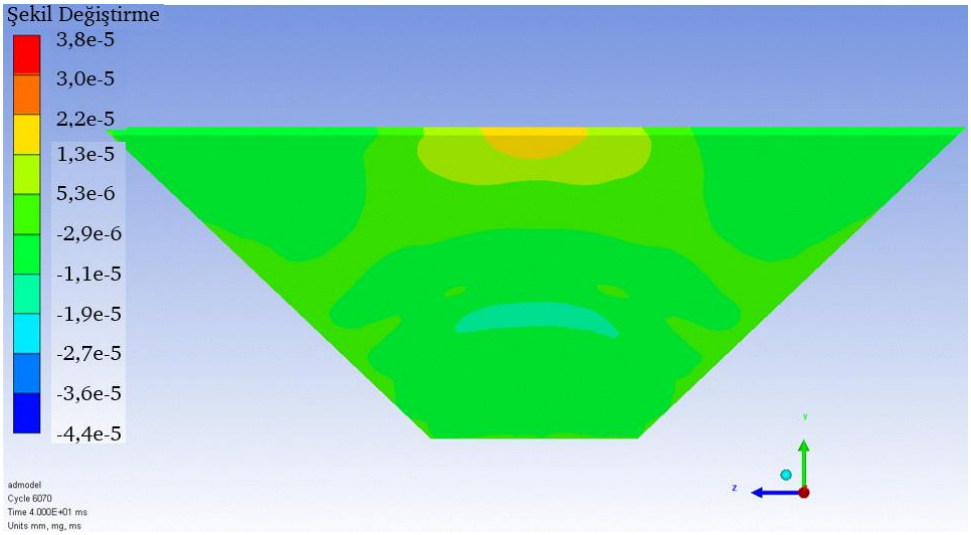
noktasında oluşan yatay yönde gerilmelerin ise simetrik olduğu ve orta noktada en büyük değere ulaştığı görülmektedir.

4.5.4.4 Şekil Değiştirme

Sonlu eleman modeli üzerinde oluşan şekil değiştirmeler incelendiğinde ise; hem hidrostatik etki altında oluşan diyagram (Şekil 4.74), hem de patlayıcı yük etkisiyle oluşan diyagramda (Şekil 4.75); en büyük değerlerin kret üst noktasında oluştuğu görülmektedir. Diyagramlar incelendiğinde ise; en küçük ve en büyük bölgeler şekil değiştirme diyagramı ile benzerlik göstermekte olup şekil değiştirmelerden de anlaşılacağı üzere, basınç etkisi altında olduğu gibi gövdenin hasar almayacak kadar değişimler göze çarpmaktadır.



Şekil 4.74 Hidrostatik etki altında oluşan şekil değiştirme diyagramı



Şekil 4.75 Hidrostatik ve patlama etkisi altında oluşan şekil değiştirme diyagramı

4.5.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada; beton ağırlık barajlara örnek olarak seçilen beton ağırlık barajının patlama yükü karşısında yapısal davranışı araştırılmış olup, sonlu eleman modeli üzerinde simülasyon yapılmıştır. Sonlu eleman sistemin hidrostatik gerilme ve patlama gerilmeleri altında davranışı incelenmiştir. Patlama yükü 13 ton TNT patlayıcının beton gövdeye 23 m uzaklıkta yapı üzerinde oluşan basınç, yerdeğiştirme ve gerilme etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın ardından elde edilen bulgular ve sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- Artan mesafe ve patlayıcı kütlesi ölçeklenmiş uzaklık (Z) mesafesinin parametreleri olup patlama yükünü doğrudan etkiler.
- AUTODYN analizinden elde edilen patlama basınçları, ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Sadece UFC'nin küçük Z değerleri farklılık göstermekte olup, yüksek sonuç vermiştir.
- Gerek ANSYS AUTODYN yazılımı gerekse UFC-3-340-02 [1] ve ampirik sonuçlara göre, gövdeye etkiyen yükler yapıya hasar vermediği veya yapıda kırılma oluşturmadığı gözlemlenmiştir.
- Hidrostatik yük ve patlama yükü altında oluşan gerilmeler ve yerdeğiştirmeler gövde yüksekliği boyunca düşey ve kret genişliği boyunca yatay olarak incelendiğinde, eğriler arasında fark sabit olup kret uzunluğu doğrultusunda eğrilerin simetrik uluştuğu görülmektedir.
- Şekil değiştirme diyagramı, yerdeğiştirme diyagramı ile örtüşmekte olup en küçük ve en büyük değerlerin oluştuğu bölgeler benzerlik göstermektedir.
- Yalnızca UFC-3-340-02 sonuçlarına göre düşük Z değerlerinde basınçlar diğer sonuçlara nazaran yüksek sonuç verdiği görülmektedir.

Barajlar gibi stratejik öneme sahip yapılarının tasarımı titizlikle yapılmalıdır. Barajlar, inşa amacı olarak çok yüksek miktarda su tutmaları ile birlikte bakım ve onarım süreçleri de kritik öneme sahiptir. Patlama etkisinin barajlarda oluşturması muhtemel kısmi veya bütünsel hasar, barajın yıkılmasına ve depoladığı yüksek hacimli su, çevresel olarak çok büyük can ve mal kaybına yol açabilir.

4.6 Beş Katlı Betonarme Bina Modeli

Dünya üzerinde: bina, yaşam alanları, hastaneler, ticari yapılar ve askeri yapılar gibi mühendislik yapıları; gerek terörizm saldırısı, gerek doğalgaz vb. patlaması ve gerekse meydana gelen kazalardan dolayı oluşan patlamalardan dolayı daima tehdit altında oldukları bir gerçektir. Verilen örnekte Paris kentinde meydana gelen bir doğalgaz patlamasının çok katlı bir yapıda meydana getirdiği yıkıcı etkiler gösterilmiştir (Şekil 4.76). Ancak bu çalışmada, çok katlı binanın patlama etkisi kapşısındaki davranışını inceleyebilmek amacıyla, literatüre uygun olarak doğalgaz yerine eşdeğer olarak TNT tipi patlayıcı kullanılmıştır. Bu sebeplerden ötürü bu tez çalışmasında 2. kez bina modeli çalışılarak analizleri yapılmış olup bu defa farklı bir yöntem üzerinde çalışılmıştır. Çalışılan çok katlı binanın kontrollü yıkımı üzerine çalışma yapılmıştır.

4.6.1 Beş Katlı Betonarme Bina ve Sonlu Eleman Modeli

Hazırlanan bina modeli; 2 farklı patlama durumu altında incelenmiştir. Her iki patlama modelinde de toplamı eşit kütleye sahip birden fazla TNT patlayıcı kullanılmıştır, ancak 1. Patlama Modelinde patlayıcı 8 parça halinde, 8 dış kolona bağlanmıştır.

2. Patlama Modelinde ise aynı patlayıcı kütlesi, 5 parça halinde ve bu kez 4 adet iç kolona ve asansör boşluğunu çevreleyen betonarme perde duvarlarının tam ortasına yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise (basınç, yerdeğiştirme, gerilme ve hasar durumu) grafik üzerinde karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bu kısmında, beş katli betonarme bir bina seçilmiş ve 2 farklı patlama durumu altında oluşan etkiler araştırılmıştır. ANSYS Workbench Software, açık yöntem (Explicit Dynamics) ile hazırlanan sonlu eleman modeli ve ANSYS AUTODYN yazılımı ile patlayıcı analizi hazırlanan betonarme bina zemin katındaki kolonların altına yerleştirilen çok sayıdaki patlayıcıya karşı yapının bütün olarak nasıl davrandığı araştırılmıştır.



Şekil 4.76 Patlama etkisine maruz kalmış bir yapı [135]

Sistemin modellenmesinde beton malzeme C35; donatı B420C; duvar dolgu duvar ve pencereler ise float glass olarak seçilmiştir. Bu kabullere göre malzeme özellikleri ise Tablo 4.17'de verilmektedir.

ANSYS yazılımı üzerinde malzeme tanımı yapılırken: Beton malzemede, *RHT Concrete* beton modeli kullanılmış olup kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Donatı çeliği modelinde, Johnson Cook modeli kullanılmış olup kırılma modeli olarak ise *Plastic Strain* kriteri kullanılmıştır. Dolgu duvar olarak ise, Drucker-Prager ve Lineer EOS kriterleri kullanılarak modelleme yapılmıştır.

Yapıya yapılan ölü ve hareketli yükler ise; ilgili yönetmelik ve TS-500(2000) standartları çerçevesinde yapılmış olup, hareketli yük için, döşemeye KPa büyüklüğünde basınç etki ettirilmiştir.

Bu çalışmada binaya, patlama yükünün yanında döşemelere 2,5 kN/m^2 olacak şekilde hareketli yük de etki ettirilmiştir.

Tablo 4.17 Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Beton	C35	$3,3 \times 10^4$	2,45	35	3,5
Donatı	B420C	$2,1 \times 10^5$	7,83	420	420
Duvar	Dolgu	$7,8 \times 10^3$	1,00	5	0,5
Pencere	Cam	$4,5 \times 10^4$	2,20	-	-
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlayıcı	TNT	-	1,63	-	-

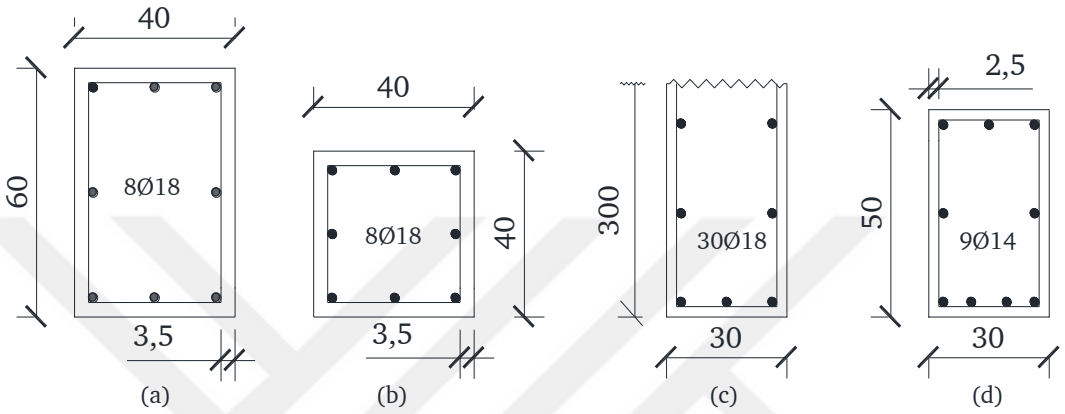
Buna göre beş katlı betonarme bina; köşe ve iç kısımlarında toplam 8 adet 60×40 cm ile kenar ve iç kısımlarda toplam 16 adet 40×40 cm olmak üzere toplam 24 adet kolon bulunmakta olup kirişler ise 50×30 cm boyutundadır. Döşemeler 12 cm olarak seçilmiştir. Ayrıca merdiven boşluğunun çevresi ise 3 adet 300×30 cm ebadında perde bulunmaktadır. Buna ek olarak tüm binanın dış cephesi ise dolgu duvar ile kaplı olup duvarların ortasında 120×120 cm'lik pencere ve bina girişinde ise 120×200 cm'lik kapı bulunmaktadır.

Bina beş katlı betonarme yapı olarak tasarlanmış olup kat yükseklikleri 300 cm, akslar arası açıklık ise 400 cm olup yapının temeli ise 50 cm kalınlıkta radye temeldir. Binanın tam ortasında, temelden en üst kata kadar merdiven boşluğu bulunmakta olup bu açıklığın ebadı ise 400×400 cm'dir.

Boyuna donatı; 60×40 kolonlarda 8Ø18, 40×40 kolonlarda 8Ø18 ve 300×300 betonarme perde 30Ø18 olup etriye ise 8Ø8 seçilmiştir. Etriyeler ise her iki kolon için Ø8/20 cm aralıklı olarak tasarlanmış olup kolon – kiriş bağlantı noktaları çevresinde ise Ø8/20 aralıklıdır. Kirişler ise 50×30 ebatlarında olup; çekme donatısı 5 Ø16 ve basınç donatısı 3 Ø12 olup etriye aralığı Ø8/20 olarak modellenmiştir. Döşemede; kalınlık 12 cm seçilmiş olup donatı ise Ø12/20 cm olarak tasarlanmıştır. Radye temel ise 21×13 m ebatlarında olup kalınlığı 0,5 m seçilmiştir. Duvarlar; dolgu duvar olarak 20 cm kalınlığında tasarlanmıştır.

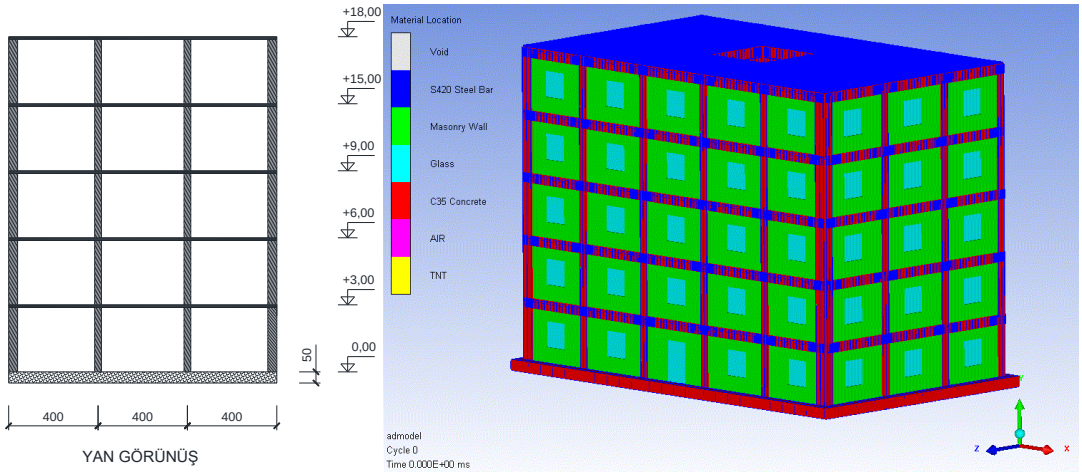
Pencereler ve kapı ise cam olarak modellenmiş olup kalınlığı 1 cm olarak dikkate alınmıştır. Hava yayılımını gözlemlemek için merdiven boşluğu birikilmiştir.

Binanın taşıyıcı sistemi kolon, perde ve kirişlerden oluşan çerçeve sistem olup; sırasıyla 60×40 kolon, 40×40 kolon, 300×30 perde ve 50×30 kirişe ait donatı düzeni Şekil 4.77'de verilmektedir.



Şekil 4.77 Betonarme kolon, perde ve kirişlere ait kesit detayları

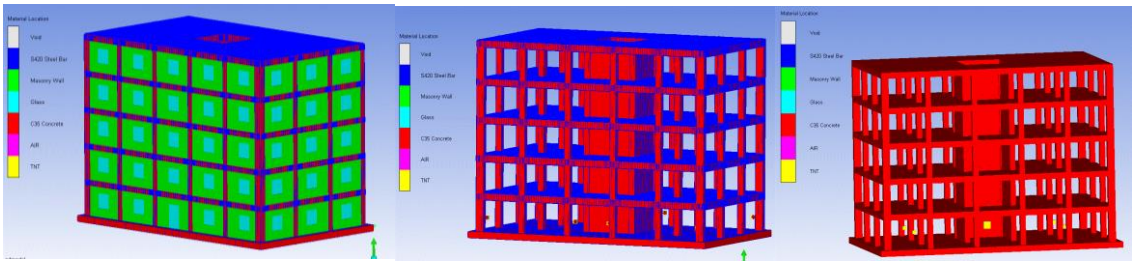
Söz konusu bina, betonarme taşıyıcı sisteme sahip olup, bir yönde üç açıklığa, diğer yönde ise beş açıklığa sahip olup; duvar, cam ve perde modeliyle birlikte dikkate alınmıştır. Söz konusu binaya ait geometrik boyutlar Şekil 4.78-a'da ve oluşturulan Sonlu eleman modeli ise Şekil 4.78-b'de görülmektedir.



a) b)

Şekil 4.78 Beş katlı binaya ait; a) Boyutları, b) Sonlu eleman modeli

Bu kabullere göre oluşturulan binanın üç boyutlu sonlu eleman modeli ve iki farklı model olarak tasarlanan TNT patlayıcıların konumlandırması Şekil 4.79 (a ve b) üzerinde gösterilmekte olup, toplam patlayıcı kütlesi ve Y koordinatları değişmemek üzere, yalnızca binanın giriş katında bulunan analitik konumları değiştirilmiştir.



a) b) c)

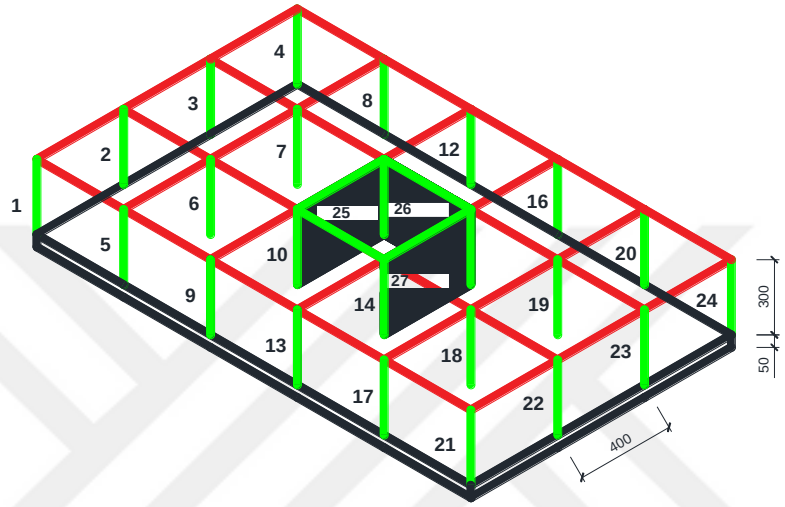
Şekil 4.79 Beş katlı bina modeline ait; a) Sonlu eleman modeli, b) 1. patlama durumu ve patlayıcıların yeri, c) 2. patlama durumu ve patlayıcıların yeri

Patlayıcı model tasarımına göre; katı model Lagrangian Model teorisine göre tasarlanmış olup yapıya ait sonlu eleman modeli ANSYS Workbench Software, Explicit Dynamics Modülü ile hazırlanmış olup mesh aralığı 2 m olarak seçilmiştir. Dış cephe duvarlar ile çerçeve sistem arasındaki bağlantı (harç) 2 MPa normal gerilme limitine ve 1 Mpa kesme gerilmesi limitine göre modellenmiştir. Patlama yüklerinin modellendiği ANSYS AUTODYN yazılımında ise hava akımı Eulerian Model teorisine göre modellenmiş olup mesh aralığı 0,3 m olarak seçilmiştir. Eulerian modelde; hava modeli, katı modeli içine alacak şekilde dikdörtgenler prizması geometrisi olarak modellenmiştir. Bu modele göre bu geometri; 27000×21000×18000 (mm) (i.j.k) ve 300 mm mesh aralığı hesabından yola çıkarak 90×70×60 (i.j.k) adet hücreye bölünmüş olup 1 hücre 300×300×300 mm. Burada patlayıcı malzeme hücreler arasına yerleştirilmiştir.

Hazırlanan modelde TNT patlayıcılar, zemin katta bulunan toplam kolonların (mesh ölçülerinin izin verdiği kadar) yanına yerleştirilmiş olup her bir patlayıcı; 0,3×0,3×0,3 = 0,027 m^3 hacim ve yoğunluğun 1630 kg/m^3 olduğu kabulü ile yaklaşık 44 kg olarak hesaplanmış, toplamda 8×44 kg = 352 kg TNT kullanılmıştır.

4.6.2 Okuma Noktaları

Zemin katta bulunan toplan 24 adet kolon ve 3 adet betonarme perde duvarın; patlama etkisi altında, vermiş olduğu tepkiler (basınç, gerilme, yerdeğiştirme ve hasar durumu) ölçülerek grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Şekil 4.80'de görüldüğü üzere, zemin katta bulunan her bir kolona ve betonarme perde duvara tek tek numara verilmiştir. Toplam 27 adet eleman davranışı incelenmiştir.



Şekil 4.80 Kolon noktalarının konumlarını gösteren çizim

4.6.3 Patlama Modelleri

1. Patlama Modelinde; toplam 352 kg TNT patlayıcı kullanılmış olup bu patlayıcı 8 parça olarak (8×44 kg = 352 kg TNT); 1, 4, 9, 12, 13, 16, 21 ve 24 nolu kolonlara (yani zemin katta bulunun dış kolonlara) bitişik olarak hazırlanmıştır.

2. Patlama Modelinde ise; yine 352 kg TNT patlayıcı kullanılmıştır. Ancak bu defa TNT patlayıcı (4×44 kg + 1×176 kg = 352 kg TNT); 6, 7, 18 ve 19 no'lu toplam 4 kolon olmak üzere her bir kolona bitişik olarak 44 kg ve betonarme perde duvarların tam ortasına ise 176 kg yerleştirilmiştir.

Bu çalışmaya ilişkin önce yapının, ölü ve hareketli yükler altındaki davranışının belirlenmesi hedeflenmiş olup bu analizin ardından patlayıcı yükler altındaki davranışının anlaşılabilmesi için 2 patlama analizi yapılmıştır.

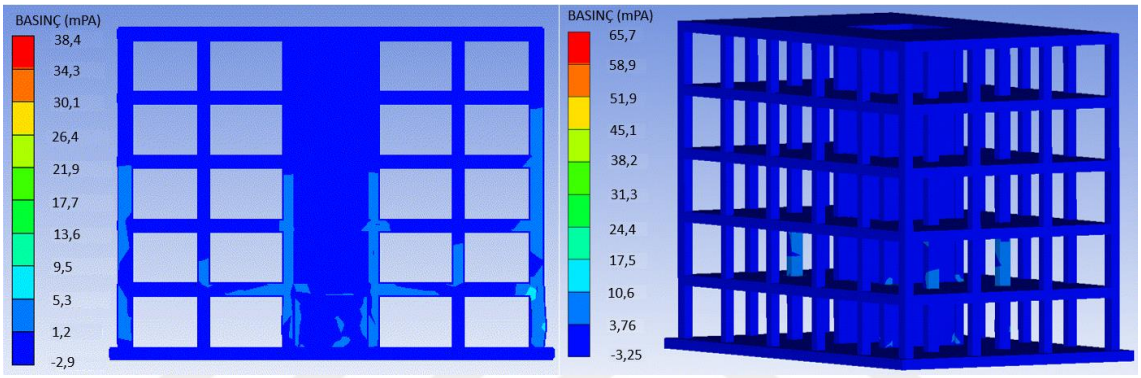
Analizler için 3 milisaniye patlama süresi ayarlanmış olup bilgisayar özelliklerine bağlı olarak daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, daha detaylı sonuçlar almak için artırılabilir.

Yapı 5 katlı olarak modellendiğinden dolayı, zemin katta bulunan kolonların araştırılması, yapının güvenli servis ömrü vermesi açısından doğru bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir.

4.6.4 Bulgular ve İrdelemeler

4.6.4.1 Patlama Basınçları

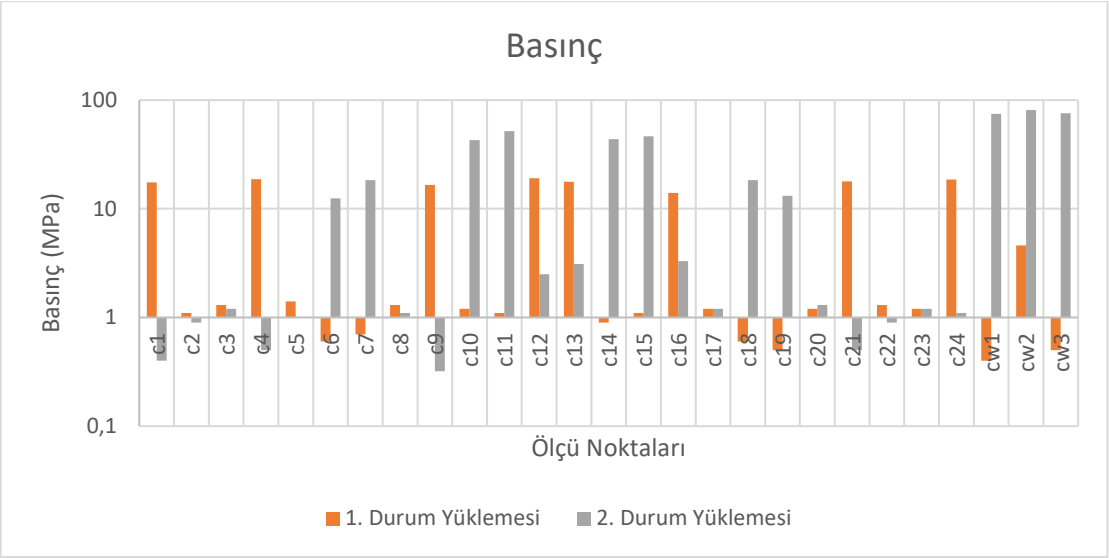
Taşıyıcı sisteme etki eden patlama yükleri incelenecek olursa, sistem üzerine gelen patlama basıncının diyagramı (Şekil 4.81) ve ölçü noktalarına gelen basıncın grafik olarak dağılımı (Şekil 4.82) gösterilmiştir.



a) b)

Şekil 4.81 Sonlu eleman modeli ve taşıyıcı sistem üzerinde oluşan basınç (MPa) diyagramı; a) 1. durum patlama analizi, b) 2. durum patlama analizi

Kontur diyagramları (Şekil 4.79) ve grafik (Şekil 4.80) incelendiğinde, 1. Patlama Durumuna göre; patlayıcının etki ettiği dış kolonlara (1, 4, 9, 12, 13, 16, 21 ve 24 nolu kolonlar) gelen basınç yükünün 18 MPa mertebesine kadar çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte döşeme ve kirişlere ise 3 MPa mertebelerinde ancak -Y yönünde basınç yükü etki etmektedir ki bu yönde gelen basınç kiriş için yıkıcı etki yapabilir.



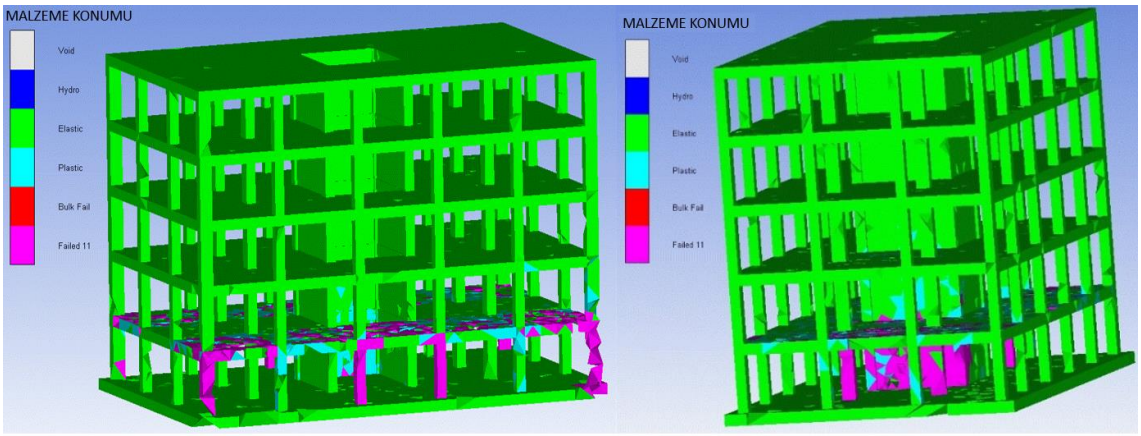
Şekil 4.82 Sırasıyla, 1. durum patlama analizi ve 2. durum patlama analizi sonrası taşıyıcı sistem üzerinde oluşan basınç değerleri

2. Patlama Durumuna göre ise; iç kolonlara (6, 7, 18 ve 19 nolu kolonlar) gelen basınç yükleri yine aynı şekilde 18 MPa mertebesine çıkmakla birlikte merdiven boşluğunun çevresinde ki kolonlarda (10, 11, 14 ve 15 nolu kolonlarda) 40 MPa mertebesine, betonarme perdelerde (25, 26 ve 27 nolu betonarme perdeler) ise 75 MPa seviyesine çıktığı gözlemlenmiştir.

2. Patlama durumunda etkiyen basınç durumunun daha yüksek olduğu gözlemlenmiş olup yapının daha yüksek değerde basınca maruz kaldığı görülmüştür.

4.6.4.2 Hasar Durumu

Yapının patlama etkisi ile beraber aldığı hasar yüzdeleri ve taşıyıcı malzemenin elastik-plastik davranışı üzerinden değerlendirme yapılmış olup ortaya çıkan kontur diyagramları (Şekil 4.83) incelenmiştir. Her iki analizine göre de; kolonların %100 oranında hasar aldığı, kirişlerin aldığı hasarın ise %60 - %70 arasında olduğu görülebilir ayrıca döşemelerde ise kısmi kırılmalar göze çarpmaktadır.



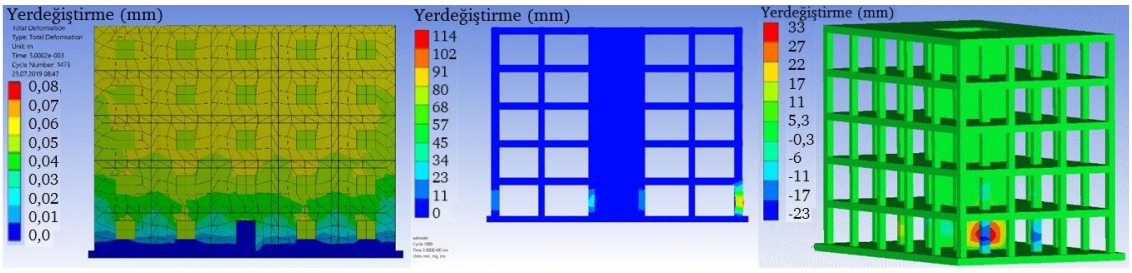
a) b)

Şekil 4.83 Sonlu eleman modeli ve taşıyıcı sistem üzerinde oluşan hasar durum diyagramı; a) 1. durum patlama analizi, b) 2. durum patlama analizi

Bununla birlikte yapının elastik – plastik davranışı incelendiğinde ise kolonların tamamen parçalandığı, kirişlerin ise kısmen parçalandığı ve parçalanmayan kısımların ise plastik davrandığı, merdiven boşluğunun çevresindeki perde kolonun ise 1. Patlama durumunda kısmi olarak plastik davrandığı ve 2. Patlama Durumunda ise tamamen parçalanarak taşıma kapasitesini kaybettiği görülmektedir. Üst katlarda ise hasar oluşumu neredeyse görülmemekte olup bölgesel plastik davranış gözlemlenen elamanlar olsa da elastik davrandığı görülebilir.

4.6.4.3 Yerdeğiştirmeler

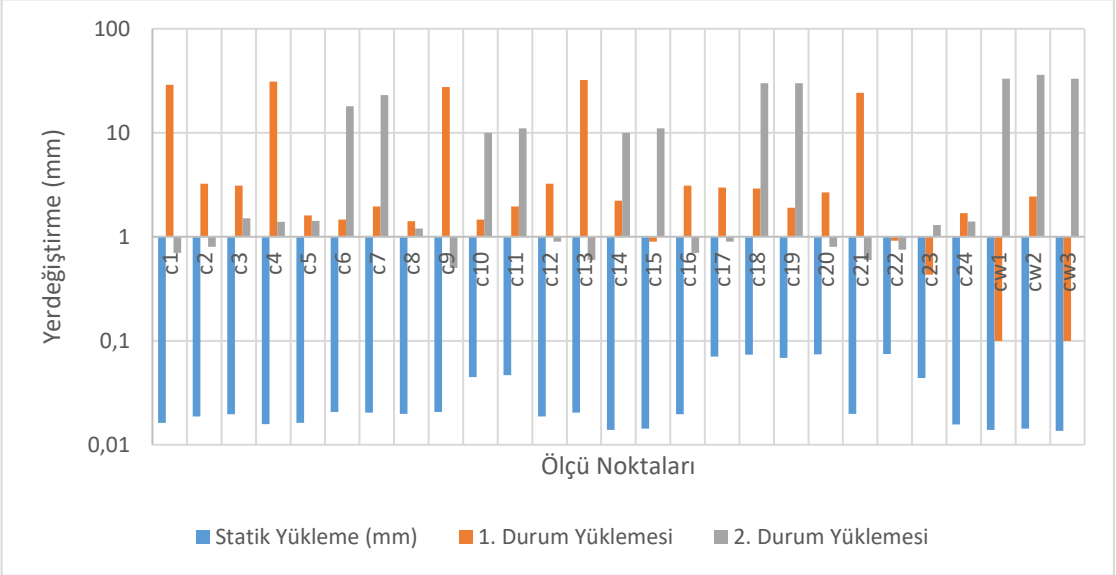
Yapılan bu analizlerin ardından, taşıyıcı sistemde oluşan gerilmeler, yerdeğiştirmeler ve basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre oluşan yerdeğiştirmeler, kontur diyagramları ile gösteriliştir. (Şekil 4.84)



a) b) c)

Şekil 4.84 Sonlu eleman modeli ve taşıyıcı sistem üzerinde oluşan yerdeğiştirmeler; a) Statik analiz, b) 1. patlama durumu, c) 2. patlama durumu

Şekil 4.85'deki grafik üzerindeki karşılaştırmalı yerdeğiştirme grafiğinden görüleceği üzere: statik analizde, yani sadece ölü yük ve hareketli yük altında iken yerdeğiştirmeler yatay doğrultuda 0,05 mm – 0,02 mm mertebesinde değişirken, 1 Patlama Durumu ve 2. Patlama Durumu sonrası patlayıcıya yakın kolonlar üzerinde 25 mm – 30 mm mertebesinde iken; 2. Patlama Durumunda ise betonarme perde duvarlarda ise TNT patlayıcı kütlesinin büyüklüğünün etkisi ile yerdeğiştirme değeri 35 mm değerinin üzerine çıktığı görülmüştür ki, bu temel kolonlarının plastik bölgede hatta bazı kolonların ise kırıldığı ve hasar aldığı anlamına gelmektedir. Temel kolonlarında meydana gelebilecek hasar ve bu hasara bağlı olarak yük taşıma kapasitesinin plastik bölgeye geçmesi Zemin katında büyük hasara, hatta temel katının üstte yer alan 4 katı düşündüğümüzde ise, çökmesine, bu da tüm yapının çökmesine yol açabilir.

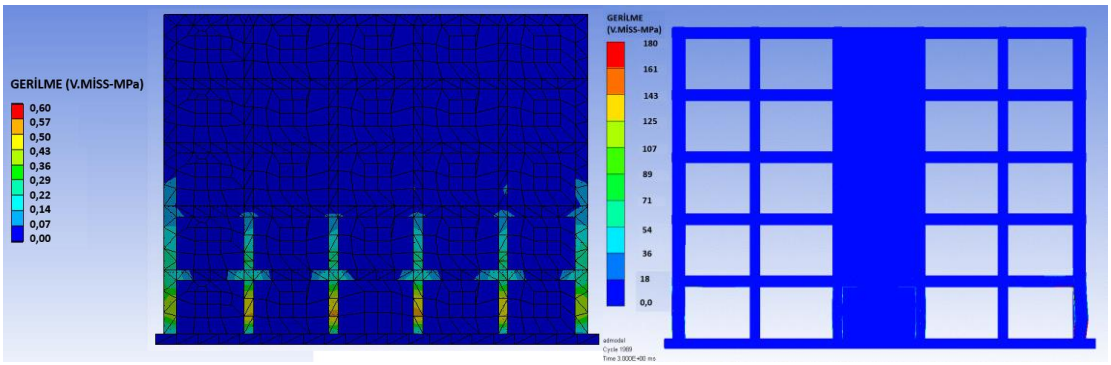


Şekil 4.85 Statik analiz, 1. patlama durumu ve 2. patlama durumunda oluşan yerdeğiştirme değerleri

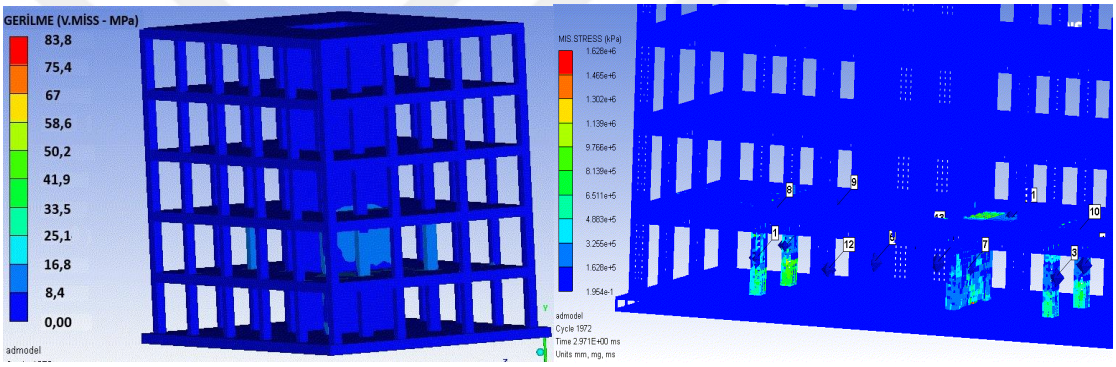
4.6.4.4 Gerilmeler

Yapının ana çerçevesindeki taşıyıcı sistem elemanlarında oluşan gerilmeler kontur diyagramları üzerinde (von-mises) incelendiğinde (Şekil 4.86) ise, patlama analizleri sonrasında zemin kat taşıyıcı sisteminde oluşan gerilmeler ve oluşan hasara bağlı olarak üst katta meydana gelen gerilme değerlerindeki artışlar

görülebilir. Statik yükleme sonucunda zemin kat kolonlarında oluşan gerilmeler en fazla 0,40 MPa değerine ulaşabildiği görülmektedir.



a) b)



c) d)

Şekil 4.86 Sonlu eleman modeli üzerinde oluşan gerilme diyagramı; a) Statik analiz, b) 1. durum patlama analizi, c) 2. durum patlama analizi sonrası d) Donatı üzerinde meydana gelen gerilmeler

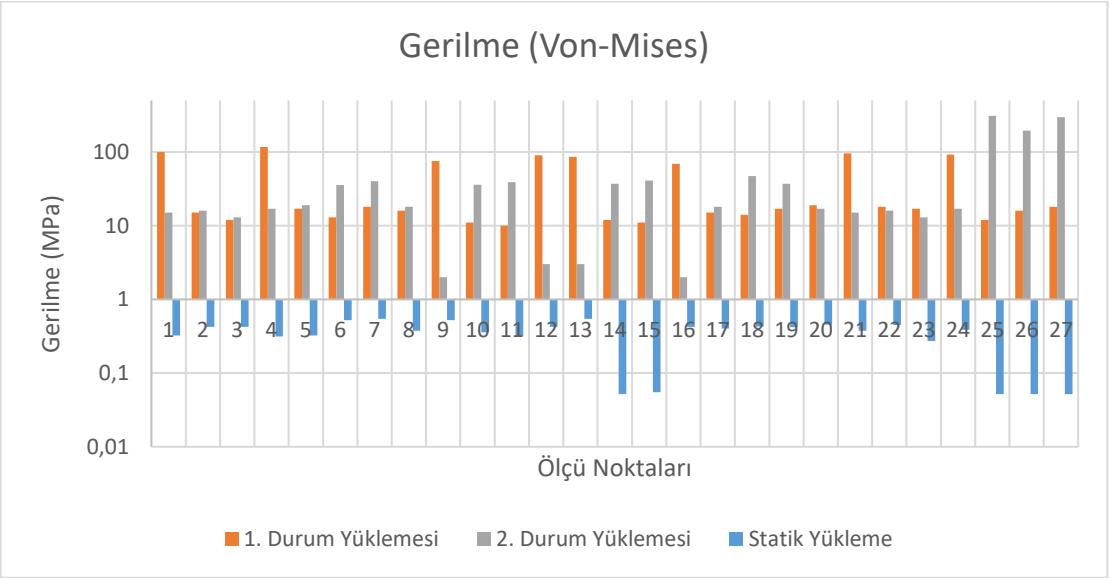
Buna karşın uygulanan her iki patlama durumu incelendiğinde ise; patlayıcının tatbik edildiği kolonlarda gerilmelerın en üst noktaya çıkarak kritik seviyenin de üserine çıktığı gözlemlenmiştir. (Şekil 4.87)

Buna göre: 1. Patlama Durumuna göre, yani dış kolonların donatıları üzerindeki gerilme; 70 MPa – 80 MPa seviyesine ulaştığı hatta 1 ve 4 Nolu kolonlarda ise 100 MPa seviyesinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir buna karşın beton malzeme parçalanmıştır.

2. Durum patlamasında ise, yani iç kolonların patlayıcı etkisinde kaldığı durumda; aynı şekilde, donatı üzerinde; 70 MPa – 80 MPa seviyesine ulaşmakla birlikte, asansör boşluğunu çevreleyen betonarme perde duvarlar üzerinde ise (25, 26 ve

27 nolu perdelerde) sırasıyla 310 MPa, 195 MPa ve 295,7 MPa mertebelerine ulaşmıştır. Bununla birlikte, beton malzemeler ise parçalanmıştır.

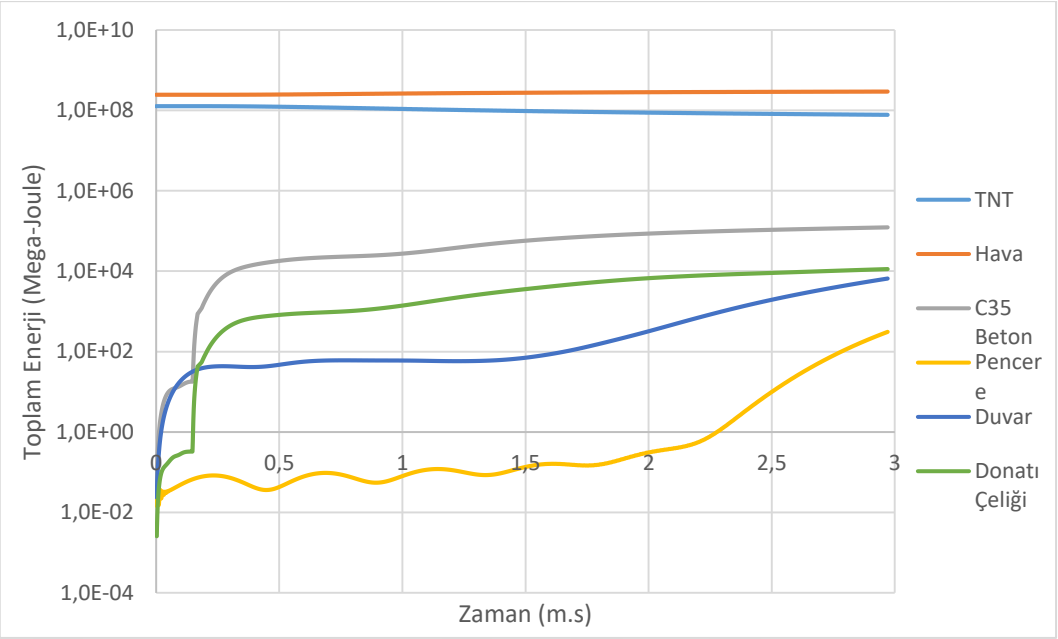
Patlayıcı malzeme TNT nin tatbik edildiği kolon ve betonarme perde duvarlar üzerinde gerilmeler kritik seviyenin çok üzerine ulaştığı söylenebilir ki bu taşıyıcı sistemin kapasitesinin çok üzerinde olmakla birlikte bu elemanların parçalandığı anlamına gelebilir.



Şekil 4.87 Statik analiz, 1. ve 2. Patlama Durumunda oluşan gerilme değerleri

4.6.4.5 Patlama Enerjisi

Patlamanın meydana gelmesiyle birlikte TNT malzemesinin ortaya çıkardığı patlama enerjisi, yapısal ve yapısal olmayan elemanlar tarafından soğurulmuştur. 2 farklı patlama modeli olmasına karşın patlayıcı malzeme TNT kütlesi ve yapı özellikleri eşit olduğundan dolayı tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Buna göre; patlama başladığı anda TNT tarafından salınan enerjinin büyük bir kısmı hava tarafından soğurulmuş olup, yapısal elemanlar tarafından soğurulan enerji miktarının ise çok daha az olduğu görülmektedir. Salınan ve soğurulan enerji miktarları Şekil 4.88 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.88 Patlama ile birlikte salınan ve soğurulan enerji değerleri

4.6.5 Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada 5 katlı bir yapının zemin katında bulunan kolonlara toplamda 352 kg TNT patlayıcı malzeme yerleştirilmiştir. Patlama süresi 3 milisaniye olarak hesaplanmıştır.

1. Patlama Modelinde; toplam 352 kg TNT patlayıcı kullanılmış olup bu patlayıcı 8 parça olarak (8×44 kg = 352 kg TNT); 1, 4, 9, 12, 13, 16, 21 ve 24 nolu kolonlara (yani zemin katta bulunun dış kolonlara) bitişik olarak hazırlanmıştır.

2. Patlama Modelinde ise; yine 352 kg TNT patlayıcı kullanılmıştır ancak bu defa TNT patlayıcı (4×44 kg + 1×176 kg = 352 kg TNT); 6, 7, 18 ve 19 nolu toplam 4 kolon olmak üzere her bir kolona bitişik olarak 44 kg ve betonarme perde duvarların tam ortasına ise 176 kg yerleştirilmiştir. Tüm dünya üzerinde artık sık rastlanmakta olan çok katlı binalar ve bu binaların; gerek patlama yükü karşısındaki davranışı, gerekse yapılması muhtemel kentsel dönüşümlerden dolayı yıkım maliyetlerinin azaltılmasına yönelik olmak üzere patlayıcı kullanılarak yapılan kontrollü yıkım analizi incelenmiştir. Bu amaçla; patlayıcı yükünün kütlesi değiştirilmeksizin, sadece etki ettiği kolonlar değiştirilerek, yapının yıkım modeli incelenmiştir.

Yapılan çalışmanın ardından elde edilen sonuç ve değerlendirmeler şu şekilde sıralanmıştır;

- İncelenen çok katlı yapının ölü ve hareketli yükler altındaki davranışı uygun olup yükleri güvenli bir şekilde taşımaktadır.
- Patlama Durumu sonrası kolonlarda oluşan yerdeğiştirmeler 25 mm – 30 mm mertebelerine ulaşmış olduğu görülmektedir, buna karşın 2. Patlama durumunda ise asansör boşluğunu çevreleyen betonarme perde duvar üzerinde ise 35 mm – 40 mm mertebesinde olduğu görülmüş olup 2. Patlama Durumu sonrası oluşan yerdeğiştirmelerin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.
- Gerilme değerleri incelendiğinde ise; 1. Patlama Durumunda, kolonlarda meydana gelen gerilmelerin 90 MPa – 100 MPa seviyesinde olduğu 2. Patlama Durumunda ise özellikle betonarme perde duvarlarda oluşan gerilmelerin 300 MPa mertebesinde gerilme kaydedilmiştir. Her iki patlama durumunda da; zemin katındaki taşıyıcı sistem üzerine oluşan gerilmelerin ani yükseldiği gözlemlenmekte olup 2. Patlama Durumunda oluşan gerilmelerin çok daha yüksek olduğu, bununla birlikte daha fazla hasar aldığı düşünülmektedir.
- Hasar seviyesi ve malzeme davranışı olarak incelendiğinde ise: her iki patlama durumunda da; patlayıcı malzemeye yakın olan kolonların neredeyse tamamen parçalandığı, kirişlerde ise kısmen parçalanma – kısmen plastik davranış gözlemlenmektedir. Farklı olarak 2. Patlama Durumunda; merdiven boşluğunu saran betonarme perdelerin ise yüksek derecede hasar alarak taşıma kapasitesini tamamen kaybettiği düşünülmektedir. Üst katlardaki kolonlarda ise gerilmelerin arttığı gözlemlenmiştir.
- Her iki patlama durumunda da; patlayıcı malzemeye yakın tuğla duvar ve pencereler ise tamamen parçalanmıştır.
- Genel olarak sistem incelendiğinde, 1. Patlama Durumunda; zemin katındaki dış cepheye bakan çerçeve sistem büyük oranda hasar görmüştür ancak iç tarafta bulunan kolonların hasar almadığı ve merdiven boşluğunu saran perde kolonlardan 2 tanesinin hasar almadığı göz önüne alındığında

yine de yapının kullanılmayacak ölçüde güvensiz hale geldiği söylenebilir. 2. Patlama Durumunda ise; zemin katındaki içerideki kolon elemanların büyük oranda hasar görmüştür ancak dış tarafta bulunan kolonların hasar almadığı ve merdiven boşluğunu saran perde kolonların tamamının yüksek oranda hasar alarak, yük taşıyamayacak durumda olduğu gözlemlenmiştir.

- Her iki patlama durumu da incelendiğinde: yapı yüksek oranda hasar alsa da; 2. Patlama Durumunun, yapıya daha fazla hasar verdiği, özellikle betonarme perde elemanların taşıma kapasitesinin kaybetmesinin, bunda etkili olduğu düşünülmektedir.

Çok katlı yapıların kontrollü göçme mekanizması araştırılırken; taşıyıcı sistemin yapısı, simetri durumu, betonarme perdelerin konumu vb. durumlar tahlil edilmelidir. Çok katlı yapıların göçme mekanizması araştırılırken, ileri göçme analizi (progressive collapse) daha detaylı sonuçlar vermektedir.

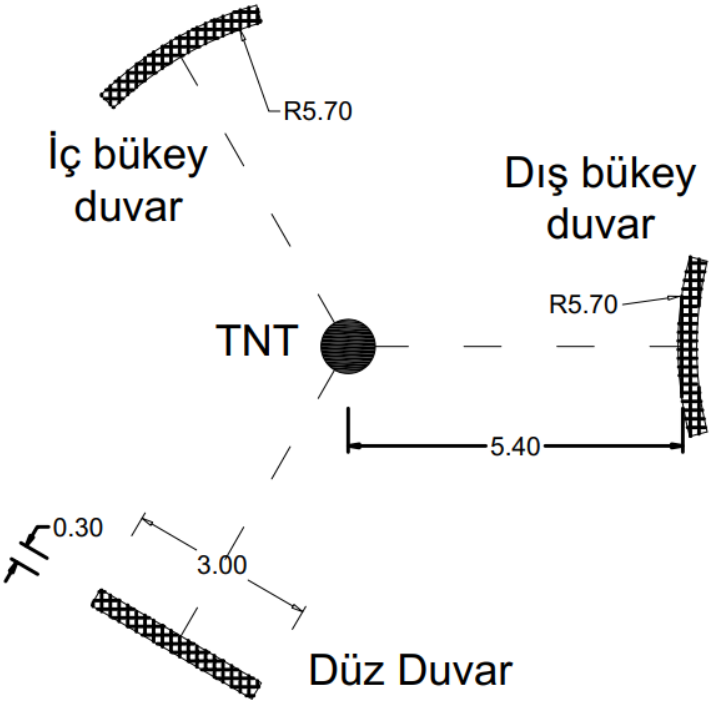
4.7 Üç Farklı Betonarme Duvar Modeli

Patlayıcıların davranışları ve teorisi üzerine günümüze kadar çalışmalar yapılmıştır ve bu süreç halen devam etmektedir. Bu çalışmada Dr Baker [113] tarafından hazırlanan yapı geometrilerinin tasarımına ilişkin, patlama etkisi altında yapının dirençli davranış gösterebilmesi için tasarı önerileri doğrultusunda çalışmalar yapılmıştır. Buna göre patlayıcının infilak etmesiyle birlikte şok dalgasının patlayıcı yüzeyine ulaşmasıyla, patlayıcı yüzeyinin geometrisinin yapı üzerinde oluşturduğu etkinin ne şekilde azalıp artabileceği gözlemlenmiş olup parametrik çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda hazırlanan üç betonarme duvar modeli üç farklı kütleli patlayıcı yüküne maruz bırakılmış olup toplam altı patlama durumu üzerinde çalışılmıştır. Bu duvar yüzeyleri, düz, iç bükey ve dış bükey olarak tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, üç farklı kütleye sahip patlayıcı etkisi altında 3 tip duvarın davranışları araştırılmış olup 6 farklı patlama modeli oluşturulmuştur. Hazırlanan modele göre düz duvar, iç bükey duvar ve dış bükey duvarın patlama etkisi altındaki davranışları gözlemlenmiştir.

4.7.1 Sonlu Eleman Modeli

Hazırlanan 6 patlama modeli için, 3 betonarme duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilerek, asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye ve patlayıcı ile duvarlar arasındaki mesafe ise 5.40 m olarak modellenmiştir (Şekil 4.89).



Şekil 4.89 Üç duvar modeli ile patlayıcının konumu ve uzaklıkları

Çalışma kapsamında, üç faklı geometride hazırlanmış ANSYS Workbench programında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Modellenen üç duvar modelinin tam ortasında 3 farklı kütlede TNT patlayıcı, ANSYS AUTODYN yazılımında, süresi 5 milisaniye olacak şekilde patlatılarak modellenmiştir. Bilgisayar özelliklerine bağlı olarak daha güçlü bilgisayarlarda bu süre, daha detaylı sonuçlar almak için, artırılabilir. Patlama etkisi sonucu meydan gelen etkiler grafikler ve kontur diyagramları ile sunulmuştur.

Dr. Baker [113] tarafından hazırlanan yapı geometrilerinin tasarımına ilişkin, patlama etkisi altında yapının dirençli davranış gösterebilmesi için tasarı önerileri Şekil 3.10'da verilmiştir.

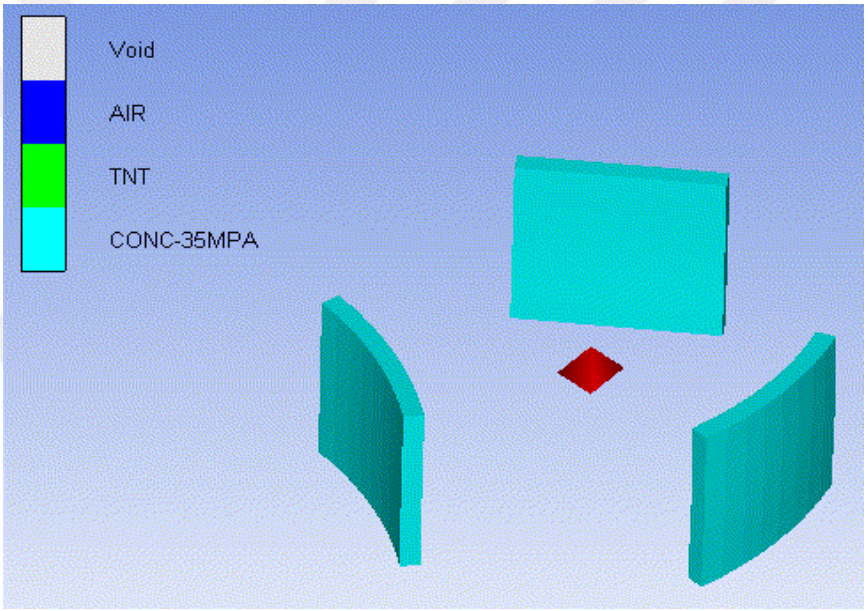
Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve patlama yüküne ilişkin tüm analizler ANSYS yazılımı (Explicit Dynamics) ile modellenmiştir.

ANSYS yazılımı üzerinde malzeme tanımı yapılırken: Beton malzemede, *RHT Concrete* beton modeli kullanılmış olup kırılma kriteri *RHT Concrete* ve çekme kırılması olarak ise *principle stress* seçilmiştir. Buna göre kullanılan malzemeler ve özellikleri Tablo 4.18'de gösterilmiştir.

Tablo 4.18 Modelde kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri

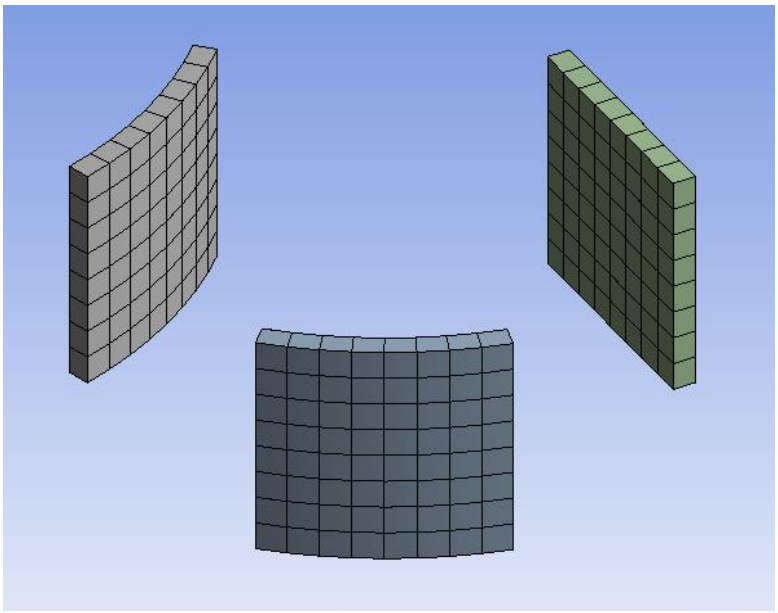
Eleman Adı	Malzeme Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Basınç Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)
Beton	C35	35	2,45	35	3,5
Hava	Hava	-	0,00123	-	-
Patlama	TNT	-	1,63	-	-

Sonlu eleman modelinde; beton malzeme C35 beton sınıfı seçilmiştir. Bu kabullere göre oluşturulan binanın üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 4.88'de verilmiştir.



Şekil 4.90 Üç boyutlu sonlu eleman modeli

Sonlu Eleman Modele ilişkin ağ modeli (mesh), ANSYS yazılımı ile yapılmış olup, Katı (Lagrange) modele ilişkin birim mesh uzunluğu (Şekil 4.91) ise 400 mm olarak seçilmiştir.

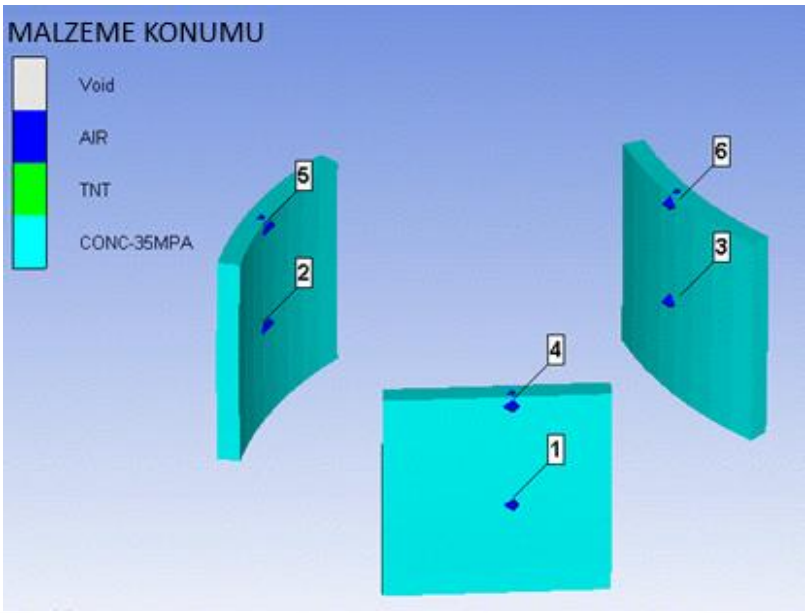


Şekil 4.91 Sonlu eleman modeline ilişkin mesh geometrisi

ANSYS yazılımı üzerinde üç boyutlu Lagrangian model tasarımı, malzeme özellikleri, mesh tanımı gibi genel tasarımların tamamlanmasına müteakip, patlama analizinin yapılacağı ANSYS AUTODYN yazılımı üzerinde Akışkan – Hava (Eulerian) modellemesi tasarımı yapılmıştır. Buna göre üç boyutlu katı model patlama işleminin gerçekleşeceği hava modelinin içerisine oturtulması gerekmektedir, bunun için 12.000 mm × 12.000 mm × 8.000 mm ebatlarındaki bir dikdörtgenler prizması hacimli hava (akışkan) malzemenin içerisine konumlandırılmış ve Lagrangian Modelde de yapıldığı gibi mesh işlemi hava modele de aynı biçimde uygulanmıştır. Uygulanan birim mesh uzunluğu ise 200 mm olarak seçilmiştir. Eulerian Modele uygulanan birim mesh uzunluğunun katı modele uygulanandan daha küçük seçilmesinin nedeni; yazılım, analiz aşamasında kuvvet aktarımlarında kuvvetlerin daha doğru ve başarılı bir şekilde aktarma işleminin gerçekleşmesi için Eulerian modelde birim mesh uzunluğu daha küçük olmasi gerektiğidir.

4.7.2 Okuma Noktaları

Patlama sonrası sonuçların irdelenmesi, karşılaştırma ve analizinin yapılabilmesi için toplam 6 adet okuma noktası yerleştirilmiştir. Bu yerleştirilen okuma noktaları Şekil 4.92'de görülmektedir.



Şekil 4.92 Sonlu eleman modelleri üzerine yerleştirilen okuma noktaları

4.7.3 Patlama Modelleri

Hazırlanan 1, 2 ve 3 nolu patlama modellerine göre (Şekil 4.90), patlayıcı zeminden 1,5 m yükseklikte modellenmiştir. Buna göre; 1 nolu patlama modeline göre üç duvar modelin tam ortasına 350 kg patlayıcı; 2 nolu patlama modeline göre 230 kg patlayıcı; 3 nolu patlama modeline göre üç duvar modelin tam ortasına 105 kg patlayıcı yerleştirilmiştir.

Hazırlanan 4, 5 ve 6 nolu patlama modellerine göre, patlayıcı zemine bitişik olarak modellenmiştir. Buna göre; 1 nolu patlama modeline göre üç duvar modelin tam ortasına 350 kg patlayıcı; 2 nolu patlama modeline göre 230 kg patlayıcı; 3 nolu patlama modeline göre üç duvar modelin tam ortasına 105 kg patlayıcı yerleştirilmiştir (Tablo 4.19).

Tablo 4.19 Patlama modellerini gösterir çizelge

Patlama Durumu	Z (m/kg$^{1/3}$)	Patlayıcı Kütlesi	Patlayıcının Yerden Yüksekliği
#1	0,77	350 kg	1,5 m
#2	0,88	230 kg	1,5 m
#3	1,14	105 kg	1,5 m
#4	0,77	350 kg	Zeminde
#5	0,88	230 kg	Zeminde
#6	1,14	105 kg	Zeminde

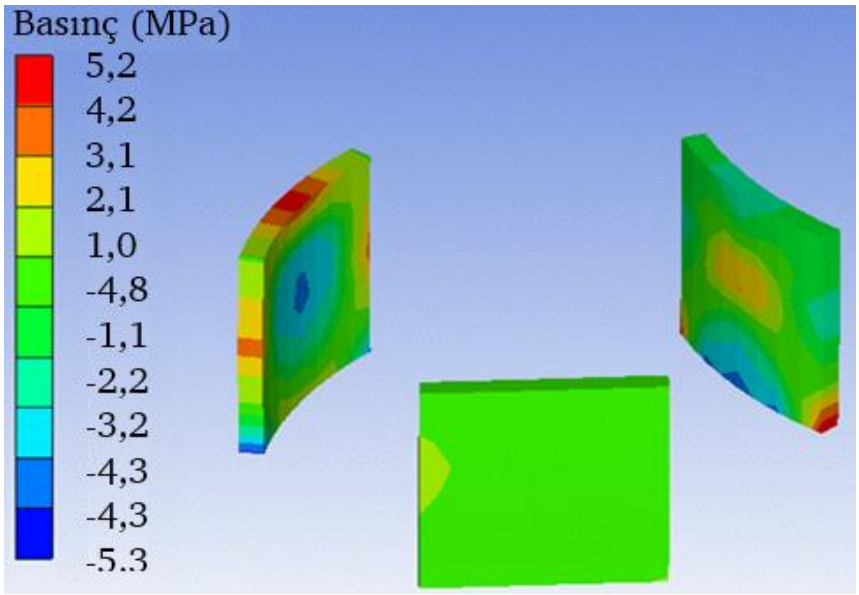
4.7.4 Bulgular

Patlama Durumu 1

Hazırlanan 1 nolu patlama modellerine göre, 3 beton duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilmiş, patlayıcı kütlesi ise 350 kg seçilmiş olup zeminden 1,5 m yükseklikte modellenmiştir. Asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye olarak ayarlanmıştır.

4.7.4.1 Patlama Basınçları

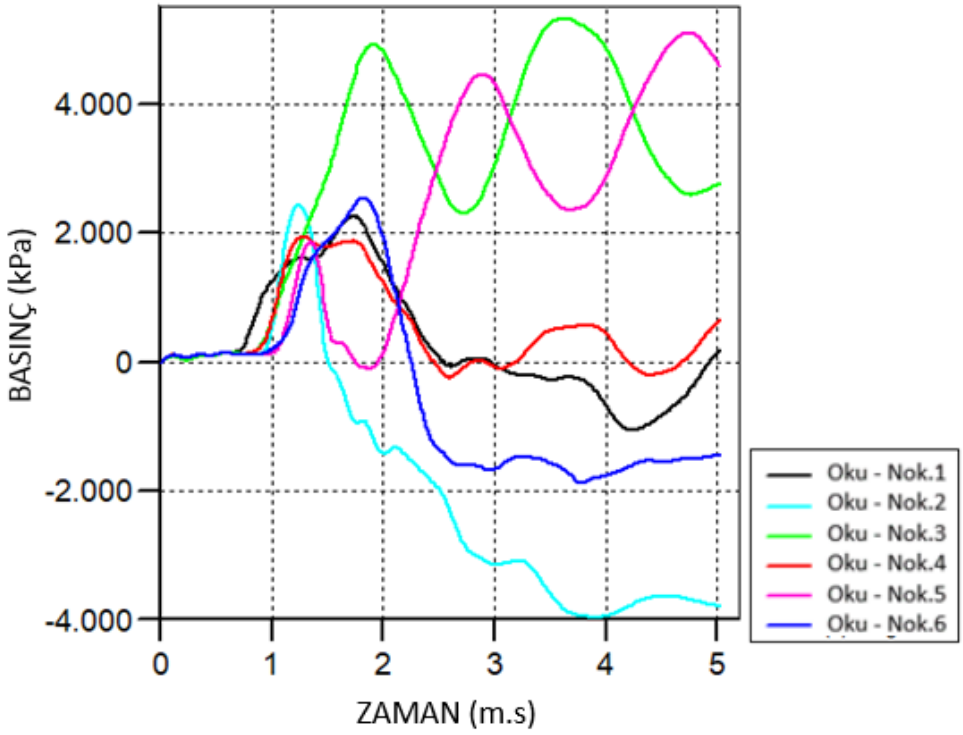
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.93) iç bükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerlerinin en yüksek değerde olduğu ve 4 MPa mertebesine ulaştığı, buna karşın dışbükey duvarda ise 3 MPa mertebelerinde olduğu, düz duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesinin ise en düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.93 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları

Bununla birlikte; basınç zaman grafikleri (Şekil 4.94) incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 2,2 MPa, 4 MPa ve 4,8 MPa olarak ölçülmüş olup duvarların üst noktalarında oluşan basınç değerleri ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,9 MPa, 4,7 MPa ve 2,7 MPa olarak tespit edilmiştir.

İçbükey ve dışbükey duvarların orta noktaları üzerinde oluşan basınç etkileri birbirine yakın değerler uluşturmakla birlikte, dışbükey duvar üzerinde oluşan basınç değeri daha yüksek olmasına rağmen, duvarın tepe noktasında oluşan basınç değerlerinde ise, içbükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



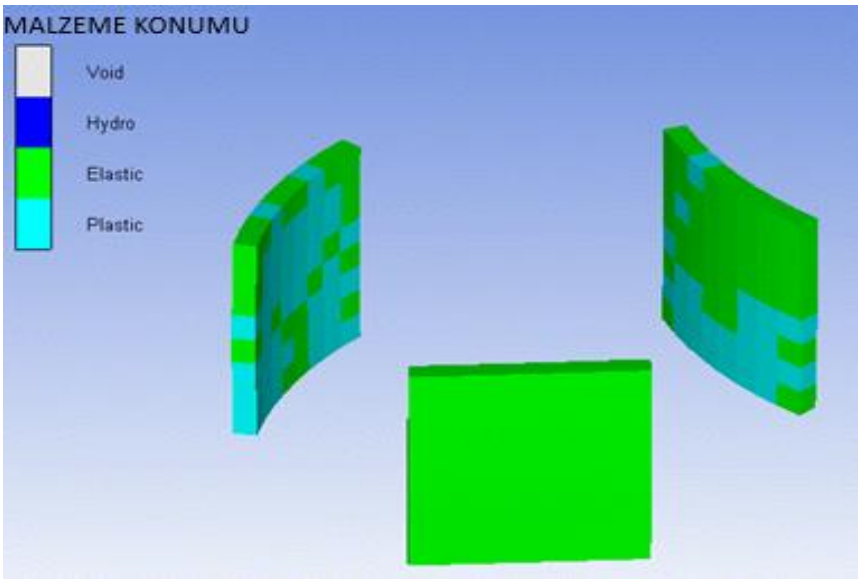
Şekil 4.94 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği

4.7.4.2 Hasar Durumları

Patlama sonrasında her üç duvar üzerinde bazı değişiklikler gözlemlenmiş olup yapı elemanlarının davranışları Şekil 4.95'de, aktarılan kontur diyagramları üzerinden yorumlanabilir.

Buna göre; patlamanın ardından düz duvar elastik yapıda davranmaya devam etmekte olup, yüzey üzerinde plastik bölgeler oluşmamıştır. İçbükey ve dışbükey duvarlar üzerinde ise, patlama yükünün ardından, plastik bölgeler gözlemlenmiştir. Bu duvarlardan iç bükey duvar üzerindeki plastik bölge oluşumu, dışbükey duvar ile karşılaştırıldığında daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

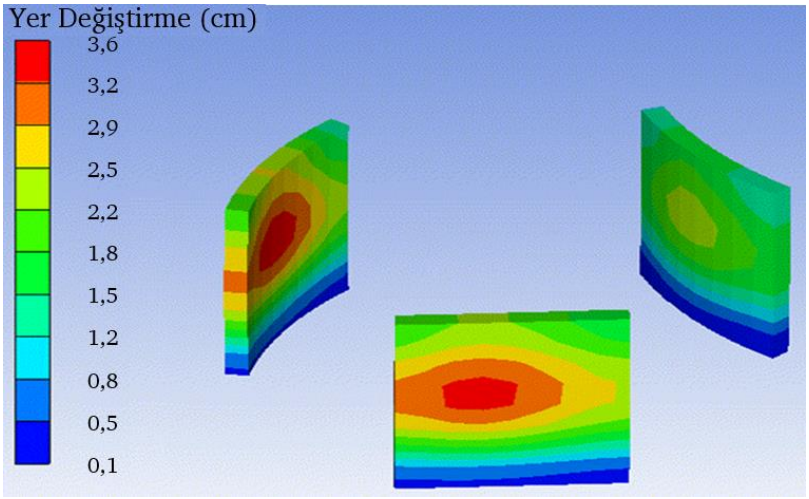
Tüm duvarlar incelendiğinde ise; patlama etkisi, duvarlarda kırılma ya da parçalanma etkisi göstermemiştir.



Şekil 4.95 Hasar durumlarını gösterir diyagramlar

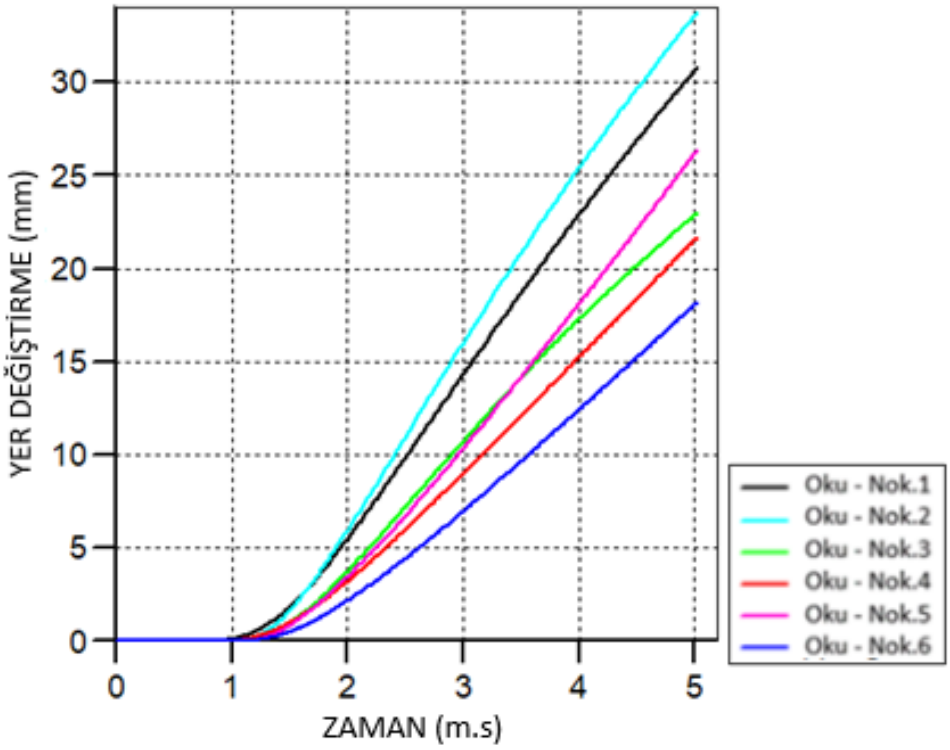
4.7.4.3 Yerdeğiştirmeler

Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait yerdeğiştirme kontur diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.96) içbükey duvar ve düz duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin en yüksek değerde buna karşın dışbükey duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. İçbükey duvar ve düz duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme değerleri 3 cm'nin üzerine çıktığı fakat dış bükey duvarda ise 2 cm mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.96 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları

Yerdeğiştirme değerleri grafik (Şekil 4.97) üzerinden incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 31 mm, 34 mm ve 23 mm olarak ölçülmüş olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 22 mm, 26 mm ve 18 mm olarak tespit edilmiştir. En büyük yerdeğiştirme değerinin, iç bükey duvar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Düz duvarda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin ise, iç bükey duvara yakın değerler oluşturduğu gözlemlenmiştir.

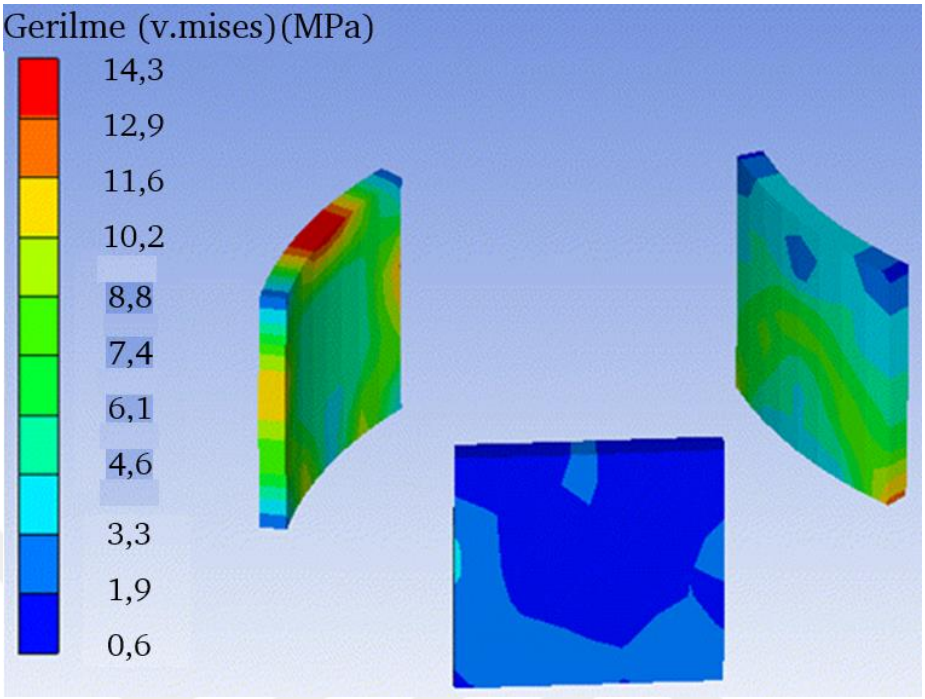


Şekil 4.97 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği

4.7.4.4 Gerilmeler

Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait gerilme (von-mises) diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.98) en büyük gerilmenin içbükey duvar üzerinde oluştuğu ardından dışbükey duvarda da kayda değer gerilmelerin oluştuğu buna karşın düz duvarda ise, oluşan gerilmelerin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. İçbükey ve dışbükey duvar incelendiğinde ise; içbükey duvarın üst noktasında gerilmenin en büyük seviyeye ulaştığı ve kenar bölgelerde yüksek seviyelerde olduğu, buna karşın dışbükey duvarda ise en büyük gerilmenin duvarın orta noktasında

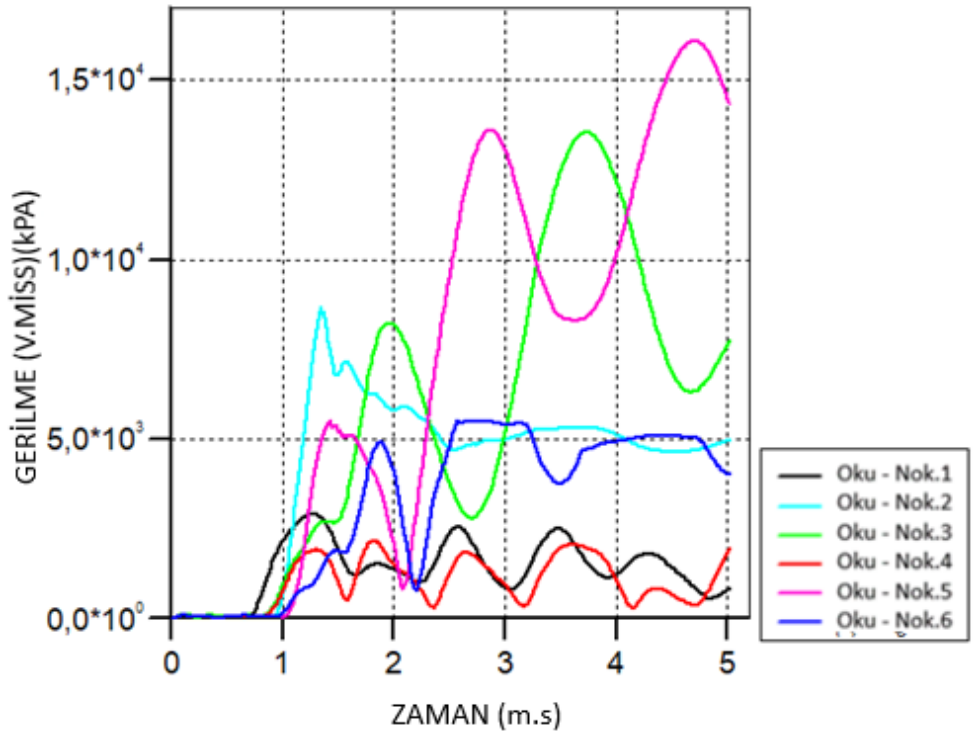
oluştuğu, kenar ve üst bölgelerde daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.98 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları

Her üç duvar modeline ilişkin gerilme – zaman grafiği (Şekil 4.99) incelendiğinde ise, okuma noktaları üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 3 MPa, 8,5 MPa ve 13,5 MPa olarak ölçülmüştür olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 2,1 MPa, 16 MPa ve 5,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

Duvarın orta noktasında en büyük gerilme değeri dışbükey duvar üzerinde oluşmuştur bu değeri iç bükey duvar takip etmekte olup duvarın üst noktası ele alındığında ise, en büyük gerilme değeri içbükey duvar üzerinde oluşmuştur. Dışbükey duvar ve düz duvarın tepe noktasında oluşan gerilmeler ise daha küçük mertebededir.



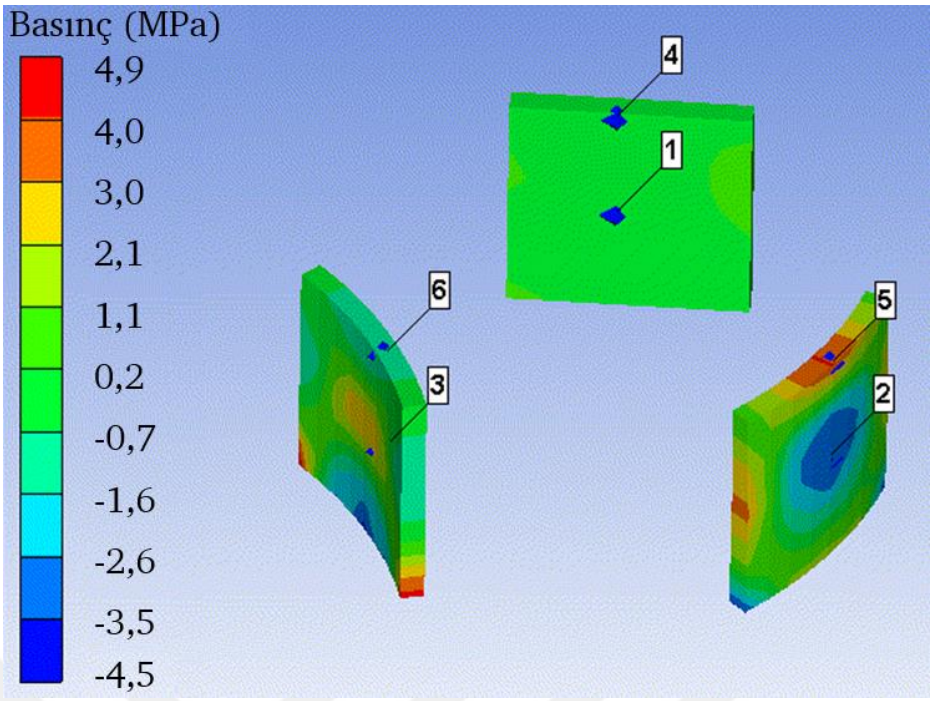
Şekil 4.99 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği

Patlama Durumu 2

Hazırlanan 2 nolu patlama modellerine göre, 3 beton duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilmiş, patlayıcı kütlesi ise 230 kg seçilmiş olup zeminden 1,5 m yükseklikte modellenmiştir. Asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye olarak ayarlanmıştır.

4.7.4.5 Basınç

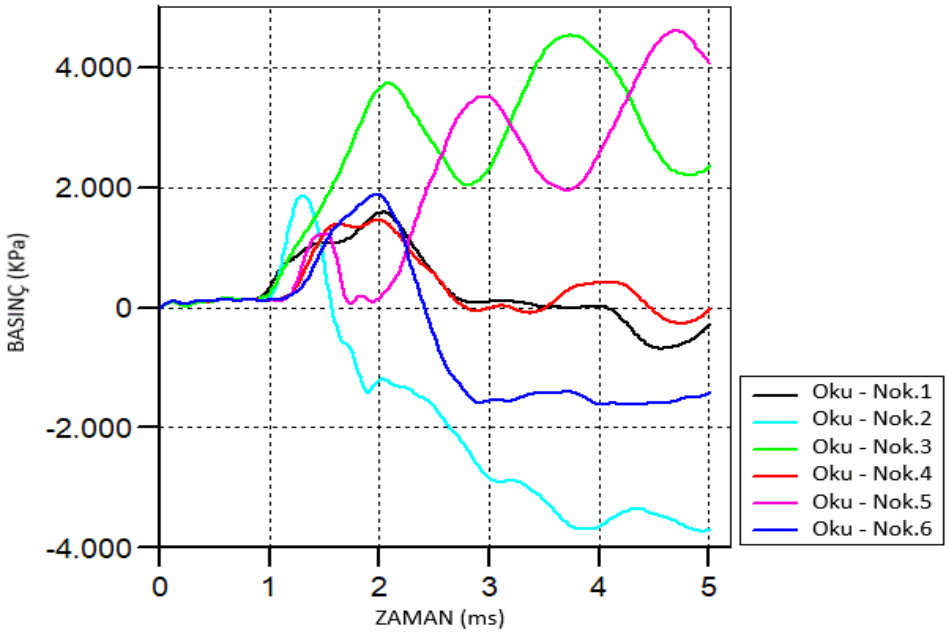
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.100) iç bükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerlerinin en yüksek değerde olduğu ve 4,2 MPa mertebesine ulaştığı, buna karşın dışbükey duvarda ise 4 MPa mertebelerinde olduğu, düz duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesinin ise en düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Duvarlar üzerinde oluşan bu basınç farklılığının sebebi olarak, eğrilik yarıçapından kaynaklı olarak patlama şok dalgasının yansıma yaparak içbükey duvar üzerinde oluşturduğu basınç etkisinin yükselmesi olarak tanımlanabilir. Buna karşın dış bükey duvarda ise eğrilik yarıçapından kaynaklı olarak, şok dalgasına daha yakın olmasından kaynaklı olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.100 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları

Bununla birlikte; basınç zaman grafikleri (Şekil 4.101) incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 1,8 MPa, 4 MPa ve 4,2 MPa olarak ölçülmüş olup duvarların üst noktalarında oluşan basınç değerleri ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,6 MPa, 4,2 MPa ve 1,9 MPa olarak tespit edilmiştir.

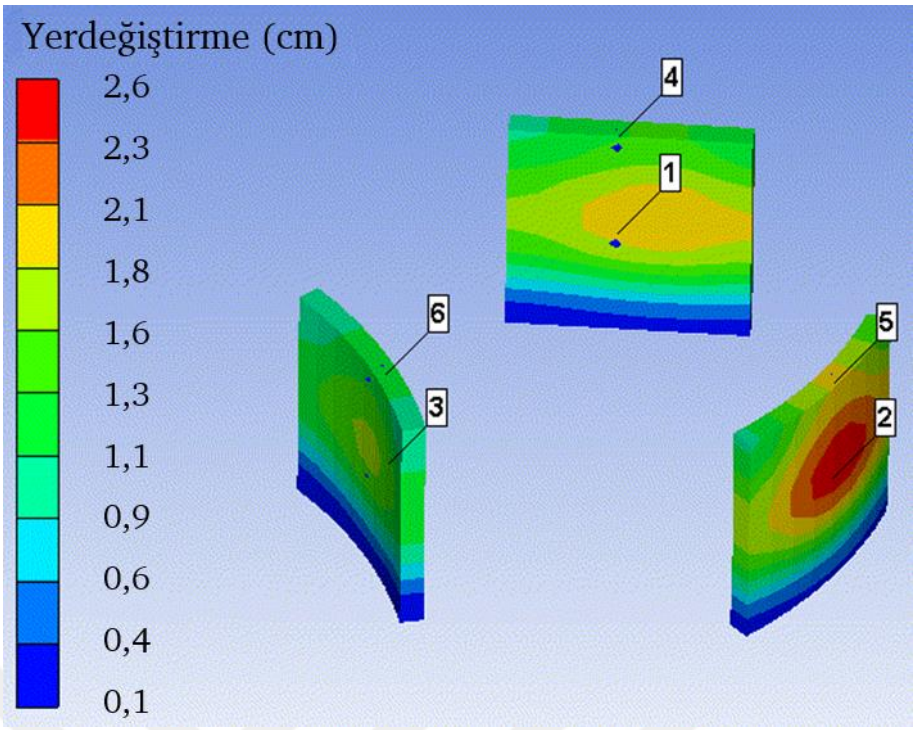
İçbükey ve dışbükey duvarların orta noktaları üzerinde oluşan basınç etkileri birbirine yakın değerler uluşturmakla birlikte, dışbükey duvar üzerinde oluşan basınç değeri daha yüksek olmasına rağmen, duvarın tepe noktasında oluşan basınç değerlerinde ise, içbükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.101 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği

4.7.4.6 Yerdeğiştirmeler

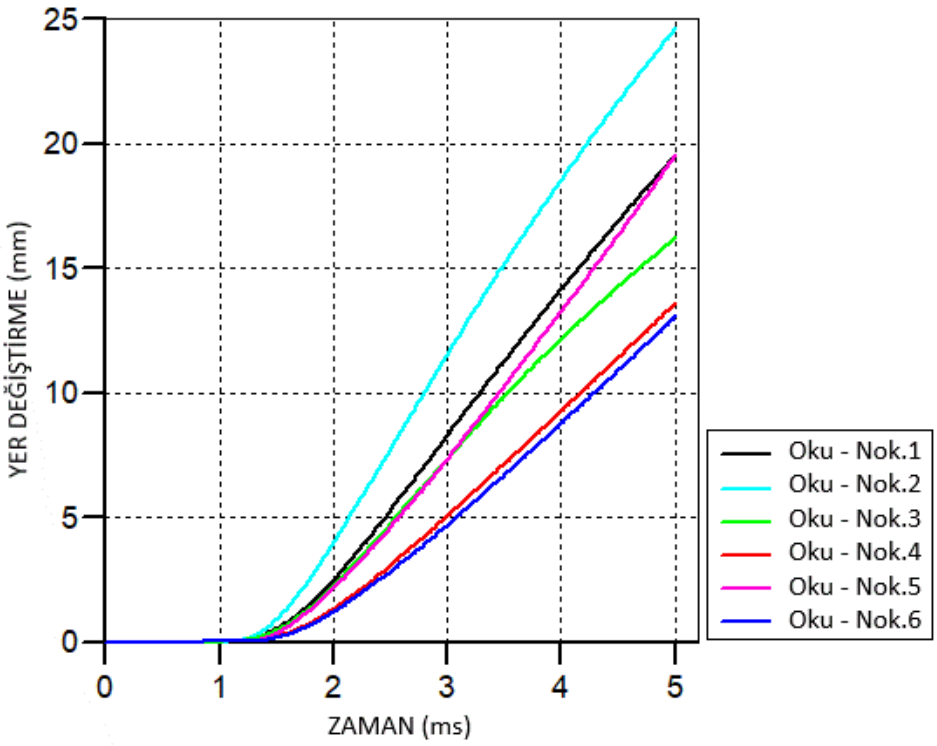
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait yerdeğiştirme kontur diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.102) içbükey duvar ve düz duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin en yüksek değerde buna karşın dışbükey duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. İçbükey duvar üzerinde yaklaşık 2,5 cm ve dış bükey duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme değerleri ise 1,6 cm'nin üzerine çıktığı fakat düz duvarda ise 1,9 cm mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.102 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları

Yerdeğiştirme değerleri grafik (Şekil 4.103) üzerinden incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 19 mm, 25 mm ve 16 mm olarak ölçülmüş olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 13 mm, 18 mm ve 12,5 mm olarak tespit edilmiştir.

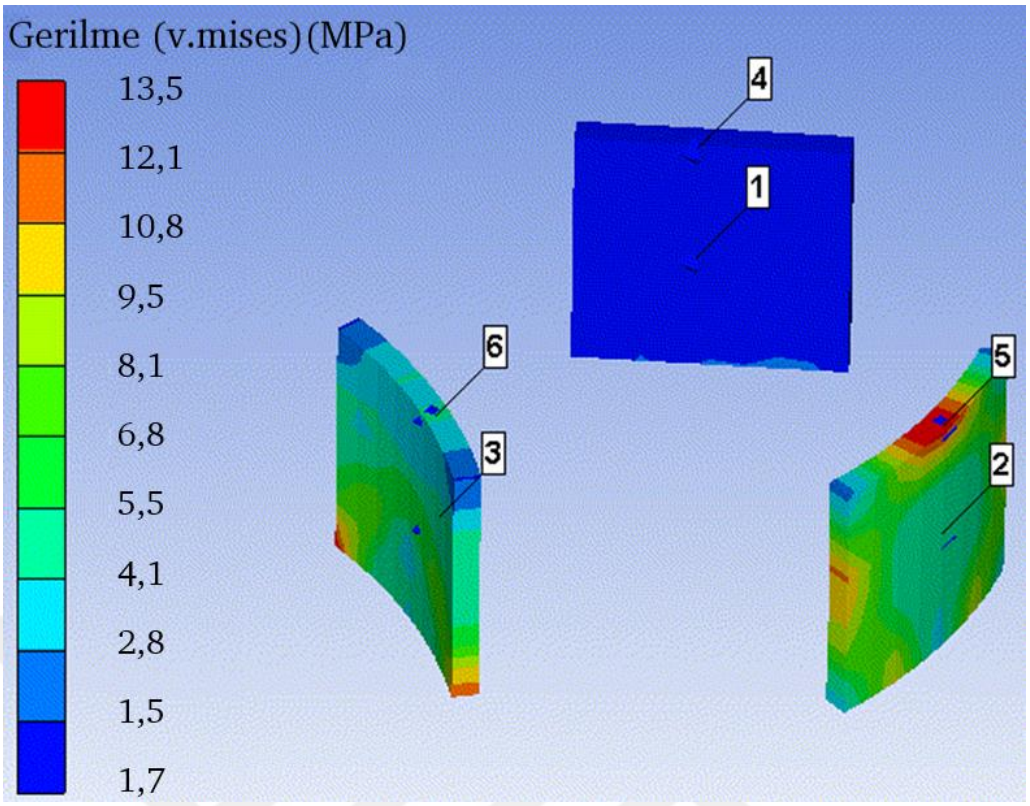
En büyük yerdeğiştirme değerlerinin; hem duvar ortası, hem de duvar tepe noktası için iç bükey duvar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Düz duvarda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin ise, iç bükey duvara yakın değerler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dışbükey duvar üzerinde ise, en küçük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.103 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği

4.7.4.7 Gerilmeler

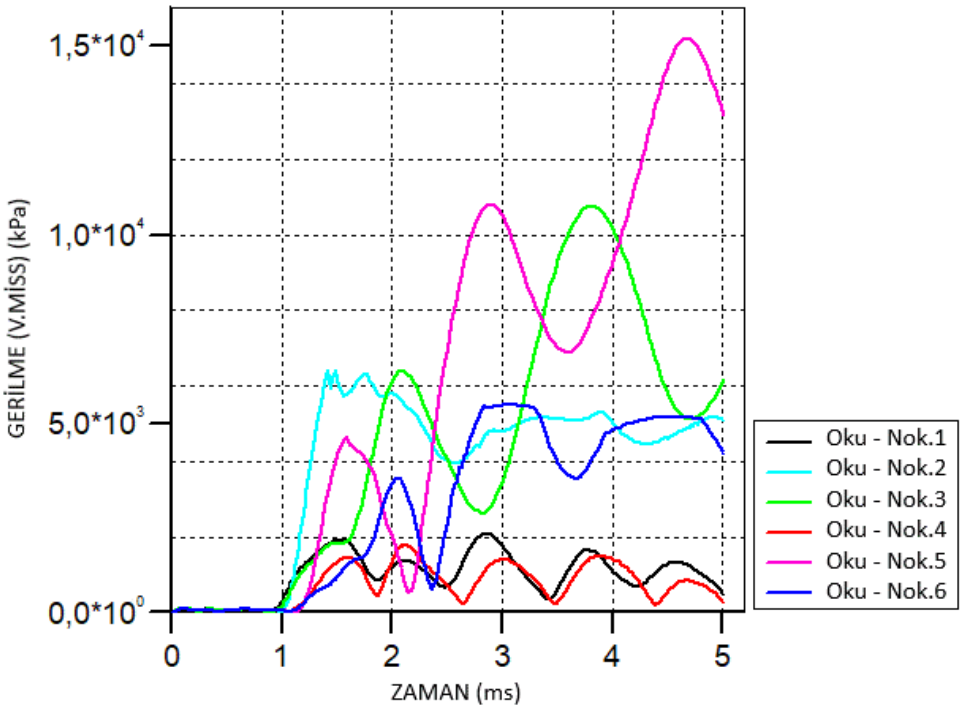
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait gerilme (von-mises) diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.104) en büyük gerilmenin içbükey duvar üzerinde oluştuğu ardından dışbükey duvarda da kayda değer gerilmelerin oluştuğu buna karşın düz duvarda ise, oluşan gerilmelerin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. İçbükey ve dışbükey duvar incelendiğinde ise; içbükey duvarın üst noktasında gerilmenin en büyük seviyeye ulaştığı ve kenar bölgelerde yüksek seviyelerde olduğu, buna karşın dışbükey duvarda ise en büyük gerilmenin duvarın orta noktasında oluştuğu, kenar ve üst bölgelerde daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.104 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları

Her üç duvar modeline ilişkin gerilme – zaman grafiği (Şekil 4.105) incelendiğinde ise, 1 nolu patlama modeline benzer bir davranış göstermekte olup, okuma noktaları üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 2,5 MPa, 6,3 MPa ve 11 MPa olarak ölçülmüştür olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,8 MPa, 15 MPa ve 5 MPa olarak tespit edilmiştir.

Duvarın orta noktasında en büyük gerilme değeri dışbükey duvar üzerinde oluşmuştur bu değeri iç bükey duvar takip etmekte olup duvarın tepe noktası ele alındığında ise, en büyük gerilme değeri içbükey duvar üzerinde oluşmuştur. Dışbükey duvar ve düz duvarın tepe noktasında oluşan gerilmeler ise daha küçük mertebededir.



Şekil 4.105 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği

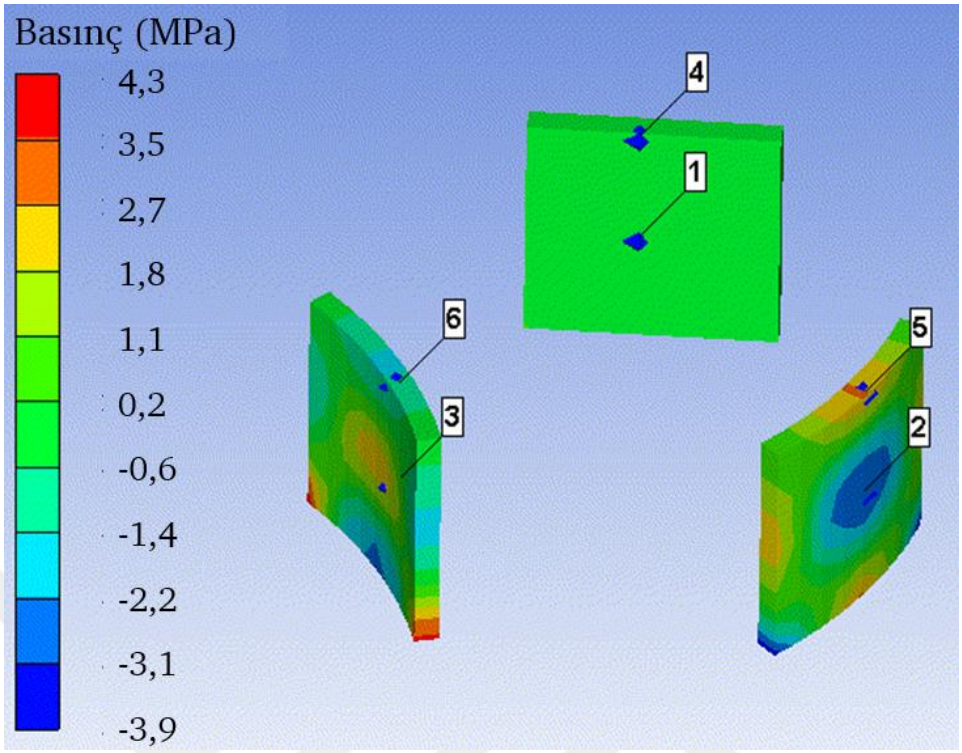
Patlama Durumu 3

Hazırlanan 3 nolu patlama modellerine göre, 3 beton duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilmiş, patlayıcı kütlesi ise 105 kg seçilmiş olup zeminden 1,5 m yükseklikte modellenmiştir. Asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye olarak ayarlanmıştır.

4.7.4.8 Patlama Basınçları

Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.106) iç bükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerlerinin en yüksek değerde olduğu ve 5 MPa mertebesine ulaştığı, buna karşın dışbükey duvarda ise 6,3 MPa mertebelerinde olduğu, düz duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesinin ise en düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

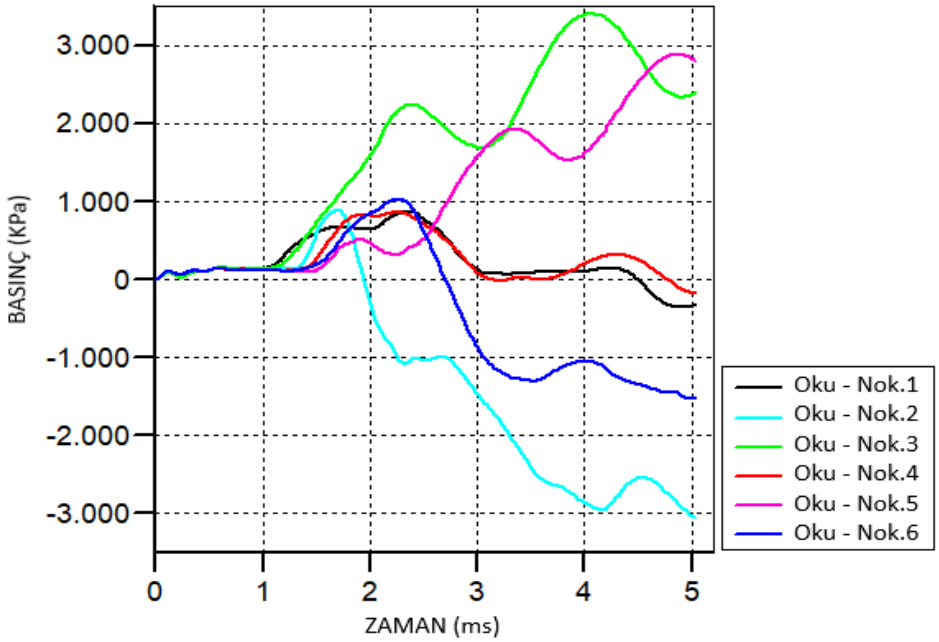
Duvarlar üzerinde oluşan bu basınç farklılığının sebebi olarak, eğrilik yarıçapından kaynaklı olarak patlama şok dalgasının yansıma yaparak içbükey duvar üzerinde oluşturduğu basınç etkisinin yükselmesi olarak tanımlanabilir. Buna karşın dış bükey duvarda ise eğrilik yarıçapından kaynaklı olarak, şok dalgasına daha yakın olmasından kaynaklı olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.106 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları

Bununla birlikte; basınç zaman grafikleri (Şekil 4.107) incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 1,8 MPa, 4 MPa ve 4,2 MPa olarak ölçülmüş olup duvarların üst noktalarında oluşan basınç değerleri ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,6 MPa, 4,2 MPa ve 1,9 MPa olarak tespit edilmiştir.

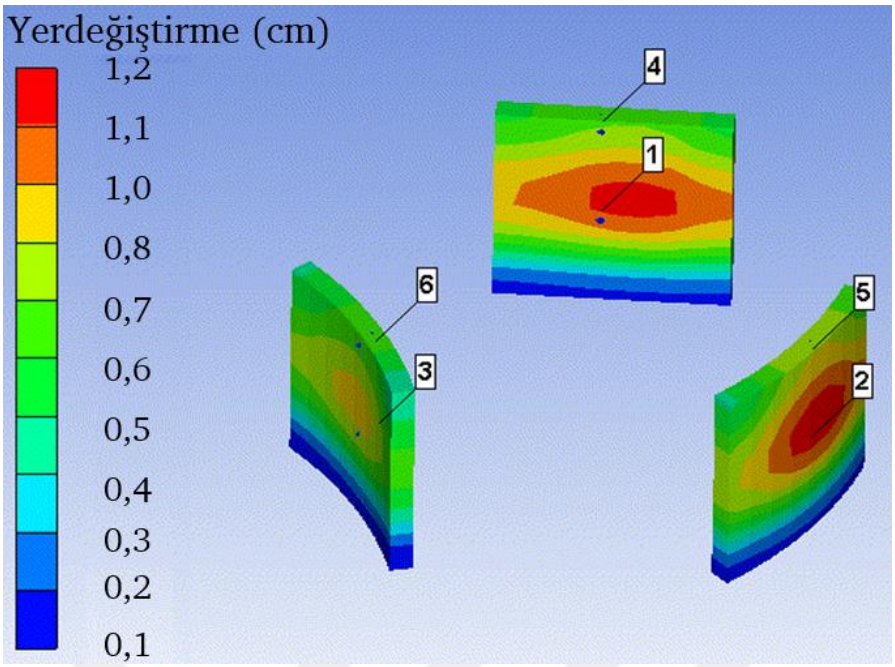
İçbükey ve dışbükey duvarların orta noktaları üzerinde oluşan basınç etkileri birbirine yakın değerler uluşturmakla birlikte, dışbükey duvar üzerinde oluşan basınç değeri daha yüksek olmasına rağmen, duvarın tepe noktasında oluşan basınç değerlerinde ise, içbükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.107 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği

4.7.4.9 Yerdeğiştirmeler

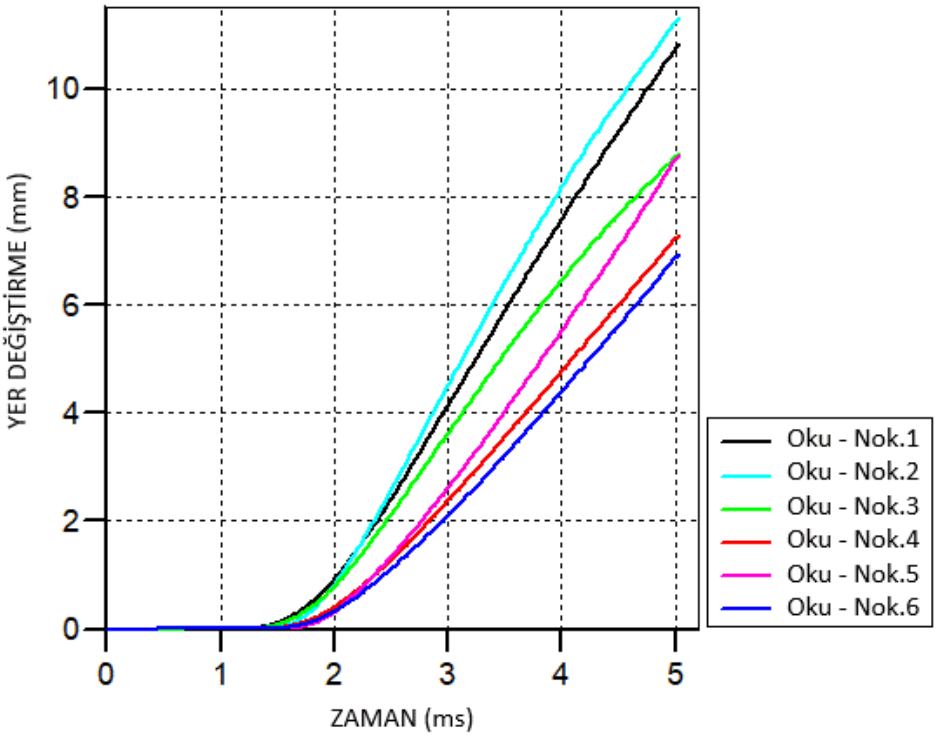
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait yerdeğiştirme kontur diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.108) içbükey duvar ve düz duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin en yüksek değerde buna karşın dışbükey duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. İçbükey duvar üzerinde yaklaşık 2,5 cm ve dış bükey duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme değerleri ise 1,6 cm'nin üzerine çıktığı fakat düz duvarda ise 1,9 cm mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.108 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları

Yerdeğiştirme değerleri grafik (Şekil 4.109) üzerinden incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 19 mm, 25 mm ve 16 mm olarak ölçülmüş olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 13 mm, 18 mm ve 12,5 mm olarak tespit edilmiştir.

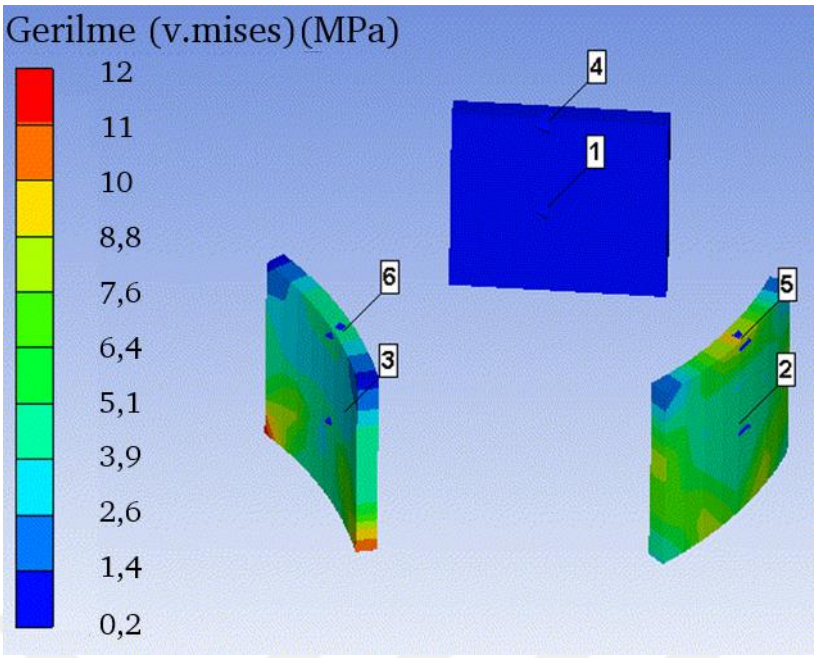
En büyük yerdeğiştirme değerlerinin; hem duvar ortası, hem de duvar tepe noktası için iç bükey duvar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Düz duvarda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin ise, iç bükey duvara yakın değerler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dışbükey duvar üzerinde ise, en küçük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.109 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği

4.7.4.10 Gerilmeler

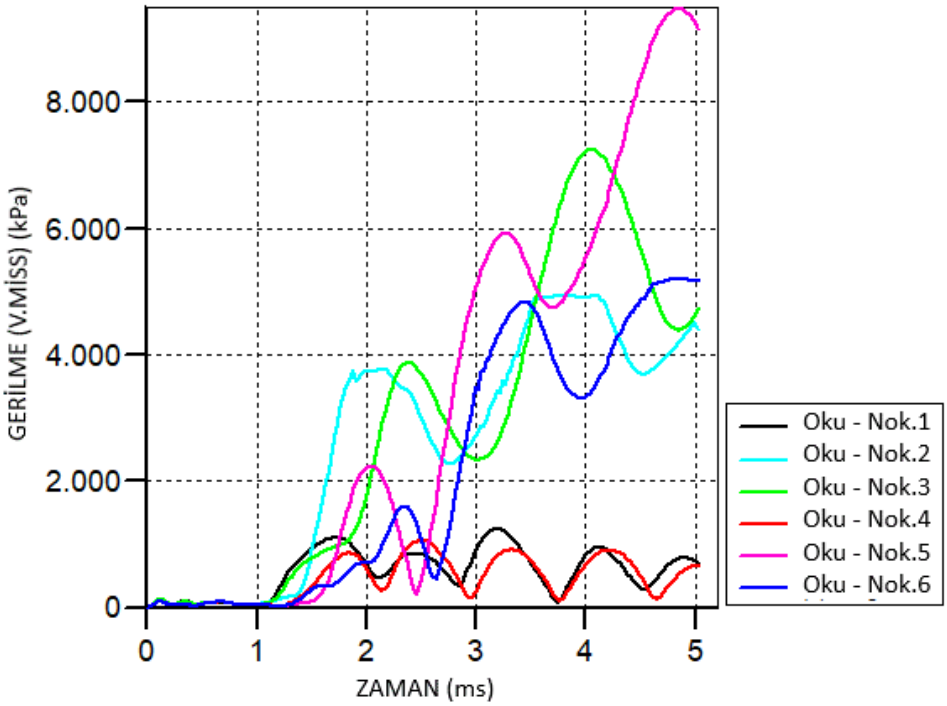
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait gerilme (von-mises) diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.110) en büyük gerilmenin içbükey duvar üzerinde oluştuğu ardından dışbükey duvarda da kayda değer gerilmelerin oluştuğu buna karşın düz duvarda ise, oluşan gerilmelerin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. İçbükey ve dışbükey duvar incelendiğinde ise; içbükey duvarın üst noktasında gerilmenin en büyük seviyeye ulaştığı ve kenar bölgelerde yüksek seviyelerde olduğu, buna karşın dışbükey duvarda ise en büyük gerilmenin duvarın orta noktasında oluştuğu, kenar ve üst bölgelerde daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.110 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları

Her üç duvar modeline ilişkin gerilme – zaman grafiği (Şekil 4.111) incelendiğinde ise, 1 nolu patlama modeline benzer bir davranış göstermekte olup, okuma noktaları üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 2,5 MPa, 6,3 MPa ve 6,5 MPa olarak ölçülmüştür olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,8 MPa, 15 MPa ve 5 MPa olarak tespit edilmiştir. Duvarın orta noktasında en büyük gerilme dışbükey duvar üzerinde, duvarın üst noktası ele alındığında ise içbükey duvar üzerinde oluşmuştur.

Duvarın orta noktasında en büyük gerilme değeri dışbükey duvar üzerinde oluşmuştur bu değeri iç bükey duvar takip etmekte olup duvarın tepe noktası ele alındığında ise, en büyük gerilme değeri içbükey duvar üzerinde oluşmuştur. Dışbükey duvar ve düz duvarın tepe noktasında oluşan gerilmeler ise daha küçük mertebededir.



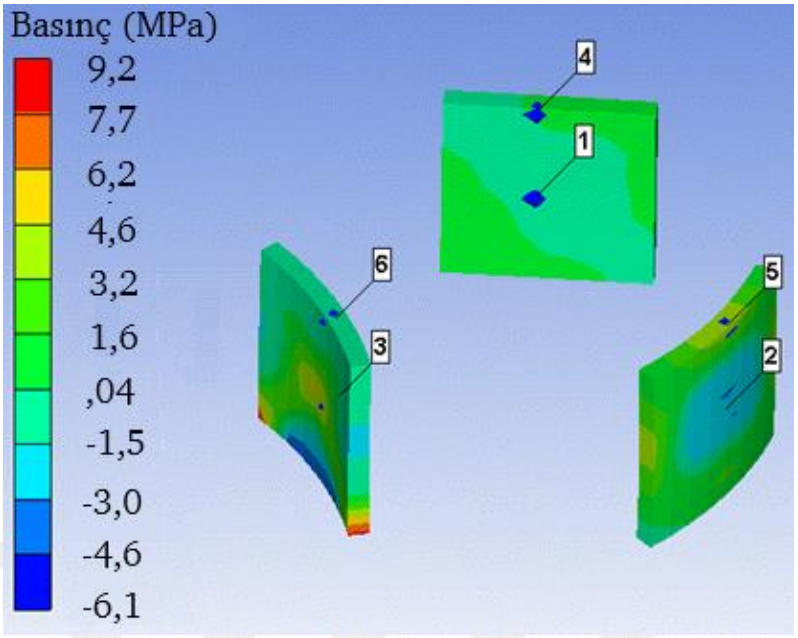
Şekil 4.111 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği

Patlama Durumu 4

Hazırlanan 4 nolu patlama modellerine göre, 3 beton duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilmiş, patlayıcı kütlesi ise 350 kg seçilmiş olup zeminde modellenmiştir. Asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye olarak ayarlanmıştır.

4.7.4.11 Patlama Basınçları

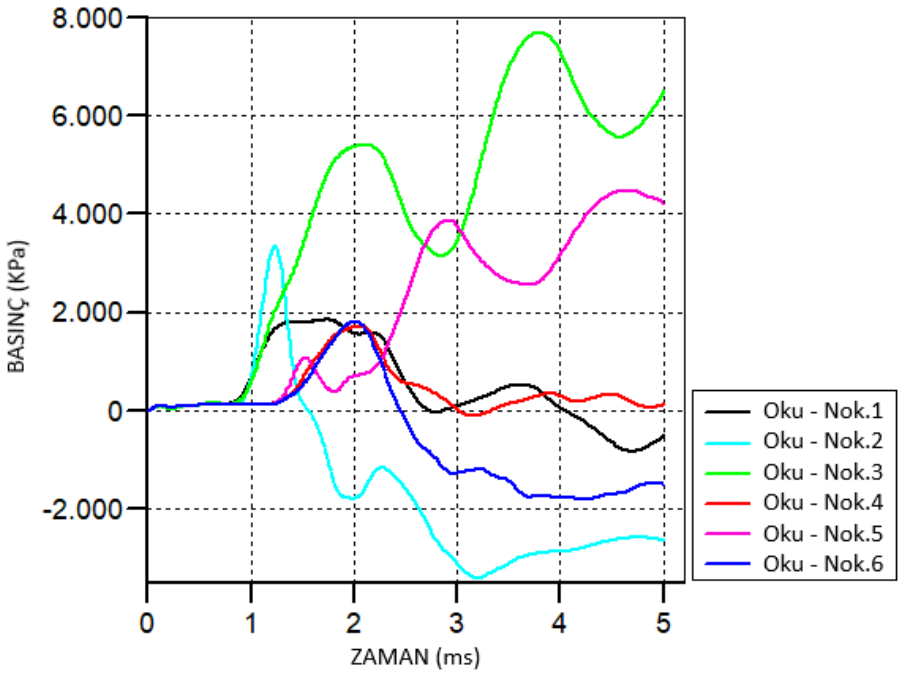
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.112) iç bükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerlerinin en yüksek değerde olduğu ve 1,8 MPa mertebesine ulaştığı, buna karşın dışbükey duvarda ise 7,7 MPa mertebelerinde olduğu, düz duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesinin ise en düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.112 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları

Bununla birlikte; basınç zaman grafikleri (Şekil 4.113) incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 1,8 MPa, 3,3 MPa ve 7,7 MPa olarak ölçülmüş olup duvarların üst noktalarında oluşan basınç değerleri ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,7 MPa, 4,4 MPa ve 1,8 MPa olarak tespit edilmiştir.

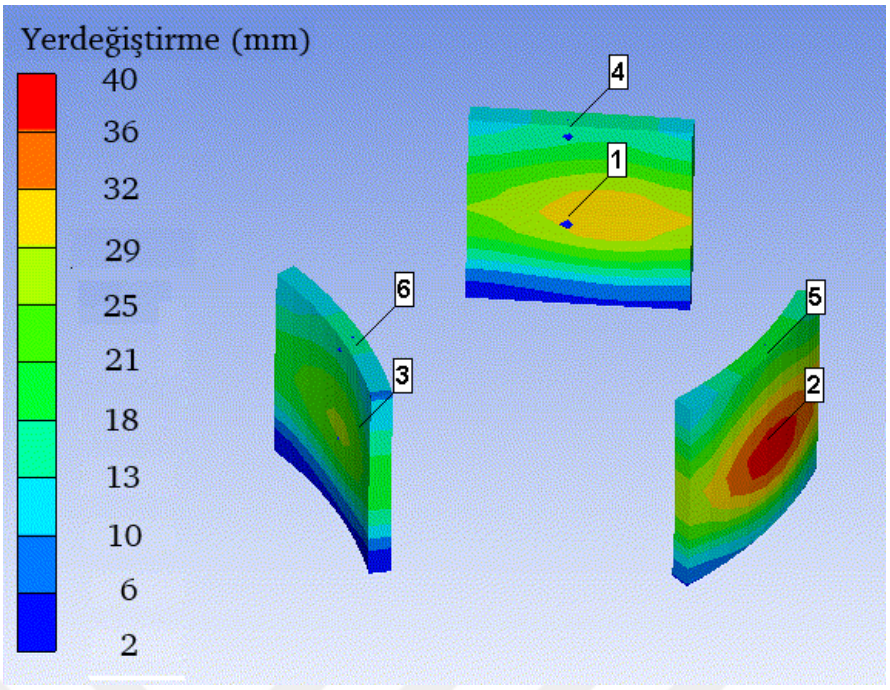
İçbükey ve dışbükey duvarların orta noktaları üzerinde oluşan basınç etkileri birbirine yakın değerler uluşturmakla birlikte, dışbükey duvar üzerinde oluşan basınç değeri daha yüksek olmasına rağmen, duvarın tepe noktasında oluşan basınç değerlerinde ise, içbükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.113 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği

4.7.4.12 Yerdeğiştirmeler

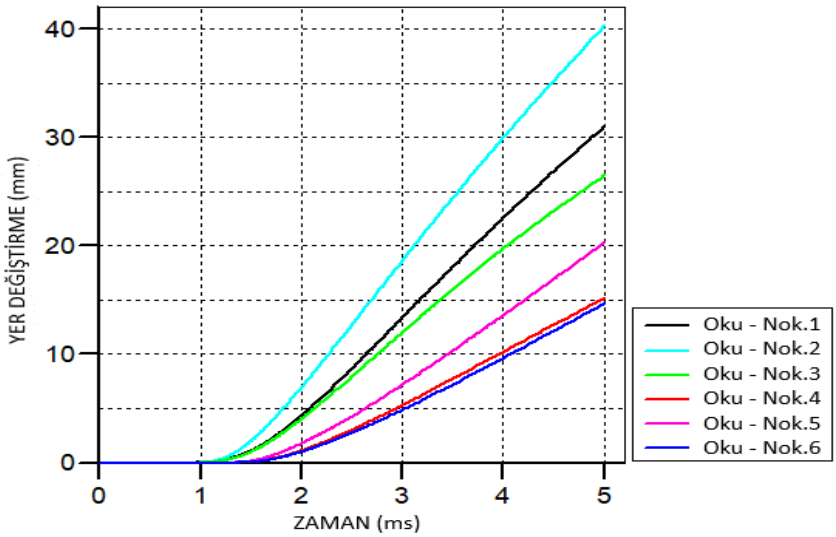
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait yerdeğiştirme kontur diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.114) içbükey duvar ve düz duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin en yüksek değerde buna karşın dışbükey duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. İçbükey duvar üzerinde yaklaşık 4,1 cm ve dış bükey duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme değerleri ise 2,6 cm'nin üzerine çıktığı fakat düz duvarda ise 3,1 cm mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.114 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları

Yerdeğiştirme değerleri grafik (Şekil 4.115) üzerinden incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 31 mm, 41 mm ve 26 mm olarak ölçülmüş olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 15 mm, 20 mm ve 15 mm olarak tespit edilmiştir.

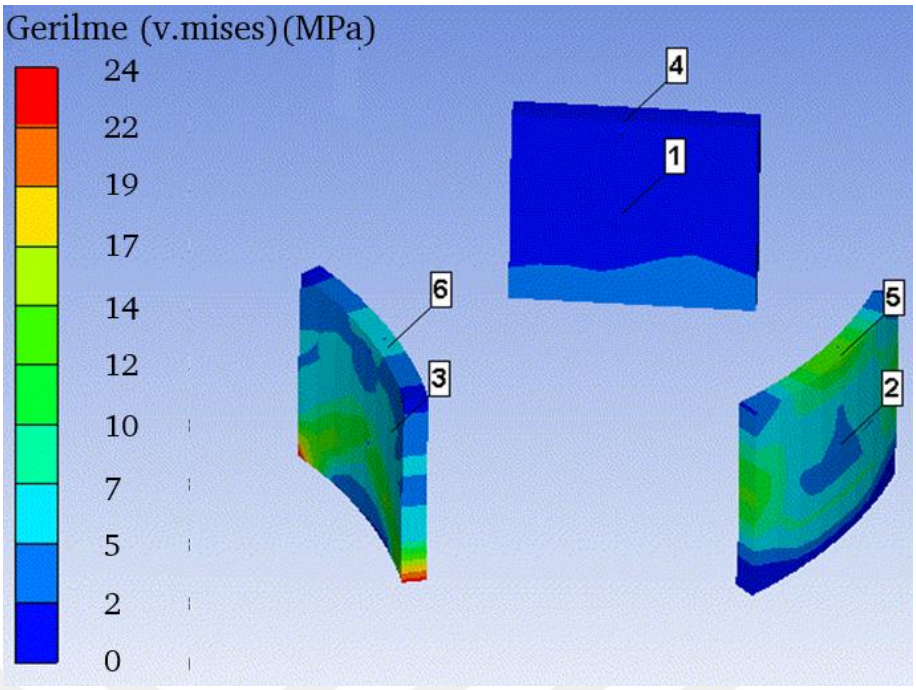
En büyük yerdeğiştirme değerlerinin; hem duvar ortası, hem de duvar tepe noktası için iç bükey duvar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Düz duvarda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin ise, iç bükey duvara yakın değerler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dışbükey duvar üzerinde ise, en küçük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.115 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği

4.7.4.13 Gerilmeler

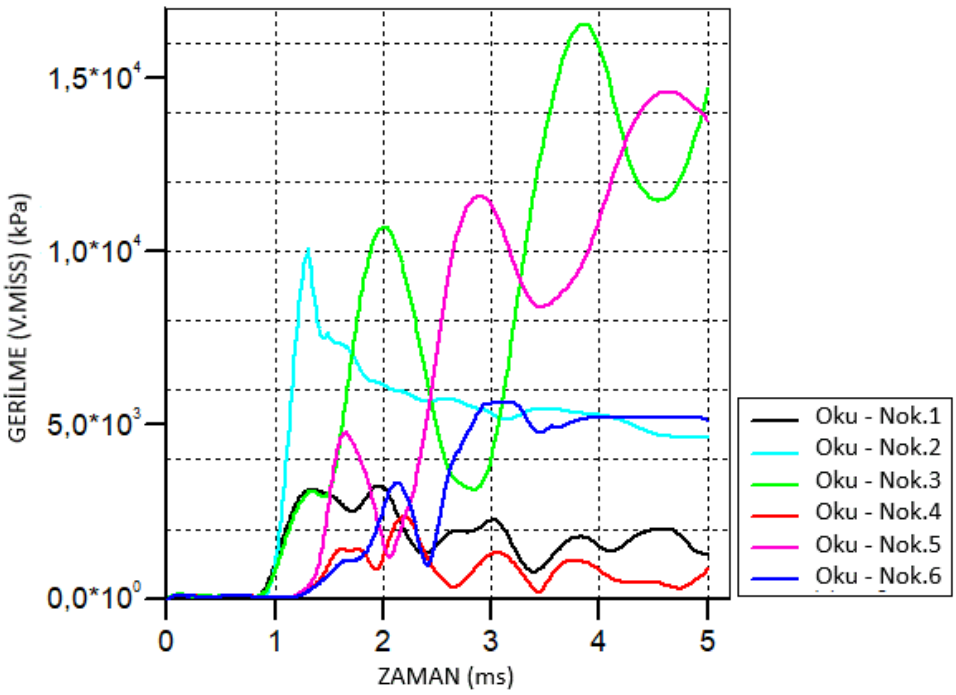
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait gerilme (von-mises) diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.116) en büyük gerilmenin içbükey duvar üzerinde oluştuğu ardından dışbükey duvarda da kayda değer gerilmelerin oluştuğu buna karşın düz duvarda ise, oluşan gerilmelerin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. İçbükey ve dışbükey duvar incelendiğinde ise; içbükey duvarın üst noktasında gerilmenin en büyük seviyeye ulaştığı ve kenar bölgelerde yüksek seviyelerde olduğu, buna karşın dışbükey duvarda ise en büyük gerilmenin duvarın orta noktasında oluştuğu, kenar ve üst bölgelerde daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.116 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları

Her üç duvar modeline ilişkin gerilme – zaman grafiği (Şekil 4.117) incelendiğinde ise, 1 nolu patlama modeline benzer bir davranış göstermekte olup, okuma noktaları üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 3,2 MPa, 10 MPa ve 16,5 MPa olarak ölçülmüştür olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 2,5 MPa, 15 MPa ve 5,8 MPa olarak tespit edilmiştir.

Duvarın orta noktasında en büyük gerilme değeri dışbükey duvar üzerinde oluşmuştur bu değeri iç bükey duvar takip etmekte olup duvarın tepe noktası ele alındığında ise; ilk 3 patlama modeline benzer bir şekilde, en büyük gerilme değeri içbükey duvar üzerinde oluşmuştur. Dışbükey duvar ve düz duvarın tepe noktasında oluşan gerilmeler ise daha küçük mertebededir.



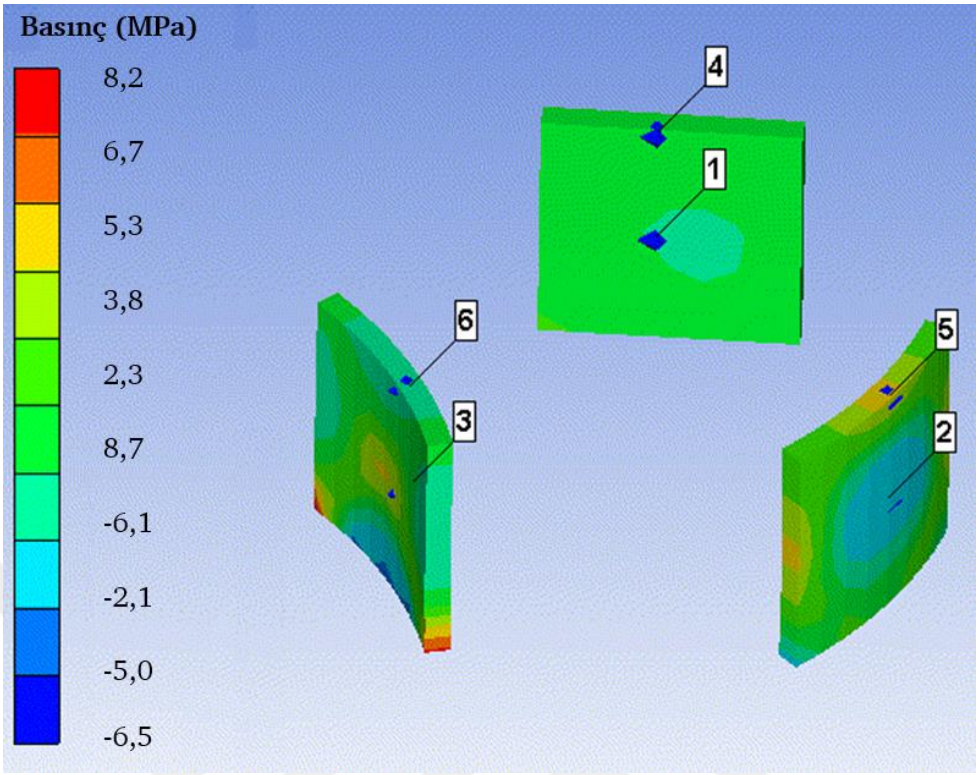
Şekil 4.117 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği

Patlama Durumu 5

Hazırlanan 5 nolu patlama modellerine göre, 3 beton duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilmiş, patlayıcı kütlesi ise 230 kg seçilmiş olup zeminde modellenmiştir. Asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye olarak ayarlanmıştır.

4.7.4.14 Patlama Basınçları

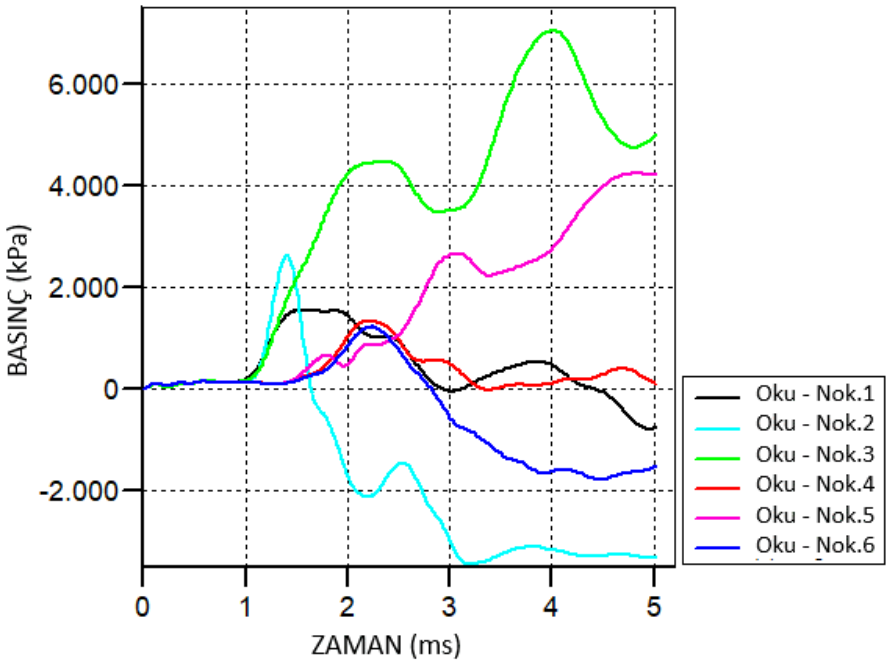
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.118) iç bükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerlerinin en yüksek değerde olduğu ve 2,5 MPa mertebesine ulaştığı, buna karşın dışbükey duvarda ise 6,7 MPa mertebelerinde olduğu, düz duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesinin ise en düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.118 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları

Bununla birlikte; basınç zaman grafikleri (Şekil 4.119) incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 1,5 MPa, 2,5 MPa ve 6,7 MPa olarak ölçülmüş olup duvarların üst noktalarında oluşan basınç değerleri ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 1,6 MPa, 4,2 MPa ve 1,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

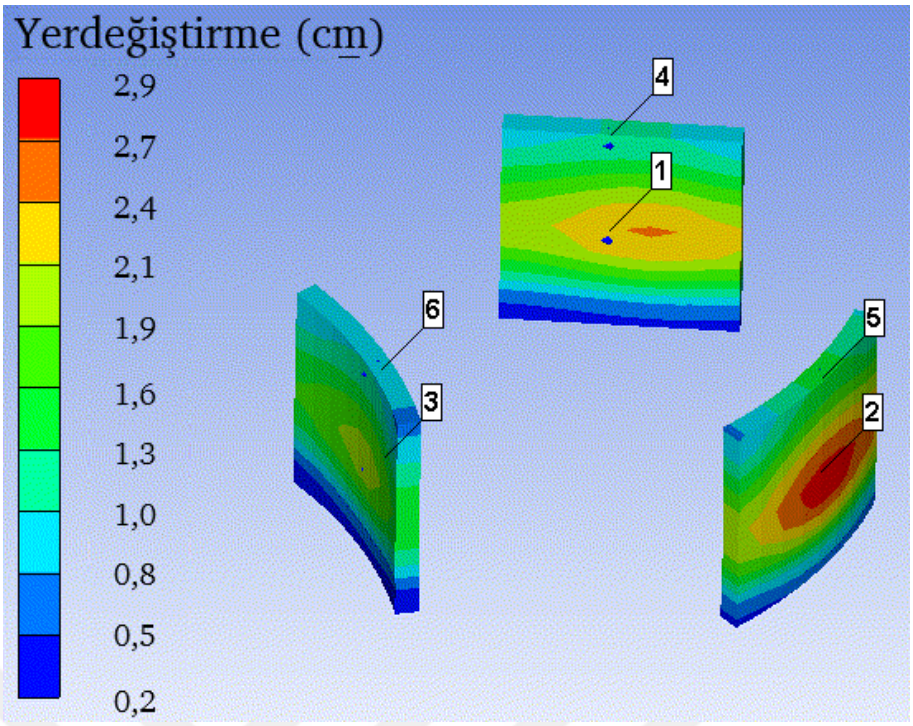
İçbükey ve dışbükey duvarların orta noktaları üzerinde oluşan basınç etkileri birbirine yakın değerler uluşturmakla birlikte, dışbükey duvar üzerinde oluşan basınç değeri daha yüksek olmasına rağmen, duvarın tepe noktasında oluşan basınç değerlerinde ise, içbükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.119 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği

4.7.4.15 Yerdeğiştirmeler

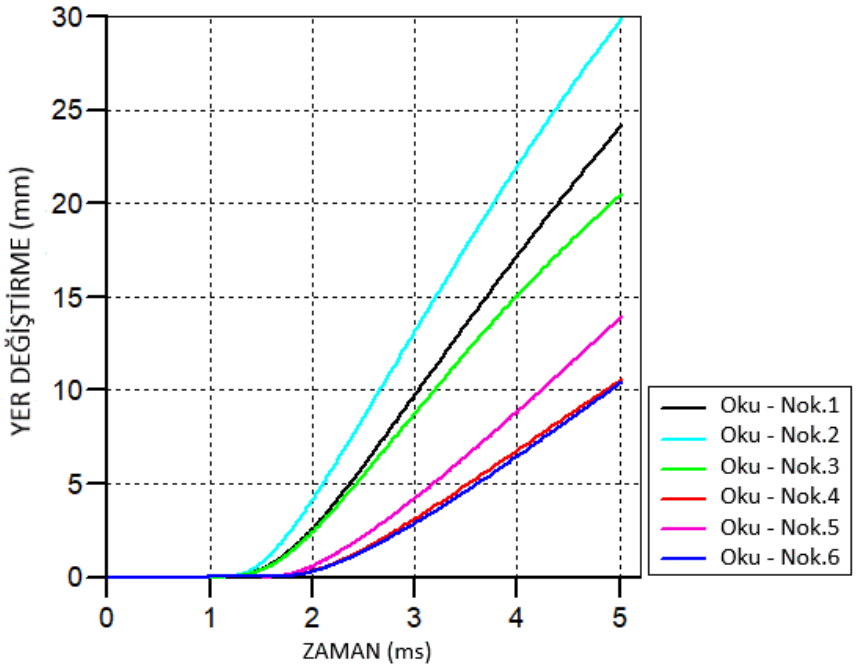
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait yerdeğiştirme kontur diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.120) içbükey duvar ve düz duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin en yüksek değerde buna karşın dışbükey duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. İçbükey duvar üzerinde yaklaşık 3 cm ve dış bükey duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme değerleri ise 2 cm'nin üzerine çıktığı fakat düz duvarda ise 2,4 cm mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.120 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları

Yerdeğiştirme değerleri grafik (Şekil 4.121) üzerinden incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 24 mm, 30 mm ve 20 mm olarak ölçülmüş olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 11 mm, 14 mm ve 11 mm olarak tespit edilmiştir.

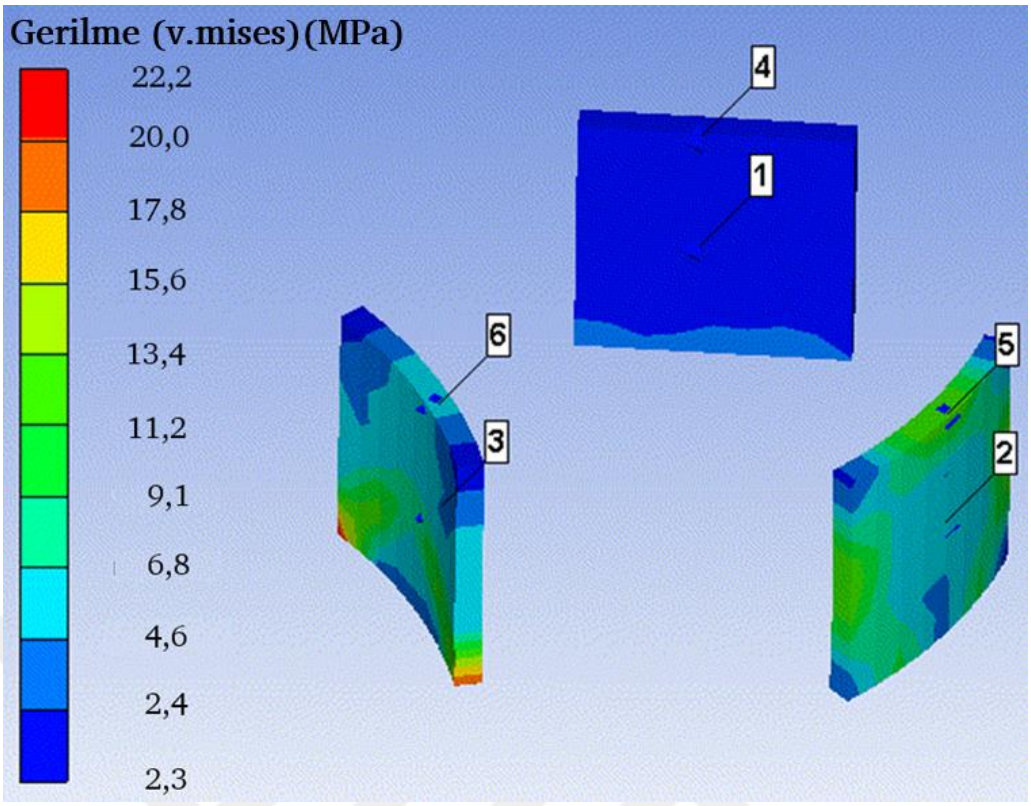
İlk 3 patlama modeline benzer bir şekilde; en büyük yerdeğiştirme değerlerinin; hem duvar ortası, hem de duvar tepe noktası için iç bükey duvar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Düz duvarda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin ise, iç bükey duvara yakın değerler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dışbükey duvar üzerinde ise, en küçük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.121 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği

4.7.4.16 Gerilmeler

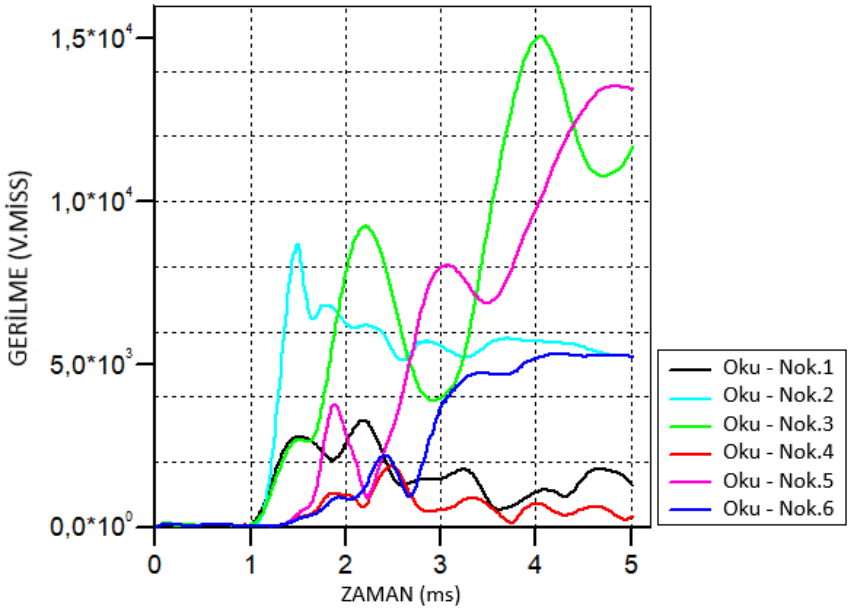
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait gerilme (von-mises) diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.122) en büyük gerilmenin içbükey duvar üzerinde oluştuğu ardından dışbükey duvarda da kayda değer gerilmelerin oluştuğu buna karşın düz duvarda ise, oluşan gerilmelerin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. İçbükey ve dışbükey duvar incelendiğinde ise; içbükey duvarın üst noktasında gerilmenin en büyük seviyeye ulaştığı ve kenar bölgelerde yüksek seviyelerde olduğu, buna karşın dışbükey duvarda ise en büyük gerilmenin duvarın orta noktasında oluştuğu, kenar ve üst bölgelerde daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.122 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları

Her üç duvar modeline ilişkin gerilme – zaman grafiği (Şekil 4.123) incelendiğinde ise, 1 nolu patlama modeline benzer bir davranış göstermekte olup, okuma noktaları üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 3,2 MPa, 8,7 MPa ve 15 MPa olarak ölçülmüştür olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 2 MPa, 13,5 MPa ve 5 MPa olarak tespit edilmiştir.

Duvarın orta noktasında en büyük gerilme değeri dışbükey duvar üzerinde oluşmuştur bu değeri iç bükey duvar takip etmekte olup duvarın tepe noktası ele alındığında ise; ilk 3 patlama modeline benzer bir şekilde, en büyük gerilme değeri içbükey duvar üzerinde oluşmuştur. Dışbükey duvar ve düz duvarın tepe noktasında oluşan gerilmeler ise daha küçük mertebededir.



Şekil 4.123 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği

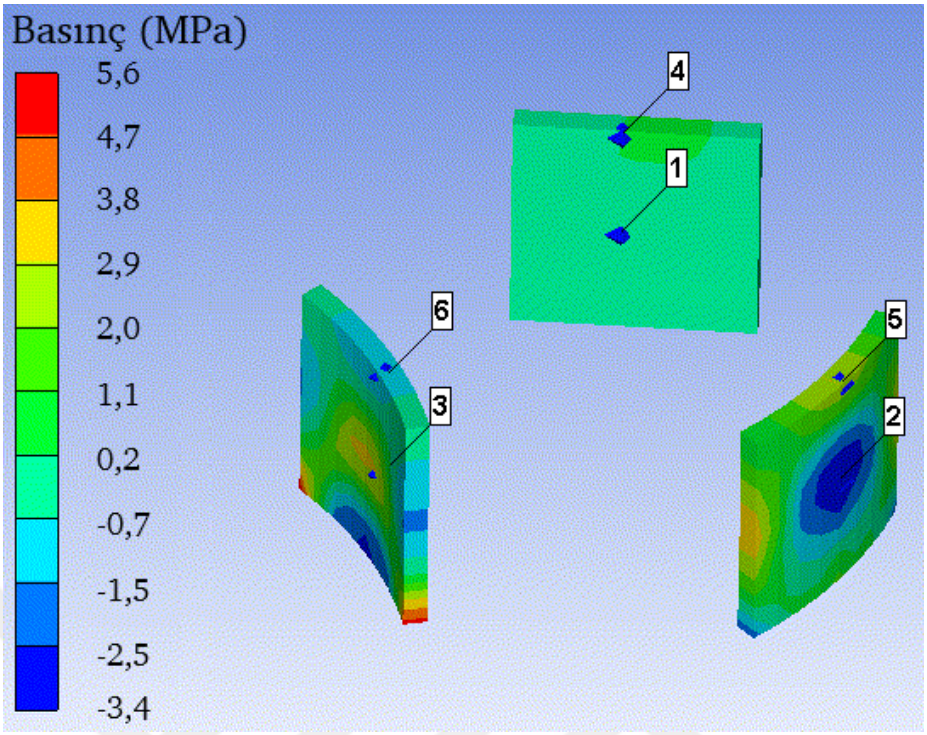
Patlama Durumu 6

Hazırlanan 6 nolu patlama modellerine göre, 3 beton duvar; dairesel yörünge üzerine yerleştirilmiş, patlayıcı kütlesi ise 105 kg seçilmiş olup zeminde modellenmiştir. Asal eksenleri arasındaki açı 120° olarak modellenmiş ve iç bükey ve dış bükey duvarların yay eğrilik yarıçapları ise 5,7 m olup patlama süresi ise 5 milisaniye olarak ayarlanmıştır.

4.7.4.17 Patlama Basınçları

Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait kontur diyagramları üzerinden basınç etkisi incelendiğinde (Şekil 4.124) iç bükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerlerinin en yüksek değerde olduğu ve 1,4 MPa mertebesine ulaştığı, buna karşın dışbükey duvarda ise 4,9 MPa mertebelerinde olduğu, düz duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesinin ise en düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

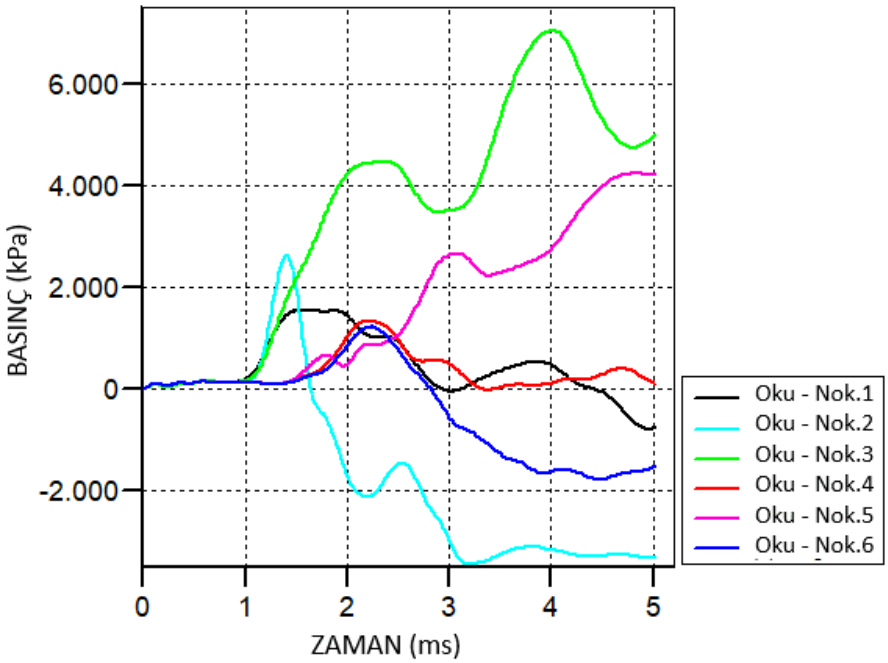
Duvarlar üzerinde oluşan bu basınç farklılığının sebebi olarak, eğrilik yarıçapından kaynaklı olarak patlama şok dalgasının yansıma yaparak içbükey duvar üzerinde oluşturduğu basınç etkisinin yükselmesi olarak tanımlanabilir. Buna karşın dış bükey duvarda ise eğrilik yarıçapından kaynaklı olarak, şok dalgasına daha yakın olmasından kaynaklı olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.124 Her üç duvar üzerinde oluşan basınç gerilmesi diyagramları

Bununla birlikte; basınç zaman grafikleri (Şekil 4.125) incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 0,9 MPa, 1,4 MPa ve 4,9 MPa olarak ölçülmüş olup duvarların üst noktalarında oluşan basınç değerleri ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 0,7 MPa, 3 MPa ve 0,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

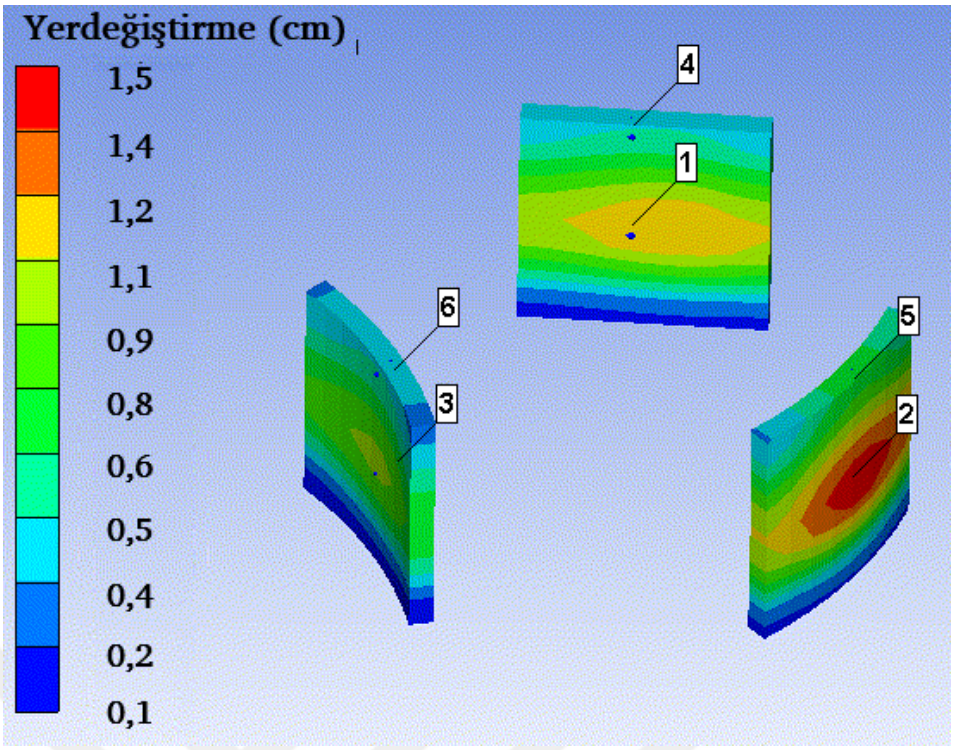
İçbükey ve dışbükey duvarların orta noktaları üzerinde oluşan basınç etkileri birbirine yakın değerler uluşturmakla birlikte, dışbükey duvar üzerinde oluşan basınç değeri daha yüksek olmasına rağmen, duvarın tepe noktasında oluşan basınç değerlerinde ise, içbükey duvar üzerinde meydana gelen basınç değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.125 Okuma noktaları için oluşan basınç – zaman grafiği

4.7.4.18 Yerdeğiştirmeler

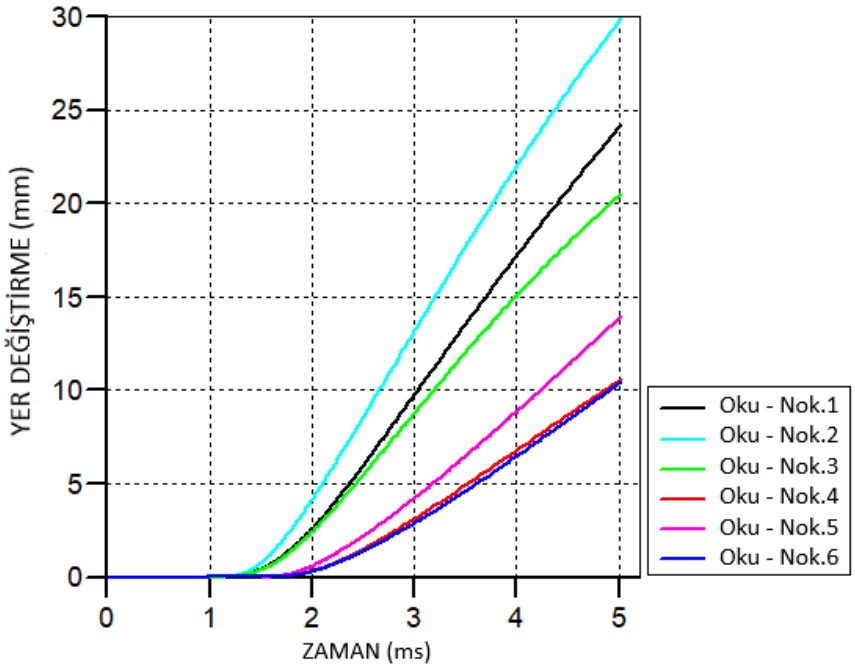
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait yerdeğiştirme kontur diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.126) içbükey duvar ve düz duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin en yüksek değerde buna karşın dışbükey duvar üzerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. İçbükey duvar üzerinde yaklaşık 1,45 cm ve dış bükey duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme değerleri ise 1 cm'nin üzerine çıktığı fakat düz duvarda ise 1,2 cm mertebelerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.126 Her üç duvar üzerinde oluşan yerdeğiştirme diyagramları

Yerdeğiştirme değerleri grafik (Şekil 4.127) üzerinden incelendiğinde ise; duvarların orta noktalarında oluşan en büyük basınç değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 24 mm, 30 mm ve 20 mm olarak ölçülmüş olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 11 mm, 14 mm ve 11 mm olarak tespit edilmiştir.

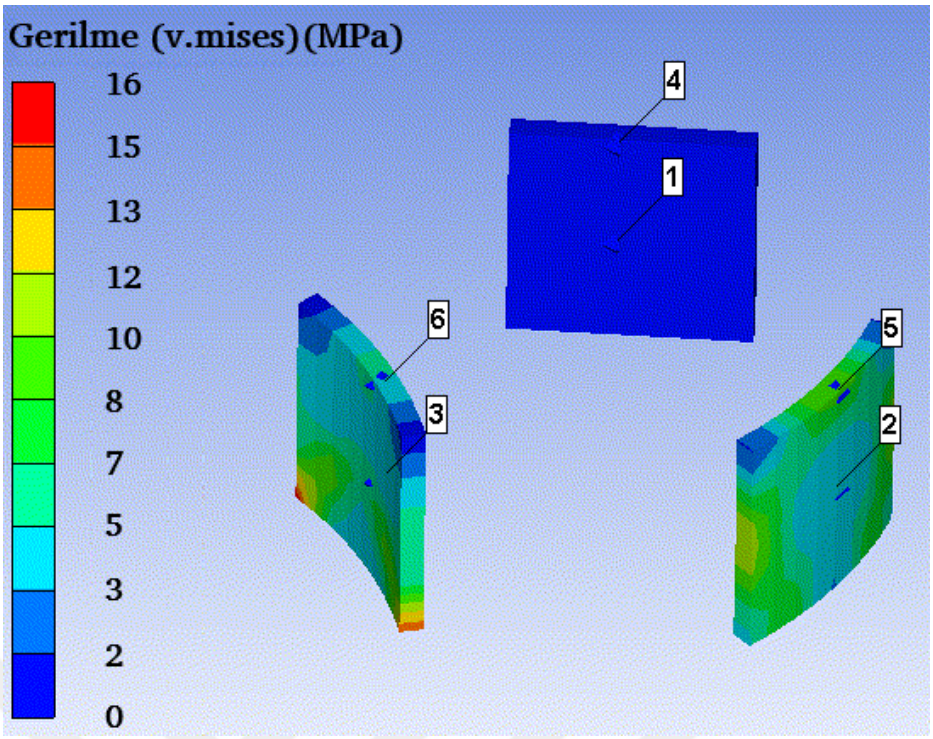
İlk 3 patlama modeline benzer bir şekilde; en büyük yerdeğiştirme değerlerinin; hem duvar ortası, hem de duvar tepe noktası için iç bükey duvar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Düz duvarda oluşan yerdeğiştirme değerlerinin ise, iç bükey duvara yakın değerler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Dışbükey duvar üzerinde ise, en küçük yerdeğiştirmelerin meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.127 Okuma noktaları için oluşan yerdeğiştirme grafiği

4.7.4.19 Gerilmeler

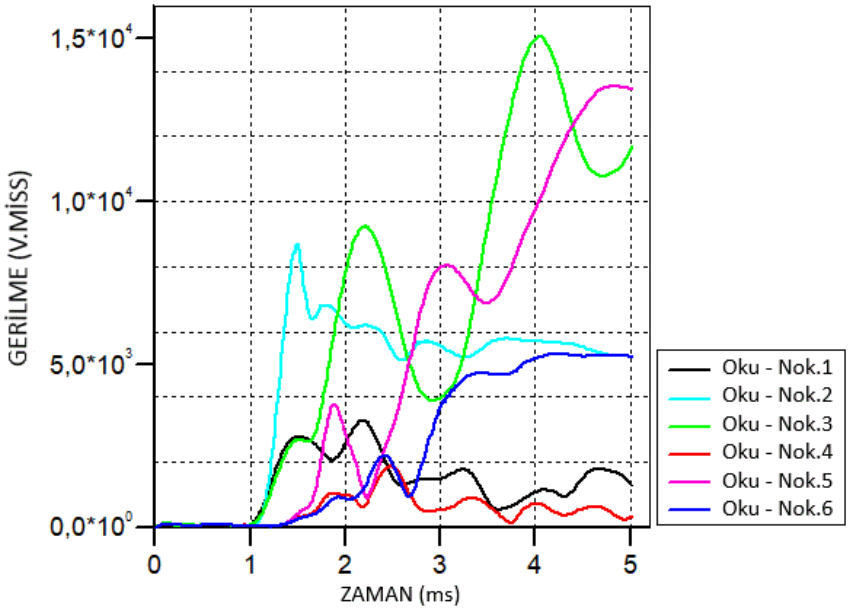
Patlama analizleri sonrası üç duvar modeline ait gerilme (von-mises) diyagramları incelendiğinde (Şekil 4.128) en büyük gerilmenin içbükey duvar üzerinde oluştuğu ardından dışbükey duvarda da kayda değer gerilmelerin oluştuğu buna karşın düz duvarda ise, oluşan gerilmelerin en düşük seviyede olduğu görülmektedir. İçbükey ve dışbükey duvar incelendiğinde ise; içbükey duvarın üst noktasında gerilmenin en büyük seviyeye ulaştığı ve kenar bölgelerde yüksek seviyelerde olduğu, buna karşın dışbükey duvarda ise en büyük gerilmenin duvarın orta noktasında oluştuğu, kenar ve üst bölgelerde daha düşük gerilme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.128 Her üç duvar üzerinde oluşan gerilme diyagramları

Her üç duvar modeline ilişkin gerilme – zaman grafiği (Şekil 4.129) incelendiğinde ise, 1 nolu patlama modeline benzer bir davranış göstermekte olup, okuma noktaları üzerinde oluşan en büyük gerilme değerleri sırasıyla (#1, #2 ve #3); 3,2 MPa, 8,7 MPa ve 15 MPa olarak ölçülmüştür olup, duvarın üst noktalarındaki okuma noktalarında ise sırasıyla (#4, #5 ve #6); 2 MPa, 13,5 MPa ve 5 MPa olarak tespit edilmiştir.

Duvarın orta noktasında en büyük gerilme değeri dışbükey duvar üzerinde oluşmuştur bu değeri iç bükey duvar takip etmekte olup duvarın tepe noktası ele alındığında ise; ilk 3 patlama modeline benzer bir şekilde, en büyük gerilme değeri içbükey duvar üzerinde oluşmuştur. Dışbükey duvar ve düz duvarın tepe noktasında oluşan gerilmeler ise daha küçük mertebededir.



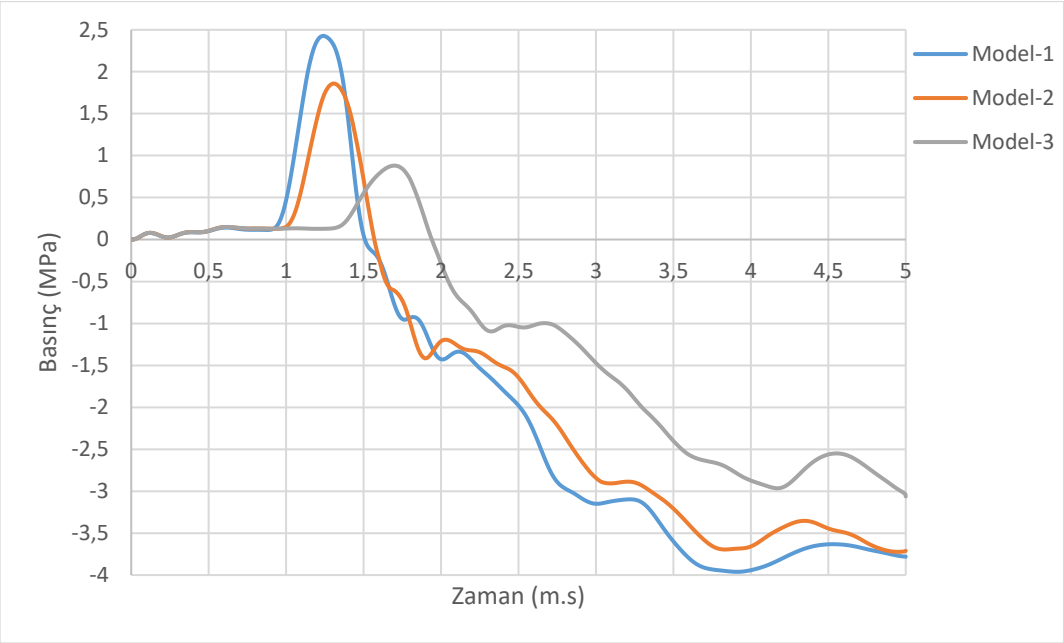
Şekil 4.129 Okuma noktaları için oluşan gerilme grafiği

4.7.5 İrdelemeler

Yapılan 6 patlama analizi sonrası duvar modelleri üzerine yerleştirilen okuma noktaları üzerinden parametrik karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre; basınç, yerdeğiştirme, gerilme ve etkin plastik şekil değiştirme parametreleri üzerinden okuma noktaları değerlendirilmiştir.

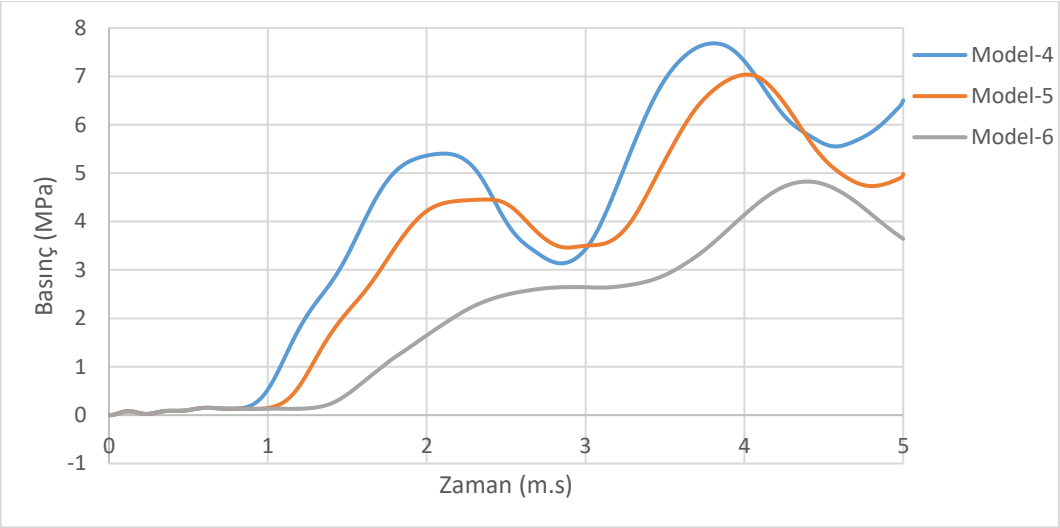
4.7.5.1 Patlama Basınçları

İlk 3 patlama modeli ele alındığında (yani patlayıcı malzemenin yerden 1,5 m yükseklikte konumlandığı patlama modeli) 2 numaralı okuma noktası (iç bükey duvarın orta noktası) ele alınmış olup en kritik noktanın iç bükey duvarda olduğu düşünülmüştür. İlk 3 patlama modeline göre 2 numaralı okuma noktasında oluşan patlama değerleri ise grafikte (Şekil 4.130) görülmektedir. Buna göre en büyük basınç değeri 1 nolu patlama modelinde oluşmakla birlikte ilk 2 patlama modelinde, en yüksek basınç değerine 1,2 – 1,3 ms aralığında ulaşmaktadır. Ancak 3 numaralı patlama modelinde en yüksek basınç değerine ise 1,75 ms'de ulaşmaktadır.



Şekil 4.130 Patlama basıncı grafiği (2 nolu okuma noktası)

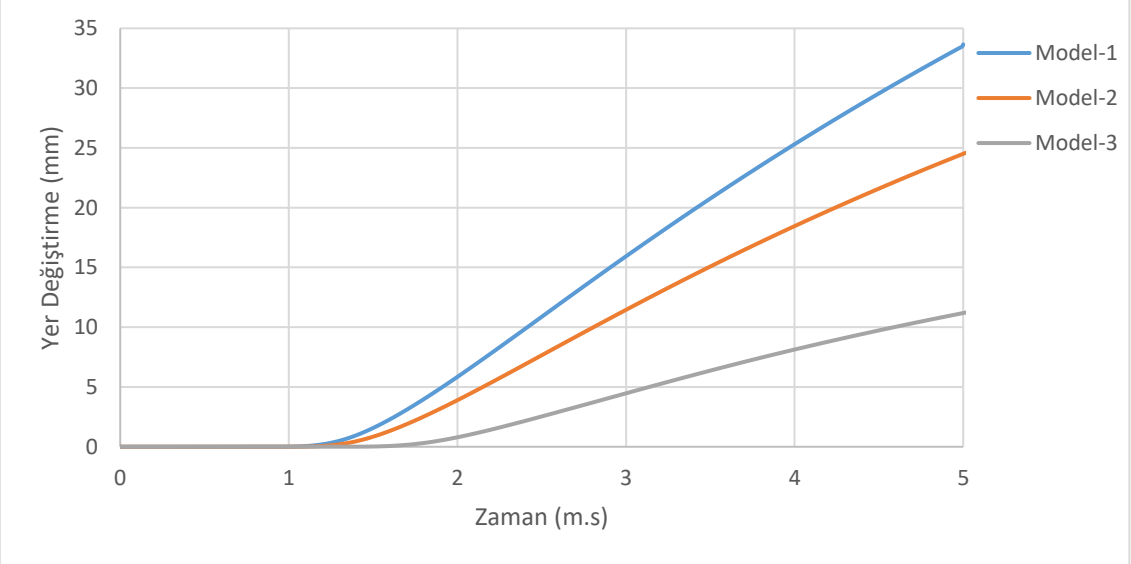
4, 5 ve 6 nolu patlama modelleri ele alındığında (yani patlayıcı malzemenin zeminde konumlandığı patlama modeli) 3 numaralı okuma noktası (dış bükey duvarın orta noktası) ele alınmıştır. 4, 5 ve 6 nolu patlama modellerine göre 3 numaralı okuma noktasında oluşan patlama değerleri ise grafikte (Şekil 4.131) görülmektedir. Buna göre en büyük basınç değeri 4 nolu patlama modelinde oluşmuş olup 5 numaralı patlama modelinde oluşan basınç davranışı 4 numaralı model ile benzerlik göstermektedir. Ancak 6 numaralı modelde ise basınç değerinin daha küçük olduğu görülmektedir. Burada gözlemlenen nokta ise; zeminde konumlanan patlayıcı modellerinde meydana gelen basınç değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.131 Patlama basıncı grafiği (3 nolu okuma noktası)

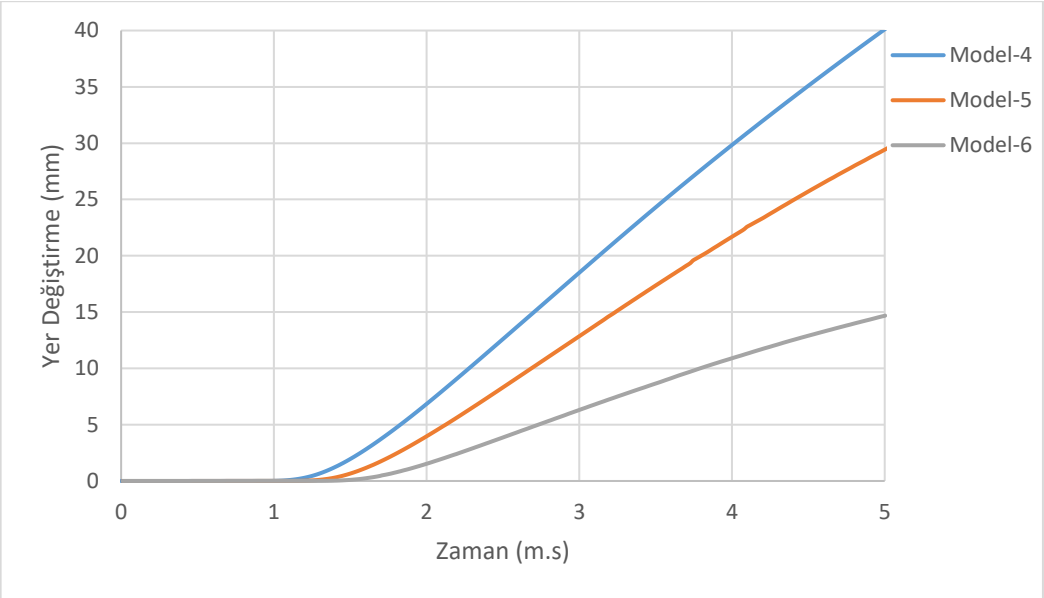
4.7.5.2 Yerdeğiştirmeler

İlk 3 patlama modeli ele alındığında (yani patlayıcı malzemenin yerden 1,5 m yükseklikte konumlandığı patlama modeli) 2 numaralı okuma noktası (iç bükey duvarın orta noktası) ele alınmış olup en büyük yerdeğiştirmenin iç bükey duvarda olduğu düşünülmüştür. İlk 3 patlama modeline göre 2 numaralı okuma noktasında oluşan yerdeğiştirmeler ise grafikte (Şekil 4.132) görülmektedir. Buna göre en büyük yerdeğiştirme değeri 1 nolu patlama modelinde oluşmuş olup bu sonucu 2 ve 3 numaralı patlama modelleri izlemektedir.



Şekil 4.132 Yerdeğiştirme grafiği (2 nolu okuma noktası)

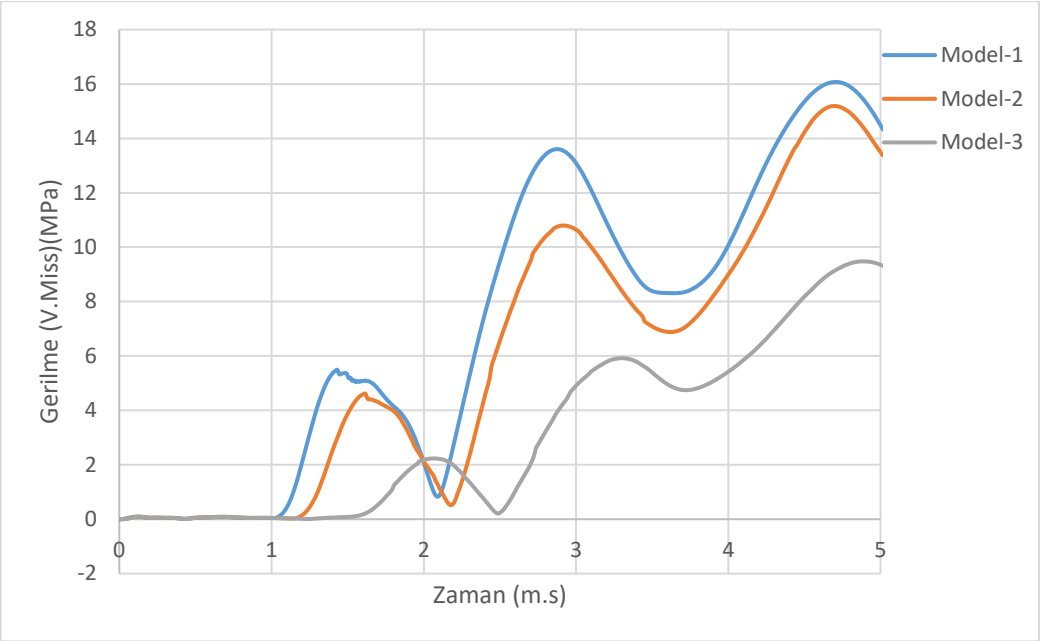
4, 5 ve 6 nolu patlama modelleri ele alındığında (yani patlayıcı malzemenin zeminde konumlandığı patlama modeli) 2 numaralı okuma noktası (iç bükey duvarın orta noktası) ele alınmıştır. 4, 5 ve 6 nolu patlama modellerine göre 2 numaralı okuma noktasında oluşan patlama değerleri ise grafikte (Şekil 4.133) görülmektedir. Buna göre en büyük yerdeğiştirme değeri 4 nolu patlama modelinde oluşmuş bu sonucu 5 ve 6 nolu patlama modelleri izlemektedir. Burada dikkat çeken nokta ise; zeminde konumlanan patlayıcı modellerinde meydana gelen yerdeğiştirmelerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.133 Yerdeğiştirme grafiği (2 nolu okuma noktası)

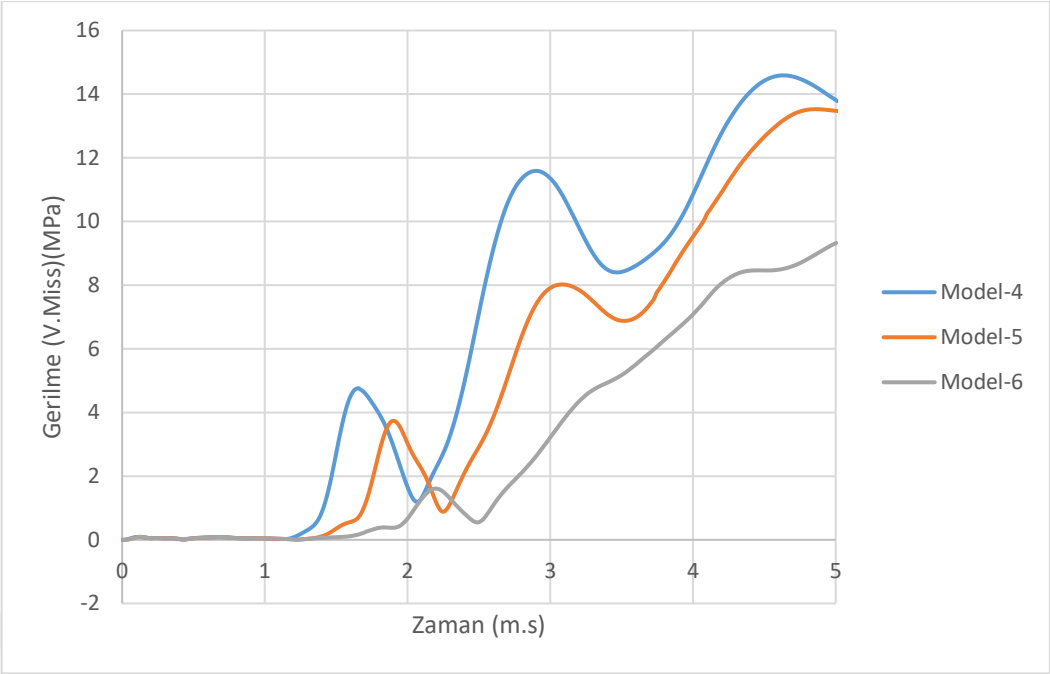
4.7.5.3 Gerilmeler

İlk 3 patlama modeli ele alındığında (yani patlayıcı malzemenin yerden 1,5 m yükseklikte konumlandığı patlama modeli) 5 numaralı okuma noktası (iç bükey duvarın tepe noktası) ele alınmış olup en büyük gerilme değerinin bu noktada olduğu gözlemlenmiştir. İlk 3 patlama modeline göre 5 numaralı okuma noktasında oluşan yerdeğiştirmeler ise grafikte (Şekil 4.134) görülmektedir. Buna göre en büyük gerilme değeri 1 nolu patlama modelinde oluşmuş olup bu sonucu 2 ve 3 numaralı patlama modelleri izlemektedir. 1 ve 2 numaralı patlama modellerinde oluşan gerilme davranışı benzer özellik göstermekte olup 3 numaralı patlama modelinde ise daha küçük gerilme değerleri meydana gelmiştir.



Şekil 4.134 Gerilme grafiği (2 nolu okuma noktası)

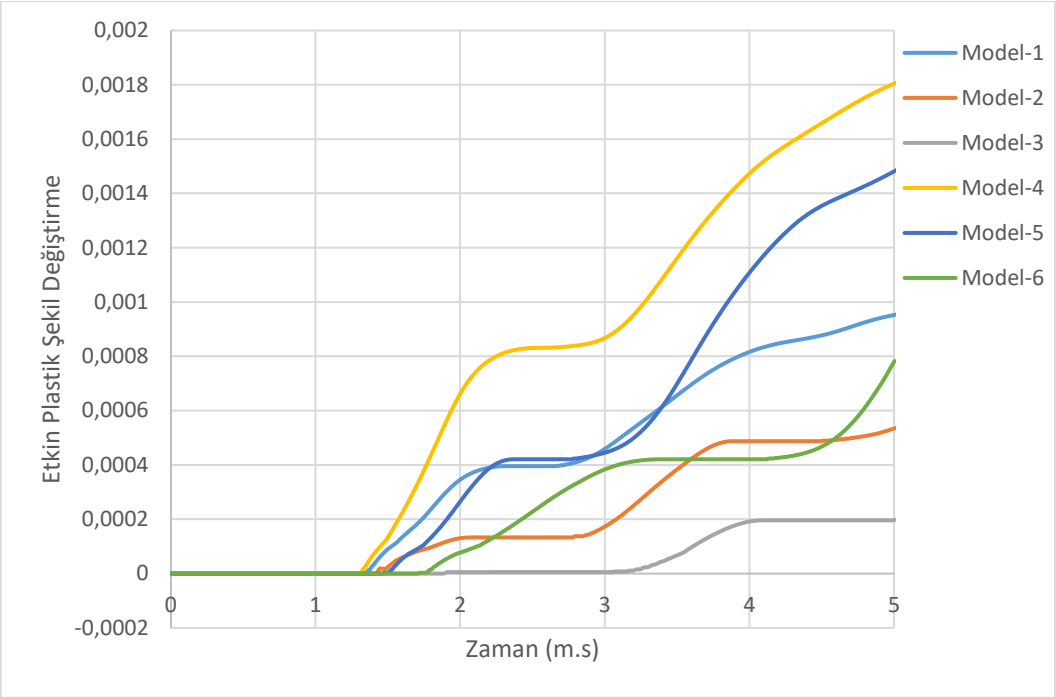
4, 5 ve 6 nolu patlama modelleri ele alındığında (yani patlayıcı malzemenin zeminde konumlandığı patlama modeli) 5 numaralı okuma noktası (iç bükey duvarın tepe noktası) ele alınmıştır. 4, 5 ve 6 nolu patlama modellerine göre 5 numaralı okuma noktasında oluşan gerilme değerleri ise grafikte (Şekil 4.135) görülmektedir. Buna göre en büyük gerilme değeri 4 nolu patlama modelinde oluşmuş bu sonucu 5 ve 6 nolu patlama modelleri izlemektedir. Burada dikkat çeken nokta ise; basınç ve yer değiştirme parametrelerinin aksine zeminde konumlanan patlayıcı modellerinde oluşan gerilme değerleri daha düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.135 Gerilme grafiği (2 nolu okuma noktası)

4.7.5.4 Etkin Plastik Şekil Değiştirme

Tüm patlama modeli incelendiğinde (6 patlama modeli) 2 numaralı okuma noktası (iç bükey duvarın orta noktası) ele alınmış olup en kritik şekil değiştirme değerinin bu noktada olduğu gözlemlenmiştir. Tüm patlama modeline göre 2 numaralı okuma noktasında oluşan plastik şekil değiştirmeler ise grafikte (Şekil 4.136) görülmektedir. Buna göre en büyük etkin plastik şekil değiştirme değeri 4 nolu patlama modelinde (patlayıcının zeminde konumlandırıldığı patlama modeli) oluşmuş olup bu sonucu 5 ve 1 numaralı patlama modelleri izlemektedir. 4 ve 5 numaralı patlama modellerinde oluşan plastik şekil değiştirme davranışı benzer özellik göstermekte olup en küçük şekil değiştirmeler 2 ve 3 numaralı patlama modelinde meydana gelmiştir.



Şekil 4.136 Etkin plastik şekil değiştirme grafiği (2 nolu okuma noktası)

4.7.6 Sonuçlar ve Değerlendirme

6 patlama modelinin ayrı ayrı 3 duvar üzerinde meydana getirdiği etkiler incelendiğinde;

- Basınç etkisi; içbükey ve dışbükey duvar üzerinde yüksek değerde meydana gelmiş olup düz duvar üzerinde daha düşük değer meydana gelmiştir.
- Yerdeğiştirme etkisi incelendiğinde; en büyük değerler sırasıyla içbükey ve düz duvar üzerinde meydana gelmiş olup, dışbükey duvar üzerinde daha düşük yerdeğiştirme meydana gelmiştir.
- Her üç duvarda oluşan gerilmeler incelendiğinde ise, duvarın orta noktasında en büyük gerilme dışbükey duvarda oluşmuş ardından en büyük gerilme içbükey duvarda meydana gelmiştir. Düz duvarda ise görece daha küçük gerilmeler meydana gelmiştir. Duvarın tepe noktası incelendiğinde ise, bu defa en büyük gerilme içbükey duvarda ardından dışbükey duvar üzerinde meydana gelmiştir.

- Yapısal davranışlar incelendiğinde ise; içbükey ve dışbükey duvar üzerinde plastik bölgeler meydana gelmiş olup, düz duvarın ise elastik davrandığı tespit edilmiştir.
- Zeminde konumlandırılan patlama modellerinde basınç, yerdeğiştirme ve etkin plastik şekil değiştirme değerleri daha büyük sonuçlar vermiştir.
- Gerilme değerleri incelendiğinde ise; zeminden 1,5 m kotunda konumlandırılan patlama modellerinde meydana gelen sonuçların daha yüksek olduğu görülmektedir.

Dr. Baker [113] tarafından yapılan çalışma çerçevesinde, yapıların geometrik özelliklerinin patlama etkisi karşısında avantaj ya da dezavantaj sağlayıp sağlayamayacakları araştırılmış buna göre dışbükey geometriye sahip bir yapının patlama yükü karşısında avantaj sağlayacağı tespit edilmiştir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; patlamaların mühendislik yapıları üzerindeki etkileri, yapısal ve yapısal olmayan elemanlar dikkate alınarak araştırılmıştır. Bu kapsamda; öncelikli olarak patlama yükünün davranış modeli araştırılmış olup patlama yükü ile ilgili literatürde kabul gören standartlar detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bu kapsamda patlayıcı çeşitleri, dönüşüm çizelgeleri, patlama yükü yaklaşık davranış diyagramları incelenerek, patlama yükünün teorisi net bir şekilde ortaya konulmaya özen gösterilmiştir.

14. yüzyıldan beri farklı araştırmacılar tarafından ortaya konulan ve patlama basıncı hesabını gösteren ampirik bağıntılar incelenmiş olup en yaygın kullanılanları incelenerek, tez çalışmasında yer almıştır. Yapılan bu teorik çalışmalara ek olarak, bilgisayar yazılımlarından da faydalanılmıştır. Bu kapsamda incelenen mühendislik yapılarının bilgisayar yazılım ortamında (ANSYS Workbench) üç boyutlu modeli (katı model) oluşturulmuş, yine bir diğer bilgisayar yazılımı olan ANSYS AUTODYN yazılımında da akışkan hava modeli ve patlama analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, farklı mühendislik yapılarının patlama yükü karşısındaki davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda; deneysel çalışma olarak hazırlanan bir yüksek lisans tezi ele alınmış ve yapılan çalışma bilgisayar yazılımında modellenerek analiz sonuçları ve yapılan teorik hesaplamalar, deneysel çalışma ile karşılaştırılmış olup sonuçlar irdelenmiştir. Buna göre donatı sıklaştırması ile kuşatma etkisi artırılarak ile süneklik düzeyi yüksek hale getirilen betonarme kolonun, süneklik düzeyi sınırlı betonarme kolona göre yer değiştirme değerleri ve patlama basıncı altındaki gerilme değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiş olup süneklik düzeyi yüksek kolonun daha güvenli olduğu görülmüştür.

İncelenen ikinci çalışmada, betonarme istinat duvarı modelidir. Bu çalışmaya göre, patlama yüküne maruz bırakılan ve 330 tonluk bir kum kütlesi etkisi alındaki

bir betonarme istinat duvarı modeli araştırılmıştır. Buna göre; irdelemesi yapılan AUTODYN analizleri, UFC 3-340-02 standardı ve ampirik bağıntılardan elde edilen sonuçlar ışığında, bazı sonuçların büyük Z değerinde uyumlu olduğu buna karşın bazı sonuçların ise küçük Z değerinde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yine de analiz yapılırken ANSYS AUTODYN yazılımı ve UFC 3-340-02 standardının en güncel ve yaygın yöntemler olduğu söylenebilir.

Üçüncü çalışmada irdelenen yapı, üç farklı kütlede patlayıcıya maruz bırakılan iki katlı betonarme bir binadır. Bu kapsamda kolonlar, kirişler, döşemeler ve duvarların patlama yükü karşısındaki davranışları incelenmiştir. Buna göre patlayıcı etkisi altındaki yapı; yerdeğiştirme, gerilme ve yapısal davranış bakımından irdelenmiş olup patlayıcının yakın çevresinde bulunan yapı elemanlarına yıkıcı hasar verdiği bununla birlikte duvarların parçalandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, döşemeye uyguladığı itme etkisiyle ikinci kat kolonlarında çok yüksek gerilme meydana getirmiştir.

Dördüncü çalışmanın konusu, üç açıklıklı bir betonarme köprü modeli incelenmiş olup TNT tipi patlayıcı malzeme kolon ayağına bitişik olarak konumlandırılmış olup köprünün davranışı araştırılmıştır. İnfilik eden patlayıcının etki ettiği kolon ayağı ve temel bölgesi beton elelmanının tamamen parçalandığı, şok dalgasının köprü kirişlerini etkilemesede, kolon ayağında meydana gelen parçalanma etkisinin tüm köprüyü etkileyecek derecede olduğu tespit eedilmiştir.

Beşinci çalışma, beton ağırlık barajının, mansap bölgesine konumlandırılan patlayıcı etkisi altındaki davranışları, hidrostatik etki altındaki davranışları ile karşılaştırılarak araştırılması konu alınmıştır. Mansap bölgesinde, beton gövdeye 20 m uzaklıkta konumlandırılan patlayıcı, barajda yıkıcı etki oluşturmasa da, bu çalışmada barajlar gibi kritik öneme yapıların patlama etkisi altında irdelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Altı nolu çalışmada ise, beş katlı bir betonarme binanın temel kolonları altına yerleştirilen TNT tipi patlayıcılar ile yapının kontrollü yıkım mekanizması araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre, beş katlı yapı; giriş katında iç kolonlara ve perde duvarda meydana gelen patlamanın, iki nolu patlama modelinde gerçekleşen ve

dış kolonlarada meydana gelen patlama etkisine göre daha fazla etkilenerek hasar aldığı tespit edilmiştir.

Son çalışma olan yedi nolu çalışmada ise, üç farklı betonarme duvar tipi (iç bükey, dış bükey ve düz) ele alınmış olup bu duvarların tam ortasına yerleştirilen farklı kütleli patlayıcılar ile duvarların tepkileri araştırılmıştır. Yapılan parametrik çalışma ile sonuçlar üzerinde değerlendirmeler yapılmış olup iç bükey duvarda meydana gelen etkilerin beklendiği gibi en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Buna göre, yapılan bu tez çalışması kapsamında ortaya çıkan sonuçlar ve öneriler neticesinde;

Patlama yükü standartları çerçevesinde; çalışma yapılan mühendislik yapısına etkiyen patlayıcı türü ne olursa olsun, önce patlayıcı türünün TNT eşdeğerinin belirlenerek eşdeğer TNT patlayıcı malzemesine dönüştürülmesi gerekmektedir. Yapılan bu eşdeğer dönüşümün ardından, ilgili patlama analizleri yapılabilir.

Faydalanılan bilgisayar yazılımlarında (ANSYS Workbench) açık yöntem (explicit dynamics) kullanılmıştır. Kullanılan bu modül, patlama analizleri gibi yüksek hassasiyet isteyen çözümleri hassasiyetle yapabilen bir çözüm algoritmasına sahiptir. Bilgisayar yazılım programları ile yapılan analizlerde (ANSYS ve AUTODYN yazılımları), önce sonlu eleman modeli (Lagrange model) oluşturulup, ağ tasarımının yapılması gerekmektedir. Ardından Euler model için AUTODYN yazılımı üzerinde oluşturulan akışkan modelin de ağ tasarımının yapılması gerekmektedir. Ancak dikkat edilmesi gereken husus, Lagrange modelin birim ağ uzunluğu, Euler modelin birim ağ uzunluğundan büyük olması gerekmektedir. Sebep olarak ise, Lagrange – Euler kuvvet aktarımlarının doğru bir şekilde gerçekleşmesi olarak açıklanabilir.

Patlama analizi için bilgisayar yazılımı ile (ANSYS ve AUTODYN) hazırlanan ve sonlu eleman modeline etki edecek TNT patlayıcı malzemenin modellenmesine müteakip, patlayıcıya tanımlanacak fitilin (detonation), patlayıcı malzeme hacminin tam ortasına yerleştirilmesi gerekmektedir bu nedenden ötürü, patlayıcı şok dalgaları düzgün küresel bir şekilde yayılabilir.

Patlama yükü davranışı araştırmalarının bilimsel olarak başlangıcı, 20. yüzyılın başlarına tekabül eder. Bu süreçte, günümüze kadar, araştırmacılar farklı matematiksel ifadelerle açıkladıkları ampirik (deneye dayalı) formüller önermişlerdir. Bu önermelerin yanında, patlama yükü parametreleri ve yapısal davranış ile ilgili standart çalışmaları da yapılmıştır. Bunlardan tüm dünya üzerinde en yaygın olarak kullanılanları; Amerika Birleşik Devletleri Ordusu tarafından 1990 yılında yayımı yapılan TM 5-1300 ve yine Amerika Birleşik Devletleri Ordusu tarafından hazırlanan ve bu yayının [2] güncel ve geçerli hali olan UFC 3-340-02 yayımlanmış olup tüm dünyada araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. (hatta bazı ülkelerin hazırladığı patlama standartları, TM 5-1300 ve UFC 3-340-02 standartlarını baz almıştır.)

Patlama yükünün hesaplanmasına yönelik olmak üzere; araştırmacılar tarafından yüz yıl kadar önce çalışmalar başlamıştır, bu çalışmalar; deneysel uygulamaların neticesinde oluşturularak ampirik formüllere dayanmaktadır. Yapılan bu ampirik formül çalışmalarından, günümüzde kabul gören çalışmalara kadar; patlama yükünün kati davranışı modeli net olarak ortaya konulamamıştır: buna sebep olarak ise; basınç değerlerinin çok yüksek olması, iyi bir davranış modelinin olmaması, ani ve yüksek basınçtan dolayı oluşan kırılmalar olarak tanımlanabilir. Patlama süresi ise; yapı içinde gerçekleştiği durumlarda 3 – 5 milisaniye mertebesinde gerçekleşirken, açık hava patlamalarında ise 50 milisaniye mertebelerine kadar çıkabilir.

- Deneysel modelde yapılan araştırmaya göre kolonlarda uygulanan etriye sıklaştırması (süneklik düzeyi yüksek kolon), patlama yükü karşısında yapının daha güvenli olmasını sağlarken, etriye sıklaştırması uygulanmayan kolon modeli süneklik düzeyi sınırlı kolon), daha fazla enerji soğurmaktadır. Ayrıca; süneklik düzeyi yüksek kolonun yerdeğiştirme değerlerinin daha düşük, süneklik düzeyi yüksek kolonun ise daha büyük yerdeğiştirmelere sahip olduğu ortaya çıkmıştır.
- Betonarme istinat duvarı modelinde arkasında bulunan kum kütlesi, patlama yükü etkisiyle duvar gövdesinde meydana getirmesi muhtemel büyük deplasmanların oluşmasını büyük ölçüde engellemektedir.

- Betonarme bina modellerinde, patlayıcı malzemenin infilak etmesiyle birlikte yakın olduğu kiriş ve döşemeleri +Y (yerçekiminin aksi yönünde) çalışmaya zorlayarak elemanların hasar almasına neden olmaktadır.
- Oluşan patlama dalgası köprü kirişlerine ulaşamasa da kolonun alt noktasında oluşturduğu yüksek basınç sebebiyle, bu sanat yapısının zaman içerisinde çevresel etkilerin de etkisiyle yıkılabileceği düşünülmektedir.
- Beş katlı betonarme binada toplam patlayıcı kütlesi değiştirilmese de, birinci patlama modelinde dış kolonlar parçalansa da, yapının ortasında bulunan ve merdiven boşluğunu saran betonarme perdelerin yapıyı taşımaya devam ettiği ancak ikinci patlamada ise yapının iç bölgesinde bulunan kolonlar ve betonarme perdelerin parçalanması ile binanın yıkılmasına sebep olacağı düşünülmektedir.
- Yapılan parametrik çalışma olan 3 betonarme duvar modelinde ise, iç bükey duvarın, patlama etkisi karşısında elverişsiz olduğu, buna karşın dış bükey ve düz duvarın ise patlama etkisi karşısında daha dirençli yapılar olduğu gözlemlenmiştir.
- Mühendislik yapıların hesaplarında (statik, deprem, dinamik, titreşim vb.) yapı davranışını belirlemek amacıyla modal analiz ile kullanılırken; patlama yükü hesabında modal analiz kullanılamamaktadır. Buna sebep olarak; patlama yükü yapının yalnızca bir bölümüne direkt olarak etki ettiğinden dolayı yapının modal titreşimlerini belirlenmesi doğru bir sonuç vermemektedir.
- Patlama yükü hesabı, günümüzde olası kazalar (kazan dairesi, doğalgaz odası, enerji bölmesi patlamaları) ve terörist saldırılara karşı taşıyıcı sistemlerin, insanların, çevrenin ve hayvanların güvenliğini artırmak ya da patlamanın yapıya ulaşmamasının sağlanması üzerine yapılmaktadır. Bununla birlikte, ömrünü tamamlayan yapıların kontrollü yıkımı (ekonomik ve zaman kazanımı) için araştırılmaktadır.
- Patlayıcı malzemenin infilak etmesiyle ortaya çıkan enerji yapı elemanları tarafından soğurulsa da, en yüksek derecede soğurma hava tarafından gerçekleşmektedir.

- Patlamanın yapıya ve yapı elemanlarına etkilerinin daha detaylı bir şekilde araştırılmasına yönelik; ileri göçme analizi (progressive collapse), karşılaştırmalı deneysel çalışmalar yapılabilir.

Mühendislik yapıları; gerek kamu binası gibi insan yaşamını muhafaza eden, sanat yapısı gibi ekonomik olarak maliyetli olup ulaşım konusunda kritik öneme sahip olan ya da baraj gibi stratejik olarak yüksek öneme sahip yapıların patlayıcı etkisine karşı güvenli olmaları gerekmektedir.

Bu nedenle; kamu binalarında bulunan; enerji bölümlerinde (elektrik, doğalgaz, kazan dairesi vb.) yüksek teknoloji cihaz, makine ve teçhizatlar tercih edilmeli, bakım ve onarımları aksatılmadan yapılmalı, olası yangın ya da kazalara karşı emniyet durumları daima ön planda tutulmalıdır.

Sanat yapıları gibi ulaşım konusunda önemli yapılar ise; çöp toplama merkezi gibi yapılardan; doğalgaz hattı, petrol boru hattı vb. gibi enerji hatlarından veya patlama yükü oluşturacak ortamlardan uzak tutulmalıdır.

Barajlar, depoladıkları devasa miktarda su ile stratejik yapılardan birisidir. İnşası ise dikkat ve titizlikle yapılmalı, tasarımlarında patlama yükü dâhil edilmelidir. Aksi takdirde baraj gövdelerinde meydana gelebilecek çatlak, barajın yıkılmasına, oluşacak taşkının ise, çevresindeki yerleşim yerlerinin, yolların ve fabrikaların yıkılmasına, insanların ve hayvanların ise yaşamlarını yitirmelerine sebep olabilir.

Patlama yükünün, mühendislik yapılarının hesaplarına dâhil edilmesi ekonomik olmayabilir ancak bazı kamu binaları, kritik sanat yapıları ve stratejik barajların projelendirilmesi sırasında, patlama yükü hesaplara dâhil edilebilir.

Patlama yükü ise yapının sadece bir bölümünde ve hacimsel etkir, sadece bu bölüm civarındaki elemanlar direnir. Yapısal elemanlar yukarı doğru etkiyen bir yüke de maruz kalır [47].

Sonuç olarak; patlama yükü altında yapı farklı davranış gösterir. Deprem güvenlikli yapı aynı zamanda patlama güvenlikli olayabilir, patlama etkileri için özel önlemler alınması gerekir [47].

KAYNAKÇA

[1] UFC 3-340-02, "Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", Department of Defense, USA, 2008.

[2] TM 5-1300, “Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions”, U.S. Departments of the Army, Navy and Air Force, USA, 1990.

[3] DOE/TIC-11268, “Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading for Structures”, U.S. Department of Energy, Washington, 1992.

[4] ESLTR-87-57, “Protective Construction Design Manual”, Air Force Engineering and Services Center, 1989

[5] TM 5-855-1, “Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons” U.S. Department of the Army, 1986.

[6] DAHS CWE, “The Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects” U.S. Departments of the Army, 1998.

[7] ASCE, “Structural Design for Physical Security—State of the Practice Report” U.S. Departments of the Army, 1995.

[8] FEMA 426, “To Migrate Potential Terrorist Attacks against Buildings” www.fema.gov 2003.

[9] FEMA 427, “For Design of Commercial Buildings to Migrate Terrorist Attacks” www.fema.gov” 2003.

[10] G. C. Mays and P. D. Smith, "Blast Effects on Buildings," 2nd Edition American Society of Civil Engineers, London, ISBN-10: 0727720309, pp: 121. 1995.

[11] J. E. Shepherd, “Structural Response to Explosions,” 1st European Summer School on Hydrogen Safety University of Ulster, USA, 2007.

[12] D. O. Dusenberry, “Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings,” USA, ISBN: 978-0-470-17054-0. 2010.

[13] Çalışma ve Sosyal Güvelik Bakanlığı, “Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Çalışanların Korunması Hakkındaki Yönetmelik” Sayı: 28633, 2013

[14] N. Eğri, “Patlayıcı Ortamlarda İş Güvenliği” Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvelik Bakanlığı, 2008

[15] B. Hopkinson and C. Cranz, “Cube Root Scaling Law” www.structuremag. org/?p=2601structural-damage-and-occupant-safety-risks-due-to-explosive-blast-loading, 1915.

[16] E. Yandzio and M. Gough, “Protection of Buildings against Explosions” Steel Construction Institute, 1999.

[17] H. L. Brode, “Numerical Solution of Spherical Blast Waves,” Journal of Applied Physics, 26(6), 766-775. 1955

[18] N. M. Newmark and R. J. Hansen, “Design of Blast Resistant Structures”, Shock and Vibration Handbook, Vol.3, Eds. Harris & Crede, McGraw-Hill, New York. 1961

[19] C. A. Mills, “The Design of Concrete Structures to Resist Explosions and Weapon Effects”, Proceedings of the 1st Int. Conference on Concrete for Hazard Protections, Edinburgh, UK. 1987.

[20] J. M. Biggs, “Introduction to Structural Dynamics,” McGraw Hill, 1964.

[21] J. Henrych, “The Dynamics of Explosion and Its Use”, Developments in atmospheric science”, Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.

[22] C. N. Kingery, and G. Bulmash, “Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Burst”, Technical Report ARBRL-TR-02555: AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. 1984.

[23] G. F. Kinney and K. J. Graham, "Explosive Shocks in Air”, Springer Publishing Company, Berlin, Germany, 1985.

[24] M. A. Sadovskiy, “Mechanical Effects of Air Shockwaves from Explosions according to Experiments”, In Sadovskiy M.A. Selected Works: Geophysics and physics of explosion. Nauka Press, Moscow, 2004.

[25] S Glasstone and P. J. Dolan, “The Effects of Nuclear Weapons” United States Department of Defense, United States Department of Energy, 1977.

[26] A. Remennikov and T.A. Rose, “Modelling Blast Loads On Buildings In Complex City Geometries” Computers and Structures 83, 2197–2205, 2005

[27] R. Garwin “Nuclear Explosion in the Atmosphere” 1963.

[28] N. Birnbaum, N. Francis and B. Gerber, “Coupled Techniques for the Simulation of Fluid-Structure and Impact Problems” Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences. 6(3-4), 295-311, 1999.

[29] J. A. Zukas, “Introduction to Hydrocodes” Elsevier, Boston, 2004.

[30] D. Youngs, “Time-Dependent Multi-material Flow with Large Fluid Distortion” Numerical Methods for Fluid Dynamics, pp273-285, 1982.

[31] ANSYS LS-DYNA, Swanson Analyses Systems, Ansys Inc. USA, 2016.

[32] W.F. Noh, “CEL: A Time-Dependent, Two-Space-Dimensional, Coupled Eulerian-Lagrangian Code” Methods in Computational Physics, Volume 3, Fundamental Methods in Hydrodynamics, Academic Press, New York, NY, pp. 117-179, 1964.

[33] S. L. Hancock, “PISCES 2DELK Theoretical Manual” PISCES International b.v., Groningenweg 6, 2803 PV Gouda, The Netherlands, August, 1985.

[34] R. L. Panton, “Incompressible Flow” JohnWiley and Sons, New York, NY, pp. 554-559, 1984.

[35] D. J. Benson, “Computational Methods in Lagrangian and Eulerian Hydrocodes,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 99:235-394, 1992.

[36] L. Olovsson, “On the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method”, Linköping Studies in Technology, Dissertation No. 635, Linköpings University, Linköping, Sweden, 2000.

[37] J. O. Hallquist, “LS-DYNA Theoretical Manual”, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, May, pp. 24.1 - 24.5, 1998.

[38] C. T. Vaughan, G. C. Bessette and R. L. Bell, “Personal Communication”, November 8, 2001.

[39] K. G. Budge, “An Evaluation of Various Approaches to Simulating Hard/Soft Interactions”, Draft Technical Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1995.

[40] K. H. Brown, R. H. Summers, M. W. Glass, A. S. Gullerud, M.W. Heinstein and R.E. Jones, “ACME Algorithms for Contact in a Multiphysics Environment, API Version 1.0”, Technical Report SAND2001-3318, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2001.

[41] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta and J. Ramsay, “Blast Loading and Effects on Structures – An Overview,” EJSE Special Issue: Loading on Structures, 76-91. 2007.

[42] H. Draganić and V. Sigmund, ”Blast Loading on Structures” Djelovanje eksplozija na konstrukcije. ISSN 1330-3651 UDC/UDK 624.01.04:662.15. 2012

[43] Z. Koccaz, F. Sütçü, N. Torunbalcı, “Architectural and Structural Design for Blast Resistant Buildings”, the 14th World Conference on Earthquake Engineering, China. 2008.

[44] C. Vijayaraghavan, D. Thirumalaivasan and R. Venkatesan, “A Study on Nuclear Blast Overpressure on Buildings and Other Infrastructures Using Geospatial Technology,” Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India. 2012.

[45] M. D. Goel, “Blast: Characteristics, Loading and Computation—An Overview,” 10.1007/978-81-322-2190-6_36, 2015.

[46] A. M. Remennikov, “A Review of Methods for Predicting Bomb Blast Effects on Buildings,” 2003.

[47] A. Topçu, “Yapılarda Patlama Hasarlarını Azaltıcı Önlemler” Osmangazi Üniversitesi, 2011.

[48] T. S. Kieval, “Structural Blast Design" Washington University, St. Louis, USA, 2002.

[49] S. N. Kazi and P. V. Muley, “Analysis of Blast Resistant RCC Structure” International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 04, Issue. 11, Nov. 2017.

[50] K. Ackland, H. Bornstein and D. Lamos. “An Analysis of TNT Equivalencies Using AUTODYN,” Journal of Explosion Engineering, vol. 1, no. 3, p. 80-88. 2012.

[51] L. J. Van der Meer, “Dynamic Response of High-Rise Building Structures to Blast Loading” Eindhoven University of Technology, 2008.

[52] N. N. Moon, “Prediction of Blast Loading and Its Impact on Buildings,” Master of Technology in Civil Engineering Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, 2009.

[53] V. Karlos, M. Larcher, and G. Solomos, “Analysis of the Blast Wave Decay Coefficient in the Friedlander Equation Using the Kingery-Bulmash Data,” Tech. Rep. JRC94784, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2015.

[54] A. T. Toy and B. Sevim, "Structural Response of Two-Storey Reinforced Concrete Building Under Blasting Effects". Celal Bayar University Journal of Science 12, 419-426, 2016.

[55] G. Fairlie “The Numerical Simulation of High Explosives using AUTODYN-2D & 3D. Explo’98, Institute of Explosive Engineers 4th Biannual Symposium, 1998.

[56] P. Svantesson “Simulations of the Response of Concrete Structures Subjected To Air Blasts,” Faculty of Engineering (LTH). Lund, Lund University, Sweden. Master's Thesis. 2013.

[57] H. R. Nicholls, F. J. Charles and W. I. Duvall, “Blasting Vibrations and Their Effects on Structures” U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1971.

[58] E. Gad, J. L. Wilson, A. Moore and A. B. Richards. “Effects of Mine Blasting on Residential Structures.” Journal of Performance of Constructed Facilities 19, 222-228. 2005.

[59] R. Nateghi, “Prediction of Ground Vibration Level Induced by Blasting at Different Rock Units,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences - Int J Rock Mech Mining Sci. 48. 899-908. 10.1016/j.ijrmms. 2011.04.014. 2011.

[60] NCHRP Report 645, “Blast-Resistant Highway Bridges: Design and Detailing Guidelines” National Cooperative Highway Research Program, 2010.

[61] K. Marchand, E. Williamson and D. G. Winget. “Analysis of Blast Loads on Bridge Substructures.” Sustainability 15 (2004): 151-160, 2004.

[62] J. Wei, R. Quintero, N. Galati, A. Nanni, “Failure Modeling Of Bridge Components Subjected to Blast Loading Part I: Strain Rate-Dependent Damage Model for Concrete,” Int J Concrete Structure Mater, 1, pp. 19-28, 2007.

[63] R. Quintero, J. Wei, N. Galati and A. Nanni, “Failure Modeling of Bridge Components Subjected to Blast Loading Part II: Estimation of the Capacity and Critical Charge,” Int J Concrete Structure Mater, 1, pp. 29-36, 2007.

[64] J. Son and A. A. Asl, “Blast Resistance of Steel Orthotropic Bridge Decks,” Journal of Bridge Engineering, 17. 589-598. 10.1061, (ASCE) BE.1943-5592.0000283, 2012.

[65] S. Fujikura, M. Bruneau and D. L. Garcia, “Experimental Investigation of Blast Performance of Seismically Resistant Concrete-Filled Steel Tube Bridge Piers” Technical Report MCEER-07-0005, University of Bufalo, State University, 2007

[66] R. B. Deng and J. L. Xian, “Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads,” WSEAS Transactions on Computers, 8, 2009.

[67] Z. Yi, A. K. Agrawal, M. Ettouney and S. Alampalli, “Blast Load Effects on Highway Bridges. II: Failure Modes and Multihazard Correlations,” Journal of Bridge Engineering, 9, 1-12, 2014.

[68] T. B. Birhane, “Blast Analysis of Railway Masonry Bridges” Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions, University of Minho, Portugal, Master's Thesis. 2013.

[69] A. De and T. Zimmie, “Centrifuge Modeling of Surface Blast Effects on Underground Structures,” Geotechnical Testing Journal. 30. 427-431. 10.1061/40803(187)208, 2007.

[70] R. Ambrosini and B. Luccioni “Craters Produced by Explosions on the Soil Surface,” Journal of Applied Mechanics-transactions of The Asme - J Appl Mech. 73. 10.1115/1.2173283, 2006.

[71] Y. Han and H. Liu, “Failure of Circular Tunnel in Saturated Soil Subjected to Internal Blast Loading,” Geomechanics and Engineering, 11(3), 521-428, 2016.

[72] J. Olarewaju, N. S. V. K. Rao and M. A. Mannan “Design Hints for Buried Pipes to Resist Effects of Blast,” Proceedings of The Indian Geotechnical Conference (Geotrendz), Bombay, India, pp. 881-884, 2010.

[73] Y. Y. Ren, L. Zhang and F. Han “Dynamic Load Analysis of Underground Structure under Effect of Blast Wave. Applied Mathematics and Mechanics,” 27. 1281-1288. 10.1007/s10483-006-0916-y, 2006.

[74] K. Anil and Y. Zhihua “Blast Load Effects on Highway Bridges” Region 2 University Transportation Research Center, 2009.

[75] V. Karlos and G. Solomos, “Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components,” Administrative Arrangement No JRC 32253-2011 with DG-HOME Activity A5, Blast Simulation Technology Development, 2013.

[76] P. Acosta, “Overview of UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions,” 1454-1469. 10.1061/41171(401)127, 2011.

[77] A. Bayraktar, T. Türker, A. C. Altunışık and B. Sevim, “Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, Iss. 5, pp.310-319, 2010.

[78] A. T. Toy and B. Sevim, “Numerically and Empirically Determination of Blasting Response Of A RC Retaining Wall Under TNT Explosive,” Advances in Concrete Construction, Vol. 5, No. 5, 493-512, 2017.

[79] B. Sevim and A. T. Toy, "Structural Response of Concrete Gravity Dams under Blast Loads," Advances in Concrete Construction, vol.9, pp.503-510, 2020.

[80] A. T. Toy and B. Sevim "Blast Effects on the Structural Response of a Highway Bridge," Istanbul Bridge Conference, 2016.

[81] G. R. Tripathy, R. R. Shirke and M. Kudale, “Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study,” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 8. 10.1016/j.jrmge.2015.10.007, 2016.

[82] A. Alia and M. Souli. “High Explosive Simulation Using Multi-Material Formulations,” Applied Thermal Engineering, Elsevier, 26, pp.1032-1042, 2006.

[83] D. Ambrosini, B. Luccioni and R. Danesi, “Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface.” Mec´anica Computacional Vol. XXIII, pp. 571-590 23, 2003.

[84] A. Cheeseman, S. Wolf, C. F. Yen and R. Skaggs, “Blast Simulation of Explosives Buried in Saturated Sand” Fragblast. 10. 1-8. 10.1080/13855140500432045, 2006.

[85] J. An, C. Tuan, B. Cheeseman and G. Gazonas, George, “Simulation of Soil Behavior under Blast Loading,” International Journal of Geomechanics. 11. 323-334. 10.1061/ (ASCE) GM.1943-5622.0000086, 2011.

[86] V. H. Balden and G. N. Nurick, "Numerical Simulation of the Post Failure Motion of Steel Plates subjected to Blast Loading," International Journal of Impact Engineering, Volume 32, Issues 1-4, pp 14-34, 2005.

[87] Y. Lu, “Underground Blast Induced Ground Shock and Its Modeling Using Artificial Neural Network,” Journal of Computers and Geotechnics, 32, 164-178, 2005.

[88] Y. Lu, “Modelling Of Concrete Structures Subjected to Shock and Blast Loading: An Overview and Some Recent Studies” Structural Engineering and Mechanics, Vol. 32(2) 235-249, 2009.

[89] I. D. Elgy, D. J. Pope and I.M. Pickup, “A Study of Combined Particle and Blast Wave Loading of Structures,” Journal de Physique IV (Proceedings), Vol.134, Issue 1, pp.467-471, 2006.

[90] M. Grujicic, B. Pandurangan and B. Cheeseman, “The Effect of Degree of Saturation of Sand on Detonation Phenomena Associated With Shallow-Buried and Ground-Laid Mines” J. Shock Vib., 13, 41–61, 2006.

[91] M. Grujicic, B. Pandurangan, Y. Huang, B. Cheeseman, W. Roy and R. Skaggs, “Impulse Loading Resulting from Shallow Buried Explosives in Water-Saturated Sand” Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part L-journal of Materials-design and Applications - Proc Inst Mech Eng L-J Mater. 221. 21-35. 10.1243/14644207jmda96, 2007.

[92] F. Wang, Y. K. M. Wan, O. Y. K. Chong, C. H. Lim and E. T. M. Lim, “Reinforced Concrete Slab Subjected to Close-In Explosion,” 7. LS-DYNA

Anwenderforum, Bamberg, Verschiedene Anwendungen I, J-I-(21-28), 2008.

[93] F. Siba, “Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation,” Master of Applied Science, Carleton University Ottawa, Ontario, 2014.

[94] R. D. Ambrosini, B. M. Luccioni, R. F. Danesi, J. D. Riera and M. M. Rocha, “Size of Craters Produced By Explosive Charges on or Above the Ground Surface,” Shock Waves 12, 69–78, 2002.

[95] A. Ambrosini and B. Luccioni, “Craters Produced by Explosions above the Soil Surface,” Mec´anica Computacional 27, 2253–2266, 2007,

[96] R. J. Swinton and D. M. Bergeron, “Evaluation of a Silent Killer, the PMN Anti-Personel Blast Mine,” DSTO-TR-1582, AR-013-112, Technical report, 2004.

[97] S. L. Hlady, “Effect of Soil Parameters on Land Mine Blast. 18 th Int. Symp. Military Aspects Blast Shock (MABS18),” Bad Reichenhall, Germany, 2004.

[98] P. W. Cooper, “Comments on TNT Equivalence”, 20th International Pyrotechnics Seminar, 1994.

[99] P. W. Cooper, “Explosives Engineering”, Wiley-VCH, New York, 1996.

[100] H. Patton and S. Taylor, “Analysis of Lg Spectral Ratios from NTS Explosions: Implications for the Source Mechanisms of Spall and the Generation of Lg Waves,” Bull. Seism. Soc. Am. 85, 1995.

[101] S. Formby and R. Wharton, “Blast Characteristics and TNT Equivalence Values for Some Commercial Explosives Detonated at Ground Level”, Journal of Hazardous Materials - J HAZARD MATER. 50. 183-198. 10.1016/0304-3894 (96)01791-8, 1996.

[102] S. Fujikura, M. Bruneau, and D. Lopez-Garcia, “Experimental Investigation of Multihazard Resistant Bridge Piers Having Concrete-Filled Steel Tube Under Blast Loading”, Journal of Bridge Engineering, vol. 13, no. 6, pp. 586–594, 2008.

[103] K. Kandil, M. Nemir, E. Ellobody and R. Shahin, “Implicit and Explicit Analysis of the Response of Blast Loaded Reinforced Concrete Slabs,” World Journal of Engineering and Technology. 02. 211-221. 10.4236/wjet.2014.23023, 2014.

[104] J. Li, H. Hao, “A Simplified Numerical Method for Blast Induced Structural Response Analysis,” International Journal of Protective Structures. 5. 323-348. 10.1260/2041-4196.5.3.323, 2014.

[105] B. Vangipuram, Md. A. J. Sharief, B. B. Sandeep and S. Baraik, “Behaviour of Reinforced Concrete Structural Members under the Influence of Implicit Blast Loading,” International Journal of Civil Engineering and Technology 10(7), 2019, pp. 349-358, 2019.

[106] F. G. Friedlander, “The Diffraction of Sound Pulses. I. Diffraction by a Semi-Infinite Plane” Proc R. Soc. Lond. A, 186: 322-344, 1946.

[107] A. Sarı “Betonarme Döşemelerde Patlama Deneyleri and Analizi” İnşaat Mühendisleri Odası, MEslekiçi Seminerleri, 2018.

[108] A. Sari, T. E. Mathew and J. Montoya, “Assessment of Modular Metal Building for Blast Loads”, Safe Haven Enterprises, Inc. Baker Risk Project No. 01-01272-001-05, San Antonio, 2005.

[109] A. Sari, M. Whitney and W. Sawruk, “Blast Analysis and Retrofit of Structures in Industrial Facilities” Structures Congress 2009. 1-13. 10.1061/41031(341)229. 2009.

[110] A. Sari and D. Barker, “Blast Response of Portable Buildings in Petrochemical Facilities” Structures Congress 2008. 1-10. 10.1061/41016(314)176. 2008.

[111] Url-1 www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/4b43c082500a6fb_ek.pdf (06.07.2019)

[112] Url-2 www.cumhuriyet.com.tr/haber/bursada-dogalgaz-patlamasi 1094786, 2018. (15.02.2016

[113] W. Baker, “Explosions in Air,” University of Texas Press, Austin, Texas, USA, 1973.

[114] ANSYS Workbench, Swanson Analyses Systems, Ansys Inc. USA, 2016.

[115] ANSYS AUTODYN, Swanson Analyses Systems, Ansys Inc. USA, 2016.

[116] Url-3 www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/ brochure/ ansys-explicit-dynamics-brochure-140.pdf (07.08.2015)

[117] Url-4 www.academia.edu/35674245/ANSYS_Explicit_Dynamics_and_ AUTODYN _ Applications (07.08.2015)

[118] U. M. Ascher, S. J. Ruuth and R. J. Spiteri, “Implicit-Explicit Runge-Kutta Methods for Time-Dependent Partial Differential Equations,” Appl Numer Math, vol. 25(2-3), 1997

[119] L. Pareschi and G. Russo, “Implicit-Explicit Runge-Kutta Schemes for Stiff Systems of Differential Equations,” Recent Trends in Numerical Analysis, Vol. 3, 269-289, 2000

[120] J. H. A. Ruwan Jayasooriya, "Vulnerability and Damage Analysis of Reinforced Concrete Framed Buıldıngs Subjected to Near Field Blast Events" Doctor of Philosophy Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2010.

[121] A. Wiśniewski and A. L. Tomaszewski “Analysis of Penetration Depth with the use of AUTODYN 5 Programme” Problemy Techniki Uzbrojenia. - 2009, nr 2, s. 47-56, 2009.

[122] Url-5 https://analizsimulasyon.com/mesh-cozum-agi/ (08.09.2020)

[123] P. Sherkar, A. S. Whittaker and A. J. Aref, "Modeling the Effects of Detonations of High Explosives to Inform Blast-Resistent Design" Earthquake Engineering to Extreme Events, Technical Report MCEER-10-0009, issn 1520-295X, 2010.

[124] K. H. Brown, S. P. Burns and M. A. Christon, “Coupled Eulerian-Lagrangian Methods for Earth Penetrating Weapon Applications”, 10.2172/808588.

[125] TS 500, “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları,” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

[126] Url-6 http://bursa.imo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=5217&tipi=2&sube=7 (14.10.2019)

[127] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. 2018

[128] Url-7 www.hurriyet.com.tr/istanbul-sultanbeylide-karakola-bombali-saldiri-29768952, 2016. (12.06.2015)

[129] Url-8 https://tr.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Harekâtı_(1944). (21.11.2021)

[130] Url-9 https://www.takvim.com.tr/guncel/2014/07/14/benden-sonrasi-tufan. (21.11.2021)

[131] Url-10 https://www.sariyarli.net/sariyar-baraji-nallihan-ankara-62.html (22.08.2019)

[132] A. C. Altunışık and H. Sesli, “Dynamic Response of Concrete Gravity Dams Using Different Water Modelling Approaches” Computers and Concrete, Vol. 16, No. 3, 429-448, 2015.

[133] H. Sesli and M. Akköse, “Evaluation of Sliding Stability in Concrete Gravity Dams Using Multiple Wedge Analysis” Sigma J Eng & Nat Sci 34 (1), 15-29, 2016

[134] Url-11 IMO, “Türkiye Mühendislik Haberleri” Vol.5 pp 7-22, 1955. (17.09.2019)

[135] Url-12 https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-46849798 (15.11.2020)

[136] Url-13 https://tr.wikipedia.org/wiki/TNT_eşdeğeri (21.11.2021)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. B. Sevim and A. T. Toy, “Numerically and Empirically Determination of Blasting Response of a RC Retaining Wall under TNT Explosive” Advances in Concrete Construction, Vol. 5, No. 5. 493-512, 2017. https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.5.493

2. B. Sevim and A. T. Toy, “Blasting Response of a Two Storey RC Building under Different Charge Weight of TNT Explosives” Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2019. https://doi.org/10.1007/s40996-019-00256-0

3. B. Sevim and A. T. Toy, "Structural Response of Concrete Gravity Dams under Blast Loads" Advances In Concrete Constructıon, vol.9, no.5, pp.503-510, 2020. https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.5.503

4. B. Sevim and A. T. Toy, “Structural Response of Two-Storey Reinforced Concrete Building under Blasting Effects” CBU J. of Sci., Volume 12, Issue 3, p 419-426, 2016. doi:10.18466/cbayarfbe.280605

Konferans Bildirileri

1. B. Sevim and A. T. Toy, “Blast Effects on the Structural Response of a Highway Bridge” İstanbul Bridge Conferance, Proceedıngs Of IBridge 2016, s.132, ISBN 978-605-65900-5-4, Istanbul, Turkey, 2016.

2. B. Sevim and A. T. Toy, “Patlamaların Mühendislik Yapılarının Davranışına Etkisi-Örnek Bir Karayolu Köprüsü ve Bina Modeli” 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17), 19-21 October 2017, Elazığ, Turkey, 2017

3. A. T. Toy and B. Sevim, “Blasting Response of a RC Retaining Wall” International Conference on Technology” Engineering and Science (ICONTES), ss.1-10, Antalya/ Turkey, 26-29 October 2017.

4. B. Sevim and A. T. Toy, “Blast Effect on the Structural Response of Sariyar Gravity Dam” International Civil Engineering and Architecture Conference 2019, (ICEARC’19), ss.1425-1432, Trabzon/ Turkey, 2019.