

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PATLAMA ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK PANEL ELEMANLARIN DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Bahram SAMADİ VAİGHAN**

**MART 2012  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PATLAMA ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK PANEL ELEMANLARIN DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Bahram SAMADİ VAİGHAN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”**  
**Unvanı İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.03.2012**  
**Tezin Savunma Tarihi : 12.04.2012**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selim PUL**

**Trabzon 2012**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Bahram SAMADİ VAİGHAN Tarafından hazırlanan**

**PATLAMA ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK PANEL ELEMANLARIN DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 20/03/2012 gün ve 1449 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM .....**

**Üye : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU .....**

**Üye : Doç. Dr. Selim PUL .....**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Patlama etkisi altındaki çelik panel elemanların dinamik davranışlarının incelenmesi” konulu bu tez çalışmasını, bana öneren ve çalışmanın her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, önerileriyle ufkumu açan, görevlerindeki yoğunluğuna ramen değerli zamanını bana ayıran danışmanım ve saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Selim PUL'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresinde değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan ve çalışmayı inceleyen değerli hocalarım Prof. Dr. Metin HÜSEM ve Prof. Dr. Ahmet DURMUŞ'a çok teşekkür ederim.

Çalışma süresinde değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Y. Müh. Hasan AHMADİ'e çok teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli arkadaşlarım Dr. Mohammad Reza ALAVİ MİLANİ ve Saeid AGHAHİAN'a ve destekleyen diğer arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım.

Son olarak hayatım boyunca beni sabır ve şefkatle destekleyen anne ve babama müteşekkir olduğumu belirtir, çalışmanın faydalı olmasını dilerim.

Bahram SAMADİ VAİGHAN  
Trabzon 2012

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Patlama Etkisi Altındaki Çelik Panel Elemanların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Selim PUL’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, bilgisayar analizlerini kendim yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 12/04/2012.

Bahram SAMADİ VAİGHAN

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa No</u></b>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Patlayıcı Maddeler ve Tarihsel Gelişimi.....	1
1.3. Patlayıcı Maddelerin Sınıflandırılması.....	2
1.3.1. Zayıf Patlayıcılar.....	3
1.3.2. Güçlü Patlayıcılar.....	3
1.4. Patlama Teorisi.....	3
1.4.1. Nispi Etkinlik Faktörü (TNT Eşdeğerliği).....	9
1.4.2. Patlamanın Başlatılması.....	11
1.4.3. Patlama Dalgalarının Oluşumu.....	12
1.4.3.1. Patlama Dalga Parametreleri.....	12
1.4.3.2. Patlama Dalga Profili.....	13
1.4.4. Patlama Etkisinin Uzaklıkla İlişkisi.....	15
1.4.5. Yansıma Olayı.....	15
1.4.5.1. Normal Yansıma.....	16
1.4.5.2. Düzenli (açılı) Yansıma.....	17
1.4.5.2.1. Mach Dalgası.....	18
1.5. Serbest Patlamalar.....	19
1.5.1. Havada Patlama.....	19
1.5.2. Yerde Patlama.....	20
1.5.3. Yeraltında Patlama.....	21

1.5.4.	Sualtında Patlama.....	21
1.6.	Patlama Olayının Yapılara Etkisi.....	23
1.6.1.	Yapı Dışındaki Patlama Etkisi.....	24
1.6.2.	Yapı İçindeki Patlama Etkisi.....	27
1.7.	Patlama Yükünün Belirlenmesi.....	29
1.7.1.	TM5-1300 Kılavuzu.....	29
1.7.2.	TM5-855-1 Kılavuzu.....	30
1.7.3.	CONWEP Yazılımında Patlama Yükü Modeli.....	31
1.7.4.	Zemin Seviyesinden Yukarıda Patlama Yükü Hesabı İçin Basitleştirilmiş Yöntem.....	32
1.7.5.	Sayısal Yöntemle Patlama Yükü Modeli.....	33
1.8.	Patlamada Malzeme Davranışı.....	35
1.9.	Patlamaya Karşı Tasarım.....	36
1.9.1.	Bina Çevresi.....	37
1.9.2.	Mimari.....	38
1.9.3.	Taşıyıcı Sistem.....	39
1.9.3.1.	Patlama Etkisindeki Yapı Elemanları.....	39
1.10.	Konu ile İlgili Olarak Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar.....	42
1.11.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	43
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
2.1.	İnceleme Konusu Çelik Panellerin Özellikleri.....	44
2.1.1.	PANEL-A.....	44
2.1.2.	PANEL-B.....	47
2.1.3.	PANEL-C.....	49
2.1.4.	PANEL-D.....	51
2.2.	Panellerin Sonlu Eleman Modeli ve Patlama Yükü Altında Çözümlemesi.....	53
2.2.1.	Panellerin Sonlu Eleman Modeli.....	53
2.2.2.	Sonlu Eleman Modelinde Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	56
2.3.	Patlama Yükünün Modeli.....	58
2.4.	Analiz Sonuçları.....	59
2.4.1.	PANEL-A'nın Analiz Sonuçları.....	59
2.4.2.	PANEL-B'nin Analiz Sonuçları.....	63
2.4.3.	PANEL-C'nin Analiz Sonuçları.....	70

2.4.4.	PANEL-D'nin Analiz Sonuçları.....	74
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
4.	KAYNAKLAR.....	81
5.	EKLER.....	86
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

PATLAMA ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK PANEL ELEMANLARIN DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Bahram SAMADİ VAİGHAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Selim PUL  
2012, 84 Sayfa, 19 Ek Sayfa

Patlama olayının mekanizması ve etkileri bugüne kadar bir çok araştırmacı tarafından teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu araştırmalar, belli miktardaki bir patlayıcının patlamasıyla oluşan basıncın hesabı ve bir eleman üzerine etkilenen herhangi bir patlama basıncının o elemanda oluşturacağı hasar durumunun belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın temel amacı da, belli bir patlama basıncına maruz çelik panel elemanların davranışını incelemektir.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma toplam beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgilerin verildiği bölüm olup, patlama olayının mekanizması ve çeşitleri ile patlama etkilerine karşı alınması gereken önlemlere değinilmiştir. İkinci bölümde, çalışmanın amacına uygun olarak farklı mesnet düzenlemelerine göre tasarlanıp, ABAQUS-6.10.1 programıyla doğrusal olmayan modellemesi yapılan çelik panellerin patlama etkilerine karşı davranışları incelenmiştir. Çalışmanın tümünden çıkartılabilecek sonuç ve öneriler ise üçüncü bölümde özetlenmekte ve bu son bölümü kaynaklar diziniyle bir ek bölüm izlemektedir.

Elde edilen sonuçlar, patlama etkisi altındaki çelik panellerde, enerjinin çoğunun mesnetlerde harcandığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Patlama, Patlama basıncı, Çelik Panel, Harcanan plastik enerji, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Master Thesis

SUMMARY

DYNAMIC BEHAVIOURS OF STEEL PANELS SUBJECTED TO BLAST LOAD

Bahram SAMADĪ VAĪGHAN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil engineer Graduate Program  
Supervisor: Doç. Dr. Selim PUL  
2012, 84 Pages, 19 Pages Appendix

The mechanism of explosion and its effects have been performed either theoretically and experimentally by many researchers. These studies focused on calculation of certain amount of blast pressure and its failure mechanism on any system. Therefore, the purpose of this study is to investigate of steel panels under different blast pressures.

The study done for the purpose consists of five main chapters. In the first chapter, general information is presented, event of explosion mechanism and measures to be taken against the effects of the explosion of varieties mentioned. In the second chapter, studies made on design steel panel modeling with a different support designs, and behavior against the effects of the explosion in steel panels with ABAQUS-6.10.1 computer program. The conclusion drawn from the results of this study and suggestion are summarized in the third chapter. This last chapter is followed by list of references and one appendix.

The conclusions obtained from study of steel panels under the influence of the explosion, showed that the most of the blast energy dissipated by supports.

**Key Words :** Blast pressure, Explosion, Steel panel, Dissipated plastic energy, Finite Element Method

## ŞEKİLLERİN DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Bir patlamanın küresel şekilli detonasyonu.....5
Şekil 1.2.	Patlama basıncının mesafeyle azalması.....6
Şekil 1.3.	Patlama basıncının zamanla değişimi.....6
Şekil 1.4.	Zamana bağlı blast dalga profili.....14
Şekil 1.5.	Normal yansıma.....16
Şekil 1.6.	Düzenli yansıma.....17
Şekil 1.7.	Mach dalgası.....18
Şekil 1.8.	Basınç değerine ve yansıma açısına bağlı, yansıma katsayıları.....19
Şekil 1.9.	Havada patlama.....20
Şekil 1.10.	Yerde patlama.....21
Şekil 1.11.	Sualtı patlaması.....22
Şekil 1.12.	Sualtı ve havada patlama değişikliklerinin oran diyagramı.....23
Şekil 1.13.	Bir araçta oluşan patlamanın yapı üzerindeki etkisi.....24
Şekil 1.14.	Yapı dışında oluşan patlamanın yükleme şeması.....25
Şekil 1.15.	Dış patlama etkisiyle binanın hasar görülme şeması.....26
Şekil 1.16.	Murrah binasına bombalı saldırı, Oklahoma City, ABD, 1995.....27
Şekil 1.17.	Bir iç patlamanın basınç-zaman ilişkisi.....28
Şekil 1.18.	Yapı içi patlama etkisiyle oluşan hasar türleri.....28
Şekil 1.19.	Bina içi gaz patlaması, Londra, İngiltere, 1968.....29
Şekil 1.20.	Zeminde patlamanın pozitif faz süresinde şok dalga parametreleri.....30
Şekil 1.21.	Yapıya 15m uzaklıkta oluşan 100 kg TNT'ye eşdeğer patlayıcının conwep programı sonuçları.....31
Şekil 1.22.	CONWEP programı ile hesaplanan basınç ve yansıma diyagramı.....32
Şekil 1.23.	Bir geometrik blok modeli.....32
Şekil 1.24.	Kagir bina içinde patlama simülasyonu (Autodyn-3d programı).....34
Şekil 1.25.	Farklı yüklemelerde birim şekil değiştirme oranları.....35
Şekil 1.26.	Betonun farklı şekil değiştirme oranları için gerilme-şekil değiştirme diyagramları.....35
Şekil 1.27.	Çelik malzemenin normal ve hızlı yükleme altında $\sigma - \epsilon$ diyagramları....36
Şekil 1.28.	Patlamaya karşı tasarım için bina yerleşimi.....37

Şekil 1.29.	Patlama etkisini azaltan ve artıran bina tasarımları.....	38
Şekil 1.30.	Patlama ile hasar gören bir betonarme kenar kolon.....	40
Şekil 1.31.	Zhao ve Nurik'e ait panelin ABAQUS çözümlemesi.....	43
Şekil 2.1.	PANEL-A'nın genel görünüşü ve ölçüleri.....	45
Şekil 2.2.	Panel-A'nın görünümü.....	46
Şekil 2.3.	Panel-A için mesnet görevi yapan çelik altlık.....	46
Şekil 2.4.	Monte edilmiş PANEL-A.....	46
Şekil 2.5.	PANEL-B'nin genel görünüşü ve ölçüleri.....	47
Şekil 2.6.	Panel-B'nin görünümü.....	48
Şekil 2.7.	Panel-B için mesnet görevi yapan çelik altlık.....	48
Şekil 2.8.	Monte edilmiş PANEL-B.....	48
Şekil 2.9.	PANEL-C'nin genel görünüşü ve ölçüleri.....	49
Şekil 2.10.	Panel-C'nin görünümü.....	50
Şekil 2.11.	Panel-C için mesnet görevi yapan çelik altlık.....	50
Şekil 2.12.	Monte edilmiş PANEL-C.....	50
Şekil 2.13.	PANEL-D'nin genel görünüşü ve ölçüleri.....	51
Şekil 2.14.	Panel-D'nin görünümü.....	52
Şekil 2.15.	Panel-D için çelik şeritler.....	52
Şekil 2.16.	Monte edilmiş PANEL-D.....	52
Şekil 2.17.	Panel- D'nin kesit görünümü.....	53
Şekil 2.18.	ABAQUS programında üç boyutlu kabuk eleman adlandırılması.....	53
Şekil 2.19.	PANEL-A'nın Sonlu Eleman Modeli.....	54
Şekil 2.20.	PANEL-B'nin Sonlu Eleman Modeli.....	55
Şekil 2.21.	PANEL-C'nin Sonlu Eleman Modeli.....	55
Şekil 2.22.	PANEL-D'nin Sonlu Eleman Modeli.....	56
Şekil 2.23.	Çelik malzemenin ABAQUS'a tanıtılan $\sigma - \epsilon$ eğrisi.....	57
Şekil 2.24.	Patlama Yükünün profile.....	58
Şekil 2.25.	Patlama yükünün modellerde uygulanması.....	59
Şekil 2.26.	PANEL-A modelinde farklı patlama yüklemeleri altında panel merkezinde oluşan yerdeğiştirmeler.....	60
Şekil 2.27.	PANEL-A'da sürtünme ile harcanan enerji.....	60
Şekil 2.28.	PANEL-A'da harcanan plastik enerji.....	60
Şekil 2.29.	$F= 2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-A'da oluşan plastik birim şekildeğiştirmelerin değişimleri.....	61

Şekil 2.30.	$F= 5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-A’da oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	61
Şekil 2.31.	$F= 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-A’da oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	62
Şekil 2.32.	$F= 1.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-A’da oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	62
Şekil 2.33.	$F= 2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-A’da oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	62
Şekil 2.34.	PANEL-B modelinde farklı patlama yüklemeleri altında panel merkezinde oluşan yerdeğişirmeler.....	63
Şekil 2.35.	PANEL-B’da harcanan plastik enerji.....	64
Şekil 2.36.	$F= 2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	64
Şekil 2.37.	$F= 5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	65
Şekil 2.38.	$F= 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	65
Şekil 2.39.	$F= 1.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	65
Şekil 2.40.	$F= 2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemeler için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmelerin değişimleri.....	66
Şekil 2.41.	PANEL-A’nin dinamik kararsız konumu.....	67
Şekil 2.42.	PANEL-B’nin dinamik kararsız konumu.....	67
Şekil 2.43.	PANEL-A’da, $3.78 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemesiyle meydana gelen yırtılma.....	68
Şekil 2.44.	PANEL-B’de, $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemesiyle meydana gelen yırtılma.....	69
Şekil 2.45.	PANEL-C modelinde $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ yüklemesi altında panel merkezinde oluşan yerdeğişirmelerin kalınlığına bağlı olarak değişimi.....	70
Şekil 2.46.	PANEL-C’de 3mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler.....	71
Şekil 2.47.	PANEL-C’de 5mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler.....	71
Şekil 2.48.	PANEL-C’de 7mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler.....	71
Şekil 2.49.	PANEL-C’de 10mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler.....	72
Şekil 2.50.	PANEL-C’de farklı sac kalınlıkları için plastik birim şekildeğişirme.....	73
Şekil 2.51.	PANEL-D modelinde panel merkezinde oluşan yerdeğişirmelerin farklı kıvrım yarıçaplarına bağlı olarak değişimi.....	74
Şekil 2.52.	PANEL-D’de $R=7.5\text{mm}$ kıvrım yarıçapı için harcanan plastik enerjiler.....	75
Şekil 2.53.	PANEL-D’de $R=10\text{mm}$ kıvrım yarıçapı için harcanan plastik enerjiler.....	75
Şekil 2.54.	PANEL-D’de $R=12.5\text{mm}$ kıvrım yarıçapı için harcanan plastik enerjiler.....	75

Şekil 2.55.	PANEL-D’de farklı Yarıçapları için plastik birim şekildeğiştirme.....	76
Şekil 2.56.	Seçilen modellerde merkez noktasının yer değişmeleri.....	79
Şekil 2.57.	Seçilen panel modellerinde harcanan plastik enerjiler.....	80

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1.	Bazı Patlayıcı Maddelerin Detonasyon Hızları.....	8
Tablo 1.2.	Bazı Patlayıcı Maddelerin TNT Eşdeğerlikleri.....	10
Tablo 2.1.	Modellemede kullanılan sonlu elemanlar.....	54
Tablo 2.2.	Çelik malzeme özellikleri.....	56
Tablo 2.3.	PANEL-A modelinde farklı yüklemeler altında elde edilen sonuçlar.....	63
Tablo 2.4.	PANEL-B modelinde farklı yüklemeler altında elde edilen sonuçlar.....	66
Tablo 2.5.	PANEL-C modelinde farklı sac kalınlıkları için elde edilen sonuçlar.....	74
Tablo 2.6.	D modelinde farklı yarıçaplardan oluşan sonuçlar.....	77

## SEMBOLLER DİZİNİ

$KNO_3$	Potasyum Nitrat
$P$	Basınç
$t$	Zaman
$P_0$	Atmosferik Basınç
$P_{s0}^+$	Maksimum Basınç
$P_{s0}^-$	Negatif Basınç
$i_s$	Pozitif Basınç Alanı
$T_s$	Pozitif Basınç Süresi
$t_a$	Şok Cephesi Varış Zamanı
$t_d$	Pozitif Faz Etki Süresi
$W_{TNT}$	Bir Patlayıcı Maddenin TNT Eşdeğer Ağırlığı
$W_{EXP}$	Patlayıcı Ağırlığı
$H_{TNT}$	TNT'nin Patlama Isısı
$H_{EXP}$	Herhangi Bir patlayıcının Patlama Isısı
$U_s$	Patlama Dalga Hızını
$q_s$	Maksimum Dinamik Basınç
$P_s$	Artan Statik Basınç
$a_0$	Atmosferik Basınç Altında Havadaki Ses Hızı
$Z$	Ölçekli Mesafe
$R$	Patlama Noktasından Olan Uzaklık
$\alpha$	Boyutsuz Dalga Formu Parametresi
$\beta$	Blast Dalgasının Yansıma Yüzeyine Yaklaşma Açısı
$P_{peak}$	Maksimum Statik Basınç
$A$	Ses Hızı
$U_x$	Blast Dalga Cephesinin Önündeki Hava Moleküllerinin Hızı
$U_p$	Blast Dalga Cephesinin Hemen Gerisindeki Hava Moleküllerinin Hızı
$M_x$	İlk Blast Dalgasının Mach Sayısı
$M_r$	Yansımış Blast Dalgasının Mach Sayısı
$C_r$	Blast Dalgasının Düzenli Yansıma Katsayısı
$P_m$	Maksimum Basınç



$\theta$	Sönüm
$W$	Patlayıcı Ağırlığı
$I$	Patlama Dalgalarından Oluşan Enerji
$\delta_y'$	Akma Gerilmesi
$\dot{\epsilon}^{pl}$	Plastik Şekildeğiştirme Oranı
$\gamma$	Viskozite Katsayısı
$m$	Şekildeğiştirme Anında Sertleşme Parametresi
$\delta_y$	Statik Akma Uzaması

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Giriş**

Bazı özel türleri hariç, yapıların rutin hesap ve tasarımında yada onarım-güçlendirme projelerinin yapımında patlama yüklerinin dikkate alınmadığı bilinmektedir. Ancak, son yıllarda dünyanın çeşitli bölgelerinde, özellikle insanların yoğun bulunduğu alanlarda çeşitli nedenlerle meydana gelen patlama olayları ciddi can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bu patlamalar sonucunda yapılar da ciddi yapısal hasarlar alabilmektedir. Dolayısıyla özellikle şehirlerde, yoğun insan trafiğine sahip ticaret bölgelerinde yapılacak yapıların da özel yapılar gibi değerlendirilip, patlama yüklerine göre de tasarlanmasının yararlı olacağı söylenebilir. Bu nedenle bu çalışmada patlama olayının geniş bir tanımı verildikten sonra, yapı elemanı olarak da kullanılabilen, farklı mesnetlenme koşullarına sahip çelik panellerin patlamaya karşı davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

### **1.2. Patlayıcı Maddeler ve Tarihsel Gelişimi**

Patlayıcılar, kimyasal enerji depo eden, ani kimyasal reaksiyon sonucu yüksek miktarda basınç, ısı ve gaz meydana getiren kimyasal maddelerdir. Bilinen ilk patlayıcı MS904 yılında Çinliler tarafından silah olarak kullanılan “kara barut”tur. Kara barut, Avrupada ise ancak 13. yy’da kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, karbon ve kükürttten ibaret bir karışım olan ve Güherçile olarak da bilinen potasyum nitrat ( $KNO_3$ ), parlak alevi ve gürültüsü nedeniyle düşman arasında panik yaratmak amacı ile kullanılmıştır. Kara barut ile çalışan silahların organize bir şekilde ilk defa 14. yy’da İngiltere’de kullanıldığı bilinmektedir. Patlayıcıların askeri kullanımından çok önce “Rum ateşi” ve Çinlilerin “alevli oklar”ında bazı kimyasal patlayıcılar da kullanılmaktaydı. Onyedinci yüzyılda, pudra şeklindeki kara barut, yerini küçük taneler halindeki kara baruta terk etmiştir. Kara barutu, 1838 yılında T.J. Pelonze'nin nitroselüloz'u keşfi ve 1846 yılında da nitrogliserinin Ascanino Sobrero tarafından keşfi takip etmiştir. İsveçli bilim adamı Alfred Nobel (1833–1896, nitrogliserinin kullanılabilir fiziksel özelliklerinden yeni patlayıcılar geliştirmiştir. Yüksek hızlı patlayıcıların ateşlenmesi, patlama teorisi, dinamit üretimi ve iki bazlı

barutların üretimi, Nobel'in keşiflerinden bazılarıdır. Bunun yanı sıra, I. ve II. Dünya Savaşları patlayıcı madde biliminin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır [1, 2].

Yaygın olarak bilinen birçok patlayıcı yanında, planlı bir araştırma sonucunda ya da tesadüfen yeni patlayıcılar da keşfedilebilmektedir. Son olarak, 2001 yılında Almanya'da bir fizik laboratuvarında meydana gelen kaza sonucu, dünyanın bilinen en güçlü patlayıcısı keşfedilmiştir. Bir silisyum türü olan bu maddenin, TNT (trinitrotoluen)'den yedi kat daha güçlü olduğu ve bir milyon kat daha hızlı patladığı bildirilmiştir [3]. Pratikte kullanılan patlayıcıların büyük bir kısmı sıkıştırılmış katı cisim (TNT), kuru toz (Amonyum Nitrat) veya bir sıvı emdirilmiş toz (plastik patlayıcılar) halinde bulunurlar. Sıvı patlayıcıların kullanımı son zamanlarda giderek artmıştır. Patlayıcı gazlar veya havaya dağıtılmış ve hızlı yanan parçacıklar patlayıcı olarak pratik bir kullanıma sahip olamamışlardır. Yine de gaz kaçaklarına bağlı olarak havada böyle patlayıcı gazlara rastlanmakta, kapalı depolarda kömür tozu ile un ya da pudra şekerinden oluşan patlayıcı nitelikte toz bulutu tesadüfi olarak oluşabilmektedir. Bütün bunlar patlamaya bağlı kazalar içinde önemli bir yer işgal etmektedir [4]. Baker ve arkadaşları [1, 5] patlayıcıların yeterince hızlı bir şekilde ve yeterince küçük bir hacimde oluşan basınç dalgasının yaratılmasına sebep olan ve patlamayla açığa çıkan bir enerjiye sahip olduğunu ifade eder.

Bir maddenin patlayıcı madde olarak tanımlanması için, kendisine ısı veya şok uygulandığında çok hızlı bir şekilde ısı ve gaz açığa çıkaran kimyasal reaksiyon oluşturması veya reaksiyonun şok veya ısı ile başlaması şartlarını sağlaması gerekmektedir. Ancak, belirtilen özelliklerden yalnızca bir kısmını karşılayan maddeler patlayıcı olarak tanımlanamaz. Örneğin azot ve oksijen, çok hızlı bir şekilde reaksiyona girerek patlama ürünü olarak gaz halindeki azot oksit'i verir. Ancak bu madde, reaksiyon esnasında ısı verilmesi yerine çevreden ısı alınması nedeniyle, patlayıcı olarak tanımlanamaz [1, 2].

### **1.3. Patlayıcı Maddelerin Sınıflandırılması**

Patlayıcı maddeler, kimyasal yapılarına, üretim şekillerine, yanma hızlarına ve kullanım amaçlarına göre değişik başlıklarda sınıflandırılmaktadırlar. Bunlardan en yaygın sınıflandırma, "güçlü" ve "zayıf" patlayıcılar şeklindedir. Her ikisi de farklı basınç dalgaları ve çevrelerine farklı etkiler yaratırlar. Patlayıcıların güçlü ve zayıf patlayıcılar şeklinde sınıflandırmalarında asıl ölçüt, patlama dalga hızı (Detonasyon)'dır [8].

### 1.3.1. Zayıf patlayıcılar

Yüzeyinden içeriye doğru yanarak ani çözünmeye uğrayan maddeler düşük hızlı patlayıcılardır. Düşük hızlı patlayıcılar genellikle “taneler” halinde imal edilirler ve sevk yakıtı olarak kullanılırlar [2]. Zayıf patlayıcılar güçlü patlayıcılara kıyasla daha az enerji yaratırlar. Patlama dalga hızları 400 m/s ile 1000 m/s’dir [8, 9]. Bu patlayıcılara örnek olarak kara barut ve dumansız barut verilebilir. Açıkta yakıldıklarında hızla yanarken, kapalı kaplar içerisinde patlarlar [10].

### 1.3.2. Güçlü Patlayıcılar

Güçlü patlayıcılar ses dalgasından daha hızla yayılırlar. Patlama dalga hızları 1000 m/s- 8500 m/s arasındadır. Genel olarak güçlü patlayıcılar, başlatıcı olanlar ve başlatıcı olmayanlar şeklinde iki grupta toplanır. Isı, sürtünme ve darbeye karşı aşırı derecede hassas olan başlatıcılar grubuna örnek olarak “kurşun azidür” ve “cıva fulminate” verilebilir. Bu maddelerin saf halde taşınması ve depolanması özel şekillerde yapılır. Tahrip kapsülleri, füyeler ve askeri mühimmatlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı, sürtünme ve darbeye daha az hassas olan ve ana imla hakkı (ana patlayıcı) grubuna örnek olarak TNT, PETN, RDX, ANFO, emülsiyon patlayıcılar ve ticari dinamit verilebilir [1, 8, 9].

## 1.4. Patlama Teorisi

Patlama kelimesi, aniden ortaya çıkan alevler, duman bulutları ve düzensiz bir şekilde her tarafa uçuşan, dağılan parçalar, yıkılan binalar, çok yüksek bir ses olarak algılanmaktadır. Gerçekte patlama, bu görsel verilerinin dışında incelenmesi gereken karmaşık fiziksel ve kimyasal olayların birleşimidir. İlk olarak 18. yüzyılın ortasında M. Wlomansow, “Detonasyonun Doğası ve Görüntüsü” isimli 1748 tarihli çalışmasında patlamanın tanımını yapmıştır [4]. Wlomansow’a göre patlama, “Büyük miktardaki enerjinin ve büyük hacimli gazın yüksek hızda serbest kalmasıdır”.

Diğer kaynaklarda, patlamanın bir patlama şok dalgası, diğer bir deyişle yüksek basınçlı ani darbe etkisi yaratması gerektiği belirtilir. Alevle hızlı olarak yanmayı tanımlayan “Deflegrasyon” ise patlayıcı sisteminin bir parçası olarak tanımın içine dahil

değildir. Tanım, bir meteor benzeri çarpmayı, şimşek benzeri ışık oluşumunu ve bazı durumlarda akışkanlarda girdap meydana gelmesine neden olan fiziksel bir olayı içermektedir. Bu çok hızlı, yoğun enerji yayılımı, patlamanın esas görünümüne hakim olmaktadır [5].

Patlamanın tanımında özellikle enerjinin serbest kalış hızının ne anlama geldiğinin açıklığa kavuşturulması gerekir. Hız göreceli bir kavramdır. Eğer benzer koşullar altında karşılaştırma yapılırsa bir patlama sonucu ortaya çıkan enerjinin serbest kalış hızının, diğer enerji serbest kalış formlarından çok daha hızlı olduğu görülür.

Tanımda dikkat çeken ikinci nokta, serbest kalan enerji miktarıdır. Bilindiği gibi enerji ne yoktan var olabilir ne de vardan yok edilebilir. Bu yüzden serbest kalan enerji miktarından, patlayıcı madde içinde bir şekilde depolanmış olan ve potansiyel bir formda bulunan enerjinin, serbest kalan bölümünün anlaşılması gerekir.

Enerjinin serbest kalmış olması, bir patlamanın meydana gelmesi için yeterli sebep değildir. Patlama sonucunda büyük mekanik kuvvetlerin ortaya çıkması ve bunların patlama ortamını saran parçalara veya ortama etki etmesi gerekir. Bu mekanik kuvvetler meydana gelmemişse bir patlamanın varlığından söz edilemez. Ortaya çıkan enerjinin mekanik bir etki oluşturabilmesi için bir çalışma ortamı gereklidir. Bu bakış açısı altında patlama, çok kısa bir zaman dilimi içinde etkili olan bir ısı-kuvvet makinesinin ürettiği “iş” olarak düşünülebilir. Bu süreç içinde daha önce aşırı ısınmış ve sıkışmış olan gazlar genişler ve mekanik bir iş yaparak, patlama etrafındaki ortamı dışa doğru iter. O halde tanımda belirtilen büyük hacimli gaz ifadesinden, patlama enerjisinin aktarıldığı yüksek basınçlı ve aşırı ısınmış gazlar anlaşılmalıdır. Patlama sırasında genişleyen gazlarda aşırı ısınmanın sağlanabilmesi için, enerji ya bu gazlar içinde serbest kalmalı ya da bunlara aktarılmalıdır. Bu enerji transferinin gazlarda hacim artışı başlamadan önce olması gerekmektedir. Aksi halde gazlarda basınç artışı, dolayısıyla mekanik iş yapma yeteneğinden bahsedilemez. Bu nedenle serbest kalan enerjinin gazlara transfer hızı ortamda genişleyen bu gazların genişleme hızından daha yüksek olmalıdır [4].

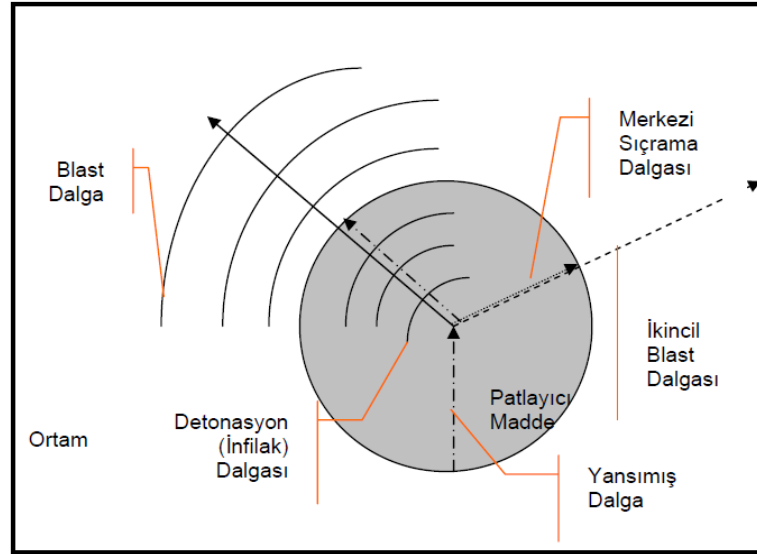
Gerçekten, bir patlamada gazların etrafa genişleme başlangıç hızı 1000 m/s civarında iken, patlamanın yayılma hızı, yukarıda da verildiği gibi, güçlü patlayıcılarda 1000 m/s ile 8500 m/s arasında değişmektedir. Böylece, Wlomansow'un patlama ile ilgili tanımından şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Patlayıcı maddelerin moleküllerinde potansiyel formda bulunan büyük miktardaki enerjinin serbest kalması,

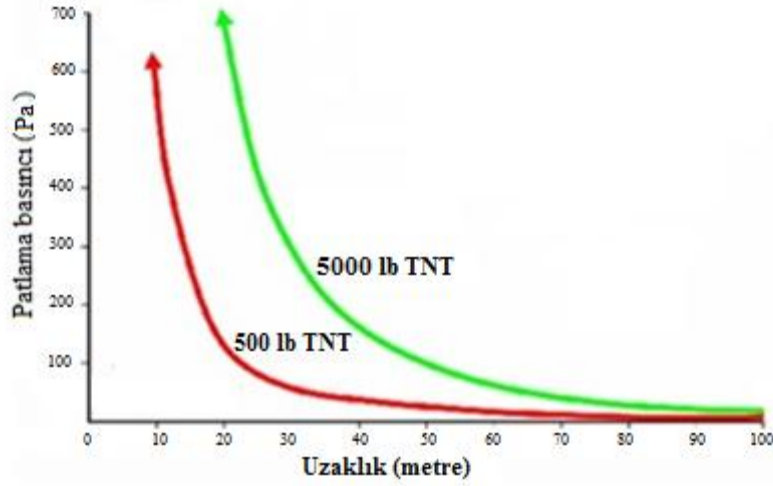
- Enerjinin serbest kalma hızının çok yüksek olması,
- Bu enerjinin patlama gazları genişleyemeden gazlara aktarılarak, sıcaklık ve basınçlarının aşırı artması,
- Ortama göre aşırı sıcak ve basınçlı gazların genişleyerek büyük mekanik kuvvetler oluşturması gerekmektedir.

Kimyasal patlayıcılar, denge durumunda normal bir malzemedirler, ancak şiddetli ekzotermik bir reaksiyon yeteneğine sahiptirler [11].

Bir patlama oluştuğunda, ortaya çıkan şok dalgaları hızlı ve ani olarak küresel şekilde, patlama kaynağından dışa doğru hareket etmektedir (Şekil 1.1) [18]. Bu durum başka bir anlatımla Şekil 1.2’de de görülmektedir. Ancak bir yüzeye çarptığında, değeri 13 katına kadar çıkabilmektedir. Oluşan basınç, Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, zamana bağlı bir şekilde üstel olarak azalmaktadır [6]. Patlama olayı, çok kısa zaman içinde oluştuğu için ölçüm birimi ms (mili saniye, 1/1000 saniye) ile ifade edilmektedir.

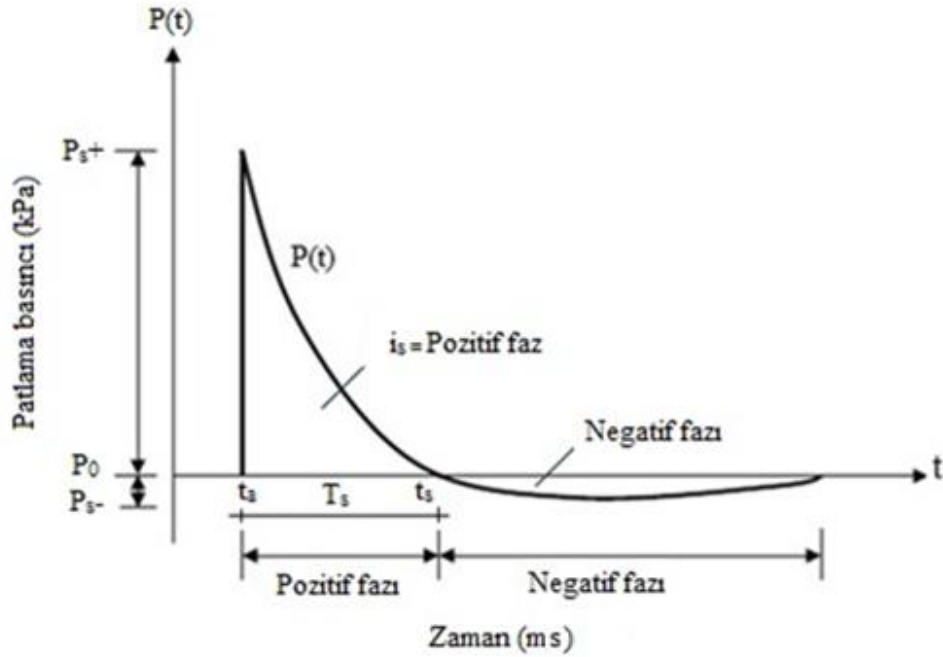


Şekil 1.1. Bir patlamanın küresel şekli [1]



Şekil 1.2. Patlama basıncının mesafeyle azalması [7]

Bir patlamanın profili aşağıdaki Şekil 1.3'de görülmektedir. Patlama meydana geldiğinde ortaya çıkan pozitif basınç (pozitif faz), birkaç milisaniye içinde atmosferik basınçtan ( $P_0$ ) maksimum basınca ( $P_{s+}$ ) ulaşmakta ve saniyenin 1/100'ü gibi bir zaman diliminde tekrar atmosferik basınca ( $P_0$ ) dönmektedir. Daha sonra saniyenin 1/10'u içinde negatif basınç (negatif faz) oluşmaktadır.



Şekil 1.3. Patlama basıncının zamanla değişimi

Negatif fazda, emmeler (vakum) meydana gelmektedir. Vakumun olduğu yerde güçlü bir rüzgâr yükü ile yüzeylere etkiyen gerilmeler, patlamanın pozitif fazından etkilenen cisimler üzerinde ters yönde bir etki daha yapmaktadır.

Patlamanın pozitif basınç etkisi (Pozitif basınç alanı,  $i_s$ ),  $T_s$ , pozitif faz süresini,  $t_a$  ise varış zamanını göstermek üzere aşağıdaki gibi ifade edilir (Şekil 1.3).

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a + T_s} P_S(t) dt \quad (1.1)$$

Yüksek güce sahip patlayıcının patlama olayı başladığında, ekzotermik reaksiyonun sonunda, katı ya da sıvı patlayıcı malzeme tam olarak sıcak, yoğun ve yüksek basınçta bir gaza dönüşür. Bu işlemin gerçekleşmesi için gerekli olan oksijen, patlayıcı maddelerin bileşiminde bulunmaktadır [12]. Patlama reaksiyonu bir patlayıcı içinde iki aşamada başlamaktadır:

- Deflagraşyon (tutuşma)
- Patlama

Deflagraşyon dalgası yavaş ve sesaltı (subsonik) hızdadır. Bu dalgaların taşınışında viskozite, ısı, iletim ve difüzyon etkindir. Basınç değişimleri deflegrasyon dalgası süresince önemsizdir. Patlama dalga davranışları deflegrasyon dalgasına oranla birçok farklı şekilde olabilir. Patlama dalgası sesüstü (süpersonik) hızdadır. Hız, 6000 m/s ile 8000 m/s arasında değişmektedir [11, 12].

Gaz doldurulmuş tüplerde, dalgalar 1–3, 5 km/s hızlarla yayılabilirler [13]. Momentum ve kinetik enerji yükleri büyüktür. Deflagraşyondan farklı olarak sıkıştırılabilirlik ve atalet önemlidir [11]. Patlama dalga yayılması nedeniyle hızlı kimyasal reaksiyona bağlı olarak patlama dalgasının konumunu sürdürmesi ile çok büyük basınç ve sıcaklık oluşur. Bunun sebebi reaksiyonun başladıktan sonra tamamlanana kadar giderek güçlenmesidir [14]. Kimyasal patlayıcılar için, serbest kalan enerjinin hemen hemen tümü patlama enerjisine dönüşür. Nükleer patlamalarda bu yalnızca %50 oranındadır. Geri kalanı ise ısı ve termal radyasyona dönüşür [12]. Düşük güçteki patlayıcılar, propellant (sevk maddeleri) ve pyrotechnic (aydınlatma ve havai fişek maddeleri) olarak patlamadan daha çok, yanmaya meyillidirler. Yüksek güçteki patlayıcılarda ise her zaman patlama dalgalarını oluşmaktadır. Patlama ürünleri başlangıçta çevredeki hava ile dengeye ulaşmaya kadar bir şok dalgası oluşturacak şekilde çok yüksek hızlarda genişler. Bu şok dalgası patlama merkezinden dışa doğru ilerleyen sesüstü hızda yüksek basınçlı hava



oluşturur. Çoğu yüksek patlayıcılarda mevcut kimyasal enerjinin üçte biri dalga oluşumu ile serbest bırakılır. Kalan üçte ikilik kısım ise hava ile karışan ve yanan patlama ürünleri olarak çok daha yavaş serbest bırakılırlar. Asıl patlama dalgasından daha yavaş meydana geldiğinden, sonraki patlama dalga oluşumu ilk patlama dalgası içinde küçük bir etkiye sahiptir [1]. Bununla birlikte, patlama dalgasının gecikmiş olan evresi özellikle sınırlandırılmış patlamalarda, etkili olabilir. Şok dalgası genişledikçe basınç süratle mesafenin küpü ile orantılı olarak azalır (bkz. Şekil 1.2). Bunun sebebi ısınmış olan hava içinde enerjinin dağılmasıdır. Sonuçta basınç zamanla ters orantılı olarak süratle düşer ve maksimum basıncın etki süresi saniyenin binde biri kadar çok kısa bir ömür aralığında etkin olur. Patlama, yüksek basınçlı bir hava kabarcığının ortam basıncına eşit oluncaya kadar genişlemesi olarak düşünülebilir [5].

Patlama dalga yayılma hızı, aslında sabittir ve patlayıcının yoğunluğuna bağlıdır [2]. Patlayıcı maddeler tahrip güçlerine göre sınıflandırılırken, göz önüne alınan parametre patlama dalga hızıdır. Belli başlı patlayıcı maddelerin patlama dalga hızları Tablo 1.1’de verilmiştir [8].

Tablo 1.1. Bazı patlayıcı maddelerin patlama dalga hızları

Patlayıcı Madde	Patlama dalga Hızı
TNT	6800 m/s
Kara Barut	400 m/s
Amonyum Nitrat	2700 m/s
Amatol 80/20	4900 m/s
Dinamit	6100 m/s
Tetritol 75/25	7000 m/s
Tetril	7100 m/s
Nitrogliserin	7700 m/s
Bileşim B	7800 m/s
Bileşim C-4	8040 m/s
Bileşim A-3	8100 m/s
PENT	8300 m/s
RDX	8350 m/s

### 1.4.1. Nispi Etkinlik Faktörü (TNT Eşdeğerliği)

Farklı kimyasal yapılara ve özel enerjilere sahip patlayıcı maddeler kullanılırken, ya da hasar değerlendirilmeleri yapılırken, kolaylık sağlamak için birbirleri ile karşılaştırılmaları gerekmektedir. Bu karşılaştırma için gereken referans patlayıcı madde, TNT olarak kabul edilmiştir. Böylece, patlayıcı maddelerin etkilerini tahmin için geliştirilen grafiklerde referans alınan TNT'ye ait değerler bulunmaktadır [15]. Başka bir patlayıcı ile çalışılacak ise, Tablo 1.2'de verilmiş olan dönüşüm değerleri, diğer bir deyişle, TNT eşdeğerlikleri kullanılmaktadır [5, 9, 16, 17]. Dönüşümlerde kullanılması önerilen bu değerlere "Nispi Etkinlik Faktörleri" ya da "Patlayıcı Maddelerin TNT Eşdeğerlikleri" adı verilmektedir. Nispi etkinlik faktörü, belli miktardaki patlayıcı maddenin oluşturduğu enerjiye eşdeğer miktardaki TNT patlayıcı maddesinin oluşturduğu enerji kıyaslanarak yapılmaktadır. TNT ile kıyaslanan patlayıcı maddelerin eşdeğerliği, patlayıcı maddenin miktarı dışında, patlayıcı maddenin şekli, sıkılama, patlama yeri ve ortam özellikleri, dikkate alınan basınç aralığı gibi diğer faktörlere de bağlıdır [5,16]. Nispi etkinlik faktörlerinin tespitinde, patlayıcı maddelerin enerji miktarlarının, TNT enerjisi ile oranlanması, patlama ısısının bir fonksiyonu olarak,  $W_{TNT}$  eşdeğer TNT ağırlığını,  $H_{TNT}$ , TNT'nin patlama ısısını ve  $H_{exp}$  ise diğer patlayıcının patlama ısısını göstermek üzere;

$$W_{TNT} = \frac{H_{exp}}{H_{TNT}} W_{exp} \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bir patlama olayında patlama parametrelerini belirletmeden önce TNT 'ye eşdeğer olan patlayıcı kg değeri belirlenmelidir. TNT eşdeğerini hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde gerçek patlama maddesinin kütlesi ile TNT enerjisi arasındaki oran en basit yöntemdir. Örneğin 1 kg TNT 'nin enerjisi 6700 kJ/kg'dır.

Tablo 1.2. Bazı patlayıcı maddelerin TNT eşdeğerlikleri

Patlayıcı Madde	Bileşenleri	Nisbi Etkinlik Faktörü ( $\eta$ )
TNT	$C_7H_5N_3O_6$	1.00
Amatol 80/20	%80 AN - %20 TNT	1.30
Amatol 60/40	%60 AN - %40 TNT	1.28
Amatol 50/50	%50 AN - %50 TNT	1.24
Amonal	%11 AL - %22 AN - %67 TNT	1.22
ANFO	%94 AN - %6 Fuel Oil	0.52
Kara Barut	%74 Potasyum Nitrat	0.50
Bileşim A-3	%91 RDX - %9 Balmumu	1.35
Bileşim B	%60 RDX - %40 TNT - %1 Balmumu	1.33
Bileşim C	%88.3 RDX - %11.7 Plastikleştirici	1.20
Bileşim C-2	%78.7 RDX - %12 DNT - %5 TNT - %2.7 MNT, %0.6 NC - %1Çözücü	1.26
Bileşim C-3	%77 RDX - %4 TNT - %5 MNT - %3 Tetryl - %10 DNT - %1 NC	1.34
Bileşim C-4	RDX - 91 Plastikleştirici - 9%	1.37
Askeri Dinamit (Düşük Hızlı)	%17.5 RDX - %67.8 YNY - %12.7 Bağlayıcı - %2 Selüloz Asetat	0.92
Askeri Dinamit (Orta Hızlı)	%75 RDX - %15 TNT - %5 Nişasta - %5Yağ	1.22
PBX-9025	%92 RDX - %8 Bağlayıcı	1.38
Pentolit 50/50	%50 PETN - %50 TNT	1.26
Pentolit 10/90	%10 PETN - %90 TNT	1.26
PLX (Sıvı)	%95 Nitrometan - Etilendiamin%5	1.34
Kapsül Bileşimi	%30 Bor - %70 Potasyum Nitrat	0.16
RIPE	%85 RDX - %15 Yağ	1.18

### 1.4.2. Patlamanın Başlatılması

Patlayıcıların çoğu oldukça şiddetli etkiler sonucunda patlarlar. Patlayıcının küçük bir parçası patladığında ona bağlı olarak bir miktar enerji ortaya çıkar. Patlama yerinin etrafında bulunan patlayıcılara etki eden ısı yüksek değerlerdedir ve patlama noktasıyla temas halinde olan patlayıcıyı ısıtır. Bu, patlayıcıda bir patlama reaksiyonu başlatır. Eğer ilk patlama küçük bir patlama ise, başta patlayıcının küçük bir hacmini kaplayan patlama hızla yayılır. Çok yüksek olan reaksiyon ısısı ani düşme eğilimindedir. Bu yüzden patlamanın başlangıç yerindeki bütün moleküller dönüşüme uğrayamaz ve patlama ürünlerine enerjilerini aktaramazlar. Bu durumda patlama reaksiyonu zayıflar ve bir süre sonra tamamen biter. Patlayıcının patlaması, ilk patlama reaksiyonunun baştan itibaren belirli bir kütleye ulaşmasıyla sağlanabilir. Patlayıcının bu asgari miktarı, patlayıcının türüne göre farklılıklar gösterebilir. Patlamada ihtiyaç olan asgari patlayıcı miktarı, patlayıcının patlama hassasiyetinin bir değeri olarak kabul edilir. Standart patlayıcılar dışında başka maksatlarla kullanılmalarına rağmen, patlamaları için asgari patlayıcı patlatıldığında ve patlama ürünlerinin genişlemesi önlendiğinde patlayabilen kimyasal maddeler de mevcuttur. Örneğin saf halde Amonyum nitrat genel anlamda patlayıcı olarak görülmez. Ancak büyük ve sertleşmiş bir yığın halindeki amonyum nitrat içinde, birkaç kilogramlık bir kısmının patlaması sağlanırsa, tümünün patlamasına neden olur [1].

Bir patlamanın ilk safhası, yukarıda açıklanan patlama dalga olayıdır. Bu safha, hızlı kimyasal reaksiyon, yüksek basınç ve sıcaklık ile patlama dalgasının karışımıdır. Bir patlama dalgası, deflagrasyon olarak başlayabilir. Yanma sonucunda yeteri kadar enerji serbest bırakıldığı zaman, deflagrasyondan patlama dalgaya bir dönüşüm olur. Bir patlama dalgası olarak da başlamış olabilir. Bu şok dalgası, dalga başlangıcında yeteri kadar enerji oluşumu şartına bağlıdır. Yüksek güçlü patlayıcı maddeler, patlamanın başlangıcında bir şok dalgasını gerektirecek şekilde tasarlanmışlardır. Yüksek güçteki patlayıcıları harekete geçirmek için küçük miktarda hassas patlayıcı içeren tahrir kapsülleri yapılmıştır. Bu çok hassas patlayıcılar (kapsüller) alevle veya elektriksel etkilerle ateşlenebilirler. Ateşlendiklerinde, şok dalgası ile birlikte serbest kalan enerji, yüksek güçteki patlayıcının ateşlenmesine sebep olur. Uygulamalarda, kapsüller patlayıcılardan ayrı bir yerde depolanarak bir kaza olma olasılığı azaltılır. Bunun nedeni, patlayıcılara yakın bir mesafede meydana gelen patlamaların oluşturduğu şok dalgaları ile patlayıcıların kazara

patlamalarının mümkün olmasıdır. Bu olaya ‘‘Sirayetle Patlama’’ adı verilir. Sirayetle patlama konusunda yapılan çalışmalar sonucunda emniyet mesafeleri belirlenmiştir [1, 8].

### 1.4.3. Patlama Dalgalarının Oluşumu

Patlama olayı bir şok dalgası meydana getirirken, etrafını saran havayı ileriye doğru sıkıştırır. Patlama dalgasındaki sıkışmış hava kuşağının başlangıçta büyük bir dalga hızı vardır. Ancak bu yüksek hız çok kısa bir zaman devam edebilir. Patlama dalgası, basıncı çok ani olarak atmosfer basıncından maksimum basınca yükselen ve dalga cephesi denilen son derece keskin hatlarla çevrelenmiştir. Patlama dalgası yoğunluk hariç bir ses dalgasının bütün özelliklerine sahiptir. Ancak sınırlı bir süre devam eder ve büyük bir enerjiye sahiptir. Patlama dalgalarında tepe noktası bir defa gerçekleşir. Patlama dalgasının tepe noktasına varışı çok hızlı olmasına rağmen, ortam basıncına geri dönüşü çok daha yavaş gerçekleşmektedir [18]. Patlama dalgası aşırı basıncı ve yüksek hızla etrafa yayılır, dalganın aşırı basıncı ve hızı hasara sebep olur. Daha sonra yüksek basıncı atmosfer basıncına dşmeğe başlar ve sonra normal basınca eşit olur. Patlama merkezinden dışarı doğru sıkışmış hava dalgası normal duruma gelince merkeze doğru tekrar hücum eder ve emme safhası başlar. Bu emme safhası, büyük bir süratle giderken otobüsün arka kısmına hava hücum edişinin çok daha kısa zamanda ve kuvvetle oluşu şeklinde açıklanabilir. Havada meydana gelen patlamada oluşan hava basıncı patlama dalgası cephesi ile çevrilmiş bir küre gibidir. Patlama dalgası cephesinin hemen içinde sıkışmış hava tabakası ve daha sonra seyrek hava tabakası vardır. Bu basıncı küresel olarak hızla genişler. Bazı hallerde bu kürenin genişleme hızı başlangıçta patlayıcı madenin patlama dalga hızına eşitir. Örneğin TNT için bu hız 6800 m/s dir [1].

#### 1.4.3.1 Patlama Dalga Parametreleri

Patlamanın dalga parametreleri, aralarındaki ilişkiler ve patlama basıncının tahmini, 1950-1960 yıllarında birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu parametrelerin analitik ozm ilk kez Borde tarafından 1955 yılında aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [35].

$$U_S = \sqrt{\frac{6P_s + 7P_0}{7P_0}} a_0 \quad (1.3)$$

$$q_s = \frac{5 p_s^2}{2 (p_s + 7 p_0)} \quad (1.4)$$

Bu denklemlerde  $U_s$  patlama dalga hızını,  $q_s$  maksimum dinamik basıncı,  $P_s$  artan statik basıncı,  $P_0$  atmosferik basıncı ve  $a_0$  ise atmosferik basınç altında havadaki ses hızını ifade etmektedir. Borde, küresel bir patlama olayında ek statik basınç elde etmek için aşağıdaki denklemleri önermiştir.

$$P_s = \left[ \frac{0.945}{Z} \right] + \left[ \frac{1.455}{Z^2} \right] + \left[ \frac{5.85}{Z^3} \right] - [0.019] \quad (0.1 \text{ bar} < p_{s0} < 10 \text{ bar}) \quad (1.5)$$

$$P_s = \left[ \frac{6.7}{Z^3} \right] + 1 \quad (10 \text{ bar} < p_{s0}) \quad (1.6)$$

Belirtilen diğer bir denklem, 1961 yılında Newmark ve Hansen tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$P_s = 6784 \left[ \frac{w}{R^3} \right] + 93 \left( \left[ \frac{w}{R^3} \right]^{1/2} \right) \text{ bar} \quad (1.7)$$

Patlama basıncı, ayrıca, logaritmik olarak aşağıdaki gibi de ifade edilebilmektedir [36].

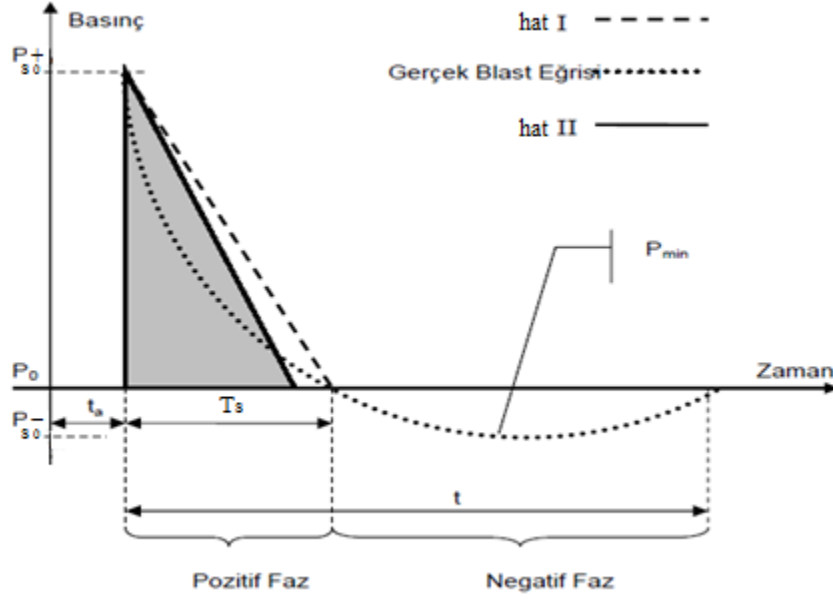
$$\log_{10} \left( \frac{t_d}{W^{1/3}} \right) \approx -2.75 + 0.27 \log_{10} \left( \frac{R}{W^{1/1}} \right) \quad (Z \geq 1) \quad (1.8)$$

$$\log_{10} \left( \frac{t_d}{W^{1/3}} \right) \approx -2.75 + 1.95 \log_{10} \left( \frac{R}{W^{1/1}} \right) \quad (Z \leq 1) \quad (1.9)$$

#### 1.4.3.2. Patlama Dalga Profili

Patlama dalgasını oluşturan patlamanın fiziksel doğası ve kaynağı çok fazla değişkenlik gösterebilirken, tipik bir patlama dalgasının basınç-zaman profili hatasız olarak gösterilebilir [19, 20, 21, 22, 23]. Zamana bağlı patlama dalga profili Şekil 1.4'de görülmektedir. Patlama dalgası, patlamanın meydana geldiği noktadan herhangi bir noktaya  $t_a$  süresinde ulaşır. Daha önce de belirtildiği gibi, patlama dalgasının belirlenen noktaya ulaşmasıyla,  $P_0$  olan ortam basıncı, ani olarak  $P_{s0}^+$  seviyesine yükselir. Basınç daha

sonra  $P_{s0}^+$  seviyesine yükselme hızından daha düşük bir hızla önce  $P_0$  ortam basıncı seviyesine, daha sonra da  $P_{s0}^-$  olarak gösterilen ortam basıncının altına düşer [1, 17, 24].



Şekil 1.4. Zamana bağlı patlama dalgası profili [17]

Patlam şok dalgasının  $P_{s0}^+$  basıncından  $P_0$  ortam basıncına düşme süresidir, bu safhaya ise pozitif faz denir. Patlama dalgasının ortam basıncı altından yine ortam basıncına geçtiği safhaya da negatif faz adı verilir. Patlama dalgasının basınç-zaman eğrisi, üstel bir fonksiyondur ve hesaplamaları sadeleştirmek için eğrinin doğrusal hale getirilmesi yaygın bir yöntemdir. Eğrinin üçgene dönüştürülmesi için iki yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar da yukarıdaki Şekil 1.4'de görülmektedir. Bunlardan ilki pozitif fazın etki etme süresini esas alan yaklaşımdır. I ile işaretlenen hat,  $P_0$  hattını gerçek eğri ile aynı noktada kestiğinden,  $T_s$  periyodunu muhafaza edecektir ve eğri bu doğru marifetiyle bir üçgene dönüştürülmüş olur. İkinci yaklaşım ise oluşan impuls etkisini eşitleme esasına dayanır. II numaralı hat orijinal eğri ile aynı impulsif etkiyi veren bir üçgen oluşturacak şekilde belirlenmektedir. Sonuç olarak çalışma alanına göre bu iki metottan biri tercih edilerek, basınç-zaman eğrisi daha kullanışlı olan üçgen formuna dönüştürülmüş olur [1, 17, 24]. Patlama dalgasının herhangi bir yerde meydana getirdiği azami basıncın zamana bağlı değişimi aşağıdaki bağıntı ile verilir [1, 17, 24].

$$P(t) \equiv P_{s0}^+ \left(1 - \frac{t-t_a}{T_s}\right) e^{-\alpha \frac{t-t_a}{t_a}} \quad (1.10)$$

Burada  $\alpha$  boyutsuz dalga formu parametresi,  $t$  ise şok cephesinin ulaştığı andan itibaren ölçülen etki süresini temsil etmektedir. Patlama dalgasının herhangi bir yerde meydana getirdiği azami basıncın zamana bağlı değişimi için literatürde farklı ampirik formüller vardır [1].

$$P(t) \equiv P_0 + P_{s0}^+ \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) e^{-\frac{bt}{T_s}} \quad (1.11)$$

Bu denklem ilk olarak 1939 yılında Friedlander tarafından ifade edilmiş, daha sonra 1997 yılında da Bulson tarafından doğruluğu saptanmıştır [25]. Bu bağlamda  $P(t)$ ,  $t$  zamanındaki basınç,  $t_{dur}$  maksimum basıncın  $P_0$  atmosferik basınç seviyesine düşene kadar geçen süredir.  $b$  ise farklılık gösteren basınç-zaman diyagramları için seçilen sabit bir değerdir. Azami basınç  $P_{s0}^+$  patlayıcı maddenin TNT eşdeğerlik miktarına ve patlama merkezinden olan uzaklığa bağlıdır. Eğer azami basınç, pozitif impuls ve pozitif süre biliniyor ise  $b$  sabiti hesaplanabilir ve basınç-zaman diyagramı çizilebilir [1].

#### 1.4.4. Patlama Etkisinin Uzaklıkla İlişkisi

Patlamadan dolayı oluşan enerji, mesafeye bağlı olarak hızla azalır (bkz. Şekil 1.2). Patlayıcı maddenin oluşturduğu patlama dalgasının mesafeyle değişimini etkileyen önemli husus, patlamanın meydana geldiği çevredir. Patlama dalgalarının ilerlemesi ortam özelliklerine bağlı olduğu kadar, çevrede bulunan ve patlama dalgasının ilerlemesinde karşısına çıkan yapılar ya da engellerdir. Bu yapılar dalga ilerleme yönüne paralel, dik yada açılı bir şekilde yerleşmiş olabilir. Bütün bunlar, dalganın eşdeğer patlamalarda farklı etkiler yaratmasına sebep olur [1].

#### 1.4.5. Yansıma Olayı

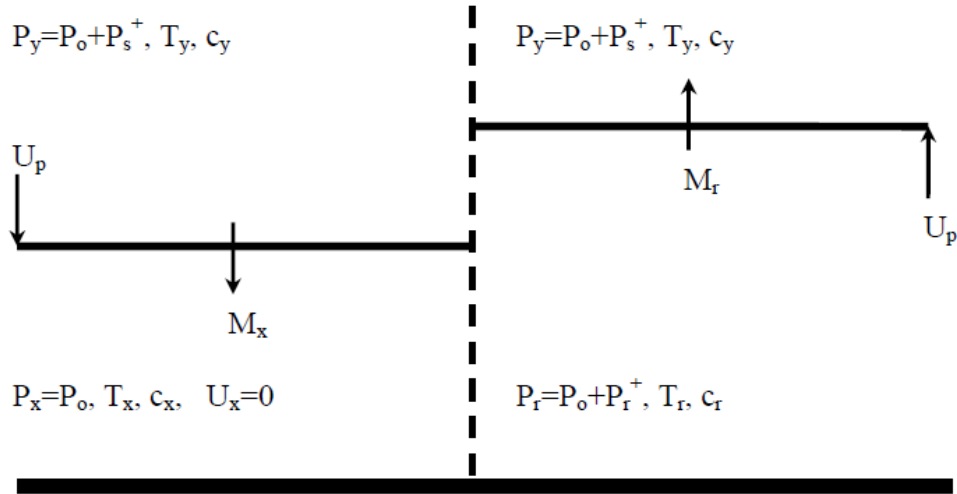
Bir patlama dalgası bir yüzeye çarptığı zaman, yüzey yayılım doğrultularına paralel değilse dalga yansıması oluşur. Yansıma, ya normal bir yansıma ya da eğrisel bir



yansımadır. Eğrisel yansımanın da iki tipi vardır. Bunlar düzgün ya da Mach yansımalarıdır. Yansıma tipi, ilk dalga açısına ve patlama dalgasının gücüne bağlıdır [1].

#### 1.4.5.1. Normal yansıma

Şekil 1.5’de şematik olarak gösterilen normal yansıma, patlama dalgasının yüzeye dik açıyla çarpması halinde meydana gelir.  $M_x$  hızıyla ilerleyen patlama dalga cephesinin önünde bulunan ortamdaki parçacık hızı  $U_x=0$ ,  $P_x=P_0$  sıcaklık ise  $T_x$ , ses hızı  $c_x$  olarak alınmaktadır. Patlama dalgasının bu noktadan geçişinden sonra, ortamdaki parçacık hızı  $U_p$ ’ye, basınç  $P_y$ ’ye, sıcaklık  $T_x$ ’den  $T_y$ ’ye ses hızı ise  $c_x$ ’den  $c_y$ ’ye yükselir [1].



Şekil 1.5. Normal yansıma [24].

Yüzeye dik olarak çarpan dalga, geliş yönünün aksi yönde yansır. Yansıyan patlama dalgasının cephe hızı  $M_r$ ’ye, patlama dalga cephesinin gerisindeki ortamın basıncı  $P_r$ ’ye, sıcaklığı  $T_r$ ’ye ses hızı  $c_r$ ’ye yükselir.

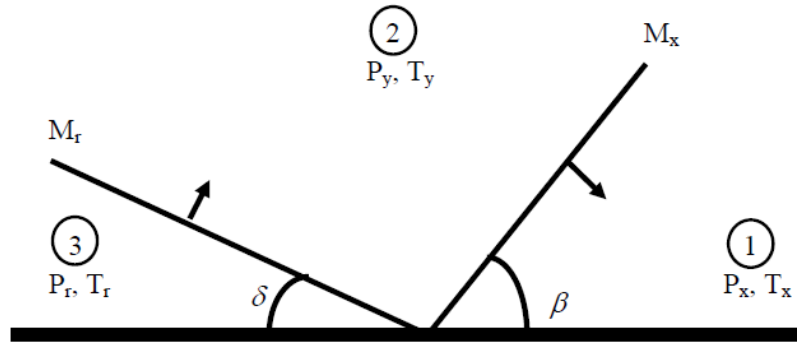
İlk patlama dalgası ile yansıyan patlama dalgasının özellikleri arasındaki farklılık yansıma katsayısı terimi olarak tanımlanabilir. Bu terim ilk şok dalgası ile oluşan basıncın yansımadan sonraki basınca oranı şeklinde ifade edilir [24]. İdeal gazlarda bu oran 1.4 olarak belirlenmiştir [1].

$$A = \frac{P_r - P_x}{P_y - P_x} = \frac{8 M_x^2 + 4}{M_x^2 + 5} \quad (1.12)$$

Yukarıdaki (1.12) eşitliğinde, ses hızında şok cephesinin hareketine bağlı olarak  $M_x$ , 1'e eşit olacağından yansımaya katsayısı 2 olacaktır. Bu demektir ki, yansıyan basınç dalgasında basınç iki kattır. Şok cephesinin hızının armasıyla  $M_x$ 'e bağlı olarak yansımaya katsayısı 8'e yaklaşır. Bu durum gaz sabiti 1.4 olan ideal gazlar için geçerlidir. Gerçek basınç dalgasında gaz sabit ve bağlı basınç katsayısı değişken olacağından, farklı yansımaya katsayıları elde edilecektir [26]. Sonuç olarak yansımaya katsayısı, patlama dalga hızına ve ilk patlama dalgasının basınç değerine bağlıdır [1].

#### 1.4.5.2. Düzenli (açılı) Yansımaya

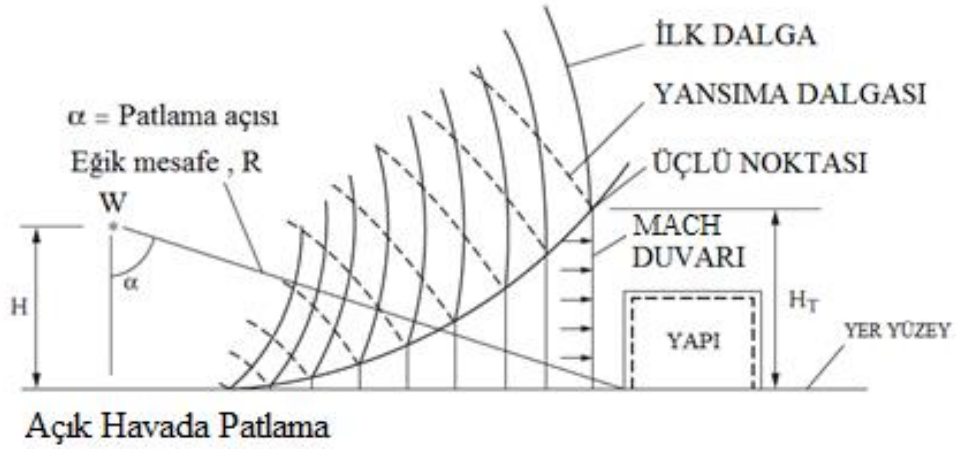
Şekil 1.6'de görüldüğü gibi, yüzeye belli bir  $\beta$  açısıyla gelen ve  $M_x$  değerine sahip dalga,  $M_r$  değerine ve  $\delta$  açısına sahip bir yansımaya dalgasına dönüşür. Yansımaya açısı genellikle ilk patlama dalgasının geliş açısına eşit değildir. Birinci bölgede ilk patlama dalgasının önündeki hava koşulları  $P_x$  basıncı ve  $T_x$  sıcaklığından düşüktür. İlk patlama dalgasının arkasındaki ikinci bölgede, basınç serbest hava basıncıyla eşdeğerdedir. Buradaki basınç  $P_y$ , sıcaklık ise  $T_y$  dir. Yansıyan şok dalgasının gerisindeki üçüncü bölgede ise basınç  $P_r$  ye sıcaklık da  $T_r$ 'ye eşittir [1, 24].



Şekil 1.6. Düzenli yansımaya [24]

### 1.4.5.2.1. MACH Dalgası

patlama dalgasının basınç değerine bağlı olarak kritik bir açı vardır. Bu değere ulaşıldığında eğrisel bir yansıma meydana gelmeyebilir. İlk şok ve yansıyan şok birleşerek üçüncü bir şok cephesi oluştururlar. Oluşan şok cephesi Mach esaslı dalga yada Mach dalgası olarak adlandırılır. Patlama cephesinin doruk noktasına yükselen bu yeni cephe yaklaşık olarak zemin yüzeyine paralel hareket eder. Üç dalganın kesişimine rastlayan bu nokta, üçlü nokta olarak adlandırılır [24]. Mach dalga cephesi ve üçlü noktanın izleyeceği yol, Şekil 1.7'de görülmektedir [1].

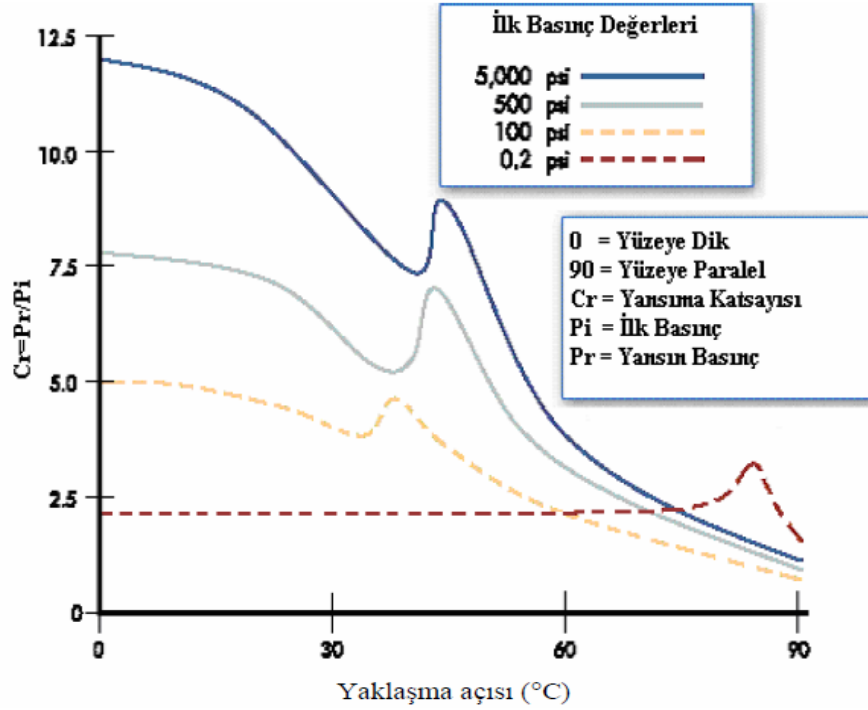


Şekil 1.7. Mach dalgası [24]

İlk patlama dalgası, dalganın ilerleme yönüne paralel olmayan yapılar olduğu zaman etkili olur, yansır ve güçlenir. Yansımış patlama dalgasının basıncı, her zaman patlamadan aynı mesafedeki ilk patlama dalgası basınca oranla daha büyüktür. Yansıyan dalga basıncı ilk patlama dalgasının açısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Patlama dalgası, dalganın ilerleme yönüne dik olan yüzeylere etki eder, itmenin olduğu noktada yansıyan basıncın maksimum olduğu görülür. Yansıtmayı gerçekleştiren yüzey patlama dalgasına paralel olduğunda, minimum yansıyan basınç görülecek yada yansıma olmayıp, ilk basınç değeri esas alınacaktır. Yansımış basıncın maksimum büyüklüğü, patlayıcı net ağırlığının ve detonasyondan olan mesafenin bir fonksiyonu olan ilk basıncın maksimum değerine bağlıdır. Şekil 1.8'de dört farklı ilk basınç değeri için yansıma açısına bağlı olarak belirlenmiş basınç yansıma katsayısı görülmektedir. Yansıma katsayısı yansıyan basıncın maksimum değerinin, ilk basıncın azami değerine oranına eşittir.

$$C_r = \frac{P_r}{P_1} \quad (1.13)$$

Şekil 1.8’de ilk patlama dalgasının basınç değeri arttıkça yansımaya katsayısının da arttığı görülmektedir. Bütün patlamalar için basınç yansımaya katsayısının sınırlandırılmış patlamalarda çok daha büyük olacağı göz önüne alınmalıdır [1].



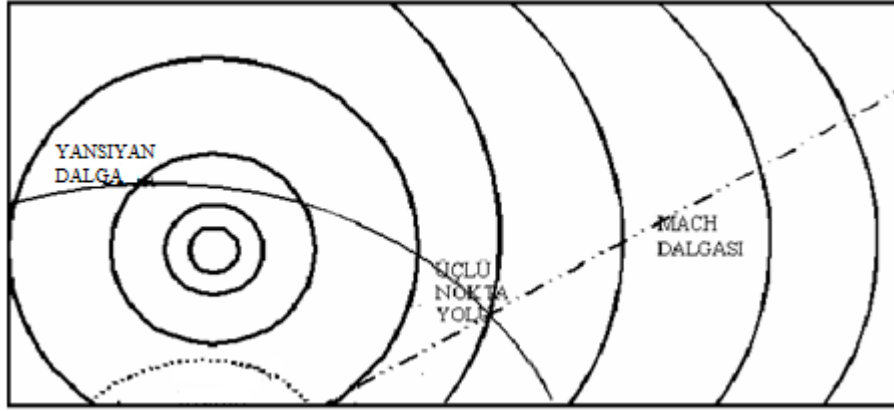
Şekil 1.8. Basınç değerine ve yansımaya açısına bağlı, yansımaya katsayıları [1, 27]

## 1.5. Serbest Patlamalar

### 1.5.1. Havada Patlama

Havada meydana gelen bir patlamanın mekanizması Şekil 1.9’da gösterilmiştir. Bir patlayıcı madde toprağın hemen biraz üstünde patlayınca, patlama dalgası toprağa çarpıncaya kadar küresel olarak yayılır. Toprağa çarpan patlama dalgası toprak yüzeyinden yansır. Toprakta yansıyan dalgalarla gecikmiş patlama dalgaları toprağın biraz üst kısmında karşılaşır ve birleşirler. Birleşen dalgalar üçüncü bir patlama dalgasını yani Mach dalgasını meydana getirirler. Mach dalgası yana doğru yayıldıkça dalganın

yüksekliği büyür, üçlü noktada havada bir eğri çizerek yükselir. Üçlü noktanın esas yer ve yolu, imla hakkına, patlayıcı maddenin yoğunluğuna ve yerden olan yüksekliğe bağlıdır. Üçlü noktanın bulunduğu yerde gerek basınç ve gerekse itme kuvveti maksimumdur. Mach dalgası yerden yükseldikçe gecikmiş ve yansıyan dalgaları bastırır. İnfilak yüksekliğine oranla uzun mesafelerde bütün çarpmalar toprağa dik yol alan bir tek küresel çarpma dalgası olur [28].

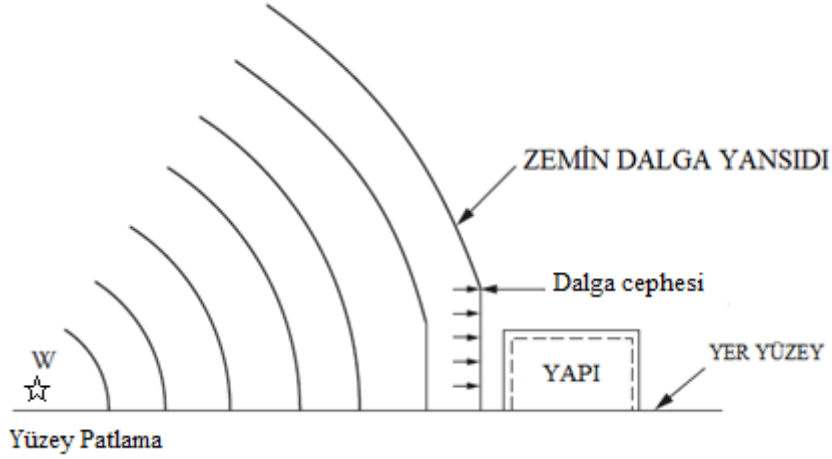


Şekil 1.9. Havada patlama

Bu şekildeki dalga genişlemesi patlayıcı maddenin tesirli yarı çapının artmasına sebep olur. Bir patlayıcının toprak üstünde ve uygun yükseklikte patlatılmasıyla elde edilen patlama dalgası ve itme kuvvetinin yarıçapı aynı patlayıcının toprak seviyesindeki patlatılmasının meydana getirildiği tesirli alandan %50 fazla olabilir [1, 5, 17, 19, 24, 29, 31, 32, 33].

### 1.5.2. Yerde Patlama

Diğer yaygın bir uygulama, patlayıcının toprak üzerinde olduğu yüzey patlamalarıdır(Şekil 1.10). Yüzey patlamaları, havada yapılan patlamalarda elde edilen toplam enerjinin 1.8 katı alınarak modellenebilir. Yüzeyin çok iyi bir yansıtıcı olduğu kabul edildiğinde, bu katsayı pratikte 2 olarak alınabilir [5,12].Yer yüzeyinde gerçekleştirilen patlamalar enerjiyi yakınlarındaki zemine, havaya ve yapılara iletirler. İletilen bu enerji ısı, hava ve toprak kinetik enerjisi, toprak deformasyonu gibi birçok biçimlere girebilir [1, 28].



Şekil 1.10. Yerde patlama [28]

### 1.5.3. Yeraltında patlama

Eğer bir patlama toprağın yeterince derin bir yerinde gerçekleştirilirse, ortaya çıkan enerji toprağın sıkıştırması ve deformasyonu vasıtasıyla tamamen emilir. İnfilak türevlerinin (hava ve gaz) tümü bastırılır ve hava şoku ortaya çıkmaz. Bu olay gizleme (kamuflej) olarak adlandırılır [34]. Öte yandan; örneğin bir mayın donmuş bir toprak tabakası altında patlatıldığında, yeryüzüne çok az miktarda enerji iletilir ve yakındaki cisimlere verilen hasarın büyük kısmı hava şoku ve patlama türevlerinin yayılmasıyla gerçekleşir. Bu iki uç örnek arasında enerjinin büyük bir kısmının, toprağın püskürtülmesini oluşturan, toprak kinetik enerjisine dönüştürüldüğü durumlar vardır. Uygun koşullar altında püskürtme, yakındaki cisimlere hasar verebilecek bir momentuma sahiptir [1].

### 1.5.4. Sualtında Patlama

Sualtı patlama olayında ilk kimyasal patlama ortaya çıkmakta daha sonra sıcak bir gaz basıncı ile yüksek sıcaklık oluşmaktadır. Bu durumda su içinde gazdan oluşan kabarcıklar çevrenin etkisiyle de sabit kalmamakta, genişleme şeklinde su yüzeyine doğru "Buyansi" kuvvetiyle hareket etmektedirler. Kabarcıklar su yüzeyine doğru hareket ederken içlerindeki basınç azalır, ortam basıncı ile eşitlenmektedir. Bir sualtı patlaması aşağıdaki Şekil 1.11'de görülmektedir.



Şekil 1.11. Sualtı patlaması

Sualtı patlama olayında şok dalgasının yayılım teorisine göre karakteristik denklemlerinin kullanılmasıyla ulaşılan ilk sonuçlar, Kirkwood tarafından 1942 yılında yayınlanmıştır. Bu teoride öngördüğü gibi basınç-zaman eğrisi bir noktada üstel şekilde hızla düşmektedir. Bu eğride maksimum basınç miktarı patlayıcı maddenin kütle ve uzaklığı merkeze olan mesafe ile üstel olarak artmaktadır [37].

Aynı yılda Penney-Dasgypa integral denklem yöntemiyle Rieman denkleminde faydalanarak önceki sonuçlara benzer bir sonuç elde etmişlerdir [38]. 1965 yılında Cole küresel ve silindirik patlayıcı maddeler üzerinde teorik ve deneysel çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu alanda Cole laboratuvar sonuçları ilk deney sonuçları olarak kabul edilmektedir.

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi, havada oluşan patlama detayları sualtında olan patlama dalgaları için de geçerlidir. Bu iki patlama arasında olan tek fark, sadece ortam farkıdır. Bir açık ortam patlamasında maksimum basınç kilo Pascal (kPa) birimiyle ifade edilmektedir.

Sualtı patlamasında maksimum basınç, hidrostatik basıncın birkaç katı olduğundan, hidrostatik basınç göz önüne alınmamaktadır. Bu sebeple maksimum patlama basıncı en yüksek basınç noktası olarak adlandırılmaktadır.

Patlamalarda oluşan enerji, patlayıcı maddenin ağırlık ve mesafesine bağlıdır. Sualtı patlama olaylarında basınç değerini elde etmek için aşağıdaki parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

$P_m$  : Maksimum basınç - ( $N/m^2$ )

$\Theta$  : Sönüm-(şu)

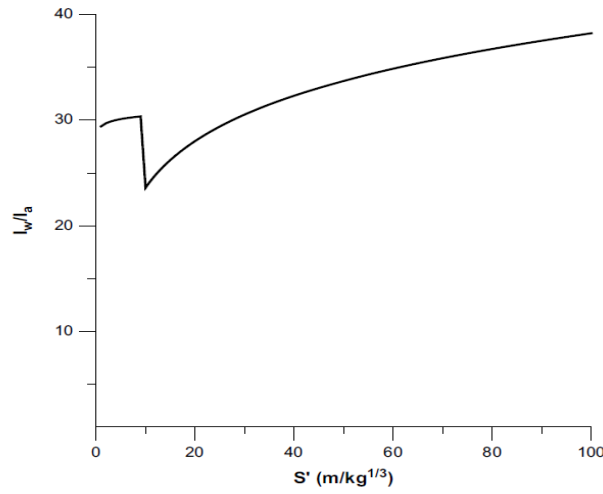
W : Patlayıcı ağırlığı-(Kg)

I : Patlama dalgalarından oluşan enerji

t : Zaman- (s)

R : Mesafe-(m)

Sualtı patlama enerjisi  $I_w$  ve açık hava patlama enerjisinin  $I_a$  oransal karşılaştırılması Şekil 1.12'de gösterilmektedir [39].



Şekil 1.12. Sualtı ve havada patlama değişikliklerinin oranı

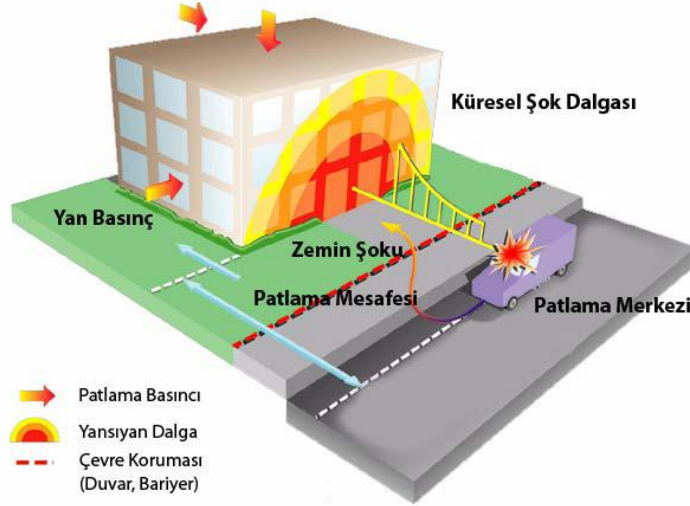
### 1.6. Patlama Olayının Yapılara Etkisi

Patlamalar, fiziksel, kimyasal veya nükleer kaynaklıdır. Yüksek basınç altında bulunan bir tankta oluşan patlama, fiziksel patlamaya örnek olarak verilebilir. Bomba türü bir patlayıcının patlatılması ile oluşan patlamalar kimyasal, atom çekirdeğinin parçalanma reaksiyonundan ortaya çıkan patlama ise nükleer patlama olmaktadır. Kaynağı ne olursa olsun, her patlama etrafına benzer karakterde etkide bulunur.

İnşaat Mühendisliği açısından patlama olayının yapı içinde ya da yapı dışında meydana gelmesi öncelikli öneme sahiptir. Gerektiğinde, oluşan patlama hasarının önlenmesi için uygun ve dayanıklı tasarım yöntemlerini kullanılmalıdır. Yapısal tasarım bakımından, patlayıcının türü, miktarı, patlama yeri gibi parametreler önem arzeder. Bazen yapı dışındaki bir araç içinde meydana gelen güçlü bir patlama yapı içinde oluşturulacak



bir patlamadan daha etkili olabilir. Aşağıdaki Şekil 1-13’de görüldüğü gibi, yapı dışında meydana gelen bir patlamada, örneğin bir araç içinde, patlayıcı madde kritik pozisyonu, binanın en yakın mesafesinde meydana gelmektedir. Genellikle TNT’ye eşdeğer olan patlayıcının miktarı ve Stand-off mesafesi (yapı ile patlayıcı arasındaki uzaklık) patlayıcı maddelerin önemli tehdit parametreleri sayılmaktadır.



Şekil 1.13. Bir araçta oluşan patlamanın yapı üzerindeki etkisi [43]

Patlayıcı maddeden oluşan dalgalar, yüksek yoğunluğu olan malzemelere isabet ederken basınç yansımalarına neden olmaktadır. Bu durumda, havada olan moleküller malzemeler tarafından durdurulur ve arkasından dalga cephesiyle sıkıştırılır. Bu sıkıştırmadan sonra basınç yansıma değeri zamanla azalır ve nihayet durur. Aşağıdaki Şekil 1-14 'da yapının çatı ve cepheleri, çarpan basınç dalgasıyla yüklenmektedir. Şekilde görüldüğü gibi dalga cephesi, yapının çatı ve kenarına geçtikten sonra arka tarafına geçmektedir. Bu yönde yansıma etkisinin daha fazla dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca patlama olaylarında ek basınçtan başka, çarpma kuvveti yapıya geçmektedir.

### 1.6.1. Yapı Dışındaki Patlama Etkisi

Yapı dışında oluşan bir patlamanın yapıya etkisi, duruma göre üç farklı durum ile ifade edilmektedir [42].

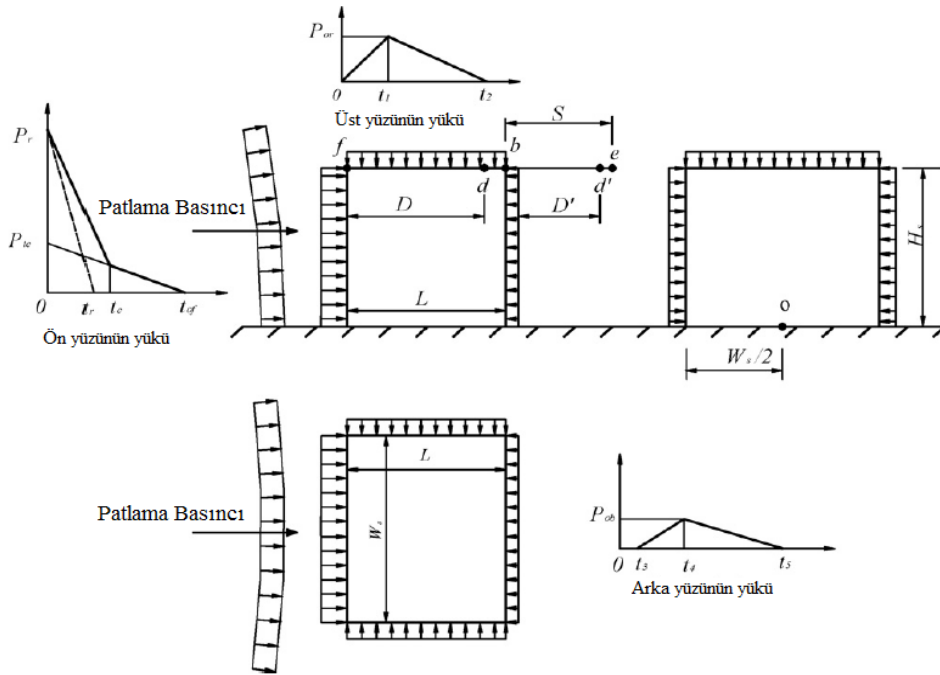
1) Büyük bir şok dalgası, küçük bir yapıya etkidikten sonra tüm yapıyı kapsamaktadır. Ayrıca ardından oluşan rüzgarın hızlı hareketi nedeniyle bir çarpma kuvveti patlama dalgası şeklinde yapıya geçmekte ancak, harekete karşı yapı direnç göstermektedir.

2) Patlama dalgası, orta büyüklükte bir yapıya etkimektedir. Bu şok dalgası, dinamik kuvvetiyle yapının deplasmanına neden olmaktadır.

3) Patlama dalgası, çok büyük bir yapıya etkimektedir. Bu durumda binanın ön cephesi yansıyan dalganın ek basıncıyla yüklenmektedir.

Patlama olaylarında patlama yükünün yapıya uygulanma şekli, hesapların en önemli kısmını teşkil eder. Bu nedenle öncelikle patlama yükünün belirlenmesi gerekmektedir [44].

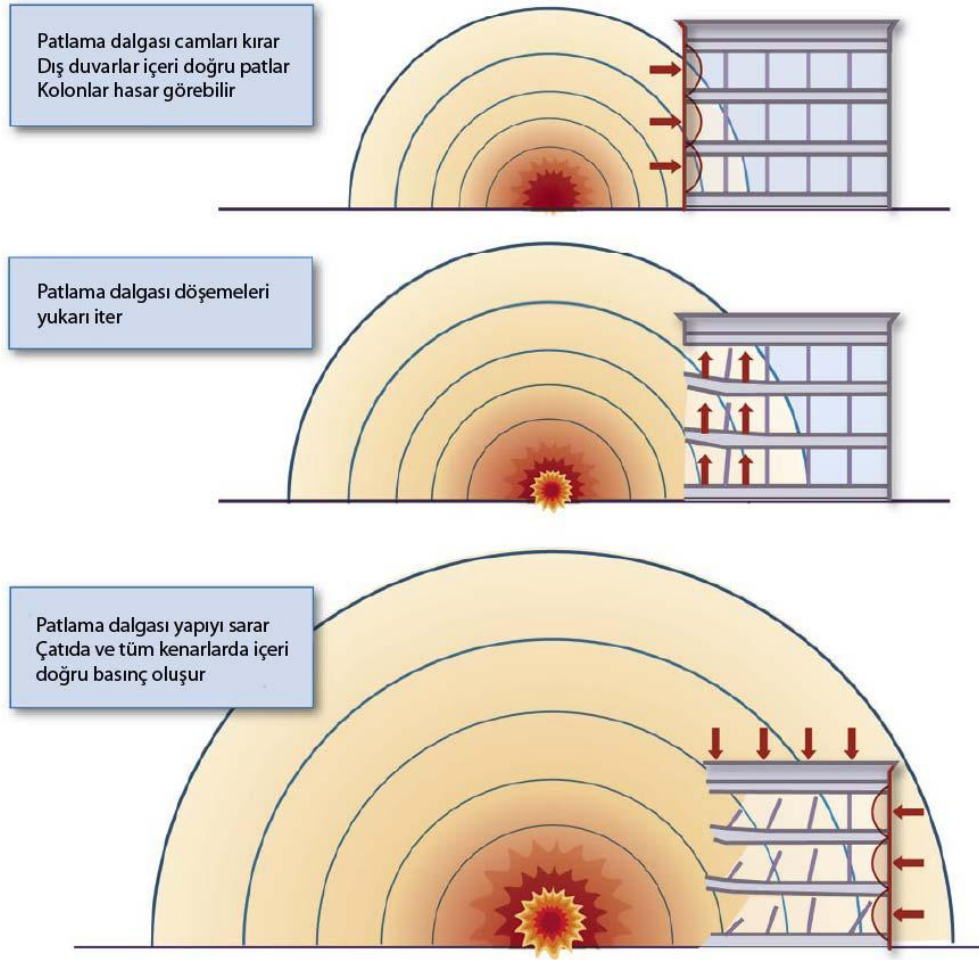
Bir yapı üzerinde oluşabilecek bir patlamanın basınç etkisi, projesinde öngörülen tasarım yüklerinden daha büyük olabilir. Yapı cephesinde oluşan basınca karşı en zayıf noktalar kapı ve pencerelerdir. Camlar, kapılar, tuğla duvarlar parçalanır ve yapı içine doğru büyük bir hızla itilir. Ayrıca, yapı dışında oluşan bir patlamanın pozitif fazındaki şok dalgası yapı içine girerek balon etkisi yaratır. Tavan döşeme ve kirişleri yukarı, kolonlar ve duvarlar içeri doğru itilir. Böylece, kiriş, döşeme gibi eğilme elemanlarında oluşan ters basınçlar, elemanın kolayca kırılmasına yol açabilir. Zayıf patlayıcı maddeler ise ancak yapı içindeki patlamalarda büyük hasarlara neden olabilmektedir.



Şekil 1.14. Yapı dışında oluşan patlamanın yükleme şeması [44]

Şekil 1.15’de görüldüğü gibi basınç genişlemesiyle patlama dalgaları yapı sisteminin içine doğru girmektedir. İçte duvar ve tavanın olmasıyla basınç dalgaları önemli ölçüde artar ve daha fazla yansımaya neden olarak, köşeler ve diğer kenar derzlerde rezonansın oluşmasına neden olmaktadır.

Son yıllarda dünyada sıkça meydana gelen yapı dışı patlama olayları maalesef çoğunlukla büyük can ve mal kayıplarıyla sonuçlanmaktadır. Örneğin 1995 yılında Oklahoma City, ABD’de, Murrah binası önünde bomba yüklü bir kamyon patlatılması sonucu 168 kişi ölmüş ve 800 kişi yaralanmıştır. Can kayıplarının çoğu binanın kısmen çökmesiyle meydana gelmiştir (Şekil 1.16). Betonarme yapının taşıyıcı sisteminde kirişlere oturan kolonlar mevcuttu ve alt katta kiriş açıklıkları yaklaşık 12m idi. Alt kolonlarından birinin kaybı ile açıklığı bir anda 24 m’ye çıkan kirişler mafsallaşarak kırılmış ve sonuçta kısmi göçme meydana gelmiştir (Topçu, Mayıs, 2006).



Şekil 1.15. Dış patlama etkisiyle binanın hasar görülme şeması [43]



Şekil 1.16. Murrah binasına bombalı saldırı, Oklahoma City, ABD, 1995.

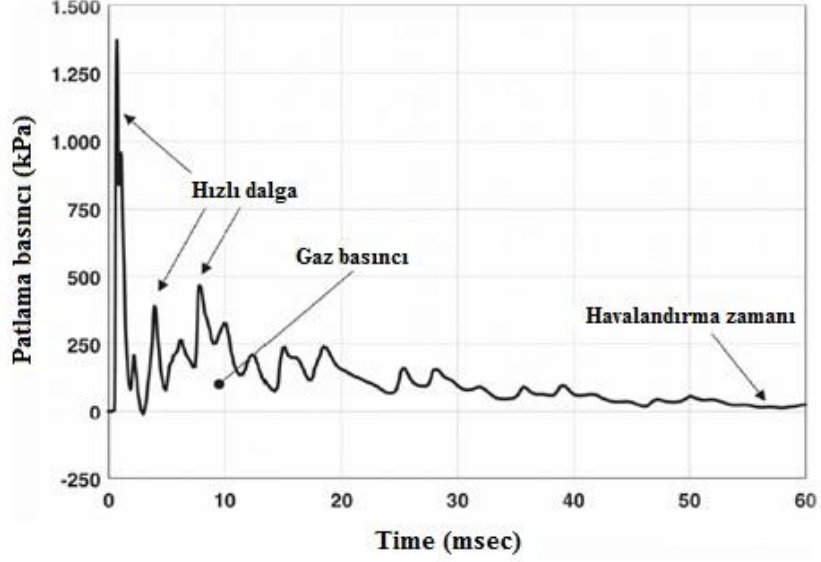
### 1.6.2. Yapı İçindeki Patlama Etkisi

Kapalı hacimde oluşan patlamanın çok daha büyük etki meydana getirdiği bilinmektedir. Oluşan basınç büyüyerek yansımakta, camlar, kapılar, tuğla duvarlar, eşyalar parçalanıp her yöne büyük bir hızla uçuşur. Yukarıda da belirtildiği gibi, balon etkisi ile tavan döşeme ve kirişleri yukarı, taban döşeme ve kirişleri aşağı, kolonlar ve duvarlar dışa doğru itilir.

Patlama basıncına öncelikle o hacimdeki elemanlar direnmek zorunda kalır. Döşeme ve kiriş sisteminin yukarı itilmesi döşemenin parçalanmasına, kirişlerin ve kolonların mafsallaşarak mekanizma durumuna gelmesine neden olur. Büyük bir toplam kuvvetin etkisinde kalan döşeme ya da kiriş, alttan yukarı doğru etkiyen böyle bir yük için boyutlandırılmadığından, ortaya çıkan ters açıklık momentinin kesitin üst bölgesinde oluşturduğu çekme kuvvetini karşılayacak hiçbir donatı yoktur. Dolayısıyla kırılma kaçınılmazdır.

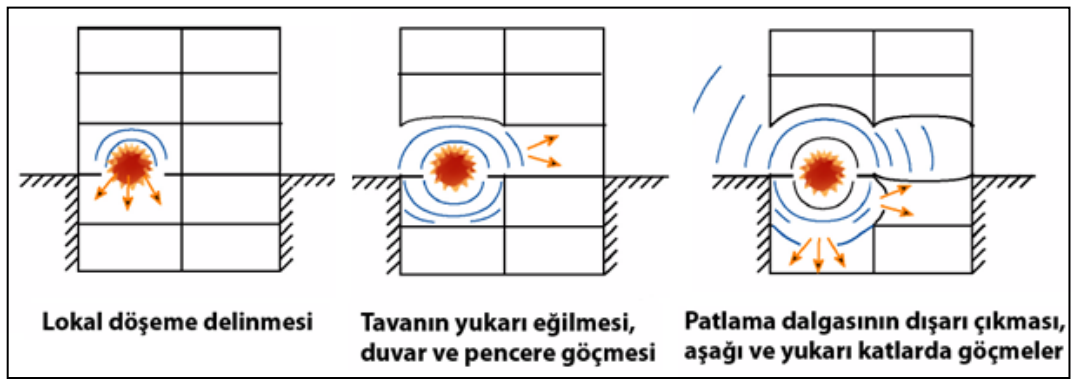
Döşeme ve kirişlerin yukarı itilmesi sonucunda kolonların aksenal basınç kuvveti azalır, sıfır hatta çekme bile olabilir. Aksenal kuvveti azalan kolonun moment ve kesme taşıma gücü düşer. Ayrıca yanal basınca maruz kalır, kiriş gibi davranır ve aşırı büyük açıklık momenti ve kesme kuvveti oluşur. Bu yükleme durumu için boyutlandırılmamış olan kolon da mafsallaşarak kırılır. Kolonun kaybedilmesi kiriş açıklığının büyümesine,

dolayısıyla göçmeye neden olur. Şekil 1.17 'de bir iç patlamada kaydedilen gerçek basınç-zaman ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 1.17. Bir iç patlamanın basınç-zaman ilişkisi [45].

Yapı içi patlamalarda, yapı içinde elde taşınan patlayıcı maddeler alanın küçük olması ve dalgadan oluşan yansıma nedeniyle hasarlara sebep olmaktadır. Böyle bir olayda ortaya çıkabilecek yapı hasar türleri aşağıdaki aşağıdaki Şekil 1.18'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Yapı içi patlama etkisiyle oluşan hasar türleri [43]

Yapı içinde patlamalara örnek olarak, 1968'de Londra'daki çok katlı prefabrike panel sistemiyle inşa edilmiş bir binanın 18. Katının bir köşesinde meydana gelen gaz patlaması sonucunda Şekil 1.19'da görülen hasar durumu verilebilir.



Şekil 1.19. Bina içi gaz patlaması, Londra, İngiltere, 1968 [50]

## 1.7. Patlama Yükünün Belirlenmesi

Bir patlama sırasında ortaya çıkan yükün ve etkisinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler, deneysel, yarı deneysel ve sayısal yöntemler olarak üçe ayrılmaktadır. Deneysel yöntemler, adından da anlaşılacağı gibi, deneylerden elde edilen verilere, yarı deneysel ve sayısal yöntemler ise, fiziksel olaylar ve matematiksel denklemlere dayanmaktadır. Ayrıca, son yıllarda patlama yükünün tahmini için bazı laboratuvar deneyi ve model analizleri, tasarım kılavuzlarında sunulmuştur. Bu kılavuzlardan birkaçı aşağıda verilmektedir.

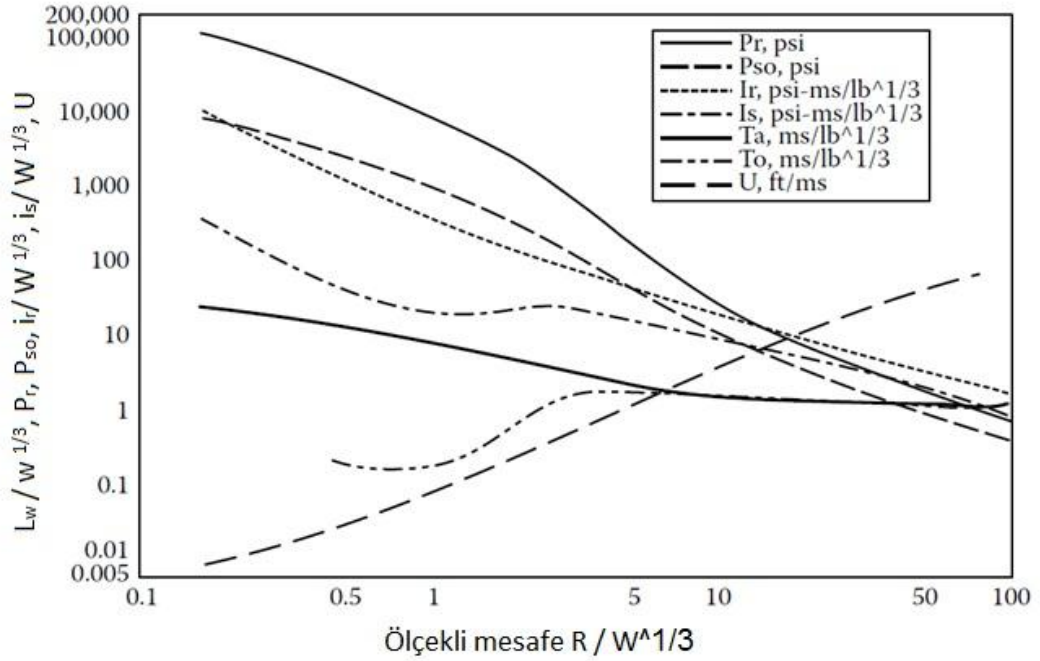
### 2.7.1. TM5-1300 Kılavuzu

Bu kılavuz, yaygın olarak askeri bölgeler ve sivil yerleşim bölgelerindeki patlamalara karşı tasarımlar için daha kullanılabilir hale gelmiştir [47]. Kılavuzda, analiz ve tasarım için adım adım hesap parametrelerine dahil olarak patlama yükü, doğrusal olmayan dinamik analizler, yapısal çelik ve betonarme tasarımlar hakkında bilgiler vermektedir. Bu kılavuzda ifade edilen tasarım eğrileri yardımıyla, patlayıcı dalga parametreleri ölçekli mesafeye göre Z, üç ayrı patlama ortamında (yüksekte, alçakta ve yüzeyde patlama ortamı) hesaplanmaktadır. Bu kılavuzla göre, bir bina çevresinde veya yukarısında, patlamadan

oluşan yansıma hiçbir rezonansa neden olmuyorsa “yüksekte patlama”, zemin üzerinde oluşan patlama ise “zeminde patlama” olarak adlandırılmaktadır. Genellikle yüksekte ve zeminde patlama arasında oluşan patlamaya da “alçakta” patlama denmektedir. Alçakta patlamalar yerden çok yüksekte olmadığı için yansıma dalgaları daha da dikkate alınmaktadır.

TM5-1300 kılavuzunda bir zeminde patlamanın pozitif faz süresinde, dalga parametreleri Şekil 1.20’de gösterilmektedir. Bu şekil, yapıya R mesafesinde oluşan patlamalar hakkında bilgiler vermektedir.

TMS-1300 Kılavuzuna göre zeminde patlamanın yük hesabı, Madde 1.7.1’de verilen yöntemle yapılmaktadır. Bu hesapta, TNT ’ye eşdeğer olan patlayıcı madde ağırlığı  $W$ , patlamanın yapıya mesafesi  $R$ , ölçekli mesafe ise  $Z$  olarak verilmektedir.



Şekil 1.20. Zeminde patlamanın pozitif faz süresinde şok dalga parametreleri [47,50]

### 1.7.2. TM5-855-1 Kılavuzu

Bu kılavuz, patlamanın tasarım ve analizi için yaygın şekilde kullanılmaktadır [48]. Ayrıca bu kılavuzda patlama yükünün tahmini için denklemler verilmiştir. TM5-855-1 Kılavuzu çok katlı binaların patlama yük hesabı için daha uygundur.

### 1.7.3. CONWEP Yazılımında Patlama Yüğü Modeli

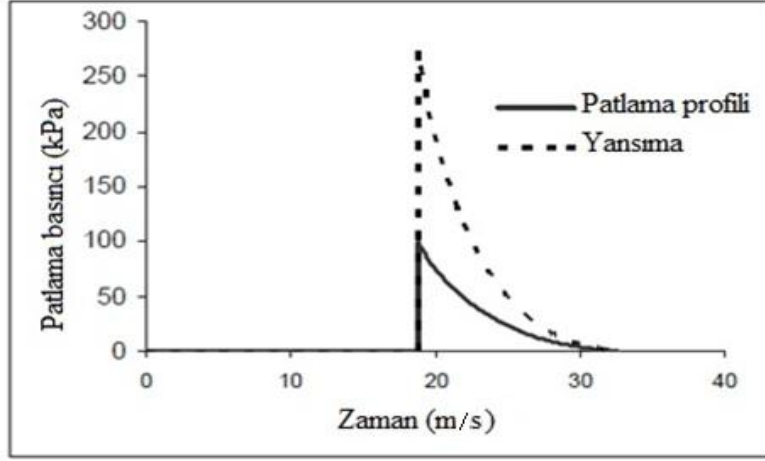
Bu model, Kingery ve Bulmash tarafından küresel ve yarım küresel yüzeyde patlamaların yük hesabı için üretilen denklemlerden yararlanarak oluşturulmuş CONWEP adlı bilgisayar yazılımı ile kullanılmaktadır. Yazılımda kullanılan bu denklemler TM5-855-1 kılavuzunda grafiksel olarak gösterilmektedir. TM5-855-1 kılavuzunun aksine, basınç ve yansıma miktarın azatılması için üçgen profilli şoklar kullanılmaktadır. CONWEP programı kullanılarak gerçekleştirilen örnek bir patlayıcı yük hesap sonuçları aşağıda Şekil 1.21'de verilmektedir. Bu hesapta, 100kg TNT eşdeğeri bir patlayıcının 15m uzaktaki bir yapıya basınç etkisi belirlenmektedir [49].

***** ANSWERS *****	
Hemispherical surface burst	
Equivalent weight of TNT, kg .....	100.0
Range to target, meters .....	15.00
YIELDS	
Peak incident pressure, kPa .....	99.07
Normally reflected pressure, kPa ...	272.2
Time of arrival, msec .....	18.73
Duration, msec .....	13.93
Incident impulse, kPa-msec .....	402.3
Reflected impulse, kPa-msec .....	955.0
Shock front velocity, m/s .....	462.0
Decay coefficient A, where	
$P(t) = P_{so} * (1 - t/t_o) * \exp(-A * t/t_o)$ ....	1.890

Şekil 1.21. Bir yapıya 15m uzaklıkta oluşan 100 kg TNT'ye eşdeğer patlayıcının Conwep programı ile analiz sonuçları

Şekil 1.22'de ise bu patlamadan oluşan basınç ve yansıma değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Yapıdan 15 metre uzaklıkta meydana gelen patlama dalgası, yaklaşık 19 milisaniye sonra yapıya ulaşmaktadır. Bu olayda ek basınç 99 kilo paskal ve pozitif faz süresi 15 mili saniyedir. Sonuçlara göre patlama dalgası binanın dış üzerine isabet ettikten sonra yansıma değeri yaklaşık 272 kilo paskala artmaktadır [49].

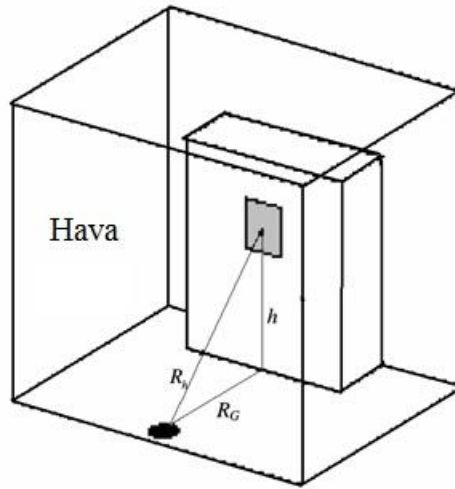




Şekil 1.22. CONWEP programı ile hesaplanan basınç ve yansıma diyagramı

#### 1.7.4 . Zeminde Patlamanın Yapıya Etkisi İçin Basitleştirilmiş Yöntem

Bu yöntem için kullanılan basit bir geometri blok modeli Şekil 1.23'da gösterilmektedir. Yapının dış yüzeyine etkiyen patlama yükü, yapı ve patlayıcı maddenin durumuna göre hesaplanmaktadır. Genellikle bütün dış patlama olayları, yüzey patlamalarla modellenmektedir. Bu modellemede patlayıcı madde, zeminde olduğu için yer tarafından yansıyan dalga ve enerji değerlerinin artımına neden olmaktadır. Ayrıca zemin sert (rijit) olduğu zaman patlama dalgalarının şiddeti iki katına çıkabilmektedir. Zemin genellikle rijit yapıda olmadığı için patlama şokuyla oluşan çukur, enerji değerinin %20 civarında harcanmasına neden olmaktadır [40].



Şekil 1.23. Bir geometrik blok modeli [40]

Şekil 1.23’da görüldüğü gibi, patlayıcı madde ile dış duvar arasında olan mesafe  $R_G$ , patlayıcı madde ile dikkate alınan nokta arasındaki mesafe  $R_h$ , olarak adlandırılmaktadır. Genellikle bu nokta yapı üzerinde bir merkezi nokta veya taşıyıcı bir elemanın parçası olarak seçilebilir. Bu basitleştirilmiş yöntemde, dış duvar üzerine isabet eden patlama basıncı, tamamen yansımaktadır. Bu olayda dalga çarpmasıyla yansıma arasında olan açı ilişkisi dikkate alınmaktadır. Ayrıca patlama olaylarında, çarpma açısı yapısal elemanlar için önemli bir etkidir. Basitleşmiş yöntemde, yerden uzakta bir noktada patlama hesabını elde etmek için aşağıdaki parametreler sağlanmaktadır:

- Patlama modelinde, yüzeyde ve küresel varsayarak dış duvarında  $h$  yüksekliğinde seçilen bir nokta
- Belirlenen patlayıcı madde ağırlığı,  $W$
- $R_G$  mesafesi
- $h$  yüksekliğinde hesaplanan ölçekli mesafe,  $Z_h$
- $h$  yüksekliğinde hesaplanan açı,  $\alpha$
- Maksimum basınçtan elde edilen yansıma miktarı,  $P_r$

#### 1.7.5. Sayısal Yöntemle Patlama Yükü Modeli

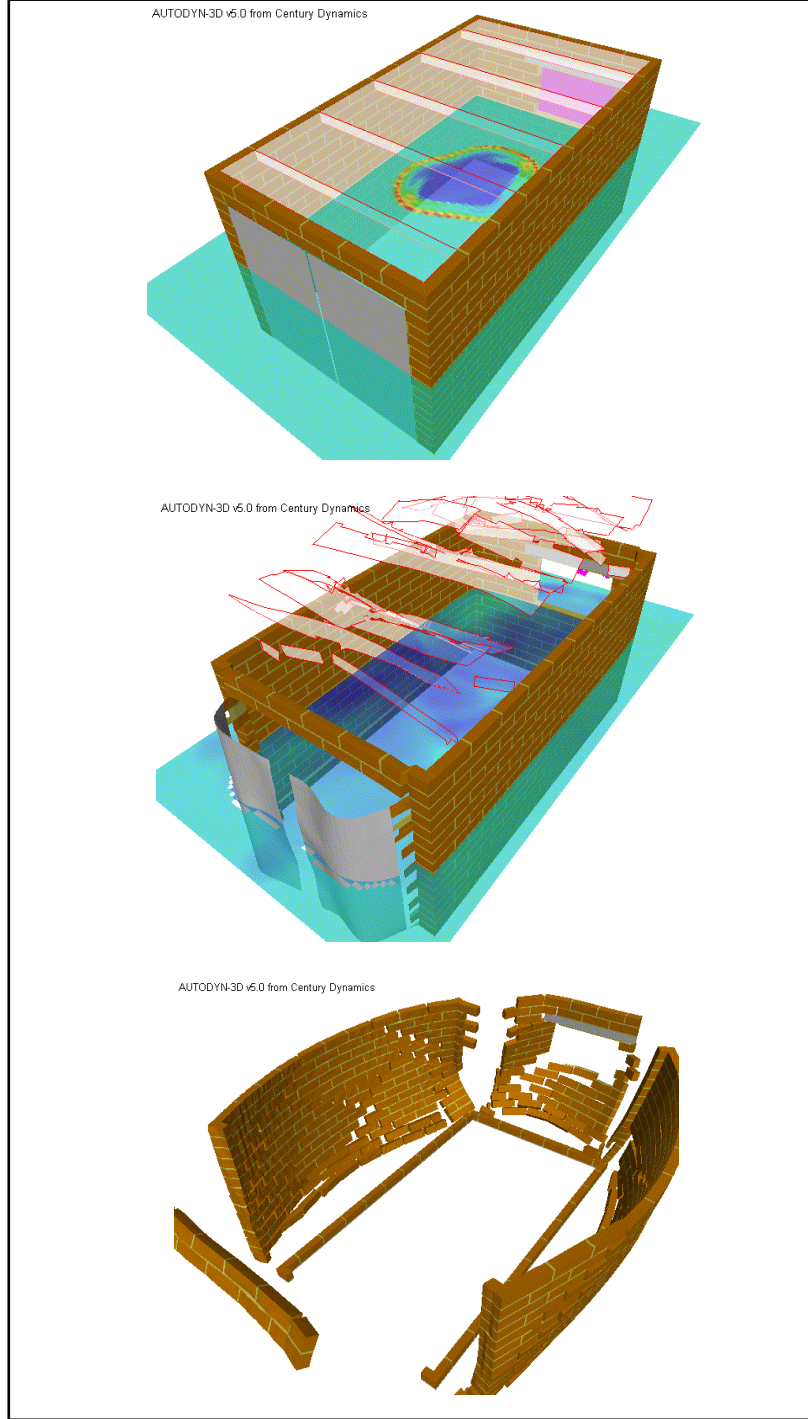
Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak artan hesaplama kapasitesi sayesinde, sayısal yöntemleri kullanarak oluşturulan simülasyon yazılımları, patlamaların yapı ya da diğer elemanlar üzerindeki etkisini daha gerçekçi ve görsel olarak ortaya koymaktadır. Yapı üzerinde patlama hesabını elde etmek için en yaygın kullanımı olan programlardan bazıları Air3d, ABAQUS, LS-DYNA, DYNA3D ve AUTODYN-3D olarak sayılabilir. Analitik yöntemleri kullanan programlar, aşağıda kısaca açıklanan, “Coupled” olan ve olmayan analizler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır:

Couple olan analizinde patlama simülasyonu ile yapısal tepki (yanıt) ilişkilidir. Bu analizde patlama yük tahmini için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve yapısal yanıtlar için hesaplamalı katı cisimler mekaniği (CSM) analizleri birlikte çözülmektedir.

Couple olmayan analizde ise patlama yükleri, yapının rijit olduğu varsayımıyla hesaplanıp yapısal modele uygulanmaktadır. Yapıya gelen yüklerin, gerçek yüklerden fazla olması bu yöntemin dezavantajıdır.

Sonlu elemanlar ve sonlu hacim tekniklerini kullanan yazılımlardan biri olan Autodyn-3d programı geniş bir alanda katı, sıvı ve gazların doğrusal olmayan dinamik

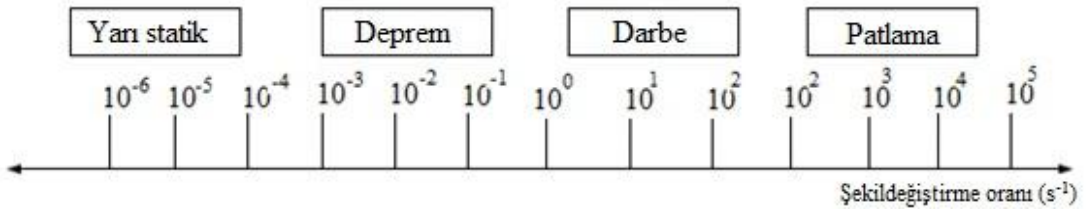
problemler için tasarlanmıştır. Bu tür programlar bazen “Hydrocode” olarak adlandırılırlar. Bu program tarafından incelenen konular daha fazla zamana bağlı olarak nonlineer geometrikler (büyük deformasyon ve şekil değiştirmeler) ve nonlineer malzemeler içermektedir. Autodyn-3d programıyla modellenmiş bir kagir bina içinde patlama olayının simülasyonu Şekil 1.24’da görülmektedir.



Şekil 1.24. Kagir bina içinde patlama simülasyonu (Autodyn-3d programı)

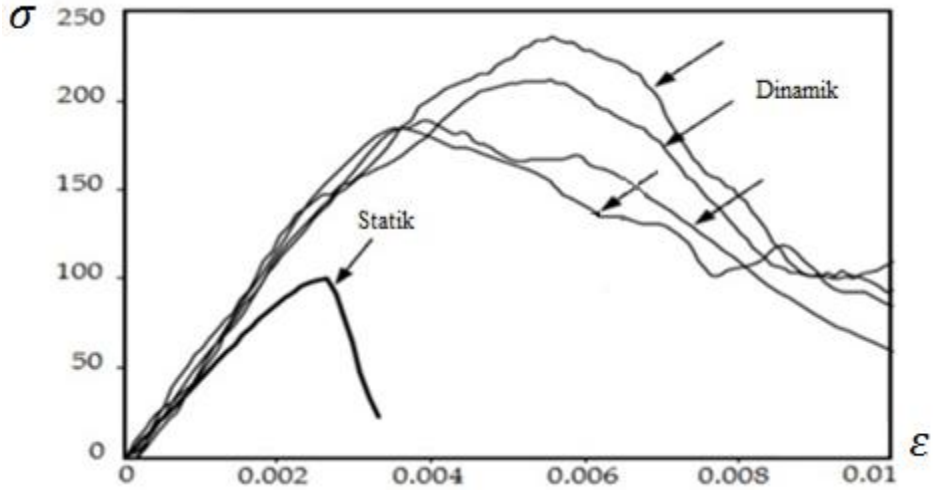
### 1.8. Patlamada Malzeme Davranışı

Genellikle patlayıcı yükleri  $10^2-10^4$ .  $s^{-1}$  arasında daha yüksek şekildeğiştirmelere ( $\epsilon$ ) neden olabilirler. Bu şekildeğiştirmeler yapı ve malzemenin mekanik özelliklerinin değişimine sebep olmaktadır. Şekil 1-25’de birim şekildeğiştirmelere farklı yüklemeler için göstermektedir. Görüldüğü gibi statik şekildeğiştirme  $10^{-6}-10^{-5}$ .  $s^{-1}$  arasında ve patlama basıncından oluşan şekildeğiştirme ise  $10^2-10^4$ .  $s^{-1}$  arasında oluşmaktadır [40].



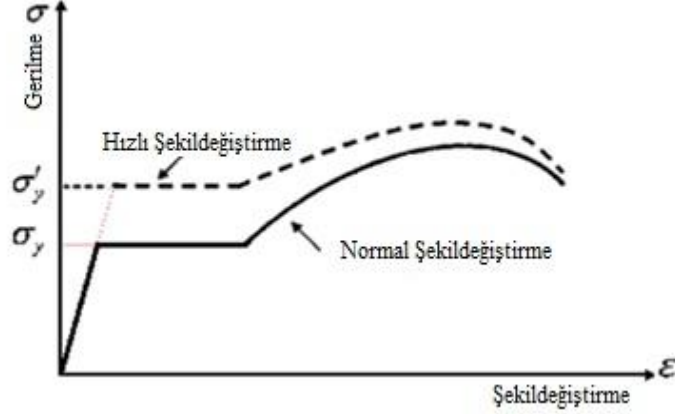
Şekil 1.25. Farklı yüklemelerde birim şekildeğiştirme oranları

Dinamik yüklemeler altındaki beton özellikleri, statik yükleme etkileri altındakinden farklıdır. Aşağıdaki Şekil 1.26’da görüldüğü gibi, eksenel yüklemeye altında oluşan dinamik gerilmeler, statik gerilmelerden daha yüksektir.



Şekil 1.26. Betonun farklı şekildeğiştirme oranları için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları [40].

Çelik ise, izotropik bir malzeme olduğu için elastik olan veya olmayan davranışları dinamik yükler altında çok daha kolayca incelenebilir. Aynı zamanda, çeliğin mekanik özellikleri yüksek şekildeğiştirmelerde önemli ölçüde değişebilir. Çeliğin statik (normal) ve hızlı yükleme altındaki  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramları aşağıdaki şekil 1.27'da gösterilmektedir.



Şekil 1.27. Çelik malzemenin normal ve hızlı yükleme altında  $\sigma - \epsilon$  diyagramları

Görüldüğü gibi dinamik durumda akma gerilmesi artmaktadır. Cowper-Symonds [41], plastisik davranışı şekildeğiştirmeye bağlı olarak aşağıdaki denklemde ifade etmektedir.

$$\delta'_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] \delta_y \quad (1.27)$$

Bu denklemde akma gerilmesi  $\delta'_y$ , Plastik şekildeğiştirme oranı  $\dot{\epsilon}^{pl}$ , Viskozite katsayısı  $\gamma$ , şekildeğiştirme anında sertleşme parametresi  $m$ , Statik akma uzaması  $\delta_y$  olarak adlandırılmaktadır [41].

### 1.9. Patlamaya Karşı Tasarım

Patlama yüküne dayanıklı tasarım aşağıdaki faktörleri içermektedir:

- Belirlenen patlama yükü
- Hesaplanan tasarım yükleri
- Yapının davranış analizi ile taşıyıcı sistemin seçimi

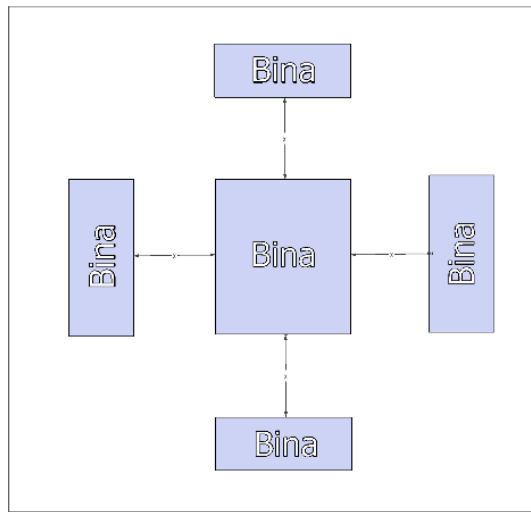
➤ Yapı elemanlarının tasarımı

Bununla beraber, aşağıda maddeler halinde verilen parametrelere de dikkat edilmesi gerekmektedir.

### 1.9.1. Bina Çevresi

Tüm dünyada son yıllarda artan terör olayları veya diğer başka nedenlerle ortaya çıkan patlama olaylarından yapıların etkilenmemesi veya en az derecede etkilenmesi için bina çevresinde alınabilecek bazı önlemler aşağıda sıralanmaktadır [51].

- Binanın kontrolsüz çevreden mümkün olduğunca uzağa yerleştirilmesi,
- Bina etrafında kesintisiz kontrollü bir hat (duvar, bariyer, hendek vs.) oluşturulması,
- Araç giriş-çıkışlarının binadan uzak bir noktada kontrol edilmesi,
- Bina yakınına araç girişi yapılabilecek noktaların sınırlandırılması,
- Bina etrafında oluşturulan güvenli hat ile bina arasında ağaç, çiçeklik, havuz gibi engel oluşturacak öğeler yerleştirilmesi,
- Bina yakınında kritik noktalara darbelere karşı tasarlanmış beton bariyer veya çiçeklik yerleştirilmesi,
- Bina önündeki kaldırımlara araç geçişini engelleyecek bariyer veya baba konulması,
- Kontrollü araç geçişi sağlanan noktalara kaldırılabilir bariyer, baba veya kapan konulması.



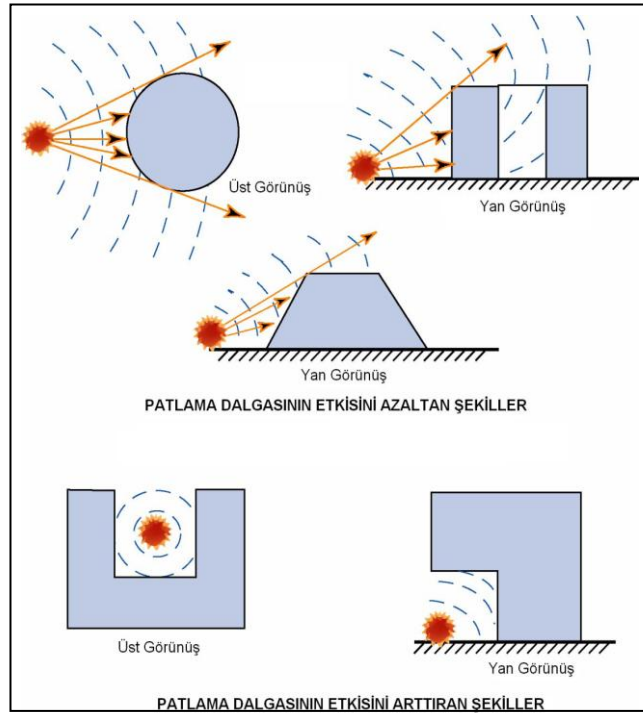
Şekil 1.28. Patlamaya karşı tasarım için bina Yerleşimi

### 1.9.2. Mimari

Binanın mimari tasarımında patlama etkilerine karşı alınabilecek bazı önlemler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [51].

- İçe dönük keskin köşeleri olmayan basit bina geometrilerinin tercih edilmesi,
- Yapı cephesinde patlama sonucu uçuşan cisimlerin zararını önleyecek hafif kaplamaların kullanılması,
- Binada kontrolsüz giriş-çıkış yapılabilecek bölümlerin dışarıya doğru yerleştirilmesi
- Bina içinde kontrollü ve kontrolsüz bölümlerin yatayda ve dikeyde ayrı tutulması ve aralarında tampon bölge, güçlendirilmiş duvar bırakılması,
- Binada asma tavan, metal jaluzi, panjur gibi yapısal olmayan ancak , patlama anında tehlikeli olabilecek unsurların kısıtlanması,
- Aydınlatma sistemlerinin tavana sabitlenmesi,
- Çalışma ve toplantı masalarının pencerelerden olabildiğince uzağa yerleştirilmesi

Aşağıdaki Şekil 1.29'de patlamanın binaya etkisini azaltan ve artıran tasarım örnekleri verilmektedir.



Şekil 1.29. Patlama etkisini azaltan ve artıran bina tasarımları [51]

### 1.9.3. Taşıyıcı Sistem

Bir binanın taşıyıcı sisteminin patlama etkilerine karşı tasarım özellikleri aşağıdaki özelliklerle doğrudan ilişkili olmaktadır [51]:

- Kütle,
- Taşıyıcı elemanlarda yeterli kayma kapasitesi,
- Tersinir yükler için yeterli kapasite,
- Yüksek hiperstatiklik derecesi,
- Yanal rijitlik,
- Süneklik

Bir binanın patlama etkilerinden en az derecede etkilenmesini sağlayabilmek için taşıyıcı sisteminin tasarımında dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar ise aşağıda sıralanmaktadır [51]:

- Çerçevesel yapılarda kolon aralıklarının sınırlandırılması,
- En dış açıklıklarda kat sayısı mümkünse az tutulmalı,
- Saplama kirişlerden ve kirişe oturan kolonlardan sakınılmalı,
- Ağırlıklı olarak içduvarlar tarafından taşınan yığma yapılarda duvar aralıkları sınırlandırılmalı,
- Ağırlıklı olarak dış duvarlar tarafından taşınan yığma yapılarda kritik duvarlar arkadan mesnetlenmeli.

#### 1.9.3.1. Patlama Etkisindeki Yapı Elemanları

Patlama etkisine maruz yapı elemanlarının tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

##### a) Kenar çerçeveler ve Kenar kolonlar

- Bir dış patlama sonucu dış çerçevelerin göçmesi durumunda oluşacak hasar binanın tümüne yayılmamalıdır.
- Kolonlarda burkulma özellikle gözönüne alınmalı. Bir kattaki döşemenin göçmesi sonucu kaybedilen yanal desteğe karşı kolonlar iki veya daha fazla kat yüksekliğinde burkulmaya karşı tasarlanmalı.



- Betonarme kolonlarda etriye sıklaştırmasıyla yüksek süneklik sağlanmalı.
- Çelik kolonlarda ekler mümkün olduğunca yerden yüksekte yapılmalı ve birleşim detaylarının sünekliliği yüksek olmalı
- Bina dışında doğrudan erişilebilir açıkta kolon bırakılmamalı
- Açık kolonların etrafında 15-20 cm kalınlığında, patlayıcının doğrudan kolona zararını engelleyecek mimari öğeler kullanılmalı [51].

Aşağıda, patlama sonucu hasar gören bir betonarme kenar kolona ait bir görünüm Şekil 1.30’de verilmektedir



Şekil 1.30. Patlama ile hasar gören bir betonarme kenar kolon

#### b) Cephe duvarları

Dış patlama riskine maruz binaların cephe duvarlarının betonarme perde duvar olarak tasarlanması en etkili yöntemdir. Zira patlama esnasında uçan parçaların yol açacağı hasar yüzünden yığma duvarlar tavsiye edilmemektedir.

#### c) Kenar kirişler

Yapısal bütünlük açısından dış çerçeveyi çepeçevre saran kirişler daha faydalıdır.

#### d) Çatı sistemleri

Bir patlamada asıl yük, patlama dalgasının aşağı yönlü basıncıdır. Ancak, patlama dalgası içeriye girdiğinde veya patlama yapı içinde olduğunda yukarı yönlü bir basınç da oluşacaktır. Çatı her iki etkiye karşı tasarlanmalıdır. Bununla beraber;

- İki yönde kirişlerle desteklenen betonarme çatılar en avantajlı çatı sistemidir.
- Kirişler ve döşeme yukarı yönlü basınca karşı her iki tarafta donatıya sahip olmalıdır. Sık etriyeler konulmalıdır.
- Çelik çatılarda eleman kapasiteleri ve birleşim detayları yukarı yönlü basıncı karşılayacak şekilde olmalıdır.
- Öngermeli ve/veya prefabrike sistemlerin kullanıldığı çatılarda yukarı yönlü basınç özellikle dikkate alınmalı, bağlantılar buna göre yapılmalıdır.
- Kirişsiz döşemeli sistemlerde zımbalamaya dikkat edilmelidir.
- Hafif çatı sistemlerinin (ahşap ve çelik kafes) patlama direnci çok azdır [51].

#### e) Döşemeler

Patlama açısından döşemelerin;

- Doğrudan patlamaya karşı yeterli kapasiteye sahip olmaları,
- Destekleyen bir kolon veya duvarın kaybında yükü dağıtacak yeterli kapasiteye sahip olmaları ve
- Üst katın veya çatının göçmesi durumunda toptan göçmeyi durduracak yeterli kapasiteye sahip olmaları şeklinde üç temel görevi bulunmaktadır.

Ayrıca döşemelerin patlama etkilerine karşı tasarımında dikkat edilmei gereken diğer bazı hususlar ise;

- Binanın lobi, depo girişi, otopark, dükkan gibi denetimsiz alanlarındaki döşemeler olası patlama etkisini durduracak şekilde tasarlanmalıdırlar.
- Prefabrike plakalar bağlantı noktalarının zayıflığı yüzünden tercih edilmemelidir.
- Öngermeli döşemeler kapasiteleri aşıldığında gevrek kırılmaya uğrayacaklarından tercih edilmemelidirler,
- Kirişsiz döşemeler kolon veya duvar kaybında yük aktarma kapasitelerinin düşük olması ve zımbalamaya karşı zayıf olmaları sebebiyle tercih

edilmemelidirler. Kullanıldıklarında, kirişlerle çevrilmeli ve kolonlar arası donatılarının sürekli olması sağlanmalıdır [51].

### **1.10. Konu ile İlgili Olarak Daha Önce Gerçekleştirilen Diğer Bazı Çalışmalar**

Patlama olayının çeşitli elemanlar üzerindeki etkileri konusunda bugüne kadar farklı disiplinlerde çok sayıda deneysel ve teorik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. İnşaat Mühendisliği alanında patlama ve çarpma yüklerinin yapılara etkileri üzerindeki çalışmalar ise, özellikle kiriş elemanlar, plaklar ve ince kabuk elemanlar üzerinde yoğunlaşmış, çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aşağıda, bu araştırmalardan bazıları çok kısaca sunulmaktadır.

Johnson [52], bir atış darbe şiddetini sınıflandırmak için sonraki araştırmacılar tarafından da yaygın olarak kullanılan boyutsuz parametreler önermiştir.

Jones [53], üniform patlama yükü altında olan dikdörtgen plaklar için boyutsuz bir parametre önermiştir .

Zhao [54]'da yine üniform patlama yükü altında farklı boyutsuz parametreler önermiştir.

Opat ve Menkes [55], darbe etkisi altındaki iki ucu ankastre kiriş üzerinde deneysel çalışma yapmıştır.

Shave ve Nurick [56], karesel plaklar üzerinde yaptığı çalışmada, patlama olayında üç ana kırılma modu olduğunu ifade etmiştir.

Cloete ve arkadaşları [55], ortadan tutulu ve çevreden ankastre mesnetli dairesel plaklar üzerinde patlama deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu araştırmacılar da deney sonuçlarına göre üç farklı kırılma modu elde etmişlerdir.

Langdon ve diğ. [57], patlama yüklemesi altındaki plaka davranışını ABAQUS–Explicit yazılımını kullanarak incelemiştir.

Louca ve diğ. [58], üniform darbe yükü altındaki çelik plakların davranışını, rijitleştirici elemanların olması ve olmaması halleri ABAQUS-Explicit ve DYNA3D programları ile incelemiştir.

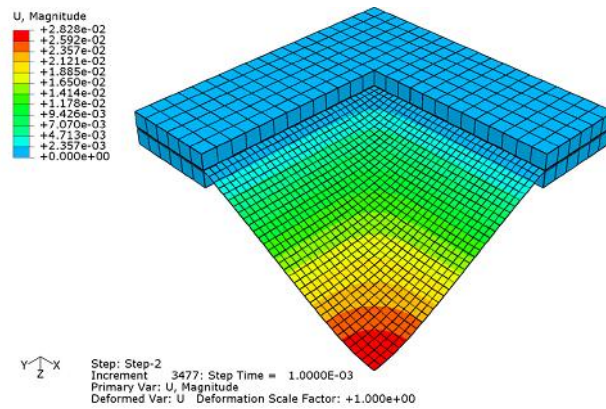
Jacob ve diğ. [59], merkezi (konsantre) yük altında olan ankastre mesnetli dikdörtgen plaklar üzerinde deneysel ve teorik incelemeler yapmıştır.

Yuen ve Nurick [60], üniform patlayıcı yükü altında farklı rijitleştiricili çelik plakaların davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelemiş, yüksek sıcaklık etkilerini göz önüne alarak, bazı yırtılma tahminleri gerçekleştirmişlerdir.

Ramajeyathilagama ve Vendhan [61], sualtı patlamasına maruz ankastre mesnetli kare çelik plakların davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bu araştırmacılar, darbe faktörünü yüklerin karşılaştırılması için kullanmışlardır.

### 1.11. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, patlama olayı hakkında bu bölümde verilen bilgiler ışığında, sadece mesnetlenme şekilleri açısından farklı, çelik panel elemanın üzerlerine etkitilen üniform yayılı patlama basınç yükü altındaki davranışlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, panel elemanların sonlu elemanlar yöntemini kullanan ABAQUS paket programı [62] ile doğrusal olmayan modellemeleri yapılmış, panellerin merkezindeki yerdeğiştirmeler, panel ve mesnetlerde harcanan plastik enerjiler ile, oluşan plastik birim şekildeğiştirmeler belirlenmiştir. Modellenen çelik panellere etkiyen patlama yüklerinin sayısal değerlerinin belirlenmesi ise bu çalışmanın konusu ve amacı dışındadır. Bu nedenle modellemeler, sadece kabul edilen yüzey yükleri altında yapılan çözümleri kapsamaktadır. Bu incelemede tasarlanan modeller, Zhao ve Nurik [60] tarafından daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalardaki modellerle, boyutlar ve patlama yükleri bakımından, benzer olup, farklılık özellikle panel mesnet tasarımlarındadır. Zhao ve Nurik [60] tarafından ABAQUS ile yapılan panel modellemesine ait bir görünüm Şekil 1.31’de verilmektedir.



Şekil 1.31. Zhao ve Nurik’e ait panelin ABAQUS çözümü

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE TARTIŞMA**

Bu başlık altında, bu çalışmanın amacına uygun olarak tasarlanan, yapı elemanı olarak da kullanılabilen, çelik panel elemanların patlama etkisi altındaki davranışları, sayısal olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

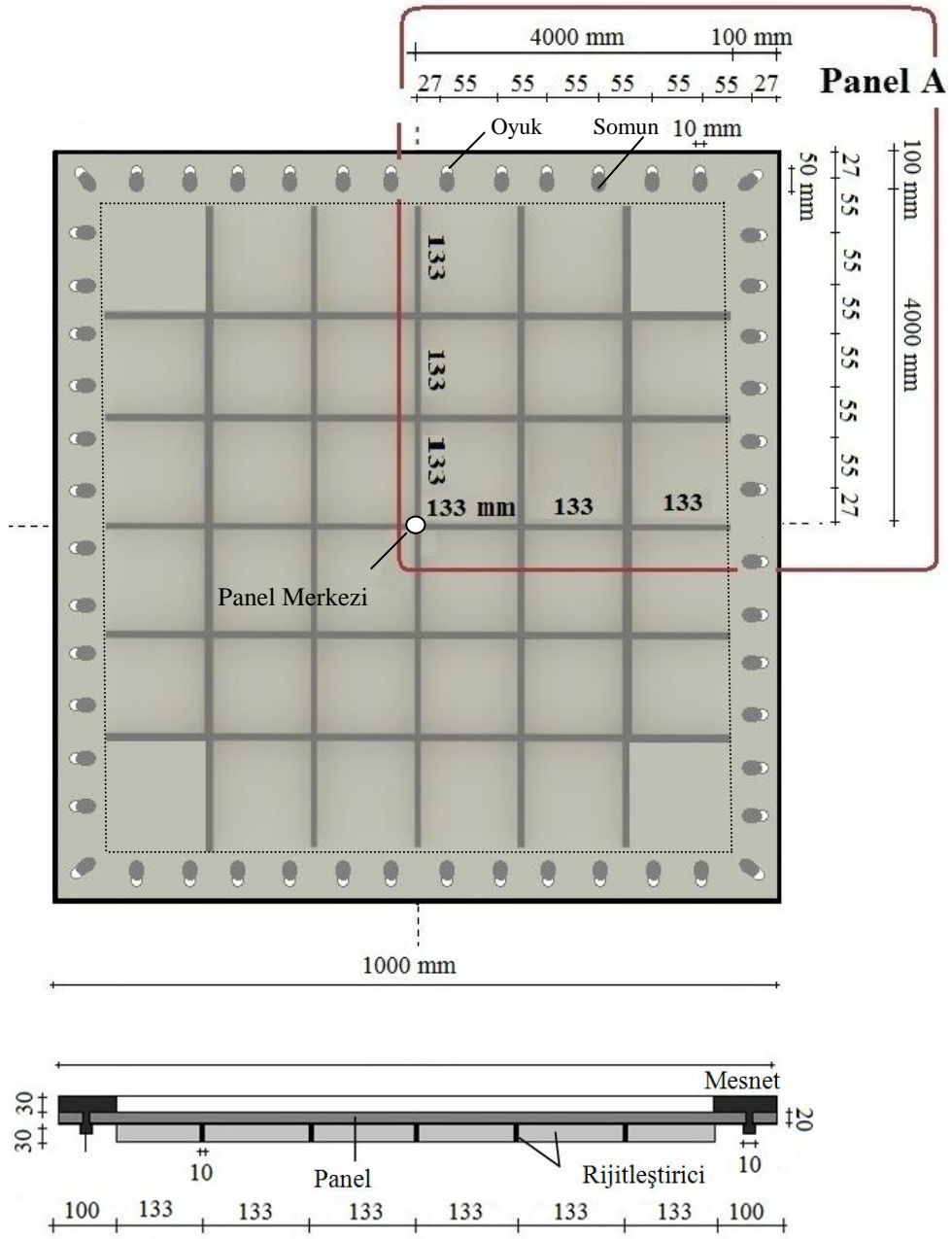
### **2.1. İnceleme Konusu Çelik Panellerin Özellikleri**

Patlama etkisi altında dinamik davranışı incelenecek çelik panel elemanların çelik bir çerçeveye bağlı olduğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla bu incelemede, dört farklı tipte oluşturulan modellerde bu bağlantının şeklinin ve panel yüzeyindeki rijitleştiricilerin davranışa etkisi araştırılmıştır. Modellenen paneller, aşağıda sıra ile tanıtılmıştır.

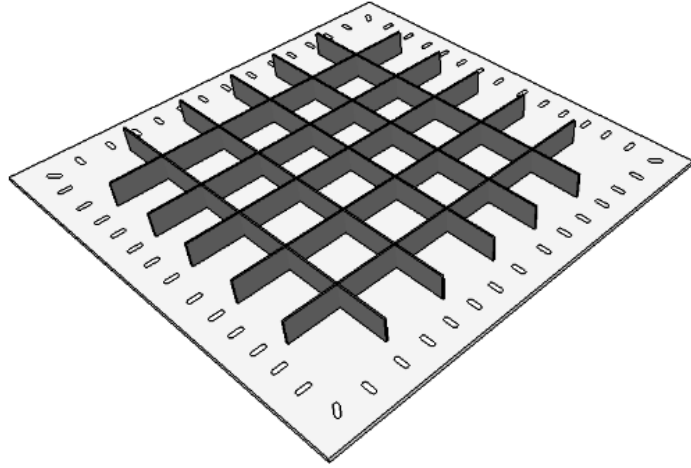
#### **2.1.1. PANEL-A**

Birinci modellemede, patlama enerjisinin değer kaybetmesi için sürtünme kuvvetlerinden yararlanılmaktadır. Bunun için, modellenen bu panel üzerinde oyuk şeklinde delikler kullanılmıştır. Bu oyukların genişliği 10mm, boyu 50 mm'dir(Şekil 2.1). Mesnet şeritindeki tırnaklar bu oyuklardan geçmekte, panele rondela ve somun ile monte edilmektedir. Bu modellemede panel ile mesnet şeriti arasındaki sürtünme, izin verilen yerdeğiştirme nedeniyle, patlamadan sonra enerjinin değer kaybetmesine sebep olmaktadır. Modellemeyi basitleştirmek için, rondela ve somunlar bileşik cisim olarak varsayılmıştır.

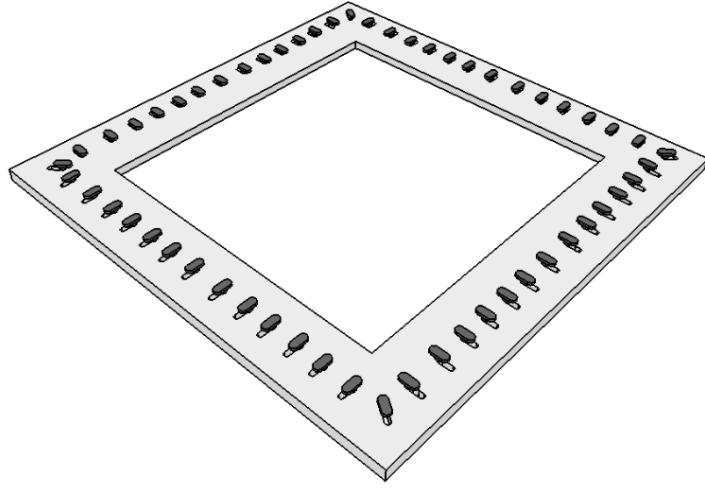
PANEL-A modelinde sac kalınlığı 2mm, sürtünme katsayısı ise 0.3 olarak alınmıştır. Mesnet şeriti 100mm x 30mm kesitindedir. Panel-A analizi için panele sırasıyla etkitilen  $2.5 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  $1.0 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>,  $1.5 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> ve  $2.0 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> değerindeki patlama yüklerine ait çözümler elde edilmiştir. Panel-A analizinde etkitilen patlama yükleri için panel merkezinde yerdeğiştirme, plastik birim şekildeğiştirme ve harcanan plastik enerji elde edilmektedir. PANEL-A modelinin genel görünüşü ve ölçüleri Şekil 2.1'de, üzerinde rijitleştirici levhaları da olan panel Şekil 2.2'de, mesnet altlığı Şekil 2.3'de ve çözümlenmeye hazır montaj durumu Şekil 2.4'de görülmektedir.



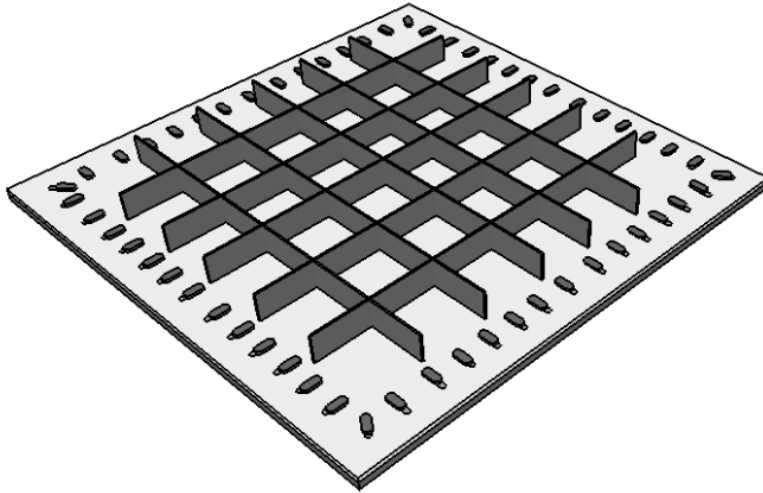
Şekil 2.1. PANEL-A'nın genel görünüşü ve ölçüleri



Şekil 2.2. Panel-A'nın görünümü



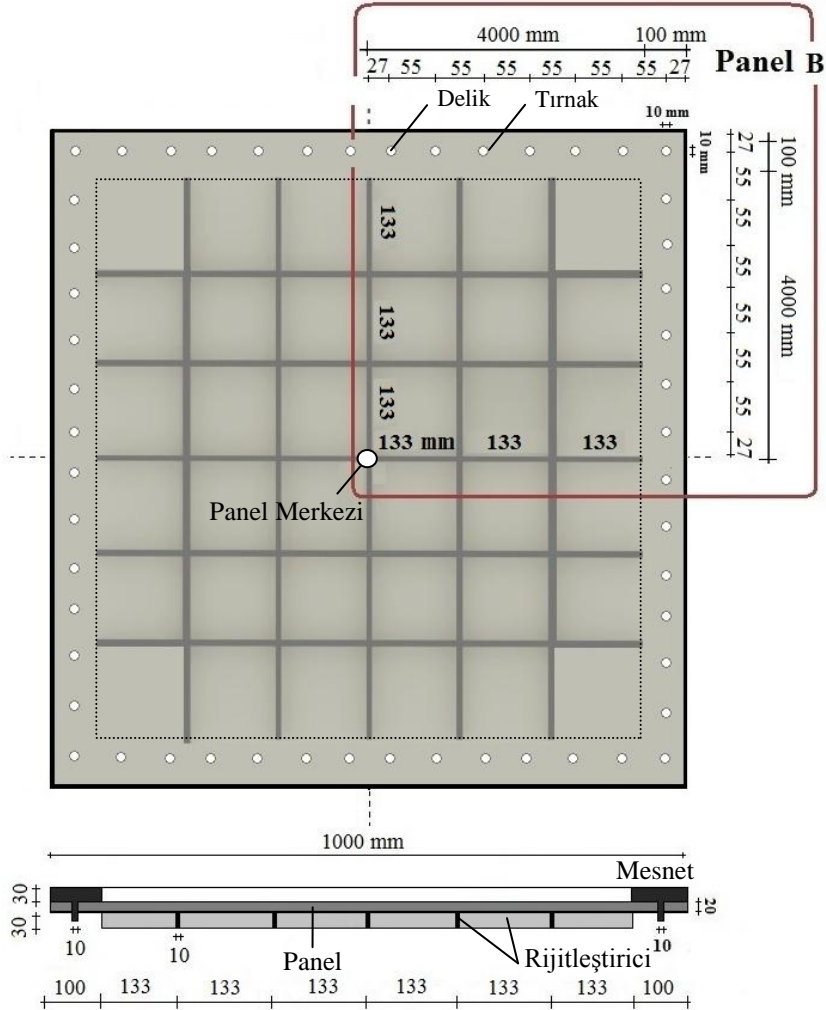
Şekil 2.3. Panel-A için mesnet görevi yapan çelik altlık



Şekil 2.4. Monte edilmiş PANEL-A

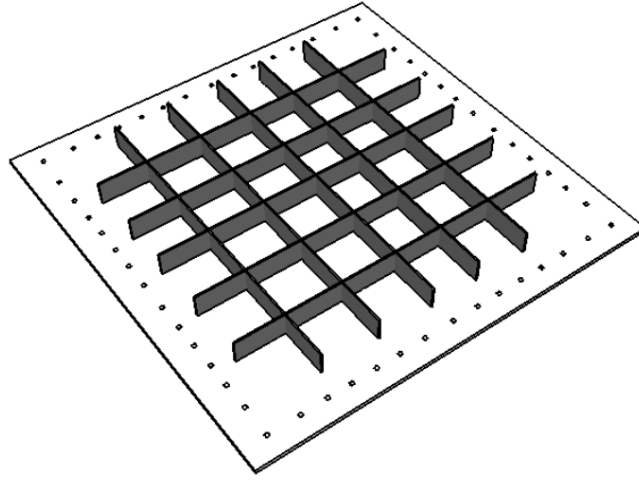
### 2.1.2. PANEL-B

İkinci model olan Panel-B, üzerinde 10mm çapında, 30mm yüksekliğinde silindirik tırnakları olan 100mm x 30mm kesitinde çelik şerit altlık üzerine serbestçe takılarak mesnetlenmektedir. Bu modelde mesnet şeritleri ve silindirik tırnaklar sabit ve rijit varsayılmıştır. Panel-B’de sac kalınlığı 2mm’dir. Panel-B’nin analizi için panele sırasıyla etkitilen  $2.5 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  $1.0 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>,  $1.5 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> ve  $2.0 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> değerindeki patlama yüklerine ait çözümler elde edilmiştir. Panel-B’nin analizinde de etkitilen patlama yükler için panel merkezindeki yerdeğişme, plastik birim şekildeğişme ve harcanan plastik enerji elde edilmektedir. PANEL-B modelinin genel görünüşü ve ölçüleri Şekil 2.5’de, üzerinde rijitleştirici levhaları da olan panel Şekil 2.6’da, mesnet altlığı Şekil 2.7’de ve panelin çözümlenmeye hazır montaj durumu ise Şekil 2.8’de görülmektedir.

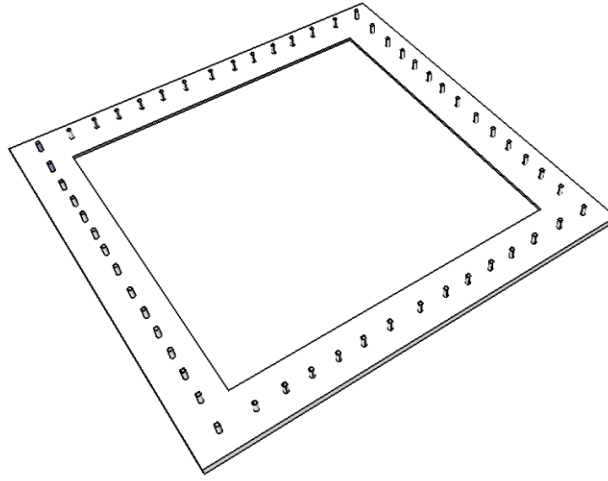


Şekil 2.5. PANEL-B'nin genel görünüşü ve ölçüleri

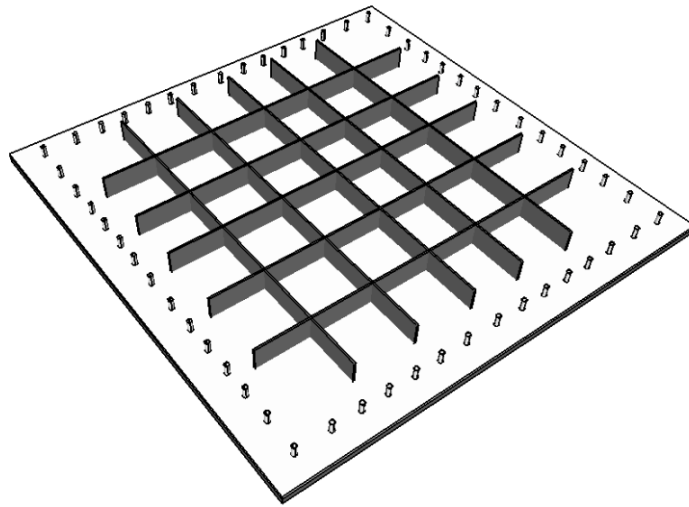




Şekil 2.6. Panel-B'nin görünümü



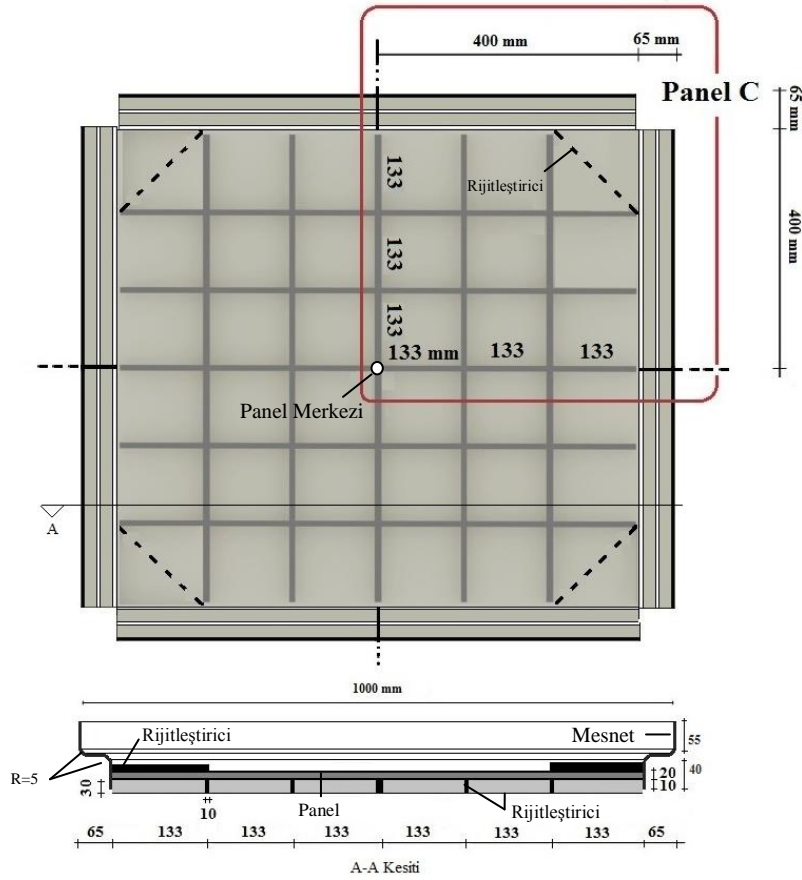
Şekil 2.7. Panel-B için mesnet görevi yapan çelik altlık



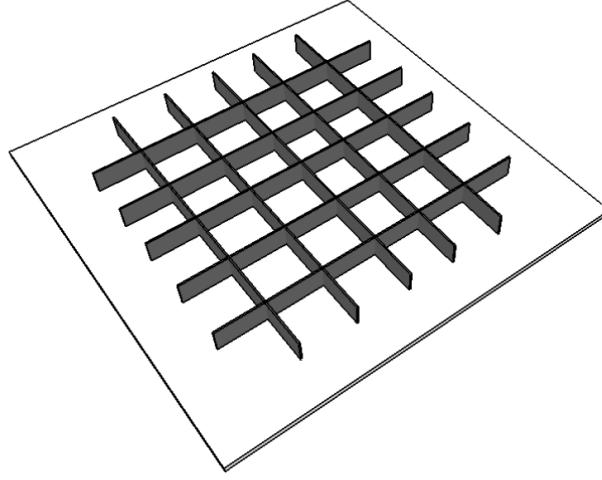
Şekil 2.8. Monte edilmiş PANEL-B

### 2.1.3. PANEL-C

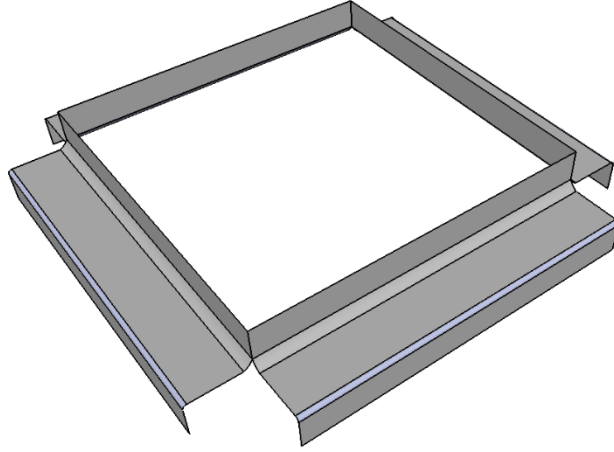
Üçüncü PANEL-C modelinde, patlama enerjisinin değer kaybetmesi, panelin mesnet bölgelerinde oluşturulan, yay benzeri davranış gösterebilen, özel kıvrımlı çelik plaklarının şekildeğiştirilmesiyle elde edilmektedir. Sac kalınlığı 2mm olan PANEL-C'nin sadece  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yüklemesi altında, kalınlığı 3, 5, 7 ve 10mm olarak seçilen kıvrımlı saclardan oluşturulmuş mesnet elemanlarının harcadığı enerji, plastik birim şekildeğiştirilmesi ve panelin merkez nokta yerdeğiştirilmesi araştırılmıştır. Modelde, kritik yük seviyesini artırmak, diğer bir deyişle paneli güçlendirmek için 2mm kalınlığında 20mm yüksekliğinde ilave çapraz rijitleştirici levhalar da kullanılmıştır (Şekil 2.9). Bu modelin genel görünüşü ve ölçüleri Şekil 2.9'da, üzerinde rijitleştirici levhaları da olan panel Şekil 2.10'de, mesnet altlığı Şekil 2.11'de ve çözümlenmeye hazır monte edilmiş sistem Şekil 2.12'de görülmektedir. Modelde, panel levhasının mesnet altlığı olarak görev yapan kıvrılmış plaklara rijit bağlı olduğu varsayılmıştır. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi model köşelerinde ayrıca çapraz rijitleştirici plakalar da kullanılmıştır.



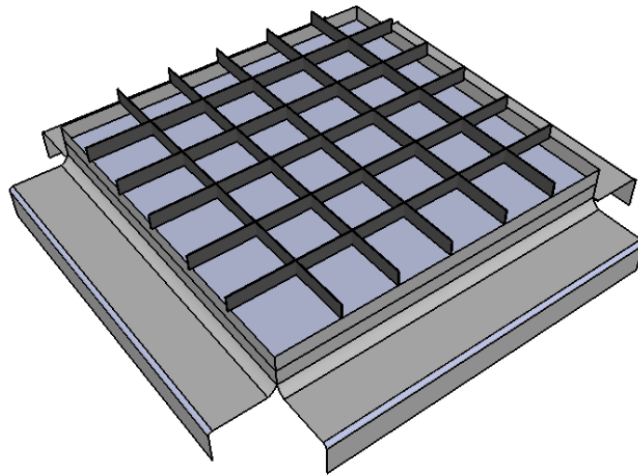
Şekil 2.9. PANEL-C'nin genel görünüşü ve ölçüleri



Şekil 2.10. Panel-C'nin görünümü



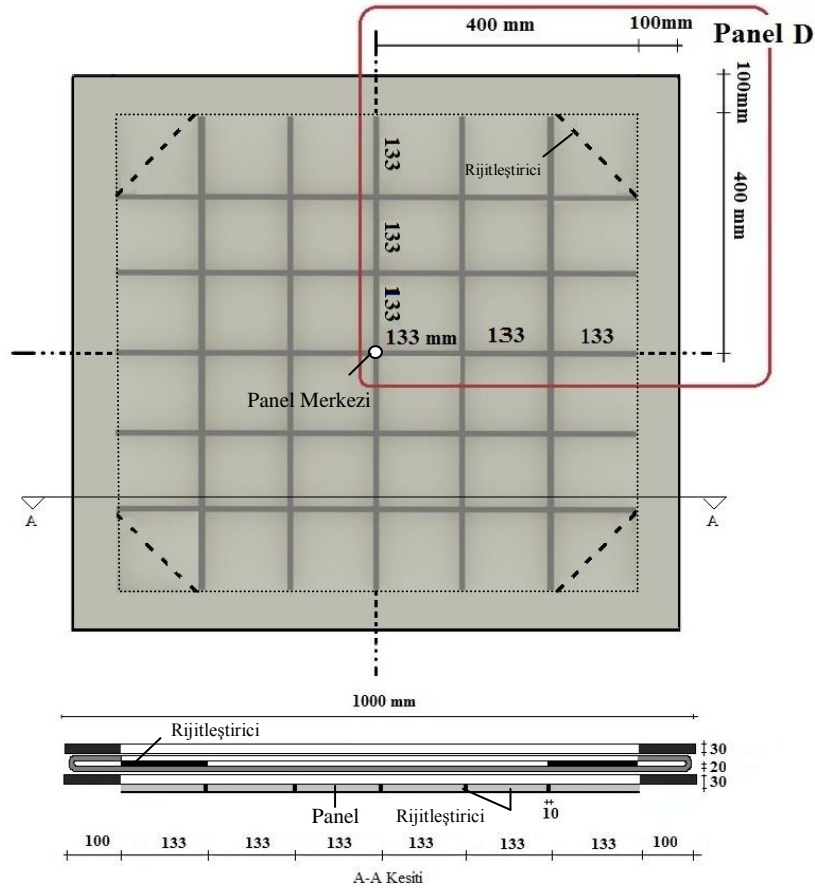
Şekil 2.11. Panel-C için mesnet görevi yapan çelik altlık



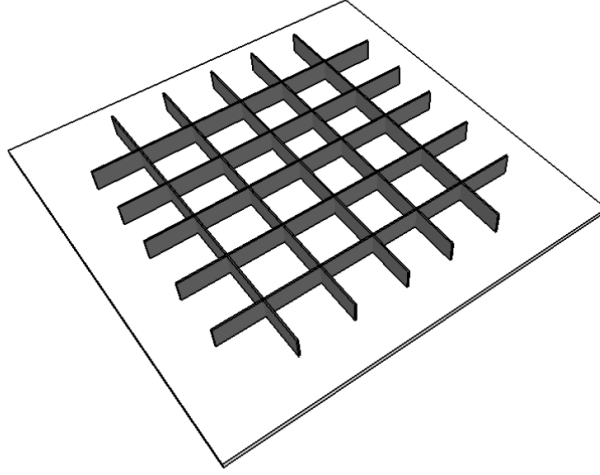
Şekil 2.12. Monte edilmiş PANEL-C

#### 2.1.4. PANEL-D

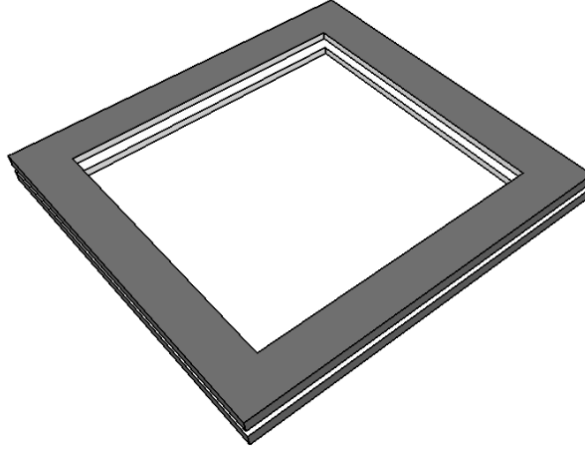
Dördüncü olarak modellenen bu modelde, PANEL-C'dekine benzer yaklaşımla, patlama enerjisinin değer kaybetmesi, panelin mesnet bölgelerinde oluşturulan  $180^\circ$  kıvrımın şekildeğiştirmesiyle elde edilmektedir. Mesnet altlığı olarak kullanılan çelik plakaların aynısı, davranışı iyileştirmek için, rijitleştirici olarak, panelin üst tarafında da kullanılmıştır. PANEL-D modelinde panel plaka kenarlarındaki kıvrım yarıçapının değişimi esas alınmıştır. Patlama yükü yine  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  olarak etkilmiştir. Modelde panel sac kalınlığı 2mm olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca bu kenar kıvrım yarıçaplarının etkisi, enerjinin değer kaybı, maksimum yer değişme ve plastik birim şekildeğiştirme açısından incelenmiştir. Bu modelin genel görünüşü ve ölçüleri Şekil 2.13'de, üzerinde rijitleştirici levhaları da olan panel Şekil 2.14'de, mesnet altlığı Şekil 2.15'de ve çözümlenmeye hazır monte edilmiş sistem Şekil 2.16'da görülmektedir. Modelde, panel levhasının alttaki mesnet altlığına rijit bağlı olduğu varsayılmıştır. Bu modelde de, köşelerinde ayrıca çapraz rijitleştirici plakalar kullanılmıştır.



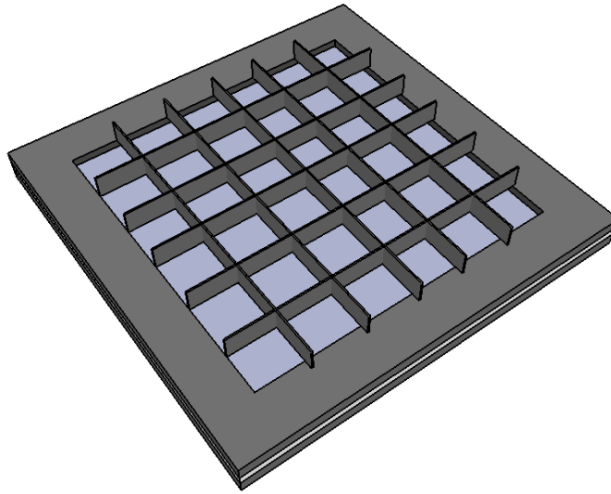
Şekil 2.13. PANEL-D'nin genel görünüşü ve ölçüleri Mesnet



Şekil 2.14. Panel-D'nin görünümü

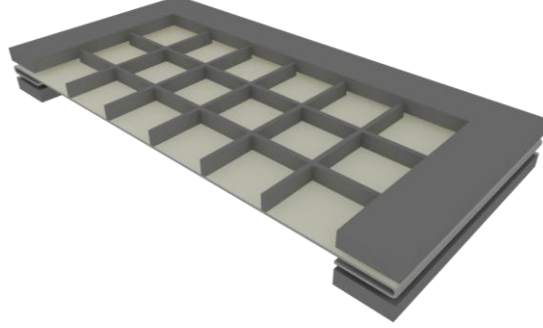


Şekil 2.15. Panel-D için çelik şeritler



Şekil 2.16. Monte edilmiş PANEL-D

Panelin mesnet bölgesinin daha iyi anlaşılabilmesi için bir kesit görünüşü ise aşağıdaki Şekil 2.17’de verilmiştir.

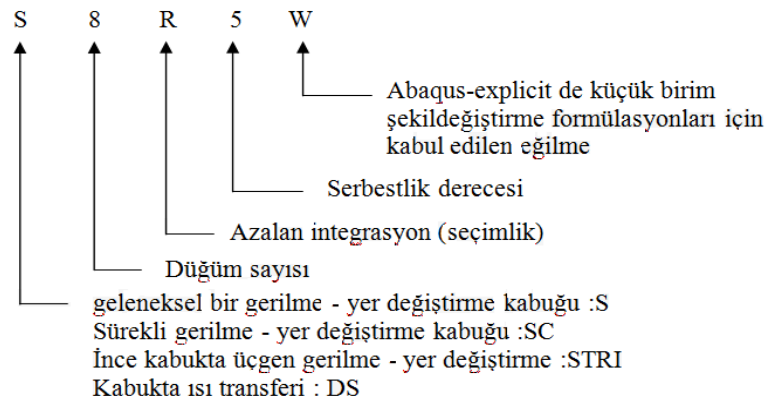


Şekil 2.17. PANEL-D’nin kesit görünümü

## 2.2. Panellerin Sonlu Eleman Modeli ve Patlama Yüğü Altında Çözümlemesi

### 2.2.1. Panellerin Sonlu Eleman Modeli

Boyutları 1000mm x 1000mm ve çelik sac kalınlığı 2mm olarak tasarlanan çelik panel modelleri tam simetrik olduklarından, bilgisayar yükünü azaltmak için sonlu eleman modellemesi 500mm x 500mm’lik çeyrek elemanlar üzerinde yapılmış ve simetri sınır koşulları plak kenarlarında uygulanmıştır. Panellerin modellemesi için kabuk (shell) elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanlar, çözümlemede kullanılan ABAQUS programının kütüphanesinde S3R, S4R, R3D4, C3D4 ve C3D8R adlarıyla tanımlanan sonlu elemanlar olarak seçilmiştir. Bu sonlu elemanların basit tanıtımı aşağıdaki Şekil 2.18 ve Tablo 2.1’de verilmektedir.



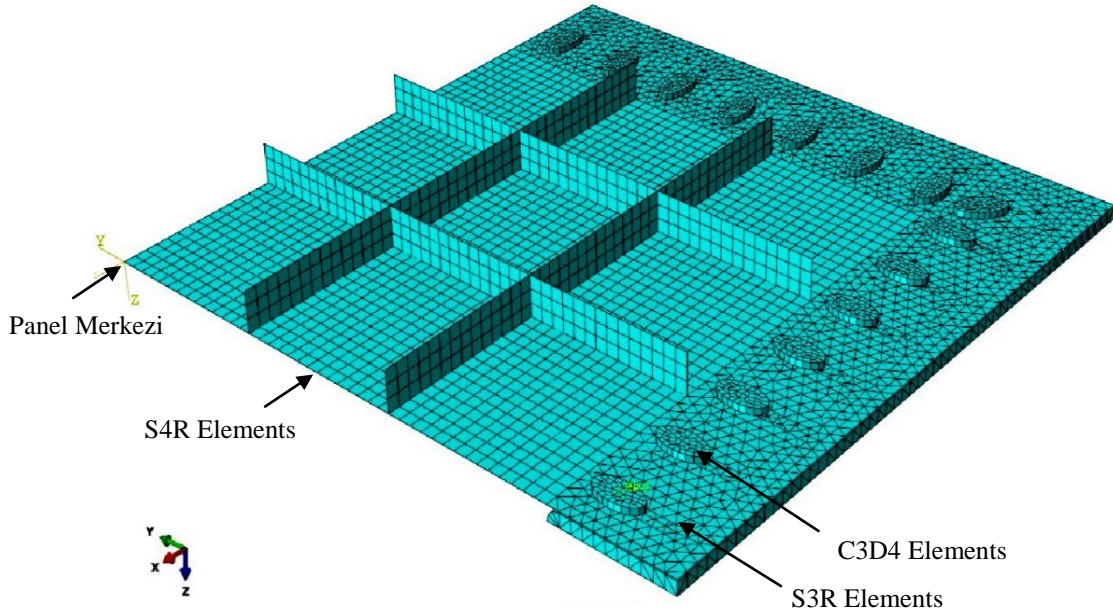
Şekil 2.18 ABAQUS programında üç boyutlu kabuk eleman adlandırılması

Tablo 2.1. Modellemede kullanılan sonlu elemanlar

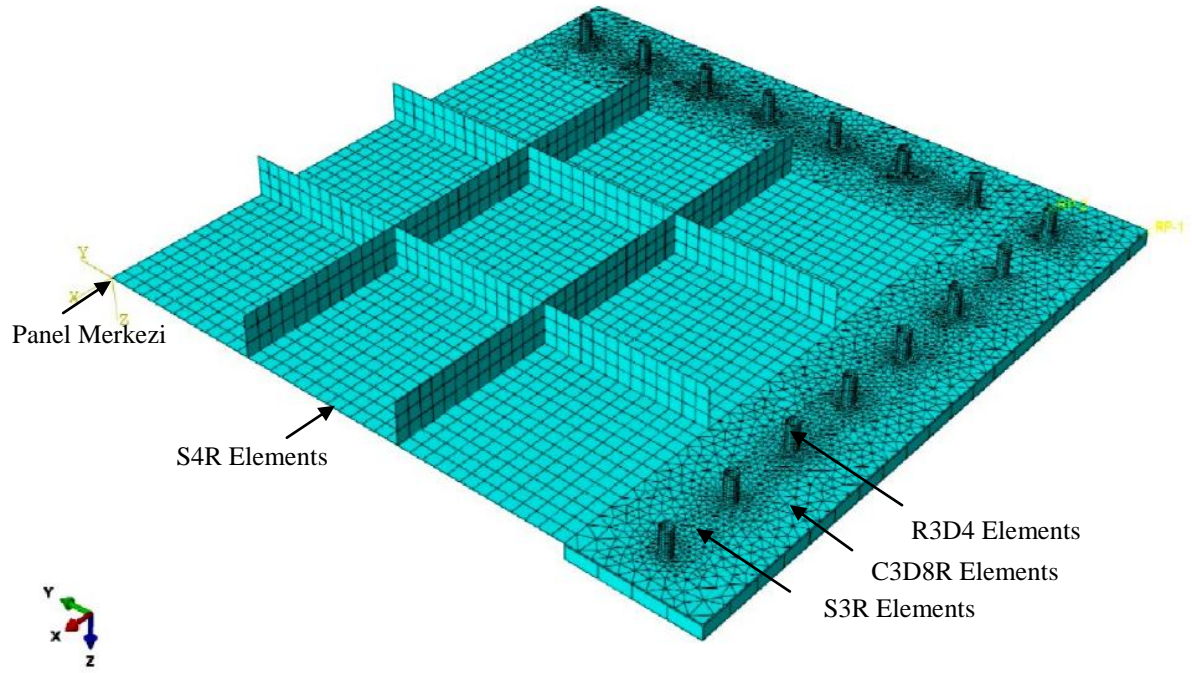
Sonlu Elemanın adı	Eleman Boyutu	Tipi	Nod Sayısı
S3R	3	Kabuk eleman, çift eğrilikli, indirgenmiş integrasyonlu bir eleman	3
S4R	3	Kabuk eleman, çift eğrilikli, indirgenmiş integrasyonlu bir eleman	4
R3D4	3	Katı (solid) eleman	4
C3D4	3	Sürekli eleman (continuum)	4
C3D8R	3	Katı (solid) eleman, azaltılmış entegrasyonlu sekiz düğümlü kabuk eleman	8

Üç boyutlu kabuk eleman adlandırmasına örnek olarak S4R elemanı, 4 nodlu, çift eğrilikli, indirgenmiş integrasyonlu bir eleman olup her nodunda altı serbestlik derecesi veya S8R elemanı ise 8 nodlu, çift eğrilikli, indirgenmiş integrasyonlu bir eleman olup her nodunda altı serbestlik derecesi vardır. Bir başka örnekte SC8R birinci dereceden aradeğerlendirme ve entegrasyonla azalan bir sekiz noktasal dörtgen ve kesintisiz gerilmeye değiştirme (stress - displacement) bir kabuk elemanıdır.

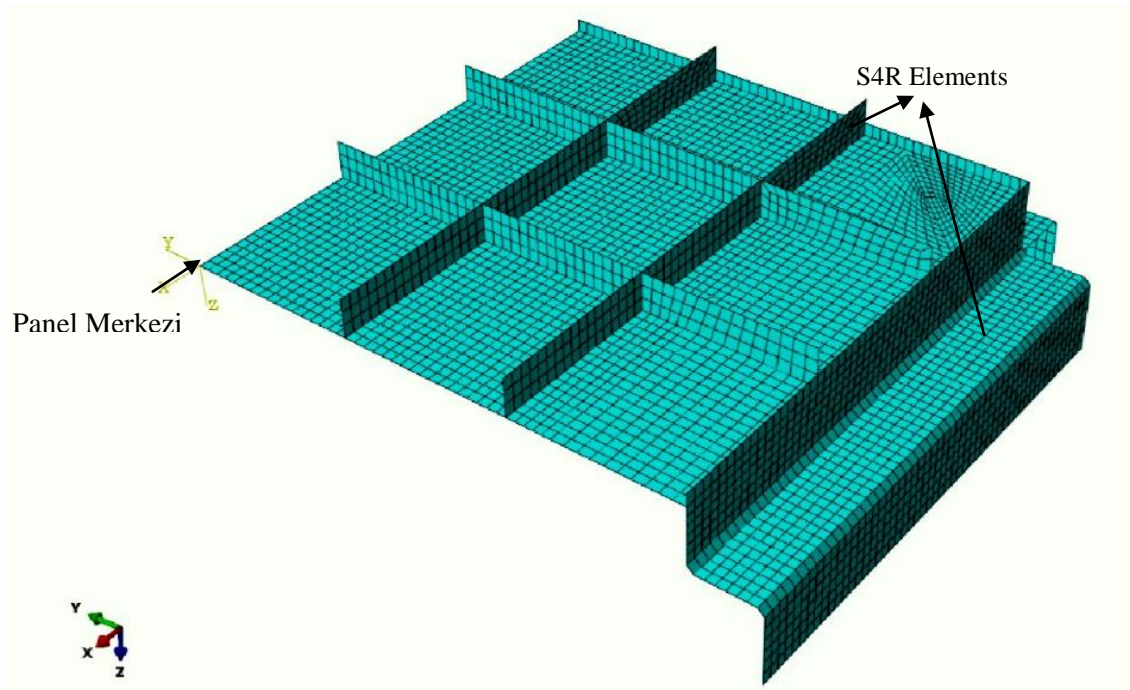
Yukarıda verilen sonlu elemanlar kullanılarak modellenen paneller aşağıda Şekil 2.19-21’de verilmektedir.



Şekil 2.19. PANEL-A'nin Sonlu Eleman Modeli

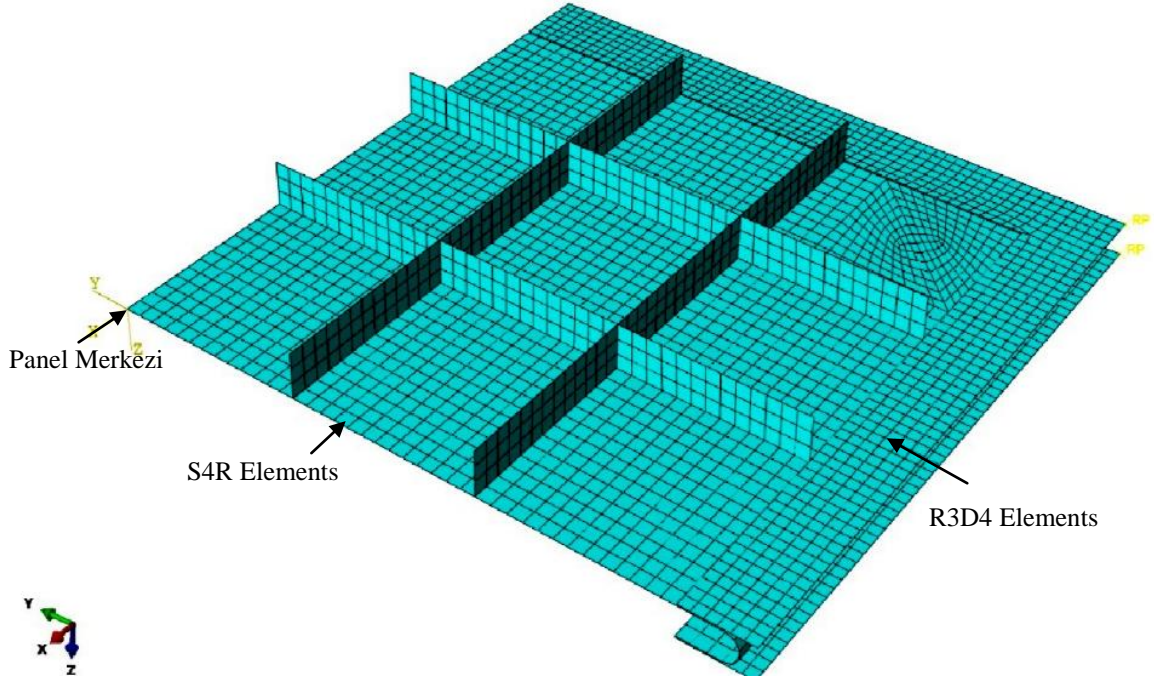


Şekil 2.20. PANEL-B'nin Sonlu Eleman Modeli



Şekil 2.21. PANEL-C'nin Sonlu Eleman Modeli





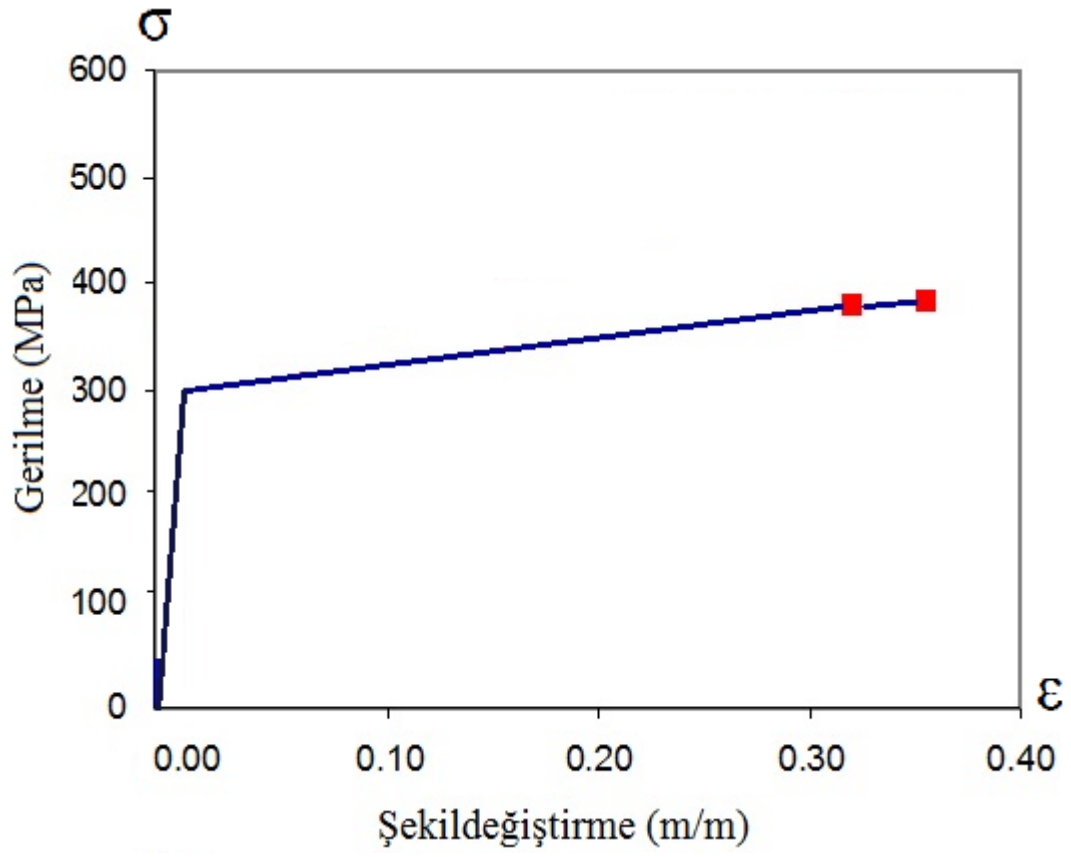
Şekil 2.22. PANEL-D'nin Sonlu Eleman Modeli

### 2.2.2. Sonlu Eleman Modelinde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Tüm modellerde, özellikleri aşağıdaki Tablo 2.2.'de verilen çelik malzeme kullanılmıştır. Çözümler için ABAQUS Programına tanıtılan elastik ve plastik eğriler ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) ise Şekil 2.23 ve 2.24'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Çelik malzeme özellikleri

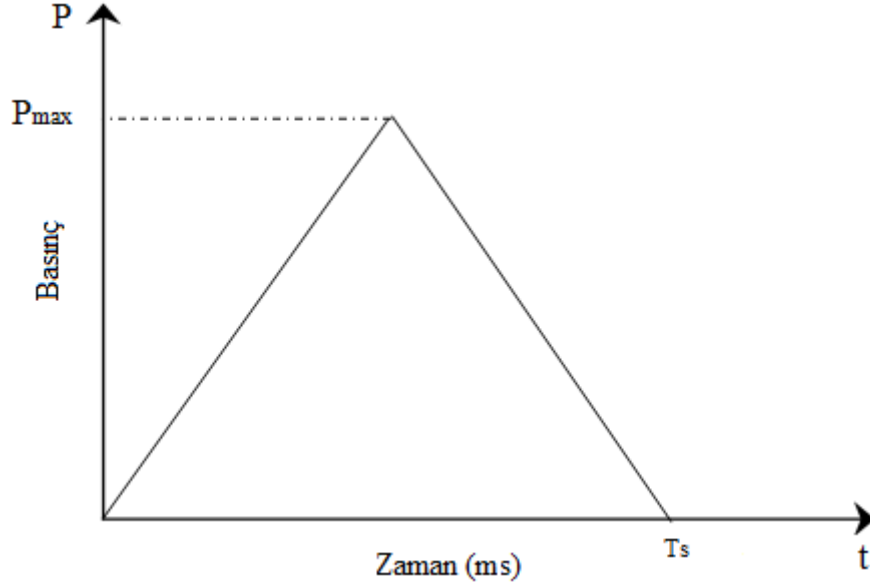
Malzeme Özelliği	Değeri
Elastisite Modülü	210 GPa
Poisson Oranı	0.3
Tanjant Modülü	250 MPa
Özgül Ağırlığı	7800 kg/m <sup>3</sup>
Akma Dayanımı	300 MPa
Çekme Dayanımı	380 MPa
Kopma uzaması (%)	36



Şekil 2.23. Çelik malzemenin ABAQUS'a tanımlanmış  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi

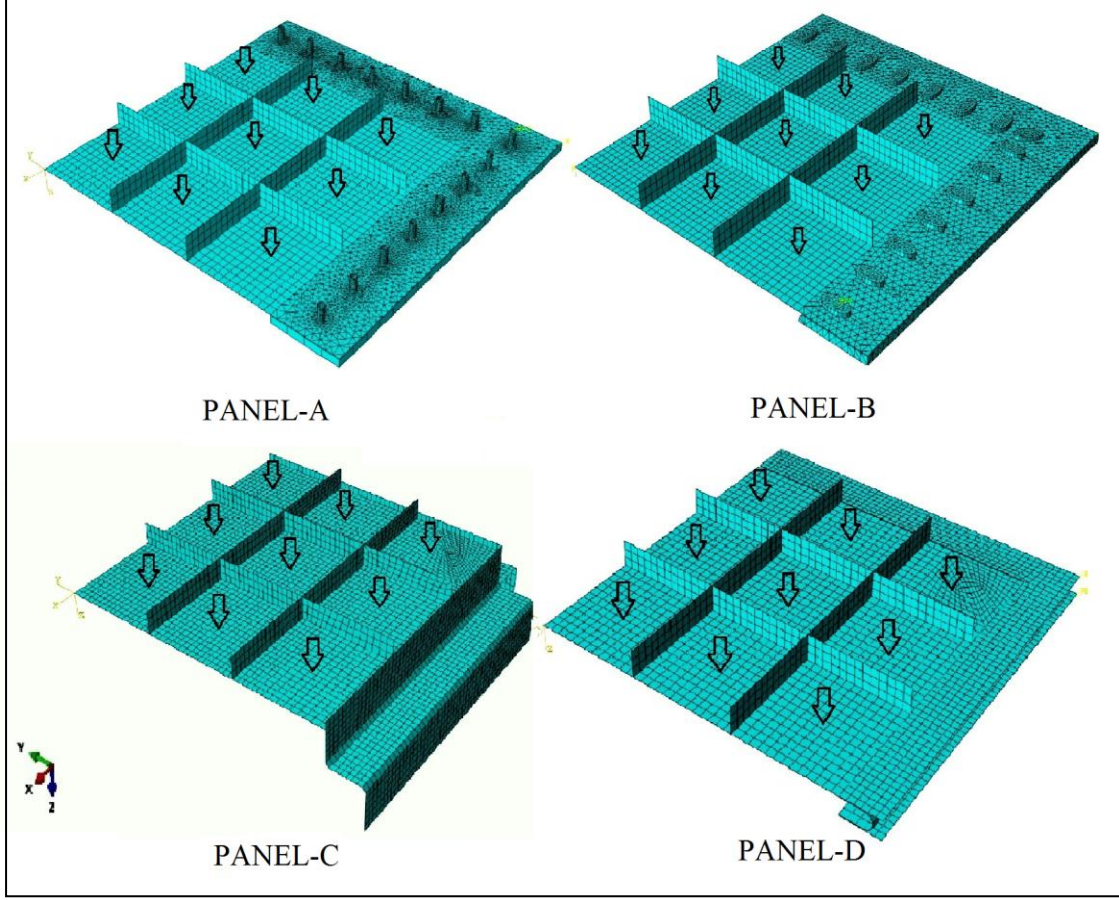
### 2.3. Patlama Yükünün Modeli

Tüm modellerde kullanılan patlama yükü üçgen ve pozitif fazın süresi  $T_s = 20\text{ms}$  (milisaniye) olarak seçilmiştir. Patlama yükü aşağıdaki Şekil 2.24’de gösterilmektedir.



Şekil 2.24. Patlama yükünün profili

Burada, bu çalışmada panel modelleri üzerine etkililen patlama basınç yüklerinin, çalışmanın amacında da belirtildiği gibi, daha önce Zhao ve Nurik [60] tarafından gerçekleştirilen modellemeye benzer olduğunu ve bu yüklerin gerçekte modellere belli bir mesafede oluşan, belli bir TNT eşdeğerliğine sahip bir patlama sonucunda panel yüzeyinde belirlenen yükler olarak kabul edildiğini belirtmek gerekmektedir. Patlama yükünün modellere etkime doğrultu ve yönü ise aşağıdaki Şekil 2.25’de verilmektedir.



Şekil 2.25. Patlama yükünün modellerde uygulanması

## 2.4. Analiz Sonuçları

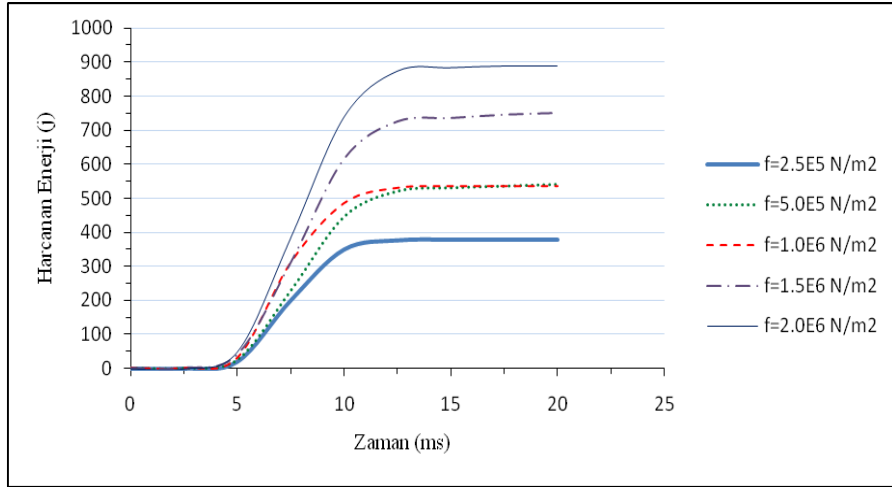
Oluşturulan dört ayrı modelin analizinde, maksimum yerdeğiştirme, plastik aşamada harcanan enerji, sürtünmede harcanan enerji ve maksimum plastik birim şekildeğiştirme değerleri elde edilerek bu değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Aşağıda, uygulanan patlama yüklemesi altında gerçekleştirilen çözümler sırası ile verilmektedir.

### 2.4.1. PANEL-A'nın Analiz Sonuçları

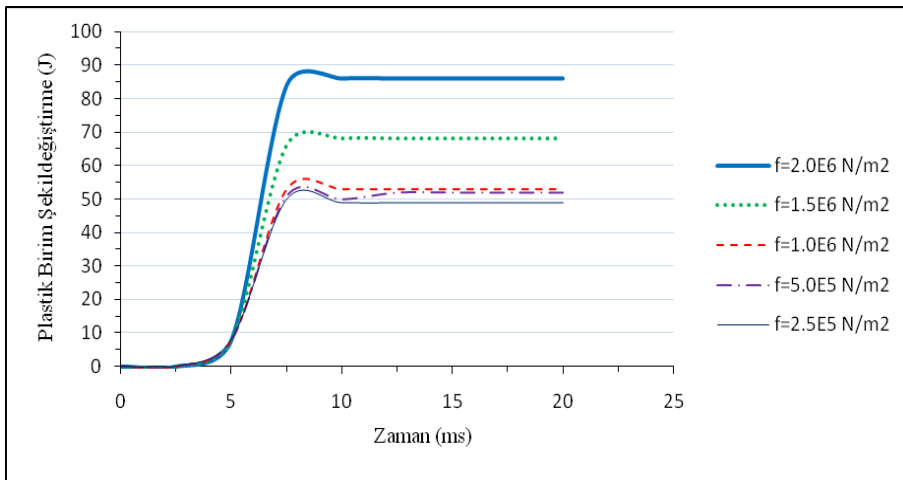
Bu analizde panele, daha önce de belirtildiği gibi, sırasıyla etkitilen  $2.5 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  $5.0 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>,  $1.0 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>,  $1.5 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> ve  $2.0 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> değerindeki patlama yüklerine ait çözümler elde edilmiştir. PANEL-A'nın bu yüklemeler altında merkez noktasında (modeldeki köşe noktası) meydana gelen maksimum yerdeğiştirme değerleri ve zaman ilişkisi aşağıdaki Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26. PANEL-A modelinde farklı patlama yüklemeleri altında panel merkezinde oluşan yerdeğişimler



Şekil 2.27. PANEL-A'da sürtünme ile harcanan enerji

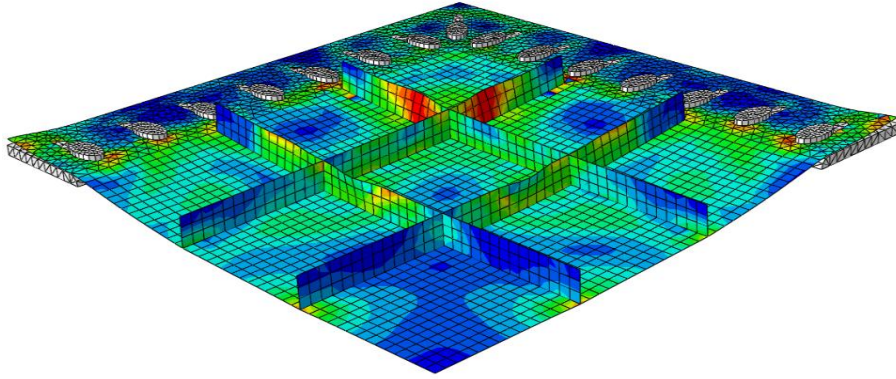


Şekil 2.28. PANEL-A'da harcanan plastik enerji

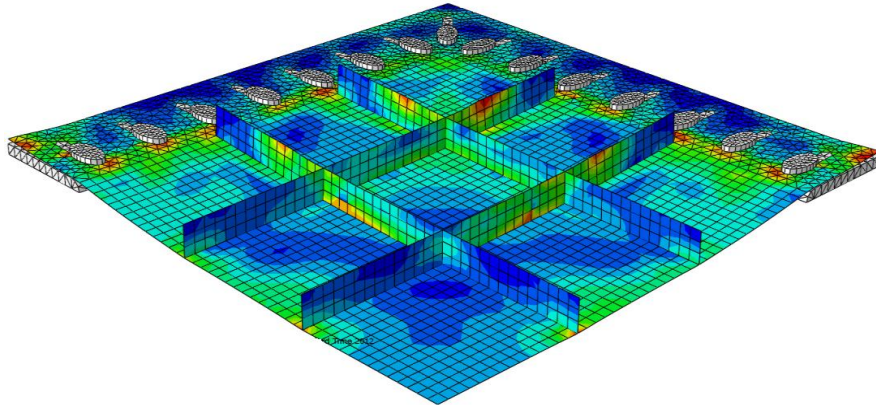
Panelin, mesnet plakalarına bağlantı noktalarındaki sürtünmeden dolayı harcanan enerjinin panel köşe noktasındaki değerleri aynı yüklemeler için Şekil 2.27’de, panelde harcanan plastik enerji ise Şekil 2.28’de verilmektedir. Bu şekillere göre patlamanın ilk 3-4 milisaniyesinde enerji harcaması sıfır olmaktadır. Bunun nedeni, patlamadan ilk olarak panel bağlantı noktalarının etkilenmesidir.

Şekil 2.26 ve Şekil 2.28’e göre panele etkitilen patlama yüklerinin  $1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ,  $5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  ve  $2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  değerine ait çözümleri birbirine oldukça yakındır. Bu da, patlama basıncının belli bir değerine kadar, harcanan plastik enerji üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir.

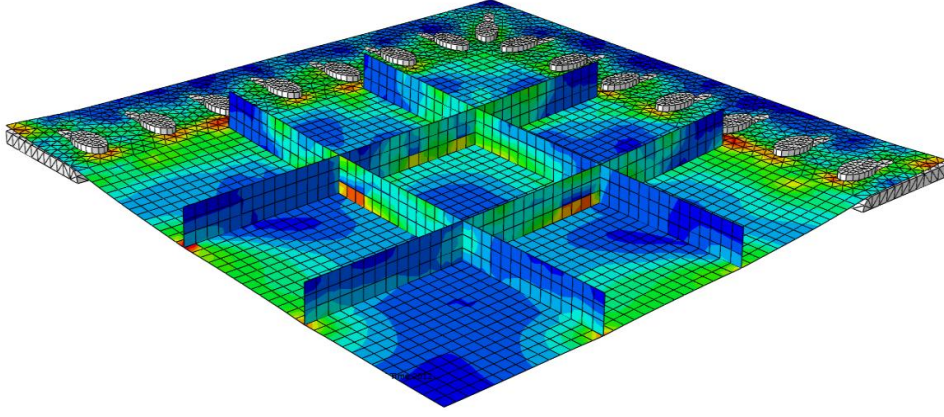
Aşağıdaki Şekil 2.29-33’de plastik birim şekildeğişirmelerin panel modelleri üzerindeki değişimleri toplam süre olan 20 ms için gösterilmektedir.



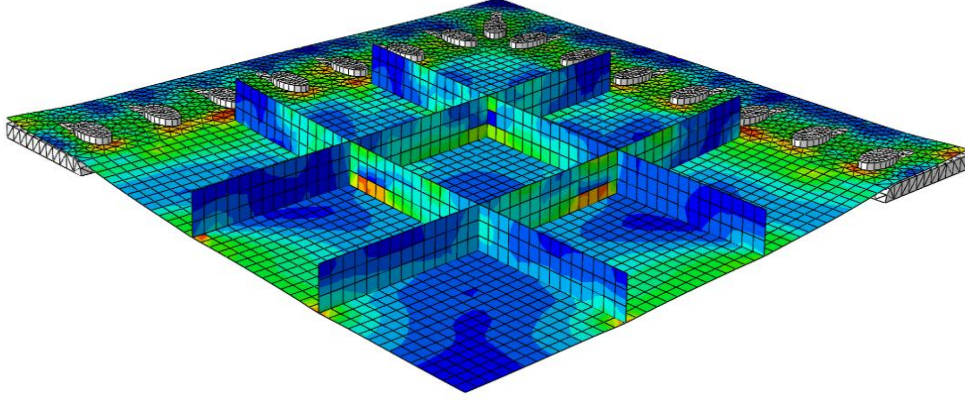
Şekil 2.29.  $F = 2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-A’da oluşan plastik birim şekildeğişirmeler



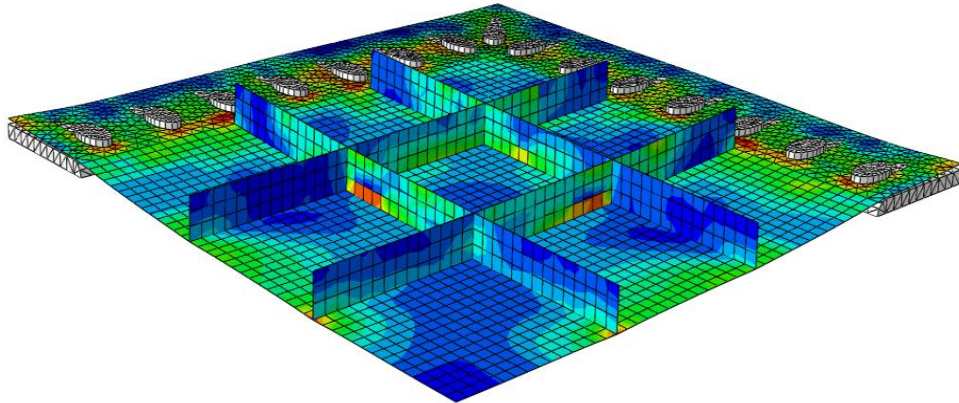
Şekil 2.30.  $F = 5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-A’da oluşan plastik birim şekildeğişirmeler



Şekil 2.31.  $F= 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-A'da oluşan plastik birim şekildeğişimleri



Şekil 2.32.  $F= 1.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-A'da oluşan plastik birim şekildeğişimleri



Şekil 2.33.  $F= 2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-A'da oluşan plastik birim şekildeğişimleri

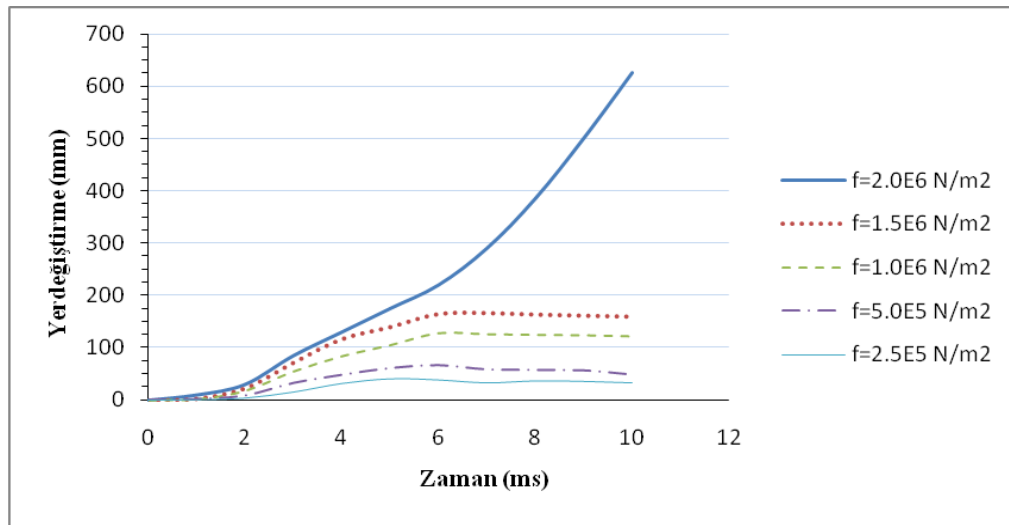
Farklı yüklemeler altında PANEL-A modelinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.3'de gösterilmektedir.

Tablo 2.3. PANEL-A modelinde farklı yüklemeler altında elde edilen sonuçlar

Değer	$f=2.5 \times 10^5$ N/m <sup>2</sup>	$f=5.0 \times 10^5$ N/m <sup>2</sup>	$f=1.0 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>	$f=1.5 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>	$f=2.0 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>
Maximum Yerdeğiştirme, (mm)	32	32.8	33	37.5	42
Harcanan Plastik Enerji, (J)	52	53	54	68	86
Sürtünme İle Harcanan Enerji, (J)	379	535	540	750	890
Maksimum Plastik Birim Şekildeğiştirme, (%)	3.06	3.10	3.14	3.19	3.20

#### 2.4.2. PANEL-B'nin Analiz Sonuçları

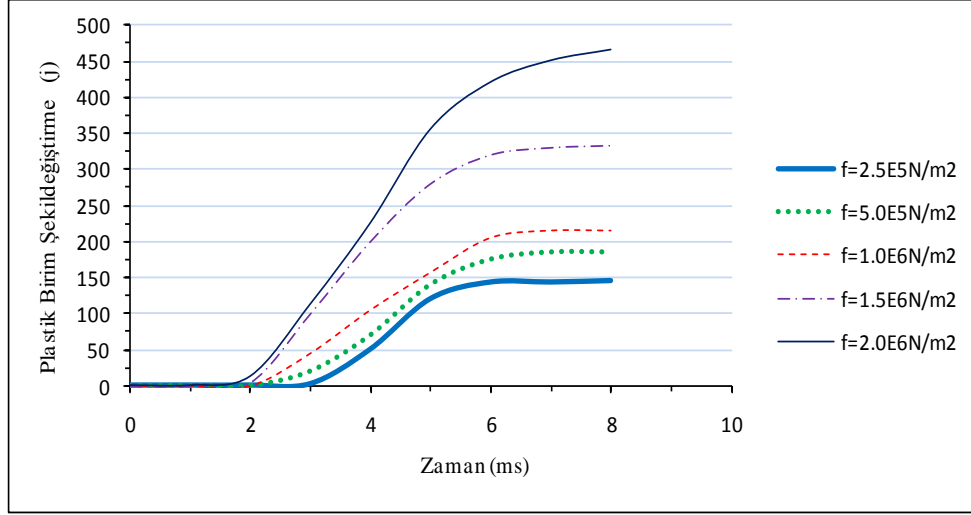
Yukarıda, Madde 2.4.1 başlığı altında PANEL-A modelinin analizi için uygulanan patlama yükleri kullanılarak, aynı çözümler PANEL-B için de tekrarlanmıştır. PANEL-B'nin bu yüklemeler altında merkez noktasında (modeldeki köşe noktası) meydana gelen maksimum yerdeğiştirme değerleri ve zaman ilişkisi aşağıdaki Şekil 2.34'de gösterilmiştir.



Şekil 2.34. PANEL-B modelinde farklı patlama yüklemeleri altında panel merkezinde oluşan yerdeğiştirmeler

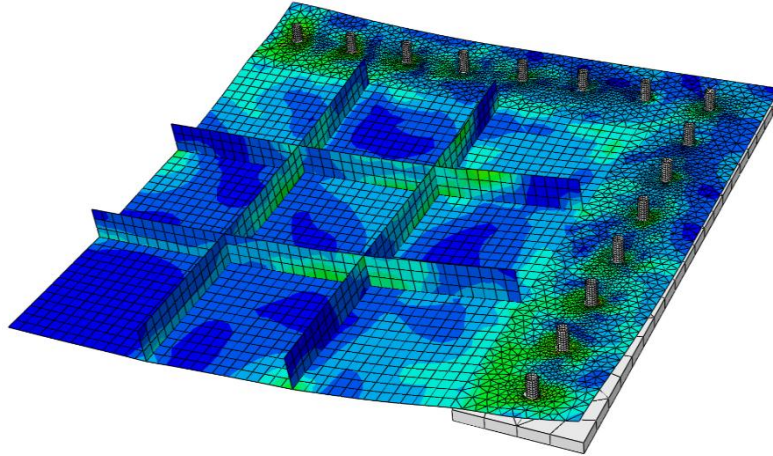


PANEL-B’de harcanan plastik enerji Şekil 2.35’de verilmektedir. Bu şekillere göre patlamanın ilk 0-20 milisaniyesinde plastic enerji harcaması sıfır olmaktadır. Bunun nedeni, patlamadan ilk olarak panel bağlantı noktalarının etkilenmesidir.

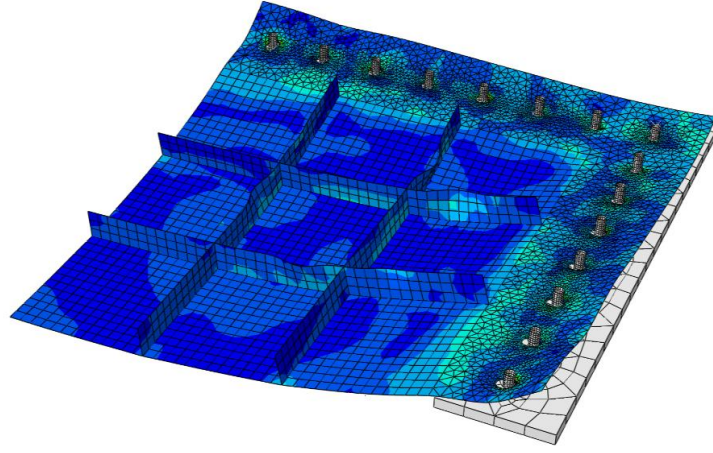


Şekil 2.35. PANEL-B’de harcanan plastik enerji

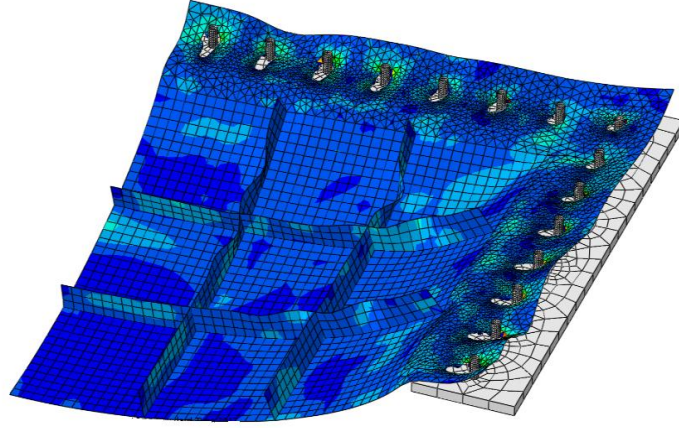
Aşağıdaki Şekil 2.36-40’da plastik birim şekildeşştirmelerin panel modelleri üzerindeki değişimleri toplam süre olan 20ms için gösterilmektedir.



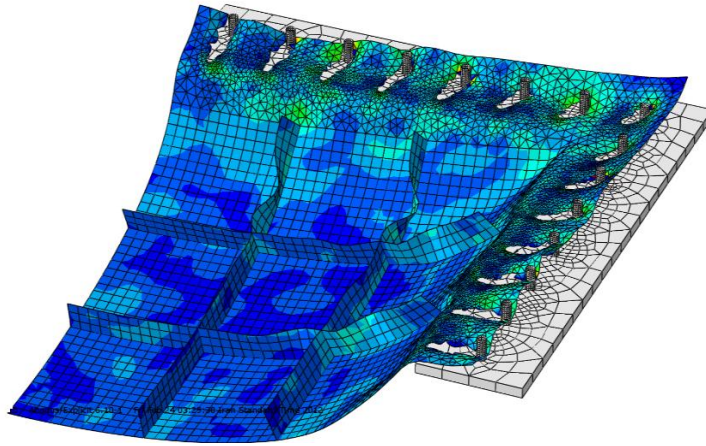
Şekil 2.36.  $F= 2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeşştirmeler



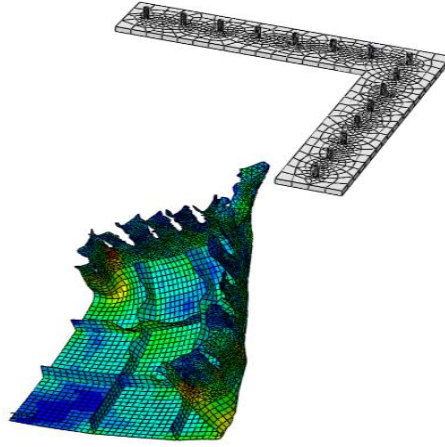
Şekil 2.37.  $F= 5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmeler



Şekil 2.38.  $F= 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmeler



Şekil 2.39.  $F= 1.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişirmeler



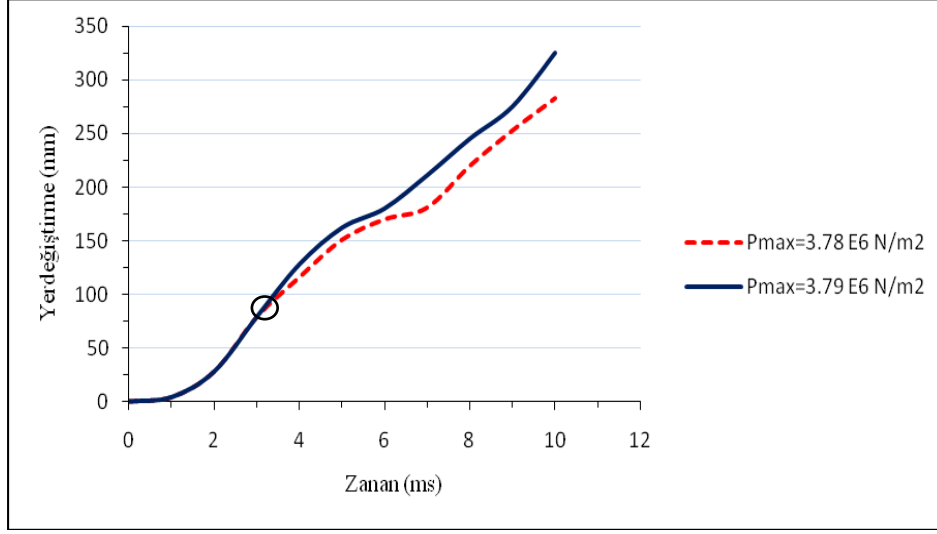
Şekil 2.40.  $F= 2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükleme için PANEL-B’de oluşan plastik birim şekildeğişimler

Farklı yüklemeler altında PANEL-B modelinden elde edilen sonuçlar Tablo 2.4’de gösterilmektedir.

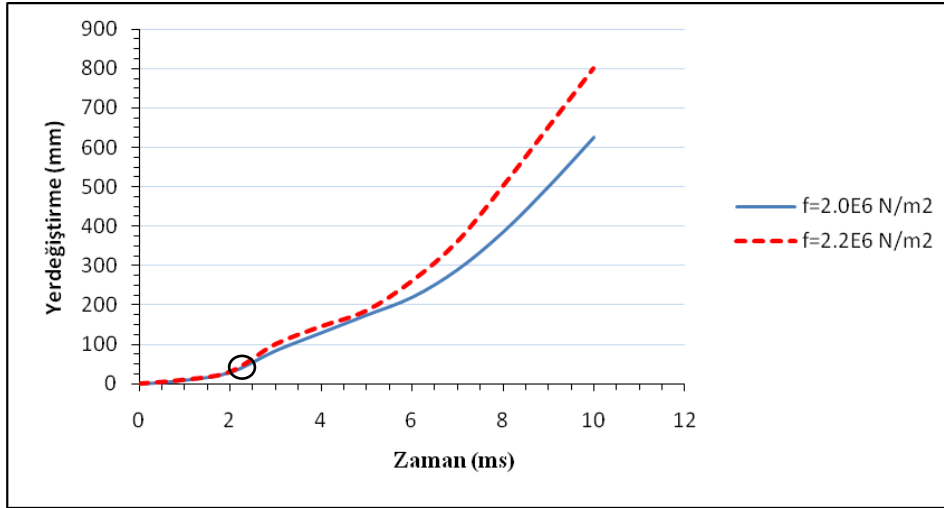
Tablo 2.4. PANEL-B modelinde farklı yüklemeler altında elde edilen sonuçlar

Değer	$f=2.5 \times 10^5$ N/m <sup>2</sup>	$f=5.0 \times 10^5$ N/m <sup>2</sup>	$f=1.0 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>	$f=1.5 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>	$f=2.0 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>
Maximum Yerdeğiştirme, (mm)	40	66	128	167	625
Harcanan Plastik Enerji, (J)	145	185	215	333	487
Maksimum Plastik Birim Şekildeğiştirme, (%)	5.66	8.60	8.92	9.54	9.56

PANEL-B modelinde gerçekleştirilen analizler sonucunda, da görüldüğü gibi, hem yerdeğiştirme, hem de harcanan plastik enerjiler açısından PANEL-A modeliyle dikkate değer bir fark görülmektedir. Ancak, patlama yükünün daha da artırılması suretiyle yapılan ilave çözümler sonucunda, söz konusu bu yükün belli bir değerinde modellerde dinamik kararsız konumun ortaya çıktığı da belirlenmiştir. Dinamik kararsız konumdan sonraki her patlama yükünde panellerde yırtılmalar meydana gelmektedir. Bu kararsız konumlar PANEL-A modeli için patlama yükünün  $3.78 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  değeri, PANEL-B modeli için ise  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  olmaktadır. Panellerin merkez noktalarında hesaplanan kararsız konumlar, PANEL-A ve PANEL-B için sırasıyla Şekil 2.41 ve Şekil 2.42’de görülmektedir.

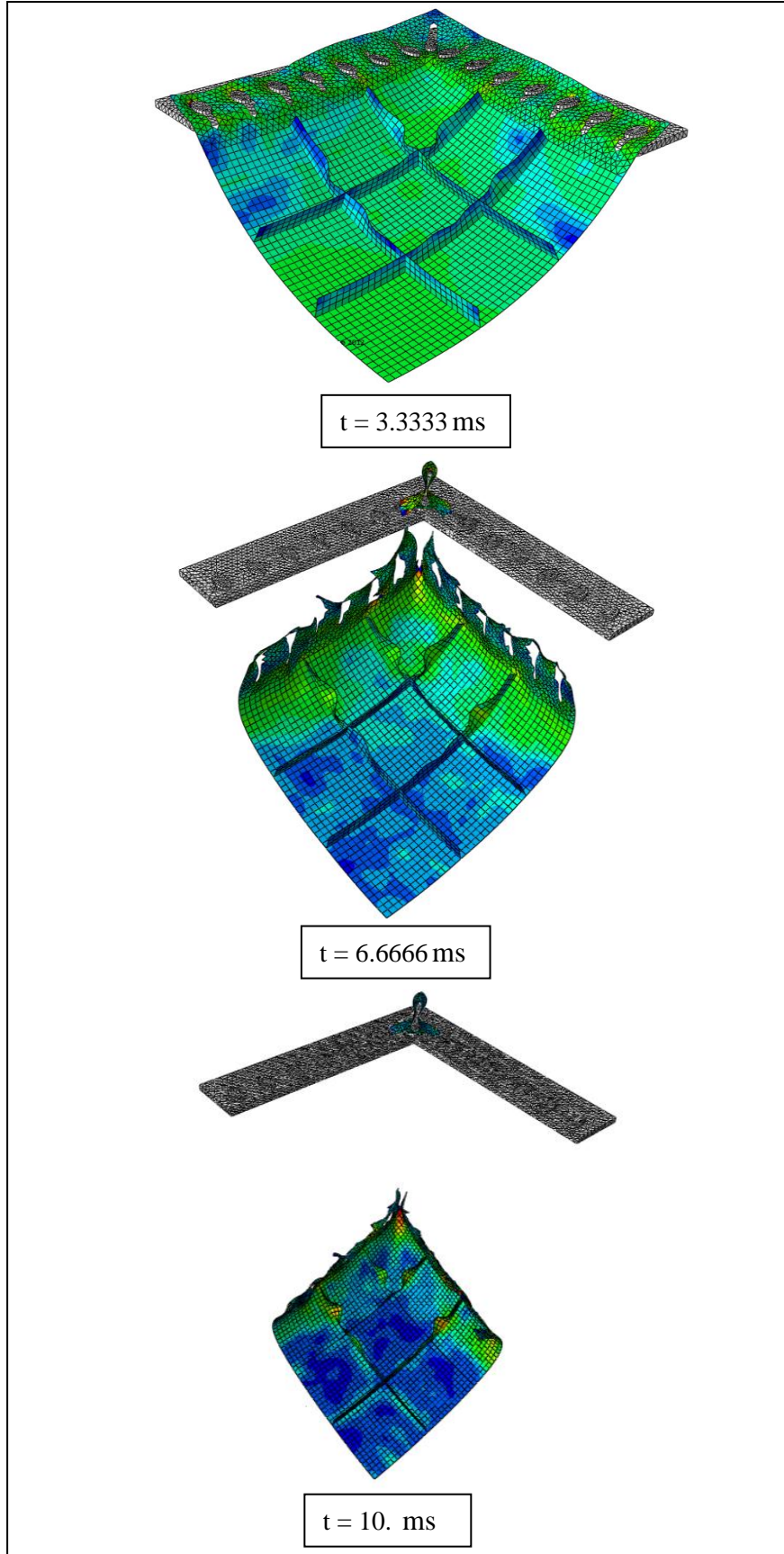


Şekil 2.41. PANEL-A'nın dinamik kararsız konumu

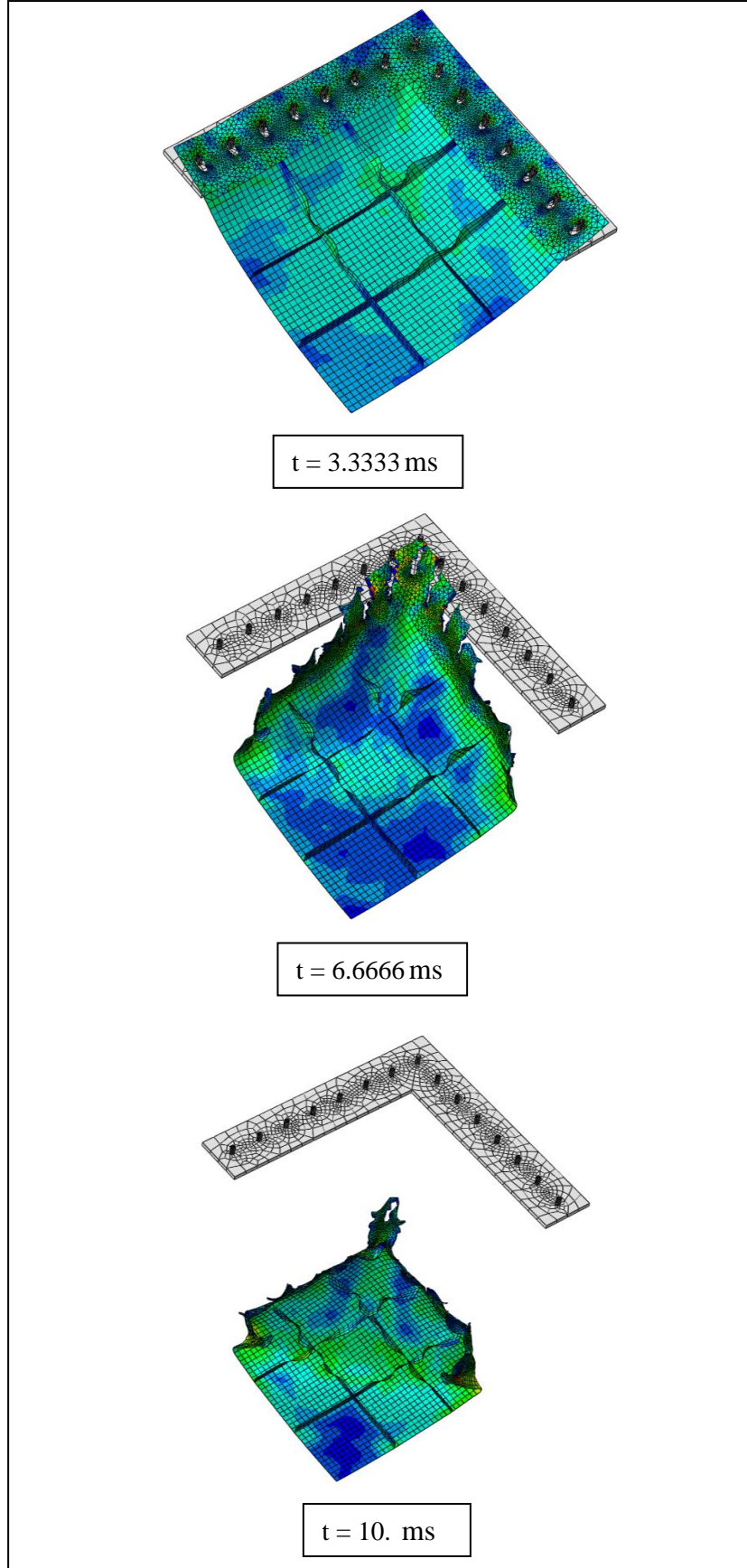


Şekil 2.42. PANEL-B'nin dinamik kararsız konumu

Kararsız konumu geçen yüklemelerde oluşan yırtılma durumları ise PANEL-A ve PANEL-B için aşağıdaki Şekil 2.43 ve Şekil 2.44'de sırasıyla verilmektedir.



Şekil 2.43. PANEL-A'da,  $3.78 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yüklemesiyle meydana gelen yırtılma



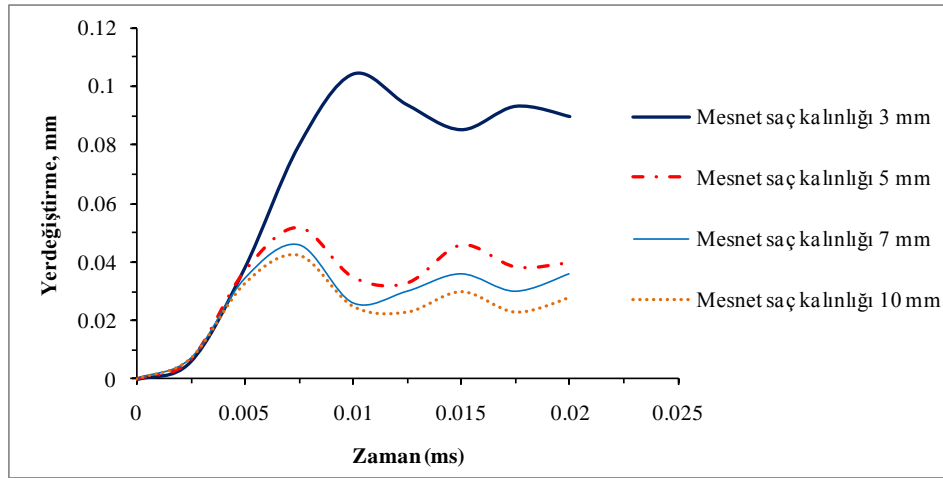
Şekil 2.44. PANEL-B'de,  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yüklemesiyle meydana gelen yırtılma

### 2.4.3. PANEL-C'nin Analiz Sonuçları

Bu başlık altında, PANEL-C'nin sadece  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yüklemesi altındaki kıvrımlı sac ile oluşturulmuş mesnet plakalarının şekildeğiştirme suretiyle harcadığı enerji değeri, plastik birim şekildeğiştirme ve merkez nokta yerdeğiştirmesinin, sac kalınlıkları 3, 5, 7 ve 10mm olarak seçilen, mesnet plakalarının kalınlıklarıyla değişimleri araştırılmıştır. Modelde panelin sac kalınlığı 2mm olarak sabit tutulmuştur.

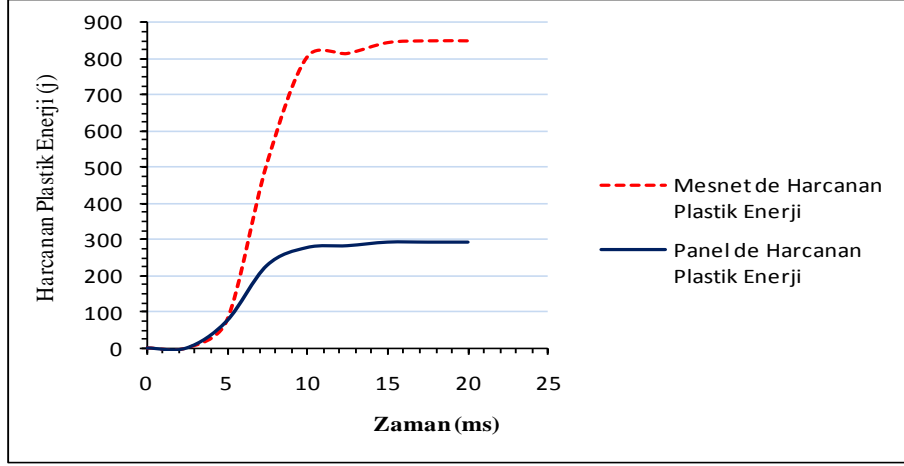
Modelde, kritik yük seviyesini artırmak, diğer bir deyişle paneli güçlendirmek için 2mm kalınlığında 20mm yüksekliğinde ilave çapraz rijitleştirici levhalar da kullanılmıştır(bkz Şekil 2.9).

Patlama yükünün  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  değeri altında panel merkezinde elde edilen yerdeğiştirme miktarlarının, farklı mesnet plakası kalınlıkları ile değişimi Şekil 2.45'de gösterilmektedir. Bu şekilden, sac kalınlığı 7mm -10mm arasındaki değerleri için maksimum yer değişme miktarının önemli miktarda değişmediği görülmektedir. Buradan, böyle bir model için optimum mesnet sacı kalınlığının 7mm olabileceği söylenebilir.

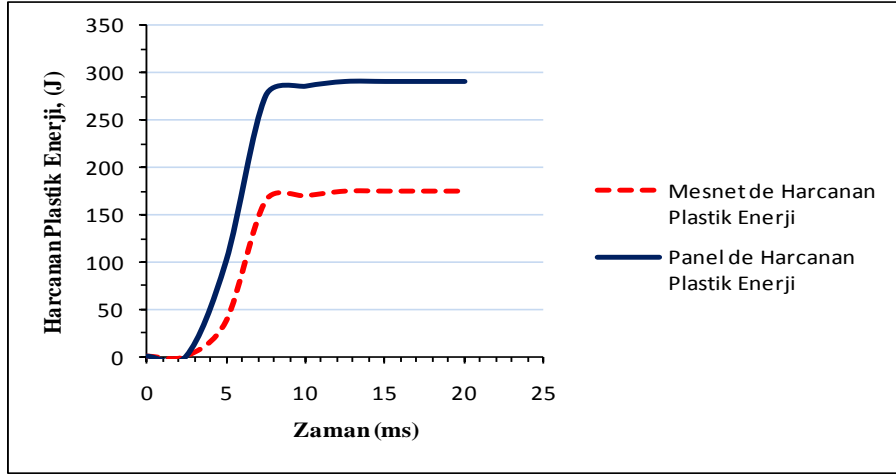


Şekil 2.45. PANEL-C modelinde  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yüklemesi altında panel merkezinde oluşan yerdeğiştirmelerin kalınlığına bağlı olarak değişimi

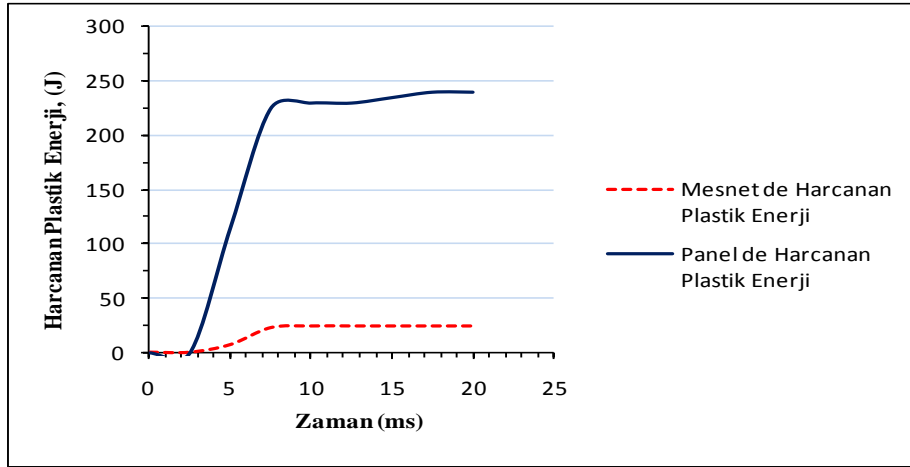
PANEL-C'nin verilen patlama etkisi altında harcadığı plastik enerji değişimleri, mesnet plakalarının sac kalınlıkları açısından, aşığıdaki Şekiller 2.46-49'da verilmektedir.



Şekil 2.46. PANEL-C’de 3mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler

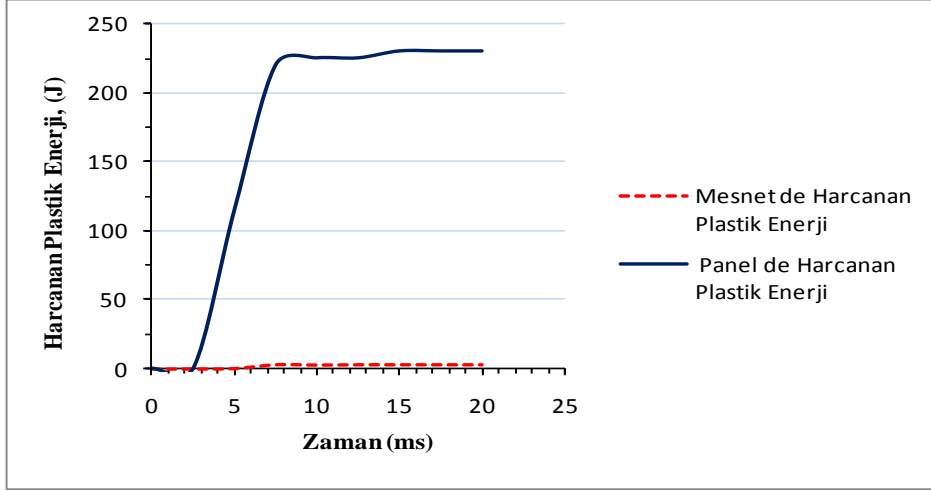


Şekil 2.47. PANEL-C’de 5mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler



Şekil 2.48. PANEL-C’de **7mm** mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler

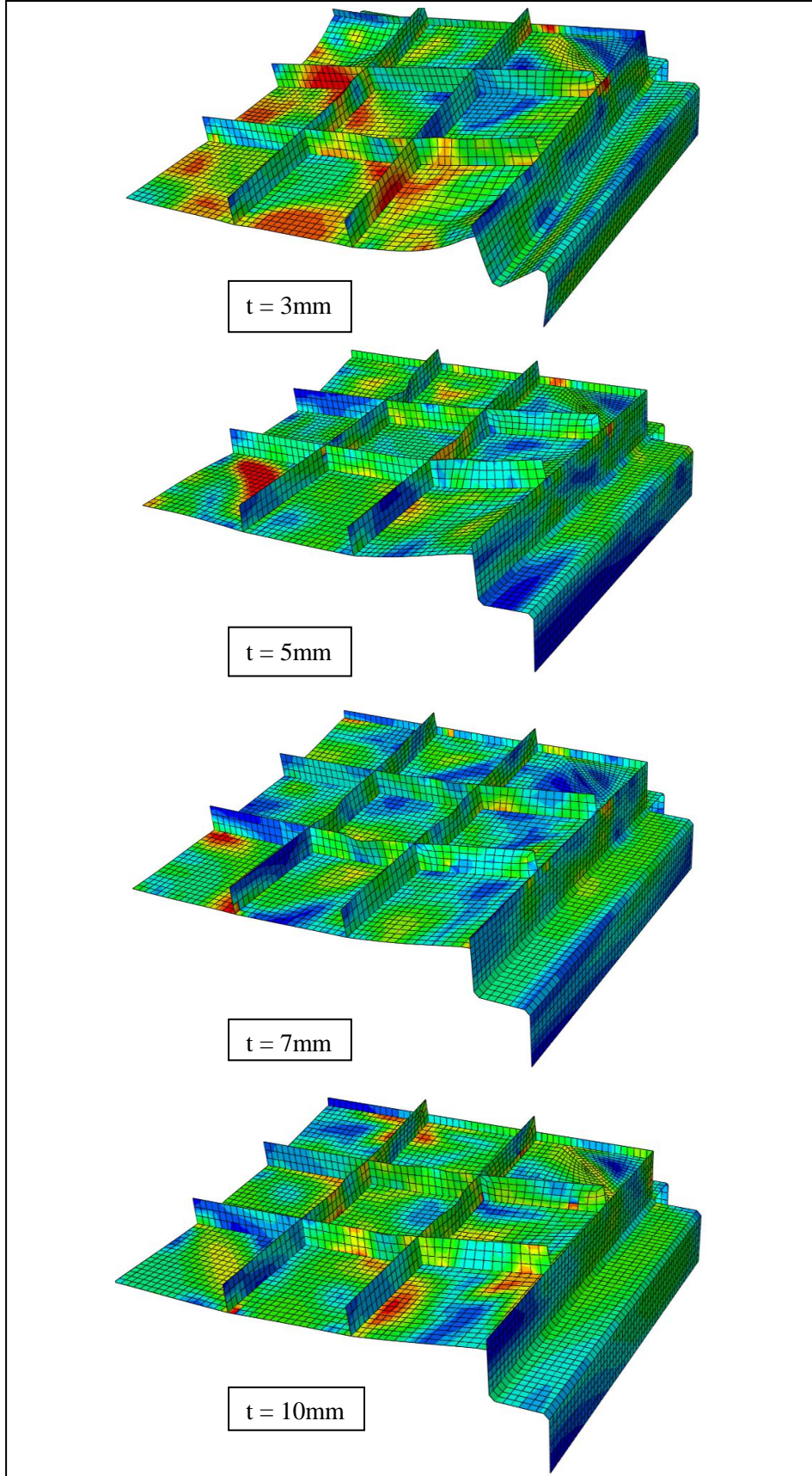




Şekil 2.49. PANEL-C’de 10mm mesnet sacı kalınlığı için harcanan plastik enerjiler

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, mesnet sacı kalınlığı 3mm olan model en uygun davranışı sergilemiştir. Zira, harcanan toplam enerjinin çoğu mesnet plakaları tarafından harcamış, panel gövdesine minimum yük etkimiştir. Oysa  $t=5\text{mm}$ ,  $7\text{mm}$  ve  $10\text{mm}$  mesnet sacı kalınlığı için verilen diğer eğriler (Şekil 2.47-49) dikkate alındığında, davranışın tam ters olduğu, mesnet sacı kalınlaştıkça patlama enerjisinin neredeyse tamamen panel sacı tarafından harcandığı görülmektedir.

Bu durumda,  $t=3\text{mm}$  sac kalınlığı en iyi çözüm gibi gözükse de, minimum plastik birim şekildeğiştirme  $t=10\text{mm}$  olan panelde meydana gelmektedir. Dolayısıyla PANEL-C’nin, bu terslik nedeniyle uygun bir tasarım olarak kabul edilemeyeceği düşünülmektedir. Panelin farklı mesnet sacı kalınlıkları için elde edilen plastik birim şekildeğiştirmeleri aşağıdaki Şekil 2.50’de, modelden elde edilen sonuçlar ise Tablo 2.5’de toplu halde verilmiştir.



Şekil 2.50. PANEL-C’de farklı sac kalınlıkları için plastik birim şekildeğıştirmeler

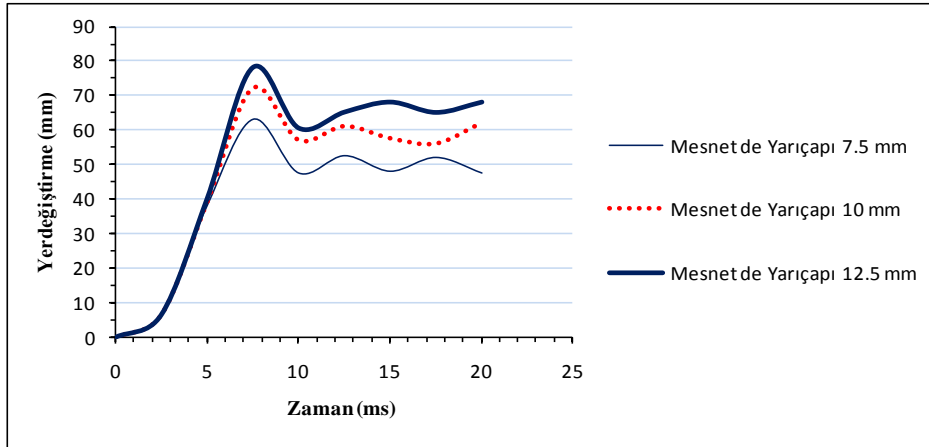
Tablo 2.5’de, Farklı yüklemeler altında PANEL-C modelinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2.5. PANEL-C modelinde farklı sac kalınlıkları için elde edilen sonuçlar

Değer	t=3mm	t=5mm	t=7mm	t=10mm
Maximum yerdeğiştirme, (mm)	104.5	52	46	42
Panelde Harcanan Plastik Enerji, (J)	290	290	240	230
Mesnet Plakasında Harcanan Enerji, (J)	850	175	24	3
Maksimum Plastik BirimŞekildeğiştirme, (%)	2.83	3.10	3.02	2.56

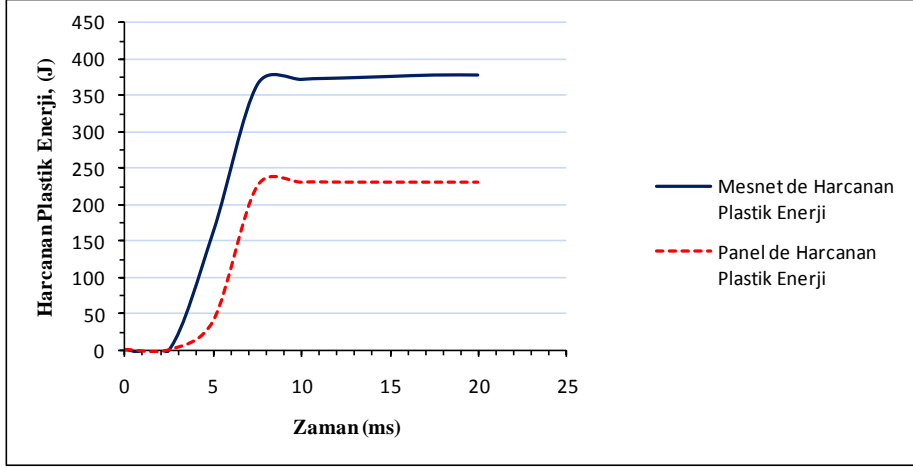
#### 2.4.4. PANEL-D’nin Analiz Sonuçları

İncelenen dördüncü ve sonuncu model olan PANEL-D modelinde panel plaka kenarlarındaki kıvrım yarıçapının değişimi esas alınmıştır. Gerçekleştirilen çözümlerden farklı mesnet kıvrımı yarıçapları için elde edilen panel merkezinin yerdeğiştirmeleri Şekil 2.51’de verilmektedir.

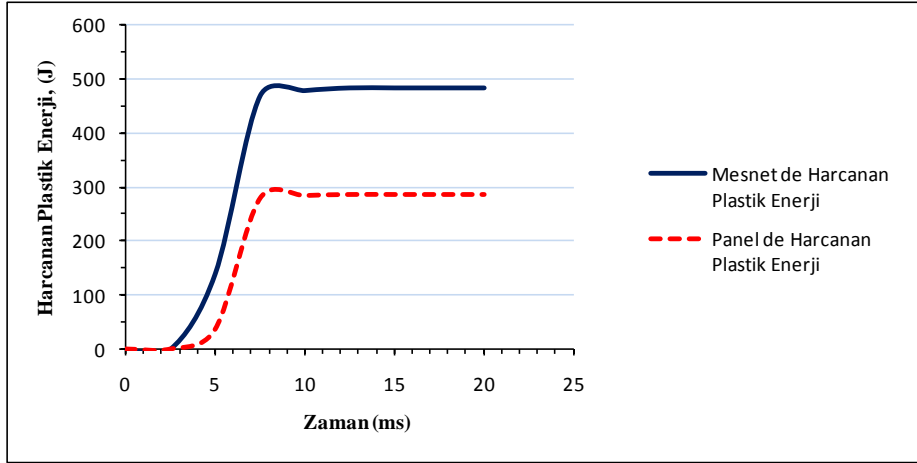


Şekil 2.51. PANEL-D modelinde panel merkezinde oluşan yerdeğiştirmelerin farklı kıvrım yarıçaplarına bağlı olarak değişimi

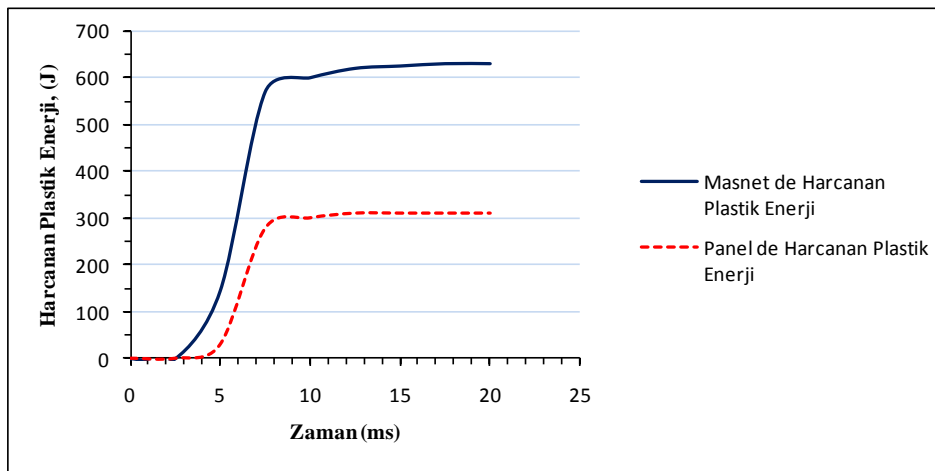
Yukarıdaki Şekil 2.51’den, kıvrım yarıçapı büyüdükçe panel merkezindeki yerdeğiştirme değeri de büyümektedir. PANEL-C’dekine benzer olarak, verilen patlama etkisi altında panelin harcadığı plastik enerji değişimleri, kıvrım yarıçapı açısından, aşağıdaki Şekiller 2.52-54’de verilmektedir



Şekil 2.52. PANEL-D'de R=7.5mm kıvrım yarıçapı için harcanan plastik enerjiler

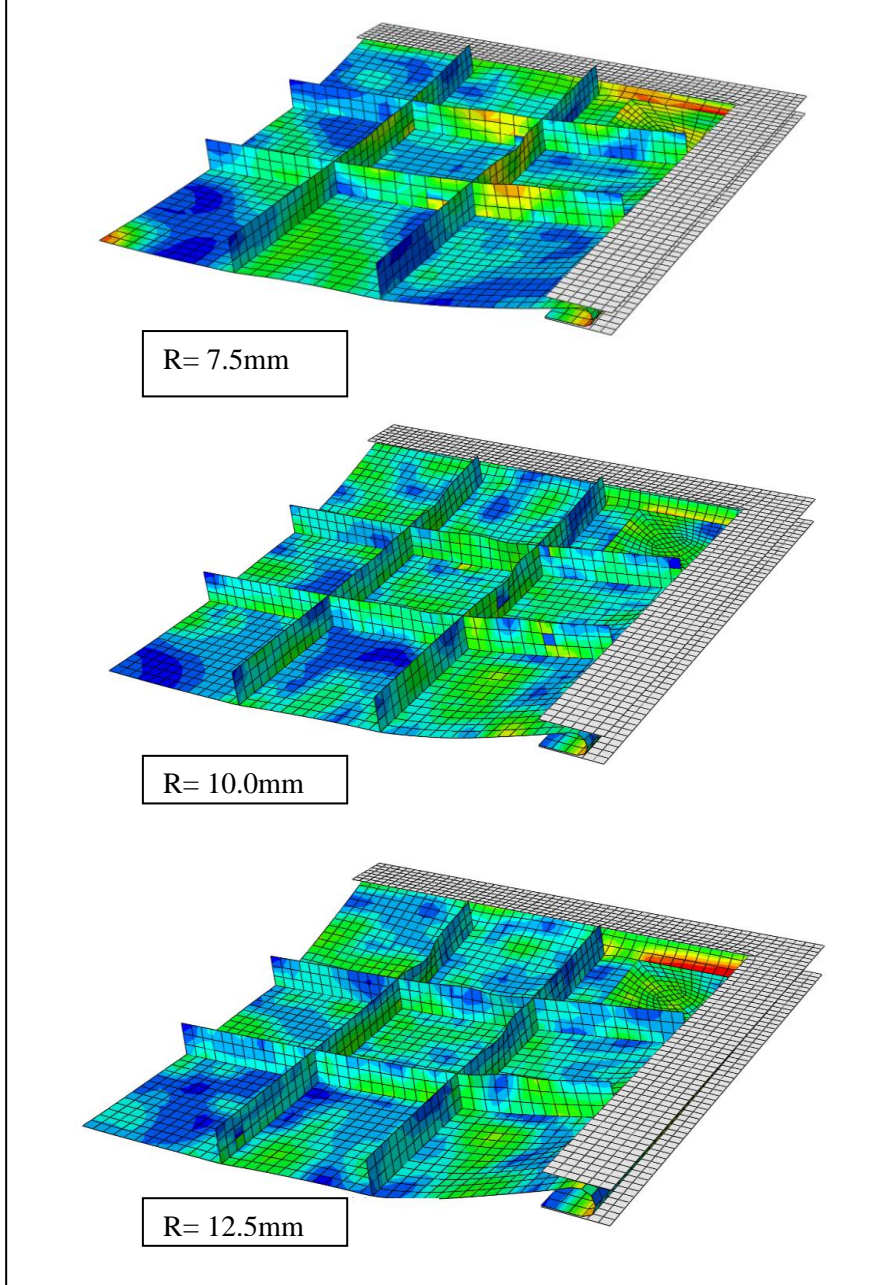


Şekil 2.53. PANEL-D'de R=10mm kıvrım yarıçapı için harcanan plastik enerjiler



Şekil 2.54. PANEL-D'de R=12.5mm kıvrım yarıçapı için harcanan plastik enerjiler

Panelin farklı mesnet kıvrım yarıçapları için elde edilen plastik birim şekildeğişimleri aşağıdaki Şekil 2.55’de, modelden elde edilen sonuçlar ise Tablo 2.6’da toplu halde verilmiştir.



Şekil 2.55. PANEL-D’de farklı yarıçapları için plastik birim şekildeğişimleri

Tablo 2.6’de, Farklı yüklemeler altında PANEL-D modelinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2.6. PANEL-D modelinde farklı yarıçaplardan oluşan sonuçlar

Değer	R=7.5 mm	R=10.0 mm	R=12.5 mm
Maximum yerdeğiştirme, (mm)	62	72	78
Panelde Harcanan Plastik Enerji, (J)	230	278	310
Mesnet Plakasında Harcanan Enerji, (J)	378	485	630
Maksimum PlastikBirimŞekildeğiştirme, (%)	3.42	3.29	3.36

Yukarıdaki şekiller ve Tablo 2.6'da incelendiğinde, mesnet kıvrım yarıçapı büyüdükçe kıvrım bölgesinde harcanan enerjinin arttığı, bu artış oranının R=12,5mm / R=7.5mm için 2.16 kat daha fazla olduğu görülmektedir.

Mesnet kıvrım yarıçapının değişimine bağlı olarak harcanan enerjileri gösteren yukarıdaki eğrilere göre, patlama enerjisinin çoğu mesnet kıvrımlarında harcanmaktadır. Bu değerler oran olarak gösterilecek olursa;

R=7.5mm olan modelde harcanan toplam 608 J.'lük enerjinin %63'si kıvrım bölgelerinde, %37'i ise panelde harcanmıştır.

R=10mm olan modelde harcanan toplam 763 J.'lük enerjinin %64'si kıvrım bölgelerinde, %36'i ise panelde harcanmıştır.

R=12.5mm olan modelde harcanan toplam 940 J.'lük enerjinin %68'si kıvrım bölgelerinde, %32'i ise panelde harcanmıştır.

PANEL-D için verilen tüm sonuçların değerlendirilmesinden, modelin davranışının kıvrım yarıçapının değişimi ile stabil olduğu, PANEL-C'dekine benzer bir tersliğin ortaya çıkmadığı görülebilir. Buradan da PANEL-D modelinin PANEL-C'ye göre daha uygun olduğu anlaşılmaktadır.

İncelenen tüm modellere (PANEL-A, PANEL-B, PANEL-C ve PANEL-D) ait 0-20ms arasındaki patlama yükü-yerdeğiştirme şekilleri sıralı olarak simülasyon biçiminde Ek-1'de verilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

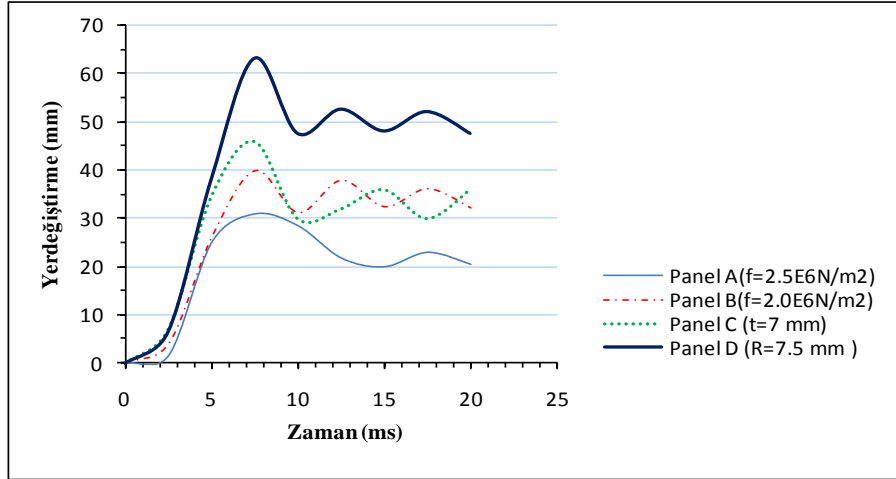
Bu çalışmanın temel amacı, farklı mesnet tiplerine sahip çelik panellerin sonlu elemanlar yöntemini kullanan ABAQUS paket programı ile doğrusal olmayan modellemesi yapılarak, üzerlerine etkitilen patlama yükü altındaki dinamik davranışlarını ve patlama enerjisinin azalmasını elde etmektir. Bu amaçla, çalışmanın birinci bölümünde patlama olayının mekanizması ve çeşitleri ile patlama etkilerine karşı alınması gereken önlemlere değinilmiş, ikinci bölümde ise çelik panellerin patlama etkilerine karşı davranışları modellenmiştir.

Gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan çıkartılabilecek bazı sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- 1) Panel-A'da, panele etkitilen patlama yüklerinin  $2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ,  $5.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  ve  $1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  değerine ait çözümleri birbirine oldukça yakındır (bkz Şekil 2.26 ve Şekil 2.28). Ayrıca görüldü gibi  $1.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ,  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  yükü için yerdeğışmeler daha artmaktadır. Bu da, patlama basıncının belli bir değerine kadar, harcanan plastik enerji üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir. Panel-A'da patlama yükünün daha da artırılması suretiyle yapılan ilave çözümler sonucunda, sözkonusu bu yükün belli bir değerinde modelde dinamik kararsız konumun ortaya çıktığı da belirlenmiştir. Bu panelde patlama yükü  $3.78 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  gelince, panelde dinamik kararsızlık ortaya çıkmakta ve plakanın yıtilmasına neden olmaktadır.
- 2) Panel-B'de, patlama yükünün daha da artırılması suretiyle yapılan ilave çözümler sonucunda, sözkonusu bu yükün belli bir değerinde modelde de dinamik kararsız konumun ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu panelde patlama yükü  $2.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  gelince, panelde dinamik kararsızlık oluşmakta ve plakanın yıtilmasına neden olmaktadır.
- 3) Panel-C'de, mesnet sacı kalınlığı 3mm olan model en uygun davranışı sergilemiştir. Zira, harcanan toplam enerjinin çoğu mesnet plakaları tarafından harcamış, panel gövdesine minimum yük etkimiştir. Oysa  $t=5\text{mm}$ ,  $7\text{mm}$  ve  $10\text{mm}$  mesnet sacı kalınlığı için verilen diğer eğriler dikkate alındığında, davranışın tam ters olduğu, mesnet sacı kalınlaştıkça patlama enerjisinin neredeyse tamamen panel sacı tarafından harcandığı görülmektedir (bkz Şekil 2.47-49). Panel-C'de  $t=3\text{mm}$  sac kalınlığı en iyi çözüm gibi gözükse de,

minimum plastik birim şekildeğiştirme  $t=10\text{mm}$  olan panelde meydana gelmektedir. Dolayısıyla PANEL-C'nin, bu terslik nedeniyle, uygun bir tasarım olarak kabul edilemeyeceği düşünülmektedir

- 4) PANEL-D'ye ait sonuçlara göre, mesnet kıvrım yarıçapı büyüdükçe kıvrım bölgesinde harcanan enerjinin arttığı, bu artış oranının  $R=12,5\text{mm} / R=7.5\text{mm}$  için 2.16 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Mesnet kıvrım yarıçapının değişimine bağlı olarak, patlama enerjisinin çoğu mesnet kıvrımlarında harcanmaktadır. PANEL-D için verilen tüm sonuçların değerlendirilmesinden, modelin davranışının kıvrım yarıçapının değişimi ile stabil olduğu, PANEL-C'dekine benzer bir tersliğin ortaya çıkmadığı görülebilir. Buradan da PANEL-D modelinin PANEL-C'ye göre daha uygun olduğu anlaşılmaktadır.
- 5) Tüm modellerdeki çözümlerden elde edilen minimum merkez nokta yerdeğiştirme değerlerini gösteren eğriler Şekil 2.56'da verilmektedir. Bu eğrilerde esas alınan modeller; PANEL-A için  $2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  etkisindeki çözümler, PANEL-B için olan çözümler, PANEL-C için  $t=7\text{mm}$  mesnet sacı kalınlığı olan çözümler ve PANEL-D için mesnet kıvrımı yarıçapı  $R=7.5\text{mm}$  olan çözümlerdir.

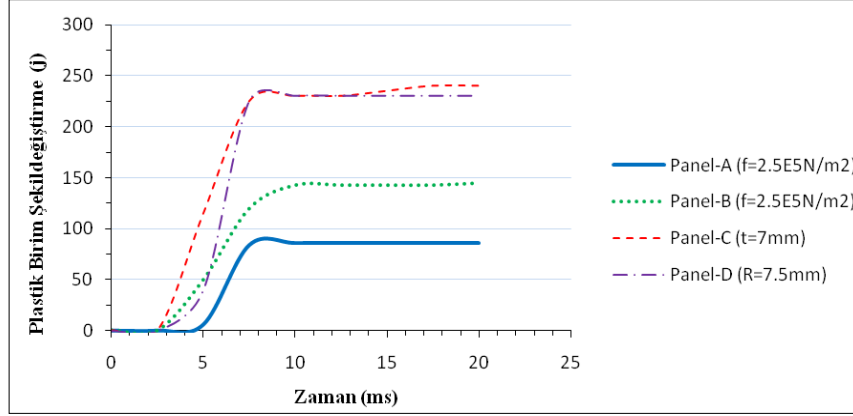


Şekil 2.56. Seçilen modellerde merkez noktasının yer değiştirmeleri

- 6) Aynı panellerin harcanan plastik enerjiye göre karşılaştırması ise aşağıdaki Şekil 2.57'de görülmektedir. Panellerin enerji harcama yetenekleri açısından karşılaştırması yapılacak olursa, yine PANEL-A'nın daha uygun bir model



olduğu anlaşılmaktadır. Zira, diğer modellerde enerjinin daha çok panel gövdesi üzerinden harcanmasına karşın, PANEL-A modelinde enerjinin önemli bir miktarı panelin mesnet bağlantı bölgelerinde sürtünme yoluyla harcanmakta, panel gövdesi patlama etkisinden en az etkilenmektedir. Bu anlamda, yine sürtünme esaslı alışan PANEL-B'nin de PANEL-A'dan sonra en uygun model olduğu söylenebilir.



Şekil 2.57 Seçilen panel modellerinde harcanan plastik enerjiler

- 7) Sürtünme esaslı çalışan ilk iki model ile Şekildeğiştirme esaslı çalışan üçüncü ve dördüncü modellerin grup olarak karşılaştırması da yapılacak olursa, sürtünmeli modellerin patlama etkilerine karşı daha uygun davranış gösterdiği söylenebilir.

Özetle bu çalışmada, belli bir patlama basıncı etkisi altında bulunan bir elik panelin davranışının farklı mesnet düzenlemelerine göre sayısal olarak incelenmesi gerçekleştirilmiş, mesnet koşullarının patlama enerjisinin harcanması için çok önemli görev üstlendiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte; panele belli mesafede ortaya çıkan ve belli TNT eşdeğerliğindeki bir patlamanın panel üzerinde meydana getireceği basıncın hesabı, farklı boyutlarda ve daha farklı mesnet tasarımlarına sahip panellerin de modellenmesi, panellerdeki rijitleştirici levhaların düzen ve boyutlarının değişiminin modellenmesi ve modelleri ile patlamanın laboratuvar ortamında denenmesinin çok daha yararlı olacağını belirtmek uygun olacaktır.

#### 4. KAYNAKLAR

1. Alkan, A., Kimyasal patlayıcıların infilakı sonucunda oluşan ses şiddetinin ölçeklendirme yasaları, Yüksek Lisans Tezi, EGE Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
2. Akçat, M., Balistik, Fen-Edebiyat Fakültesi Basımevi, Erzurum, 1963.
3. Kovalev, D., Super Explosive, New Scientist, 2001.
4. Pokrowski, G. I., Explosion und Sprengung, Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek, Leipzig, 1985.
5. Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., and Stehlow, R. A., Explosion Hazards and Evaluation, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1983.
6. Hinman, E., Council, A. T. and Engineers, H. C., Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks, FEMA 427 (2003).
7. TM 5-1300, Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, US Department of the Army Technical Manual, 1990.
8. KKT, Patlayıcı Maddeler ve Tahrip, Kara Kuvvetleri Komutanlığı, Ankara, 1972, 5-25.
9. J. Gn. K. lığı., Bomba İmha Uzmanlığı Temel Eğitimi Kurs Notları, Ankara, 1996.
10. NATO, El Yapısı Patlayıcı Maddelerin Zararsız Hale Getirilmesi (IEDD) Kurs Notları, Ankara, 2001.
11. Fickett, W., Detonation in Miniature, The Mathematics of Combustion, Philadelphia, (1985) 133-181.
12. Smith, P. D. and Hetherington, J. G., Blast and Ballistic Loading of Structures, Butterworth and Heinemann Ltd, Oxford, 1994.
13. Lewis, B. and Von Elbe, G., Combustion Flames and Explosions of Gases, Academic Press, Second Edition, New York, 1961.
14. Davies, W. C., High Explosives: The Interaction of Chemistry and Mechanics, Los Alamos Science, (1981) 48-75.
15. Beshara, F. B. A., Modelling of Blast Loading on Aboveground Structures-I (General Phenomenology and External Blast), Computers & Structures, 51,5 (1994) 585-96.

16. TM5-1300, Supperssive Shields-Structural explosion, U. S. Army Corps of engineers, HNDM-1110-1-2, 1990.
17. Kinney, G. F. and Graham, K. J., Explosive Shocks in Air, New York, 1985.
18. Henrych, J., The Dynamics of Explosion and Its Use, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1979.
19. Agbabian, M. S., Design of Structures to Resist Nuclear Weapon Effects, ASCE, Manual on Engineering Practice, 1985.
20. Newmark, N. M., An Engineering Approach to Blast Resistant Design, ASCE, 309 (1953) 79.
21. Newmark, N. M. and Haltiwanger, J. D., Air Force Design Manual: Principles and Practice for Design of Hardened Structures, Air Force Special Weapons Center, (1962) 62-138.
22. Newmark, N. M., Design of Structures for Dynamic Loads Including the Effects of Vibration and Ground Shock, In Symposium on Scientific Problems of Protective Construction, 1963, Zurich, Swiss Federal Institute of Technology, 148-248.
23. Newmark, N. M., External Blast, Proceedings of Int. Conf, on the Planning and Design of Tall Buildings, 1972, Lehigh University, 661- 676.
24. Baker, W. E., Explosions in Air, University of Texas Press, Austin, 1973.
25. Bulson P. S., Explosive Loading of Engineering Structures, E & FN Spon, 1997, 233.
26. Johansson, M., Stötvagsutbredning in luft, Publication B54- 223/02, Swedish Rescue Service Agency, 2002.
27. TM 5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of the Army and the Navy Publication NAVFAC P-397, Department of the Air Force Manual AFM 88-22, November, 1990.
28. Krauthammer, T., Modern Protective Structures, Design, Analysis and Evaluation. Course notes, The Pennsylvania State University, USA, 2000.
29. Biggs, J. M., Introduction to Structural Dynamics, McGraw- Hill, New York, 1964.
30. Glasstone, S. and Dolan, P. J., The Effects of Nuclear Weapons 2, 3rd Edition, U.S. Department of Defense and U.S. Department of Energy, Washington DC,1977.
31. Grawford, R. E., Higgins, C. J. and Bultman, E. H., AFWL-TR-74-102 The Air Force Manual for Design and Analysis of Hardened Structures, Albuquerque, 1974.
32. Newmark, N. M. and. Hansen, R. J., Design of Blast-Resistant Structures. In Shock and Vibration Handbook 3, McGraw-Hill, 1961.

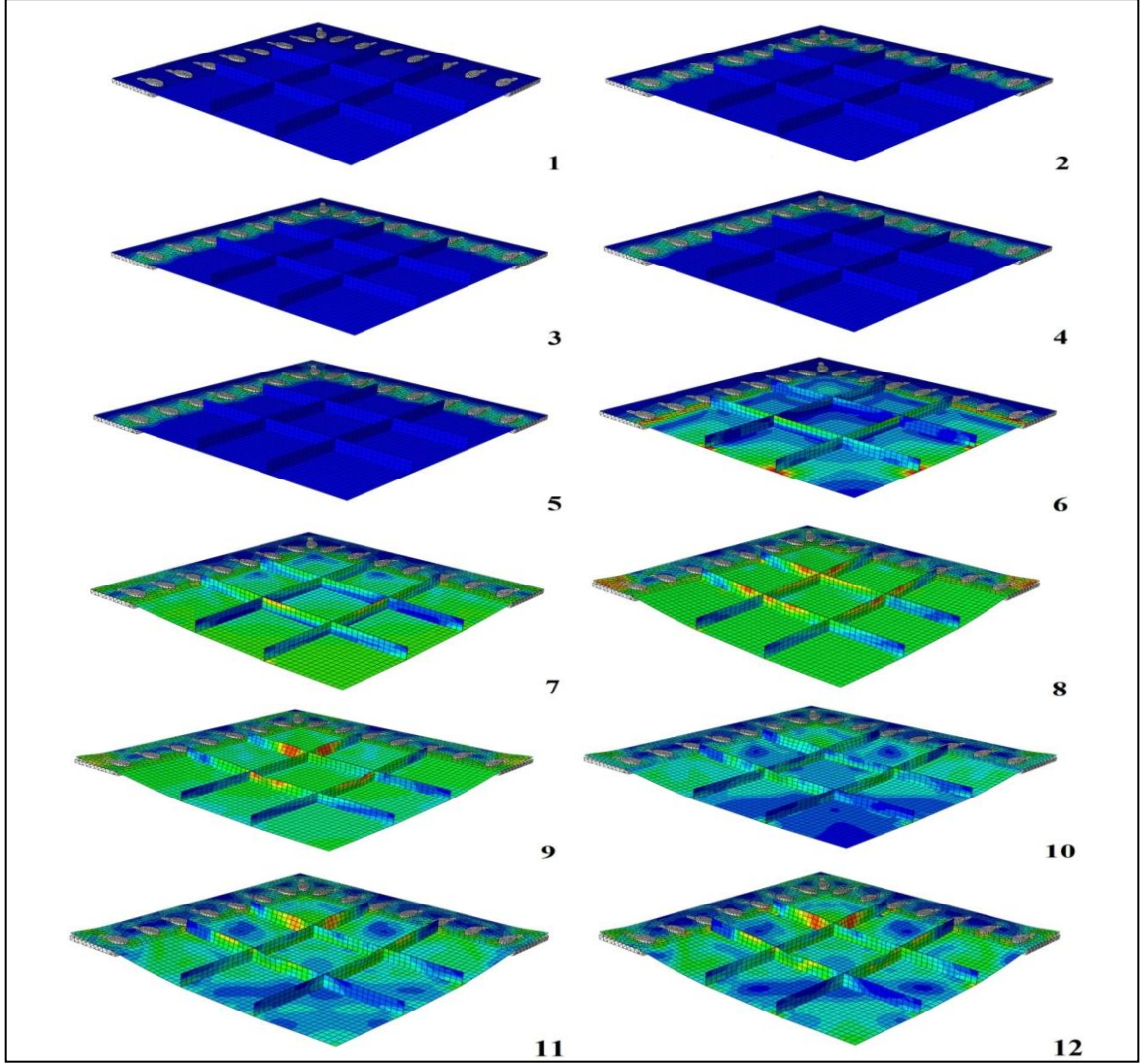
33. Dharaneepathy, M. V., Rao, M. N. K. and Santhakumar, A. R., Critical Distance for Blast-Resistant Design, Pergamon Press Inc, 1995.
34. Bergeron, D., Walker, R. and Coffey, C., Detonation of 100-Gram Anti-Personnel Mine Surrogate Charges in Sand a Test Case for Computer Code Validation. Defence Research Establishment Suffield Ralston, Alberta Canada Suffield Report, April 1998.
35. Mays G. C. and Smith P. D., Blast effects on buildings-Design of buildings to optimize resistance to blast loading, Thomas Telford, London, 1995.
36. Pedro, F., Silva, Binggeng. and Lu, Antonio Nanni., Prediction of Blast Load Based on the Expected Damage Level by Using Displacement Based Method, SAFE 2005 WIT Conference Proceedings Rome, June 2005, Italy.
37. Kirkwood, J. G., and Bethe, H. A., Basic Propagation Theory, OSRD, (1942) 588-595.
38. Peeny, W. G. and Dasgupta, H. K. British Report, RC-333, 1942.
39. Rajendran, R., Lee, J. M., Blast loaded plates, Marine Structures, 22,2 (2009) 99-127.
40. T. Ngo., P. Mendi., A. Gupta. and J. Ramsay., Blast Loading and Blast Effects On Structures-An Overview, Electronic Journal of Structural Engineering,7 (2007) 76-91.
41. Grote, D., Park, S. and Zhou, M., Dynamic Behavior of Concrete at High Strain Rates and Pressures, International Journal of Impact Engineering Science, 25,9 (2001) 869-886.
42. Bangash. M. Y. H. and Bangash, T., Explosion-Resistant Buildings, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
43. FEMA-Risk Management Series Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks, December 2003.
44. Li, B., T. C. Pan. and A. Nair., A Case Study of the Effect of Cladding Panels on the Response of Reinforced Concrete Frames Subjected to Distant Blast Loadings, Nuclear engineering and design 239,3 (2009) 455-469.
45. Smith, PD. and Rose, TA., Blast Loading and Building Robustness, Progress in Structural Engineering and Materials, 4 (2002) 213-223.
46. Biggs, JM., Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York, 1964.
47. TM 5-1300, Design of structures to resist the effects of accidental explosions, US Department of the Army Technical Manual, 1990.
48. TM5- 855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Department of the Army Technical Manual, 1985.

49. Hyde, DW., Conwep-Conventional Weapons Effects: Department of the Army, Waterways Experimental Station, *US Army Corps of Engineers, Vicksburg*, 1992.
50. T. Krauthammer., *Modern protective structures*, CRC 22, 2008.
51. [www.imoizmir.org.tr/.../seminer-20100415](http://www.imoizmir.org.tr/.../seminer-20100415), DarbeCatlak, 02 Mart 2012.
52. Johnson, W., *Impact strength of materials*, Edward Arnold, Paris, 1972.
53. Jones, N., *Structural Impact*, Cambridge University Press, Cambridge UK, 1989-1997.
54. Zhao, YP., Suggestion of a New Dimensionless Number For Dynamic Plastic Response of Beams and Plates, *Arch Appl Mech*, 68 (1998) 524–538.
55. Cloete, TJ., Nurick, GN. and Palmer, RN., The Deformation and Shear Failure of Peripherally Clamped Centrally Supported Blast Loaded Circular Plates, *International Journal of Impact Engineering Science*, 32 (2005) 92-117.
56. Nurick, GN. and Shave, GC., The Deformation and Tearing of Thin Square Plates Subjected to Impulsive Loads-An Experimental Study, *International Journal of Impact Engineering Science*, 18 (1996) 99-116.
57. Langdon, GS., Chung Kim Yuen, S. and Nurick, GN., Experimental and Numerical Studies on The Response of Quadrangular Stiffened Plates. Part II: Localised Blast Loading, *International Journal of Impact Engineering Science*, 31 (2005) 85–111.
58. Louca, LA., Punjani, M. and Harding. JE., Non-linear Analysis of Blast Walls and Stiffened Panels Subjected to Hydrocarbon Explosions, *J Constr Steel Res*, 46 (1998).
59. Jacob, N et al., Scaling Aspects of Quadrangular Plates Subjected to Localised Blast Loads Experiments and Predictions, *International Journal of Impact Engineering Science*, 30 (2004) 1179–1208.
60. Chung Kim Yuen, S. and Nurick, GN., Experimental and Numerical Studies on the Response of Quadrangular Stiffened Plates. Part I: Subjected to Uniform Blast Load, *International Journal of Impact Engineering Science*, 31 (2005) 55–83.
61. Ramajeyathilagam, K. and CP Vendhan, Deformation and Rupture of Thin Rectangular Plates Subjected to Underwater Shock, *International journal of impact engineering* 30,6 (2004) 699-719.
62. Abaqus Simulia Program, ver, 6.10-1 User Manuel.

## 5. EKLER

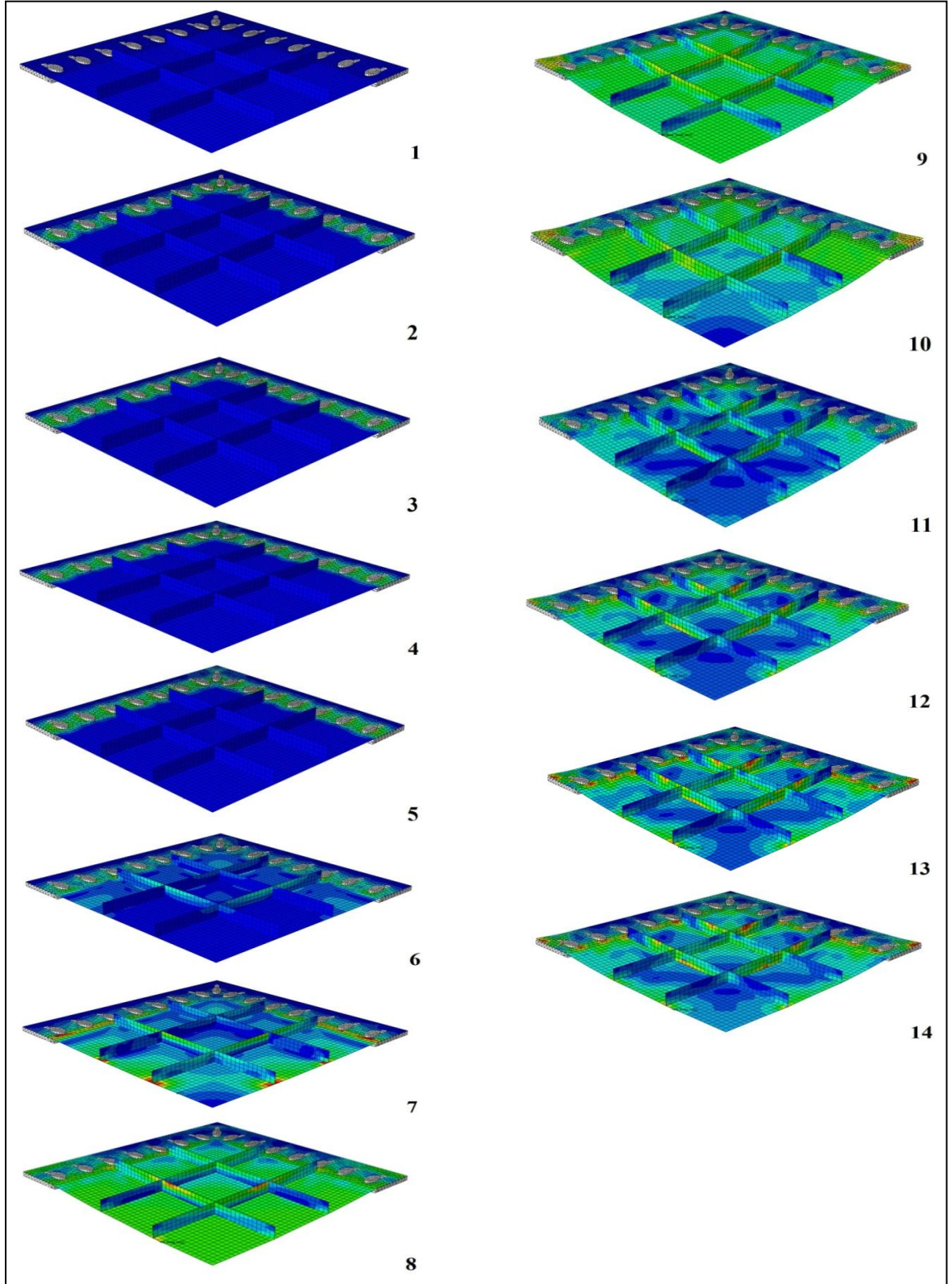
### 5.1. Ek 1

Bu başlık altında, dört farklı farklı mesnet koşullarına sahip çelik panellerin üzerlerine etkitilen patlama yükü altındaki dinamik davranışlarının, sonlu elemanlar yöntemini kullanan ABAQUS paket programı ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan çözümlerinden elde edilen enerji değişimleri aşağıdaki şekillerde, 0-20ms aralığında simülasyonlu olarak, verilmektedir.



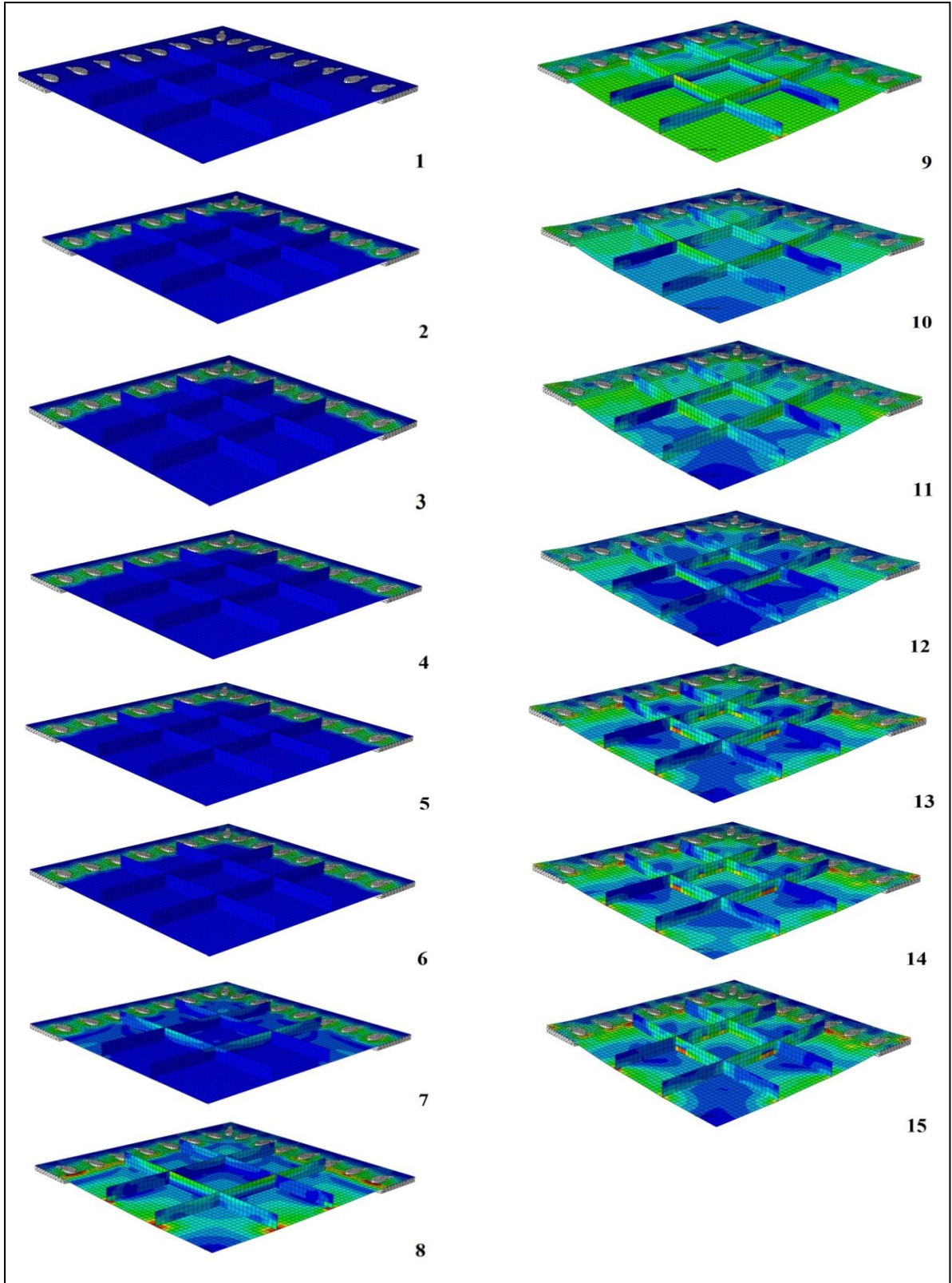
Ek Şekil 5.1. PANEL-A modelinin  $2.5 \text{ E}05 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS Simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



Ek Şekil 5.2. PANEL-A modelinin  $5.0 \text{ E}05 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

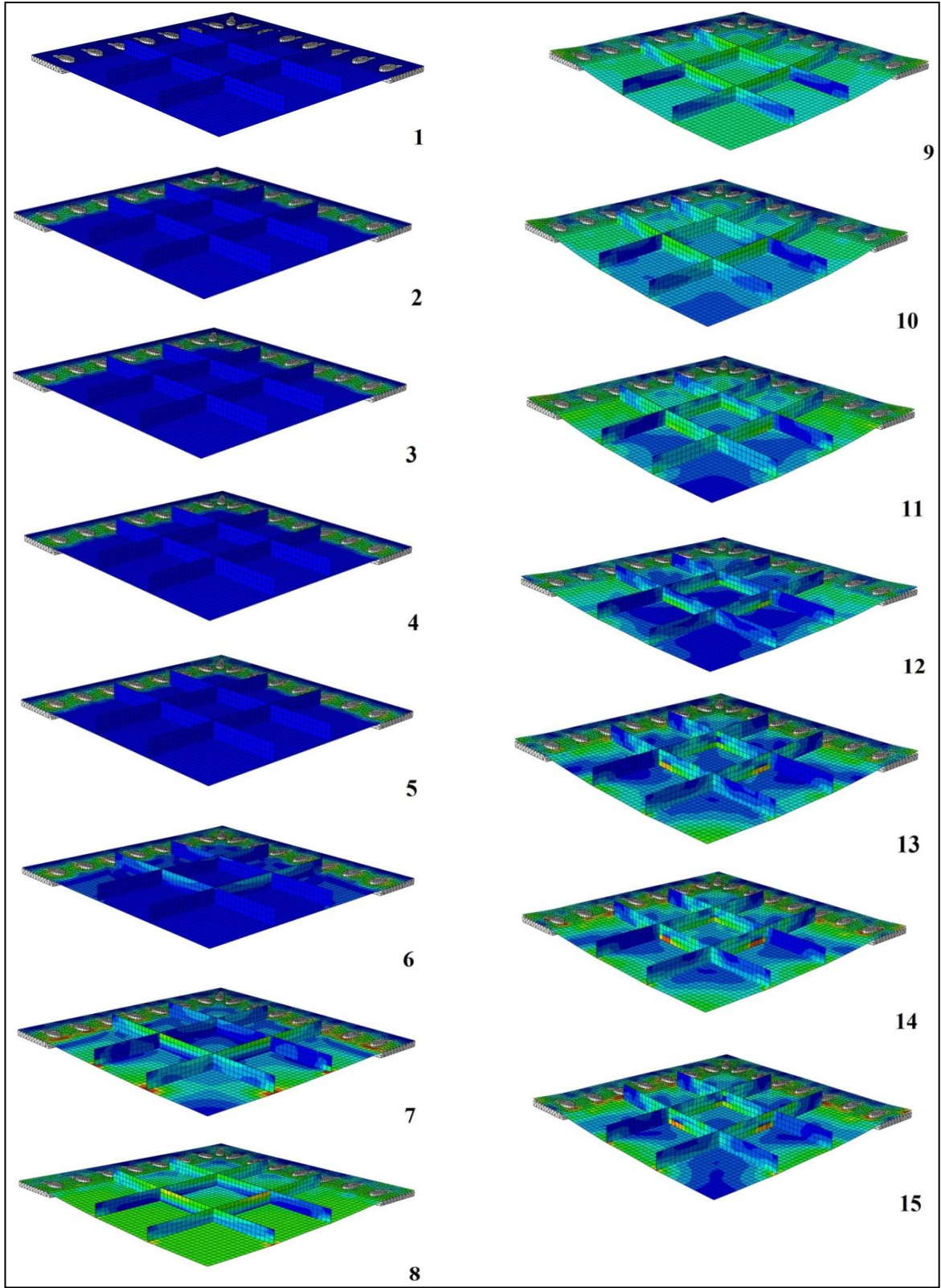
(Ek 1'in devamı)



Ek Şekil 5.3 PANEL-A modelinin  $1.0 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

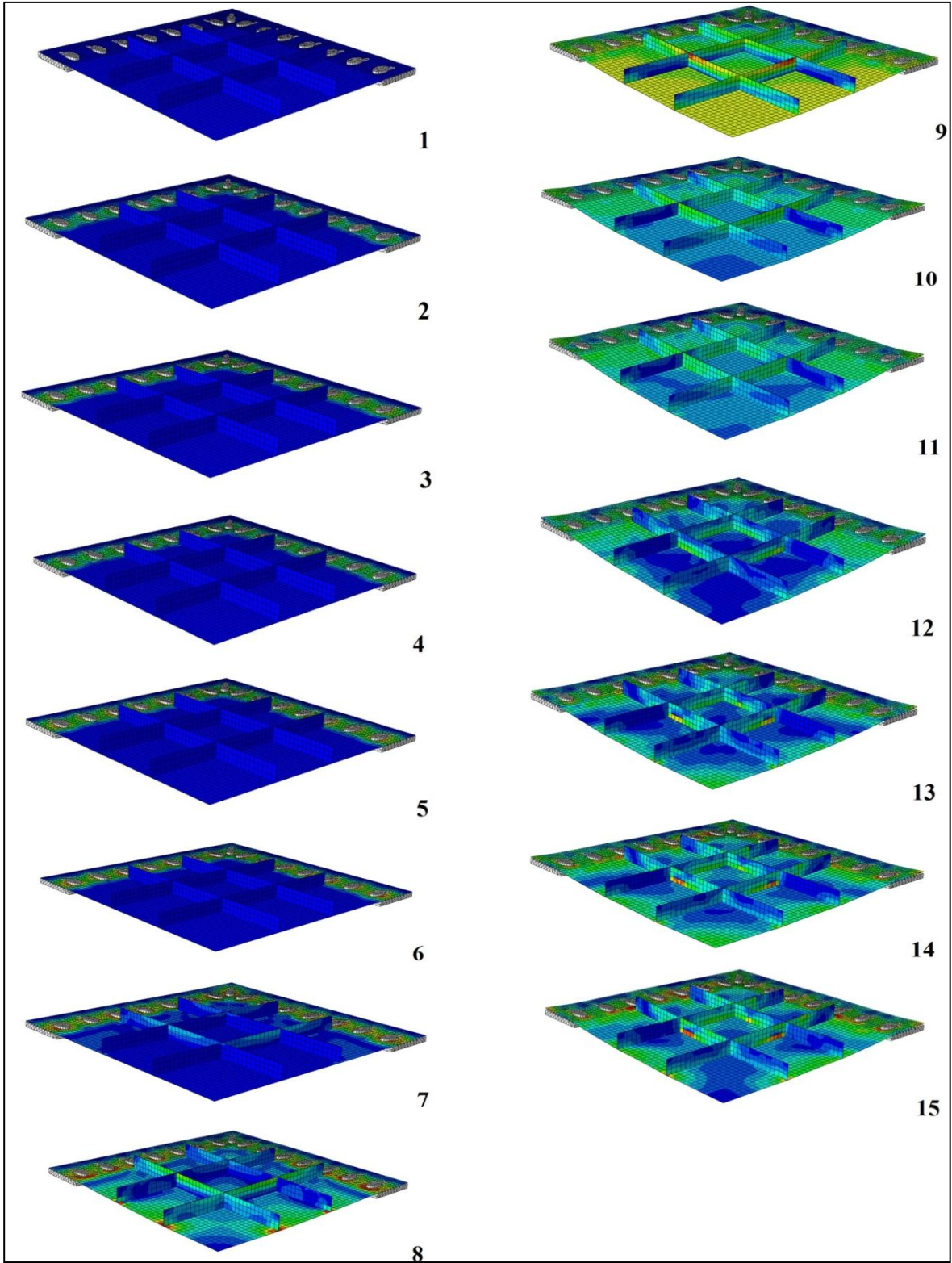


(Ek 1'in devamı)



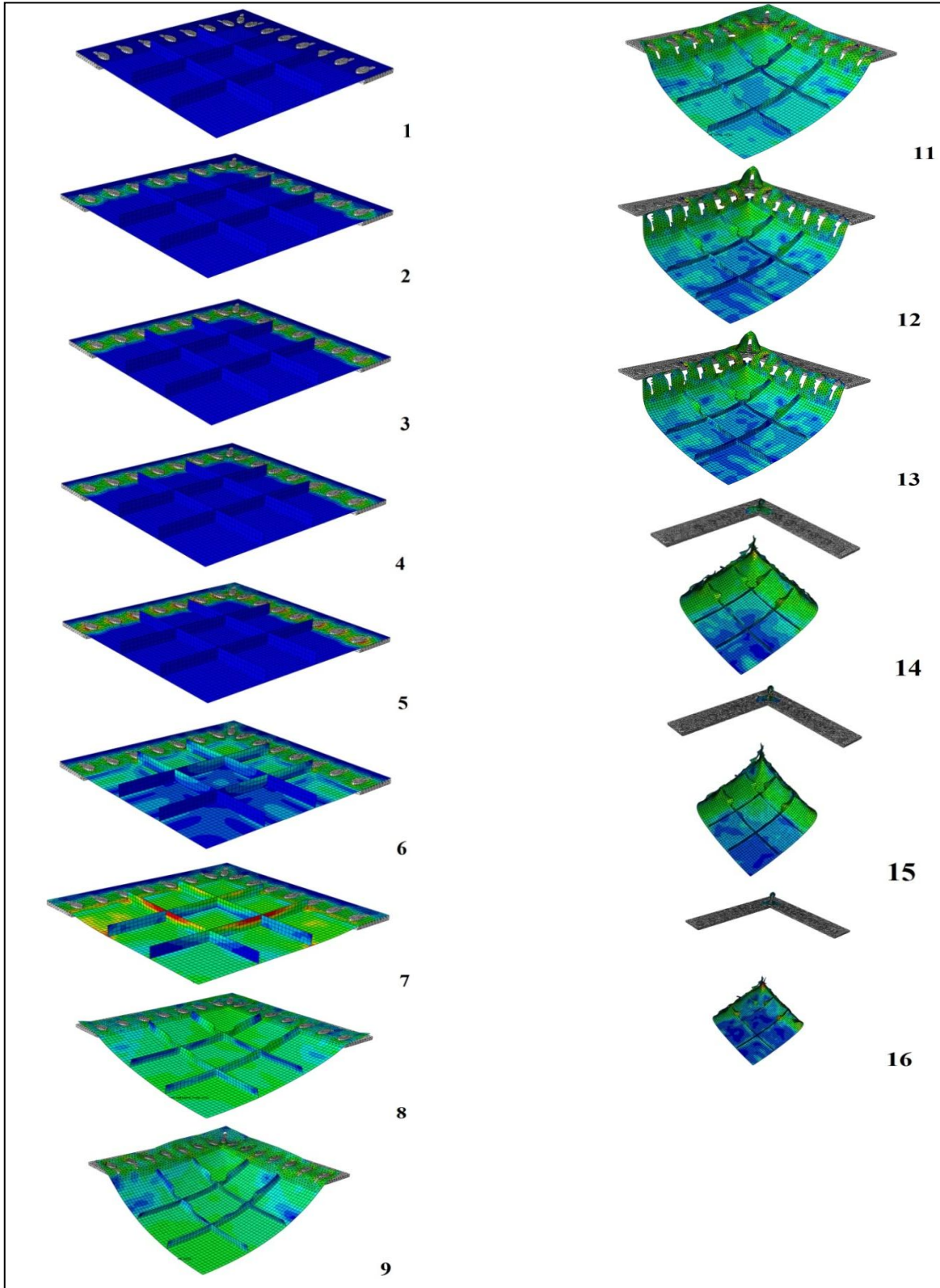
Ek Şekil 5.4. PANEL-A modelinin  $1.5 E06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



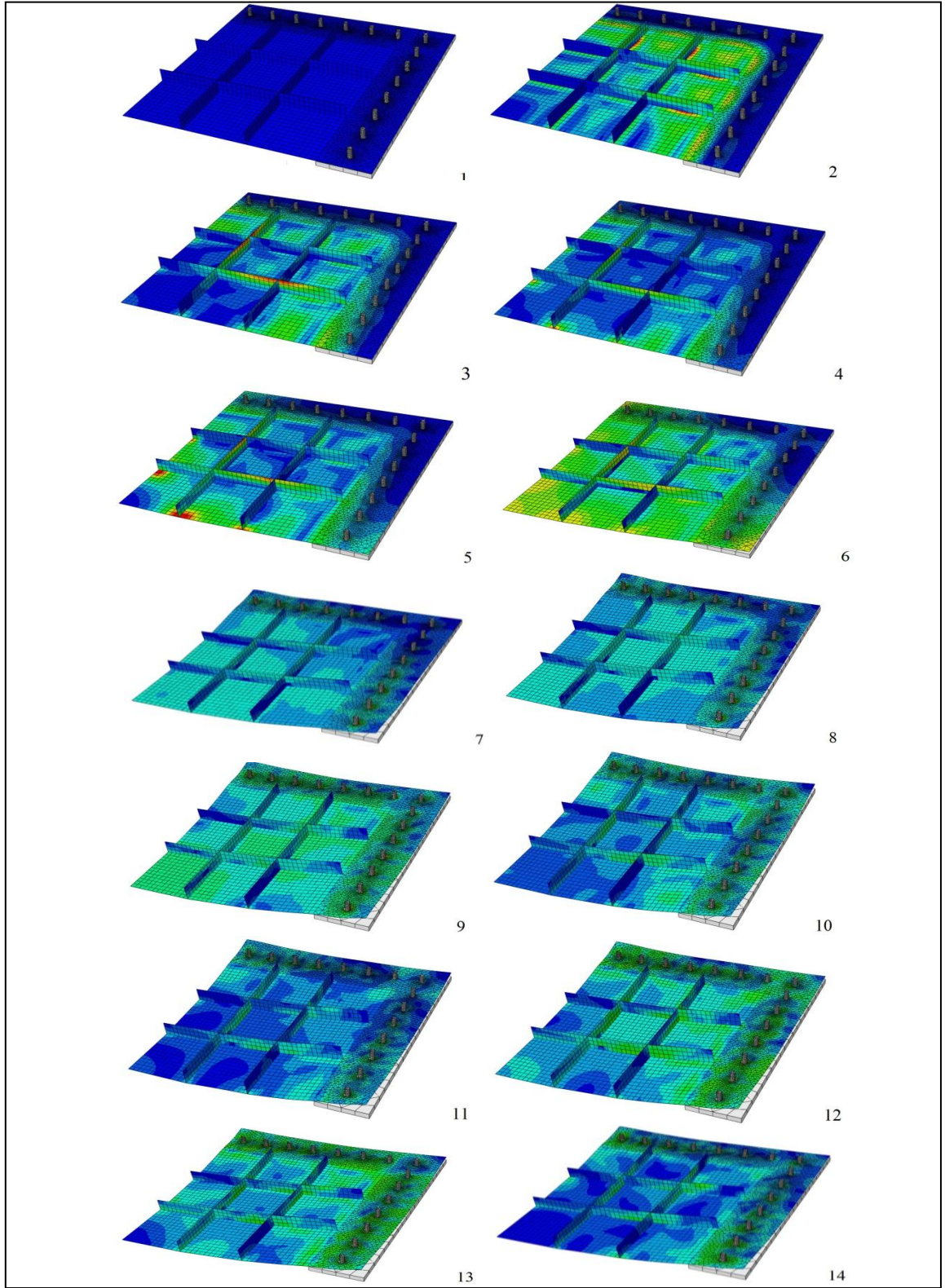
Ek Şekil 5.5 PANEL-A modelinin  $2.0 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



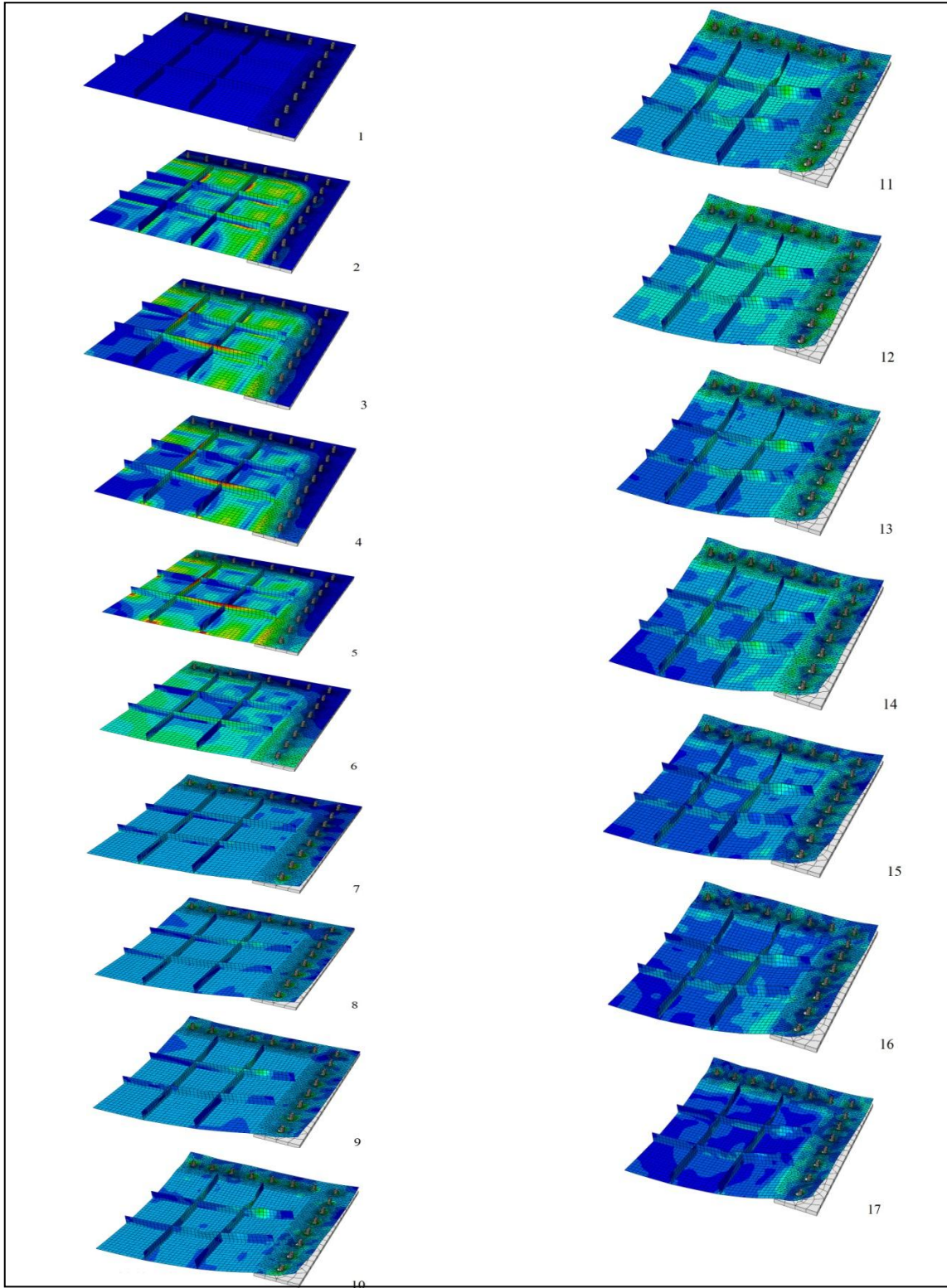
Ek Şekil 5.6 PANEL-A modelinin  $3.78 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



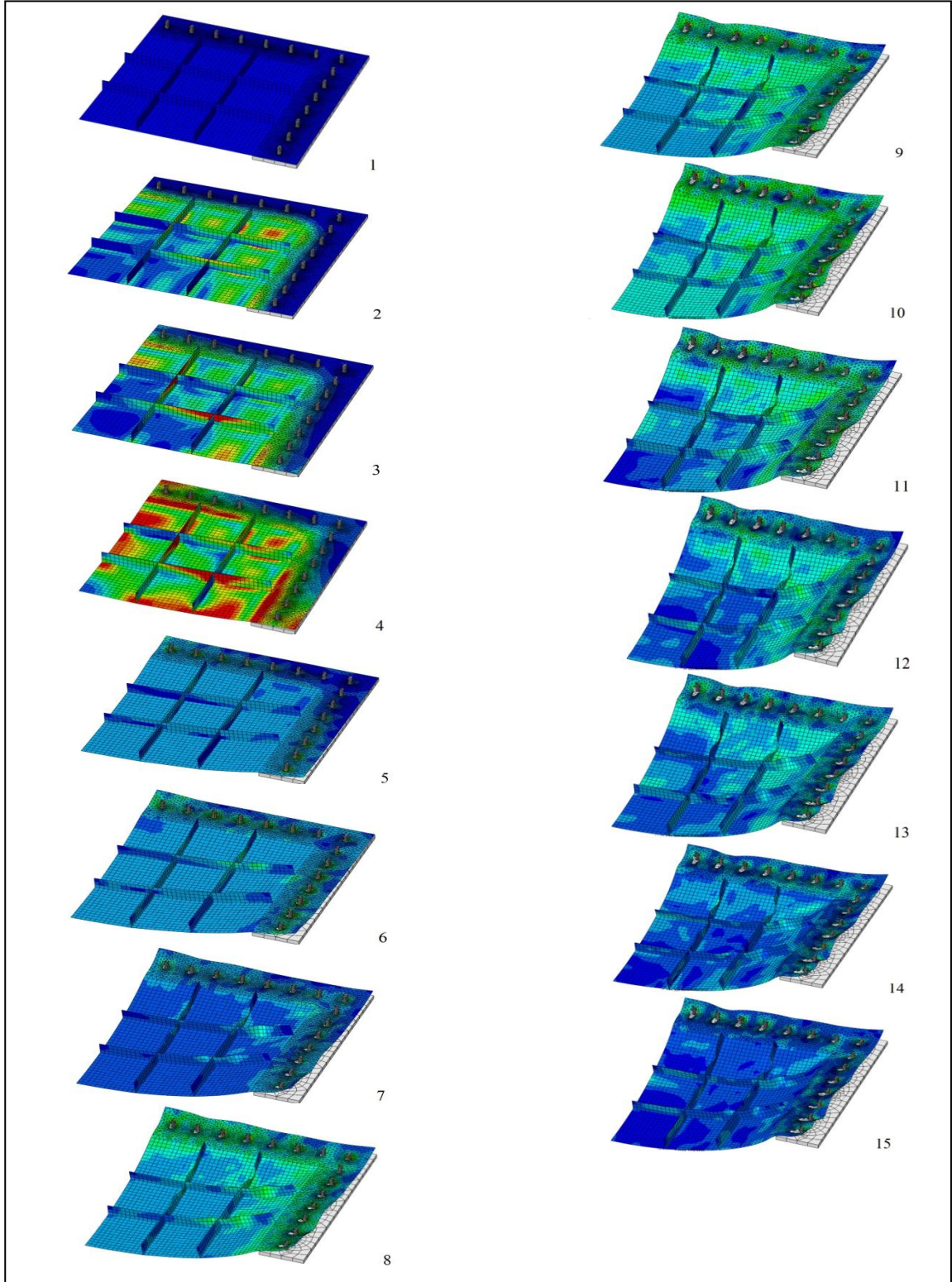
Ek Şekil 5.7. PANEL-B modelinin  $2.5 \text{ E}05 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



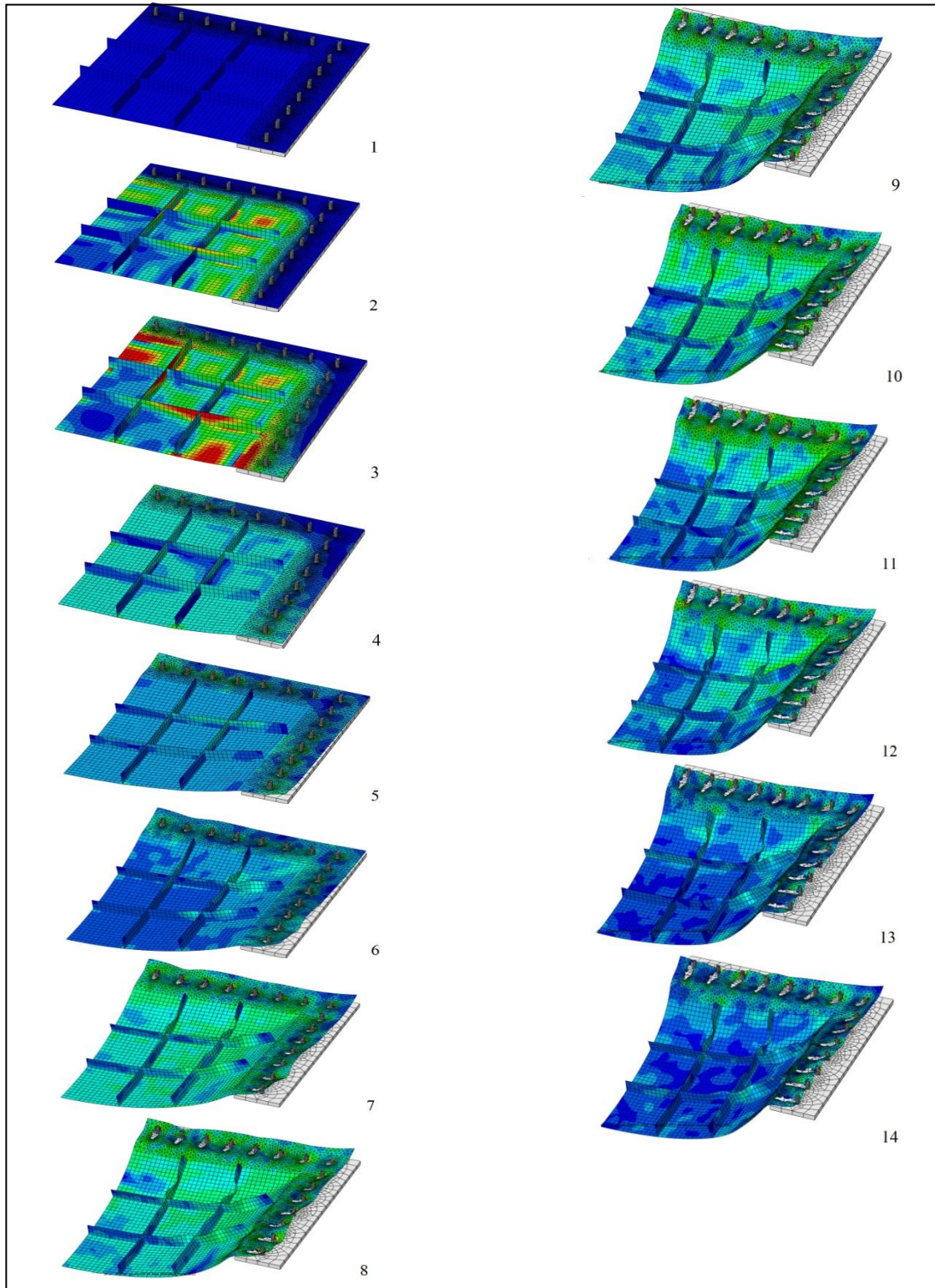
Ek Şekil 5.8 PANEL-B modelinin  $5.0 \text{ E}05 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



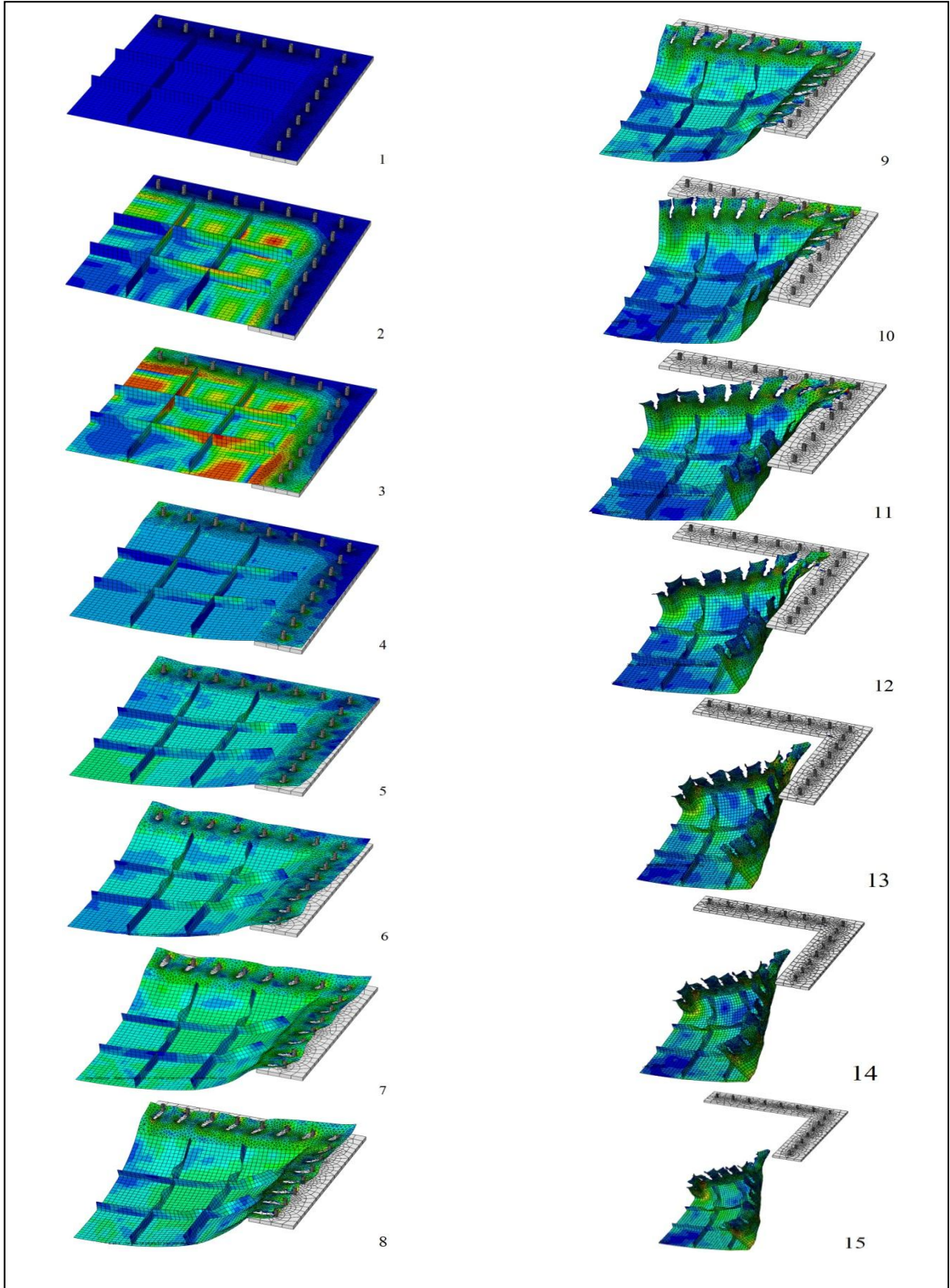
Ek Şekil 5.9 PANEL-B modelinin  $1.0 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



Ek Şekil 5.10 PANEL-B modelinin  $1.5 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS Simülasyonu

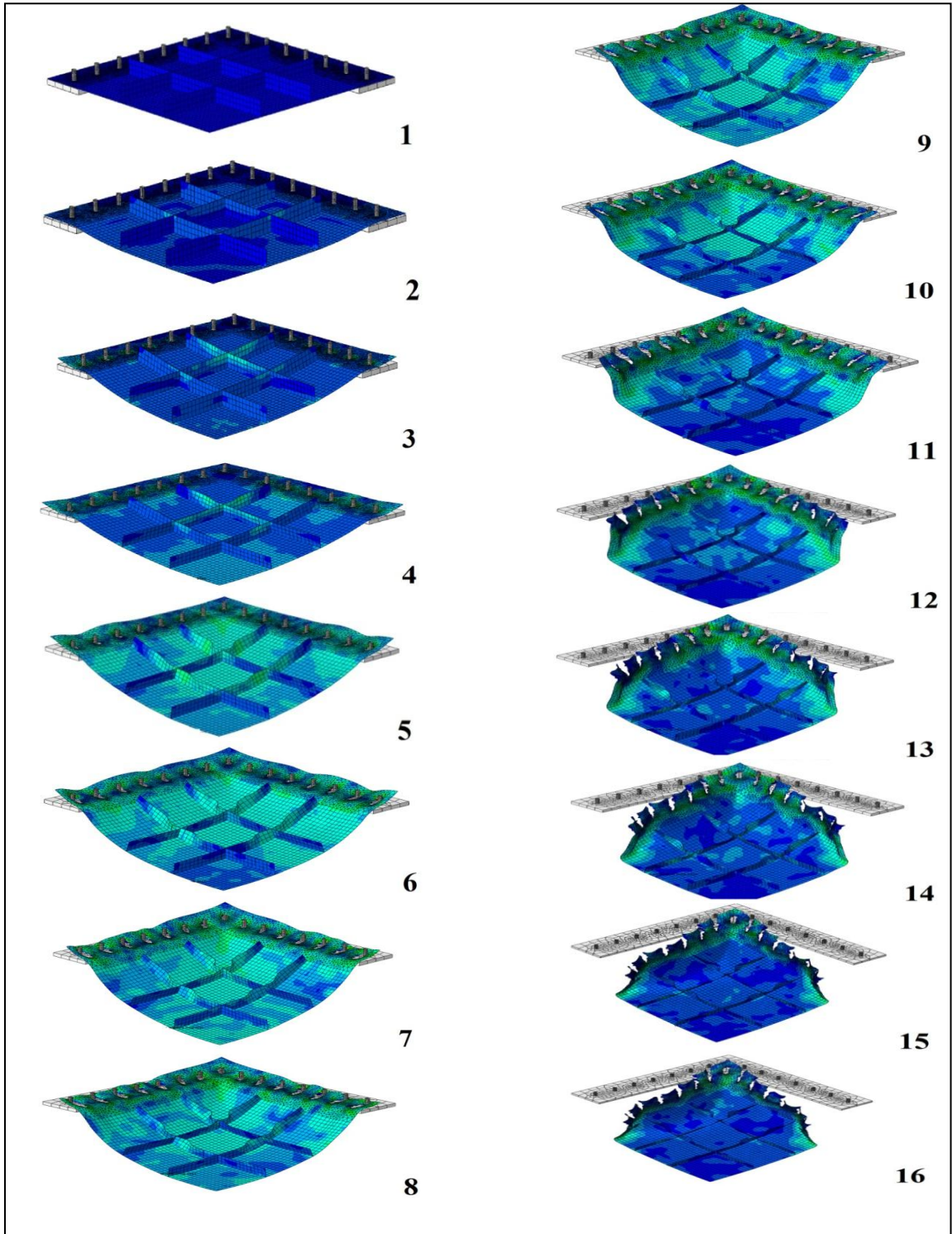
(Ek 1'in devamı)



Ek Şekil 5.11 PANEL-B modelinin  $2.0 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

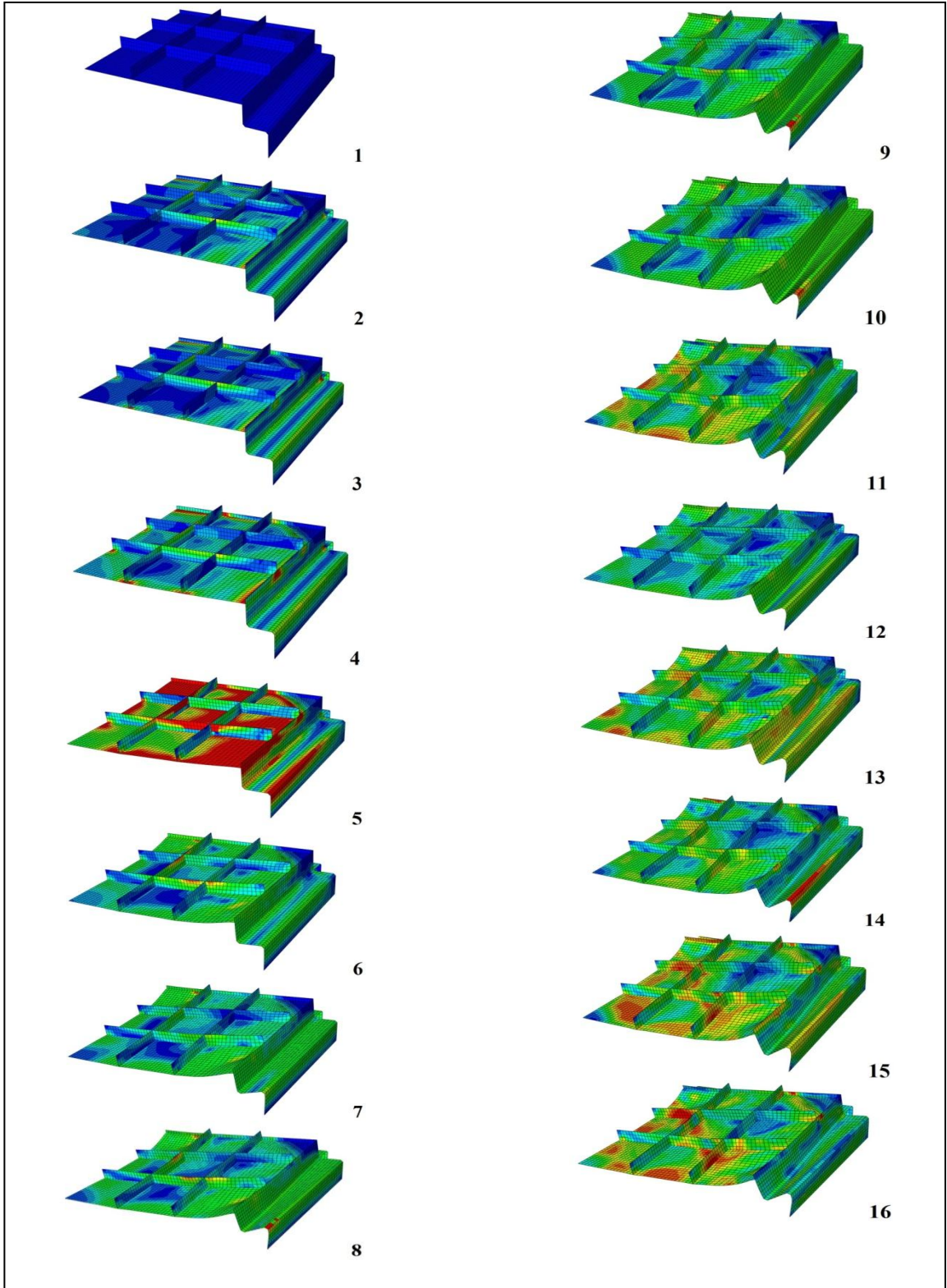


(Ek 1'in devamı)



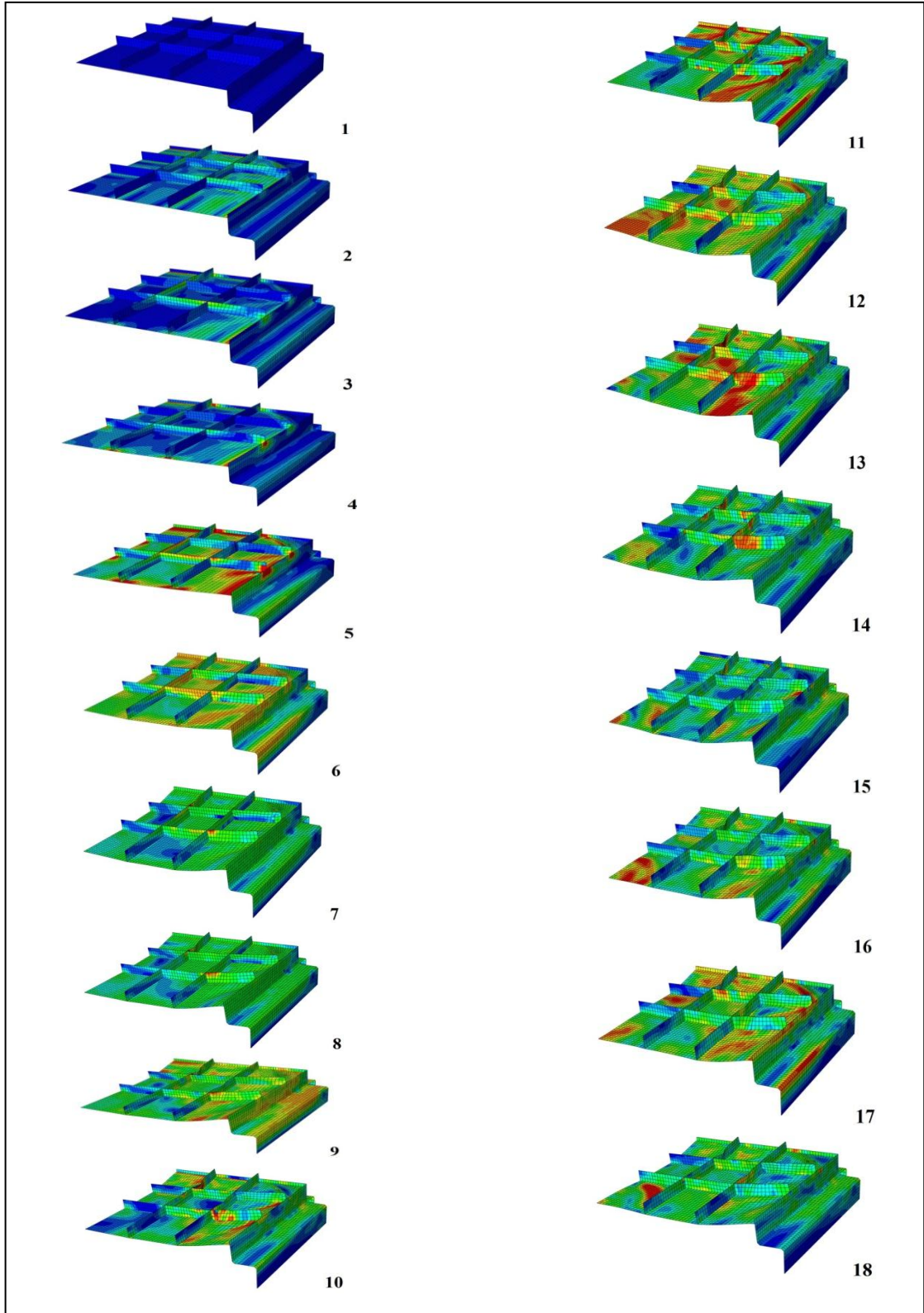
Ek Şekil 5.12 PANEL-B modelinin  $2.2 \text{ E}06 \text{ N/m}^2$  patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



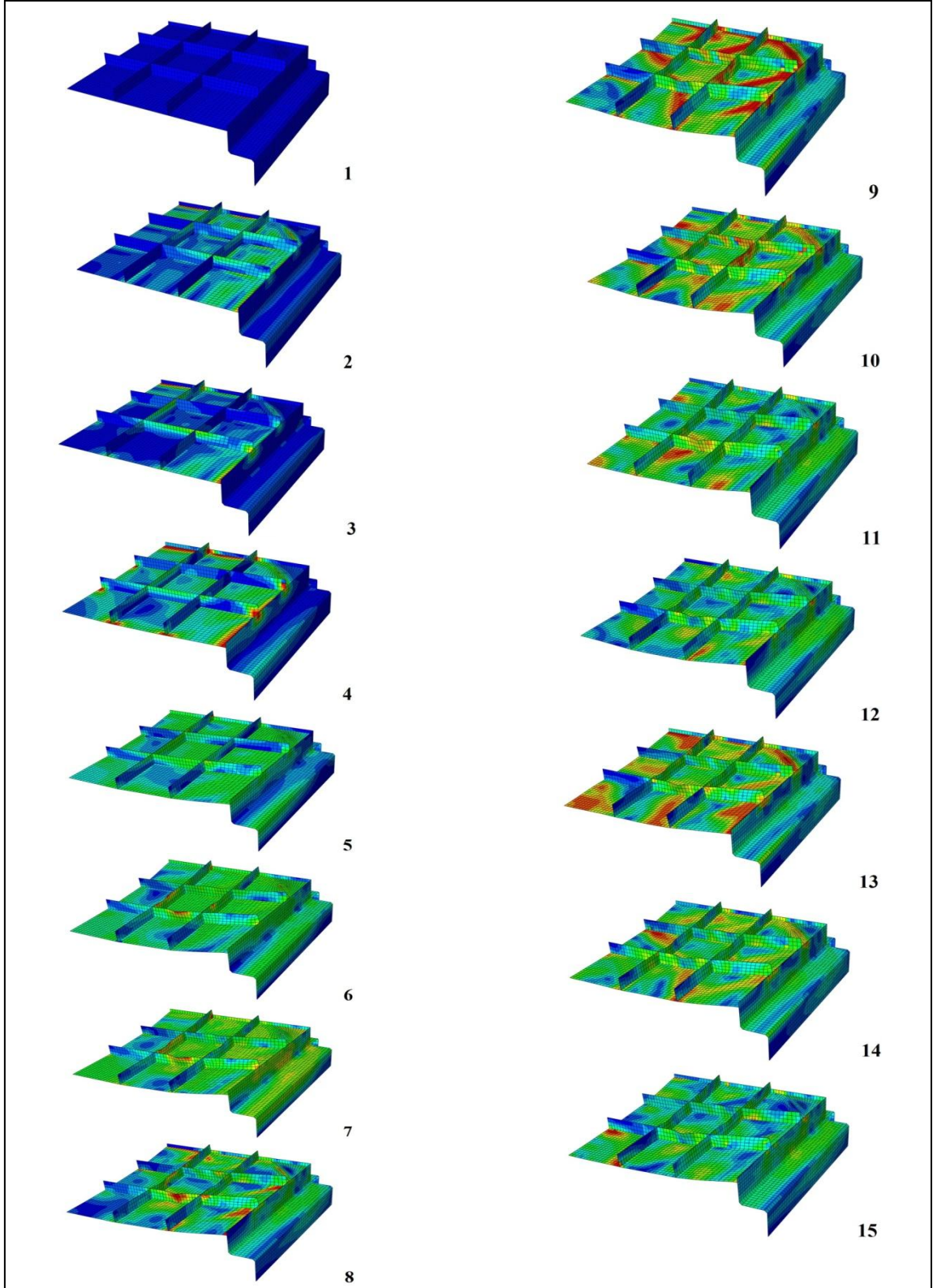
Ek Şekil 5.13 PANEL-C modelinin 3mm sac kalınlığının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



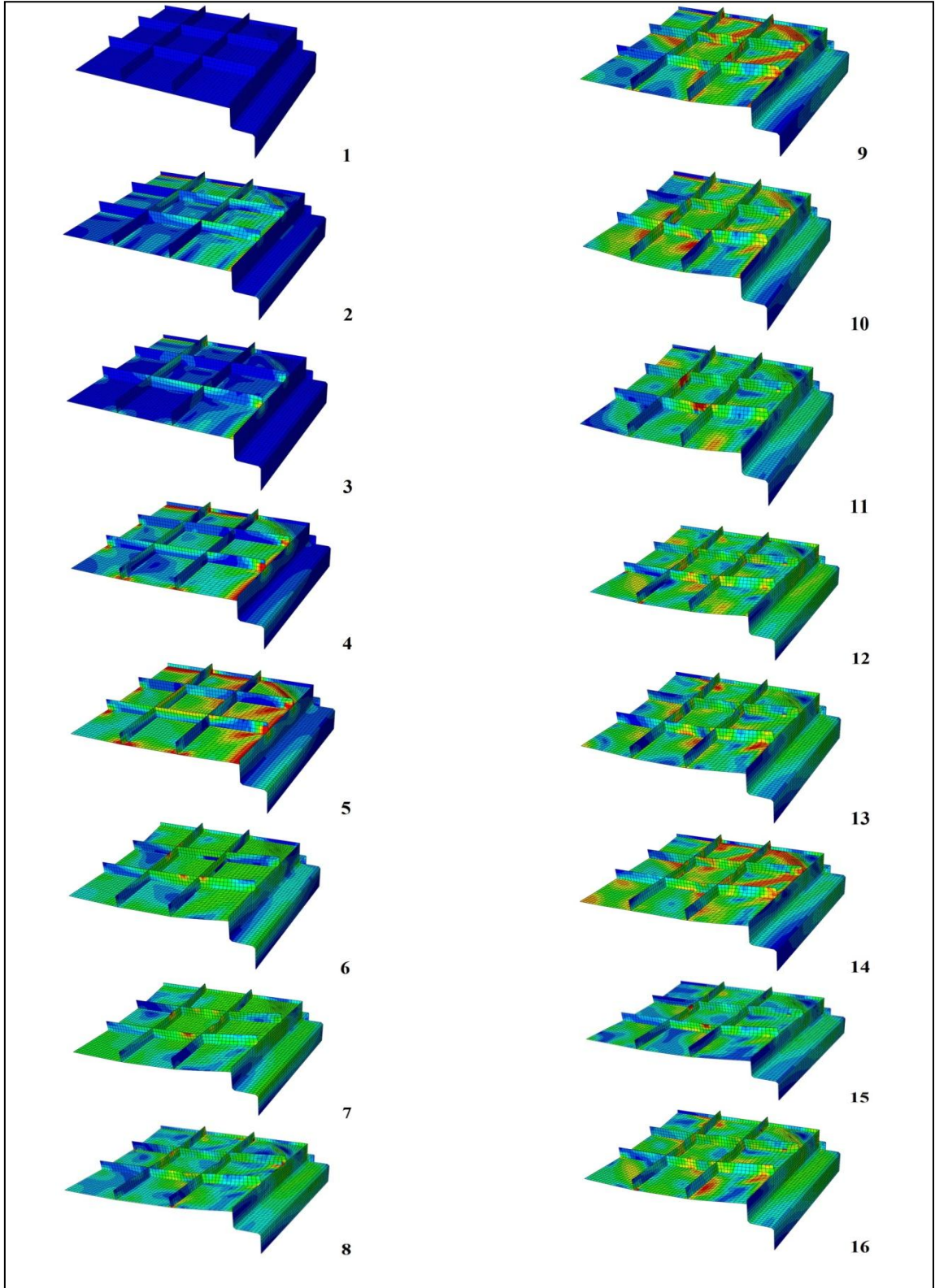
Ek Şekil 5.14 PANEL-C modelinin 5mm sac kalınlığının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



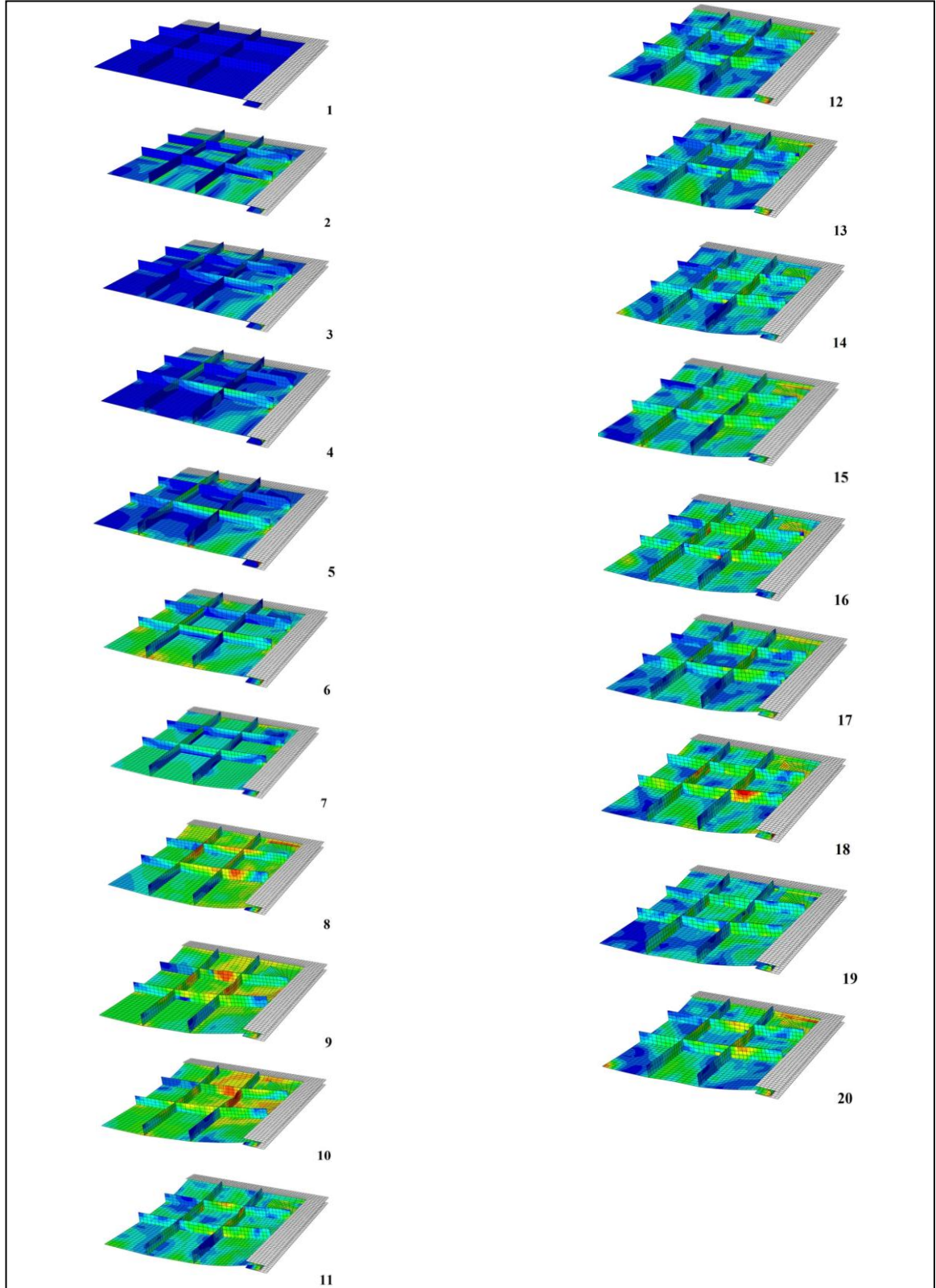
Ek Şekil 5.15 PANEL-C modelinin **7mm** sac kalınlığının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



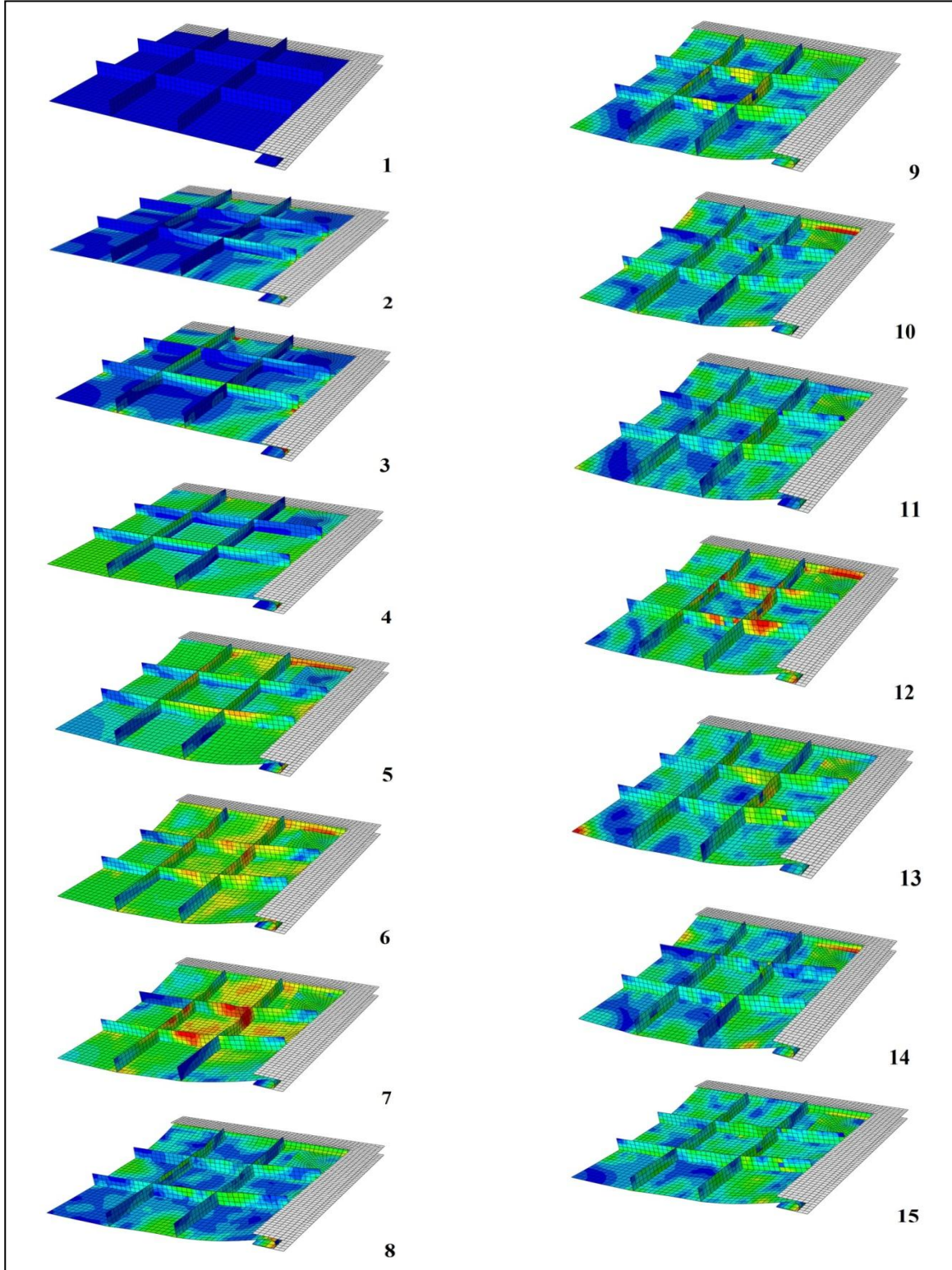
Ek Şekil 5.16 PANEL -C modelinin **10mm** sac kalınlığının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



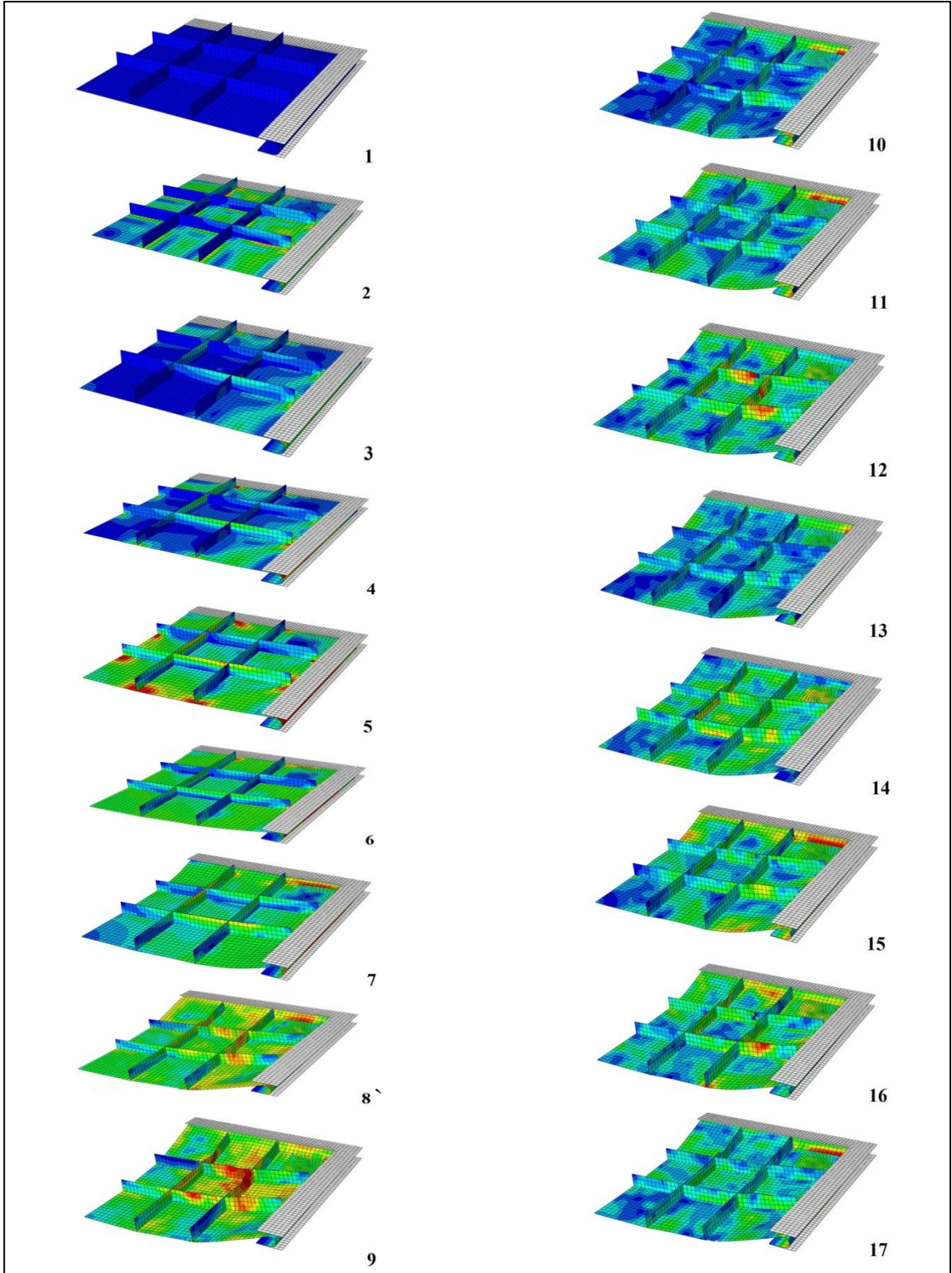
Ek Şekil 5.17 PANEL-D modelinin **7.5mm** yarıçapının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



Ek Şekil 5.18 PANEL-D modelinin **10mm** yarıçapının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu

(Ek 1'in devamı)



Ek Şekil 5.19 PANEL-D modelinin **12.5mm** yarıçapının patlama yükü altındaki ABAQUS simülasyonu



## ÖZGEÇMİŞ

Bahram SAMADİ VAİGHAN 1983 yılında İran'ın Tabriz Şehrinde doğdu. İlköğrenimini 1990 yılında Tabriz'de tamamladıktan sonra 2002 yılında Tabriz'in İhsan Lisesinde mezun oldu. 2003 yılında Şabester Azad İslami Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girmeye hak kazanmış ve öğrenimini burada 2008 yılında tamamlamış ve 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır. Bekar olan Bahram SAMADİ VAİGHAN iyi derecede Türkçe, İngilizce, Farsça, Azerice bilmektedir.