



**MÜKERRER İÇ PATLAMA YÜKLERİ ALTINDAKİ BETONARME ODA
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İRDELENMESİ**

Ömer POLAT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Ömer POLAT

20/01/2021

MÜKERRER İÇ PATLAMA YÜKLERİ ALTINDAKİ BETONARME ODA
DAVRANIŞININ DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İRDELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ömer POLAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Bu çalışmada, mükerrer iç ortam patlamaları altındaki betonarme oda davranışının deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle tüm yapı elemanları betonarme olan bir oda inşa edilmiştir. Çalışma kapsamında patlayıcı miktarı ve patlayıcının duvarlara mesafesinin değişken olarak alındığı dört adet patlama deneyi yapılmıştır. Her patlama deneyi sırasında, piezoelektrik basınç ölçüm cihazından basınç verileri alınmıştır. Mükerrer deneylerdeki her patlamanın ardından tüm duvarlarda ve üst döşemede çatlak oluşumları krokisi çizilmiştir. Patlama deneyi sonrasında elde edilen veriler doğrultusunda bir sonraki deneye yön verilmiştir. Her patlama deneyi, basınç, çatlak ve deformasyon verileri kapsamında patlayıcı miktarı ve mesafesi değişkenleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Aynı yapısal özelliklere sahip ölçüm duvarı ve karşısındaki duvarda ölçülen çatlak verileri karşılaştırılarak patlayıcı miktarı ve patlayıcı mesafesinin yapısal davranışa etkisi incelenmiştir. Deneysel verilerin ışığında yapılan, teorik çalışmada beton basınç modeli için Birtel ve Mark modeli, çekme modeli için Hordijk tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Deneylerle elde edilen basınç verileri kullanılarak, ABAQUS programında mükerrer iç patlamaların betonarme oda elemanları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Teorik çalışma sonucu elde edilen yapı elemanları davranışı, deneysel çalışmalar sonucu yapılan ölçümler ve gözlemler ile karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91102

Anahtar Kelimeler : Mükerrer patlama, patlayıcı mesafesi, patlayıcı miktarı, patlama basıncı, betonarme oda

Sayfa Adedi : 82

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Yusuf DEMİREL

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EXAMINE BEHAVIOR OF REINFORCED
CONCRETE CHAMBER UNDER REPEATED INTERNAL EXPLOSION LOADS

(M. Sc. Thesis)

Ömer POLAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

ABSTRACT

In this experimental study, the aim was to investigate the behavior of reinforced concrete rooms when subjected to repeated indoor explosions. A room whose structural elements were all made from reinforced concrete was built for the purposes of the study. Four explosion tests were conducted in which the amount of explosive and its distance from the walls were taken as variables. During each explosion test, pressure data was obtained from a piezoelectric pressure measuring device. A sketch of the crack formations in all walls and the ceiling was then drawn. The next test was then steered by the data obtained from the previous test. Each explosion test was evaluated using pressure, crack, and deformation data against the variables of the amount of explosive and its distance from the walls. The effect of the amount of explosive and its distance from the walls on structural behavior was investigated by comparing each wall's crack data and structural properties with those of the opposite wall. A theoretical study conducted in light of the experimental data then used the Birtel and Mark model for concrete pressure and Hordijk's model for tensile damage. The pressure data obtained from the tests was analyzed with Abaqus software to assess the impact of repeated internal explosions on reinforced concrete room elements. The theorized behavior of the building elements was then compared with the measurements and observations from the experimental studies.

Science Code : 91102

Key Words : repeated explosion, distance of explosive, quantity of explosive,
pressure of explosion, reinforced concrete chamber

Page Number : 82

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Yusuf DEMİREL

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgilerini benimle paylaşan, yol gösteren ve çalışmam sırasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Yusuf DEMİREL'e, deneylerle ilgili yardımlarından dolayı çalıştığım kurum olan TÜBİTAK SAGE'ye, ders dönemimde ve tez dönemimde gerekli nezaketi gösteren birim amirime, tüm yüksek lisans sürecinde manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve kardeşlerime, bu süreçte bana sabır gösteren ve tezimi okuyarak düzeltmelerimde bana yardımcı olan değerli eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. İÇ PATLAMA VE YÜKLERİ.....	23
2.1. İç Patlamanın Temel Parametreleri	25
2.1.1. Şok basınçları	25
2.1.2. Yarıstatik gaz basıncı.....	29
2.2. Yüksek Şekil Değiştirme Oranında Malzeme Davranışları.....	32
2.2.1. Yüksek şekil değiştirme oranında hasar mekanizması.....	32
2.2.2. Yüksek şekil değiştirme oranları altında betonun dinamik özellikleri.....	33
2.2.3. Yüksek şekil değiştirme oranları altında donatının dinamik özellikleri ...	35
2.3. İç Patlama Yüküne Maruz Kalan Yapıların Göçme Modları	35
2.3.1. İç patlama yüküne maruz kalan yapıların hasar mekanizmaları	36
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	39
3.1. Deney Düzenegi	39
3.2. Deney Programı	43

	Sayfa
3.3. İlk Patlama Deneyi	44
3.4. İkinci Patlama Deneyi	45
3.5. Üçüncü Patlama Deneyi.....	47
3.6. Dördüncü(Son) Patlama Deneyi.....	49
3.7. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi.....	51
4. TEORİK ÇALIŞMA	61
4.1. Teorik Çalışmada Kullanılan Bilgisayar Programı	61
4.2. Betonarme Odanın Modellenmesi.....	62
4.3. Dinamik Analiz Verilerinin Değerlendirilmesi	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	82

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Birincil hasarın eşdeğer çapı.....	4
Çizelge 1.2. Patlayıcı boyutları	7
Çizelge 1.3. Her deney için kullanılan yapı, malzeme ve patlayıcı miktarlarının özeti	16
Çizelge 1.4. Yapı tasarım kriterleri, yapı malzemeleri taşıma kapasiteleri ve ağırlık miktarları.....	20
Çizelge 2.1. Tipik patlama hasarları	37
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazının özellikleri	43
Çizelge 3.2. Mükerrer deney programı	44
Çizelge 3.3. Çatlakların patlayıcı mesafelerine göre karşılaştırılması.....	52
Çizelge 3.4. İkinci ve üçüncü patlama deneylerinde ölçüm duvarında ölçülen diyagonal çatlak boyları	53
Çizelge 3.5. Dördüncü patlama deneyi sonrasında ölçüm duvarında ölçülen diyagonal çatlak boyları	53
Çizelge 3.6. Mükerrer patlama deneylerinde kaydedilen maksimum yansıyan şok basınçları	55
Çizelge 3.7. Mükerrer patlama deneylerinde kaydedilen patlama süreleri.....	57
Çizelge 3.8. Mükerrer patlama deneylerinde kaydedilen maksimum yansıyan şok basınçlarının oluşma süreleri.....	57
Çizelge 3.9. UFC 3-340-02 yönetmeliği kapsamında hesaplanan parametreler.....	59
Çizelge 4.1. Plastik hasar parametreleri.....	

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kapalı alan (a) Plan görünüşü, (b) A-A kesiti	3
Şekil 1.2. Deney düzeneği	3
Şekil 1.3. Döşeme kesiti.....	4
Şekil 1.4. Yapı planı.....	6
Şekil 1.5. Basınç ölçüm cihazlarının yerleşimi, yükseklik kesiti	6
Şekil 1.6. Toplam itki.....	7
Şekil 1.7. Betonarme döşemenin geometrik biçimi	8
Şekil 1.8. Kapalı alan (a) İç patlama şeması (b) Yapının sonlu eleman modeli	10
Şekil 1.9. Yapının projeleri (a) Bodrum kat (b) Birinci kat.....	11
Şekil 1.10. Yapının kesiti.....	12
Şekil 1.11. B2 kolonunun hasar mekanizması	13
Şekil 1.12. Patlayıcının konumu	17
Şekil 1.13. DIC sistemi için kurulan HSV (yüksek hızlı video) kamera düzeneği.....	18
Şekil 2.1. Tipik iç patlama basınç-zaman grafiği	23
Şekil 2.2. Kapalı patlama tipleri	24
Şekil 2.3. TNT patlamaları için normal yansıyan basınç dalga parametreleri.....	26
Şekil 2.4. Serbest havada TNT patlamasıyla oluşan küresel patlama dalgası için başlangıç ve yansıyan pozitif faz parametreleri	27
Şekil 2.5. Yüzey üzerinde TNT patlamasıyla oluşan yarıküresel patlama dalgası için başlangıç ve yansıyan pozitif faz parametreleri.....	28
Şekil 2.6. UFC 3-340-02'ye göre idealleştirilmiş iç patlama basınç-zaman grafiği	29
Şekil 2.7. Yapı içerisindeki TNT patlamaları için yarıstatik gaz basıncı	29
Şekil 2.8. Yapı içerisindeki TNT patlamaları için ölçeklendirilmiş süre ve ölçeklendirilmiş maksimum basınç.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 2.9. TNT dönüşüm faktörü	32
Şekil 2.10. Farklı yük tiplerine göre şekil değiştirme oranları	33
Şekil 2.11. Farklı şekil değiştirme oranlarında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	33
Şekil 2.12. Betonun maksimum şekil değiştirme oranı için dinamik artış faktörü	34
Şekil 2.13. Tipik basınç-itki(P-I)diyagramı	36
Şekil 2.14. Yapı içerisindeki patlamanın etkileri.....	37
Şekil 3.1. Patlama deneylerinin yapılması için inşa edilen betonarme odanın planı....	40
Şekil 3.2. Betonarme odanın radye temel donatı planı	41
Şekil 3.3. Betonarme odanın perde duvar donatı planı.....	41
Şekil 3.4. Betonarme odanın tavan döşemesi donatı planları	42
Şekil 3.5. 477 g TNT ve ölçüm duvarına 3 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği	45
Şekil 3.6. Betonarme odadaki çatlak krokisi (İkinci patlama) (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş.....	46
Şekil 3.7. 1000 g TNT ve ölçüm duvarına 2,5 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği	47
Şekil 3.8. Betonarme odadaki çatlak krokisi (Üçüncü patlama) (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş.....	48
Şekil 3.9. 466 g TNT ve ölçüm duvarına 2.5 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği	49
Şekil 3.10. Betonarme odadaki çatlak krokisi (Dördüncü patlama) (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş.....	50
Şekil 3.11. 700 g TNT ve ölçüm duvarına 3 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği	51
Şekil 3.12. Mükerrer dört patlama sonucu oluşan basınçların deney sırasına göre arka arkaya eklenmesi.....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Patlayıcı miktarlarındaki artışla maksimum şok Şok basıncındaki artışın karşılaştırılması.....	55
Şekil 3.14. Deneysel çalışmalar sonucu oluşan maksimum yansıyan şok basınçlarının UFC 3-340-02 yönetmeliği ve Cormie grafikleri ile karşılaştırılması	58
Şekil 4.1. (a) Abaqus modeli önden görünüş (b) Abaqus modeli arkadan görünüş	62
Şekil 4.2. Basınç yüklemesi altında gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	63
Şekil 4.3. Çekme yükü için gerilme- çatlak genişliği ve gerilme- şekil değiştirme ilişkisi.....	64
Şekil 4.4. Betonarme odanın sonlu eleman modeli.....	65
Şekil 4.5. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda ölçüm duvarının merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği	67
Şekil 4.6. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda arka duvarın merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği	67
Şekil 4.7. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda tavan döşemesinin merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği	68
Şekil 4.8. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda kapı boşluğuna sahip betonarme duvarın merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği	68
Şekil 4.9. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda pencere boşluğuna sahip betonarme duvarın merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği	69
Şekil 4.10. Birinci patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş	70
Şekil 4.11. İkinci patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş	71
Şekil 4.12. Üçüncü patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş	72
Şekil 4.13. Dördüncü patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş	73

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Deneyler için inşa edilen yapı.....	5
Resim 1.2. Yapının arka görünüşü	12
Resim 1.3. B2 kolonundaki hasar	13
Resim 1.4. Konteynerler (a) Flanşlı konteyner (b) Tamamen kapalı konteyner	17
Resim 2.1. Sakarya havai fişek fabrikasında meydana gelen patlama.....	38
Resim 3.1. Patlama deneylerinin yapılması için inşaa edilen betonarme odanın genel görünümü	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
m^3	Metreküp
kg	Kilogram
N	Newton
mm^2	Milimetrekare
mm	Milimetre
m	Metre
cm	Santimetre
MPa	Megapascal
P_g	Yaristatik gaz basıncı
I_{total}	Toplam itki
$Msec$	Milisaniye
Psi	Pounds per square inch
σ_b	Tasarım ankraj bağı gerilmesi
F_s	Donatıdaki bağ kuvveti
l	Ankraj uzunluğu
ϕ_c	Donatı çapını
σ_{bu}	En yüksek bağ gerilmesi
σ_{cu}	Betonun basınç dayanımı
β	Donatı katsayısı
F_s^{toplam}	Toplam bağ kuvveti
g	Gram
s	Saniye
Pa	Pascal
kPa	Kilopascal
s^{-1}	1/s
mV	Milivolt

kHz	Kilohertz
Hz	Hertz
μs	Mikrosaniye
mA	Miliamper
cm	Santimetre
t_a	Varış süresi
t_o	Pozitif faz süresi
t_{o^-}	Negatif faz süresi
P_{so}	Maksimum basınç
P_{so^-}	Maksimum negatif basınç
b	Dalga bozulma katsayısı
λ	Patlayıcının akma faktörü
Z	Ölçekli mesafe
W	Patlayıcı ağırlığı
R	Patlayıcının hedefe olan uzaklığı
Q_{EXP}	Patlayıcının detonasyon ısısı
Q_{TNT}	TNT'nin detonasyon ısısı
V_{EXP}	Gazın hacmi/patlayıcının kütlesi
V_{TNT}	Gazın hacmi/TNT nin kütlesi
W_{TNT}	Eşdeğer tnt ağırlığı
W_{exp}	Patlayıcı ağırlığı
H_{TNT}	TNT'nin detonasyon ısısı
H_{exp}	Patlayıcının detonasyon ısısı
P_r	Yansıyan basınç
P_s	Patlama basıncı
U_s	Dalganın hızı
a_o	Ses hızı
q_s	Dinamik basınç
i_s	Karakteristik dalga itkisi
i_r	Yansıyan basınç dalgasının itkisi
T_s	Yansıyan dalganın pozitif faz süresi
T_r	Başlangıç dalgasının pozitif faz süresi
$\overline{p_1}$	Ölçekli başlangıç gaz basıncı

$\bar{\tau}$	Ölçekli darbe zamanı
A_s	İç yüzey alanı
a_e	Yapının açık alanının oranı
V	İç hacim
a_e	Yapının açık alanının oranı
A_v	Açık alan
A_w	Duvar alanı
t_b	Gaz basıncının ölçekli süresi
$\dot{\epsilon}$	Şekil değiştirme oranı
$\dot{\epsilon}_s$	Yarıstatik şekil değiştirme oranı
A	Yapıda yer alan açıklıkların alanı
V_f	Yapının toplam hacminden yapı içerisindeki ekipman vb. diğer elemanların çıkarılmasıyla hesaplanan serbest hacim
P_g	Gaz basıncı
i_g	Gaz basıncının itkisi
t_g	İdealize edilmiş gaz basınçlarının süresi
W_{E_g}	Gaz basıncı için efektif patlayıcı ağırlığı
H_{TNT}^c	TNT'nin yanma ısısı
H_{EXP}^c	Patlayıcının yanma ısısı
$\emptyset$	TNT dönüşüm faktörü
H_{TNT}^d	TNT'nin detonasyon ısısı
H_{EXP}^d	Patlayıcının detonasyon ısısı
W_{EXP}	Patlayıcı miktarı
f_{co}	Betonun basınç dayanımı
f_y	Donatı akma gerilmesi
$P-I$	Basınç-itki diyagramı
l_{eq}	İç uzunluk parametresi
G_{cl}	Sabit ezilme enerjisi
f_{ct}	Betonun çekme dayanımı
G_f	Betonun kırılma enerjisi
E_{ci}	Betonun 28 gün sonra elde edilen elastisite modülü

E_c	Betonun elastisite modülü
f_{cm}	Betonun basınç dayanımı
ε_c	Betonun şekil değiştirme oranı
w_c	Kırılma anındaki çatlak açıklığı
w	Çatlak açıklığı
σ_{t0}	Betonun kırılma anındaki çekme gerilmesi
ε_{t0}	Kırılma anındaki şekil değiştirme oranı
d_t	Çekme hasar parametresi
d_c	Basınç hasar parametresi
ε_t^{pl}	Çekme altında plastik şekil değiştirme oranı
ε_c^{pl}	Basınç altındaki plastik şekil değiştirme oranı

Kısaltmalar

DIF

LPG

Açıklamalar

Dinamik artış faktörü

Sıvılaştırılmış petrol gazı

1. GİRİŞ

1960' lı yıllardan önce patlama yüküne karşı analiz ve tasarım yalnızca kimyasal kaza veya patlamaların olabileceği yerlerde ve askeri alanlara yapılabilecek saldırılara karşı yapıldı [1]. Fakat 2. Dünya Savaşı, 1999 yılında Oklahoma'daki Murrah Köprüsü'nün patlatılması ve terörizmin şehirlere yayılmaya başlamasıyla patlama yükleri sivil yapılar içinde önemli hâle gelmeye başladı. Ülkemizde ise ilk ciddi saldırılar 20 Kasım 2003'te HSBC genel merkez binası ve 22 Mayıs 2007'de Ankara Anafartalar Çarşısına yapılan saldırılardır. Ülkemizin konumu ve komşu ülkelerde yaşanan gelişmeler nedeniyle son yıllarda özellikle İstanbul ve Ankara' da yaşanan patlayıcı saldırı sayısı artmıştır.

Ülkemizde kompleks yapıların artması ve üretim yapan endüstriyel tesislerin çoğalmasıyla patlama olayları daha sık yaşanmaya başlamıştır. Bu yapılar ve tesisler, terörist saldırıların hedefi haline gelirken bir yandan da iş güvenliği eksikliği nedeniyle kaza sonucu oluşabilecek patlama olaylarının artmasına sebep olmuştur. Özellikle patlayıcı depolanan yerlerde ve havai fişek fabrikalarında yaşanan kazalar sonucu oluşan patlamalar, mükerrer birçok patlamaya sebep olduğundan yapıda oluşacak hasarlar tahmin edilememektedir. 3 Temmuz 2020 yılında Sakarya havai fişek fabrikasında meydana gelen patlamayla birlikte oluşan mükerrer patlamaların şiddeti ve oluşturdukları hasarların büyüklüğü bu konunun ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca günümüzde savaş teknolojisinin gelişmesiyle üretilen beton delici mühimmatların, yapı duvarını geçtikten sonra içeride patlaması da bu tip patlamaları arttırmaktadır.

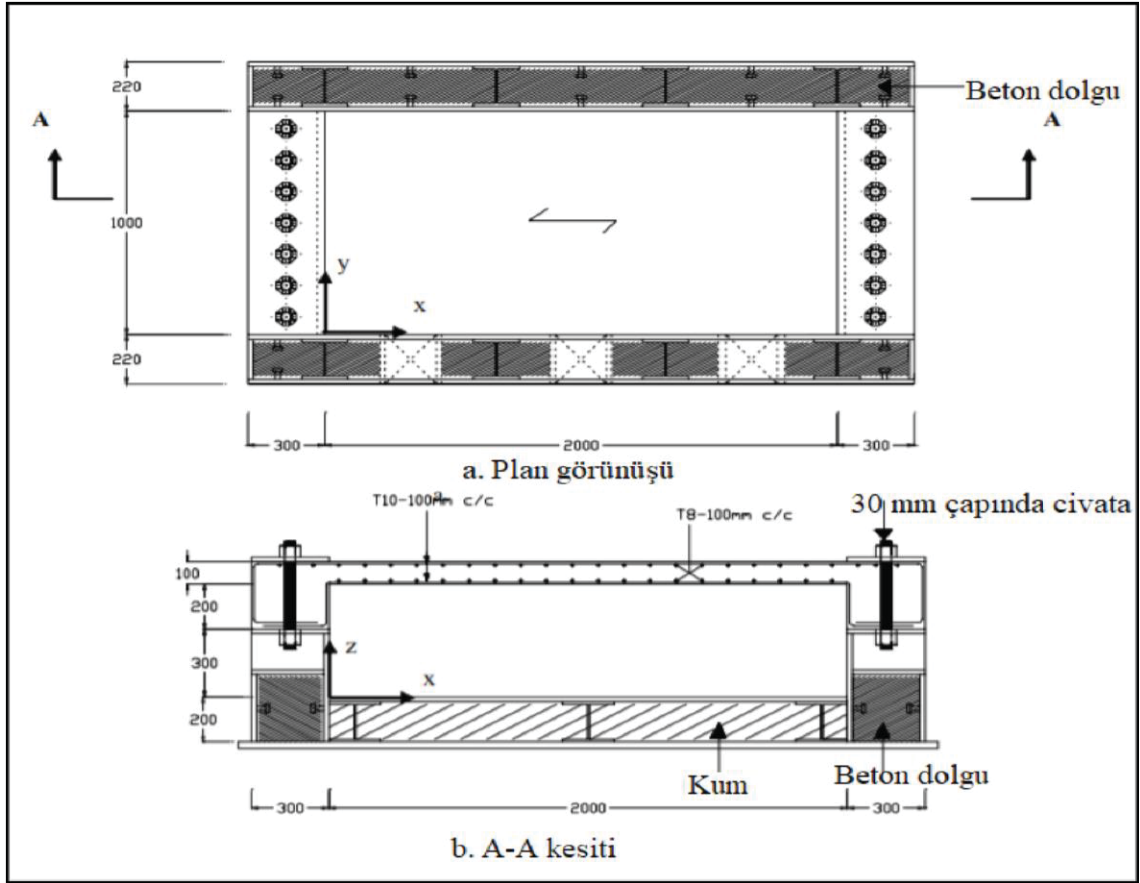
Patlayıcılar kaza veya saldırılardan farklı olarak binaların kontrollü yıkımında da kullanılmaya başlamıştır. Patlayıcı yıkım yüksek binaların yıkımında maliyet ve zaman faktörleri açısından daha verimli olmaktadır. Son yıllarda ülkemizde yapılan yüksek katlı yapı sayısı artmıştır [2]. Ülkemizde yeni gelişmekte olan patlayıcı yıkım tekniği önümüzdeki yıllarda daha çok kullanılmaya başlayacaktır.

Yapıların patlama yükleri altındaki analizini yapabilmek için yapı elemanlarının dinamik tepkilerini, malzeme davranışını ve patlama olayını iyi anlamak ve değerlendirmek gerekir. Patlayıcı deney yapımının riskli olması nedeniyle bu alandaki çalışmalar kısıtlı kalmıştır. Bu nedenle genellikle askeri alanlarda yapılan çalışmalar ve yayınlar bulunmaktadır.

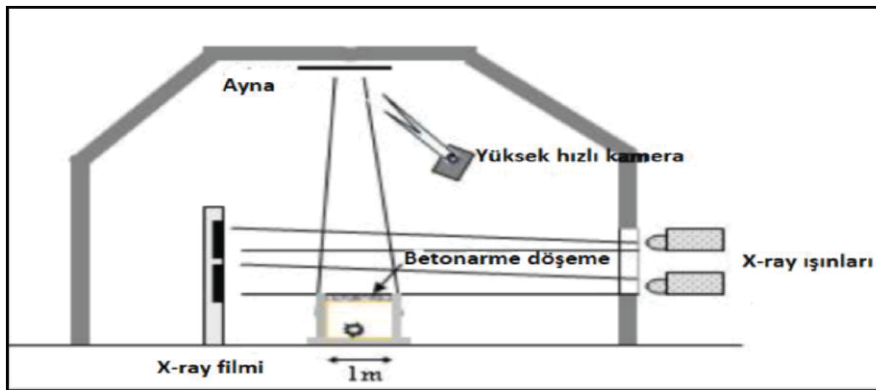
Yapıların patlama yüklerine göre tasarımı amacıyla, bazı ülkeler ve birlikler tarafından standartlar yayınlanmıştır. ABD Savunma Bakanlığı tarafından “UFC 3-340-1(2002) Design and Analysis of Hardened Structure Conventional Weapons Effects” [3] ve “UFC 3-340-2(2008) Structures To Resist The Effects Of Accidental Explosions” [4] ve NATO tarafından “AASTP-1(2010) Manual of Nato Safety Principles for The Storage of Military Ammunition and Explosives” [5], Avrupa Birliği tarafından “The Eurocode EN 1991-1-7(2006) Actions on Structures” [6] ve Hindistan Hükümeti tarafından “IS 4991(2003) Criteria For Blast Resistant Design Of Structures For Explosions Above Ground” [7] adlı standartlar yayınlanmıştır. Ülkemizde de bu konuyla ilgili tasarımlarda “The Eurocode EN 1991-1-7(2006) Actions on Structures” [6] yönetmeliğinin referans olarak alındığı “TS EN 1991-1-7(2006) Yapılar Üzerindeki Etkiler” [8] yönetmeliğinin kullanılması önerilmektedir. Patlayıcı ile yıkım konusunda ise “Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Patlayıcı ile Yıkım Tekniği Uygulama Kitapçığı (2017)” adlı doküman yayınlanmıştır [9].

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde açık ortamda yapılan çalışma sayısının kapalı ortamda yapılan çalışmalardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bu çalışma kapsamında birçok çalışma detaylı olarak incelenmiştir. İncelenen bazı önemli çalışmaların kısa özetleri aşağıda bulunmaktadır.

J. Weerheijm, H. S. Lim [10] çalışmalarında kapalı alanda patlamaların oluşturduğu hasarı araştırmayı amaçlamışlardır. Deney için Şekil 1.1’ de gösterilen detaylarda betonarme döşemeye sahip bir kutu yapılmıştır. Kullanılan betonun 28 günlük ortalama küp dayanımı 46 MPa, ortalama yarmada çekme dayanımı 4 MPa’ dır. Bu çalışma kapsamında dört temel deney ekipmanı kullanılmıştır. Bunlar Şekil 1.2’ de görüldüğü üzere yüksek hızlı kamera, gerilme ölçer, x-ray cihazı ve basınç ölçerdir. İki adet x-ray cihazının pencere merkezlerine yerleştirilmesiyle farklı zaman ve yüksekliklerde iki fotoğraf elde edilmiştir. Yüksek hızlı kamera, deneylerin yapıldığı odanın tavanında yer alan aynadaki yansımaları görüntüleyerek tüm patlama olayını kaydetmiştir. Bu yolla döşemenin tepki sürecinin üç boyutlu fotoğrafı kaydedilmiştir. Gerilme ölçerler döşeme yüzeyinde, x-ray fotoğrafları ve video kayıtlarından elde edilen görülebilir hareketlerden önce oluşan ilk yapısal tepkileri araştırmak amacıyla kullanılmıştır. Üç adet basınç ölçer ise yan duvarlara yerleştirilerek, döşeme üzerinde oluşan patlama yüklerinin elde edilmesi planlanmıştır. Çalışmada 0,5, 1, 2 ve 4 kg’ lık yarım küre şeklindeki TNT’ler kullanılmıştır. TNT’ler kutunun zeminine yerleştirilerek patlatılmıştır.



Şekil 1.1. Kapalı alan (a)Plan görünüşü, (b) A-A kesit

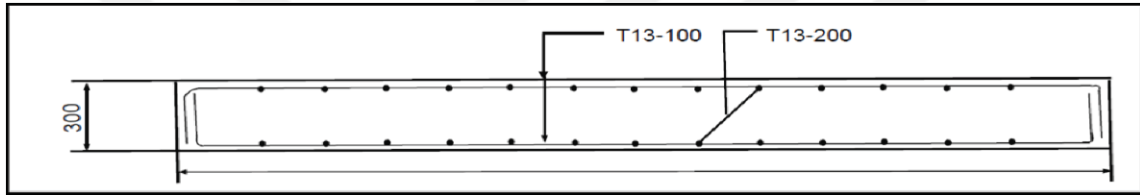


Şekil 1.2. Deney düzeneği

Bu çalışma sonucunda x-ray fotoğrafları ve yüksek hızlı kameradan alınan görüntülerde $0,5 \text{ kg/m}^3$ yükleme yoğunluğunda eğilme göçmesinin, 2 kg/m^3 yükleme yoğunluğunun üstündeki durumlarda ise kesme göçmesinin baskın olduğu belirlenmiştir. $1-2 \text{ kg/m}^3$ yükleme yoğunluğu aralığında, iki göçme modu arasında bir geçiş olduğu ortaya çıkmıştır. Betonarme döşemede geniş çatlaklar görülmesine rağmen, eleman stabilite kaybına

uğramamıştır. Gerilme ölçer kayıtlarında x-ray fotoğrafları ve yüksek hızlı kameradan alınan kayıtlardan önce yapısal tepkinin değerlendirilebildiği görülmüştür.

Fang Wang, Yew Kong Mark Wan, Oi Yi Karen Chong, Chee Hiong Lim, Edwin Tze Meng Lim [11] çalışmalarında farklı ağırlıktaki TNT'lerin betonarme döşemeye yakın patlatılmasıyla betonarme döşeme üzerinde oluşan hasarları deneyler ve teorik çalışmalar ile incelemişlerdir. Tüm deney durumları için 3000 mm x 3000 mm x 300 mm boyutlarında betonarme döşeme kullanılmıştır. Döşemede Şekil 1.3' te görüldüğü gibi alt ve üstte 200 mm' lik 460 MPa akma dayanımına sahip donatı kullanılmıştır. Beton sınıfı 32 MPa' dır.



Şekil 1.3. Döşeme kesiti

1 ve 2 kg TNT eşdeğerli patlayıcı döşeme yüzeyinin üst merkezine yerleştirilmişken 3 kg TNT eşdeğerli patlayıcı döşeme merkezinin 50 mm yukarısına yerleştirilmiştir. Betonarme döşemenin karşılıklı iki kenarının altına ikişer adet ahşap mesnet yerleştirilmiştir. Üç farklı ağırlıktaki TNT eşdeğerli patlayıcıların patlatılmasıyla betonarme döşeme üzerinde oluşan kraterin çapı, betonun parçalanmasıyla oluşan çukurun uzunluğu ve döşeme üzerinde dökülmelerin olduğu bölgenin çapı deneysel ve teorik olarak elde edilmiştir. Çizelge 1.1' de betonarme döşeme üzerinde oluşan hasarların deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 1.1. Birincil hasarın eşdeğer çapı

Deneysel sonuçlar(mm)				Simülasyon sonuçları(mm)		
Patlayıcı ağırlığı	Krater Çapı	Çukur Uzunluğu	Dökülme çapı	Krater Çapı	Çukur Uzunluğu	Dökülme çapı
1 Kg	500	0	750	500	30	650
2 Kg	600	250	700	600	266	700
3 Kg	650	225	850	740	150	650

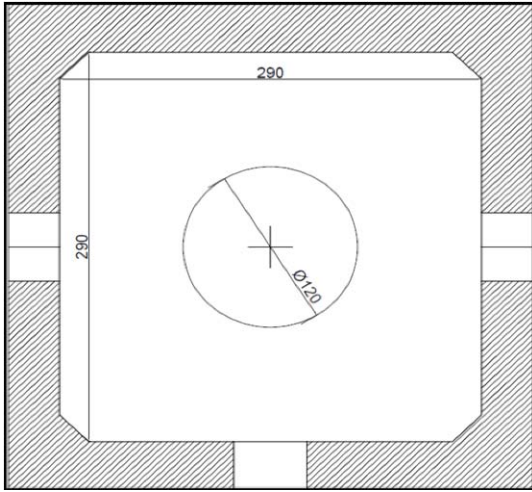
Bu çalışmada farklı sınır koşullarının etkisini değerlendirebilmek için oniki adet teorik çalışma yapılmıştır. Teorik çalışmaların dokuzunda kenarların mesnetlendiği, basit mesnet ve kenarların serbest olduğu koşullar dikkate alınmıştır. Diğer üç teorik çalışmada ise ikisi kenarlarda yer alacak şekilde dört paralel eşit aralıklı ahşap mesnet durumu araştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, 1 ve 2 kg TNT eşdeğerli patlayıcının patlatılmasıyla yapılan deneysel ve teorik çalışmalar incelendiğinde döşemenin merkezinde oluşan hasar boyutu sonuçlarının uyumluluk gösterdiği görülmüştür. 3 kg TNT için deney sonucu ile teorik çalışma sonucunun farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yazarlara göre bu farklılık yüksek ihtimalle 3 kg TNT' nin konumundan kaynaklanmış olabilir. Yazarlar deney tecrübelerine dayanarak TNT yukarı kaldırıldıkça krater çapı azalır, çukur uzunluğu ve dökülme çapı artar.' değerlendirmesini yapmışlardır. Kenarlar serbest veya sınırlı tüm durumlarda aynı TNT ağırlıkları için yapılan teorik çalışmalarda benzer göçme modelleri oluşmuştur. Dört paralel ahşap mesnetleme ile diğer mesnetleme koşullarında yapılan teorik çalışmalarla elde edilen çatlak krokilerinde çok küçük farklar olduğu tespit edilmiştir.

I. Edri, Z. Savir, V.R. Feldgun, Y.S. Karinski, D.Z. Yankelevsky [12] çalışmalarını sınırlı havalandırma açıklığı bulunan bir odada iç patlamanın bazı karakteristiklerini anlamak amacıyla yapmışlardır. Patlama deneylerinin yapıldığı yapı, iç patlama serilerine dayanacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Yapı iki çelik plaka arası yüksek dayanımlı betondan imal edilmiştir. Kübik biçimdeki yapının eni 2,9 m, boyu 2,9 m yüksekliği 2,7 m' dir. Yapının duvarları 35 cm' dir. Tüm duvarların kenarları Şekil 1.4' te gösterildiği gibi 20 cm kesilmiştir.

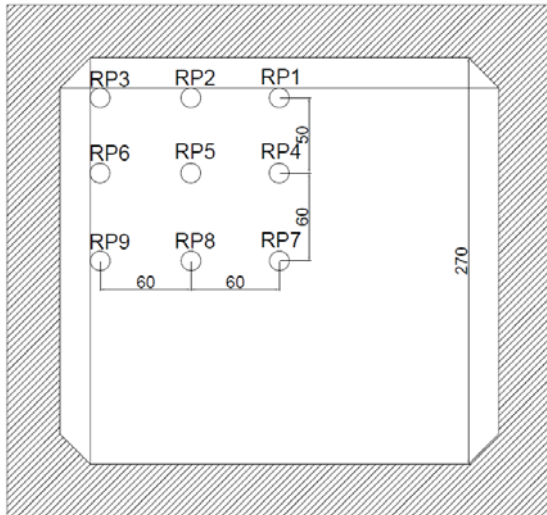


Resim 1.1. Testler için inşa edilen yapı



Şekil 1.4. Yapı planı

Yapıda sıkıca kapatılmış üç adet kapı yer almaktadır. Yapının çatısının merkezinde patlama sonucu oluşan atıkların tahliyesi için 120 cm çapında çember biçiminde açıklık bulunmaktadır. Açıklık tüm deneylerde sabit olarak yer almıştır. Yapının iç duvarlarının birine dokuz adet basınç ölçer yerleştirilmiştir. Duvardaki yansıyan basınç hareketlerini ölçmek için Kulite HEM-375-2500A dinamik basınç ölçüm cihazları kullanılmıştır. Basınç ölçüm cihazları RP1' den RP9' a kadar tasarlanarak Şekil 1.5 'te gösterilen lokasyonlara yerleştirilmiştir.



Şekil 1.5. Basınç ölçüm cihazlarının yerleşimi, yükseklik kesiti

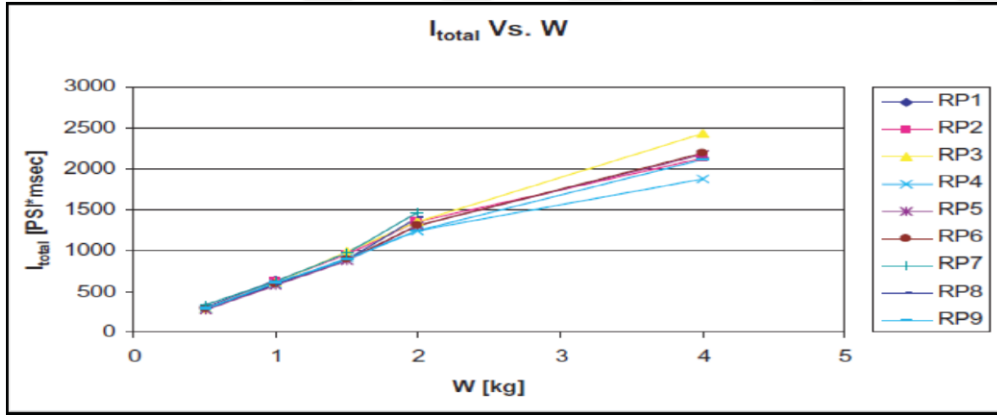
Çalışmada beş adet patlatma deneyi yapılmıştır. Küp şeklindeki TNT' ler yapının merkezine yerleştirilmiştir. Çizelge 1.2' de dikdörtgen prizma şeklindeki patlayıcının

boyutları ve ağırlıkları verilmiştir. Çizelgede yer alan L_1 patlayıcının boyu, L_2 patlayıcının eni ve L_3 patlayıcının yüksekliğidir.

Çizelge 1.2. Patlayıcı boyutları

Test No	Patlayıcı(kg)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_1/L_2	L_2/L_3	L_1/L_3
1	0,5	104	67	52	1,55	1,29	2,00
2	1,0	134	104	52	1,29	2,00	2,58
3	1,5	156	134	52	1,16	2,58	3,00
4	2,0	134	104	104	1,29	1,00	1,29
5	4,0	208	134	104	1,55	1,29	2,00

1 ve 2 nolu deneylerde tüm basınç ölçerlerin çalıştığı gözlenmiştir. 3 ve 4 nolu testlerde RP1, 5 nolu testte ise RP 7 ve RP 8 olarak adlandırılan basınç ölçerlerin bozulduğu anlaşılmıştır. Patlama basıncının duvar üzerinde basınç ölçerlerin yerleştirildiği lokasyonlarda oluşturduğu toplam itki değerlerini içeren Şekil 1.6' daki grafik incelendiğinde, eğrilerin benzer eğimlerde olduğu görülmüştür.



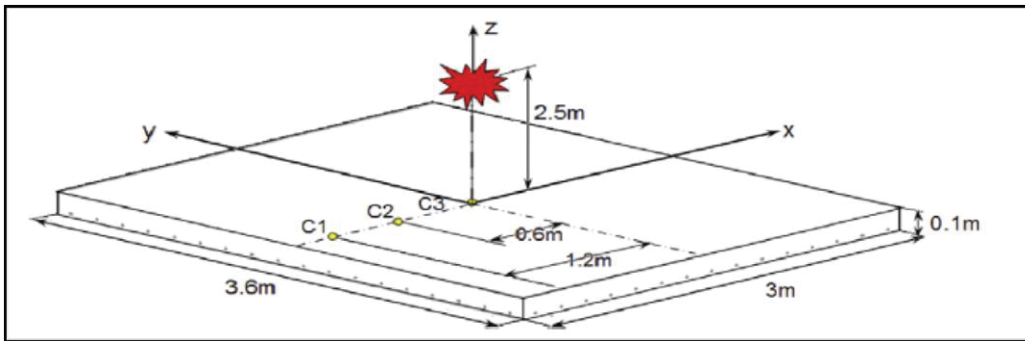
Şekil 1.6. Toplam itki

Deneyler sonucu oluşan patlama dalgalarının, patlayıcı miktarına göre basınç ölçerlere ulaşma süreleri davranışı incelendiğinde, RP9 noktası hariç diğer noktaların benzer davranış gösterdiği görülmüştür. Deneyler sonucu duvarın köşe noktalarından elde edilen basınç ölçümleri ile duvarın merkezinde oluşan basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Patlayıcı ağırlığı arttıkça duvarın köşe noktasında (RP3) oluşan itkinin, duvarın merkezinde (RP7) oluşan itkiye oranının arttığı tespit edilmiştir. Ancak 2 kg' lık patlayıcıda bu oranın azaldığı bu yüzden bu davranışın küçük yük ağırlıklarında

görülebileceği belirtilmiştir. 1 kg' lık patlayıcı için duvar üzerinde 5 milisaniye zaman artışlarıyla dikey (RP7, RP4, RP1), yatay (RP7, RP8, RP9) ve diyagonal (RP7, RP5, RP3) yönlerde elde edilen toplam itki dağılımları incelenmiştir. Bu incelemenin amacının toplam itkinin belirli bir davranışa sahip olup olmadığının araştırılması olduğu belirtilmiştir. Söz konusu inceleme sonucunda toplam itkinin her yönün çeyrek mesafesinde minimum değere sahip olduğu, köşelere doğru gittikçe bu değerin arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada deneyler sonucu oluşan gaz basıncının UFC 3-340-02' ye göre %27 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Patlayıcı boyutlarının basınç üzerindeki etkileri görülmüş ve bu parametrelere bağlı olarak duvar üzerinde oluşan basınç dağılımı ve basınç ile ilgili yeni bilgiler elde edilmiştir. Duvarlardaki dinamik deformasyonların deney sonuçlarını etkilememesi için yapının hasar almaması hedeflenmiştir. Bu tez için planlanan çalışmamızda, patlama basınçlarını etkileyen faktörler dikkate alınarak iç patlama yükleri altındaki yapı elemanları davranışı da deneysel ve teorik olarak araştırılacaktır.

Y.S. Tai , T.L. Chu , H.T. Hu , J.Y. Wu [13] çalışmalarında patlama etkisi altındaki betonarme elemanın dinamik davranışını teorik olarak incelemişlerdir. Bu amaçla Şekil 1.7' de gösterildiği gibi 3,6 m uzunluğunda 3 m eninde 0,15 m kalınlığında bir betonarme döşeme modellenmiştir. Betonarme döşemede x yönünde 18 adet, y yönünde 15 adet donatı bulunmaktadır. Patlayıcıları döşemenin merkezinin 2,5 m yukarısına yerleştirmişlerdir.



Şekil 1.7. Betonarme döşemenin geometrik biçimi

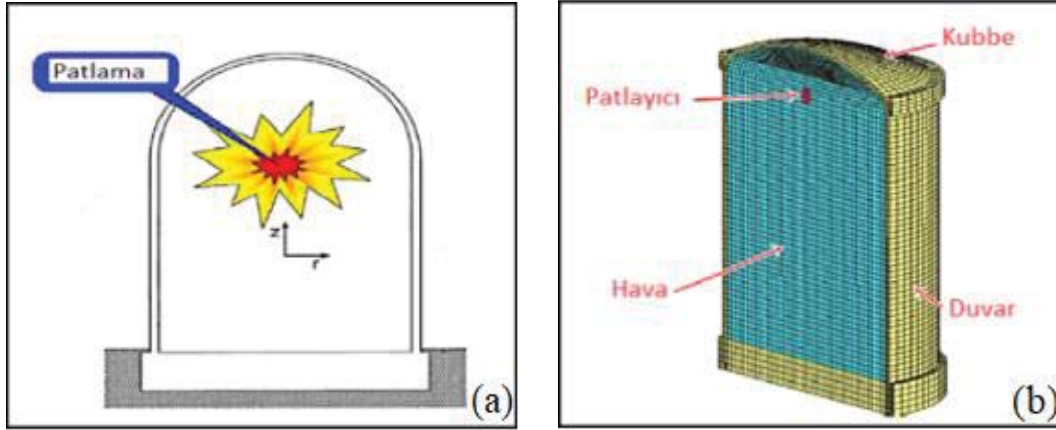
Teorik çalışma sonuçlarını doğrulayabilmek için patlama dalgası parametreleri karşılaştırılmıştır. Betonarme döşeme 10 cm, 20 cm ve 40 cm dilimleme(mesh) boyutlarına göre analiz edilmesiyle elde edilen basınç-zaman grafikleri eğrilerinin benzer olduğu, fakat

basınç değerlerinin dilimleme(mesh) yoğunluklarının değişken olarak alınmasından dolayı farklı olduğu görülmüştür. Analiz sonuçları ile literatürdeki denklemlere göre hesaplanan tepe basınç değerleri karşılaştırıldığında 40 cm dilimleme(mesh) boyutlarına göre yapılan analiz sonuçlarının ampirik denklem sonuçlarından çok farklı olduğu görülmüştür. Patlayıcı miktarının 1 kg, 3 kg, 5 kg ve 10 kg olduğu koşullar incelenmiştir. Patlayıcı miktarı 3 kg' a çıkarıldığında betonarme döşemede mesnet yanında çatlaklar gelişmiştir. Patlayıcı miktarı 5 kg' a çıkarıldığında betonarme döşemenin merkezinde çatlaklar oluşmuş ve mesnet bölgelerinde hasarların ortaya çıktığı görülmüştür. Patlayıcı miktarı 10 kg' a çıkarıldığında döşemenin merkezindeki çatlakların ilerlediği ve hem döşemede hem de mesnetlerde hasarlar olduğu ortaya çıkmıştır. Patlayıcıdan uzaklaştıkça betonarme döşeme üzerinde oluşan deplasmanların azaldığı belirlenmiştir. Donatı oranı %0,2 ve %1,2 arasında alınarak döşeme üzerinde oluşan maksimum deplasmanlar, 10 kg ve 20 kg' lık patlayıcılar altında teorik olarak incelenmiş ve donatı oranının artmasıyla döşemenin merkezinde deplasmanın azaldığı görülmüştür. Donatı oranı düşükse hasarın döşemenin merkezinde, donatı oranı yüksekse hasarın mesnette olduğu görülmüştür.

Bu teorik çalışmanın sonucunda, teorik çalışma sonuçlarının gerçeğe yakın olabilmesi için dilimleme(mesh) boyutlarının doğruluğunun incelenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Patlayıcı miktarı arttıkça döşemenin merkezinde çatlakların geliştiği, mesnetlerde ise hasarların olduğu ortaya çıkmıştır. Patlayıcının betonarme döşemeye olan mesafesi arttıkça döşeme üzerinde oluşan deplasmanların azaldığı belirlenmiştir. Donatı oranının değişken olarak alındığı durumlarda, donatı oranının betonarme döşemenin davranışını değiştirdiği ortaya konulmuştur.

C.F. Zao, J.Y. Chen, Y. Wang, S.J. Lu [14] çalışmalarında iç patlama yükleri altındaki nükleer santrallerin davranışını teorik olarak araştırmışlardır.

Betonarme yapı Şekil 1.8' de görüldüğü gibi dik silindir ve yarımküresel kubbeden oluşmaktadır. Silindirik kısım 40 m iç çapa, 42,2 m dış çapa ve 48 m yüksekliğe sahiptir. Kubbenin iç çapı 20 m, dış çapı 20,9 m ve kalınlığı 0,9 m' dir. Betonarme yapının toplam yüksekliği (temel hariç) 68,9 m' dir. Patlayıcılar kabuk elemanın merkezine ve zeminin 48 m üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 1.8. Kapalı alan (a) İç patlama şeması , (b) Yapının sonlu eleman modeli

Bu çalışmada teorik çalışma sonuçlarını doğrulayabilmek için farklı ölçeklendirme değerlerinde ($m/kg^{1/3}$), kapalı alan patlamasıyla literatürlerde yer alan ampirik denklemler karşılaştırılmıştır. Doğrulama çalışması sonucunda elde edilen zamana bağlı tepe basınç değerlerinin değişiminin ampirik sonuçlarla paralellik gösterdiği, ancak teorik sonuçların ampirik denklem sonuçlarından daha büyük olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, yapı içerisindeki patlama sonucu oluşan basınç dalgalarının yansımalarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Çalışmada dilimleme(mesh) boyutları ve ölçeklendirme değerlerinin değişken olarak alındığı koşullar altında teorik çalışmalar yapılmıştır. Betonarme yapı içerisindeki patlamadan kaynaklı yan alanlardaki hesaplanan yük dağılımı incelendiğinde; yapıdaki güçlü basınç dalgalarının önce kubbeye doğru yükseldiği görülmüştür. Duvarın üst noktasının patlamadan önemli bir ölçüde etkilendiği görülmüştür.

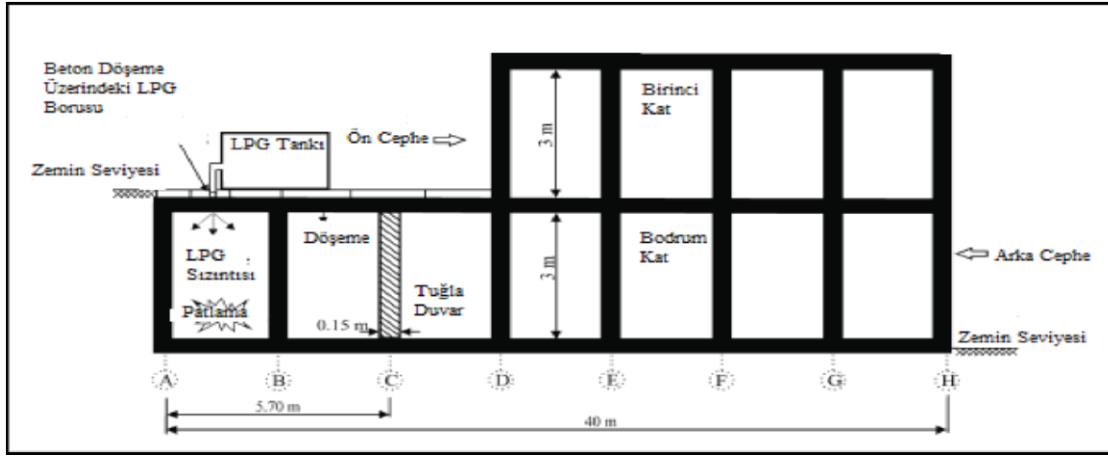
Çalışma sonucunda küçük dilimleme boyutlarında sonuçların gerçeğe yakın olabileceği, ölçeklendirme değeri düştükçe patlama etkisinin arttığı, patlama basıncı dalgalarının yansımalarından dolayı iç patlama sürecinin dış patlama sürecinden farklı olduğu ve kapalı alan içerisinde en zayıf konumun kubbe olabileceği tespit edilmiştir. Gaz patlamasında ilk olarak Fukushima nükleer santralinde olduğu gibi kubbenin göçmüş olabileceği görülmüştür. Bu yüzden yazarlar nükleer güç santrali tasarımında betonarme kubbenin güçlü olması gerektiğini önermişlerdir.

Paki Turgut, M. Arif Gürel, R. Kadir Pekgökgöz [15] çalışmalarında, kapalı alanda LPG sızıntısı sonucu oluşan patlamanın yapı üzerinde oluşturduğu hasarları incelemişlerdir.

Patlama 17 Haziran 2011’ de Şanlıurfa’nın Karaköprü ilçesinde bir akaryakıt istasyonunda LPG sızıntısı sonucu meydana gelmiştir. Patlamaya maruz kalan yapı 2002 yılında gaz istasyonu olarak yapılmıştır ve yapının projeleri Şekil 1.9’ da verilmiştir. Hasarlı yapı betonarme kirişler, döşemeler ve kolonlardan oluşur. Yapı bodrum kat ve giriş kattan oluşmaktadır. Katların yüksekliği 3 m’ dir. Şekil 1.9(a)’ da görüldüğü gibi bodrum katta C ekseninde bir tuğla duvar bulunmaktadır, fakat yapının orijinal projesinde bu duvar bulunmamaktadır. A, 1 ve 6 akslarında betonarme duvarlar bulunmaktadır. Beton basınç dayanımı 20 MPa’ dır. Donatıların akma dayanımı ve maksimum çekme dayanımı 420 MPa ve 500 MPa’ dır. Şekil 1.10’ deki kesitte görüldüğü gibi beton döşeme üzerindeki LPG borusunda oluşan sızıntıyla bodrum katta gaz birikmeye başlamıştır. Projede yer almayan fakat yapıda bulunan tuğla duvar LPG sızıntısının kapalı alanda birikmesine ve bodrum katta patlamaya neden olmuştur.



Şekil 1.9. Yapının projeleri (a) Bodrum kat, (b) Birinci kat



Şekil 1.10. Yapının kesiti

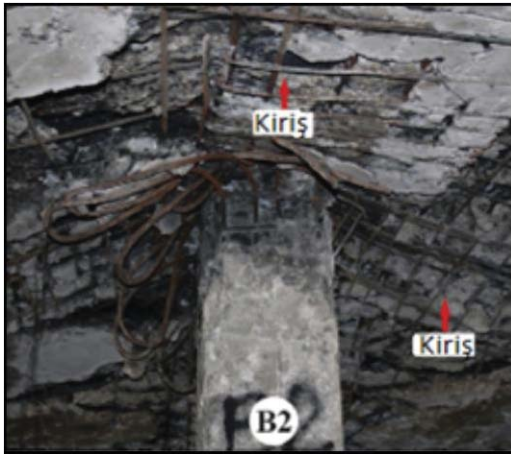
Yapının betonarme elemanlarında oluşan hasar seviyeleri birbirinden farklıdır. A ve D aksları arasında hasar yüksek, D ve F aksları arasında orta, F ve H aksları arasında ise hafiftir. Resim 1.2’ de yapının arka kenarında meydana gelen hasarları göstermektedir.



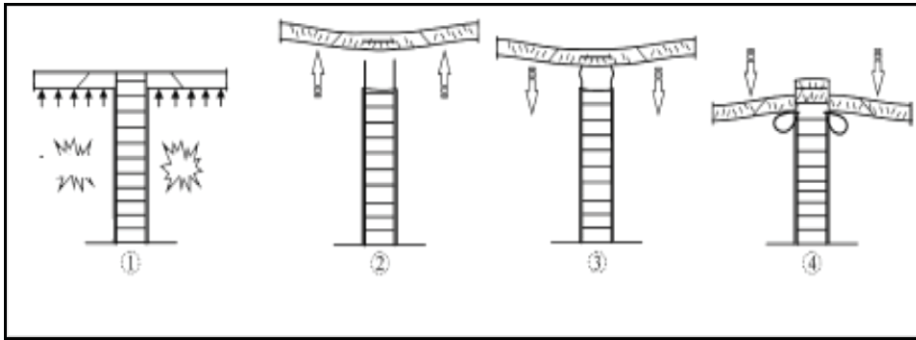
Resim 1.2. Yapının arka görünüşü

Hasar görmüş B2 kolonu ve hasar mekanizması Resim 1.3 ve Şekil 1.11’ de verilmiştir. Şekil 1.11’ de görüldüğü gibi kiriş- döşeme sistemi kolon başından ayrılmıştır. Bunun sonucunda B2 kolonunun boyuna donatıları kiriş- döşeme sisteminin betonundan tamamen ayrılarak açığa çıkmıştır. Kolonun uç kısmındaki açığa çıkan boyuna donatıların uzunluğunun yaklaşık 100 cm olduğu tespit edilmiştir. Bu tavanın 100 cm’ den daha yükseğe kaldırıldığını göstermektedir. B2 kolonunun yüksekliği boyunca dikey çekme

çatlakları görülmüştür. Patlama etkisi hızlıca geçtikten sonra kiriş- döşeme sistemi B2 kolonunun başına düşmüştür. Bunun sonucunda açığa çıkmış boyuna donatıların burkulmuş ve eğrilmiş olduğu görülmüştür. Kiriş- döşeme sistemi kolonun üzerine düşerken, döşeme sisteminde zımbalama göçmesi oluşmuştur. Kolondaki enine donatıların açılmış veya kopmuş olduğu tespit edilmiştir. Kolon kiriş birleşim bölgesindeki betonun tamamen kırılmış olduğu gözlenmiştir.



Resim 1.3. B2 kolonundaki hasar



Şekil 1.11. B2 kolonunun hasar mekanizması

Tasarım ankraj bağı gerilmesinin, ankraj uzunluğu boyunca sabit olduğu kabul edilmiş ve Eş. 1.1' deki formülle hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = \frac{F_s}{\pi \phi_c l} \quad (1.1)$$

F_s bağ kuvveti, l ankraj uzunluğu, ϕ_c donatı çapını ifade etmektedir. Bağ gerilmesinin, en yüksek tasarım bağ gerilmesini aşmaması gerektiği ve Eş. 1.2 ile hesaplanmış olduğu

belirtilmiştir. σ_{cu} betonun basınç dayanımını, β donatı katsayısını ifade eder. Donatı katsayısı deforme olmuş donatıda ve çekme altında 0,5 olarak alınır.

$$\sigma_{bu} = \beta \sqrt{\sigma_{cu}} \quad (1.2)$$

B2 kolonunun ankraj uzunluğu, boyuna donatıların çapı ve sayısı 1 m, 16 ve 18 mm' dir. Kolon boyutları ve kolonun yük alanı 36 cm x 80 cm ve 600 cm x 570 cm' dir. Bu değerlerle toplam bağ kuvveti ve patlama basıncı hesaplanmıştır:

$$F_s^{toplamlam} = 16 \times 0,5 \times 3,14 \times 18 \times 1000 \times \sqrt{20} \cong 2,022 \times 10^6 \text{ N}$$

$$p = \frac{F_s^{toplamlam}}{A_{basinç \text{ alanı}}} = \frac{2,022 \times 10^5}{(600 \times 570) - (80 \times 36)} \cong 0,60 \text{ kgf/cm}^2 \approx 0,59 \text{ bar}$$

B aksında yer alan B3 kolonundaki boyuna donatılar döşemenin yukarı kalkmasından dolayı tamamen kopmuştur ve kolon iki parçaya ayrılmıştır. Kolonun üst bölgesindeki boyuna donatılar ile kiriş- döşeme sistemi arasındaki bağlantının koptuğu görülmüştür. Kolonda döşemenin yukarı kalkıp aşağı düşmesiyle zımbalama göçmesi oluşmuştur. C aksındaki kolonlar ve kiriş- döşeme sistemlerindeki hasar, B aksındaki hasarlarla aynıdır. C2 ve C3 kolon başlarının etrafında kiriş- döşeme sistemlerinde zımbalama etkisiyle belirgin kraterler oluştuğu görülmüştür. Kolon betonunda enine çatlakların bulunduğu tespit edilmiştir. D aksındaki hasarlar incelendiğinde hasarların kiriş ve döşeme sisteminin patlamanın etkisiyle yukarı kalkıp, daha sonra aşağı inmesiyle oluştuğu anlaşılmıştır. D2 kolonundaki boyuna donatıların bindirme donatıları uzunluğu boyunca açığa çıktığı belirlenmiştir. D3 kolonunun üst bölgesinde boyuna donatılarda bağlantı göçmesi gelişmiştir ve sonra kiriş ve döşeme sistemi aşağı inerek kolon başına vurmuştur. Kolonda özellikle enine donatıların kopması, boyuna donatıların burkulması, paspayının parçalanması ve kolonda önemli eksenel kısalmalar oluşmuştur. D2 ve D3 kolonlarındaki beton paspayları ve döşeme sistemi ile bağlantılarında parçalanmalar olduğu gözlenmiştir. E, F, G ve H akslarındaki kolonlarda küçük enine çekme çatlakları bulunduğu gözlenmiştir. Patlama basıncının etkisiyle kiriş- döşeme sistemleri ve kolonlar yukarı kalkmıştır. Sonra patlama basıncının etkisi geçtikten sonra yer çekiminin etkisiyle kiriş ve

döşeme sistemleri düşmüştür. Bu mekanizma sonucunda kiriş- döşeme sistemlerinde aşırı sarkmalar oluştuğu gözlenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, patlama hasarının patlama noktasından uzaklaştıkça azaldığı, kolonlardaki hasarların boyuna donatıların kopması veya bu donatıların burkulmasıyla oluştuğu, boyuna donatıların bazı kiriş-döşeme sistemlerinden ayrılarak açığa çıktığı, kiriş-döşeme sistemleri incelendiğinde döşemelerde büyük sarkmalar olduğu ve bazı kolon başlarında zımbalamaların oluştuğu tespitleri yapılmıştır.

Ajith P Ponnu, Akbu Aby Mathews, Mintu George, Vishnu Krishnan, Jayasree Ramanujan [16] çalışmalarında düşük enerjili piroteknik patlayıcı yüklerinin tuğla duvarlı yapı üzerindeki etkisini ve çeşitli yapısal elemanların yapısal tepkisini teorik olarak incelemişlerdir.

Modellenen yapı 3,6 m eninde, 3 m boyunda ve 3 m yüksekliğindedir. Duvarlar 23 cm kalınlığında tuğla duvardan yapılmıştır. Çatı betonarmedir ve yapıda üç adet kapı boşluğundan başka açıklık bulunmamaktadır. Patlayıcı yükü olarak tüm iç duvarlara 0,6 MPa' lık üniform basınç yükü uygulanmıştır. Üç farklı senaryo üzerinde çalışılmıştır. Birinci senaryoda yapı duvarlarında farklı oranlarda kapı boşlukları yer almaktadır. Birinci senaryoda üç farklı durum incelenmiştir. Birinci durumda 3,6 m uzunluğundaki duvarlarda duvarların %10' u oranında kapı boşlukları bırakılmıştır. İkinci durumda 3,6 m uzunluğundaki iki duvarda ve 3 m uzunluğundaki bir duvarda, duvarların %15'i oranında kapı boşlukları bırakılmıştır. Üçüncü durumda 3 m uzunluğundaki iki duvarda ve 3 m uzunluğundaki bir duvarda, duvarların %15'i oranında kapı boşlukları modellenmiştir. İkinci senaryoda tuğla duvarlara, kapı boşluklarının üst kotunda tüm duvarlar boyunca 15 cm yüksekliğinde lento yerleştirilmiştir. Üçüncü senaryoda yapıya duvarların zemin ile birleştiği bölgeye 15 cm yüksekliğinde süpürgelik kirişi yerleştirilmiştir. Teorik çalışma sonuçları incelendiğinde; farklı açıklıkların olduğu birinci senaryoda minimum deformasyonun, en düşük kapı boşluğu oranına sahip birinci durumda ortaya çıktığı görülmüştür. Lento ve süpürgelik kirişinin olduğu senaryolarda, tuğla duvar üzerindeki deformasyonların azaldığı tespit edilmiştir. Tüm durumlarda maksimum deformasyonun çatıda ve 3,6 m uzunluğundaki duvarlarda oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu teorik çalışmanın sonucunda sabit basınç altındaki yapıda kapı boşluklarının artmasıyla duvarlarda oluşan deformasyonların arttığı, betonarme çatıda oluşan deformasyonların izin

verilebilir sınırlarda olduğu ancak duvarlardaki deformasyonların yeterli sünekliğe sahip olmayan tuğla duvarlar için çok büyük olduğu belirlenmiştir. Bu veriler sonucunda yapı duvarları için tuğla duvar yerine yeterli sünekliğe sahip ferrocement ve lifli polimerlerin alternatif malzemeler olarak kullanılması önerilmiştir.

V. Pickerd, H. Bornstein, P. McCarthy, M. Buckland [17] çalışmalarında, deneysel olarak iç patlama yüküne maruz kalan metal konteynerin göçme mekanizması ve yapısal tepkisini araştırmışlardır.

Deney serisi 1 m³ çelik konteyner içerisinde silindirik plastik patlayıcıların patlatılmasıyla ilgilidir. Konteyner dizaynında flanşlı ve tamamen kapalı olmak üzere iki sınır koşulu değişken olarak esas alınmıştır. Patlama deneyleri sırasıyla Çizelge 1.3’ te verilmiştir. Tüm deneylerde silindirik patlayıcıların uzunluğunun yarıçapına oranı 1’ dir.

Çizelge 1.3. Her deney için kullanılan yapı, malzeme ve patlayıcı miktarlarının özeti

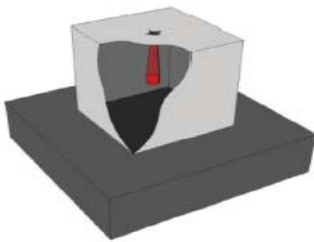
Deney	Yapı	Malzeme	Patlayıcı Miktarı
1. ES. 245	Kapalı	G250 hafif çelik	245 g
2. FS. 345	Flanşlı	G250 hafif çelik	345 g
3. FS. 345	Flanşlı	G250 hafif çelik	345 g
4. FS. 431	Flanşlı	G250 hafif çelik	431 g
5. ES. 431	Kapalı	G250 hafif çelik	431 g

Deneyde kullanılan konteyner 1 m eninde 1 m boyunda ve 1 m yüksekliğindedir. Bu konteynerin levha kalınlığı 5 mm’ dir. Flanşlı konteyner düzeneği F olarak simgelenmiştir. Resim 1.4(a)’ da gösterildiği gibi 10 mm kalınlığında flanş, beton bloğa gömülü bir çelik plakaya bulon ile bağlanmıştır. 5 mm kalınlığındaki konteyner, 10 mm kalınlığındaki flanşa kaynaklanmıştır. Tamamen kapalı konteyner deneyleri, E olarak isimlendirilmiş ve Resim 1.4(b)’ de gösterildiği gibi cıvata yerine ahşap bloklarla desteklenmiştir. Yalnızca patlayıcı miktarının 345 g olduğu durumda deney kurulumu tekrarlanmıştır. Tüm konteynerlerin montajında çift taraflı kaynak kullanılmıştır.

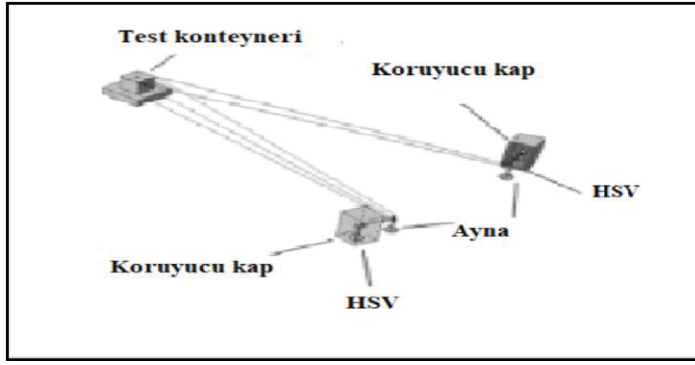


Resim 1.4. Konteynerler (a) Flanşlı konteyner (b) Tamamen kapalı konteyner

Patlayıcı, deney aşamasında konteynerlerin üst panelinde yer alan 10 cm çapındaki boşluktan konteynera Şekil 1.12’ de gösterildiği gibi asılı olarak yerleştirilmiştir. Patlama basınçlarını ölçmek için beton bloğa gömülü çelik plaka üzerine dokuz adet eşit aralıklı basınç ölçüm cihazı monte edilmiştir. Dokuz ölçüm cihazının dördü kenar basınçlarını kaydetmek için kullanılmıştır ve her kenarın merkezinden 10 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Diğer dört ölçüm cihazı köşedeki basınçları kaydetmek için kullanılmış ve her köşeden 14,1 cm diyagonal uzaklığa ve her kenardan 10 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Deneysel çalışma sırasında görüntülerin veri olarak toplanabilmesi için ayna ve yüksek hızlı kameralar kullanılmıştır. Yüksek hızlı kameraların arasına ayna yerleştirilerek, aynadan yansıyan görüntülerin kayıt edilmesi amaçlanmıştır. İki adet yüksek hızlı video kamerası panele 25°’ lik açıyla ve 12 m uzaklığa yerleştirilmiştir. Yüksek hızlı kamera kayıtlarından deney sırasında panel üzerinde oluşan deformasyon ve şekil değiştirme profilleri elde edilebilmiştir. Bu sistem DIC olarak adlandırılmıştır. DIC düzeneği Şekil 1.13’ te gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Patlayıcının konumu



Şekil 1.13. DIC için HSV (yüksek hızlı video) kamera düzeneği

1.ES 245, 2.FS 345 ve 3.FS 345 ile tanımlanan deneylerin gerçekleştirilmesiyle DIC sisteminden alınan veriler incelendiğinde; konteynerlerin ilk genleşmesi esnasında kaynak birleşimlerinin yırtılmasıyla göçtüğü görülmüştür. Bu davranış, konteynerin maksimum deformasyona ulaşarak kaynak boyunca yırtılmasıyla oluşmuştur. 4. FS. 431 ve 5. ES. 431 deneylerinde maksimum deformasyon değerlerinin benzer olduğu görülmüştür. Her iki deneyde de konteynerler maksimum deformasyona ulaşmadan önce göçme gerçekleşmiştir. Bu olayın konteyner yüzeylerinin maksimum deformasyona ulaşmadan önce kaynaklı birleşimlerin yırtılmış olması nedeniyle gerçekleştiği görülmüştür. Tekrarlı deneyler olan 245 g ağırlığındaki deneyler incelendiğinde; deneyler arasında %8,3 deformasyon farklılığı olduğu tespit edilmiştir. Bu hata oranının Russel hata ölçüsüne göre kabul edilebilir sınırlarda olduğu belirlenmiştir. Bu değerlendirmeye deney düzeneği kurulumunun doğru olduğu yorumu yapılmıştır. 245 g tamamen kapalı konteyner deneyi ile 345 g flanşlı çelik konteyner deneyi için DIC ile kaydedilen von mises yüzey şekil değiştirme ölçümleri incelendiğinde; tüm deneylerde maksimum şekil değiştirmenin kaynaklı birleşimlerde konteynerlerin köşelerinde olduğu görülmüştür. Tüm deneylerde en yüksek şekil değiştirmelerin konteyner kenarlarındaki kaynak bölgelerinde olduğu görülmüştür. İkinci en yüksek şekil değiştirme bölgesinin konteynerin yüzeyi olduğu belirlenmiştir. 345 g' lık patlayıcının patlatıldığı flanşlı çelik konteynerin kenarında şekil değiştirmenin yüzeyinde oluşan şekil değiştirmeden 8 kat daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. DIC sistemi ile elde edilen maksimum deformasyonlar ile teorik çalışmalar sonucu elde edilen maksimum deformasyonlar arasındaki farklılıkların %10 un altında olduğu görülmüştür. 345 g' lık patlayıcının patlatıldığı flanşlı çelik konteynerin DIC verileri ve teorik çalışma ile elde edilen deformasyon-zaman eğrileri incelendiğinde; sonuçların uyum gösterdiği görülmüştür. Ancak teorik çalışma sonucu elde edilen maksimum deformasyonun, DIC ile elde edilen maksimum deformasyon değerinden düşük

olduğu görülmüştür. Bu farklılığın deneysel çalışmalarda kaynakların yırtılırken, teorik çalışmalarda kaynakların yırtılmamış olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

İç patlama deneyleri sonucu basınç ölçer kayıtlarından elde edilen basınç verileri değerlendirilmiştir. 431 g ve 345 g patlayıcı miktarlarında kenar ve köşede oluşan basınç ve itki eğrilerinin deneysel ve nümerik olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma ile teorik çalışma sonucu flanşın merkezinde elde edilen tepe basınçları arasında %164, itkiler arasında %35 farklılık olduğu ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışma ile teorik çalışma sonucu flanşın kenarına yerleştirilen basınç ölçer lokasyonlarında elde edilen tepe basınçları arasında %79, itkiler arasında %30 farklılık olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışma ile teorik çalışma sonucu flanşın köşe noktalarından elde edilen tepe basınçları arasında %210, itkiler arasında %200 farklılık olduğu görülmüştür.

Bu deneysel ve teorik olarak yapılan çalışmanın sonucunda; konteynerin merkezinde DIC sistemi ile ölçülen deformasyon ve şekil değiştirmeler teorik çalışma ile makul bir derecede doğrulanmıştır. Ancak teorik çalışmalar göçmenin olduğu kaynaklı bölgelerde yetersiz kalmıştır. DIC sistemi ile kaynaklı bölgeler incelendiğinde, bu bölgelerde yüksek şekil değiştirmelerin oluşmasıyla göçmelerin gerçekleştiği görülmüştür. Deneysel çalışma ile teorik çalışma sonucu elde edilen basınç ve itki değerleri karşılaştırıldığında, sonuçların tutarlı bir şekilde elde edilmesinin zor olduğu anlaşılmıştır.

H. Özmen, K. Soyluk ve Ö. Anıl [18] çalışmalarında, patlayıcı kullanılarak içe yıkılması planlanan binaların yapısal davranışının analizi ve beton dayanımının düşürülmesinin yıkım sürecine etkisini açıklamışlardır.

Tip yapı olarak 12 katlı 5 m aks açıklığı olan 6x6 aks özellikli kare bir bina seçilmiştir. Çizelge 1.4' te verilen ve tip yapı tasarımı için kullanılacak yapı özellikleri, yük ve malzeme değerleri TS500 (2000) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları ile TS 498 (1997) Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri standartlarından alınarak ön tasarım hesaplamalarında kullanılmıştır. Yapı sisteminin yıkım planlamasında, Jahromi ve diğerleri (2012) tarafından önerilen yapının taşıyıcı sistemindeki ana taşıyıcı elemanlar için eleman yok etme metodu kullanılmıştır. Jahromi ve diğerleri patlatma etkisiyle yapıdaki belirlenen elemanların taşıma kapasitesini kaybetmesi sağlanacağından, analizde bu elemanların dikkate alınmayarak hesaplamaların

yapılmasını önermişlerdir. Ayrıca yapının 1. ve 2. kat duvarları yapıyı zayıflatma amacı ile kaldırılmıştır.

Çizelge 1.4. Yapı tasarım kriterleri, yapı malzemeleri tasarım taşıma kapasiteleri ve ağırlık miktarları

Kat Adedi	Kat Yüksekliği	Zemin Sınıfı	Deprem Bölgesi		Yapı Önem Katsayısı		
12(Zemin+11)	3 m	Z1	2.Derece		1		
Malzeme Taşıma Kapasiteleri(MPa)			Malzeme Ağırlıkları(kN/m³)				
Beton C30 (fck)	Donatı S420 (fyk)	Donatı S220 (fyk)	Betonarme	Tuğla	Sıva(4 cm)	Döşeme Kaplaması	Hareketli Yük
30	420	220	24	15	20	1	2

Tasarım ile imalat sırasında beton dayanımının projeye göre düşük olması durumunu incelemek için projede öngörülen C30 betonu yerine C20 ve C10 beton dayanımlarındaki iki ayrı model incelenmiştir. Oluşturulan modeller üzerinde karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla analiz sonuçları; kolon yerdeğiştirmeleri, kolon normal kuvvet değişimi, enkaz etkileme alanı ve dairesel enkaz etkileme alanı ile enkaz yüksekliği dikkate alınarak değerlendirilmiştir. C30 beton dayanımının C20 ve C10 beton dayanımına düşürülmesiyle, her üç durum için yapının kendi içine yıkım planlaması karşılaştırmalı olarak 5 sn süresince 1 sn zaman aralığı ile analiz edilmiş olduğu görülmüştür. Yapılan analiz sonucu beklenildiği gibi beton dayanımındaki azalmaya bağlı olarak bina sistemleri daha hızlı yıkılmıştır. C30 beton dayanımı için yıkım 5 sn sonunda tamamlanırken, C10 betonu için yıkım 4 sn sonunda tamamlanmıştır. C10 beton dayanımı için kolonun eksenel yük taşıma kapasitesine göre C20 ve C30 beton dayanımına göre kısa sürede kaybolduğu ortaya çıkmıştır. Beton dayanımı düştükçe x ve y yönlerindeki yerdeğiştirmelerin arttığı görülmüştür. Z yönünde ise C10 beton dayanımında yıkımın daha kısa sürede tamamlandığı belirlenmiştir. Yıkılan tüm parçaların dikkate alındığı toplam enkaz etki alanının, beton dayanımı düştükçe genel olarak arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte ana dağılımın esas alındığı dairesel enkaz etki alanının ise beton dayanımı düştükçe azaldığı belirlenmiştir. Enkaz yüksekliğinin ise beton dayanımı düştükçe arttığı gözlenmiştir.

Bu teorik çalışmanın sonucunda; beton basınç dayanımının düşürülmesiyle yer değiştirmelerin artarak yapının yıkılma davranışının değiştiği, yıkılma süresinin azaldığı,

toplam enkaz etki alanının arttığı, dairesel enkaz etki alanının azaldığı ve enkaz yüksekliğinin arttığı sonuçları elde edilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde patlayıcı boyutu, patlayıcı miktarı, patlayıcı mesafesi, patlayıcı şekli değişkenleri kullanılarak tek patlamalarla deneysel ve teorik çalışmalar yapıldığı belirlenmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda döşeme ve kutu vb. elemanlar kullanılarak, gerçek yapı boyutundan uzak elemanların incelendiği görülmüştür. Bu çalışmalar ışığında, yapılardaki mükerrer patlamaların etkisinin bilinmediği ve gerçek yapı ölçülerinde oda veya yapılarda patlama davranışının belirlenmesinin ihtiyaç hissedilen bir konu olduğu ortaya çıkmıştır.

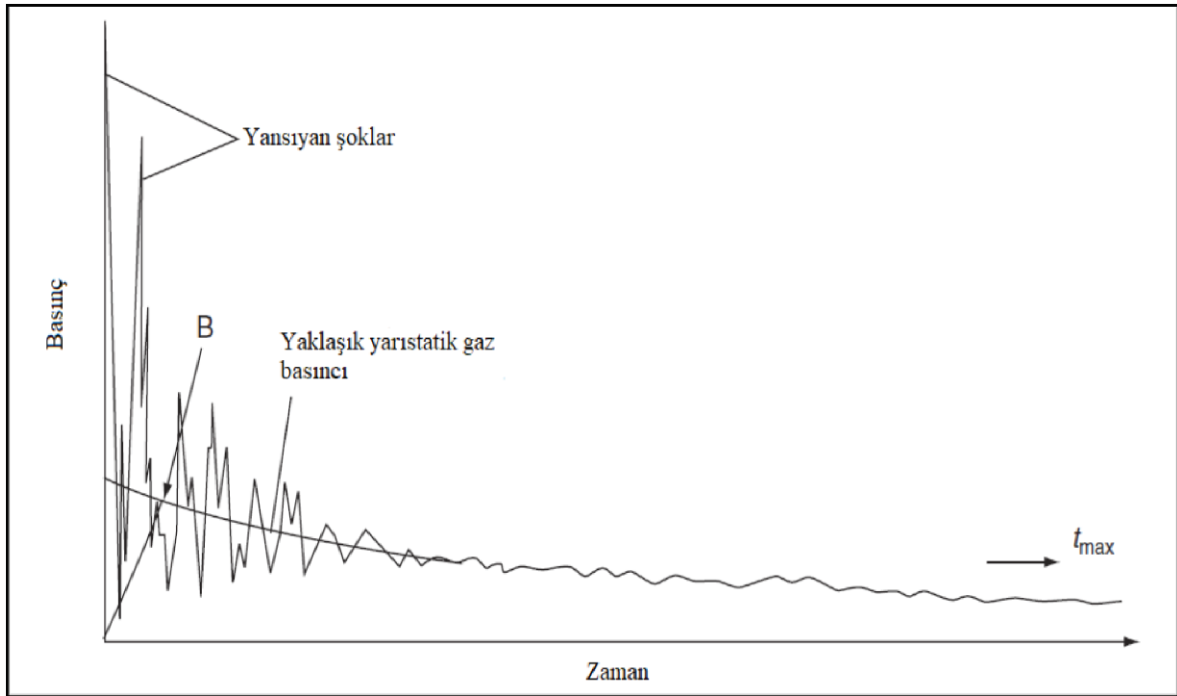
Programlanan çalışmamız neticesinde sığınak, kritik yapılar ve endüstriyel tesisler saldırılara ve kazalar sonucu oluşabilecek mükerrer iç patlamalara karşı daha dayanıklı hale getirilebilir. Yapılması planlanan mükerrer patlamaların riskli olması ve ekipman azlığı nedeniyle çok sayıda çalışma yapılamamıştır. Fakat yapılan çalışmalar ileride yapılacak çalışmalara temel oluşturabilecek niteliktedir. Bu alanda ABD, Kanada ve Çin’deki üniversitelerde laboratuvar olanaklarının yeterli olması sebebiyle çok sayıda çalışma yapılmıştır.



2. İÇ PATLAMA VE YÜKLERİ

Patlama hızlı ve ani enerji salınımı sonrası oluşan genişleme olarak tanımlanır. Yapı içerisinde patlama olduğunda ilk şok dalgası, yapı içerisindeki duvarlarda yansiyarak çok büyük hale gelir. Yapının kapalı olmasından dolayı, yüksek sıcaklık etkisi ve gaz ürünlerinin birikimi yapı içerisinde ek basınç oluşturur ve yükleme süresini artırır.

Yapı içerisindeki patlamalar sonucu oluşan yükler iki farklı faz içerir. İlk faz başlangıç ve yansıyan şok dalgalarından gelen dinamik basınçtır. Şekil 2.1' de P_r olarak gösterilen bu kısa süreli yansıyan dalga, başlangıç basıncını içerir ve çeşitli yansıyan darbeler ikinci kez yapı duvarları üzerinde yansıyabilir. Daha sonraki darbeler genellikle ilk darbelere göre zayıftır. İkinci yük fazı gaz ürünlerinin birikimi ve patlama süreçlerinin sıcaklığıyla ilgili olan şekilde P_{qs} olarak gösterilen yarıstatik gaz basıncı darbesidir. Yapı duvarlarında bulunan açıklıklar iç patlamadan oluşan dalgaların zemin yüzeyine yayılmasına izin verir, böylelikle iç basıncın büyüklüğü ve süresi azalır. Yapılardaki havalandırma açıklığı iç basınçların etkilerini azaltacaktır [19].



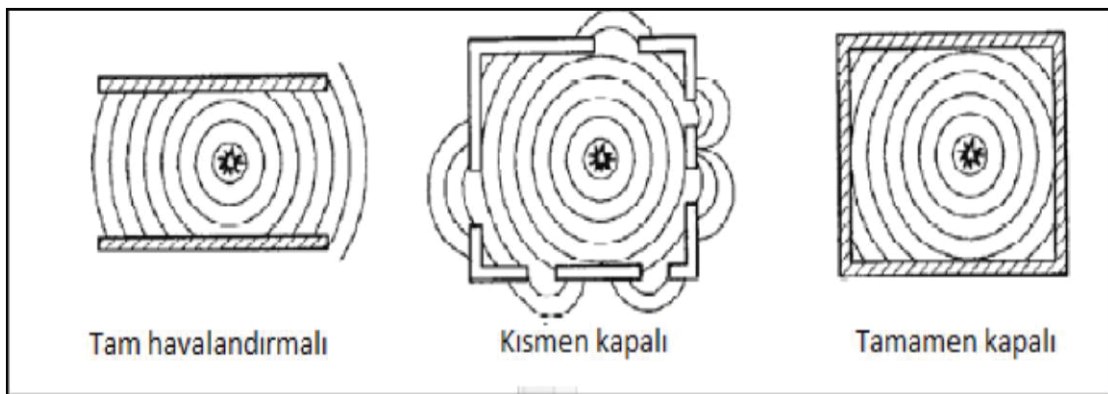
Şekil 2.1. Tipik iç patlama basınç-zaman grafiği

Kapalı alandaki patlamalar yapıların kapalılıklarına göre Şekil 2.2’de gösterildiği gibi tam havalandırmalı patlama, kısmen kapalı patlama ve tamamen kapalı patlama olmak üzere üç kısma ayrılır:

Tam havalandırmalı patlama bir ya da daha fazla yüzeyinin atmosfere açık olduğu bariyer ya da kübik tip yapıların içinde olur. Başlangıç dalgası yapının parçalanmayan kısımlarından yansıyarak büyür ve patlama dalgası şok dalgası formunda yapıdan uzaklaşarak atmosfere doğru çıkar [3].

Kısmen kapalı patlamalar, açıklıklar veya kırılabilir yüzeylerin sınırlandırıldığı bariyer ya da kübik tip yapılarla ilişkilidir. Başlangıç dalgası yapının kırılabilir veya kırılmayan kısımlarından yansıyarak büyür ve patlama ürünleri belirli bir süre sonra atmosfere yayılır. Patlamanın kapalılığı sonucu oluşan yüksek sıcaklık birikimi ve gaz ürünleri yarıstatik basıncı oluşturur. Bu basınç şok basıncına kıyasla daha uzun sürelidir [3].

Tamamen kapalı patlamalar bariyer ya da kübik tipli yapılarda patlayıcının toplam kapalılığıyla ilişkilidir. Bu tip patlamalarda oluşan iç patlama yükleri, dışarı çıkmayan şok yükleri ve kapalılık derecesinin fonksiyonu olan çok uzun süreli yarıstatik basınçtan oluşur. Kaçak basıncın büyüklüğü genellikle çok küçüktür ve sadece patlamanın olduğu yapının hemen dışındaki tesisleri etkiler [3].



Şekil 2.2. Kapalı patlama tipleri [20]

2.1. İç Patlamanın Temel Parametreleri

2.1.1. Şok basınçları

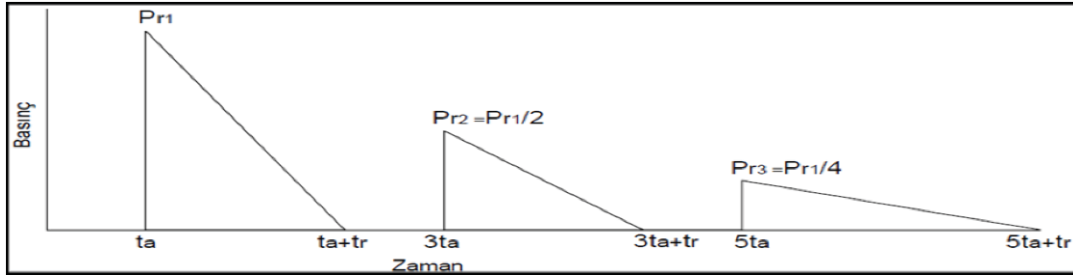
İç şok basıncının hesabını basitleştirmek için iki farklı yaklaşım geliştirilmiştir. İki yaklaşım da Z ölçeklendirme yasasını esas alır. Ölçeklendirme yasası hesabında eşdeğer TNT yükü ve patlayıcı mesafesi parametreleri kullanılır. Ölçeklendirme yasası Eş. 2.1 kullanılarak hesaplanabilir. Eş. 2.1' de yer alan R patlayıcı mesafesini, W ise patlayıcı miktarını ifade etmektedir. Bu hesaplamalarda patlayıcı türü TNT olarak dikkate alınmalıdır. Bu nedenle farklı türdeki patlayıcıların eşdeğer TNT miktarı hesaplanmalıdır. Farklı türdeki patlayıcıların eşdeğer TNT yükünün hesaplanması için birçok ampirik denklem üretilmiştir ancak bu yöntemlerden en çok kullanılanı detonasyon ısısı yöntemidir ve Eş. 2.1'de verilmiştir. Denklemden yer alan W_{TNT} eşdeğer TNT ağırlığını, W_{exp} patlayıcı ağırlığını, H_{TNT} TNT'nin detonasyon ısısını, H_{exp} patlayıcının detonasyon ısısını ifade eder.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2.1)$$

$$W_{TNT} = \frac{H_{exp}}{H_{TNT}} \times W_{exp} \quad (2.2)$$

İlk yaklaşımda, Baker'ın önerisi kullanılmıştır. Şekil 2.3'teki Baker yaklaşımında, her patlama sonucu üç adet yansıyan şok basıncı oluşur ve her yansımada basınç büyüklüğü yarıya düşürülen bir modelleme önerilmiştir. t_a yansıyan şok basıncının yapı elemanına ulaşma süresini, t_r ise idealize edilmiş şok basıncının süresini ifade etmektedir [21]. t_r , Eş. 2.3 ile hesaplanabilir. Ancak, bu yaklaşımda yarıstatik gaz basınçları dikkate alınmayarak modelleme daha basitleştirilmiştir.

$$t_r = 2t_a \quad (2.3)$$



Şekil 2.3. TNT patlamaları için normal yansıyan basınç dalgası parametreleri [19]

Baker yaklaşımında patlama ve yansıyan patlama itkileri (P_r) üçgen şeklindedir ve Eş. 2.4 ve Eş. 2.5'te verilen formüllerle hesaplanabilir [21].

$$P_r(t) = P_r \left(1 - \frac{t}{t_r}\right), \quad 0 \leq t \leq t_r \quad (2.4)$$

$$P_r(t) = 0, \quad t \geq t_r \quad (2.5)$$

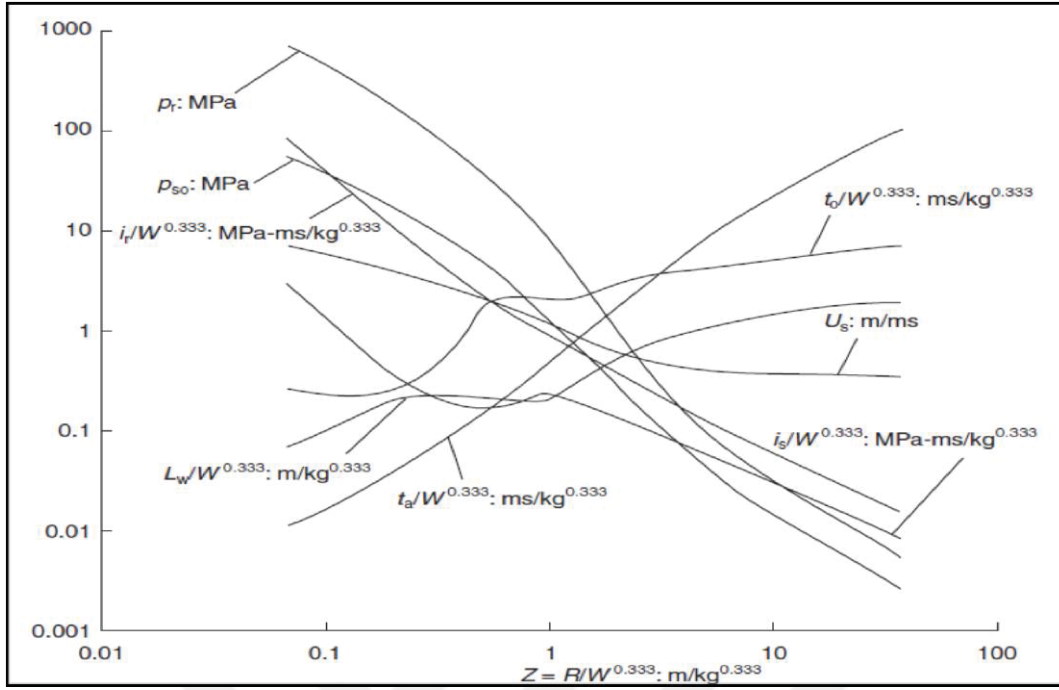
Bu itkilerin süreleri (t_r) gerçek patlama dalgası süreleriyle aynı değildir, fakat itkilerin büyüklüğünü korumak için düzenlenirler. Her patlama dalgasının yapının iç yüzeyine ulaşmasıyla yansıması arasındaki sürenin t_r olarak sabit olduğu kabul edilir ve bu süre Eş. 2.6'ya göre hesaplanabilir.

$$t_r = 2i_r/P_r \quad (2.6)$$

Yansıyan basınçların miktarı için Baker tarafından her tekrar yansımadan sonra maksimum basıncın yarıya düştüğü yaklaşımı önerilmiştir. Her itkinin süresinin sabit kaldığı düşünülürse itkiler yarıya düşmüş olacaktır. Üç yansımadan sonra her yansıyan dalganın basıncının sıfır olduğu kabul edilir [21].

Baker tarafından daha kesin tahminler için başlangıç itkilerinin 1,75 katı olan ardışık yansıyan şok dalgalarının oluşturduğu kombine yüklerin kullanılmasını içeren bir modelleme önerilir. Böylece t_r süresi 1,75 ile çarpılarak hesaplanır [21].

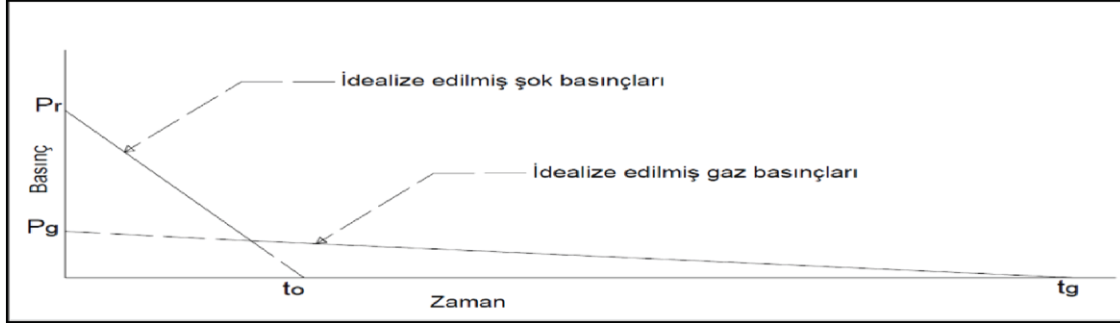
Baker yaklaşımında kullanılan yansıyan şok basıncı P_r ve şok basıncının yapı elemanına ulaşma süresi t_a için Cormie ve diğerleri [22] tarafından iki ayrı grafikleme önerilmiştir.



Şekil 2.5. Yüzey üzerinde TNT patlamasıyla oluşan yarıküresel patlama dalgası için başlangıç ve yansıyan pozitif faz parametreleri [22]

İkinci yaklaşım, UFC 3-340-2 “Kaza Sonucu Oluşan Patlama Etkilerine Karşı Yapıların Dayanımı” adlı yönetmelikte yer alan idealleştirme yöntemidir. Söz konusu yönetmelikte yapının biçimi ve boyutları, patlayıcı miktarı ve patlayıcının konumu temel alınır. Bu yönetmelik basit bariyerler, kübik biçimler ve koruma yapılarının yanı sıra her biri ile ilgili çeşitli parametrelerin tanımlanmasını sağlar. İdealleştirme yönteminde, yönetmelikte tanımlanan yapı türlerinin, yansıyan duvar sayısına göre N katsayısı belirlenir. N katsayısı yapının yansıtıcı yüzeyini ifade eder. Patlayıcının yapı içerisindeki duvarlara uzaklıklarının yapının duvar uzunluklarına oranlanmasıyla grafiklerde kullanılacak h/H ve l/L parametreleri belirlenir. Patlayıcının referans duvara uzaklığı R_A ve referans duvarın uzunluğu L oranlanarak L/R_A parametresi bulunur. Yapının duvar uzunlukları oranlanarak L/H parametresi bulunur. N , h/H , l/L , L/R_A , L/H ve Z değerleriyle ilgili grafikten yansıyan şok basıncı P_r ve yansıyan şok basıncının itkisi i_r belirlenir. Yönetmelikte tanımlanan grafiğin ara değerlerinde enterpolasyon yapılması önerilmektedir. Fakat grafiklerde tanımlanan sınırların dışında enterpolasyon yapılmasındansa sınır değerlerin kullanılması önerilmektedir. Yapı duvarlarının uzunlukları oranı L/H parametresi 5’ ten büyükse hesaplamaların 5’ e göre yapılması önerilmektedir. l/l ve h/H parameteleri 0.1 den küçükse 0.1’ e, 0.75’ ten büyükse 0.75’ e göre hesap yapılması önerilmektedir. İdealize edilmiş şok

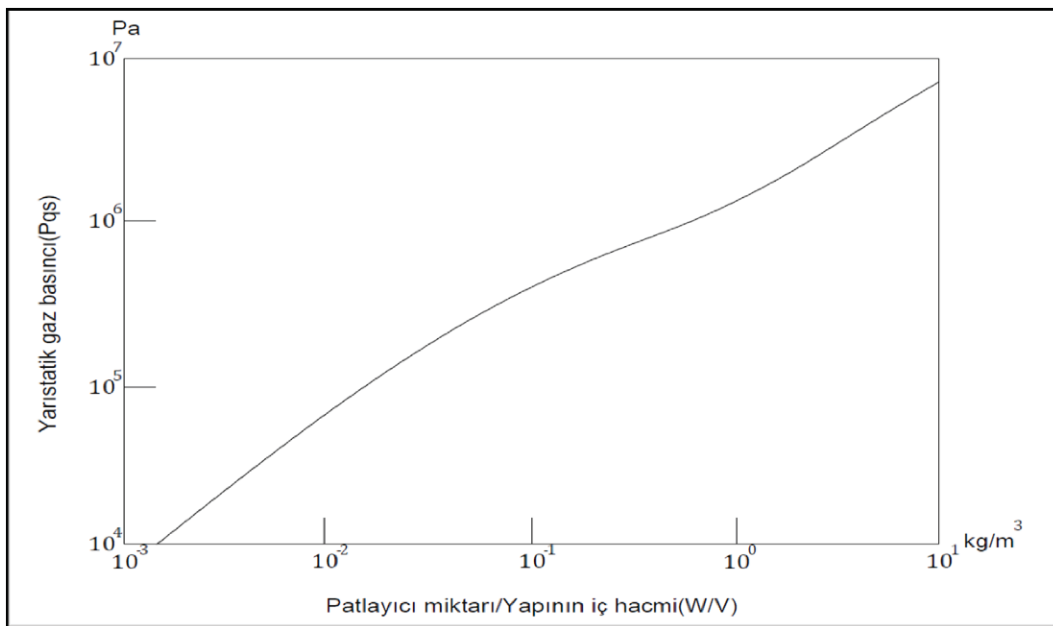
basınçlarının süresi Eş. 2.6 kullanılarak hesaplanabilir [3]. Basınçların idealleştirilmiş gösterimi Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6. UFC 3-340-02'ye göre idealleştirilmiş iç patlama basınç-zaman grafiği [3]

2.1.2 Yarıstatik gaz basıncı

Baker tarafından yarıstatik gaz basıncı formu için Şekil 2.7 önerilmiştir. İdealize edilmiş yük fonksiyonunun yarıstatik kısmının iki önemli parametreleri yarıstatik basınç P_{qs} ve basıncın başlangıç basıncına döndüğü süre olan t_b ' dir. t_b , Eş. 2.9 kullanılarak hesaplanabilir. Baker tarafından ölçekli miktarlar için Şekil 2.8' deki grafiğin kullanılması önerilmektedir. Eş. 2.7 kullanılarak $\bar{p}_1$ ölçekli başlangıç gaz basıncı ve Eş. 2.8 kullanılarak ölçekli darbe zamanı ($\bar{\tau}$) hesaplanabilir [19].



Şekil 2.7. Yapı içerisindeki TNT patlamaları için yarıstatik gaz basıncı

$$\overline{P_1} = \frac{P_{qs} + P_0}{P_0} \quad (2.7)$$

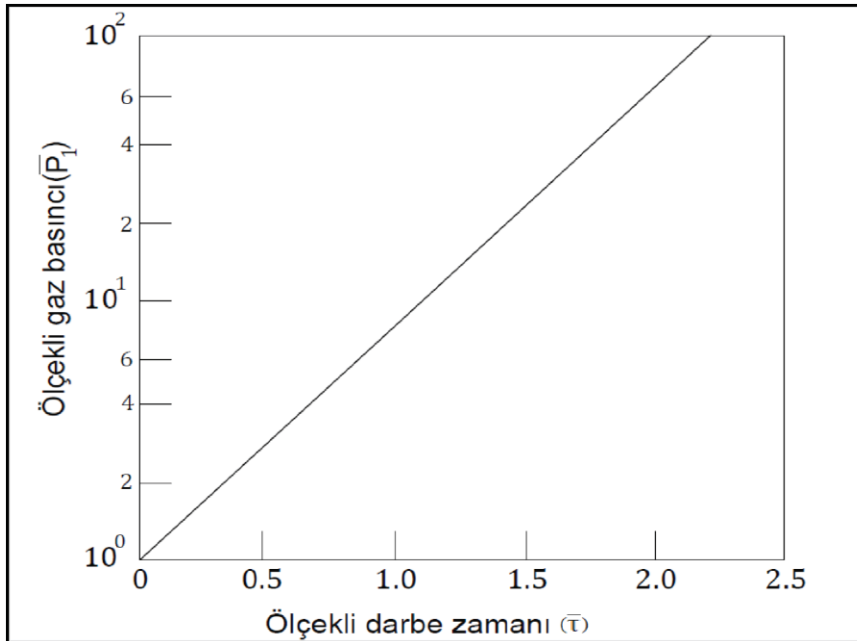
$$\overline{\tau} = \left(\frac{a_e A_s}{V^{\frac{2}{3}}} \right) \left(\frac{a_0}{V^{\frac{1}{3}}} \right) t_b \quad (2.8)$$

a_0 deniz seviyesi üzerindeki hızı, P_0 ortam basıncını, A_s iç yüzey alanını, a_e yapının açık alanının oranını ve V iç hacmi tarif eder. Yapının açık alanının oranı Eş. 2.9' de verilmiştir. Eş. 2.9' da verilen parametreler A_v açık alanı, A_w duvar alanını ifade etmektedir.

$$a_e = \frac{A_v}{A_w} \quad (2.9)$$

Eş. 2.10' da gaz basıncının ölçekli süresi ölçekli maksimum basıncın bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$t_b = \overline{\tau} \left(\frac{V}{a_e A_s a_0} \right) \quad (2.10)$$



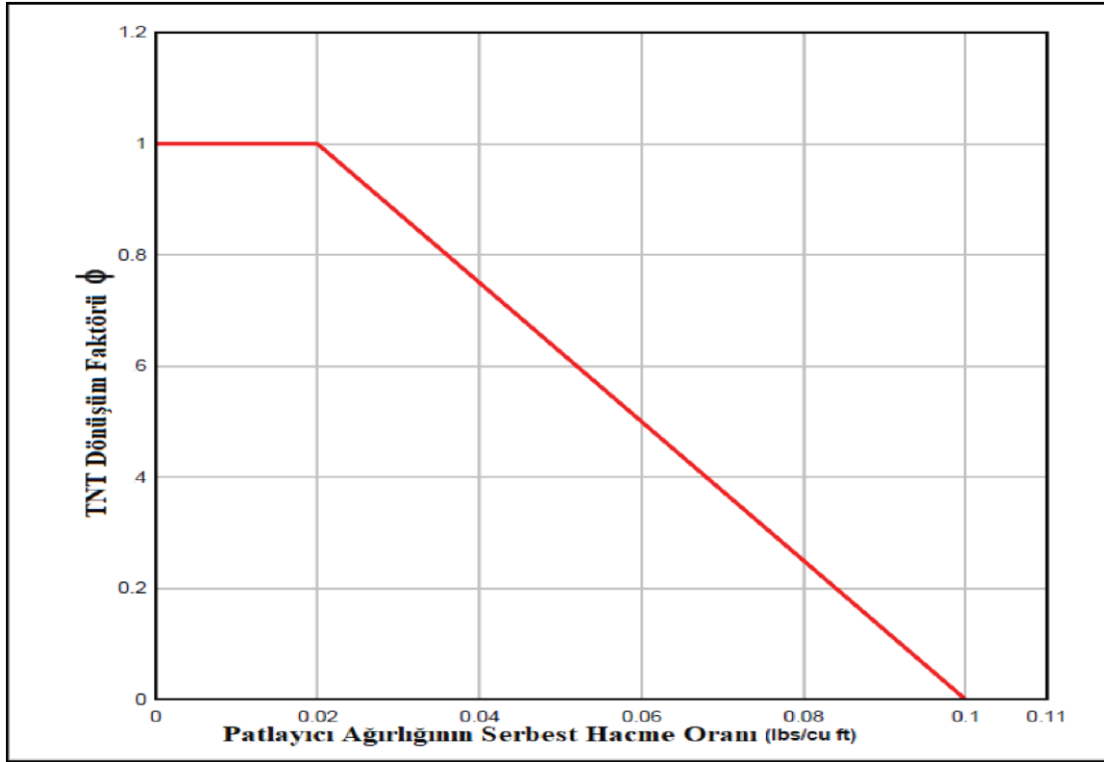
Şekil 2.8. Yapı içerisindeki TNT patlamaları için ölçeklendirilmiş süre ve ölçeklendirilmiş maksimum basınç

Kısmi havalandırmalı ve tam havalandırmalı terimleri $A_V/V^{(2/3)}$ oranı ile tanımlanan ölçekli açık alan oranına göre belirlenir. Eğer bu parametre 0.60' tan büyükse gaz havalandırma süresi başlangıç şok yükü süresinden küçüktür ve yapı tam havalandırmalı olarak düşünülür, gaz basıncı parametreleri önemsenmez. Fakat eğer 0.60' a eşit veya küçükse kısmi havalandırmalıdır ve gaz basıncı parametreleri düşünülmelidir [19].

Diğer bir yaklaşım ise UFC 3-340-02 yönetmeliğinin kullanılarak abaklarla yarıstatik gaz basıncının hesaplanmasıdır. Bu yönetmelikte gaz basınçlarının hesaplanabilmesi için $0 \leq A/V_f^{2/3} \leq 0.022$ şartı verilmiştir. A yapıda yer alan açıklıkların alanını, V_f ise yapının toplam hacminden yapı içerisindeki ekipman vb. diğer elemanların çıkarılmasıyla hesaplanan serbest hacmi ifade etmektedir. Patlayıcı ağırlığının serbest hacme oranı için W/V_f , yapıda yer alan açıklıkların ölçekli serbest hacme oranı için $A/V_f^{2/3}$, kırılabilir parçaların ağırlığının ölçekli ağırlığa oranı için $W_F/W^{1/3}$, yansıyan şok basıncına ait itkinin ölçekli patlayıcı ağırlığına oranı için ise $i_r/W^{1/3}$ parametreleri belirlenerek grafikten gaz basıncı P_g ve gaz basıncının itkisi i_g elde edilir. İdealize edilmiş gaz basınçlarının süresi t_g , Eş. 2.11 formülüyle hesaplanır [3]. Gaz basıncı patlayıcı ağırlığı ve yapının hacminin bir fonksiyonudur. Söz konusu yönetmelikte gaz basıncı için Eş. 2.12' de TNT eşdeğeri formülü tanımlanmıştır. W_{E_g} gaz basıncı için efektif patlayıcı ağırlığını, H^c_{TNT} TNT'nin yanma ısısını, H^c_{EXP} patlayıcının yanma ısısını, ϕ TNT dönüşüm faktörünü, H^d_{TNT} TNT'nin detonasyon ısısını, H^d_{EXP} patlayıcının detonasyon ısısını, W_{EXP} patlayıcı miktarını ifade etmektedir. TNT dönüşüm faktörü Şekil 2.9 ile elde edilebilir.

$$t_g = 2 \frac{i_g}{P_g} \quad (2.11)$$

$$W_{E_g} = \frac{\phi[H^c_{EXP} - H^d_{EXP}] + H^d_{EXP}}{\phi[H^c_{TNT} - H^d_{TNT}] + H^d_{TNT}} W_{EXP} \quad (2.12)$$



Şekil 2.9. TNT dönüşüm faktörü

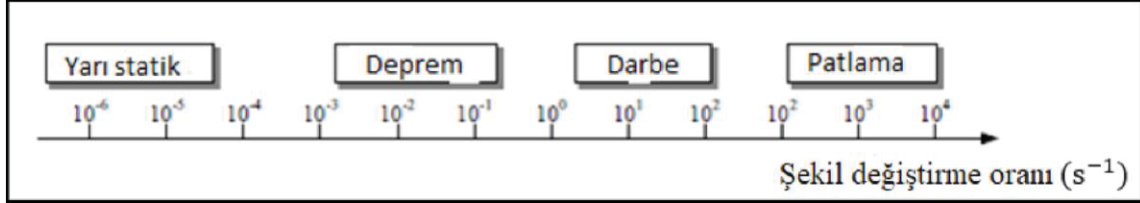
2.2. Yüksek Şekil Değiştirme Oranında Malzeme Davranışları

Patlama yükleri 10^2 - 10^4 /s arasında yüksek şekil değiştirme oranları üretir. Bu yüksek şekil değiştirme oranları hedef yapının dinamik özelliklerine dönüşür ve çeşitli yapı elemanlarında hasarlara neden olur. Betonarme yapılarda patlama yükleri yüksek gerilme oranlarından dolayı beton ve çeliğin üzerinde önemli gerilme artışlara neden olur [23].

2.2.1. Yüksek şekil değiştirme oranında hasar mekanizması

Şok yükleri 10^2 - 10^4 /s yüksek şekil değiştirme oranları oluşturur. Bu şiddetli yüklemeler hedef olan yapının dinamik özelliklerini değiştirir. Farklı yapısal elemanlar üzerinde beklenen hasar mekanizmaları birbirlerinden farklıdır. Beton ve çeliğin mukavemeti şok yüklerine maruz kalan betonarmenin şekil değiştirmesinden dolayı artar. Hem çelik hem de betondaki mukavemet artışını hesaplamak için dinamik artış faktörü (DIF) kullanılır. Şekil 2.10' da farklı yükleme şartları altında tahmin edilen şekil değiştirme oranları gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi normal statik şekil değiştirme oranı 10^{-6} -

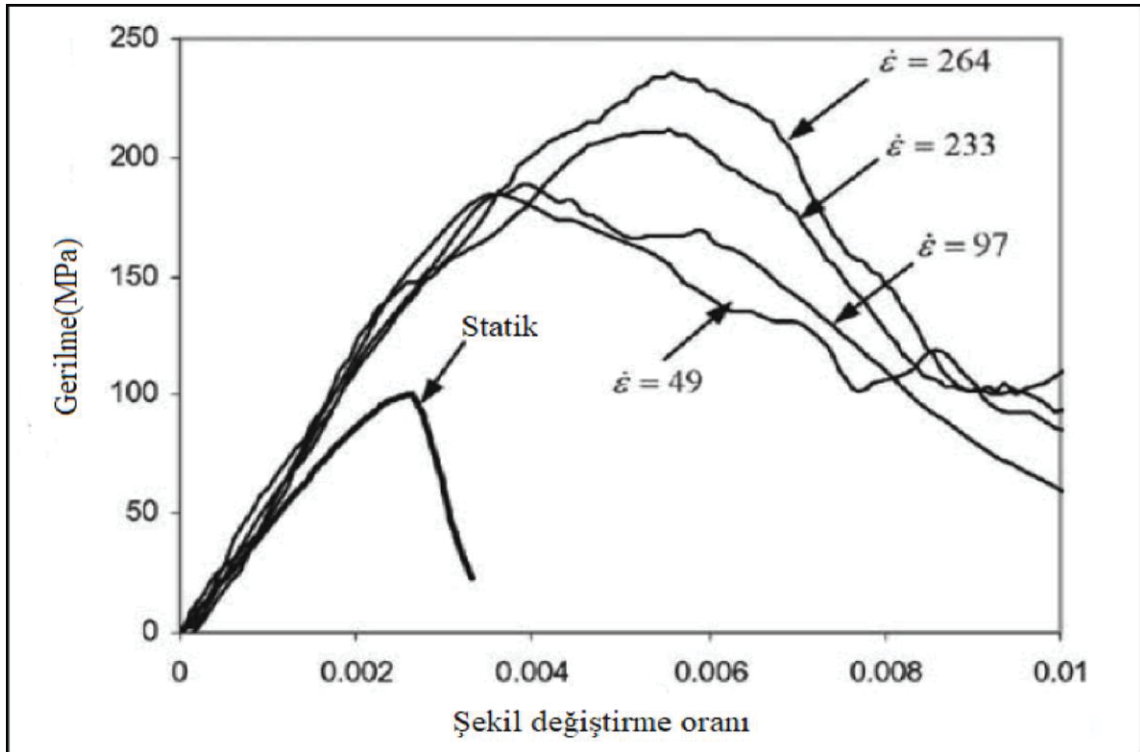
10^{-5} /s iken patlama basınçları genelde 10^2 - 10^4 /s şekil değiştirme oranları ile ilgili yükler üretir [23].



Şekil 2.10. Farklı yük tiplerine göre şekil değiştirme oranları (24)

2.2.2. Yüksek şekil değiştirme oranları altında betonun dinamik özellikleri

Betonun dinamik yüklemeler altındaki mekanik özellikleri statik yüklemeler altındaki mekanik özelliklerinden farklıdır. Dinamik koşullar altındaki gerilmeler statik koşullar altındaki gerilmelerden oldukça yüksektir. 10^2 - 10^3 /s lik şekil değiştirme oranları altında gerilme büyütme faktörleri basınç altında 4' e çekme altında 6' ya kadar çıkmaktadır [25]. Şekil 2.11' de farklı şekil değiştirme oranlarında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Farklı şekil değiştirme oranlarında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi [26]

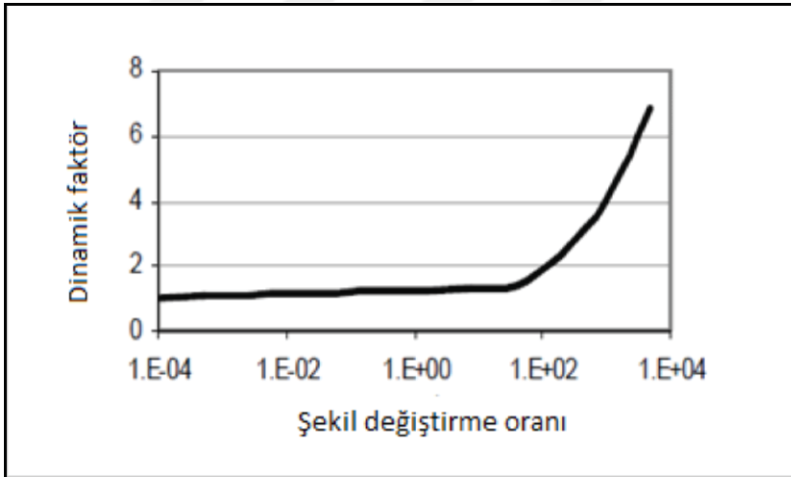
Betonun şekil değiştirme oranını geliştirmek için dinamik artış faktörü ve maksimum basınç gerilmesi hesaplanmıştır. Beton için dinamik artış faktörü Eş. 2.12 ve Eş. 2.13 kullanılarak hesaplanabilir. Eş. 2.12, Eş. 2.13 'te yer alan $\dot{\epsilon}$ şekil değiştirme oranı, $\dot{\epsilon}_s$ yarıstatik şekil değiştirme oranını ifade eder. Şekil 2.12' de betonun şekil değiştirme oranı için dinamik artış faktörü grafiği verilmiştir. Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 kullanılarak, Eş. 2.12 ve Eş. 2.13' te yer alan α ve γ katsayıları hesaplanabilir.

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026\alpha} \quad \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (2.12)$$

$$DIF = \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dot{\epsilon} > 30s^{-1} \quad (2.13)$$

$$\log \gamma = 6.156\alpha - 2 \quad (2.14)$$

$$\alpha = 1 / \left(5 + \frac{9f'_c}{f_{co}} \right) \quad (2.15)$$



Şekil 2.12. Betonun maksimum şekil değiştirme oranı için dinamik artış faktörü (25)

2.2.3. Yüksek şekil değiştirme oranları altında donatının dinamik özellikleri

Metalik malzemelerin izotropik özelliklerinden dolayı dinamik yüklere karşı elastik ve inelastik tepkileri kolaylıkla gözlenebilir. Malvar yüksek şekil değiştirme oranları altında çeliğin gerilmesini araştırmıştır. Bu çalışmalarda farklı çelik sınıfları için dinamik artış

faktörünü tanımlamıştır [27]. Eş. 2.16, Eş. 2.17 ve Eş. 2.18 kullanılarak donatı için dinamik artış faktörü hesaplanabilir.

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}} \right)^{\alpha} \quad (2.16)$$

$$\alpha_{fy} = \alpha = 0.074 - 0.04 \left(\frac{f_y}{414} \right) \quad \text{akma gerilmesinin hesaplandığı bölgede} \quad (2.17)$$

$$\alpha_{fu} = \alpha = 0.019 - 0.009 \left(\frac{f_y}{414} \right) \quad \text{en yüksek gerilmenin hesaplandığı bölgede} \quad (2.18)$$

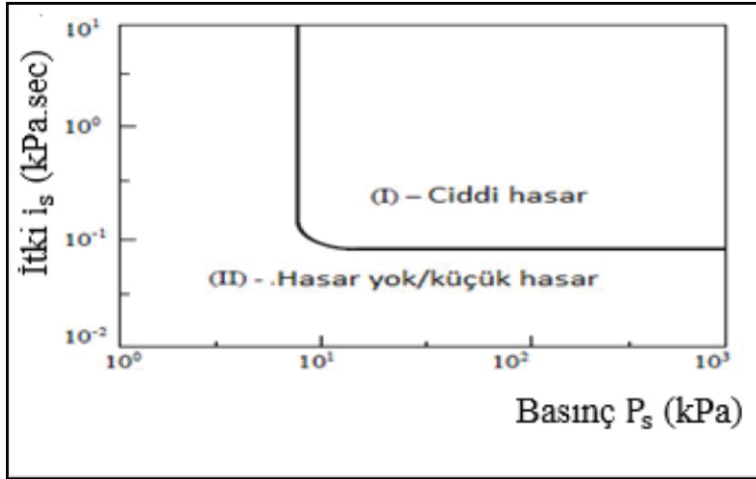
2.3. İç Patlama Yüküne Maruz Kalan Yapıların Göçme Modları

Yapısal elemanlar üzerindeki patlama yükü etkileri farklı göçme modlarına göre hem lokal hem de global tepkiler üretebilir. Yapısal davranış tipi yükleme oranı, hedefin konumu ve sınır koşullarına bağlıdır. Patlama yüküne bağlı olarak genel göçme modları eğilme, direk kesme ya da zımbalama şeklinde olabilir.

Yapısal elemanların global tepkisi genel olarak enine yüklerin uzun süreli uygulanmasıyla ve genellikle eğilme ve kesme davranışıyla ilgilidir. Yer üstündeki betonarme yapıların patlama yükleri altında davranışı eğilme göçmesi olarak adlandırılır. İkinci göçme modu kesme göçmesidir. Bu göçme geçici kısa süreli dinamik yüklerle ilgilidir. Yüksek kesme gerilmeleri direk global kesme göçmelerine izin verir ve önemli eğilme deformasyonları olmadan önce meydana gelir [23].

Kapalı patlamalar önemli lokal kesme ya da eğilme göçmelerine neden olabilir. Bu davranış, temel olarak patlayıcıyla yapı arasındaki mesafeye ve yapısal elemanların sünekliliğine bağlıdır. Lokal kesme göçmesi yerel delme ve parçalama şeklinde görülebilir.

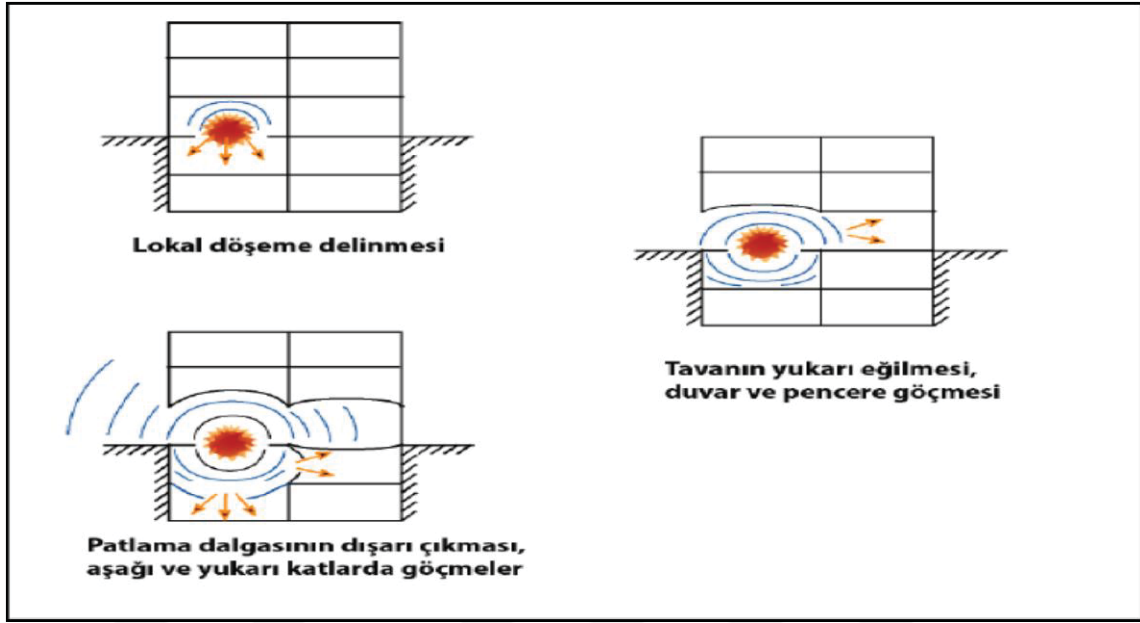
Yapısal elemanların maruz kaldıkları patlama basınçları ve itkilerin kombinasyonuyla zarar seviyesini belirlemek için basınç-itki diyagramı kullanılabilir. Şekil 2.13' te basınç itki diyagramına göre yapısal elemanlardaki hasarın büyüklüğü tahmin edilebilir.



Şekil 2.13. Tipik basınç-itki(P-I)diyagramı [28]

2.3.1. İç patlama yüküne maruz kalan yapıların hasar mekanizmaları

Şok dalgasından dolayı oluşan hasarlar hava patlama etkileri ve ilerleyen göçmeler olarak sınıflandırılır. Direk hava patlama etkileri patlamanın yüksek yoğunluklu basınçlarından dolayı yapıya zarar verir. Bunlar dış duvarların, pencerelerin, çatı sistemlerinin döşeme sistemlerinin ve kolonların göçmesine sebep olabilir. Şekil 2.14' te iç patlama sonucu yapıdaki hasar mekanizması gösterilmiştir. Yapı içerisinde patlayan patlayıcılar küçük olsa bile yapı yüzeylerindeki yansımadan dolayı hava patlama etkileri büyür. Beklenen tipik hasar tipleri; patlayıcı altındaki döşeme sisteminin lokal olarak aniden çökmesi, patlayıcı üzerindeki döşemenin hasarı ve muhtemel lokal çökme, yakındaki beton ve duvarın hasar ve muhtemel çökmesi, yapısal olmayan elemanların çökmesi, bina içerisindeki ekipmanlar nedeniyle uçan enkazlar olarak sayılabilir [29]. Çizelge 2.1' de basınçların oluşturacağı hasar tipleri verilmiştir.



Şekil 2.14. Yapı içerisindeki patlamanın etkileri [29]

Çizelge 2.1. Tipik patlama hasarları [30]

Basınç(kPa)	Hasar
0,15	Rahatsız edici ses
0,20	Önceden hasarlı büyük camların kırılması
0,30	Yüksek ses
0,70	Önceden hasarlı küçük camların kırılması
1,0	Tipik cam kırılması
2,0	Asma tavan hasarı
3,0	Küçük ölçekli yapısal hasar
3,5 - 7,0	Küçük ve büyük pencerelerin patlaması, bazı pencere çerçevelerinin hasarı
5,0	Zayıf yapılarda küçük ölçekli hasar, Çatı kiremitlerinin uçması
7,0	Zayıf yapılarda önemli hasar
35	Ağaç telefon/elektrik direklerinin devrilmesi
50	Tren vagonlarının devrilmesi
50 - 55	Hafif tuğla duvarların tamamen hasarı
50 - 65	Çelik çerçeveli yapıların göçmesi
50 - 70	Otomobillerin ciddi oranda ezilmesi
55 - 70	Hafif tuğla duvarların tamamen göçmesi
65	Çelik uzay kafes çelik köprülerin göçmesi
> 70	Betonarme olmayan tüm yapıların göçmesi
90	Ağır tuğla/ taş duvarların tamamen göçmesi
490	Ağır yığma yapıların, betonarme yapı ve köprülerin göçmesi



Resim 2.1. Sakarya havai fişek fabrikasında meydana gelen patlama [31]

Resim 2.1’ de Sakarya’da bulunan havai fişek fabrikasında meydana gelen patlamaya ait fotoğraf bulunmaktadır. İlk patlama oluştuktan sonra yapıda oluşan mükerrer patlamalarla patlamanın etkisi artmıştır. Fotoğraf incelendiğinde patlamaların etkisiyle yapı duvarlarının ve çatı elemanlarının hasar gördüğü ve enkazların çevreye yayıldığı gözükmemektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

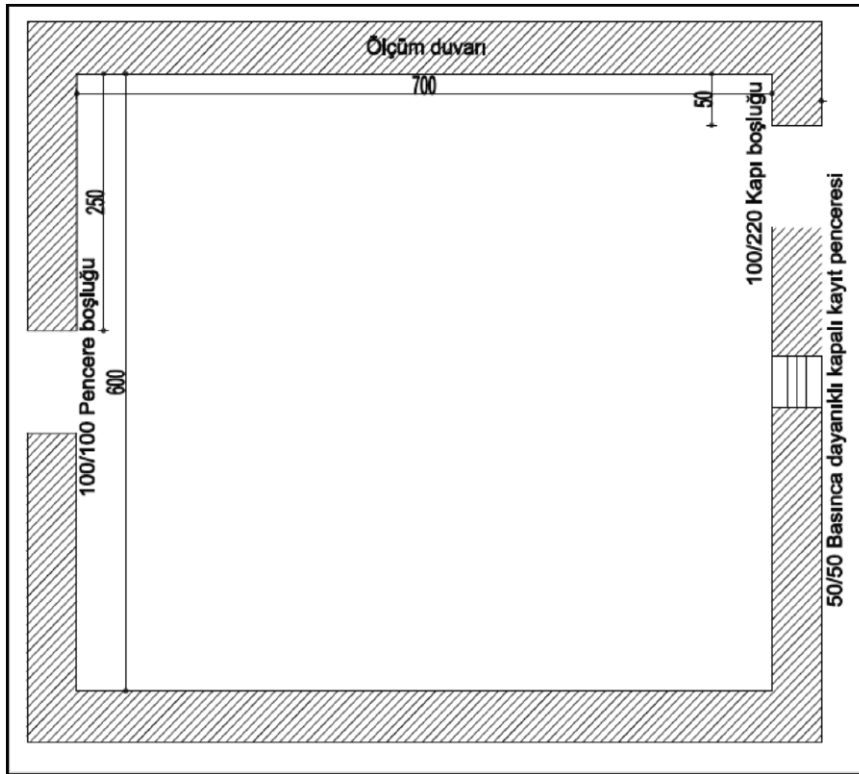
Literatür çalışmaları incelendiğinde, deneysel ve teorik çalışmalarda iç patlama basıncını etkileyen faktörler üzerinde durulduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmalarda kutu vb. modeller kullanılarak, gerçek oda boyutu üzerindeki çalışmaların az sayıda kaldığı belirlenmiştir. Bu çalışma, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak mükerrer iç patlamalar altındaki betonarme odanın davranışını araştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla mükerrer dört adet deneyin planlaması yapılmıştır. Betonarme patlama deney odasında, dört adet farklı patlayıcı miktarı ve değişken mesafeler altında yapılan deneyler sonucunda, ölçüm duvarında oluşan patlama basınçları kaydedilmiş ve gözlemsel veriler temin edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen basınç verileri, farklı türdeki patlayıcıların etkisini değerlendirebilmek amacıyla yapılan bir deneysel çalışmaya da referans olacaktır.

Deney programındaki ilk patlamada betonarme patlama odası davranışının bilinmemesi ve deney ölçüm cihazlarının kontrol edilebilmesi amacıyla düşük miktarda patlayıcı kullanılması planlanmıştır. İkinci patlama deneyinden önce yapının davranışı ve hasar durumu uygun olursa, ikinci patlama deneyinde mükerrer patlama deneyi programındaki en büyük basıncı oluşturacak patlamanın yapılması hedeflenmektedir. Bu nedenle patlayıcı miktarı arttırılacak ve patlayıcı ölçüm duvarına yaklaştırılacaktır. İkinci patlama deneyi sonrasında yapıdaki hasar durumu değerlendirilerek, deney programının tamamlanabilmesi için patlayıcı miktarı ve patlayıcının ölçüm duvarına olan mesafesinde değişiklikler yapılacaktır. Dördüncü patlama deneyinde, yapıdaki hasar durumu da dikkate alınarak, patlayıcı mesafesinin etkisini görebilmek amaçlanacaktır. Planlanan deney programında patlayıcı miktarı ve mesafesi değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu değişkenler, mükerrer patlama deneyi programının tamamlanabilmesi için her deneyde bir önceki deneyle elde edilen yapı davranışına göre değiştirilerek patlama deneyi programına devam edilecektir.

3.1. Deney Düzenegi

Deneysel çalışma için, inşa edilen betonarme odanın iç ölçüleri eni 600 cm, boyu 700 cm ve yüksekliği 400 cm olarak planlanmıştır. Muhtemel iç ortamlarda her zaman en az bir giriş kapısı ve bir pencere bulunduğu düşünülerek mevcut deney düzenegimizde bu hacimsel boşluklar bırakılmıştır. Ayrıca mükerrer patlama deneylerinin yapılması için

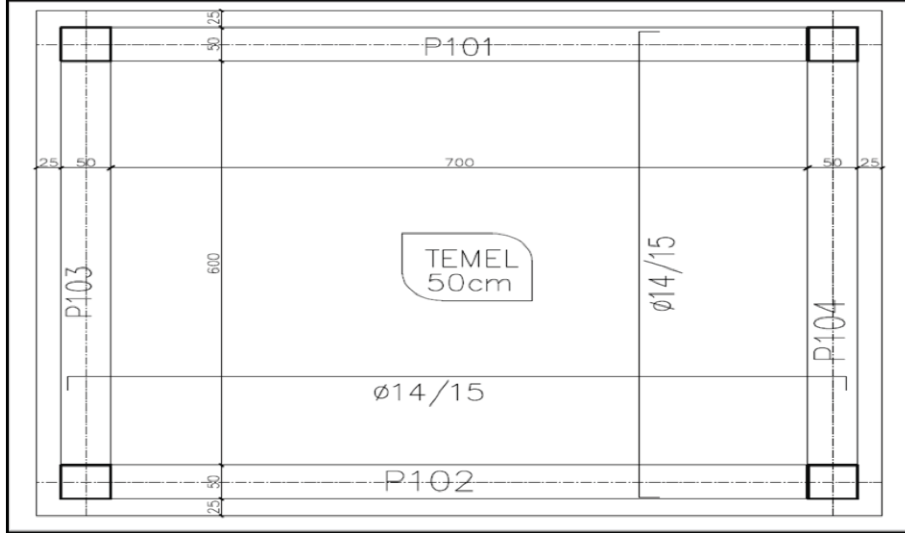
modellenen odanın, patlama basıncı ve gaz basıncı davranışının da gerçek oda davranışına uyumlu olması amacıyla bu boşlukların bırakılması planlanmıştır. Bu nedenle, ölçüm duvarının sağında duvardan 50 cm uzaklıkta, 100x220 cm boyutlarında kapı boşluğu ve ölçüm duvarının solunda duvardan 250 cm uzaklıkta 100x100 cm boyutlarında zeminden yüksekliği 100 cm olacak şekilde pencere boşluğu oluşturulmuştur. Bu boşluklara 2 mm kalınlığında sac malzemeyle kapı ve pencere yapılmıştır. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi oluşturulan betonarme odaya, ölçüm duvarının sağındaki duvara 50x50 cm boyutlarında bırakılan boşluğa, patlamaya dayanıklı cam yerleştirilerek deney öncesi, deney aşaması ve deney sonrası yüksek hızlı kamera ile görsel kayıt alınması amaçlanmıştır.



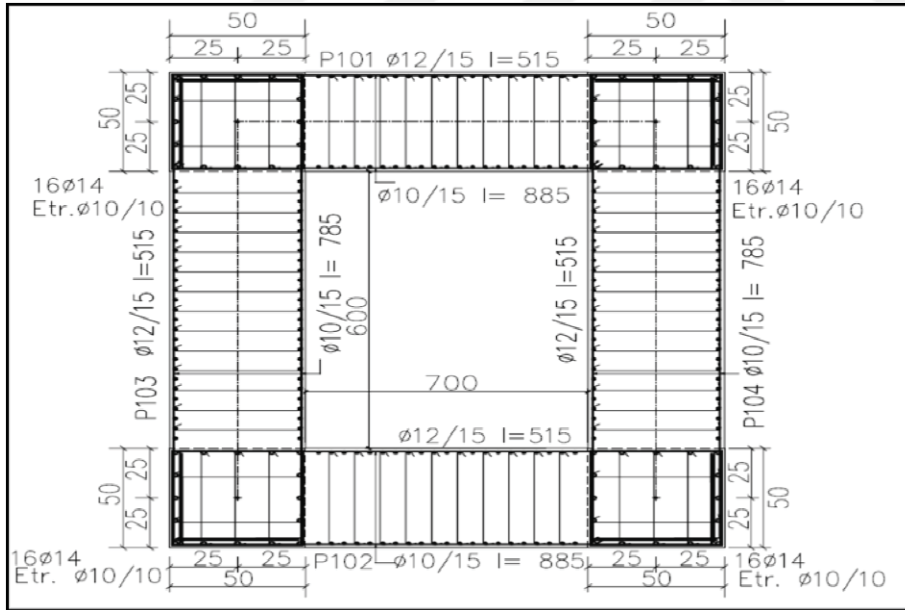
Şekil 3.1. Patlama deneylerinin yapılması için inşa edilen betonarme odanın planı

Betonarme odanın yapımında C30/37 sınıfı beton ve S420 sınıfı nervürlü donatı kullanılmıştır. Betonarme odanın temeli Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi 50 cm kalınlığında radye temel olarak inşa edilmiştir. Ölçüm duvarı ve diğer duvarlar 50 cm kalınlığında olup, Şekil 3.3’ teki gibi donatılandırılmıştır. Betonarme odada yapı duvarlarının kenarlarında oluşacak gerilme yığılımlarını karşılamak için ilave etriye konulması uygun görülmüştür.

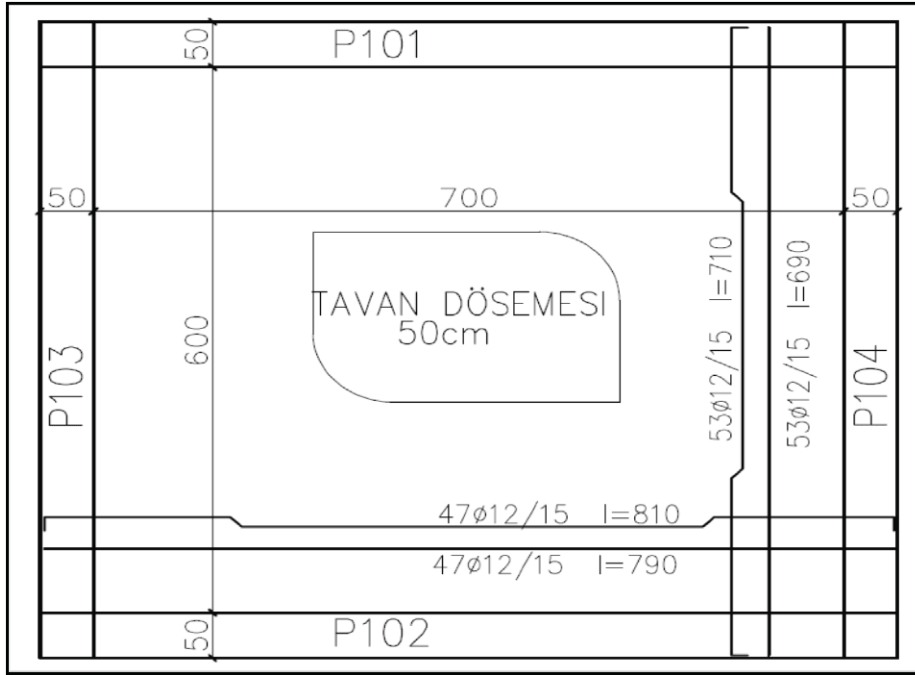
Betonarme odanın tavan döşemesi 50 cm kalınlığında olup, donatı planı Şekil 3.4' te verilmiştir.



Şekil 3.2. Betonarme odanın radye temel donatı planı

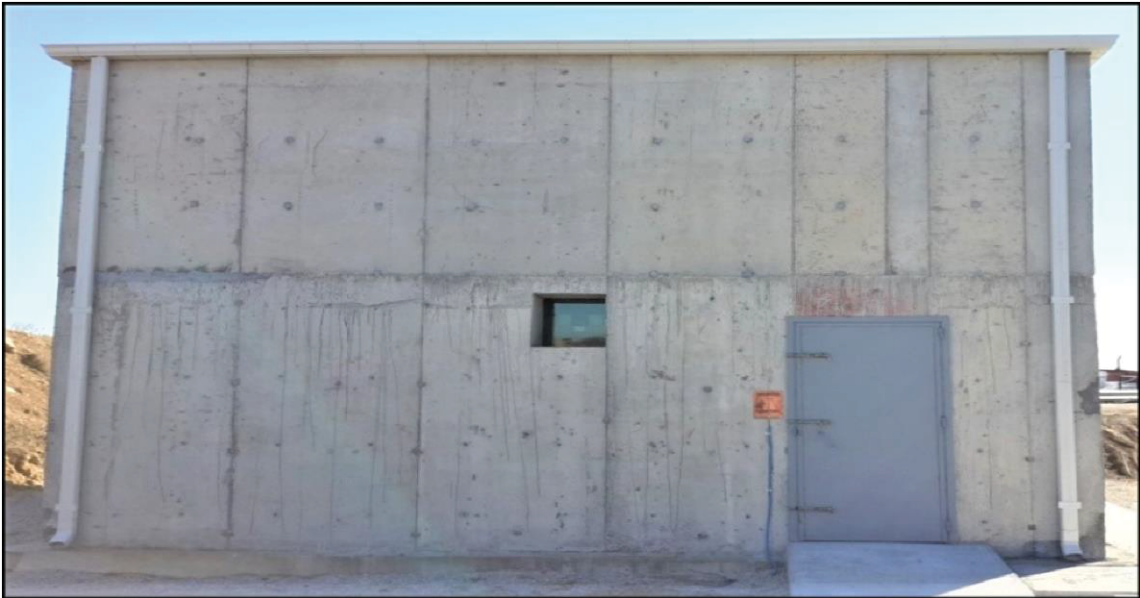


Şekil 3.3. Betonarme odanın perde duvar donatı planı



Şekil 3.4. Betonarme odanın tavan döşemesi donatı planları

Patlamaların yapılacağı betonarme odanın görseli Resim 3.1’ de verilmiştir. Piezoelektrik basınç ölçüm cihazının yerleştirileceği 15 cm çapındaki delik, ölçüm duvarının düşeyde ve yatayda tam ortasına gelecek şekilde oluşturulmuştur.



Resim 3.1. Patlama deneylerinin yapılması için inşaa edilen betonarme odanın genel görünümü

Bu çalışmada patlayıcı madde olarak küresel şekilli TNT ve patlayıcı maddeyi ateşlemek için elektrikli fûnye kullanılmıştır. Patlama sonucu oluşan basınç değerlerini ölçmek için Çizelge 3.1’ de özellikleri verilen PCB marka ICP 113b27 serisi piezoelektrik basınç sensörü kullanılmıştır. Piezoelektrik basınç sensörüne ulaşan basınç dalgaları, bağlantı kablolarıyla IMC Cronosflex marka veri toplama cihazına aktarılmıştır. Elde edilen veri kaydından basınç-zaman grafikleri oluşturulmuştur.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan piezoelektrik basınç sensörünün özellikleri [32]

Performans	Değer
Ölçüm Aralığı (± 5 V çıkış için)	6,894 bar
Faydalı Aralık	13,788 bar
Hassaslık	725 mV/bar
Maksimum Basınç	68,95 bar
Rezonans Frekansı	≥ 500 kHz
Yükseliş Süresi	≤ 1 μ s
Düşük Frekans Tepkisi (-5 %)	0,5 Hz
Doğrusalsızlık	≤ 1 %FS

Patlayıcı miktarı ve ölçüm duvarına olan mesafenin basınca olan etkisini gözlemleyebilmek amacıyla patlayıcılar pencere boşluğu ve kapalı gözlem penceresinin tam ortasına gelecek şekilde kenarlardan 350 cm ve yerden yüksekliği 200 cm olmak üzere kat ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir ve sabit tutulmuştur.

3.2. Deney Programı

Bu deneysel çalışmada mükerrer iç patlamaların betonarme yapılarda oluşturacağı etkilerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle mükerrer dört adet patlama deneyi yapılması planlanmıştır. Bu deneylerde patlayıcı miktarı ve patlama noktasının ölçüm duvarına olan mesafesi değişken olarak tanımlanmıştır. Bu değişkenler dikkate alınarak her deney sırasında betonarme ölçüm duvarına etkiyen basınç verilerinin kaydedilmesi ve her deney sonrasında elde edilecek gözlemsel verilerle betonarme oda elemanları davranışının deneysel olarak elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle ölçüm duvarında oluşacak basınçların kaydedilmesi için ölçüm duvarının merkezine PCB marka ICP 113b27 serisi piezoelektrik basınç sensörü yerleştirilmiştir. Ayrıca gözlemsel verilerle betonarme oda elemanlarının davranışının deneysel olarak elde edilebilmesi amacıyla her deney sonrasında betonarme oda üzerinde oluşacak çatlaklar ölçülerek, çatlak krokileri

hazırlanacaktır. İlk patlamada betonarme patlama odası davranışının bilinmemesi ve deney ölçüm cihazlarının kontrolü amacıyla düşük miktarda patlayıcı kullanılması planlanmıştır. Bu nedenle 500 g patlayıcının ölçüm duvarına 300 cm mesafeye yerleştirilerek patlatılması planlanmıştır. Eğer betonarme odanın yapısal davranışı ve durumu uygun olursa ikinci deneyde patlayıcı miktarının 1000 g'a çıkarılarak iki katına çıkarılması ve patlayıcının ölçüm duvarına yaklaştırılarak 250 cm mesafede mükerrer deneyin yapılması düşünülmektedir. İkinci deney sonrasında yapı durumunun uygun olması durumunda üçüncü deneyde patlayıcı miktarının 500 g'a indirilerek yarıya indirilmesi ve mesafenin 250 cm'de, bir önceki deneye göre sabit tutulması planlanmıştır. Dördüncü ve son deneyde, yapının hasar durumu uygun olduğu takdirde patlayıcı miktarının iki katına çıkarılarak 1000 g'lık patlayıcının 300 cm mesafede patlatılması planlanmıştır. Her deney sonrasında, veri değerlendirmesi sonucu yapılan mükerrer deney programı irdelenerek, programa değişikliklerle devam edilir. Çizelge 3.2' de mükerrer deney programı verilmiştir.

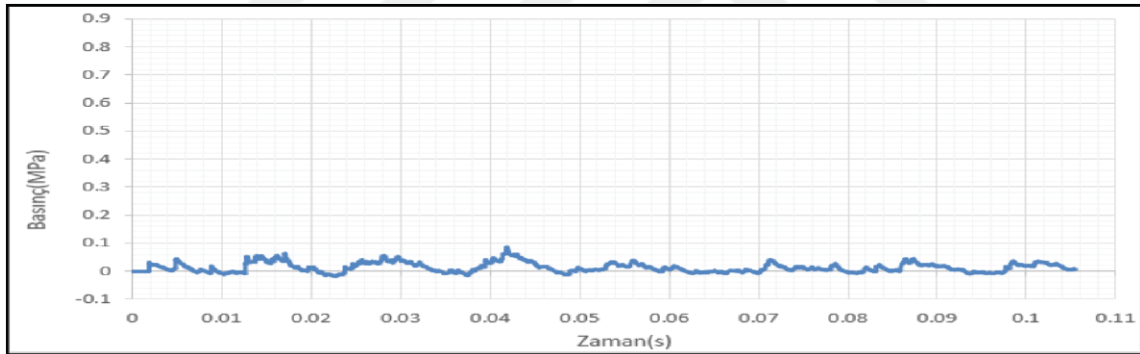
Çizelge 3.2. Mükerrer patlama deneyi programı

Deney Sırası	Patlayıcı (TNT) miktarı	Patlayıcının ölçüm duvarına olan mesafesi	Patlayıcının yerden yüksekliği	Patlayıcının yan duvarlara mesafesi	Patlayıcının arka duvara mesafesi
1	500 g	300 cm	200 cm	350 cm	300 cm
2	1000 g	250 cm	200 cm	350 cm	350 cm
3	500 g	250 cm	200 cm	350 cm	350 cm
4	1000 g	300 cm	200 cm	350 cm	300 cm

3.3. Birinci Patlama Deneyi

Deney programındaki ilk deney, hem deney düzeneğinin hem de ölçüm düzeneğinin testini yapmak üzere planlanmıştır. Bu nedenle ilk patlama deneyinde, düşük miktarda patlayıcı kullanılması kararlaştırılmıştır. İlk patlama deneyinde 500 g TNT kullanılması amaçlanmıştır. Patlayıcı maddenin tartımında 477 g olduğu tespit edilmiş ve ilave patlayıcı temin edilememiştir. Patlayıcı Çizelge 3.2' deki gibi planlandığı şekilde yerleştirilmiştir. Patlama yapılmadan önce herhangi bir kaza yaşanmaması için toprak sutrenin arkasına geçildi ve emniyetli durum oluşana kadar patlatma işlemi yapılmadı. Patlatma işlemi sonucunda betonarme odada herhangi bir hasar (çatlak, parça kalkması ve deformasyon)

gözlenmemiştir. Yapısal elemanların 50 cm kalınlığında olması ve bu elemanların çift yönlü donatılandırmaya sahip olması yapısal hasarın oluşmasını önlemiştir. Ancak kapı ve pencere patlamanın etkisiyle yerinden çıkmıştır. İlk patlama sonucu piezoelektrik basınç sensöründen 0,105 s' lik basınç-zaman grafiği elde edilmiştir. İlk basınç dalgasının piezoelektrik basınç sensörüne 0,00001 s' de ulaştığı kaydedilmiştir. Patlama deneyi sonucu ölçülen maksimum yansıyan şok basıncı 0,09 MPa' dır ve bu basıncın 0,04. s' de meydana geldiği kayıtlardan okunmuştur. Piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından elde edilen basınç-zaman grafiği Şekil 3.5' te verilmiştir. Yüksek hızlı kamera kayıtları incelendiğinde, patlama sonucu oluşan titreşimler nedeniyle sistemin bozulduğu ve görüntü alınamadığı tespit edilmiştir. Yüksek hızlı kamera düzeneği deney düzeneğinden çıkarılmıştır. Kapı ve pencerelerin patlamanın etkisiyle yerinde çıkması nedeniyle yapılacak diğer patlama deneylerinde kapı ve penceresiz betonarme patlama deneyi odası kullanılacaktır. Patlama sonucu oluşan kalıntılar nedeniyle betonarme odanın iç yüzeyinde gözlem yapılamamıştır.



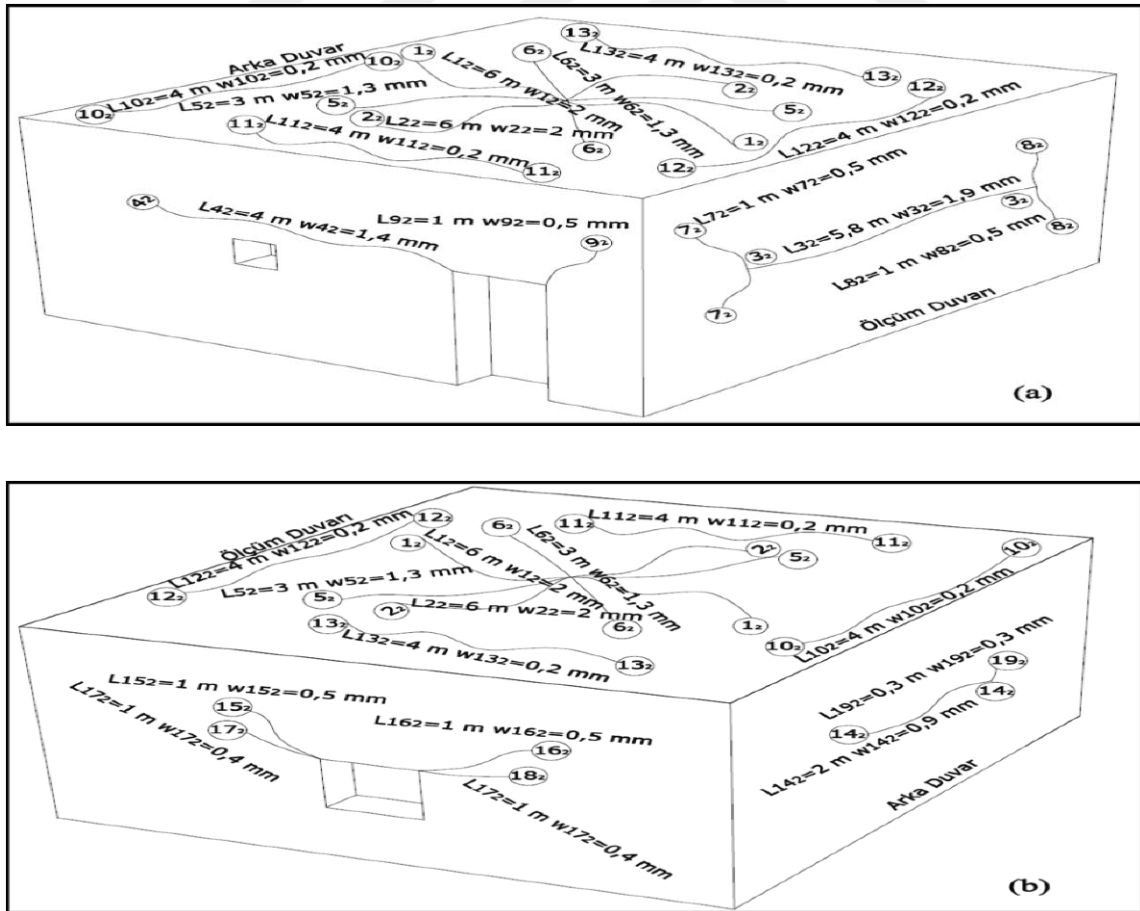
Şekil 3.5. 477 g TNT ve ölçüm duvarına 3 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği

Birinci patlama deneyi sonrasında betonarme oda elemanlarında yapısal hasar gözlenmemesi nedeniyle ikinci patlama deneyinin, deney programındaki gibi en büyük basıncı oluşturacak değişkenler kullanılarak mükerrer patlama deneyinin planlandığı gibi devam edilmesine karar verilmiştir.

3.4. İkinci Patlama Deneyi

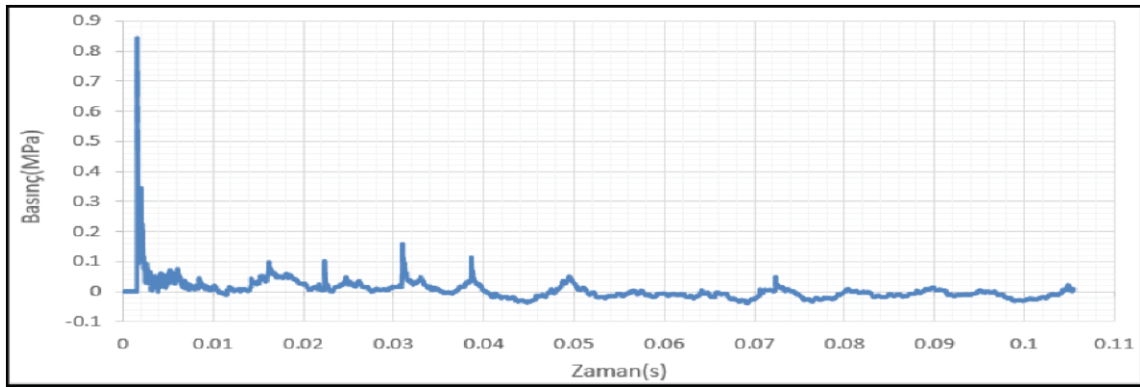
İlk patlama sonucu kapı ve pencerelerin yerinden sökülüp fırlamıştır ancak betonarme oda elemanlarında hasar tespit edilmemiştir. İlk deney sonrasında betonarme oda elemanlarında hasar tespit edilmemesi üzerine ikinci patlama deneyinde patlayıcı miktarı

deney programındaki gibi iki katına çıkarılmış ve patlayıcı ölçüm duvarına yaklaştırılmıştır. İkinci patlama deneyinde 1000 g'lık TNT kullanılmıştır. Patlayıcının basınç ölçüm cihazının yerleştirildiği ölçüm duvarına mesafesi 250 cm olacak şekilde ölçüm duvarına yaklaştırılmıştır. Patlayıcı Çizelge 3.2' deki gibi planlandığı şekilde yerleştirilmiştir. Patlatma işlemi öncesinde güvenlik önlemleri kontrol edilmiştir ve patlatma deneyi yapılmıştır. Patlatma işlemi sonrasında betonarme odada parça kalkması ve deformasyon oluşumu gözlenememiştir. Ancak betonarme oda elemanlarında çatlaklar oluştuğu görülmüştür. İkinci patlamada, tavan döşemesinin merkezinde 1 numara ile gösterilen 6 m uzunluğunda 2 mm kalınlığında, ölçüm duvarının merkezinde 3 numara ile gösterilen 5,8 m uzunluğunda 1,9 mm kalınlığında ve ölçüm duvarının karşısındaki betonarme duvarın merkezinde 14 numara ile gösterilen 2 m uzunluğunda ve 0,9 mm kalınlığında çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca kapı ve pencere boşlukları kenarlarında ve betonarme oda elemanlarında oluşan diğer çatlaklar Şekil 3.6.(a) ve Şekil 3.6.(b)' de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Betonarme odadaki çatlak kroki (İkinci patlama) (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş

Çatlak krokilerindeki L çatlak boyunu, w çatlak açıklığını ifade etmektedir. Bu kısaltmalardan sonra yer alan numaralardan birincisi çatlak numarasını ikincisi bu çatlakın hangi patlamada meydana geldiğini anlatmaktadır. İkinci patlama deneyi sonucu piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından 0,105 s' lik basınç-zaman grafiği elde edilmiştir. İlk basınç dalgasının piezoelektrik basınç sensörüne 0,00018 s' de ulaştığı kaydedilmiştir. Patlama deneyi sonucu oluşan maksimum yansıyan şok basıncı 0,84 MPa'dır ve bu basıncın 0,0016. s' de meydana geldiği kayıtlardan okunmuştur. Piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından elde edilen basınç-zaman grafiği Şekil 3.7' de verilmiştir.



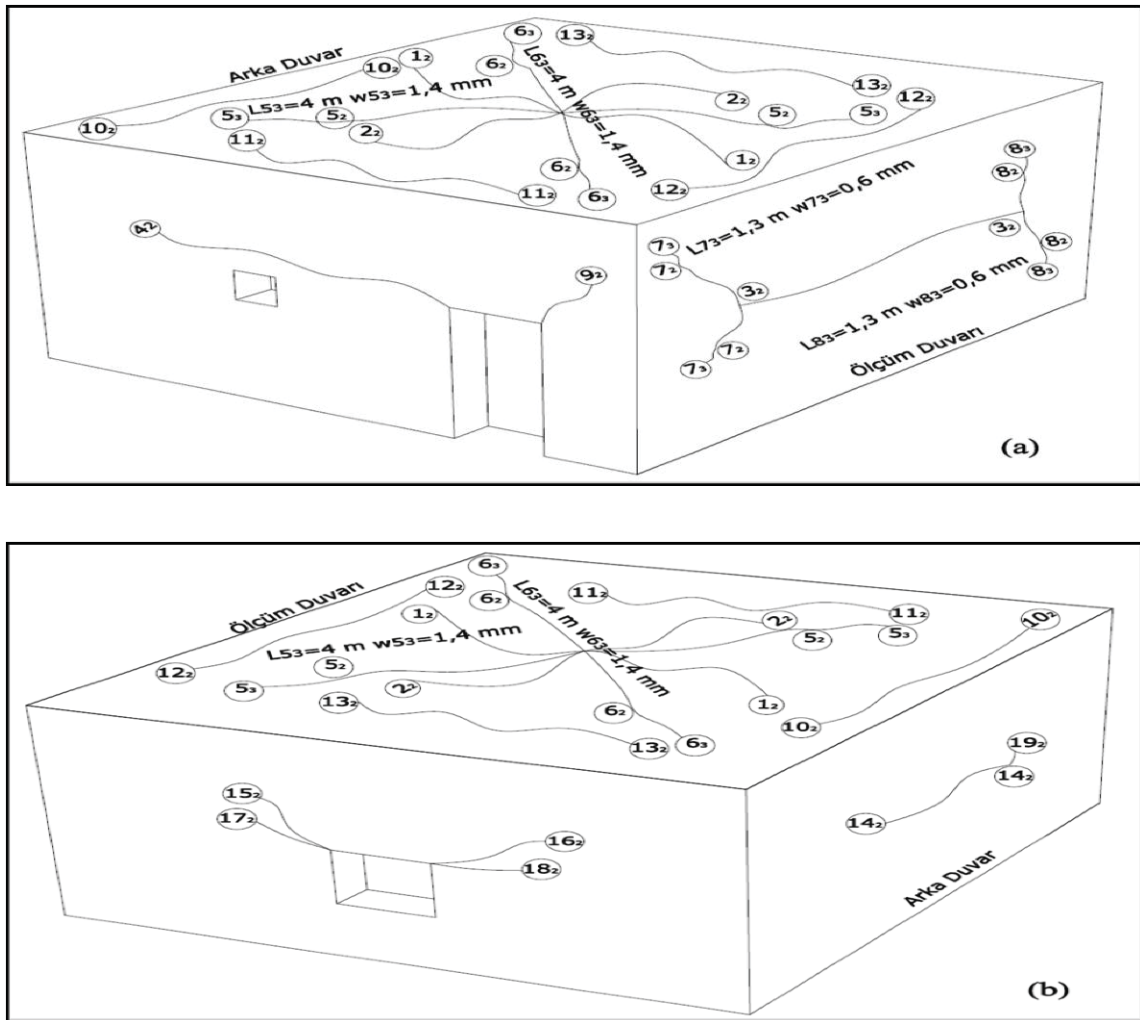
Şekil 3.7. 1000 g TNT ve ölçüm duvarına 2,5 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği

İkinci patlama deneyi sonrasında betonarme oda elemanları yapısal olarak incelenerek planlanan deney programına uyulmasına karar verilmiştir.

3.5. Üçüncü Patlama Deneyi

Üçüncü patlama deneyi öncesinde betonarme oda yapısal olarak incelenmiş ve hasar durumları da dikkate alınarak sonraki iki patlama deneyinin de gerçekleştirilebilmesi için patlayıcı miktarı bir önceki deneye göre yarı yarıya azaltılmıştır. Üçüncü mükerrer patlama deneyinde, patlayıcı miktarının değişiminin betonarme duvara etkisini görebilmek için patlayıcının duvara olan mesafelerinde değişiklik yapılmamıştır. Bu deney için kullanılan patlayıcı maddenin tartımı sonucunda 466 g TNT çıkmıştır. 500 g olarak planlanan patlayıcı miktarını eksik kısmın ilave edilmesi mümkün olmamıştır. Patlama noktası bir önceki deneye göre sabit tutularak, patlayıcı ölçüm duvarına mesafesi 250 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Diğer duvarlara olan mesafeler de herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Patlama öncesi güvenlik önlemleri alınarak patlama deneyi yapılmıştır.

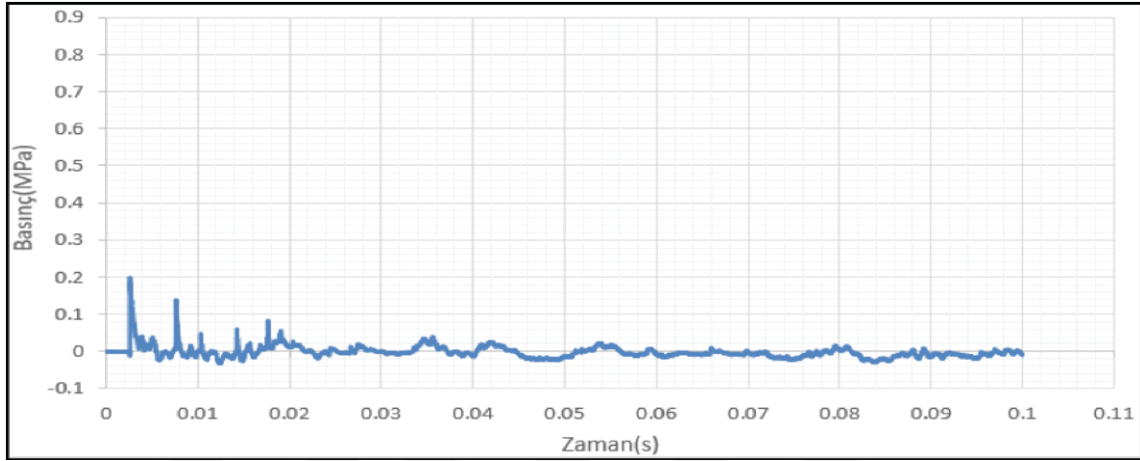
Patlama sonrası betonarme odada parça kalkması ve deformasyon gözlenmezken çatlaklarda ilerlemeler olduğu tespit edilmiştir. Bu patlamada tavan döşemesinin merkezinden diyagonal olarak meydana gelen çatlağın ilerlediği ve 4 m boyuna ulaştığı tespit edilmiştir. Bu çatlağın açıklığının 1,4 mm olduğu tespit edilmiştir. Ölçüm duvarından tavan döşemesine doğru diyagonal yönde ilerleyen 7 numaralı çatlak ilerleyerek 1,3 m uzunluğunda ve 0,6 mm kalınlığında bir çatlak oluşturmuştur. Üçüncü patlama deneyi sonrasında betonarme oda elemanları üzerinde oluşan çatlakların ölçülmesiyle hazırlanan krokiler Şekil. 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Betonarme odadaki çatlak krokisi (Üçüncü patlama) (a) Ön görünüş
(b) Arka görünüş

Deney aşamasında piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından 0,1 s’ lik basınç-zaman grafiği elde edilmiştir. İlk basınç dalgasının piezoelektrik basınç sensörüne 0,00008 s’ de ulaştığı kaydedilmiştir. Patlama deneyi sonucu ölçülen maksimum yansıyan şok basıncı

0,19 MPa' dır ve bu basıncın 0,0026. s' de meydana geldiği kayıtlardan okunmuştur. Piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından elde edilen basınç-zaman grafiği Şekil 3.9' da verilmiştir.



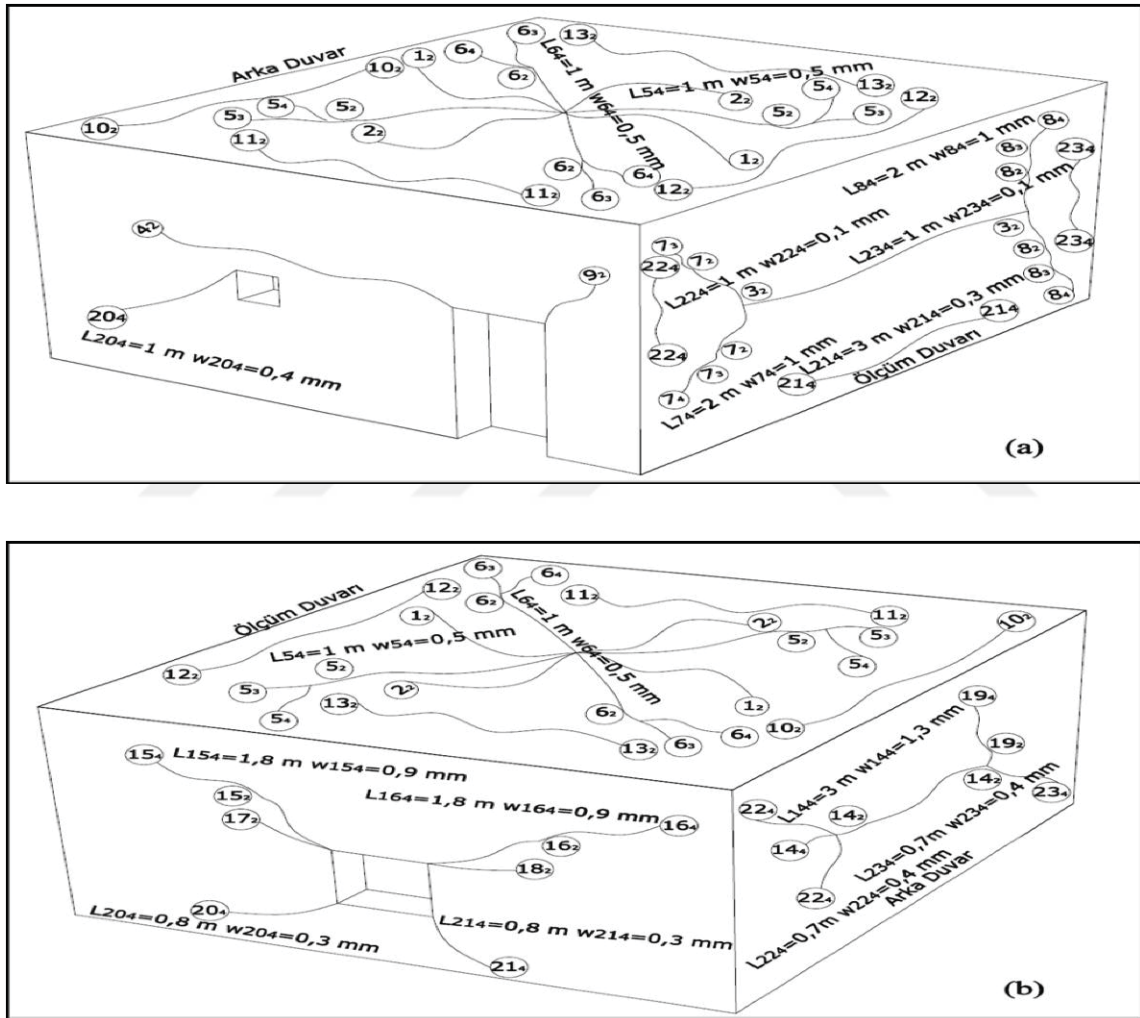
Şekil 3.9. 466 g TNT ve ölçüm duvarına 2,5 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği

Üçüncü patlama deneyi sonrasında yapısal hasar durumu dikkate alınarak son patlama deneyinin tamamlanabilmesi için deney programında dördüncü patlama deneyinde kullanılması planlanan patlayıcı miktarının azaltılması gerektiği belirlenmiştir.

3.6. Dördüncü (Son) Patlama Deneyi

Dördüncü patlama deneyi öncesinde yapıda oluşan çatlakların ilerlediği ve yeni çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Dördüncü patlama deneyinde patlayıcının ölçüm duvarına olan mesafesinin basınç üzerindeki etkisini görebilmek için 1000 g' lık patlayıcı kullanılması planlanıyordu. Fakat betonarme odada mükerrer patlama yükleriyle oluşan hasarların, stabilite kaybı oluşturabileceği ihtimaline karşı 700 g' lık patlayıcı kullanılması daha uygun bulunmuştur. Dördüncü ve son patlama deneyinde 700 g' lık TNT kullanılmıştır. Patlayıcının basınç ölçüm cihazının yerleştirildiği ölçüm duvarına mesafesi 300 cm' dir. Patlayıcı Çizelge 3.2' deki gibi planlandığı şekilde yerleştirilmiştir. Patlamadan önce toprak sutrenin arkasına geçilerek güvenlik sağlanmıştır. Patlatma deneyi sonrası betonarme odada parça kalkması ve deformasyon gözlenmemiştir. Ancak çatlakların arttığı tespit edilmiştir. Bu patlamada tavan döşemesinde mevcut olan çatlakların ilerlediği ve 6 numara ile gösterilen 1 m uzunluğunda 0,5 mm kalınlığında yeni bir diyagonal çatlak

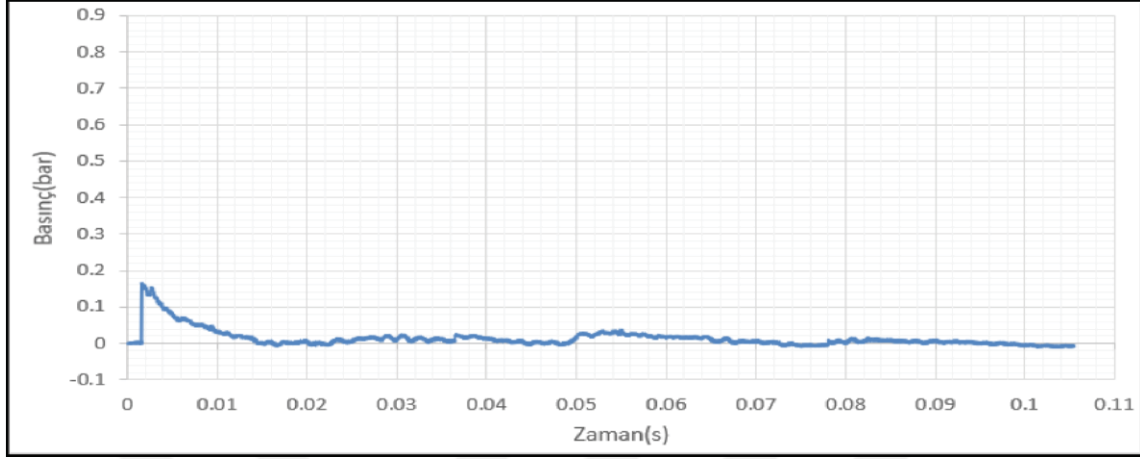
meydana geldiği tespit edilmiştir. Ölçüm duvarının merkezinden aşağı diyagonal olarak ilerleyen 7 numaralı çatlağın ilerleyerek 2 m uzunluğunda 1 mm kalınlığında bir çatlak meydana geldiği tespit edilmiştir. Ölçüm duvarının karşısındaki simetrik duvarda da diyagonal yönde çatlakların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu çatlaklar 0,7 m uzunluğunda ve 0,4 mm kalınlığındadır. Ayrıca diğer duvarlarda da aşağı diyagonal yönlerde çatlak tespitleri ve mevcut çatlaklarda uzamalar belirlenmiştir. Bu çatlaklar Şekil 3.10.(a) ve Şekil 3.10.(b)' de verilmiştir.



Şekil 3.10. Betonarme odadaki çatlak krokisi (Dördüncü patlama) (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş

Piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından 0,105 s' lik basınç-zaman grafiği elde edilmiştir. İlk basınç dalgasının piezoelektrik basınç sensörüne 0,00018 s' de ulaştığı kaydedilmiştir. Patlama deneyi sonucu ölçülen maksimum yansıyan şok basıncı 0,16 MPa'

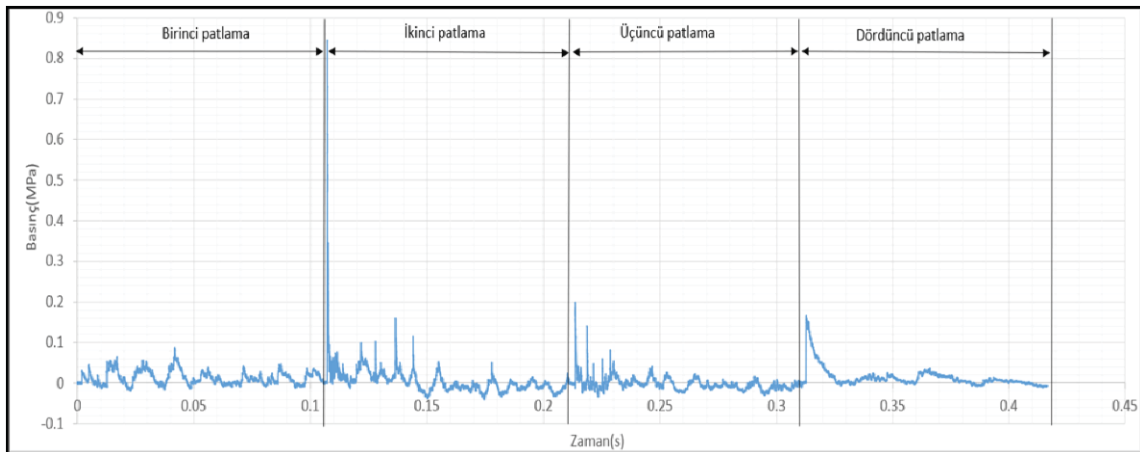
dır ve bu basıncın 0,0017. s' de meydana geldiği kayıtlardan okunmuştur. Piezoelektrik basınç sensörü kayıtlarından elde edilen basınç-zaman grafiği Şekil 3.11' de verilmiştir.



Şekil 3.11. 700 g TNT ve ölçüm duvarına 3 m mesafede elde edilen basınç-zaman grafiği

3.7. Deneysel Verilerin Değerlendirmesi

Patlama deneyleri sonrasında yapı duvarlarının iç yüzeyinde patlamanın kalıntıları nedeniyle çatlak gözlemi yapılamamıştır. Deneysel çalışmalarda yapıya etkiyen mükerrer patlama basınçlarının etkisiyle betonarme oda elemanlarının dış yüzeyinde çatlaklar gözlenebilmiştir. Mükerrer olarak yapılan dört adet patlama deneyinde piezoelektrik basınç sensörleriyle alınan basınç-zaman grafikleri deney sırasına göre arka arkaya eklenerek Şekil 3.12 'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 3.12. Mükerrer dört patlama sonucu oluşan basınçların deney sırasına göre arka arkaya eklenmesi

500 g' lık TNT' nin kullanıldığı birinci patlama deneyi sonrasında betonarme oda elemanlarında yapısal hasar (çatlak, parça kalkması ve deformasyon) gözlenmemiştir. Bunun ana nedeni duvarların ve döşemenin 50 cm kalınlığında olmasıdır. Ayrıca ilk patlama deneyi ile deney yapısı ve düzeneği kontrol edilmiştir. Zira çelik kapı ve pencereler ilk patlama ile yerinden sökülüştür.

1000 g TNT' nin kullanıldığı ikinci patlama deneyinde patlayıcı miktarının birinci patlama deneyine göre iki katına çıkarılması ve patlayıcının ölçüm duvarına mesafesinin 300 cm' den 250 cm' e indirilmesiyle yapısal hasarlar tespit edilmiştir. Çizelge 3.3' te patlayıcı mesafelerinde göre betonarme oda elemanlarında meydana gelen hasarlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Patlayıcının 250 cm mesafede olduğu ölçüm duvarı ve patlayıcının 350 cm mesafede olduğu ölçüm duvarının karşısındaki aynı yapısal özelliklere sahip simetrik duvarda merkezde ölçülen çatlaklar karşılaştırıldığında; ölçüm duvarında ölçülen çatlakların uzunluğunun simetriğindeki duvarda oluşan çatlakların uzunluğunun 2,9 katı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgelerde ölçülen çatlak açıklıkları değerlendirildiğinde; ölçüm duvarındaki çatlak kalınlıklarının karşısındaki simetrik duvarda ölçülen çatlak kalınlıklarının 2,11 katı olduğu tespit edilmiştir. Patlayıcı mesafesinin 350 cm olduğu kapı boşluğuna sahip duvar ile simetrik duvarda oluşan çatlak uzunlukları karşılaştırıldığında, kapı boşluğuna sahip duvardaki çatlak simetrik duvardaki çatlağın 2 katıdır. Patlayıcının 350 cm mesafede olduğu kapı ve pencere boşluğuna sahip betonarme perdeler incelendiğinde çatlakların boşluk kenarlarında başladığı görülmüştür. Kapı boşluğuna sahip perdede boşluğun kenarında yalnızca bir adet çatlak oluşurken pencere boşluğuna sahip perdede boşluk kenarında dört adet çatlak meydana geldiği tespit edilmiştir. Betonarme perdede yer alan boşlukların perdeyi zayıflattığı ortaya çıkmıştır. Çatlak krokileri incelendiğinde tavan döşemesinde basınç bölgesinde de çatlakların oluşarak çatlak zarfının tamamlandığı diğer duvarlarda ise bu zarfın henüz oluşmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.3. Çatlakların patlayıcı mesafelerine göre karşılaştırılması

Duvar	Patlayıcı mesafesi	Çatlak boyu	Çatlak açıklığı
Ölçüm duvarı	250 cm	5,8 m	1,9 mm
Simetrik duvar	350 cm	2 m	0,9 mm
Kapı boşluğuna sahip duvar	350 cm	4 m	1,4 mm

Üçüncü patlama deneyinde patlayıcı miktarı ikinci patlama deneyine göre yarı yarıya azaltılmış ve patlayıcının konumunda değişiklik yapılmamıştır. Ölçüm duvarı ve tavan döşemesinde meydana gelen diyagonal çatlakların ilerlediği tespit edilmiştir. Çizelge 3.4’ te patlayıcı miktarındaki değişime göre ölçüm duvarında oluşan çatlak ilerlemesi gösterilmiştir. 1000 g TNT’nin ölçüm duvarına 250 cm de patlatılmasıyla 1 m uzunluğunda diyagonal çatlak meydana gelmiştir. Patlayıcı miktarının yarıya indirildiği ve patlayıcı mesafesinin değiştirilmediği üçüncü deneyde diyagonal çatlağın ilerleyerek 1,3 m olduğu tespit edilmiştir. Patlayıcı miktarının yarıya indirildiği durumda çatlak ilerlemesinin çatlak boyuna oranının %30 olduğu tespit edilmiştir. Patlayıcı miktarının yarıya indirilmesiyle patlayıcıya 350 cm uzaklıkta olan duvarlarda çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

Çizelge 3.4. İkinci ve üçüncü patlama deneylerinde ölçüm duvarında ölçülen diyagonal çatlak boyları

Patlayıcı miktarı	Çatlak boyu
1000 g	1 m
466 g	1,3 m

Dördüncü patlamada patlayıcı miktarı 1,5 katına çıkarılıp patlayıcı ölçüm duvarında 50 cm uzaklaştırılmıştır. Dördüncü patlama sonucunda kapı boşluğuna sahip betonarme duvar haricinde tüm betonarme oda elemanlarında çatlak zarflarının olduğu görülmüştür. Çizelge 3.5’ te mükerrer patlama deneyi sonucunda ölçüm duvarı ve karşısındaki simetrik duvarda çatlak zarfını tamamlayan diyagonal çatlakların boyları verilmiştir. Ölçüm duvarında ölçülen diyagonal çatlakların uzunluğunun simetriğindeki duvarda meydana gelen diyagonal çatlak uzunluğunun 2,8 katı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu bölgelerde ölçülen çatlak açıklıkları değerlendirildiğinde; ölçüm duvarındaki çatlak açıklıklarının karşısındaki simetrik duvarda ölçülen çatlak açıklıklarının 2,5 katı olduğu tespit edilmiştir.

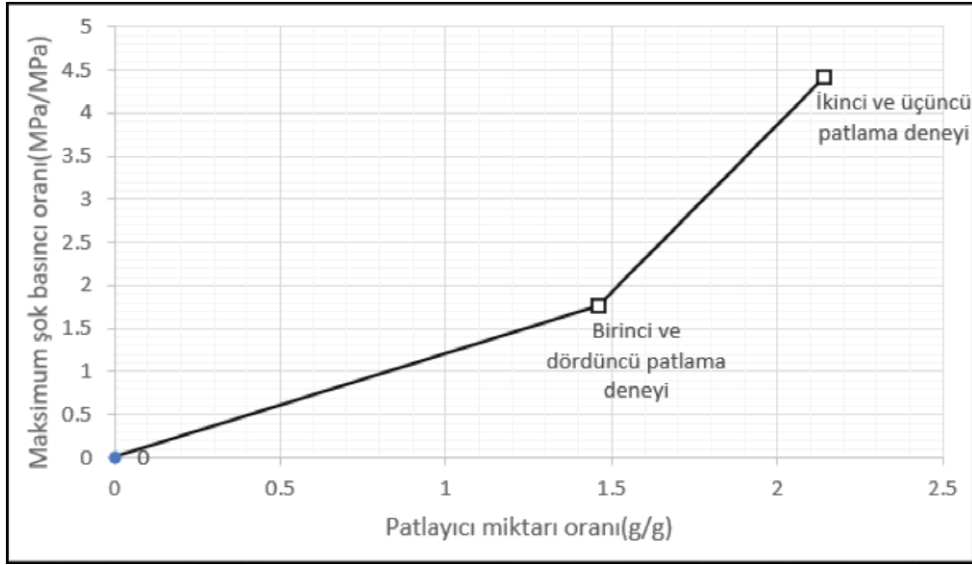
Çizelge 3.5. Dördüncü patlama deneyi sonrasında ölçüm duvarında ölçülen diyagonal çatlak boyları

Duvar	Çatlak boyu	Çatlak açıklığı
Ölçüm duvarı	2 m	1
Simetrik duvar	0,7 m	0,4

Patlayıcının 350 cm mesafede olduğu kapı boşluğuna sahip betonarme duvar ile pencere boşluğuna sahip betonarme duvardaki hasarlar karşılaştırıldığında, pencere boşluğunun zarf oluşumunun tam orta noktasına gelmesi sebebiyle daha düşük enerji kullanarak zarf formunu oluşturması doğaldır. Ayrıca kapı boşluğuna sahip betonarme duvarda boşluğun büyük olması sebebiyle basıncın tahliye olduğu da düşünülebilir. Betonarme oda elemanlarında meydana gelen çatlak zarflarının beklenildiği gibi akma çizgileri teorisine uygun olarak oluştuğu tespit edilmiştir.

Yaklaşık 500 g TNT' nin kullanıldığı birinci ve üçüncü patlama deneylerinde patlayıcının 200 cm mesafede olduğu tavan döşemesinde oluşan çatlaklar incelendiğinde; birinci patlama deneyinde tavan döşemesinde çatlak oluşmazken üçüncü patlama deneyinde tavan döşemesinde çatlakların ilerlediği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin tavan döşemesinin ikinci patlama deneyinde çatlak zarfını oluşturmasıyla hasarlı hâle gelmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 3.6' de mükerrer patlama deneyleri sonucu kaydedilen maksimum yansıyan şok basınçları gösterilmiştir. 477 g TNT ve ölçüm duvarına 300 cm mesafede yapılan ilk deneyde kaydedilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,09 MPa iken 700 g TNT ve ölçüm duvarına 300 cm mesafede yapılan dördüncü deneyde kaydedilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,16 MPa' dır. Patlayıcının ölçüm duvarına uzaklığının 300 cm olduğu ilk deney ve son deneyde elde edilen basınç verileri karşılaştırıldığında; patlayıcı miktarı 1,46 katına çıkarıldığında, maksimum yansıyan şok basıncının 1,77 katına çıktığı tespit edilmiştir. 466 g TNT ve ölçüm duvarına 250 cm mesafede yapılan üçüncü deneyde elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,19 MPa iken 1000 g TNT ve 250 cm mesafede yapılan ikinci deneyde elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,84 MPa' dır. Patlayıcının ölçüm duvarına uzaklığının 250 cm olduğu ikinci ve üçüncü deneyde elde edilen basınç verileri karşılaştırıldığında; patlayıcı miktarı 2,14 katına çıktığında, maksimum yansıyan şok basıncının 4,42 katına çıktığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu verilerle sabit mesafeler altında patlayıcı miktarı değiştirildiğinde elde edilen maksimum yansıyan şok basınçları arasındaki bağlantının Şekil 3.13' de gösterildiği gibi doğrusal olmadığı görülmüştür.



Şekil 3.13. Patlayıcı miktardaki artışla maksimum şok basıncındaki artışın karşılaştırılması

Çizelge 3.6. Mükerrer patlama deneylerinde kaydedilen maksimum yansıyan şok basınçları

Deney Sırası	Patlayıcı (TNT) miktarı	Patlayıcının ölçüm duvarına olan mesafesi	Maksimum yansıyan şok basıncı
1	477 g	300 cm	0,09 MPa
2	1000 g	250 cm	0,84 MPa
3	466 g	250 cm	0,19 MPa
4	700 g	300 cm	0,16 MPa

477 g TNT ve ölçüm duvarına 300 cm mesafede yapılan ilk deneyde elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,09 MPa iken 466 g TNT ve ölçüm duvarına 250 cm mesafede yapılan üçüncü deneyde elde edilen maksimum yansıyan şok basıncının 0,19 MPa olduğu kayıtlardan okunmuştur. Patlayıcı miktarlarının yaklaşık olarak aynı olduğu birinci ve üçüncü deney karşılaştırıldığında, patlayıcı ölçüm duvarına 50 cm yaklaştırıldığında maksimum yansıyan şok basıncının 2,11 katına çıktığı tespit edilmiştir. 700 g TNT ve ölçüm duvarına 300 cm mesafede yapılan dördüncü deneyde elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,16 MPa iken 1000 g TNT ve ölçüm duvarına 250 cm mesafede yapılan üçüncü deneyde bu değer 0,84 MPa' dır. Patlayıcı miktarının 1,43 katına çıkarılıp patlayıcının ölçüm duvarına 50 cm yaklaştırılmasıyla maksimum yansıyan şok basıncının 5,25 katına çıktığı tespit edilmiştir.

Patlayıcı miktarının 1,47 katına çıkarıldığı ve patlayıcı mesafesinin sabit tutulduğu ilk ve son deneyde maksimum yansıyan şok basıncı 1,77 katına çıkarken, patlayıcı miktarının 1,43 katına çıkarıldığı ve patlayıcının ölçüm duvarına 50 cm yaklaştırıldığı ikinci ve dördüncü deneyde maksimum yansıyan şok basıncının 5,25 katına çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca 700 g TNT ve ölçüm duvarına 300 cm mesafede yapılan dördüncü deneyde elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı 0,16 MPa iken 466 g TNT ve ölçüm duvarına 250 cm mesafede yapılan deneyde 0,19 MPa' dır. Patlayıcı miktarı 1,5 katına çıkarılıp, patlayıcı ölçüm duvarına 50 cm uzaklaştırıldığında elde edilen maksimum yansıyan şok basınçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Buradan mesafenin etkisinin patlayıcı miktarına göre daha etkin olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.7' de mükerrer patlama deneylerinde oluşan basınç ölçüm süreleri listelenmiştir. 477 g TNT' nin ölçüm duvarına 300 cm mesafede patlatılmasıyla elde edilen basınç-zaman grafiği incelendiğinde 0,105 s basınç ölçüm süresi kaydedildiği görülmüştür. Patlayıcı miktarının iki katına çıkarıldığı ve patlayıcının ölçüm duvarına 50 cm yaklaştırıldığı ikinci deneyde de basınç ölçüm süresinin 0,105 s olduğu kayıtlardan okunmuştur. Patlayıcı miktarının ikinci deneye göre yarı yarıya azaltıldığı patlayıcı mesafesinin sabit tutulduğu üçüncü deney incelendiğinde ise 0,100 s basınç ölçüm süresi olduğu okunmuştur. 700 g TNT' nin ölçüm duvarına 300 cm mesafede patlatılmasıyla 0,105 s' lik basınç ölçüm süresi meydana geldiği kayıtlardan okunmuştur. İkinci ve üçüncü deneyde kayıtlardan elde edilen basınç ölçüm süreleri karşılaştırıldığında; patlayıcı miktarının yarı yarıya azaltılmasıyla basınç ölçüm süresinde %5 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. İkinci ve üçüncü deneyde kaydedilen basınç ölçüm süreleri karşılaştırıldığında, patlayıcı miktarının %30 oranında azaltılmasına rağmen basınç ölçüm süresinin değişmediği tespit edilmiştir.

Aynı miktarda patlayıcı kullanılan birinci deney ile üçüncü deney karşılaştırıldığında; birinci deneydeki basınç ölçüm süresinin ikinci deneydeki basınç ölçüm süresinden %5 daha büyük olduğu görülmüştür. Bu farklılığın birinci deneyde kapı ve pencere boşluklarının kapalı olması sebebiyle olduğu düşünülmektedir. Bu verilerle patlayıcı miktarındaki azalmaların basınç ölçüm süresinde azalmalar oluşturabileceği görülmüştür. Ayrıca yapı kapalılığının artmasıyla patlama süresinin de arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.7. Mükerrer patlama deneylerinde kaydedilen basınç ölçüm süreleri

Deney Sırası	Patlayıcı (TNT) miktarı	Basınç ölçüm süresi
1	477 g	0,105 s
2	1000 g	0,105 s
3	466 g	0,100 s
4	700 g	0,105 s

Çizelge 3.8’ de gösterilen maksimum yansıyan şok basınçlarının oluşma süreleri incelendiğinde; 1000 g TNT’ nin kullanıldığı ikinci patlama deneyinde 0,0016. s, 700 g TNT’ nin kullanıldığı dördüncü patlama deneyinde 0,0017. s, 466 g TNT’ nin kullanıldığı üçüncü patlama deneyinde 0,0026. s, 477 g TNT’ nin kullanıldığı birinci patlama deneyinde 0,04. s’ de maksimum yansıyan şok basınçlarının oluştuğu kayıtlardan okunmuştur. Bu verilerle birlikte patlayıcı miktarı arttıkça maksimum yansıyan şok basınçlarının da daha erken oluştuğu tespit edilmiştir.

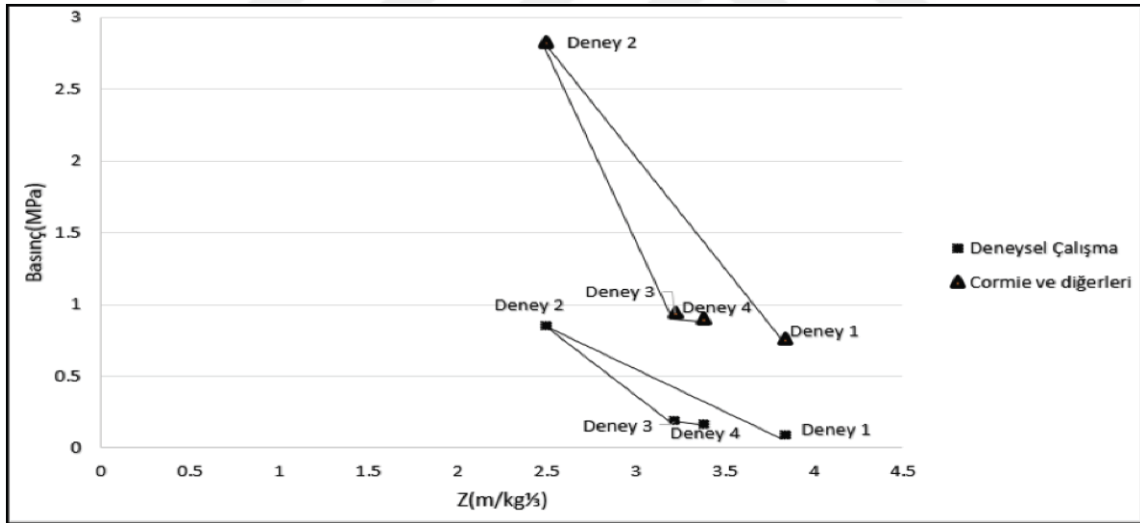
Çizelge 3.8. Mükerrer patlama deneylerinde kaydedilen maksimum yansıyan şok basınçlarının oluşma süreleri

Deney Sırası	Patlayıcı (TNT) miktarı	Maksimum yansıyan şok basınçlarının süresi
1	477 g	0,04 s
2	1000 g	0,0016 s
3	466 g	0,0026 s
4	700 g	0,0017 s

Yapılan deneysel çalışmalardaki patlayıcı miktarı ve patlayıcı mesafesi değişkenlerini temel olarak oluşturulmuş olan, UFC 3-340-02 yönetmeliği ve Cormie ve diğerleri tarafından oluşturulan grafikler ile deneysel verilerin teorik karşılığı araştırılmaya çalışılmıştır. Baker tarafından şok basınçlarının sayısı ve zamana bağlı değişimini içeren modelleme kullanılarak deney sonucu oluşan yansıyan şok basıncı sayısı ve zamana bağlı basınç değişimi ile ilgili değerlendirme yapılmıştır [3,22].

Deneysel çalışmalardaki değişkenler kullanılarak hesaplanan $Z(m/kg^{1/3})$ değeri ilk deneyde 3,83 $m/kg^{1/3}$, ikinci deneyde 2,5 $m/kg^{1/3}$, üçüncü deneyde 3,22 $m/kg^{1/3}$ ve dördüncü deneyde 3,37 $m/kg^{1/3}$ elde edilmiştir. Cormie ve diğerleri tarafından önerilen Şekil 2.4’teki grafik

kullanılarak hesaplanan maksimum yansıyan şok basıncı değerleri deneylerin sırasıyla 0,76 MPa, 2,83 MPa, 0,94 MPa ve 0,90 MPa olarak elde edilmiştir. Deneyler sonucu oluşan maksimum yansıyan şok basınçları sırasıyla 0,09 MPa, 0,84 MPa, 0,19 MPa, 0,16 MPa olarak elde edilmiştir. Deneylerin Z değerlerine göre Cormie ve diğerleri tarafından verilen grafikler kullanılarak hesaplanan maksimum yansıyan şok basınçları ile deneysel çalışma sonucu elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı değerlerinin deney sırası şekilleri Cormie ve diğerlerinin verileriyle karşılaştırılabilmiştir. Bu karşılaştırma Şekil 3.14'te görüldüğü gibi Cormie ve diğerlerinin çalışmaları ile şekilsel olarak benzemekte ancak şiddet olarak farklılık göstermektedir. Deneysel veriler incelendiğinde Cormie ve diğerleri tarafından verilen grafiklere göre hesaplanan maksimum yansıyan şok basınçlarının deneysel çalışma sonucu oluşan maksimum yansıyan şok basınçlarından büyük olduğu görülmüştür. Cormie ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada yapıdaki boşluklar dikkate alınmamıştır. Bu basınç farklılıklarının sebeplerinden birinin de bu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.14. Deneysel çalışmalar sonucu oluşan maksimum yansıyan şok basınçlarının Cormie grafikleri ile karşılaştırılması

UFC 3-340-02 yönetmeliğinde, patlayıcının yapı içerisindeki konumu, patlayıcı miktarı ve yapı biçimine göre belirlenen parametrelerle grafiklerden idealize edilmiş şok basıncı hesaplanmasını amaçlar. UFC 3-340-02 yönetmeliğinde yer alan grafiklerde maksimum Z değeri 4 ft/lb^{1/3}'tür. Bu yönetmelikte sınır değerlerin dışında değerler oluşması durumunda, sınır değeri dikkate alınarak hesaplama önerilmektedir. Deneylerin Z değerleri hesaplandığında ilk deneyde 9,67 ft/lb^{1/3}, ikinci deneyde 6,30 ft/lb^{1/3}, üçüncü deneyde 8,12

ft/lb^{1/3} ve dördüncü deneyde 8,51 ft/lb^{1/3} olarak elde edilmiştir. Patlayıcıların Z değerleri 4 ft/lb^{1/3}'ün üzerinde olduğundan patlayıcının ölçüm duvarına mesafesinin aynı olduğu deneylerde, aynı basınç değerleri alınmak zorunda kalınmaktadır. Bu nedenle, UFC 3-340-02 yönetmeliğiyle hesaplanan idealize edilmiş şok basınçlarıyla deneysel çalışma sonucu oluşan maksimum yansıyan şok basınçlarının değerleri uyum sağlamamaktadır. Mükerrer dört deneyin de ölçeklendirme değeri Z'nin aynı alınması sonucunda, Z değeri kabulünden dolayı bu çalışma kapsamında yapılmış olan dört deneysel çalışmayı kapsamamaktadır. Bu değerlendirme kapsamında hesaplanan parametreler Çizelge 3.9' da verilmiştir. Çizelge 3.9' de yer alan L ve H betonarme odanın iç kenar ölçüleri, R_A patlayıcının ölçüm duvarına olan mesafesi, l patlayıcının ölçüm duvarının karşısındaki duvara mesafesi, h patlayıcının boşluklu duvarlara olan mesafesini ifade etmektedir.

Çizelge 3.9. UFC-3-340-02 yönetmeliği kapsamında hesaplanan parametreler

Deney Sırası	Z(ft/lb ^{1/3})	L/R _A	L/H	l/L	h/H
1	9,67	2,33	1,17	0,5	0,5
2	6,3	2,8	1,17	0,58	0,5
3	8,12	2,8	1,17	0,58	0,5
4	8,51	2,33	1,17	0,5	0,5

Patlamalar sonucu oluşan basınç-zaman grafikleri incelendiğinde Baker yaklaşımındaki üç adet yansıyan basınç oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca grafiklerde yansıyan patlama dalgalarının arasındaki sürenin değişken olduğu ve Baker yaklaşımındaki yansıyan basınçlar arasındaki sürenin sabit olduğu kabulüne uymadığı görülmüştür.

Bu çalışmada yarıstatik basınçlar, negatif basınç oluşumları görülmesi sebebiyle dikkate alınmamıştır. Negatif basınçlar, yapıdaki açıklıklar sebebiyle basıncın atmosfer basıncının altına düşmesiyle oluşmuştur.



4. TEORİK ÇALIŞMA

Teorik çalışmada, mükerrer patlama deneyleri sonucu elde edilen basınç verileri kullanılarak, yapı davranışının dinamik analizle elde edilmesi ve deneysel verilerle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla teorik çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir bilgisayar programı tercih edilmiştir.

4.1. Teorik Çalışmada Kullanılan Bilgisayar Programı

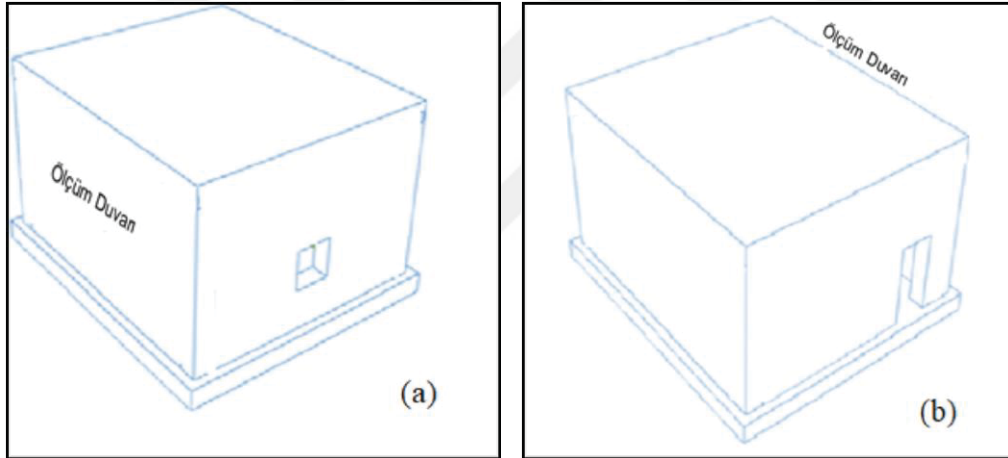
Bu tez çalışmasında ABAQUS adlı sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Abaqus ilk sürümü 1978 yılında piyasa çıkmış bir sonlu elemanlar analizi ve bilgisayar destekli mühendislik yazılımıdır. İsmi ve logosu İngilizce “abacus” ‘ten gelmektedir. Abaqus yazılımı 5 modülden oluşmaktadır.

1. Abaqus/CAE veya “Complete Abaqus Environment” ile makine parçalarının modellenmesi, analizinin yapılması ve sonuçların, görselleştirilmesi yapılır.
2. Abaqus/CFD , hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için modelleme, analiz ve raporlamasını yapan modüldür.
3. Abaqus/ Standart, genel amaçlı implicit analiz yapabileceğiniz bir modüldür.
4. Abaqus/ Explicit ise çarpışma, düşme, patlama gibi nonlineer analizlerin yapılabilirdiği modüldür.
5. Abaqus/ Elektromagnetic ise ileri elektromanyetik problemlerin çözümünün yapılabilirdiği modüldür.

Abaqus otomotiv, uzay, savunma ve makina sanayi gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Geniş malzeme modelleme yeteneklerinin diğer progamlara göre daha üstün olması nedeniyle akademik çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır [33].

4.2. Betonarme Odaanın Modellenmesi

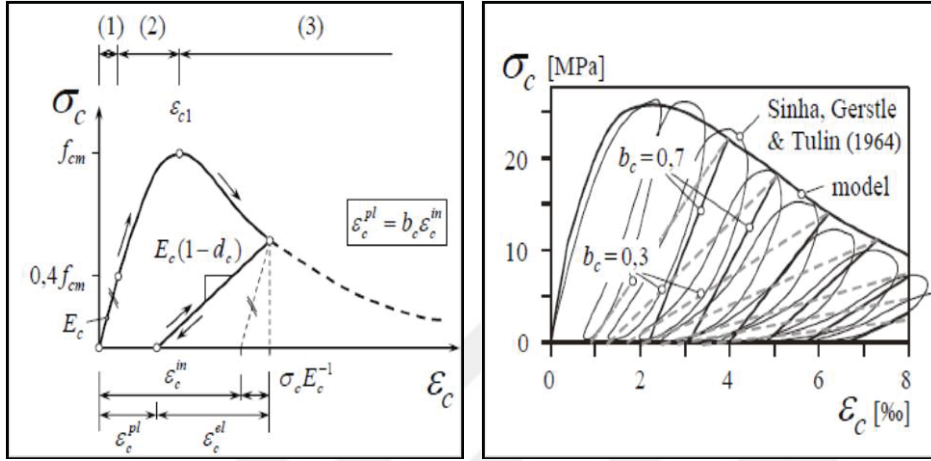
Betonarme oda ABAQUS 6.13.1’de Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi üç boyutlu olarak modellenmiştir. Basınca dayanıklı kapalı gözlem penceresi yapı duvarı olarak dikkate alınmıştır. Betonarme elemanın modellemesinde C3D8R tipi eleman, donatı modellemesinde B31 tipi eleman kullanılmıştır. C3D8R integrasyonu indirgenmiş lineer hekza hedral 8 noktalı kutu elemanı, B31 ise iki noktalı kiriş elemanıdır. C3D8R elemanının dezavantajı ise modeli oluşturan bazı elemanlarda elde edilen gerilme değerlerinin sıfır çıkması ve bu elemanlarda gerçek dışı deformasyonların görülmesidir. Bu durumun çözülmesi için dilimleme(mesh) aşamasında hourglass kontrolü yapılmalıdır [34].



Şekil 4.1. (a) Abaqus modeli önden görünüş (b) Abaqus modeli arkadan görünüş

Beton basınç modeli için Birtel, Mark modeli çekme için Hordijk tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Eş. 4.1, Eş. 4.2 ve Eş. 4.3 kullanılarak beton modeli için gerilme şekil değiştirme eğrisi oluşturulabilir. Şekil 4.2’ de gösterildiği gibi ilk iki bölüm ε_{c1} ’ deki f_{cm} tepe yüküne kadar yükselen bir dalı tanımlar. Üçüncü ve inen dal, meshten bağımsız simülasyon sonuçlarını doğrulamak için modelin geometrisine olan bağımlılığını hesaba katar. Böylece $\sigma_{c(3)}$ fonksiyonunda, Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanabilen γ_c iniş fonksiyonuyla malzeme özelliği olarak eleman meshinden türetilen iç uzunluk parametresi l_{eq} ’ ye ek olarak Eş. 4.5 kullanılarak hesaplanabilen sabit ezilme enerjisi G_{cl} ’ de hesaba katılmış olur. Eş. 4.5’ te yer alan f_{ct} betonun çekme dayanımını, G_f ise betonun kırılma enerjisini ifade eder. b_c sabit değeri, şekilde görüldüğü gibi 0,7 olarak deneylerle

belirlenmiştir [35]. Denklemlerde yer alan ε_{c1} değeri için 0,0022 kullanılır. Denklemlerde kullanılan E_{ci} betonun 28 gün sonra elde edilen elastisite modülünü, E_c betonun elastisite modülünü, f_{cm} betonun basınç dayanımını, ε_c betonun şekil değiştirme oranını ifade eder. E_{ci} Eş. 4.6 kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 4.2. Basınç yüklemesi altında gerilme- şekil değiştirme ilişkisi (Sinha ve diğerleri, 1964)

$$\sigma_{c(1)} = E_c \varepsilon_c \quad (4.1)$$

$$\sigma_{c(2)} = \frac{E_{ci} \frac{\varepsilon_c}{f_{cm}} - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})}{1 + (E_{ci} \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} f_{cm} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{c(3)} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_{cm} \varepsilon_{c1}}{2 f_{cm}} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\gamma_c \varepsilon_c^2}{2 \varepsilon_{c1}} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

$$\gamma_c = \frac{\pi^2 f_{cm} \varepsilon_c}{2 \left[\frac{G_{cl}}{l_{eq}} - 0,5 f_{cm} \left(\varepsilon_c (1 - b) + b \frac{f_{cm}}{E_c} \right) \right]^2} \quad (4.4)$$

$$G_{cl} = (f_{cm} / f_{ct})^2 G_F \quad (4.5)$$

$$E_c = 0,85 E_{ci} \quad (4.6)$$

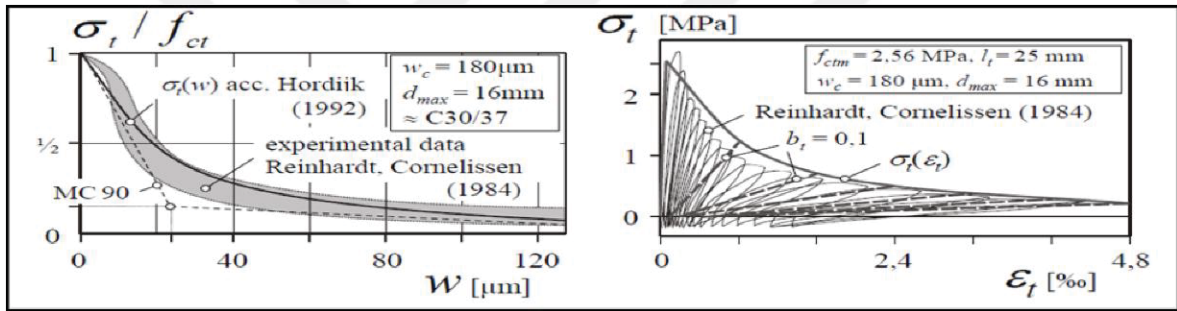
Çekme yüklemesi altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, f_{ct} 'ye kadar uzanan lineer bir bölüm ve geometriye bağlı lineer olmayan şekilde azalan bir bölüm içerir. Eş. 4.7, Eş. 4.8,

ve Eş. 4.9 kullanılarak gerilme- çatlak açılma ilişkisi hesaplanabilir. Denklemlerde kullanılan w_c kırılma anındaki çatlak açıklığını, w çatlak açıklığını, σ_{t0} betonun kırılma anındaki çekme gerilmesi, ε_{t0} kırılma anındaki şekil değiştirme oranını ifade eder. c_1 katsayısı ve c_2 katsayısı sabit değerlerdir. c_1 katsayısının 3 ve c_2 katsayısının 6,93 olarak alınması önerilmiştir [35].

$$\frac{\sigma_t(w)}{\sigma_{t0}} = [1 + (c_1 w/w_c)^3] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (4.7)$$

$$w_c = 5,14 G_F / \sigma_{t0} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} + w/l_{eq} \quad (4.9)$$



Şekil 4.3. Çekme yükü için gerilme- çatlak genişliği ve gerilme- şekil değiştirme ilişkisi [35]

b_t sabit değeri, Şekil 4.3' te görüldüğü gibi deneylerle 0,1 olarak belirlenmiştir. Betonun plastik hasar parametreleri literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [35]. Betonun plastik hasar parametreleri Çizelge 4.1' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Plastik hasar parametreleri [35]

Dilatasyon açısı (ψ)	İki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımına oranı (α_f)	Akış potansiyeli açısı (ξ)	İkinci gerilme değişkenlik oranı (K_c)
30°	1,16	0,1	0,67

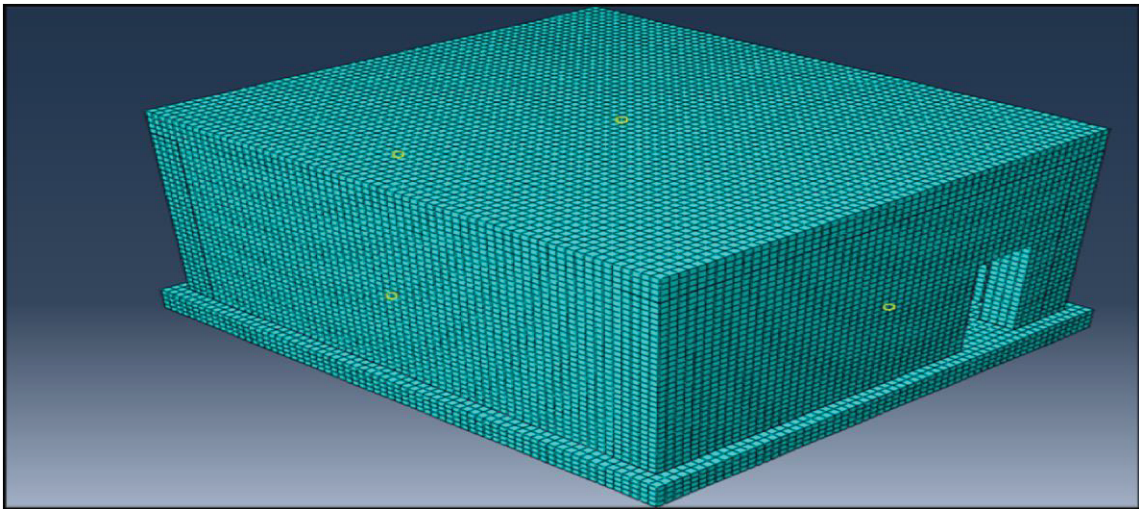
Betonun elastik parametrelerinde TS-500 yönetmeliği kullanılmıştır [36]. Betonun elastisite modülü 32000 MPa ve poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır. Betonun basınç ve

çekme hasarı hesabında Abaqus dokümanlarında yer alan Eş. 4.11 ve Eş. 4.12 denklemleri kullanılmıştır [37]. d_t çekme hasar parametresini, d_c basınç hasar parametresini, ε_t^{pl} çekme altında plastik şekil değiştirme oranını, ε_c^{pl} basınç altındaki plastik şekil değiştirme oranını ifade eder.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (4.11)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (4.12)$$

Betonarme odanın beton ve donatı verileri kullanılarak beton ve donatı modelleri oluşturulmuştur. Bu işlemten sonra betonarme odanın tüm elemanları konumlarına göre yerleştirilmiştir. Constraints sekmesinden donatılar, beton elemanların içerisine yerleştirilerek betonarme elemanlar oluşturulmuştur. Betonarme elemanların birbirlerine etkileşimlerini sağlamak için constraints sekmesinden temas eden yüzeyler seçilerek ‘tie’ seçeneğiyle birbirine bağlanmıştır. Elemanların etkileşimi sağlandıktan tüm model meshlenmiştir. Yakınsama çalışması yapılarak 100 mm dilimleme (mesh) uygulamasının yeterli olduğu görülmüştür. Dilimleme (mesh) işleminde hourglass kontrolü yapılarak gerçek dışı deformasyonların oluşması engellenmiştir. Dilimleme işlemi sonucu 184.174 adet eleman elde edilmiştir. Betonarme odanın temelinin alt yüzeyine ankastre mesnet tanımlaması yapılmıştır. Şekil 4.4’ te görüldüğü gibi Abaqus programında betonarme odanın sonlu eleman modeli hazırlanmıştır.



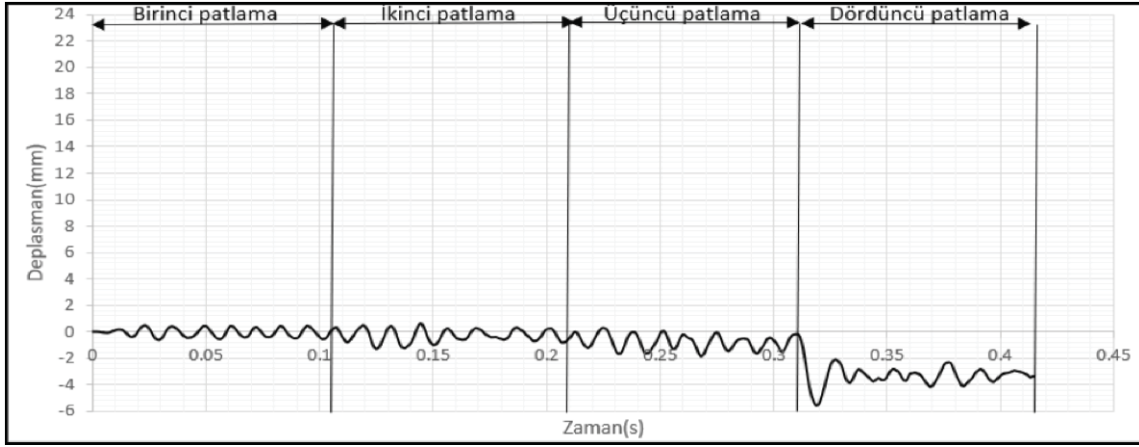
Şekil 4.4. Betonarme odanın sonlu eleman modeli

4.3. Dinamik Analiz Verilerinin Değerlendirilmesi

Mükerrer patlamaların tek yönlü tekrarlanan yükler olması sebebiyle betonarme oda ABAQUS programında dinamik olarak analiz edilmiştir. Mükerrer patlamaların dinamik analizini yapabilmek için ABAQUS’ te dört adet dynamic explicit analiz tanımlanmıştır. Her bir analiz için tanımlanacak yükleme sürelerinde, deneyler sonucu elde edilen basınç-zaman grafiklerindeki yük süreleri dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen basınç- zaman grafikleri ‘amplitude’ sekmesine veri olarak girilmiştir.

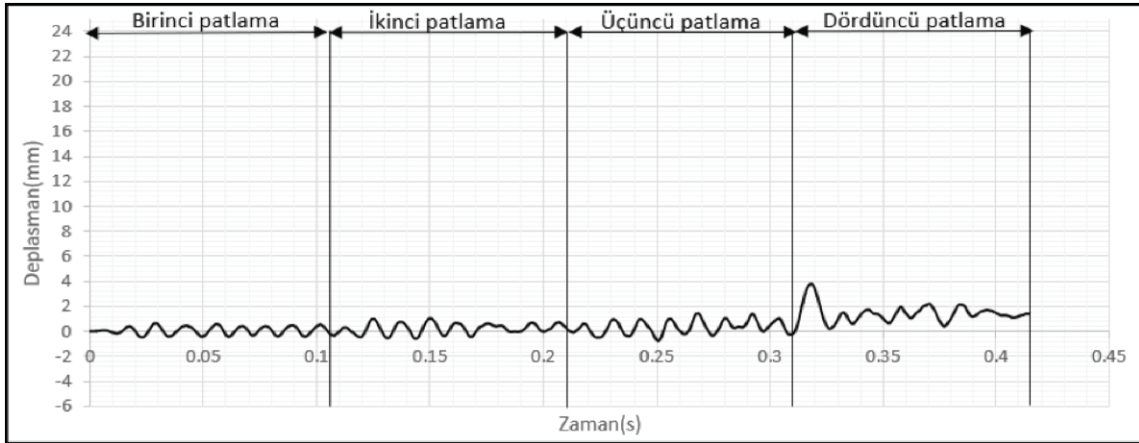
Deneylele yalnızca ölçüm duvarından basınç kaydı alınabildiği için diğer betonarme oda elemanlarında oluşacak basıncın tahminin yapılması gerekmektedir. Basınç tahminleri için maksimum yansıyan şok basınçlarının karşılaştırıldığı grafikte, deney sırası şekillerinin uyum sağladığı Cormie ve diğerleri tarafından önerilen grafikleme kullanılmıştır. Cormie ve diğerlerine göre betonarme oda elemanlarında oluşacak maksimum yansıyan şok basıncı değerleri hesaplanmıştır. Ölçüm duvarı için hesaplanan maksimum yansıyan şok basıncının, diğer betonarme oda elemanlarında elde edilen maksimum yansıyan şok basınçlarına oranı bir yük çarpanı olarak belirlenmiştir. Elde edilen yük çarpanı ABAQUS programında betonarme oda elemanlarına yüklerin uygulandığı sekmede, basınç-zaman grafiklerine uygulanarak dinamik analiz yapılmıştır.

Ortalama 0,1 s olmak üzere mükerrer dört patlamanın yapıya dinamik olarak uygulanmasıyla elde edilen deplasman zaman grafikleri her bir duvar ve tavan döşemesi için ayrı ayrı grafik olarak Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’ da gösterilmiştir. Şekil 4.5’ de dört patlamanın yapıya mükerrer olarak uygulanmasıyla ölçüm duvarının merkezinde oluşan deplasman-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde birinci patlamada -0,6 mm maksimum deplasman, ikinci patlamada -1,3 mm maksimum deplasman, üçüncü patlamada -1,9 mm maksimum deplasman, dördüncü patlamada -5,6 mm maksimum deplasman oluşmuştur.



Şekil 4.5. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda ölçüm duvarının merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği

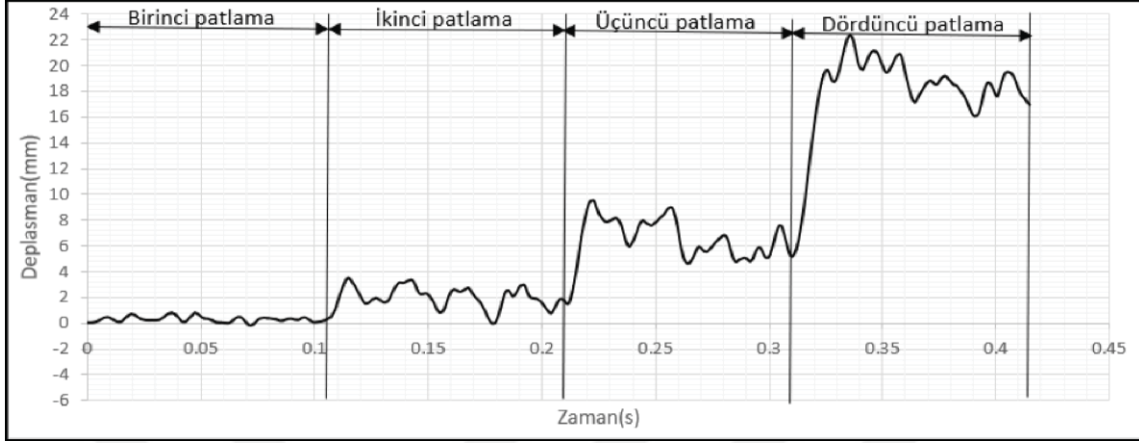
Şekil 4.6' da dört patlamanın yapıya mükerrer olarak uygulanmasıyla ölçüm duvarının karşısındaki arka duvarın merkezinde oluşan deplasman-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde birinci patlamada 0,6 mm maksimum deplasman, ikinci patlamada 1,1 mm maksimum deplasman, üçüncü patlamada 1,5 mm maksimum deplasman, dördüncü patlamada 3,8 mm maksimum deplasman oluşmuştur.



Şekil 4.6. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda arka duvarın merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği

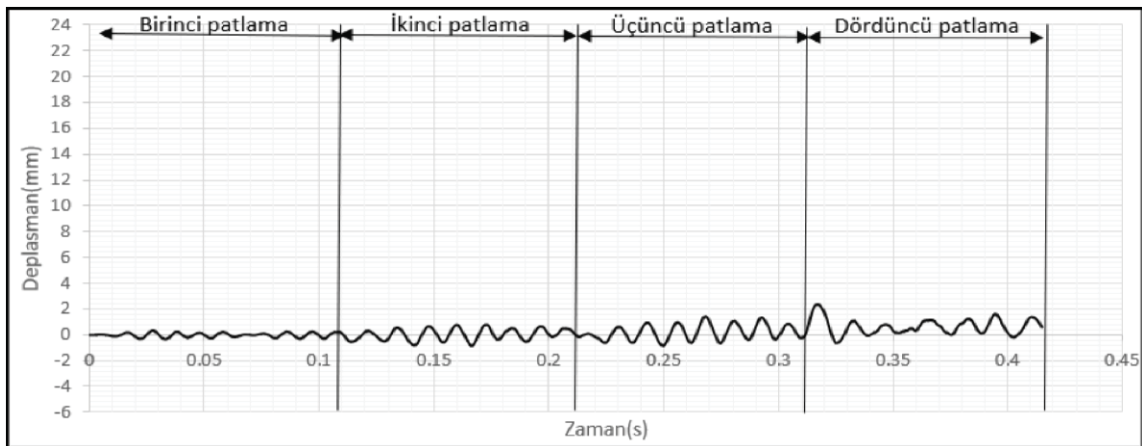
Şekil 4.7' da dört patlamanın yapıya mükerrer olarak uygulanmasıyla tavan döşemesinin merkezinde oluşan deplasman-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde birinci patlamada 0,7 mm maksimum deplasman, ikinci patlamada 3,5 mm maksimum deplasman, üçüncü patlamada 9,5 mm maksimum deplasman, dördüncü patlamada 13,5 mm maksimum deplasman oluşmuştur. Döşemede oluşan deplasmanın 22,3 mm değerine

ulaştığı ve son deneyde patlayıcı miktarının 1000 g'dan 700 g'a düşürülmesinin doğru bir seçim olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.7. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda tavan döşemesinin merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği

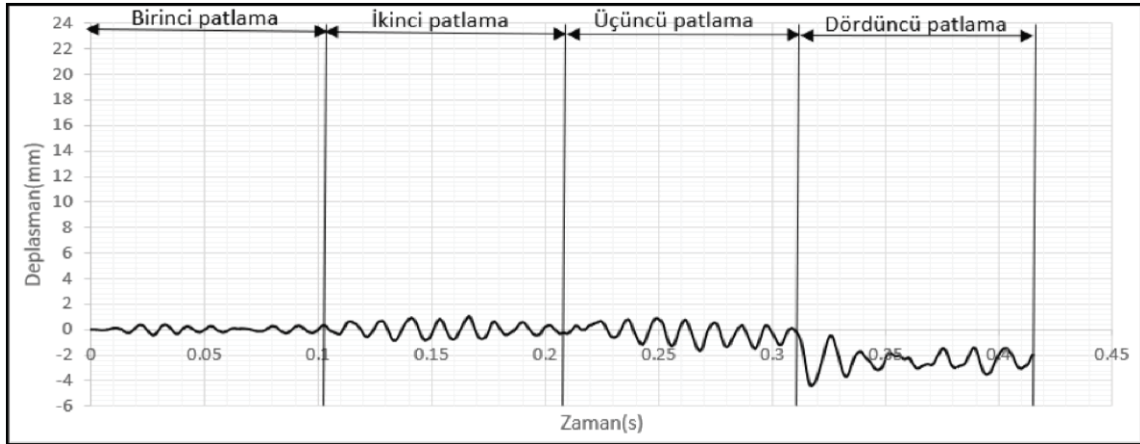
Şekil 4.8' de dört patlamanın yapıya mükerrer olarak uygulanmasıyla kapı boşluğuna sahip betonarme duvarın merkezinde oluşan deplasman-zaman grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde birinci patlamada 0,3 mm maksimum deplasman, ikinci patlamada -0,9 mm maksimum deplasman, üçüncü patlamada 1,4 mm maksimum deplasman, dördüncü patlamada 2,4 mm maksimum deplasman oluşmuştur.



Şekil 4.8. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda kapı boşluğuna sahip betonarme duvarın merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği

Şekil 4.9' da dört patlamanın yapıya mükerrer olarak uygulanmasıyla pencere boşluğuna sahip betonarme duvarın merkezinde oluşan deplasman-zaman grafiği verilmiştir. Grafik

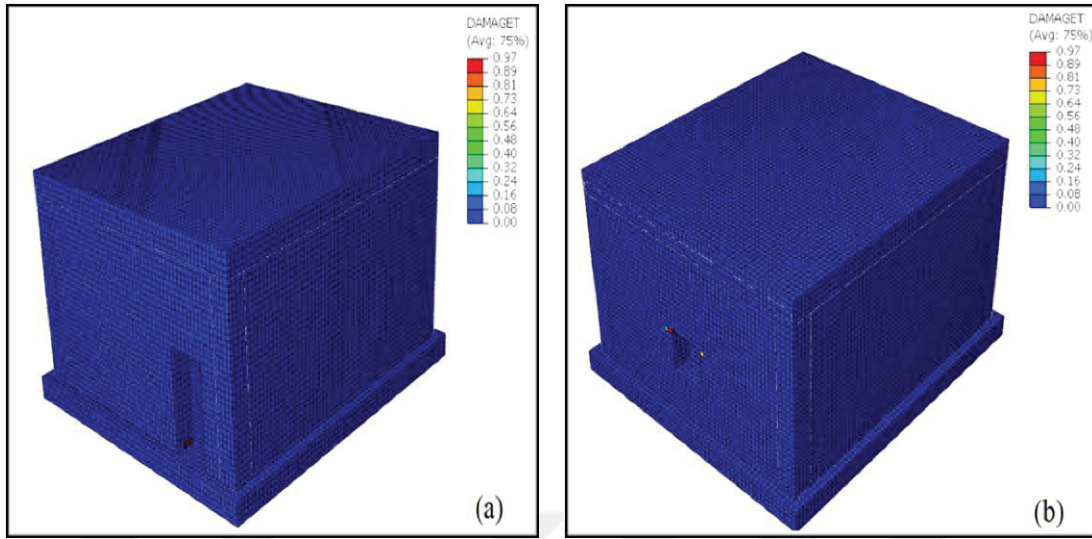
incelendiğinde birinci patlamada -0,4 mm maksimum deplasman, ikinci patlamada 1 mm maksimum deplasman, üçüncü patlamada -1,7 mm maksimum deplasman, dördüncü patlamada -4,4 mm maksimum deplasman oluşmuştur.



Şekil 4.9. Mükerrer patlama yüklerinin dinamik analizi sonucunda pencere boşluğuna sahip betonarme duvarın merkezinde elde edilen deplasman-zaman grafiği

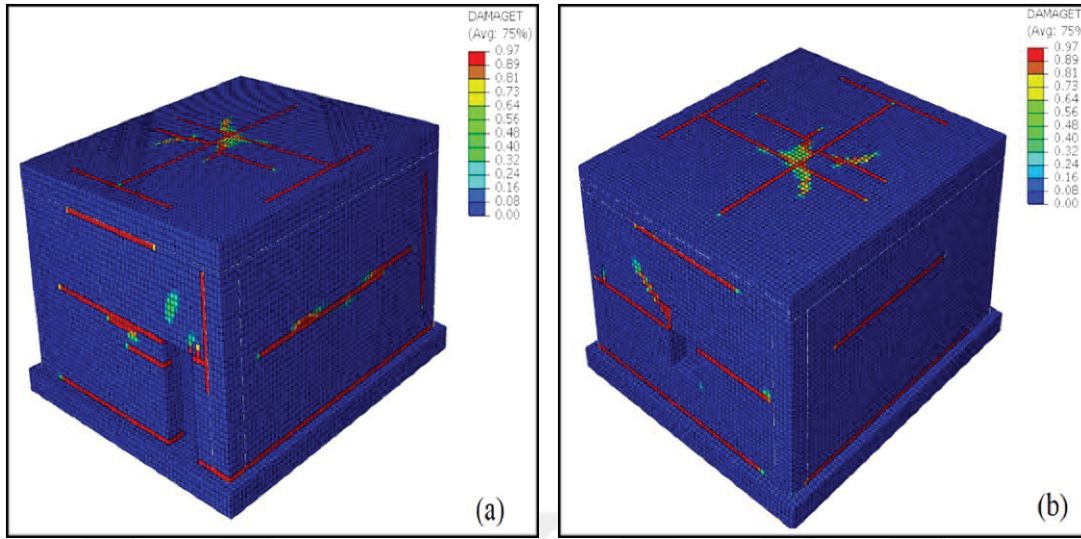
Betonarme odanın tavan döşemesinin betonarme duvarlara göre patlamadan daha fazla etkilendiği görülmüştür. Bu durum tek yönlü tekrarlanan patlama yükü nedeniyle projelendirmedeki çekme ve basınç bölgelerinin yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13' te mükerrer patlamaların dinamik analizle yüklenmesiyle, betonarme odada oluşan çekme çatlakları gösterilmiştir. İlk patlama sonrası yapı elemanlarının genelinde hasar oluşmamıştır. Yalnızca pencere boşluğunun kenarında 10 cm ve 20 cm uzunluğunda simetrik çekme çatlakları oluşmuştur. İlk patlama deneyinde betonarme odada yapısal hasar gözlenmemiştir.



Şekil 4.10. Birinci patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş

Dinamik analiz ile ikinci patlamanın çözümünde tavan döşemesinin merkezinde, ölçüm duvarı ile boşluksuz duvarın doğrultusunda 6 m uzunluğunda bir çatlak elde edilmiştir. Ölçüm duvarında, merkezden kapı boşluğuna sahip betonarme duvar ile pencere boşluğuna sahip betonarme duvar doğrultusunda yaklaşık 6 m uzunluğunda, boşluksuz betonarme duvarın merkezinden betonarme duvarlara doğru uzayan yaklaşık 3,4 m uzunluğunda çatlaklar elde edilmiştir. Tavan döşemesinin ve ölçüm duvarının merkezlerinde diyagonal yönde uzayan çatlaklar elde edilmiştir. Ayrıca betonarme perdelerde yer alan boşlukların kenarlarında ve betonarme perdelerin birleşim bölgelerinde çatlaklar elde edilmiştir. Bu çatlaklar Şekil 4.11’ da gösterilmiştir.

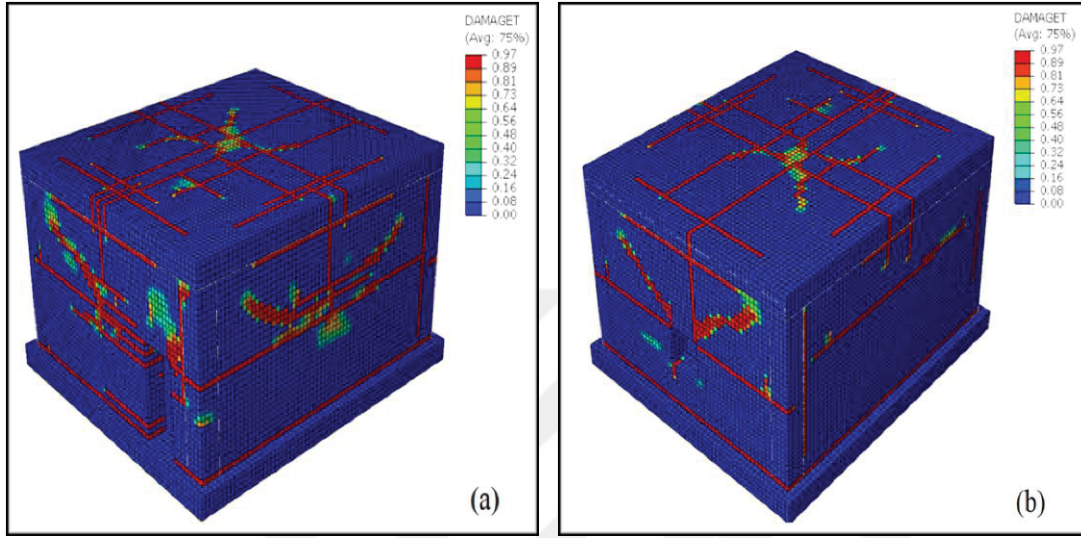


Şekil 4.11. İkinci patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş

İkinci patlamanın dinamik çözümü ile elde edilen ve ikinci patlama deneyi sonucu betonarme odada ölçülen çatlaklar incelendiğinde; deneysel çalışma sonucu ölçüm duvarında ölçülen çatlakların uzunluğunun dinamik analizle elde edilen çatlakların uzunluğuna çok yakın olduğu görülmüştür. Ancak deneysel çalışmada meydana gelen diyagonal çatlağın dinamik analizde oluşmadığı tespit edilmiştir. Tavan döşemesinin merkezinde kenar doğrultuları boyunca uzanan çatlaklar hem deney de hem de dinamik analizde elde edilmiştir. Tavan döşemesinin merkezinde diyagonal olarak ilerleyen çatlakların uzunluğu dinamik analizde 1 m iken deneyde 4 m' dir. Tavan döşemesinin betonarme duvarlarla birleştiği bölgedeki çatlaklar karşılaştırıldığında, dinamik analizle elde edilen çatlağın uzunluğu deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlağın uzunluğuna yakındır. Kapı boşluğu kenarında dinamik analizde deneysel ölçüme göre sayıca daha fazla çatlak elde edilmiştir. Pencere boşluğuna sahip duvarın boşluk kenarında oluşan çatlaklarının uzunluğu karşılaştırıldığında; dinamik analizle elde edilen çatlak uzunluğu deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlak uzunluğunun 1,5 katıdır. Ölçüm duvarının karşısındaki duvarın merkezinde oluşan çatlaklar incelendiğinde; dinamik analizle elde edilen çatlakların uzunluğu deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlak uzunluklarının 1,7 katıdır.

Üçüncü patlamanın dinamik analizinde tavan döşemesinin merkezinden diyagonal yönde 4,5 m uzunluğunda çatlak elde edilmiştir. Ölçüm duvarının tavan döşemesi ile birleştiği

bölgede 3,8 m uzunluğunda çatlak elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda betonarme oda elemanlarında diyagonal yönde oluşan çatlak boylarının arttığı görülmüş ve birleşim bölgelerinde yeni çatlaklar elde edilmiştir. Söz konusu çatlaklar Şekil 4.12’ de gösterilmiştir.

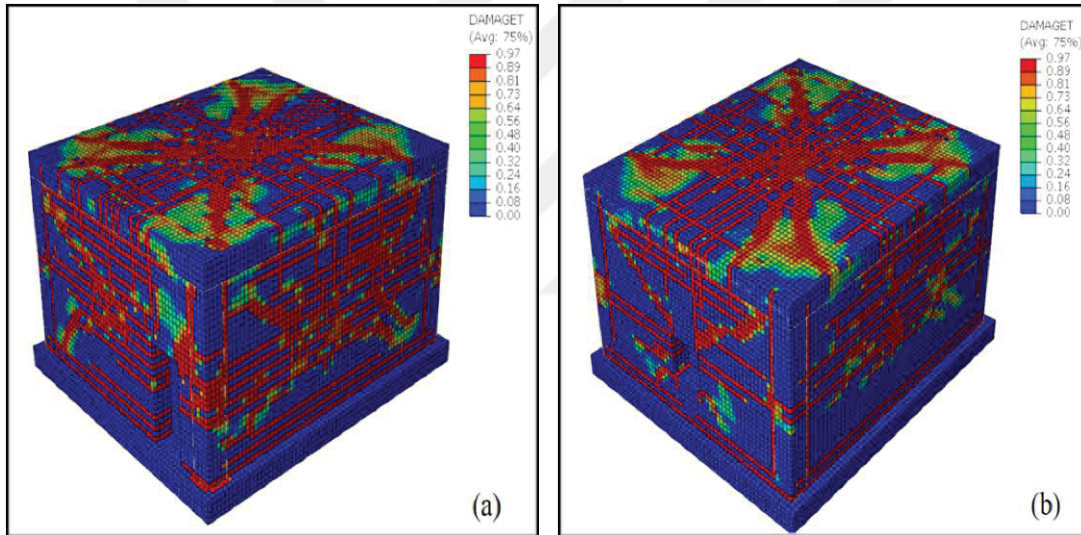


Şekil 4.12. Üçüncü patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş

Üçüncü patlamanın dinamik analizinde elde edilen çatlaklarla deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlaklar karşılaştırılmıştır. Tavan döşemesinde dinamik analizle elde edilen çatlakların x şeklinde çatlak krokisi oluşturduğu deneysel ölçümde bu çatlak krokisinin ikinci patlamada meydana geldiği tespit edilmiştir. Tavan döşemesinin merkezinde kenar doğrultularınca tespit edilen çatlaklar, aynı bölgede deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlaklardan sayıca fazladır. Bu patlamada; ölçüm duvarının dinamik analiziyle elde edilen çatlaklar, deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlak boylarının 1,05-1,11 katıdır. Pencere boşluğuna sahip duvarda dinamik analizde çatlak sayısı artarken, deneysel çalışmada meydana gelen çatlak sayısında değişiklik olmamıştır. Pencere boşluğunun kenarında mevcut olan çatlağın hem dinamik analizde hem de deneysel çalışmada ilerlediği tespit edilmiştir. Dinamik analizle elde edilen bu çatlağın boyu deneysel çalışma sonucu meydana gelen aynı bölgedeki çatlak boyunun 1,25 katıdır. Kapı boşluğuna sahip betonarme duvarda, dinamik analizle elde edilen çatlakların deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlaklardan sayıca fazla olduğu tespit edilmiştir. Dinamik analizle elde edilen çatlakların deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlak boylarının 1,15-1,2 katı olduğu tespit edilmiştir. Ölçüm duvarının karşısındaki duvar incelendiğinde;

bu duvarın dinamik analiziyle elde edilen çatlaklarla deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlakların aynı bölgede olduğu tespit edilmiştir. Bu duvarda; dinamik analizle elde edilen çatlakların uzunluğu deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlakların uzunluğunun 1,5-2 katı olduğu tespit edilmiştir.

Dördüncü patlama sonrası tavan döşemesinin merkezinden köşe birleşimlerine doğru çatlakların köşelerle birleşerek x şeklinde çatlak krokisi oluşturduğu görülmüştür. Ölçüm duvarının tavan döşemesi ile birleştiği bölgedeki çatlak 1,75 m uzamıştır. Ölçüm duvarının kapı boşluğuna sahip betonarme duvar ile birleştiği bölgedeki çatlak 2 m uzamıştır. Diğer betonarme duvarlarda da diyagonal çatlakların uzayarak kenarlarda oluşan çatlaklarla birleştiği Şekil 4.13' te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Dördüncü patlamanın dinamik analizi sonucunda betonarme odadaki çekme çatlaklarının görünüşü (a) Ön görünüş (b) Arka görünüş

Dördüncü patlama deneyi sonucunda ölçümlerle elde edilen çatlak krokileriyle, dördüncü patlama deneyinin dinamik çözümüyle elde edilen çatlaklar değerlendirildiğinde; son patlamada hem ölçümlerle tespit edilen deneysel çatlak krokisinde hem de dinamik analiz çözümüyle elde edilen çatlak krokilerinde aşağı yönde diyagonal çatlakların olduğu tespit edilmiştir. Ölçüm duvarındaki bu çatlakların dinamik analizle elde edilen çatlak boyu deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlakların boyunun 1,06 katıdır. Kapı boşluğuna sahip betonarme perdede, dinamik analizle elde edilen aşağı diyagonal yönlerde oluşan çatlakların uzunlukları deneysel patlamalar sonucu meydana gelen çatlakların uzunluğunun 1,96 katıdır. Pencere boşluğuna sahip betonarme perdede, dinamik analizle elde edilen

aşağı diyagonal yönlerde oluşan çatlakların uzunlukları deneysel patlamalar sonucu meydana gelen çatlağın uzunluğunun 1,44 katıdır. Ölçüm duvarının karşısındaki duvarda deneysel çalışmada 1 m dinamik analizde 2 m uzunluğunda diyagonal çatlak meydana gelmiştir.

Deney olarak elde edilen yapı davranışı ile uluslararası standart ve yönetmelikler kullanılarak yapılan dinamik analizler karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlak yerleri ve şekillerinin, dinamik analiz sonucu elde edilen çatlak yerleri ve şekilleriyle paralellik gösterdiği görülmüştür. Ancak dinamik analiz sonucunda elde edilen çatlak boylarının deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlak boylarına oranının 1,5 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dinamik analiz sonucunda elde edilen çatlak sayısının deneysel çalışmaya göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada mükerrer iç patlama yüklerinin betonarme yapılarda oluşturacağı etkilerin deneysel olarak araştırılması yapılmıştır ve teorik çalışmayla desteklenmiştir.

Birinci patlama deneyinde çatlak meydana gelmemesinin ana nedeni, patlama deneylerinin yapı üzerindeki sonuçları kestirilemediğinden betonarme odanın 50 cm kalınlığında betonarme döşeme ve 50 cm kalınlığında betonarme duvarlardan oluşmasıdır.

İkinci patlama deneyinde biri patlayıcıya 250 cm mesafede diğeri 350 cm mesafede olan özdeş duvarlarda ölçülen çatlaklar karşılaştırıldığında; patlayıcıya 250 cm mesafede olan duvarda 5,8 m uzunluğunda çatlak meydana gelirken patlayıcıya 350 cm mesafedeki duvarda 2 m uzunluğunda çatlak oluşmuştur. Duvarların patlayıcıya olan mesafesindeki bu küçük değişim bile davranışta yaklaşık 3 katı çatlak boyu oluşturmaya neden olmuştur. Yapılan basınç ölçümlerinde ise, aynı patlayıcı miktarlarına sahip birinci ve üçüncü deneylerde patlayıcı mesafesinin 300 cm' den 250 cm' ye indirilmesiyle maksimum şok basıncı 0,09 Mpa'dan 0,19 Mpa' a çıkarak yaklaşık 2 katına çıkmıştır.

Aynı patlayıcı mesafelerine sahip ikinci ve üçüncü patlama deneylerinde ölçüm duvarında diyagonal yönde tespit edilen çatlaklar karşılaştırıldığında; 1000 g TNT'nin kullanıldığı ikinci patlama deneyinde 1 m uzunluğunda çatlak oluşurken patlayıcı miktarının 466 g'a indirildiği üçüncü patlama deneyinde çatlak uzunluğunun 1,3 m' ye çıktığı tespit edilmiştir. Patlayıcı miktarındaki yarı yarıya azalmayla birlikte çatlak ilerlemesi çatlak boyunun yaklaşık 0,5 katı olmuştur. Yapılan basınç ölçümlerinde ise, ikinci ve üçüncü patlama deneylerinde maksimum şok basıncı 0,84 Mpa' dan 0,19 MPa' a inmiştir. Patlayıcı miktarının yarıya indirilmesiyle ise maksimum şok basıncı yaklaşık 3,5 kat azalmıştır. Bu sonuçla patlayıcı mesafesi değişkeninin yapısal hasarda patlayıcı miktarına göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

İki yan duvar yapısal hasar bakımından karşılaştırıldığında, pencere boşluğu kapı boşluğundan küçük olmasına rağmen yapısal hasar bakımından betonarme duvarın daha fazla hasara uğramasına neden olmuştur. Pencere boşluğu duvarın tam orta noktasına gelerek zarf eğrilerinin birleşim yerine tekabül etmiştir. Bu nedenle çatlakların ilerlemesine

yardımcı olmuştur. Kapı boşluğu yan duvarın kenar ve alt bölgesinde yer almaktadır. Patlamalar sonrasında bu boşluktan hem gaz ve basınç tahliye olmuştur. Hem de duvar zarf eğrisinin nispeten dışında kaldığı için hasar seviyesi artmamıştır.

Deneyler sonucunda tavan döşemesi ile diğer betonarme oda elemanlarında meydana gelen çatlaklar karşılaştırıldığında; tavan döşemesi ve ölçüm duvarında ikinci patlamada çatlak zarfı belirgin hale gelirken diğer betonarme oda elemanlarında bu durum dördüncü patlama sonucunda meydana gelmiştir.

Patlama deneyleri sonucu kaydedilen basınç-zaman grafikleri değerlendirildiğinde; patlayıcı miktarı 477 g' dan 700 g' a çıkarıldığında maksimum şok basıncı 0,09 Mpa'dan 0,16 Mpa'a yani yaklaşık olarak 2 katına çıktığı, patlayıcı miktarı 466 g' dan 1000 g' a çıktığında maksimum yansıyan şok basıncının 0,19 Mpa'dan 0,84 MPa çıkarak yaklaşık 4,5 katına çıktığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu verilerle sabit mesafeler altında patlayıcı miktarı ile maksimum yansıyan şok basınçları arasındaki bağlantının Şekil 3.13' te verildiği gibi doğrusal değil logaritmik olduğu tespit edilmiştir.

Patlama deneyleri sonucu kaydedilen basınç-zaman grafikleri değerlendirildiğinde; patlayıcı miktarının 477 g' dan 700 g'a çıkarıldığı ve patlayıcı mesafesinin sabit tutulduğu ilk ve son deneyde maksimum şok basıncı 0,09 MPa' dan 0,16 MPa' a çıkarak yaklaşık 1,5 katına çıkarken, patlayıcı miktarının 700 g'dan 1000 g' a çıkarıldığı patlayıcının ölçüm duvarına mesafesinin 300 cm' den 250 cm' ye indirildiği dördüncü ve ikinci deneyde maksimum yansıyan şok basıncının 0,16 MPa' dan 0,84 MPa' a çıkarak yaklaşık 5 katına çıktığı belirlenmiştir. Patlayıcı miktarının 466 g'dan 700 g' a çıkarılarak 1,5 katına çıkarıldığı, patlayıcının ölçüm duvarına mesafesinin 250 cm' den 300 cm' e çıkarıldığı üçüncü ve dördüncü deneyde kaydedilen maksimum şok basınçlarının 0,19 MPa ve 0,16 MPa olduğu tespit edilmiştir. Buradan mesafenin etkisinin patlayıcı miktarına göre maksimum şok basıncı davranışında daha etkin olduğu görülmektedir.

Piezoelektrik basınç sensöründen elde edilen kayıtlar değerlendirildiğinde; patlayıcı miktarının 1000 g' dan 466 g' a yarı yarıya azaltılmasıyla basınç ölçüm süresi 0,105 s' den 0,100 s' ye düşerek % 5 oranında azalma olduğu ancak patlayıcı miktarının 1000 g' dan 700 g' a %30 oranında azaltılmasına rağmen basınç ölçüm süresinin değişmediği tespit

edilmiştir. Bu verilerle patlayıcı miktarındaki azalmaların basınç ölçüm süresinde azalmalar oluşturabileceği tespit edilmiştir.

Aynı patlayıcı miktarlarına sahip deneyler karşılaştırıldığında kapı ve pencerelerin mevcut olduğu 477 g TNT' nin patlatıldığı birinci patlama deneyindeki basınç ölçüm süresi 0,105 s iken, kapı ve pencerelerin mevcut olmadığı 466 g TNT' nin kullanıldığı üçüncü patlama deneyindeki basınç ölçüm süresi 0,100 s' dir. Bu sonuçlarla yapıda çelik kapı ve pencerelerin yerinde olmaması durumunda basınç ölçüm süresinin %5 azaldığı ve patlama sonrası oluşan basınç ve gaz ürünlerinin daha hızlı tahliye olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışma sonucu kaydedilen maksimum yansıyan şok basıncı değerinin Cormie ve diğerleri tarafından önerilen grafiklemeye elde edilen maksimum yansıyan şok basıncı değerleri ile deney sıralarına göre grafiksel olarak karşılaştırıldığında; sonuçların şekilsel olarak benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ancak şiddet olarak Cormie ve diğerlerinde deney sırasına göre 0,76 MPa, 2,83 MPa, 0,94 MPa ve 0,90 MPa maksimum şok basıncı değerleri elde edilirken deneysel çalışmada 0,09 MPa, 0,84 MPa, 0,19 MPa ve 0,16 MPa değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlarla, deneysel verilerle Cormie ve diğerlerinin sonuçlarının şiddet olarak yaklaşık %300 oranında farklılık gösterdiği görülmüştür. Cormie ve diğerlerinin çalışmasında yapısal boşluklar dikkate alınmamıştır. Basınç farklılıklarının muhtemel sebeplerinden biri de pencere ve kapının patlama sonucunda betonarme odada mevcut olmaması olabilir.

Yönetmelikteki sınır değer kabulünden dolayı bu çalışma kapsamında yapılmış olan dört deneyi kapsamadığı görülmüştür. Deneysel verilerdeki Z değerinin UFC 3-340-02(2008) yönetmeliğinde sınır değer olan 4 ft/lb^{1/3}'ten büyük olması ve yönetmeliğin sınır değer üstündeki durumlar için sınır değer dikkate alınması kabulünden dolayı patlayıcının ölçüm duvarına olan mesafesinin aynı olduğu deneylerde aynı basınç değerlerini verecektir. Dolayısıyla UFC 3-340-02 yönetmeliğinde Z değerinin 4' ten büyük olduğu durumlarda, patlama basıncının patlayıcı miktarından bağımsız olduğu sonucu çıkmaktadır.

Deneysel gözlem ve ölçümler ile elde edilen yapı davranışı ile mükerrer patlamaların dinamik çözümü karşılaştırılmıştır. Mükerrer patlama deneylerinde ölçümlerle tespit edilen çatlak krokileri ile dinamik analizle elde edilen çatlakların yerleri ve şekillerinin paralellik

gösterdiği görülmüştür. Ancak dinamik analizden elde edilen çatlakların boylarının deneysel çalışma sonucu meydana gelen çatlakların boylarına oranının 1,5 olduğu görülmektedir.

Mevcut tez çalışmasında gerçek bir oda modellemesinin yapılabilmesi amacıyla betonarme odada bir adet kapı ve bir adet pencere imâl edilmiştir. Yapılarda yer alacak pencere, kapı gibi boşlukların boyutları ve patlayıcıya göre konumlarının değişken olarak kullanıldığı deneysel çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır. Yapılacak bu çalışmalarla daha fazla deneysel veri altında boşlukların etkisinin UFC 3-340-02 yönetmeliğine eklenilmesi sağlanmalıdır.

İş güvenliği ve deneysel çalışmaların sağlığı için 50 cm kalınlığında betonarme duvar ve tavan döşemesine sahip bir oda modellemesine gidilmiştir. Ancak duvar kalınlığı, dayanım, en boy oranı gibi parametreler dikkate alınarak çalışmaların genişletilmesinde yarar vardır.

KAYNAKLAR

1. Williams, R., Wilson, W., Dookeram, R. (2016). Analysis of the Response of a One-Storey One-Bay Steel Frame to Blast. *Journal of Structures*. 2, 1-11.
2. İnternet: Patlayıcı yıkım yüksek binalarda maliyet zaman ilişkisi. URL: <https://mehmetfaatci.wordpress.com/2012/11/25patlatma-ile-bina-yikim-teknikleri-2/>, Son Erişim Tarihi: 06.12.2020
3. UFC 3-340-01. (2002). *Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects*. Washington DC: US Army Corps of Engineers.
4. UFC 3-340-02. (2008). *Structures to Resist The Effects of Accidental Explosions*. Washington DC: US Army Corps of Engineers.
5. AASTP-1. (2006). *Manual of NATO Safety Principles For the Storage of Military Ammunition and Explosives*. NATO International Staff – Defense Investment Division.
6. EN 1991-1-7. (2006). *Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-7 General Actions-Accidental Actions*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
7. IS 4991. (2003). *Criteria for Blast Resistant Design of Structures for Explosions above Ground*. New Delhi: Ministry of Transport & Aviation.
8. TS EN 1991-1-7. (2006). *Yapılar Üzerindeki Etkiler - Bölüm 1-7: Genel Etkiler - Kazara Oluşan Etkiler*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
9. *Patlayıcı ile Yıkım Tekniği Uygulama Kitapçığı*. (2017). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Genel Müdürlüğü, Türkiye.
10. Weerheijm, J., and Lim, H. S. (2007), *Break-Up of Concrete Structures Under Internal Explosion*, FraMCoS-6 Conference, Italy.
11. Wang, F., Wan, Y.K.M., Chong, O.Y.K., Lim, C.H., Lim, E.T.M. (2008). *Reinforced Concrete Slab Subjected To Close In Explosion*. 7.LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 22-28.
12. Edri, I., Savir, Z., Feldgun, V.R., Karinski, Y.S., Yankelevsky, D.Z. (2011). On Blast Pressure Analysis Due to a Partially Confined Explosion: I. Experimental Studies. *International Journal of Protective Structures*. 2(1), 1-20.
13. Tai, Y.S., Chu, T.L., Hu H.T., Wu, J.Y. (2011). Dynamic Response of a Reinforced Concrete Slab Subjected to Air Blast Load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 56, 140–147.
14. Zhao, C.F., Chen, J.Y., Wang, Y., Lu, S.J. (2012). Damage Mechanism and Response of Reinforced Concrete Containment Structure Under Internal Blast Loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 61, 12–20.

15. Turgut, P., Gürel, M. A., Pekgökgöz, R. K. (2013). Lpg Explosion Damage of a Reinforced Concrete Building: A Case Study in Sanliurfa, Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 32, 220–235.
16. Ponnu, A., Mathews, A., George, M., Krishnan, V., Ramanujan, J. (2014). Finite Element Analysis of Buildings under Blast Loading. *International Journal of Engineering Research and Applications*. ISSN: 2248-9622, 59-63.
17. Pickerd, V., Bornstein, H., McCarthy P., Buckland M. (2016). Analysis of The Structural Response and Failure of Containers Subjected to Internal Blast Loading. *International Journal of Impact Engineering*, 95, 40–53.
18. Özmen, H., Soyluk, K., Anıl, Ö. (2017). *Betonarme Binaların Patlayıcı Kullanılarak Yıkımında Yapı Davranışının Analizi*. 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
19. Beshara, F. B. A. (1994). Modelling of Blast Loading on Above Ground Structures-II. Internal Blast and Ground Shock. *Computers & Structures*, Vol. 51, No. 5, pp. 597-606
20. Koccaz, Z., Sütcü, F., Torunbalcı, N. (2008). *Architectural And Structural Design For Blast Resistant Buildings*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China.
21. Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., Strehlow, R.A. (1983), *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam: Elsevier, ISBN 0 4 4 4 2 0 9 4 0 (Vol. 5), 238-252.
22. Cormie, D., Smith, P., Mays, G. (2009). *Blast Effect on Buildings*. Cranfield University at the Defence Academy of the United Kingdom, London. ISBN: 978-0-7277-3403-7, 32-57.
23. Iqbal, J. (2009). *Effects Of An External Explosion on A Concrete Structure*. Master Thesis, Faculty of Civil & Environmental Engineering University of Engineering and Technology, Taxila-Pakistan, 60-68.
24. TM5-1300. (1990) *Structures to Resist The Effects of Accidental Explosions*. U.S. Departments of the Army, Navy and Air Force.
25. CEB-FIP MODEL CODE. (1991). *Design Code*. Comite Euro-International du Beton, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK.
26. Grote, D., Park, S., and Zhou, M. (2001). Dynamic Behaviour of Concrete at High Strain Rates and Pressures. *Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, Pergamon press, New York, pp. 869-886.
27. Malvar L.J. (1998). Review of Static and Dynamic Properties of Steel Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal*, 95 (5) , ACI, Detroit, Michigan , pp. 609-616.
28. Biggs, J.M. (1964). *Introduction to Structural Dynamics*. USA, ISBN: 07-005255-7, 276-315.

29. FEMA 427. (2003). *Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks*. USA: Federal Emergency Management Agency, US Department of Homeland Security, 4-4.
30. Clancey, VJ. (1972). *Diagnostic Features of Explosion Damage*. In: Paper presented at the sixth international meeting of forensic sciences, Edinburgh.
31. İnternet: Sakarya havai fişek fabrikası. URL: <https://www.haberturk.com/sakarya-hendek-havai-fisek-fabrikasi-patlama-son-durum-nedir-bakandan-aciklama-geldi-2733711>, Son Erişim Tarihi: 25.11.2020.
32. Model 113B27 ICP® Pressure Sensor Installation and Operating Manual, PCB Piezotronics, Inc., Walden Avenue, Depew, NY.
33. İnternet: Abaqus. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>, Son Erişim Tarihi: 06.12.2020.
34. Erbaş, Y. (2018). *Prizmatik Çubukların Çarpma Yüklemesi Altında Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 41-43.
35. Birtel, V., Mark, P. (2006), *Parameterised Finite Element Modelling of RC Beam Shear Failure*. Abaqus Users Conference, 95-108
36. TS 500. (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12-14.
37. Dassault Systemes, *ABAQUS, Version 6.13 User's Guide* 2013.



GAZİ GELECEKTİR..