

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





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

**ORCID : - - -**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**ORCID : - - -**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasına ışık tutan ve her aşamasında gerek bilgi ile tecrübelerini gerekse her türlü desteğini benden esirgemeyen çok kıymetli hocam Doç. Dr. Temel TÜRKER'e samimi teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamı yapmam için bana fırsat veren ve maddi destekleri için, YTB, Türkiye Bursları Programı ve Türkiye Cumhuriyet Hükümeti'ne de teşekkürlerimi sunarım.

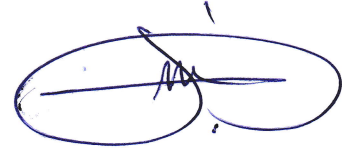
Anneme, rahmetli babama Mohammed Anees ve eşime her türlü maddi ve manevi destekleri için içten teşekkürlerimi sunarım. Çocuklarıma ilim yolunda devam etmeleri için bu çalışmayı armağan ediyorum.

Alaaddin AL-JUNEED

Trabzon 2020

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**PATLAMA YÜKLERİ ETKİSİNDEKİ BETONARME BİNALARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Temel TÜRKER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/06/2020



Alaaddin AL-JUNEED

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	V
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	V
TABLolar DİZİNİ .....	V
SEMBOLLER DİZİNİ .....	V
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1 Giriş .....	1
1.2 Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar .....	2
1.3 Tezin Amacı ve İçeriği .....	6
1.4 Patlama, Patlayıcı Madde Türleri, Patlama Sınıflandırması.....	7
1.4.1. Patlama Kavramı .....	7
1.4.2. Patlayıcı Süreci .....	8
1.4.3. Patlamanın Dalgası .....	9
1.4.4. Patlayıcı Maddeler .....	10
1.4.5. Patlama Etkileri ve Yapılara Tesirleri .....	11
1.4.6 TNT Eşdeğeri .....	13
1.4.7. Patlama Dalgasının Parametreleri .....	15
1.4.8. Patlama Yüklerinin Sınıflandırması .....	17
1.4.8.1. Açık Ortamda Yaşanan (Sınırlandırılmamış) Patlamalar .....	18
1.4.8.2. Kapalı Ortamlarda Yaşanan Patlamalar .....	20
1.5. Patlama Parametrelerin Hesaplaması .....	21
1.5.1. Maksimum Basınç Ampirik Bağlıntıları .....	21
1.5.2. Geliş Zamanı ve Pozitif Faz Süresi Ampirik Bağlıntıları .....	24
1.5.3. CONWEP Yöntemi .....	24
1.6. Beton Mikro Yapısı .....	25

1.6.1.	Beton Plastisite .....	27
1.6.2.	Beton Hasar Mekanikliği .....	27
1.6.3.	Betonun Basınç Etkisindeki Davranışı .....	29
1.6.4.	Betonun Çekme Etkisindeki Davranış .....	31
1.6.5.	Plastisite ve Hasar Kombinasyonu .....	32
1.6.6.	Hasar Durumunun Modellenmesi .....	32
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	37
2.1	Kullanılan Yöntemin Doğrulaması .....	37
2.2.	Sonlu Eleman Boyut Etkisinin Belirlenmesi .....	38
2.3.	Patlama Senaryoları .....	43
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER .....	45
3.1	Doğrulama Modelinin Analiz Sonuçları .....	45
3.2.	Boyut Etkisi Analiz Sonuçları .....	45
3.2.1	Sonlu Eleman Boyutunun 60cm Olması .....	45
3.2.2.	Sonlu Eleman Boyutunun 30cm Olması .....	47
3.2.3.	Sonlu Eleman Boyutunun 20cm Olması .....	48
3.2.4.	Sonlu Eleman Boyutunun 15cm Olması .....	49
3.2.5.	Sonlu Eleman Boyutunun 10cm Olması .....	50
3.2.6.	Sonlu Eleman Boyutunun 7.5cm Olması .....	51
3.2.7.	Sonlu Eleman Boyutunun 5cm Olması .....	52
3.2.8.	Harici İş Değişimi .....	53
3.2.9	Kinetik Enerji Değişimi .....	54
3.2.10.	Dahili Enerji Değişimi .....	55
3.2.11.	Toplam Enerjinin Değişimi .....	56
3.3.	Patlama Senaryoları Analiz Sonuçları .....	58
3.3.1.	Binadan 1m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu .....	58
3.3.2.	Binadan 1m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu .....	59
3.3.3.	Binadan 1m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu .....	60
3.3.4.	Binadan 2.5m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu .....	61
3.3.5.	Binadan 2.5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu .....	62
3.3.6.	Binadan 2.5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu .....	63

3.3.7.	Binadan 5m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu .....	65
3.3.8.	Binadan 5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu .....	66
3.3.9.	Binadan 5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu .....	67
3.3.10.	Zeminden Yüksekliğin Patlamaya Etkisinin Değerlendirilmesi .....	68
3.3.11.	Patlayıcı Ağırlığının Patlamaya Etkisinin Değerlendirilmesi .....	70
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	72
5.	KAYNAKLAR .....	74

## ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

PATLAMA YÜKLERİ ETKİSİNDEKİ BETONARME BİNALARIN DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ

Alaaddin AL-JUNEED

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Temel TÜRKER  
2020, 81 Sayfa

Bu tez çalışmasında betonarme binaların patlama etkisindeki davranışı ve muhtemel oluşan hasarların belirlenmesi hedef almıştır. Birinci bölümde konuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalar, patlama kavramı, patlayıcılar, patlama şok dalgası, patlama etkileri, patlama sınıflandırması, patlama parametrelerin hesaplaması, CONWEP yöntemi, betonun davranışı, plastisite teorisi, sürekli hasar mekaniği ve CDP (Concrete Damaged Plasticity- beton hasarlı plastisite) modeli anlatılmıştır. İkinci bölümde yapılan çalışmalar sunulmuştur. İlk etapta betonarme yapıların modellemesinde kullanılan yöntemleri belirleyebilmek için literatürde mevcut olan patlama yüküne maruz betonarme döşeme sonlu eleman analizi ve laboratuvar çalışması referans alınarak bu döşemenin ABAQUS yazılımında sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Patlama yükü için Kingry ve Bulmash metoduna dayanan CONWEP yöntemi kullanılmış olup betonarmeyi modellemek için CDP modeli kullanılmıştır. Üçüncü bölümde analizden çıkan hasar sonuçları gerçek deney karşılaştırmıştır. Modellemenin gerçeği temsil ettiğini elde edilmiştir. İkinci etapta, seçilen bir betonarme binanın patlama etkisindeki davranışı ABAQUS programında oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde incelenmiştir. Bu incelemede öncelikle sonlu eleman boyutunun analiz sonuçlarına etkisi belirlenmiştir, ardından betonarme binanın patlama etkisindeki davranışı, farklı patlayıcı miktarları kullanılarak binadan farklı mesafelerde ve zeminden farklı yüksekliklerde oluşturulan toplam 9 patlama senaryosu için analiz edilmiştir. Analizlerde hasar dağılımına ve enerji çıkışlarına bakılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

**Anahtar kelime:** Betonarme bina, CDP model, CONWEP, hasar oranları, patlama yükü, sonlu eleman boyut etkisi.



Master Thesis

SUMMARY

REVIEW THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS UNDER  
BLAST LOADING EFFECTS

Alaaddin AL-JUNEED

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate  
Program Supervisor: Doç. Dr. Temel TÜRKER  
2020, 81 Page

In this thesis study, the behavior of reinforced concrete buildings under explosion and determination of possible damages are aimed. In the first chapter previous studies on the subject, burst phenomenon, explosives, shock wave, blast load effects, blast load classification, CONWEP method, behavior of concrete, plasticity theory, continuous damage mechanics and CDP (Concrete Damaged Plasticity) model are explained. In the second chapter, studies are presented. In order to realize the methods we used, the experiment which made by Alañón et al in 2018 upon concrete slab is modeled in ABAQUS program. When using CONWEP method based on blast load Kingry and Bulmash method, CDP model was used to model concrete. In the third chapter first, the damage results from the analysis compared the actual experiment. It is obtained that modeling represents reality. The behavior of a selected reinforced concrete building under the explosion effects was examined on the finite element model created in ABAQUS program. Firstly, the effect of finite element mesh size on the analysis results was determined, then the behavior of the reinforced concrete building under explosion effect was analyzed for a total of 9 explosion scenarios created at different heights, explosive weight and distances from the building. Evaluations were made by looking at the distribution of damage and energy outputs.

**Keywords:** Blast load, CDP model, concrete structure, CONWEP, damage rates, mesh size effects.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. Sensorla ölçülen patlatma basınçları (Förch, 2019) .....	8
Şekil 1.2. Tipik patlama yükü şok dalga diyagramı .....	9
Şekil 1.3. Yapı üzerinde patlama yükü .....	10
Şekil 1.4. Mesafeyi göre patlama basınçlarının dağılımı .....	11
Şekil 1.5. Şok basınçların bir yapı üzerindeki etkileri .....	13
Şekil 1.6. Yansımali tipik patlama yükün şok dalga diyagramı .....	15
Şekil 1.7. Geliş açısı ve maksimum basınç değerlerine göre yansım katsayısının değerleri .....	17
Şekil 1.8. Patlama yükünün hapsedilme ve yansım durumlarına göre sınıflandırması .....	18
Şekil 1.9. Serbest havada yaşanan patlamanın şok dalgası yayılımı .....	18
Şekil 1.10. Yerden belli bir mesafede yaşanan patlamanın şok dalgası yayılımı ...	19
Şekil 1.11. Yeryüzündeki meydana gelen patlamaların şok dalgasının yayılımı ...	20
Şekil 1.12. TNT patlaması için pozitif faz şok dalgası parametreleri .....	25
Şekil 1.13. Tipik malzeme modelleri .....	29
Şekil 1.14. Betonun tek eksenli yük altındaki basınç davranışı .....	29
Şekil 1.15. Betonun tek eksenli yük altındaki çatlak gelişimi .....	30
Şekil 1.16. Tek eksenli çekme yük altında betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi .....	32
Şekil 1.17. Tek eksenli yükleme altında beton basınç davranışı .....	34
Şekil 1.18. Tek eksenli yükleme altında betonun çekme davranışı .....	35
Şekil 2.1. Deneyde kullanılan döşeme .....	38
Şekil 2.2. Döşeme sonlu eleman modeli ve donatı detayları .....	38
Şekil 2.3. Modellenen üç katlı betonarme binaya ait görüntüler.....	39
Şekil 2.4. Betonarme binanın farklı sonlu eleman boyutları için sonlu eleman modelleri .....	40
Şekil 2.5. Betonarme binanın donatı detayları .....	40
Şekil 2.6. Binaya, patlama noktasına ve etkilenen yüzeye ait görüntü .....	41
Şekil 2.7. Patlama senaryoları .....	44
Şekil 3.1. Döşemenin hasar durumları .....	45
Şekil 3.2. Betonarme binanın 60cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi ..	46

Şekil 3.3.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (60cm eleman boyutu için) .....	47
Şekil 3.4.	Betonarme binanın 30cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi	48
Şekil 3.5.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (30cm eleman boyutu için) .....	48
Şekil 3.6.	Betonarme binanın 20cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi.	49
Şekil 3.7.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (20cm eleman boyutu için) .....	49
Şekil 3.8.	Betonarme binanın 15cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi.	50
Şekil 3.9.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (15cm eleman boyutu için) .....	50
Şekil 3.10.	Betonarme binanın 10cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi.	51
Şekil 3.11.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (10cm eleman boyutu için) .....	51
Şekil 3.12.	Betonarme binanın 7.5cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi.	52
Şekil 3.13.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (7.5cm eleman boyutu için) .....	52
Şekil 3.14.	Betonarme binanın 5cm eleman boyutu için hasar değerlendirmesi ...	53
Şekil 3.15.	Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (5cm eleman boyutu için)	53
Şekil 3. 16.	Farklı sonlu eleman boyutlar için harici işin zamanla değişimi .....	54
Şekil 3.17.	Farklı sonlu eleman boyutlar için kinetik enerjini zamanla değişimi ...	55
Şekil 3.18.	Farklı sonlu eleman boyutlar için dahili enerjini zamanla değişimi ....	55
Şekil 3.19.	Toplam enerjinin analiz süresince farklı sonlu eleman boyutlarına göre değişimi .....	56
Şekil 3.20.	Maksimum dahili enerjinin farklı sonlu eleman boyutlarına göre değişimi .....	57
Şekil 3.21.	Betonarme binanın 10cm'lik sonlu eleman boyutu için hasar görüntüleri .....	58
Şekil 3.22.	Binadan 1m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	58
Şekil 3.23.	Binadan 1m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	59
Şekil 3.24.	Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	59
Şekil 3.25.	Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	60
Şekil 3.26.	Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	61
Şekil 3.27.	Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu enerji çıkışları .....	61
Şekil 3.28.	Binadan 2.5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	62
Şekil 3.29.	Binadan 2.5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları (100kg) .....	62

Şekil 3.30.	Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	63
Şekil 3.31.	Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	63
Şekil 3.32.	Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	64
Şekil 3.33.	Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	64
Şekil 3.34.	Binadan 5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	65
Şekil 3.35.	Binadan 5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	65
Şekil 3.36.	Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	66
Şekil 3.37.	Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	66
Şekil 3.38.	Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için hasar durumu .....	67
Şekil 3.39.	Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için enerji çıkışları .....	67
Şekil 3.40.	Farklı yükseklik ve mesafeler için harici iş-zaman diyagramları .....	68
Şekil 3.41.	Farklı yükseklik ve mesafeler için dahili enerji-zaman diyagramları ..	69
Şekil 3.42.	Farklı yükseklik ve mesafeler için kinetik enerji-zaman diyagramları	70
Şekil 3.43.	Farklı patlayıcı ve mesafeler için harici iş-zaman diyagramları .....	70
Şekil 3.44.	Farklı patlayıcı ve mesafeler için dahili enerji-zaman diyagramları ...	71
Şekil 3.45.	Farklı patlayıcı ve mesafeler için kinetik enerji-zaman diyagramları ..	71

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.1. Şok basınçlarının yapılar da olası etkileri	12
Tablo 1.2. Patlayıcı TNT dönüşüm faktörleri	14
Tablo 1.3. Patlama yükünün hapsedilme ve yansıma durumlarına göre sınıflandırması	17
Tablo 1.4. Ölçeklenmiş mesafeyi göre Kingery ve Bulmash denklem katsayıları	25
Tablo 2.1. Modellemesinde malzeme	38
Tablo 2.2. Beton ve çelik için elastik malzeme özellikleri	42
Tablo 2.3. Beton için plastik malzeme özellikleri	42
Tablo 3.1. Farklı sonlu eleman boyutları için ilk 15ms'deki maksimum enerji değerleri.	57

## SEMBOLLER DİZİNİ

ALLIE	: Toplam dahili enerji
ALLKE	: Toplam kinetik enerji
ALLWK	: Toplam harici iş
$C_{r\alpha}$	: Yansıma katsayısı
$d_c$	: Basınç hasar oranı
$d_t$	: Çekme hasar oranı
$E_A$	: Yapay şekildeğiştirme enerjisinin toplamı
$E_{CD}$	: Visko elastik veya sürtünme yoluyla dağılmış enerji
$E_E$	: Şekildeğiştirme enerjisi
$E_I$	: Dahili enerji
$E_k$	: Kinetik enerjinin
$E_o$	: Başlangıç (hasarsız) elastisite modülünü
$E_p$	: Plastik davranış yoluyla dağılmış enerji
$E_{total}$	: Toplam enerji
$f_c$	: Beton basınç dayanımı
$G_f$	: Kırılma enerjisi
$H_s$	: Patlayıcı patlama ısısı
$H_{TNT}$	: TNT patlama ısısı
$i_s$	: Pozitif impuls
$i_s^-$	: Negatif impuls
$p$	: hidrostatik basınç gerilmesini
$P_r$	: Yansıyan basıncı
$P_{so}$	: Maksimum pozitif basınç
$P_{so^-}$	: Maksimum negatif basınç
$Q_s$	: Patlayıcının kütleye özgül enerjisi
$Q_{TNT}$	: TNT'nin kütleye özgül enerjisi
$R$	: Patlama ile hedef arasındaki mesafe
$R_a$	: Patlama dik mesafesi

$t_a$	: Patlama geliş zamanı
$t_o$	: Pozitif aşama süresi
$t_o^-$	: Negatif aşama süresi
$U$	: Şok dalga hızı
$W$	: Patlayıcı ağırlığı
$W_{TNT}$	: TNT eşdeğer kütlesi
$W_x$	: Patlayıcının kütlesi
$Z$	: Ölçeklenmiş mesafe
$\mu$	: Viskozite parametresi (algılama hızı)
$\epsilon$	: Akış potansiyeli eksantrikliği
$\Psi$	: Genleşme açısı
$\theta$	: Zaman katsayısı
$\alpha$	: İzdüşüm açısı
$\epsilon_{0c}^{el}$	: Elastik şekildeğiştirme
$\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)$	: Başlangıçtaki çift eksenli akma gerilmesi başlangıçtaki tek eksenli akma gerilmesine oranını
$\overline{\sigma_{max}}$	: Maksimum asal efektif gerilmesi
$\widetilde{\epsilon}_c^{pl}$	: Eşdeğer plastik basınç şekildeğiştirme
$\widetilde{\epsilon}_t^{pl}$	: Eşdeğer plastik çekme şekildeğiştirme
$\bar{\sigma}_t$	: Etkin çekme kohezyon (birleşme) gerilmesi
$\bar{\sigma}_c$	: etkin basınç kohezyon gerilmesi
$\epsilon_c^{in}$	: Basınç elastik olmayan şekildeğiştirme
$\sigma_c$	: Basınç gerilmesini
$\sigma_t$	: Çekme gerilmesini
$K_c$	: Akma fonksiyonun çekme meridyendeki ikincil sabit gerilmesinin basınç meridyendekine oranını
$\epsilon_c$	: Basınçta toplam şekildeğiştirme
$\epsilon_t$	: Çekme toplam şekildeğiştirme

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Son yıllarda meydana gelen patlama olaylarında dramatik bir artış görülmektedir. İnsan yapımı bir felaket olarak füzeler, bombalar, roketler veya bombalı araçlar can kaybına ve yapılarda hasara neden olmaktadır. Büyük kütleleri imha edebilen, can kayıplarına ve yapılarda büyük hasara yol açan bu tür patlamalar geleneksel silah (Conventional Weapon) adı verilmiştir. Patlama bir yapının içinde veya yakın çerçevesinde meydana geldiğinde, patlayıcı maddeden ani bir şekilde enerjinin bırakılması sonucu havada basınç (şok) dalgası oluşarak yakındaki nesnelerin ve yapıların yüzeylerine patlama şok basınçları uygulanır. Buna ek olarak, şok dalgası bir yüzeye çarptığında yansıma dalgaları oluşur. Yansıyan dalgalar, şok dalgasıyla birleşerek patlama etkisini daha da artırmaktadır.

Patlama yüklerinin tehlikesi etkilediği yönden kaynaklanmaktadır. Örneğin bir binanın dışında meydana gelen bir patlamada yatay yükler çok şiddetli rüzgar gibi etkimektedir. Normalde tasarım aşamasında dikkate alınmayan bu yükler iki aşama analiz edilebilmektedir. İlk olarak direk yük uygulamasından etkilenen yapısal elemanda oluşan hasar ve daha sonra binanın oluşan hasardan sonra kendi ağırlığı altında davranışdır. Bu tür dinamik yüklerin tesir zamanları milli saniye mertebesindedir. Patlama etkileri patlamanın yaşandığı ortamlara göre değişmektedir. Kapalı ortamlarda ve defalarca yansıma oluşmasından dolayı etkiler büyümektedir.

Patlama etkisine maruz yapılardaki hasar miktarını tahmin edilmesi, yapının kullanılabilirliğinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Patlama yüklerine maruz kalan bir yapı malzemesi elastik sınırları aşmış doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Beton malzemesinin doğrusal olmayan davranışının temsili oldukça güçtür. Betonun bilindiği gibi çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça küçüktür, orantılı bir şekilde göstermek istenirse %5-10 mertebesindedir. Betonarme bir binanın patlama etkisinde gerçek davranışı simüle etmek için malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekir. Bu amaçla metal için geliştirilen plastisite teorisi daha sonra genişleterek beton için kullanılmaktadır. Lakin plastisite teorisinde beton malzemenin hasardan oluşan rijitlik kaybı dikkate alınmadığı için araştırmacılar plastisite teorisi ve sürekli hasar mekaniğinden



birleşiminden oluşan modeller geliştirmişlerdir. Sürekli hasar modeli hasardan oluşan rijitlik kaybını temsil edebilmektedir.

## 1.2. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar

Krauthammer ve Otani (1997), yapmış oldukları çalışmada patlama yüküne maruz betonarme kabin tipi bir binanın davranışını ve hasar durumunu sonlu eleman yöntemi sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmada sonlu eleman boyutu ve donatı detaylarının analiz sonuçlarına etkisinin belirlenmesi hedef alınmıştır. Analizler donatı detaylı farklı on model için yapılmış olup her donatı detay için biri ince diğeri kaba iki farklı sonlu eleman boyutu için tekrarlanmıştır. Ayrıca, farklı analizlerin beton ve donatı için gerilme ve şekildeğişimlere bakılmıştır. Çalışmadan küçük sonlu eleman boyutuna sahip modellerin daha büyük şekildeğişimler gösterdiği elde edilmiştir.

Ngo ve ark (2007), tarafından yapılan çalışmada patlama kavramı bazı patlayıcı türleri, şok dalgası, patlama yayılımı, gaz patlamaları, binanın patlama yüküne etkileşimi, dinamik hareketler ve patlama altında malzeme davranışı incelenmişlerdir. Analitik çalışma iki kısma ayrılmıştır. İlk olarak iki farklı kesite sahip kolon üç boyutlu sonlu eleman modeli LS-DYNA programında türetilmiştir. Her kolon için beton dayanımı farklı (40-80MPa) kolonların yüksekliği 6.4m çok katlı binanın zemin katında farklı etriye sıklaştırma (10-40cm) şekillerine göre kolonların patlatmaya karşı olan dayanımları karşılaştırılmıştır. Analizlerde malzemede ve uygulanan yük olarak iki açıdan doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Analiz sonuçlardan malzeme açısından, yüksek dayanımlı betondan imal edilmiş kolonun daha yüksek enerji absorbe ettiği ayrıca etriye sıklığı açısından, daha sık etriye olduğu durumda yanıl yer değıştirmelerin arttığını gözlemlenmiştir. Daha sonra 3.85m kat yüksekliğine sahip 52 katlı, kolon arasındaki mesafe 8.4m ve merkezinde dörtgen şekle sahip perde duvarlı bir binanın patlama etkisinde dinamik davranışı ve aşamalı göçme analizi yapılmıştır. Binanın zemininde oluşan patlatma nedeniyle yerel hasar değılendirmiştir. Kolonların, momentlere dayanacak şekilde tasarlanmış ise kesme kapasitesi ve sünekliliğinin önemli ölçüde arttığı bu nedenle patlama ve itme dayanımlarının da arttığı tespit edilmiştir.

Dharmasena ve ark (2008), farklı iki tür sandviç metal döşemeyi ABAQUS programında sonlu eleman yöntem ile modellemişlerdir. Patlatma yükleri simüle etmek için CONWEP yöntemi kullanıldı. Döşemelerin boyutları aynı olup sadece içteki

çekirdekler farklı (biri bal petek çekirdekli diğeri de çapraz kare çekirdekli) olarak dikkate alınmıştır. Patlayıcı ağırlığı değiştirerek (1, 2 ve 3kg) patlama noktası döşemeden 10cm sabit bir mesafede seçilmiştir. Analizlerden oluşan sonuçları aynı boyuttaki döşemeler üzerinde gerçek deney yaparak karşılaştırmışlardır. CONWEP yöntemi kullanarak yapılan analizlerde gerçekçi bir davranış gösterdiğini belirlenmiştir.

Cömert (2010), yapmış olduğu çalışmada betonarme binaların patlama etkileri altında davranışlarını değerlendirmiştir. Çalışmada ilk olarak patlayıcı türleri patlama sınıflandırması ve patlama etkileri, daha sonra yapısal elemanların modellenmesi ve davranışlarını, son olarak betonarme binaların patlama yükleri karşısında çözümlene yöntemlerini incelemiştir. Ayrıca betonarme elemanlar için deprem yönetmenliğine göre davranış seviyeleri tanımlanarak olası patlamalar sonucunda yapıların göstereceği performanslar açıklamıştır. Bunlara ek olarak, Türkiye’de yaşanan iki patlama örneği sunulmuştur. Birinci örnek, 2008 yılında barut üretim tesisinde yaşanan patlamadır. İkincisinde ise 1970’li yıllarda yapılan yapıların özelliklerini taşıyan 4 katlı betonarme bina üzerinde saldırı senaryoları kurgulanmıştır. Örnek yapının bu saldırı senaryoları karşı gösterebileceği performansları değerlendirilmiştir. Saldırı senaryoları sonucunda binada ciddi hasarların oluşacağı gözlemlenmiştir.

Tai ve ark (2011), de LS-DYNA yazılımında patlama yüküne maruz betonarme döşeme sonlu eleman yöntem ile modellenmişlerdir. Analizler döşemedeki donatı çeliğin oranını değiştirerek yapılmıştır. Döşemelerdeki hasar şekilleri incelenmiştir. Çalışmadan, düşük donatı oranlı döşemelerde hasarın döşemenin merkezinde oluştuğu, yüksek donatı oranlı döşemelerde hasar mesnetlere yakın oluştuğunu belirlenmiştir.

Kelliher ve Sutton-Swaby (2012), çalışmasında on katlı betonarme bir binanın zemin katında (otopark) yaşanan farklı büyüklükte patlama olayları sonucunda binada oluşan hasar oranlarını değerlendirilmişlerdir. Farklı patlayıcı yüküne sahip bombalı araçların rastgele otoparkın farklı noktalarında patlatılması sonucunda oluşacak davranış sayısal olarak analiz edilmiştir.

Ahmad ve ark (2014), yapmış oldukları çalışmada bir taş duvarın patlama yükleri altındaki davranışı incelenmiştir. Duvarın eni, boyu ve kalınlığı sırasıyla 2, 2, 0.381m olacak şekilde imal edilmiştir. Patlayıcı TNT yük eşdeğeri değiştirilerek 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 7.2 ve 8.4kg için deneyler yapılmıştır. Deneylerden çıkan basınç değerleri ampirik basınç hesaplama bağıntılarıyla karşılaştırılmıştır.

Qureshi ve Maghekar (2015), yapmış oldukları çalışmada 45 katlı betonarme binanın dışında farklı mesafelerde ve içinde farklı katlar için patlama senaryoları kurgulamışlardır. Patlama TNT eşdeğer yükü 500kg'dır. Çalışmanın amacı farklı patlama senaryo için binanın dinamik davranışını gözlemlemektir. Bina modellemesinde SAP2000 sonlu eleman programı kullanılmıştır. Çalışmadan, binanın dış patlama senaryolar için mesafe uzadıkça doğrusal olmayan davranışın azaldığını ve binanın içinde yüksekliğinin yarı üstünde yaşanan patlamaların daha tehlikeli hasarlara yol açtığını belirlenmiştir.

Gevrek (2016), tarafından yapılan çalışmada patlama yüklerine maruz kalan çelik kiriş-kolon elemanlarının üç boyutlu dinamik davranışını incelenmiştir. Kiriş elemanı ABAQUS programı kullanarak sonlu eleman yöntemiyle modellenmiştir. Analizler çelik malzeme modellemesinde iki farklı yöntemler biri elastik modeli diğeri de elasto-plastik malzeme modeli (Johnson-Cook sürekli modeli) kullanılmıştır. Farklı malzeme temsiline kullanılan yöntemlerin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Daha sonra Johnson-Cook sürekli modeli için parametrik çalışmalar yapılmıştır.

Kravchenko ve ark (2016), yapmış oldukları çalışmada LS-DYNA yazılımında bir betonarme kolonu sonlu eleman yöntemiyle modellenmiştir. Analizlerde 10kg ağırlığa sahip TNT eşdeğerli patlayıcının kolon üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ampirik yöntem ile Lagrangian/Eulerian simülasyonu birleşerek yapılan analizlerde zamanla değişen hasarlara bakılmıştır. Analiz aynı kolon için lakin donatı oranı değiştirip tekrarlanmıştır. Çalışmadan, donatı oranının patlama yüküne maruz yapısal elemanın davranışının üzerinde büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak zemin kattaki kolonların tasarım aşamasında güçlendirerek bu tür yüklere karşı büyük hasarlar telafi edebileceği sonucuna varılmıştır.

Lim ve ark (2016), yapmış oldukları çalışmada patlama yüküne maruz bir betonarme kiriş-kolon birleşim düğüm noktasını sayısal olarak incelemişlerdir. Sonlu eleman modeli LS-DYNA programı kullanarak yapılmıştır. Kolon-kiriş birleşme noktası için kiriş donatı detayları sadece basınç donatılı, çekme ve basınç donatılı, basınç ve çapraz donatılı, çekme ve basınç ile kesme donatılı ve çekme, basınç, kesme ve çapraz olarak beş farklı şekilde detaylandırılmıştır. Kiriş üst yüzeyinden 1m uzaklıkta 30kg TNT patlamasından uygulanan basınç CONWEP yöntemiyle modellenmiştir. Çalışmadan, birleşimdeki çeşitli takviye detayları arasında, çapraz donatının patlama yükleri altındaki direncin artırımında en etkili olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, kesme donatılarının da kiriş kolon birleşimini patlama direnci üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Siwiński ve Stolarski (2016), aynı boyuttaki iki betonarme binayı farklı taşıyıcı sistemler kullanarak AUTODYN programında sonlu eleman yöntem ile modellemişlerdir. Taşıyıcı sistemler biri çerçevesel diğeri perdelidir ve binanın içinde patlatma uygulanmıştır. İki modelin arasındaki hasar dağılımı ve deplasmanlara karıştırılmıştır. Perdeli sistemdeki hasarın daha çok katlara ulaştığını belirlenmiştir.

Nica ve ark (2017), çalışmasında üç boyutlu asimetrik betonarme çerçevesel bir binanın UFC standartlara göre hesaplanan patlama etkisindeki davranışı ilk önce yerel hasar daha sonra komple bina aşamalı göçme analizleri şeklinde yapılmıştır. Yapılan çalışma deneysel ve sayısal olarak iki katlı çerçevesel binanın önünde patlama senaryo uygulanmıştır. Modelleme LS-DYNA programında sonlu eleman metodu kullanılmıştır. Modelin deneysel ve sayısal hasar sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra çok katlı betonarme çerçevesel bir binanın General Services Administration (GSA, 2003) standartlara göre aşamalı göçme analizi yapılmıştır. Kolon sistemi, beş dahili, beş köşeli ve iki taraflı on iki farklı yıkılım senaryo varsayılmıştır. Kolon kırılma senaryolarına göre bina komple aşamalı göçme durumuna düşüp düşmediğini incelenmiştir. Çalışmadan, deprem yüklerine karşı tasarlanan binada bir aralıklı iki kolon kırılma durumunda komple aşamalı göçmenin oluşmadığı, fakat eğer iki kırılan kolonun köşe başı ve yanındaki kolon olması durumunda binada komple aşamalı göçme gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

Alañón ve ark (2018), LS-DYNA yazılımındaki CONWEP yöntemi kullanarak patlatmaların betonarme döşemelerde yapısal eleman boyutlarının etkisini incelemişlerdir. Basit mesnetli 15cm kalınlığı sahip betonarme bir döşemenin üzerinde 1m yükseklikte 15kg patlayıcı kullanılarak patlatma etkisi modellenmiştir. Yapısal eleman boyutlarının etkisini dikkate alabilmek amacıyla 7.5mm'den 40mm'ye kadar değişen boyutlarda yapısal elemanlarla oluşturulan modellerin bu patlatma etkisindeki davranışları incelenmiştir. Sayısal olarak elde edilen sonuçlar laboratuvar ortamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmadan 20mm boyutlarındaki yapısal elemanlarla oluşturulan modelin gerçeğe daha yakın sonuç verdiği belirlenmiştir.

Temsah ve ark (2018), çalışmasında ankastre mesnetli patlama etkisine maruz bir kiriş sayısal olarak incelemişlerdir. Seçilen kiriş daha önce deneysel olarak Zhang ve ark (2013) tarafından incelenmiştir. Kiriş davranışını modellemek için ABAQUS programı kullanarak malzeme beton hasarlı modeli (CDPM) kullanılmıştır. Çalışmadan, CDP modelinin betonun patlama altında doğrusal olmayan davranışı temsil edebildiği

gösterilmiştir. CONWEP Yöntemiyle patlama yansıma etkileri ihmal edilerek yapılan analizlerin gerçek patlama etkileri simüle edebildiği kanıtlanmıştır.

Förch (2019), doktora çalışmasında patlama yüküne maruz cam panellerin davranışını anlamak için analizler yapmıştır. Cam kırığı öncesinde tek ve çoklu tabaklı camlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Çalışmada patlama kavramı, patlama süreci, TNT eşdeğeri, patlama yayılımı ve sınıflandırması ile tek serbestlik dereceli sistemlerin analiz temelleri anlatılmıştır. Uygulamada tek ve çoklu tabakalı cam panellerin patlama altındaki davranışını anlamak için hem laboratuvar deneyleri hem de ANSYS programı kullanarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında patlama etkilerine maruz betonarme binaların dinamik davranışı ve hasar oranları belirlemesi hedef almıştır. Bu amaçla öncelikle patlama kavramı, patlayıcılar, patlama şok dalgası, patlama etkileri, patlama sınıflandırması, patlama parametrelerin hesaplaması, CONWEP yöntemi, betonun davranışı, plastisite teorisi, sürekli hasar mekaniği ve CDP (Concrete Damaged Plasticity-beton hasarlı plastisite) modeli anlatılmıştır. Daha sonra betonarme yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemleri belirleyebilmek için literatürde mevcut olan patlama yüküne maruz betonarme döşeme sonlu eleman analizi ve laboratuvar çalışması referans alınarak bu döşemenin ABAQUS yazılımında sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Patlama yükü için Kingry ve Bulmash metoduna dayanan CONWEP yöntemi kullanılmış olup betonarmeyi modellemek için CDP modeli kullanılmıştır. Bu modelin analizden çıkan hasar sonuçları literatürde sunulan gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Modellemenin ve analizin gerçeği temsil ettiğinin belirlenmesinden sonra betonarme binaların patlama etkisine maruz kalması durumundaki davranışı analiz edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla seçilen bir betonarme binanın CONWEP yöntemi kullanarak patlama etkisindeki davranışı ABAQUS programında oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde incelenmiştir. Bu incelemede öncelikle sonlu eleman boyutunun analiz sonuçlarına etkisi belirlenmiştir. Bunun için binanın dışında 2.5m mesafede 100kg'lık bir TNT patlatılması sonucunda oluşan patlama yüklerinin betonarme binada oluşturacağı hasar etkisi CDP yöntemi kullanılarak yedi farklı durum için belirlenmiştir. En uygun sonlu eleman boyutunun belirlenmesinin ardından betonarme binanın patlama etkisindeki

davranışı, farklı patlayıcı miktarları kullanılarak binadan farklı mesafelerde ve zeminden farklı yüksekliklerde oluşturulan toplam 9 patlama senaryosu için analiz edilmiştir. Analizlerde hasar dağılımına ve enerji çıkışlarına bakılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

#### **1.4. Patlama, Patlayıcı Madde Türleri, Patlama Sınıflandırması**

##### **1.4.1. Patlama Kavramı**

Patlama çok hızlı ve güçlü bir kimyasal reaksiyonudur ve tepkimeye girmeyen patlayıcıda süpersonik hızla ilerlemektedir. Patlama hızları çoğu güçlü patlayıcılar için 6700 ila 8500m/s'dir. Patlama sırasında, katı veya sıvı patlayıcıyı çok sıcak, yoğun ve yüksek basınçlı bir gaz haline hızla dönüştürür. Patlayıcı madde olan bu gazın hacmi havadaki güçlü patlama dalgasının kaynağını oluşturur. Patlama cephesinin hemen arkasındaki basınçlar 18.6-33.8GPa arasında değerler alabilmektedir (UFC 3-340-02, 2008)

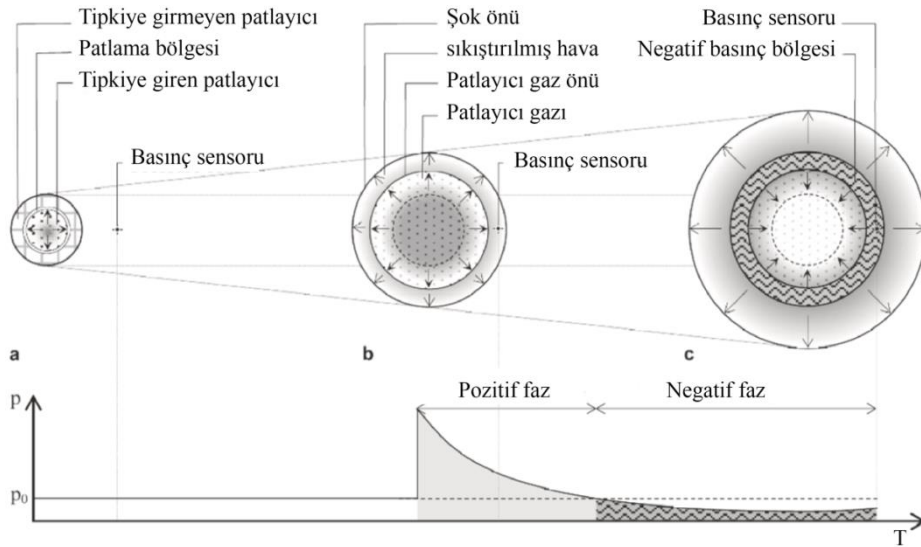
Patlama, patlayıcı kaynağına göre fiziksel, kimyasal ve nükleer patlamalar olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Fiziksel patlamalar, yüksek basınçlı bir gaz tüpünün kırılması, volkanik püskürmeleri veya farklı ısıda iki sıvının karıştırılmasından meydana gelmektedir. Nükleer patlama, çok hızlı bir nükleer reaksiyon sonucu bir atomun çekirdeğinin iki veya fazla parçaya bölünmesi ve etkileşen çekirdekler içindeki protonların ve nötronların yeniden dağılmasıyla farklı atom çekirdeği oluşmasıyla ortaya çıkan enerjidir. Kimyasal patlamalar da ise enerjisinin asıl kaynağı yakıt bileşenlerin karbon ve hidrojenin hızlı oksidasyonudur (Ngo ve ark, 2007)

Patlama sürecinde, çoğu güçlü patlayıcıda bulunan toplam kimyasal enerjinin sadece üçte biri serbest bırakılır. Havadaki patlamalarda, enerjinin diğer üçte ikisi patlama ürünleri hava ile karıştırıp yandığında yavaşça salınır. Bu yanma işlemi patlamadan çok daha yavaş olduğundan dolayı patlama dalgasının özelliklerine sadece hafif bir etkisi vardır. Bu yanma işlemi yangın ve ısı radyasyonlara sebep olabilmektedir.

Bir patlamanın patlama etkileri, patlayıcının yüzeyinden çevreleyen havaya doğru genişleyen yüksek yoğunluklu bir şok dalgası şeklindedir. Dalga genişledikçe, basıncı azalır, süresi uzar ve hızı da azalır (Cömert, 2010)

### 1.4.2. Patlama Süreci

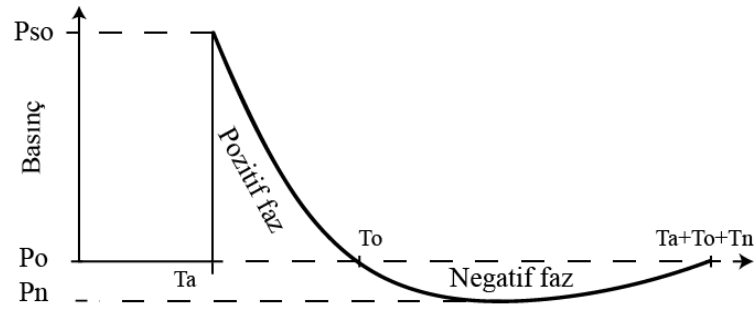
Genellikle patlama süreci üç ana zaman dilimlerine ayrılabilir. İlk olarak, patlayıcı maddenin patlatılması yer alır, ardından patlayıcının kütesinin çevresindeki havada aşırı basınç dalgası oluşturur. Üçüncü zaman dilimi içinde ise bir negatif basınç oluşturulur (Şekil 1.1). İlk zaman diliminde,  $t=0$  zamanında merkezden patlamaya başlayan küresel şekle sahip bir patlayıcı, dışa doğru yayılan küresel bir patlatma dalgası önü oluşturmaktadır. Hemen sonra  $t=0$  patlayıcı, yayılan patlatma dalgası tarafından iki bölgeye ayrılır. Reaksiyona giren iç bölge, yüksek basınç ve sıcaklık sahip patlayıcı gazlardan oluşur. Patlayıcının dış kısmı daha tepkiye girmemiştir. İkinci zaman diliminde patlayıcı komple patlatıldıktan sonra, patlama gazları çevreleyen havaya doğru genişleyip basınç tabakası oluşur. Sıkıştırılmamış ve sıkıştırılmış hava arasındaki tabakaya patlatma cephesi denir. Enerji ilk zaman diliminde serbest bırakılırken, ikinci zaman diliminde sıcaklık ve sıkışan gazlar daha büyük bir hacmi kapladığından enerjide bir azalma meydana gelir. Patlayıcı gazların basıncı bu şekilde atmosfer basıncına yavaş yavaş azalır. Bu andan itibaren, patlama dalgası artık patlayıcı gazlar tarafından takviye olmayacak ancak parçacıklar kütle atalet etkisi nedeniyle daha da hareket ederek atmosfer basıncından daha düşük bir basınç seviyesi üretir. Atmosfer basıncı ile içerideki basınç altı arasındaki basınç farkı, durup geriye doğru hareket eden parçacıklar tarafından dengeler. Bu geri hareket nedeniyle kürenin içinde hafif bir basınç oluşur ve bu durum dördüncü zaman dilimi olarak gösterilebilir (Förch, 2019)



Şekil 1.1. Sensorla ölçülen patlatma basınçları (Förch, 2019)

### 1.4.3. Patlama Dalgası

Yoğun yüksek patlayıcının patlaması, 300kBar'a kadar basınçlı sıcak gazlar ve yaklaşık 3000-4000C° sıcaklık üretir. Sıcak gaz, kapladığı hacmi zorlayarak genişler. Sonuç olarak patlamanın açığa çıkardığı enerjinin çoğunu içeren bu gaz hacminin önünde bir basınçlı hava tabakası (patlama dalgası) oluşur. Patlama dalgası anında ortam atmosfer basıncı üzerinde basınç değerine yükselir. Bu şok dalgası aşırı basınç olarak adlandırılır ve patlama kaynağından dışa doğru genişledikçe azalmaktadır (Ngo ve ark, 2007). Kısa bir süre sonra, ön taraftaki basınç ortam basıncının altına düşebilir. Şekil 1.2'de patlama basınç-zaman diyagramı gösterilmektedir. Negatif fazda, kısmi bir vakum oluşur ve hava emilir. Bu da patlama kaynağından uzak mesafelere enkaz taşıyan yüksek emme rüzgarları neden olmaktadır.



Şekil 1.2. Tipik patlama yükü şok dalga diyagramı (UFC 3-340-02, 2008)

Patlama sonucunda oluşan dalga havada genişledikçe, yolundaki bulunan yapılara çarparak ilerler ve tüm yapılar şok basınçları tarafından sarılır. Şok dalgası pozitif ve negatif iki fazdan oluşur fakat negatif faz analizlerde çoğu durumlarda ihmal edilebilir. Patlama basınçlarını etkileyen başlıca üç faktör vardır (Şekil 1.3). Bunlar:

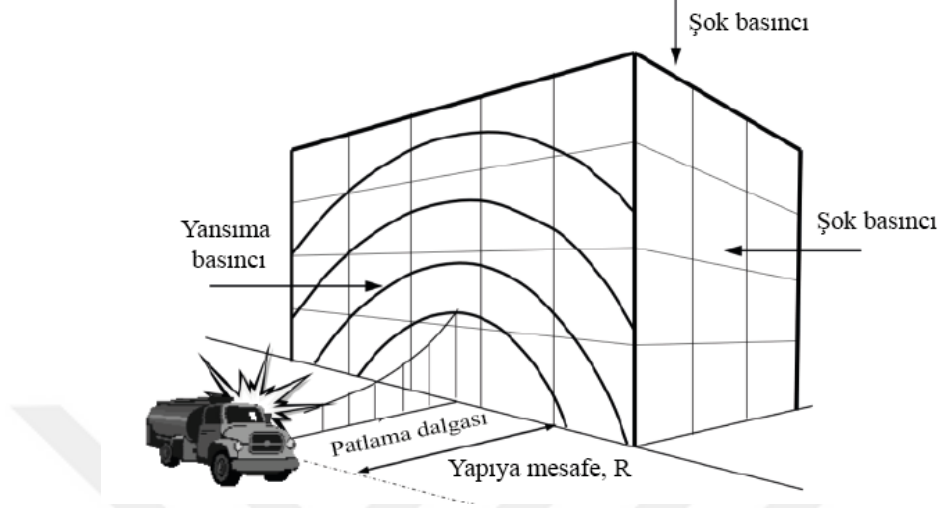
1. Patlayıcı özellikleri, yani patlayıcı madde tipi, enerji çıkışı ve patlayıcı ağırlığı (W)
2. Yapıya göre patlamanın yeri (iç veya dış patlamalar) ve mesafesi (R)
3. Basıncın, zemin bariyer veya yapının kendisiyle etkileşimi (yansıma etkileri)

Şok dalgasının etkisini ve parametrelerini dikkate almak için ilk adım ölçeklenmiş mesafenin (Z) hesaplamasıdır. Denklem 1.1 ile ölçeklenmiş mesafe hesaplanır.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1.1)$$



Burada  $Z$  ölçeklenmiş mesafeyi ( $m/kg^{1/3}$ ),  $R$  patlama noktasından olan mesafeyi (m),  $W$  ise patlayıcı ağırlığını (kg) göstermektedir.



Şekil 1.3. Yapı üzerinde patlama yükü (Ngo ve ark, 2007)

#### 1.4.4. Patlayıcı Maddeler

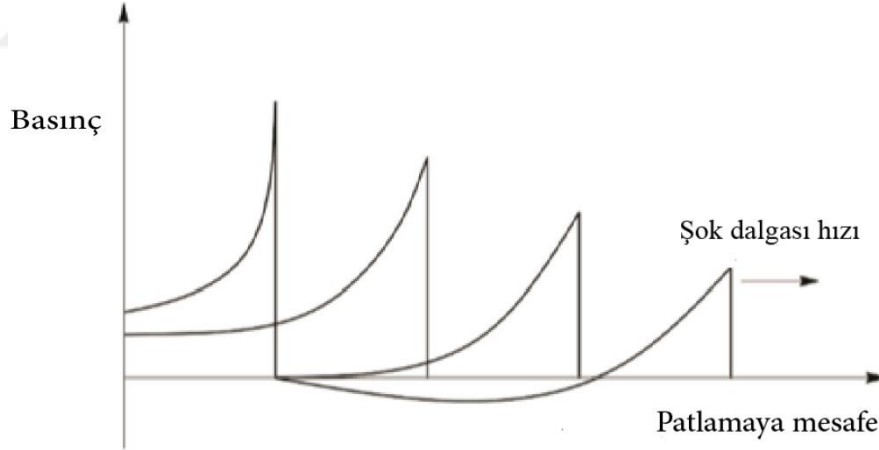
Patlayıcılar normal koşullarda atıl ve istikrarlı olmalıdırlar. Patlama olayında bir nedenle patlayıcı patlatıldığında tepkiye girerek ısı ve genişleyen gaz dalgası oluşturur. Bu olay patlamannın kendiliğinden bir reaksiyondan ziyade başlatılmış olduğunu anlamına gelir (Draganić ve Sigmund, 2012). Fiziksel durumuna göre katı, sıvı veya gaz olarak sınıflandırılabilir. Katı patlayıcılar öncelikle güçlü patlayıcıdırlar. Bununla birlikte, yanıcı kimyasal ve itici maddeler gibi diğer malzemeler de potansiyel patlayıcı malzemeler olarak tanımlanabilir (UFC 3-340-02, 2008). Sıvı ve gaz halindeki patlayıcılar kimyasal, yakıt ve itici gazların üretiminde kullanılan çok çeşitli maddeleri kapsar. Ayrıca ateşlemeye duyarlılıklarına göre ikincil veya birincil patlayıcı olarak sınıflandırılabilirler. Birincil patlayıcılar kolayca bir kıvılcım, alev veya darbe basit ateşleme ile patlatılabilmektedirler. Civa-fulminate ve kurşun asit gibi malzemeler birincil patlayıcıdırlar. İkincil patlayıcılar patlatıldığında şok dalgaları oluşturarak çevrede yaygın hasara yol açabilir. Örnek olarak Trinitrotoluen TNT(Trinitrotoluen) ve ANFO verilebilir.

Oluşan yüksek basınç ortamı sadece farklı malzemeler arasında değişmez, aynı zamanda belirli bir malzeme için de farklı olabilir. Özel fiziksel ve kimyasal özelliklerin

yanı sıra üretim, depolama ve kullanımda kullanılan yöntemler gibi durumlar patlayıcı maddelerin patlama etkilerini değiştirebilir (UFC 3-340-02, 2008).

#### 1.4.5. Patlama Etkileri ve Yapılara Tesirleri

Bir nesne veya yapı üzerinde patlama etkileri ana ve yan etkiler olarak iki gruba ayrılabilir. Ana etki, patlama noktasından küresel bir biçimde yayılan patlamanın yarattığı yüksek yoğunluğu sahip gaz tabakası (şok) dalgasıdır. Yan etkiler ise yer hareketi, yangın ve patlamayı takip eden olaylardır (Cömert, 2010). Patlama şok dalgası havadan daha yoğun bir yüzeye rastladığında yansıma oluşmaktadır. Yan etkilerin, ana etkilere göre çok küçük olduğundan dolayı analizde etkileri ihmal edilmektedir. Şok dalgası patlama noktasında maksimum hız ve basınç değerleri almaktadır. Şok dalgası genişledikçe daha büyük bir yüzey kapladığı için basıncı ile hızı giderek azalmakta ve süresi uzamaktadır (Şekil 1.4). Şok dalgasının basınç değeri ortam basıncıyla denge kurana kadar hareketinde devam etmektedir



Şekil 1.4. Mesafeyi göre patlama basınçlarının dağılımı (Draganić ve Sigmund, 2012)

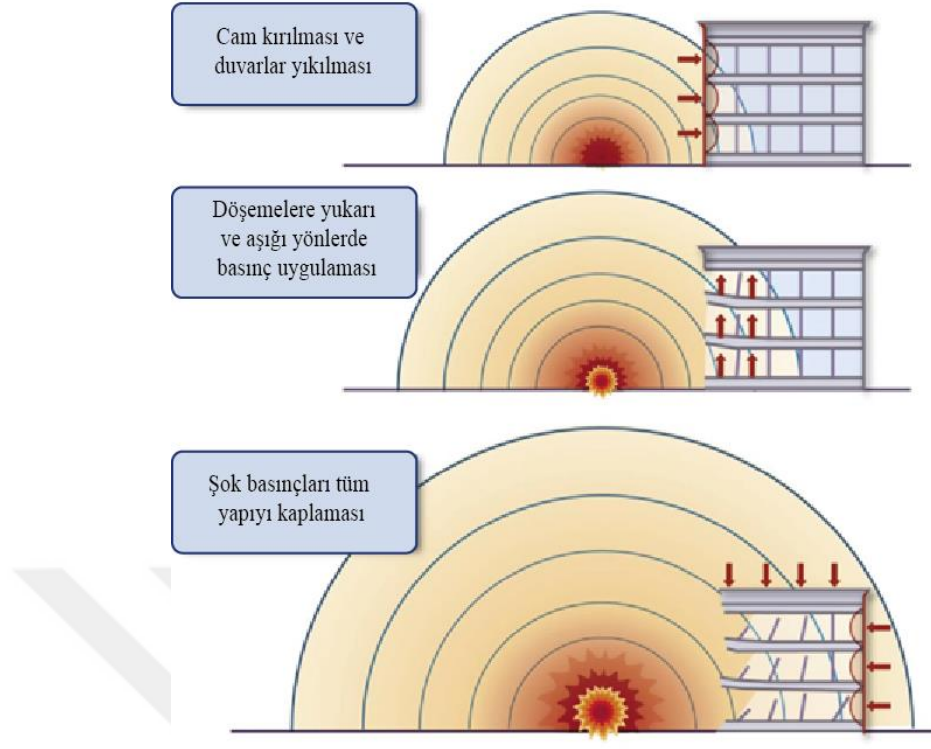
Patlamadan etkilenen binadaki davranışı iki aşamada analiz edilmektedir. Birincisi patlama basınçların direk etkileriyle yerel hasarlar; ikincisi ise yapının kendi ağırlığı altında devamlı aşamalı göçmesidir. Yapıya etkiyen basınçlar dış cephe duvarları, cam, döşeme, kolon veya kiriş yapı elemanlarında yerel hasarlara sebep olmaktadır. Şok basınçların yapıyı verdiği hasarlar Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Şok basınçlarının yapılarda olası etkileri.

Patlama basıncı (GPa)	Olası Hasar
1.0-1.5	Pencere camların kırılması
3.5-7.6	Bazı binalarda hafif hasar
7.6-12.4	Metal panelin bozulması
12.4-20	Beton duvarların hasar oluşması
35 ten yüksek	Ahşap binaların yıkılması
27.5-48	Ana çelik unsurlarda büyük hasar
40-60	Betonarme binaların imhası
70-80	Bütün bina tiplerin imhası

Şok dalgası patlamanın tahrip aracı sayılmaktadır. Yüzeyle uygulanan basınçların şiddeti, yapı tasarım aşamasında dikkate alınan basınçlardan büyüktür. Ayrıca şok basınçların etkilediği yön tasarımda dikkate alınmamaktadır. Mesela döşemede yerçekimine ters olacak şekilde etkileşim olması. Şekil 1.5'te bir yapının dışında meydana gelen patlama olayında aşağıda sıralanan aşamalar görülmektedir.

1. aşama: Dış cephelere basınçlar uygulanarak cam kırılması ve duvarlar yıkılmasıdır.
2. aşama: Basınçlar bina içine girerek döşemelere yukarı ve aşağı yönlerde basınçlar uygulamaktadır. Döşemelerin büyük yüzeye sahip olmaları nedeniyle patlama etkisinin altında yıkılabilme olasılığı çok büyüktür.
3. aşama: Patlama şok basınçları tüm yapıyı kaplayarak çatı yüzeyini aşağı, yan duvarları içeri doğru çekmektedir. Cam normalde yapının en zayıf bileşenidir. Cam parçaları kaybı ve yaralıların sayısı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bu parçalar uzun mesafelere intikal edebilmektedir.



Şekil 1.5. Şok basınçların bir yapı üzerindeki etkileri.

Patlama etkileri ortama göre değişmektedir. Açık ortamda meydana gelen bir patlamanın etkileri kapalı ortamdaki etkileri birbirinden farklıdır, örneğin kapalı ortamda yaşanan bir patlama olayında, şok dalgası iç yüzeylerden defalarca yansılardan dolayı güçlendirmektedir. Patlamadan oluşan gazlar da iç yüzeyleri tahrip ederek açık havaya ulaşır.

#### 1.4.6. TNT Eşdeğeri

Patlayıcıların patlama etkileri ve ürettikleri basıncı kendi özel enerji çıkışına bağlıdır. Patlayıcılar enerji çıkışları birbirinden farklı olduğundan dolayı ortak bir birime ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için dünyada patlayıcıların patlama etkilerini belirlemek için TNT'nin referans olarak kullanılması kabul edilmektedir. Patlama dalgası TNT dışındaki bir patlayıcıdan üretilmiş ise ölçmenin ilk adımı, patlayıcı yük kütlesini TNT'nin eşdeğer bir kütlesine dönüştürmektir. TNT dışındaki bir patlayıcının kütlesi, bir dönüşüm faktörünün kendi özel enerjisine ve TNT'ye göre çarpılmasıyla Denklem 1.2'deki gibi hesaplanır.

$$W_{TNT} = \frac{Q_s}{Q_{TNT}} W_x \quad (1.2)$$

Burada,  $W_{TNT}$ , TNT eşdeğer kütlesi,  $W_x$  patlayıcının kütlesi,  $Q_s$ , patlayıcının kütleye özgü enerjisi ve  $Q_{TNT}$ , TNT'nin kütleye özgü enerjisidir. TNT eşdeğeri patlama ısısına bağlı olarak Denklem 1.3'teki gibi yazılabilir (UFC 3-340-02, 2008).

$$W_{TNT} = \frac{H_s}{H_{TNT}} W_x \quad (1.3)$$

Burada,  $W_{TNT}$ , TNT eşdeğer kütlesi,  $W_x$  patlayıcının kütlesi,  $H_s$ , patlayıcı patlama ısısı ve  $H_{TNT}$ , TNT patlama ısısıdır. Yaygın olarak kullanılan bazı patlayıcıların TNT eşdeğerleri Tablo 1.2'de patlayıcı dönüşüm faktörleri gösterilmektedir (UFC 3-340-02, 2008).

Tablo 1.2. Patlayıcı TNT dönüşüm faktörleri.

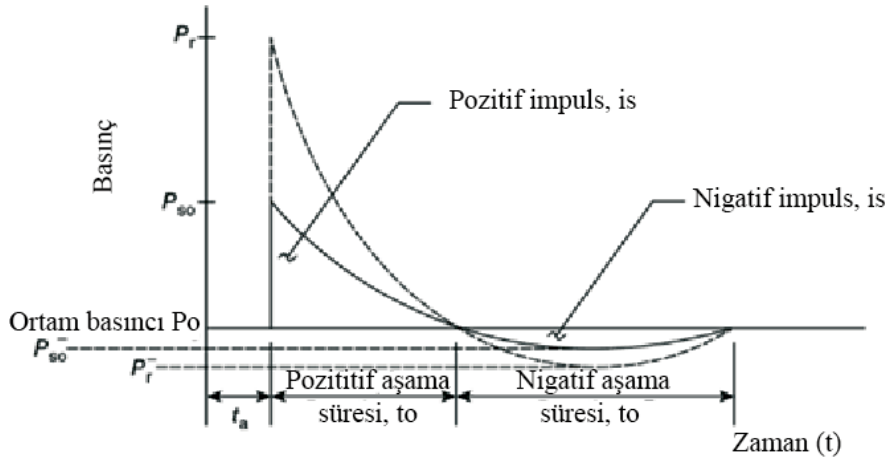
Patlayıcı Türleri	Enerji	TNT Eşdeğeri
	$Q_s$ (kJ/kg)	$Q_s/Q_{TNT}$
Compound B (60% RDX 40% TNT)	5190	1.148
RDX (Cyclonite)	5360	1.185
HMX	5680	1.256
Nitroglycerin (liquid)	6700	1.481
TNT	4520	1.000
Blasting Gelatin (91% nitroglycerin, 7.9% nitrocellulose, 0.9% antacid, 0.2% water)	4520	1.000
60% Nitroglycerin dynamite	2710	0.600
Semtex	5660	1.250
C4	6057	1.340

Yukarıda verilen patlayıcı eşdeğer bağıntıları patlayıcı malzemenin kütlesi ile TNT eşdeğer kütlesi aynı şekil ve aynı kapalılık durumlar için doğrudur. Malzeme enerji çıkışına ilave olarak malzeme şekli (düz, kare, yuvarlak, vb.), patlayıcı madde birim sayısı, patlayıcı hapsi (kasa, konteynerler, vb.) ve basınç aralığı (yakın, orta veya uzak aralıklar) gibi diğer faktörler de TNT eşdeğerine etkilemektedir.

Patlayıcı kasası şok basınçlarının büyüklüğü üzerinde bir etkiye sahiptir. Bu etkiler, malzeme, kalınlık, şekil, vb. gibi kasa özelliklerine bağlıdır. Sınırlı miktarda yüzey patlamasının test verilerinin gözden geçirilmesi, kasanın etkilerinin şiddetli olmadığını ve bu nedenle tasarımda kasa etkilerinin ihmal edileceği göstermektedir (UFC 3-340-02, 2008).

#### 1.4.7. Patlama Dalgasının Parametreleri

Patlama sonucu basıncın  $t_a$  zaman aşamasında ortam basıncından maksimum pozitif basınç değerine ( $P_{so}$ ) ani bir yükseliş gerçekleşmektedir. Maksimum pozitif basınç  $t_o$  süre içinde ortam basıncına düşmektedir ve böylece pozitif aşama oluşmuş olur. Basınç azalmasıyla maksimum negatif basınç ( $P_{so-}$ ) ortam basıncından düşük bir değere ulaşır ve hava parçacıklarının seyreltme nedeniyle negatif aşama süresinin ( $t_o-$ ) sonunda ortam basıncıyla denge kurmaktadır. İki fazdan oluşan basınç dalgası süpersonik hızla yayılmakta yani bu olay sadece milli saniye zaman diliminde sürmektedir. Şekil 1.6'da bu patlama parametreleri gösterilmiştir. Gösterimde direk şok dalgası sürekli çizgi ve bir yüzeyden yansıyan şok dalgası için ise kesikli çizgi kullanılmıştır.



Şekil 1.6. Yansımali tipik patlama yükün şok dalga diyagramı (Uddin, 2010)

Pozitif aşama süresi için diyagram altındaki alan pozitif impulsı ( $i_s$ ) temsil eder. Benzer şekilde negatif aşama süresi için diyagramın üstündeki alan negatif impulsı ( $i_s$ ) temsil etmektedir. Pozitif faz genellikle maksimum pozitif basınç ( $P_{so}$ ) ve pozitif impuls ( $i_s$ ) büyük genliği nedeniyle negatif aşamadan daha önemli olarak kabul edilmektedir

(Uddin, 2010). Öte yandan, büyüklüğü nispeten küçük, ölçülmesi zor olduğundan negatif faz genellikle göz ardı edilmez (Nassr, 2012). Ancak bazı çalışmalar göstermiştir ki, ölçeklenmiş mesafeler ( $Z$ )  $20\text{m/kg}^{1/3}$ 'ten büyük (özellikle  $50\text{m/kg}^{1/3}$ 'ten büyük) mesafelerde negatif aşamanın etkisi ihmal edilemez (Larcher, 2008). Buna ek olarak nispeten esnek yapılar için negatif aşama basıncı dahil edilebilir (Uddin, 2010).

Pozitif aşama basınç zaman diyagramından geliştirilen Denklem 1.4'te verilen Friedlander denklemi kullanarak temsil edilebilmektedir.

$$P_s(t) = P_{so} \left[ 1 - \left( \frac{t-t_a}{t_0} \right) \right] e^{-(t-t_a)/\theta} \quad t_a \leq t \leq t_a + t_0 \quad (1.4)$$

Burada,  $\theta$  zaman katsayısı ve  $t$  zaman (ms)'dir. Pozitif impuls bu eğrinin integrali alınarak Denklem 1.5'teki şekilde elde edilir.

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+t_0} P_s(t) dt \quad (1.5)$$

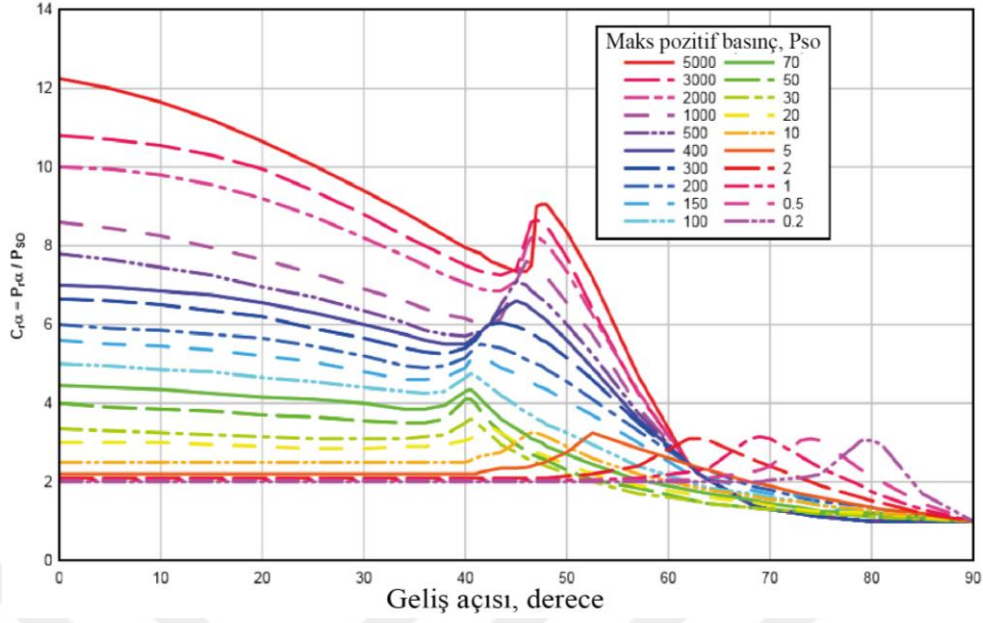
Eğer  $t_a=0$  sayılırsa ve Denklem 1.4'ten Denklem 1.5'e yazılırsa pozitif impuls Denklem 1.6'da verilebilir.

$$i_s = \int_0^{t_0} P_{so} \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_0} \right) \right] e^{-t/\theta} dt \quad (1.6)$$

Şok dalgası yayılırken oldukça rijit bir yüzeye rastlarsa yansımaya uğrar. Yansıyan basıncı ( $P_r$ ), ilk dalga maksimum pozitif basıncının ( $P_{so}$ ) 2-13 katı arasında değer almaktadır. Yansıyan şok dalgası Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Yansıyan basınç ilk basıncın geliş açısına bağlıdır ve yayılım yönüne dik yüzeyler için en büyük değer elde edilmektedir. Yansıyan maksimum pozitif basınç herhangi bir geliş açısı için Denklem (1.7)'de verilmektedir.

$$P_r = C_{r\alpha} P_{so} \quad (1.7)$$

$C_{r\alpha}$  yansıma katsayısı geliş açısıyla ve maksimum pozitif basınca bağlıdır. Yansıma katsayısı değerler Şekil 1.7'den belirlenebilmektedir.



Şekil 1.7. Geliş açısı ve maksimum basınç değerlerine göre yansıma katsayısının değerleri (UFC 3-340-02, 2008).

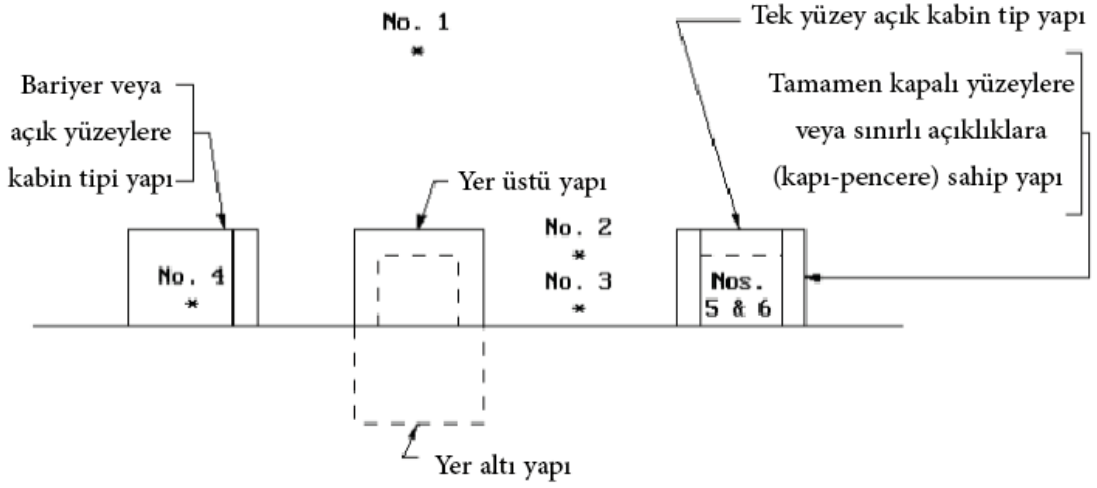
#### 1.4.8. Patlama Yüklerinin Sınıflandırması

Yapı üzerindeki patlama yükleri, patlayıcı kütlesinin hapsedilmesine göre sınırlandırılmış patlamalar ve serbest ortamlarda yaşanan patlamalar olarak iki ana gruba ayrılabilir. Ayrıca zemin bariyer etkisine bağlı olarak alt gruplar da oluşturulabilir. Bu sınıflandırma Tablo 1.3 ve Şekil 1.8'de gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Patlama yükünün hapsedilme ve yansıma durumlarına göre sınıflandırması

Kapalılık durumu	Sınıflandırma	Basınç yükleri
Sınırlandırılmamış	1. Serbest hava patlaması (küresel patlamalar)	Yansıtılmamış
	2. Hava patlaması	Yansıyan
	3. Yüzey patlaması (yarı küresel patlamalar)	Yansıyan
Sınırlandırılmış	4. Tamamen havalandırılmış	İç şok-Sızıntı
	5. Kısmen Sınırlandırılmış	İç şok-İç gaz-Sızıntı
	6. Tamamen kapalı	İç şok-İç gaz

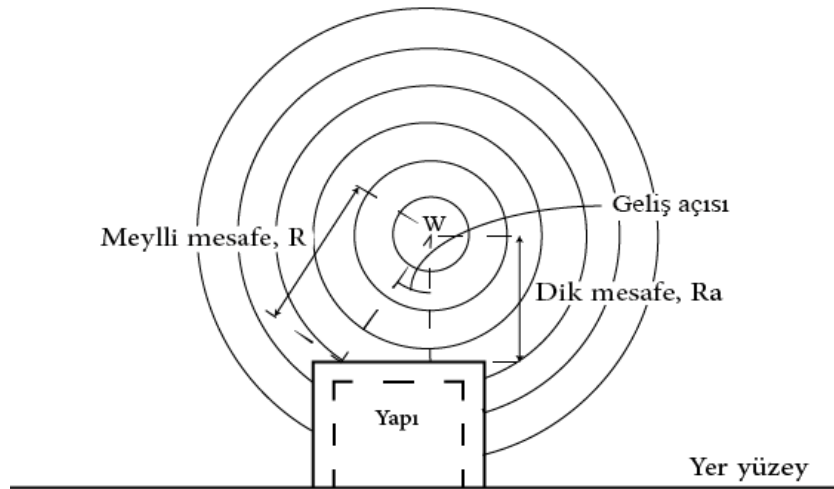




Şekil 1.8. Patlama yükünün hapsedilme ve yansıma durumlarına göre sınıflandırması

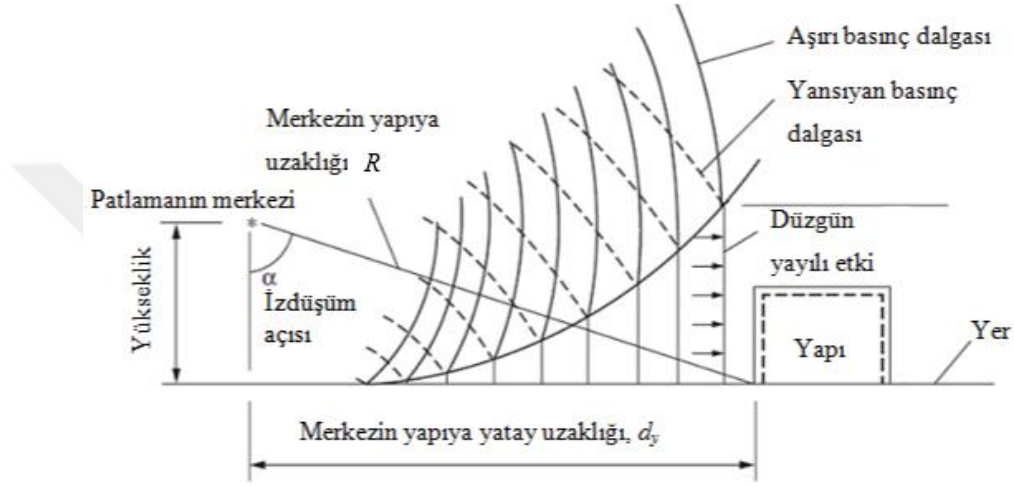
#### 1.4.8.1. Açık Ortamda Oluşan Patlamalar

Bir yapının dışında yaşanan patlamalardır. Serbest hava patlamalar, hava patlamalar ve zemin yüzeyinde yaşanan patlamalar olarak üç farklı sınıfa ayrılabilir. Serbest havada meydana gelen bu tür patlamalarda patlama noktası yapının bitişiğinde veya üstündedir. Oluşan şok dalgası, patlama noktasından hedef yapıya ulaşana kadar küresel serbest bir şekilde yayılmaktadır. Şok dalgası patlama merkezinden uzağa yayılan bir başlangıç çıkışı üretir ve dalga yansıma olmadan yapıya çarpar. Şekil 1.9'da serbest havada yaşanan patlamanın şok dalgası yayılımı gösterilmiştir.



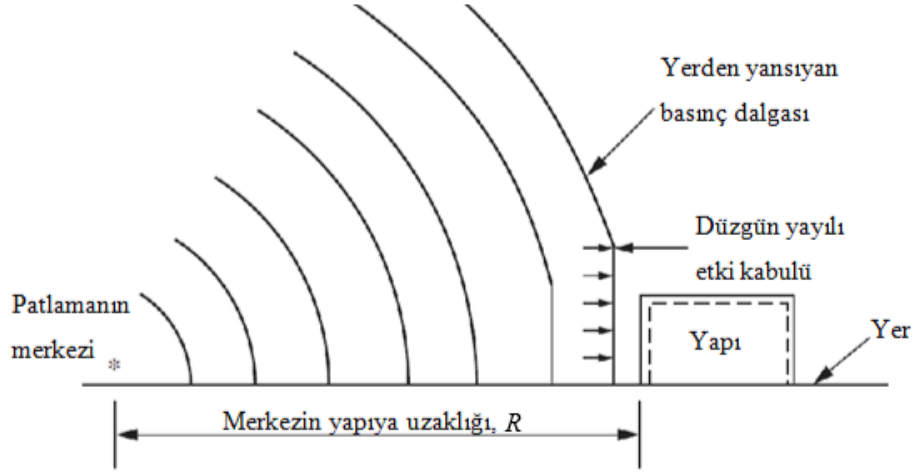
Şekil 1.9. Serbest havada yaşanan patlamanın şok dalgası yayılımı (UFC 3-340-02, 2008)

Yapıdan uzak bir mesafede havada meydana gelen bu patlamalarda ilk dalganın zemin yansımaları, patlama dalgası yapıya ulaşmadan önce meydana gelir. Şekil 1.10'da gösterilen ilk dalga ve yansımalar birleşerek üretilen dalga ilk dalgadan büyük bir basınca sahip olduğu için bu tür patlamalar serbest havada yaşanan patlamalara göre oldukça tehlikelidir. Bu tür hava patlaması bir binanın kat yüksekliğinin iki veya üç katına eşit mesafede meydana gelen bir patlama ile sınırlıdır.



Şekil 1.10. Yerden belli bir mesafede yaşanan patlamanın şok dalgası yayılımı (Cömert, 2010)

Zemin yüzeyinde veya yer yüzeyine çok yakın bir noktada meydana gelen patlamalarda ilk şok dalgasının zemin yansımaları nedeniyle şiddetlenir. Patlamanın ilk dalgası yansıtılır ve yansıyan bir dalga üretmek için zemin yüzeyi tarafından takviye edilir. Hava patlamasının aksine yansıyan dalga patlama noktasındaki şok dalgasıyla birleşerek tek bir dalga oluşturur. Hava patlamasının dalgasının doğasını benzer ama aslında yarı küresel şeklindedir. Şekil 1.11'de yer yüzeyindeki meydana gelen patlamaların etkisi gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Yeryüzündeki meydana gelen patlamaların şok dalgasının yayılımı (Cömert, 2010)

#### 1.4.8.2. Kapalı Ortamlarda Yaşanan Patlamalar

Kapalı bir ortamda (tanker) veya yapının içinde yaşanan patlamalardır. Burada maksimum şok önü pozitif basıncı yapıda defalarca yansımalarından dolayı güçlenmektedir. Tamamen kapalı, kısmen havalandırılmış ve tamamen havalandırılmış gibi sınırlamalara göre etkiler değişmektedir. Reaksiyonun devam etmesinden üretilen yüksek sıcaklıkların ve gaz ürünlerinin birikmesinin etkileri ek basınçlar uygulayarak yapı içindeki yük etkileme süresini artırabilmektedir. Eğer yapının iç patlamaya karşı tasarlanmamış ise bu iç basınçlarının birikimi yapının tamamen yıkılmasıyla sonlandırılır. Bu basınçların açığa çıkarmasında kullanılan yöntemler, büyüklüklerinin yanı sıra sürelerini de azaltmaktadır.

Tamamen havalandırılmış patlamalar bir bariyer veya atmosfere tek veya daha fazla açık yüzeye sahip kabin tipi yapının içinde veya hemen bitişiğinde meydana gelen patlamalardır. İlk şok dalgasını, yapının kırılmayan yüzeylerden yansıyan dalgaları ve oluşturan gaz ile patlama ürünlerin açık yüzeyden dışarı doğru serbest bırakılır.

Kısmen havalandırılmış patlama sınırlı büyüklükte açıklıklar ve/veya kırılabilen yüzeylere sahip bir bariyer ya da kabin tipi yapının içinde meydana gelen patlamalardır. İlk dalga, kırılabilen ile kırılmayan yüzeylerden oluşan yansımaları ve patlama ürünleri şok dalgasını oluşturarak atmosfere küçük bir zamandan sonra serbest bırakılır. Yüksek sıcaklık ve gaz içeren ürünlerin birikme oluşan patlama ürünlerinin hapsedilmesi, yarı statik basınç birikmesi ile ilişkilidir. Bu basınç, şok basıncına kıyasla uzun bir süreyle sahiptir.

Tamamen kapalı patlamalar bir patlamanın tam hapsedilmesi durumudur. Patlama bir bariyer yapı tarafından tamamen veya neredeyse tamamen kapalıdır. İç patlama yükleri, üretilen şok yükleri ve çok uzun süreli gaz basınçlarından oluşmaktadır. Bu basınçların etkileme süresi yapının kapalılık durumuna bağlıdır. Sızıntı basınçlarının miktarı genellikle küçük olur ve sadece yapının hemen bitişiğindeki nesnelere etkileyebilir.

### **1.5. Patlama Parametrelerinin Hesaplanması**

Patlama etkisinin belirlenmesinde en önemli parametreler, maksimum pozitif basınç ( $P_{so}$ ), geliş zamanı ( $t_a$ ), pozitif aşama süresi ( $t_o$ ), pozitif özgül impuls ( $i_s$ ) ve yansıyan basınç ( $P_r$ )'dir. Bu parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılan başlıca yöntemler aşağıda verilmektedir.

- Ampirik (veya analitik) yöntemler.
- Yarı ampirik yöntemler.
- Sayısal (veya ilk ilke) yöntemler.

Ampirik yöntemler aslında deneysel verilerle bağıntılardır. Bu yaklaşımların çoğu, temel deney veri tabanının kapsamıyla sınırlıdır. Tüm ampirik denklemlerin doğruluğu, patlayıcı olay giderek daha yakın alana dönüştükçe azalır. Yarı ampirik yöntemler basitleştirilmiş fiziksel olgu modellerine dayanır. Altta yatan önemli fiziksel süreçleri basitleştirilmiş bir şekilde modellemeye çalışırlar. Bu yöntemler geniş verilere ve örnek olay incelemesine dayanır. Onların sonuçları ampirik yöntemlere göre daha doğrudur. Sayısal yöntemler, bir problemi yöneten fiziğin temel kanunlarını açıklayan matematiksel denklemlere dayanır. Bu ilkeler kütle, moment ve enerjinin korunmasını içerir. Buna ek olarak, malzemelerin fiziksel davranışı kurucu ilişkiler ile tanımlanır. Bu modeller genellikle hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleri olarak adlandırılır (Draganić ve Sigmund, 2012). Ampirik yöntemlere dayanan patlama parametreleri hesaplamasında kullanılan birçok bağıntı bulunmaktadır.

#### **1.5.1. Maksimum Basınç Ampirik Bağıntıları**

Farklı mesafeler ve yük ağırlığı sahip patlayıcı kullanarak yapılan deneylerin veri tabanına dayalıdır. Patlama maksimum basıncını tahmin etmek için ölçeklenmiş mesafeye

göre 1952'den beri Denklem 1.8-1.19'da verilen çeşitli ampirik bağıntılar sunulmaktadır. Bu bağıntılarda  $Z$  ( $m/kg^{1/3}$ ) ve  $P_{so}$  (MPa)'dır.

Sadovskiy bağıntısı (Sadovskiy, 2004)

$$P_{so} = \frac{0.085}{Z} + \frac{0.2}{Z^2} + \frac{0.82}{Z^3} \quad (1.8)$$

Brode bağıntısı (Brode, 1955)

$$P_{so} = \begin{cases} \frac{0.67}{Z^2}, & P_{so} > 1 \\ \frac{0.0975}{Z} + \frac{0.1455}{Z^2} + \frac{0.585}{Z^3} - 0.0019, & 0.01 \leq P_{so} \leq 1 \end{cases} \quad (1.9)$$

Naumyenko ve Petrovskiy bağıntısı (Low ve Hao, 2001)

$$P_{so} = \begin{cases} \frac{1.050}{Z^2} - 0.0981, & Z \leq 1 \\ \frac{0.0745}{Z} + \frac{0.250}{Z^2} + \frac{0.637}{Z^3}, & 1 < Z \leq 15 \end{cases} \quad (1.10)$$

Adushkin ve Korotkov bağıntısı (Adushkin ve Korotkov, 1961)

$$P_{so} = \frac{0.08}{Z} + \frac{0.28}{Z^2} + \frac{0.322}{Z^3} \quad 0.08 \leq Z < 18 \quad (1.11)$$

Henrych ve Major bağıntısı (Henrych ve Major, 1979)

$$P_{so} = \begin{cases} \frac{1.380}{Z} + \frac{0.543}{Z^2} - \frac{0.035}{Z^3} + \frac{0.000613}{Z^4}, & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{0.607}{Z} - \frac{0.032}{Z^2} + \frac{0.209}{Z^3} & 0.3 < Z \leq 1 \\ \frac{0.0649}{Z} + \frac{0.397}{Z^2} + \frac{0.322}{Z^3}, & 1 < Z \leq 10 \end{cases} \quad (1.12)$$

Held bağıntısı (Held, 1983)

$$P_{so} = 2 \frac{W^{2/3}}{R^2} \quad (1.13)$$

Kinney ve Graham bağıntısı (Kinney ve Graham, 1985)

$$P_{so} = P_o \cdot \frac{808 \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2\right]} \cdot \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2\right]} \cdot \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2\right]}} \quad (1.14)$$

Mills bağıntısı (Low ve Hao, 2001)

$$P_{so} = \frac{1.772}{Z^3} - \frac{0.114}{Z^2} + \frac{0.108}{Z} \quad (1.15)$$

National Defense Engineering Design Specifications (NDEDS), China (Li ve Ma, 1992)

$$P_{so} = 0.084 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right) + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^2 + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^3 \quad (1.16)$$

Hopkins-Brown ve Bailey bağıntısı (Hopkins-Brown ve Bailey, 1998)

$$P_{so} = \begin{cases} -1.245 + \frac{1.935}{Z} + \frac{0.2353}{Z^2} - \frac{0.01065}{Z^3}, & 0.05 \leq Z \leq 1.15 \\ \frac{0.0707}{Z} + \frac{0.3602}{Z^2} + \frac{0.4891}{Z^3}, & 1.15 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (1.17)$$

Gelfand ve Silnikov bağıntısı (Gelfand ve Silnikov, 2004)

$$P_{so} = \begin{cases} 1.7 \cdot 10^3 \exp(-7.5 \cdot Z^{0.28}) + 0.0156 & 0.01 \leq Z \leq 8 \\ 8 \cdot 10^3 \exp(-10.7 \cdot Z^{0.1}) & Z \geq 8 \end{cases} \quad (1.18)$$

Bajić bağıntısı (Bajić, 2007)

$$P_{so} = 0.102 \frac{W^{1/3}}{R} + 0.436 \frac{W^{2/3}}{R^2} + 1.4 \frac{W}{R^3} \quad (1.19)$$

### 1.5.2. Geliş Zamanı ve Pozitif Faz Süresi Ampirik Bağlılıları

Geliş zamanı hesaplamak için birçok bağıntı bulunmaktadır. Bunların arasında Wu ve Hao bağıntısı (Wu ve Hao, 2005) Denklem 1.20'de verilebilmektedir.

$$T_a = 0.34 \frac{R^{1.4} W^{-0.2}}{a_0} \quad (1.20)$$

Burada  $a_0$  hava ortamında ses hızı (m/s)'dir. Pozitif faz süresi hesaplamasında kullanılan birçok bağıntı vardır. Bunların arasında Sadovskiy ile Wu ve Hao bağıntıları sırasıyla Denklem 1.21 ve Denklem 1.22'de verilmektedir (Sadovskiy, 2004; Wu ve Hao, 2005).

$$T_o = 1.2 \sqrt[6]{W} \sqrt{R} \quad (1.21)$$

$$T_o = 1.9 (Z)^{1.3} + 0.5 (Z)^{0.72} W^{0.4} \quad (1.22)$$

### 1.5.3. CONWEP Yöntemi

Patlama parametreleri tahmininde sayısal yöntemler arasında bilgisayar ortamında programlanarak yaygın kullanılan yöntem CONWEP yöntemi bulunmaktadır (Hyde, 1992). Bu yöntem 1kg'dan 400000kg'a kadar patlayıcı kullanılarak gerçekleştirilen test verilerinden elde edilen Kingery ve Bulmash denklemlerine dayanmaktadır (Kingery ve Bulmash, 1984). CONWEP yöntemi ABAQUS, LS-DYNA vb. bilgisayar programlarında patlama parametrelerinin hesaplaması için uygulamaktadır. Kingery ve Bulmash denklemleri, açık hava patlama basınçlarını ve yapılar üzerindeki yükleri belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Denklem 1.23'te Kingery ve Bulmash maksimum pozitif basınç ve pozitif impuls hesaplamasında kullanılan denklem verilmektedir.

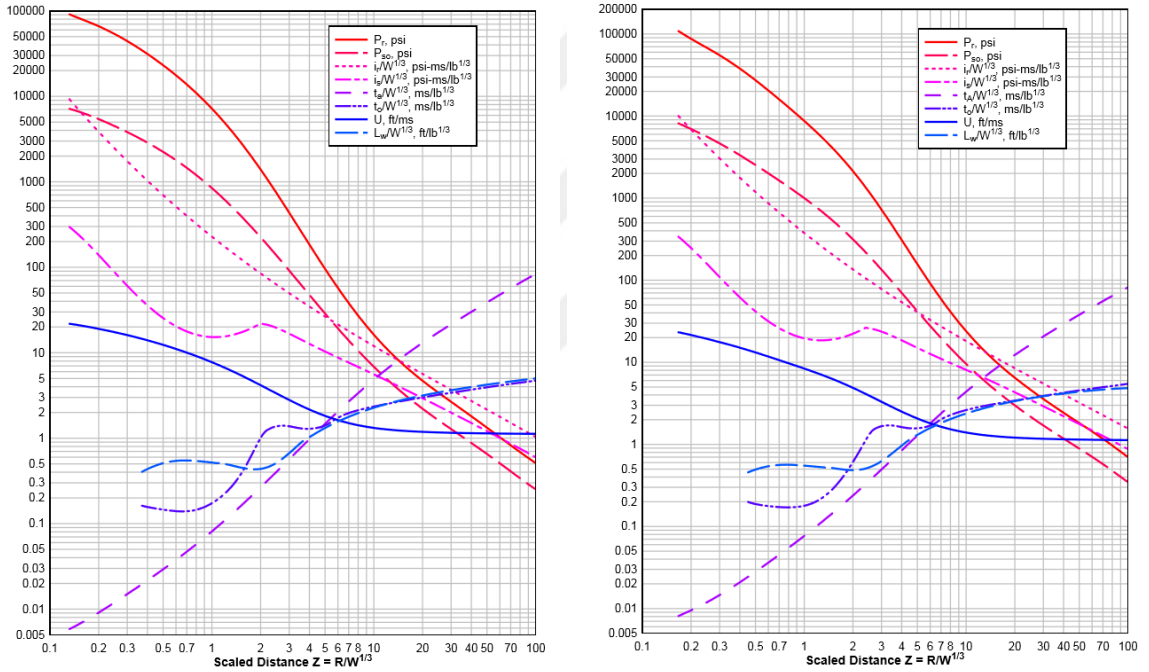
$$P_{so} = \text{EXP}[A + B (\ln Z) + C (\ln Z)^2 + D (\ln Z)^3 + E (\ln Z)^4] \quad (1.23)$$

Burada, A, B, C, D ve E katsayılar olup bunlara ait değerler Tablo 1.4'ten ölçeklenmiş mesafeyi göre seçilebilmektedir (Ullah ve ark, 2016).

Tablo 1.4. Ölçeklenmiş mesafeyi göre Kingery ve Bulmash denklem katsayıları.

$Z(\text{m}/\text{kg}^{\frac{1}{3}})$	A	B	C	D	E
0.2-2.9	7.1206	-2.1069	-0.3229	0.1117	0.0685
2.9-23.8	7.5938	-3.0523	0.40977	0.0261	-0.01267
23.8-198.5	6.0536	-1.4066	0	0	0

Bu denklemler Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02, 2008) yönetmeliğinde diyagram şeklinde uygulanmaktadır. Şekil 1.12’te gösterildiği gibi  $Z$  ölçeklenmiş mesafeyi göre patlama parametreleri hesaplanabilmektedir.



(a). Deniz seviyesinde serbest havada (b) Deniz seviyesinde yer yüzeyi yarı küresel  
Şekil 1.12. TNT patlaması için pozitif faz şok dalgası parametreleri (UFC 3-340-02, 2008)

## 1.6. Beton Mikro Yapısı

Beton heterojen bir malzeme olduğundan çekme ve basınç yükleri etkisindeki davranışı farklılık göstermektedir. Betonun basınç dayanımı oldukça yüksek olmasına karşın çekme dayanımı düşüktür ve yaklaşık olarak %5-10 mertebesindedir. Beton herhangi bir dış yükün uygulamadan önce bile kaba agregalar ve harç arasındaki ara



yüzeyde çok sayıda mikro çatlaklar bulunmaktadır. Bu mikro çatlakların varlığı beton mekanik davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yükleme sırasında düşük gerilme seviyelerinde mikro çatlakların yayılımı doğrusal olmayan davranışı ve kırılma noktasına yakın hacmi genişleme neden olur. Bu mikro çatlakların çoğu başlangıçta harç ayrımı, büzülme ve termal genişleme neden olmakla beraber. Ayrıca agrega ve harç arasındaki sertlik farkı nedeniyle yükleme sırasında bazı mikro çatlaklar oluşabilir. Harç ile agrega ara yüzeyi harçtan çok daha düşük çekme dayanımına sahip olduğundan kompozit sistemdeki en zayıf halkasını oluşturur, bu beton düşük çekme mukavemeti için en önemli nedenlerden biridir.

Betonun doğrusal olmayan davranışını iki farklı malzeme mekanik süreçlere atfedilebilir; plastisite ve hasar mekanizmalarıdır. Betondaki çatlama işlemi diğer malzemelerindeki (cam/metal) oldukça farklıdır, çünkü betonda mikro çatlakların ani bir yüzeylerin oluşması değil, daha çok var olan mikro çatlakların çoğalıp birbiri ile bağlanmasıdır. Mikro çatlakların oluşumu mikroskobik olarak malzemenin yumuşama davranışı olarak ifade edilir. Mikroskobik düzeydeki bu fenomenolojik davranışı klasik plastisite ile modellenemez (Prmono ve Willam, 1989). Öte yandan, mikro çatlaklar, mikro boşluklar ve bunların çekirdekleşme ve birleşmesi gibi mikro süreçler de rijitlik kaybına neden olur, klasik plastisite ile temsil etmesi zordur (Lee ve Fenves, 1998). Efektif gerilme kavramı kullanarak rijitlik kaybı modellenmektedir buradan sürekli hasar mekaniğinden bir model ihtiyaç duyulmaktadır. Hasar mekaniği de beton malzemelerin klasik plastisite teorisi ile yansımayan yumuşama davranışı temsil etmek için kullanılmaktadır.

Betonun kırılma davranışı agrega ile harç matrislerin arasındaki ara yüzey karmaşık bozulma süreci ile bağlıdır. Agrega ile harç matrisi ara yüzeyinde betona herhangi bir yük uygulamadan önce bile mikro çatlaklar mevcuttur. Bu tür mikro çatlaklar oluşumun nedeni agrega ve çimento harcının elastiklik modülün farklı olmasıdır. Çeşitli bileşenlerin termal katsayıları arasındaki farktan kaynaklanan büzülme ve termal etkiler nedeniyle betondaki hacim değişimleri sonucu agrega ara yüzeyindeki gerilme yoğunlaşmaları da oluşabilir. Dış yükler uygulandığında betondaki mikro çatlaklar süreklilik kazandırmaktadır. Bu mikro çatlaklar, sabit yükleme etkisi altında belirli bir eşiğe ulaşıldıktan sonra matrisle birleşene kadar yayılmaktadır. Harç matrisindeki mikro çatlaklar genişler birbiri ile birleşerek kırılma durumuna ulaşılmaktadır.

### 1.6.1. Beton Plastisite

Plastisite teorisi, malzemenin basınç yüklerine maruz kaldığı durumları başarıyla temsil edebilmektedir. Çekme ve basıncın önemli bir rol oynadığı durumlarda, basınç bölgelerinin modelinde plastisite teorisi uygulanırken, Çekme bölgelerinin modelinde hasar veya kırılma mekaniği kullanılmaktadır (Lubliner ve ark, 1989).

Betonun sergilediği bazı plastik davranışları klasik plastisite teorisi temsil etmediğini ve gerçek durumun simülasyonu eksik bir şekilde yapıldığını kanıtlanmıştır (Adenaes ve ark, 1977). Öte yandan mikroskobik bir bakış açısıyla klasik plastisite betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin zirve öncesi bölgede doğrusal olmayan davranışı ve yüklemeye üzerine kalıcı şekildeğiştirmeleri temsil edebilir. Bu nedenle, plastisite teorisi beton şekildeğiştirme pekleşme davranışı modellemesinde kullanılmaktadır. Klasik plastisite teorisini araştırmacılar tarafından geliştirerek beton için daha uygun hale getirmek için birçok eser sunulmuştur (Feenstra ve de Borst, 1996; Bicanic ve Pearce, 1996; Grassl ve ark, 2002; Park ve Kim, 2005; Taqieddin, 2008).

Plastisite teorisinde akma fonksiyonu, akış kuralı ve pekleşme kuralı olmak üzere üç ana unsur bulunmaktadır. Akma fonksiyonu plastik şekildeğiştirmelerin olup olmadığını, akış kuralı plastik şekildeğiştirmelerin doğrultusunu ve pekleşme kuralı ise akma yüzeyinin değişimini belirlemektedirler. Akış kuralı plastik potansiyel için bir fonksiyon seçilmesi ile belirlenir. Eğer bu fonksiyon akma yüzeyi ile aynı alınırsa plastik şekildeğiştirmelerin diklik koşulu (associated plasticity) sağlanmış olur aksi durumda, yani farklı bir fonksiyon (non-associated plasticity) seçilirse diklik kuralı geçerli değildir.

### 1.6.2. Beton Hasar Mekaniği

Betonun hasarı, öncelikle mikro çatlakların yayılması ve yoğunlaşmasıyla bağlıdır. Yükleme sırasında bu mikro çatlakların büyümesi, beton malzemenin mekanik özelliklerinde mukavemetin azalmasına ve bozulmaya neden olur. Bundan dolayı, betonarme yapıların kırılma analizinde çatlak oluşumu ve yayılımının modellenmesi oldukça önemlidir.

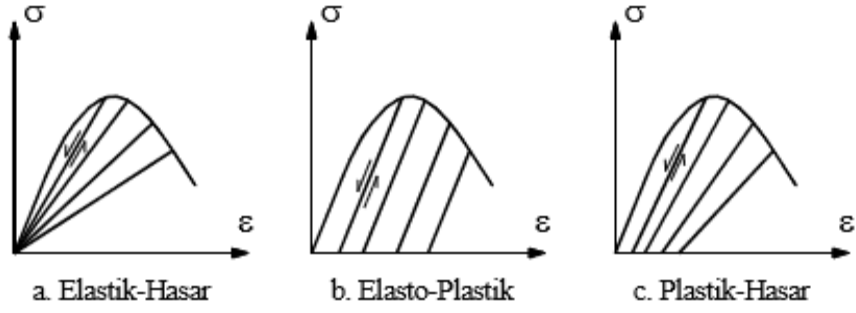
Betonda hasarı modellemek için, bilim adamları tarafından farklı yaklaşımlar da dahil olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirmiştir, örneğin endokronik teorisi (Bazant 1978), plastik kırılma teorisi (Dragon ve Mroz, 1979), toplam şekildeğiştirmeler modelleri

(Kotsovos 1980), akma limiti azalan plastisite (Wastiels 1980), mikro düzlem modelleri (Bazant ve Ozbolt, 1990) ve sınırlayıcı yüzey konsepti (Voyiadjis ve Abu Lebdeh, 1993).

Sürekli hasar mekaniği (Continuum Damage Mechanics) önce metallere uygulandı ve daha sonra farklı malzemelerin modelini yapmak üzere geliştirilmiştir. Hasar mekaniği terimi genel olarak rijitlik kaybı veya sekant modülünün azaltılmasıyla nitelikli modelleri temsil etmek için kullanılmıştır. İlk olarak Kachanov (1958) tarafından sönmeyle ilgili sorunlar için tanıtılmış daha sonra metallerin ve kompozitlerin ilerleyici kırılmanın tanımına uygulanmış ve malzeme yorgunluk davranışını temsil etmesinde kullanılmıştır (Kachanov, 1986). Beton sürekli hasar mekaniğinin kullanımı 1980'lerde başlamıştır. Hasar modelleri beton şekildeğiştirme-yumuşama davranışını tanımlamak için kullanılmıştır. O zamandan beri, araştırmacılar beton temsil etmek için farklı hasar modelleri geliştirmiştir (Krajcinovic, 1986; Mazars ve Pijaudier-Cabot, 1989; Voyiadjis ve Abu Lebdeh, 1992).

Beton malzeme hasar teorisi zirve sonrası bölgeyi temsil edebilir (Krajcinovic, 1983b; Mazars ve Pijaudier-Cabot, 1989). Öte yandan, beton malzemelerde kırılma mekaniğinin kullanımı geniş bir şekilde tartışılmıştır (Mindess, 1983; Krajcinovic ve Fanella, 1986). Bu nedenle, sürekli hasar mekaniği mikroskobik düzeyde hasar değişkenlerinin ve malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Krajcinovic, 1979; Dragon ve Mroz, 1979).

Rijitlik kaybı bir modelde nasıl dahil edildiğine dair çeşitli yaklaşımlar vardır. Bazı araştırmacılar hasarı sadece elastik analizle bir araya getirirken, diğerleri hasarı plastik davranışla bir araya getirmiştir. Şekil 1.13'te tipik malzeme modellerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri açıklamaktadır (a) şıkında elastisite ve hasar mekaniğinin birlikte uygulanmasıyla elde edilen betonun davranışını gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi hasarla birlikte malzemenin rijitliğin azalması buna karşın plastik kalıcı şekildeğiştirmeler yansıtmamaktadır. (b) şıkında ise elasto-plastik betonun davranışını gösterilmiştir. Burada sadece kalıcı şekildeğiştirmeler fakat malzemenin rijitliğin değişimleri temsil etmemektedir. (c) şıkında hasar ve plastisite birlikte kullanılmasıyla elde edilen betonun davranışını gösterilmiştir. Bu modelde hem plastik (kalıcı) şekildeğiştirmeler hem de rijitlikte azalma temsil etmektedir.

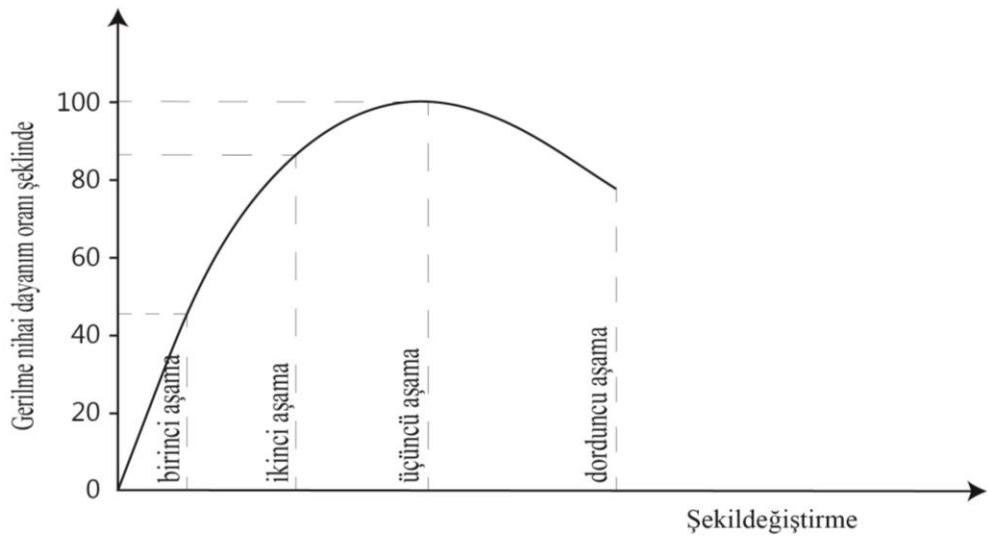


Şekil 1.13. Tipik malzeme modelleri (Lale, 2011)

Plastik hasar modelinde Rijitlik kaybı bir plastisite modeline gömülüdür (Simo ve Ju, 1987a,b; Ju, 1989; Lubliner ve ark, 1989; Voyiadjis ve Kattan, 1989; Luccioni ve ark 1996; Armero ve Oller, 2000; Salari ve ark, 2004; Voyiadjis ve ark, 2008a). Bu modellerde Rijitlik kaybını temsil etmek için elastik ve plastik hasar parametreleri kullanılmakta. Hasar parametreleri, deney sonuçlarıyla parametrelerin kalibre edilmesine yardımcı olan bünye bağıntıları kullanılarak plastik şekildeğişimlerle birleştirilir.

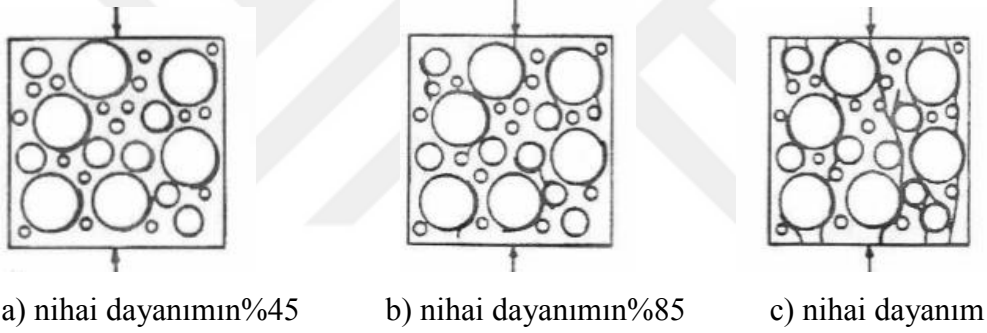
### 1.6.3. Betonun Basınç Etkisindeki Davranışı

Tek eksenli basınç etkisi uygulanan betonun davranışı Şekil 1.14'te gösterilen dört aşamada özetlenebilmektedir.



Şekil 1.14. Betonun tek eksenli yük altındaki basınç davranışı (Chen, 1982)

Birinci aşama nihai dayanımın %30-60'ı arasına karşılık gelmektedir. Şekil 1.14'te bu aşama %45 olarak gösterilmiştir. Bu aşamada, Şekil 1.15a'da gösterildiği gibi çekme gerilmenin belirli noktalarda yoğunlaştığını ve yeni mikro çatlakların başladığı gözlemlenir. Bu yük durumunda, bölgesel çatlaklar başlar, ancak yayılmaz ve sabit çatlaklar şeklinde kalır. Böylece gerilme-şekildeğiştirme davranışı doğrusal elastik olur. Bu nedenle,  $0.3f_c$  genellikle elastiklik sınırı olarak önerilmektedir. Bu sınırın ötesinde, gerilme-şekildeğiştirme eğrisi düz bir çizgiden eğilmeye başlar. Nihai dayanımın %70-90'ına kadar gerilmeler, ikinci aşamayı temsil etmektedir. Şekil 1.14'te bu aşama %85 olarak gösterilmiştir. Bu aşamada, uygulanan yük kademeli olarak arttıkça, çatlak sistemi Şekil 1.15b'de gösterildiği gibi çoğalıp yayılmaktadır. Betonun içindeki çatlaklar artması, elastik doğrusal davranışından sapmaya, rijitlik kaybına ve geri dönmeyen şekildeğiştirmelere neden olmaktadır (Kotsovos ve Newman, 1977).



a) nihai dayanımın%45      b) nihai dayanımın%85      c) nihai dayanım

Şekil 1.15. Betonun tek eksenli yük altındaki çatlak gelişimi (Kotsovos ve Newman, 1977)

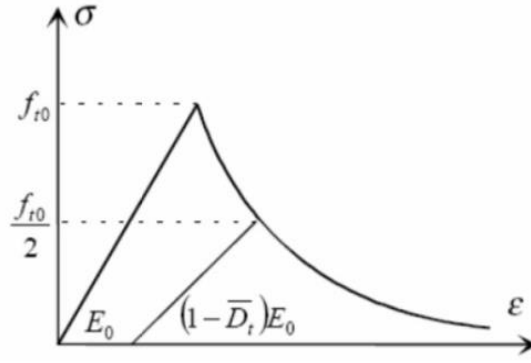
Şekil 1.14'te gösterilen üçüncü aşama nihai dayanıma kadar devam etmektedir. Bu aşamada arayüzeydeki mikro çatlaklar birbirine bağlanıp süreklilik oluşmaktadır. Bu çatlaklar yakındaki agregaların yüzeyindeki bağ çatlaklarıyla birleşerek ve iç hasarın çatlak bölgelerini oluşturmaktadır. Dördüncü aşama, nihai dayanımın ötesindeki bölgeyi tanımlar. Bu bölgede, bir çatlağın yayılmasıyla açığa çıkan enerji, yayılma için gereken enerjiden daha fazladır. Bu nedenle, çatlaklar kararsız hale gelir ve tam bir bozulma ve kırılma meydana gelene kadar kendi kendine yayılır. Bu aşamada, büyük çatlaklar uygulanan yükün yönüne paralel olarak oluşur ve betonun kırılmasına neden olurlar. Boşlukların hacmi önemli ölçüde artar ve Şekil 1.15c'de gösterildiği gibi betonun toplam hacminde hızlı bir genişlemeye neden olur.

Yukarıda belirtilen tüm aşamalar tek eksenli basınç durumunda içindir. Aşama I, (II ve III) ve IV sırasıyla lineer elastik, elastik olmayan ve yerleştirme aşamalarına sınıflandırılabilir. Bu aşamaları anlamak herhangi bir modelin gelişimi için oldukça önemlidir.

#### **1.6.4. Betonun Çekme Etkisindeki Davranışı**

Betonun doğrusal olmayan davranışı, malzemede meydana gelen iki farklı mikro-yapısal değişiklikten kaynaklanır. Bunlar plastik akış ve mikro çatlakların ile boşlukların gelişmesidir. Plastisite açısından bakıldığında, plastik akış işlemi sırasında atomlar arasındaki bağların sayısı pek değişmez. Bu nedenle, mikro-yapısal değişimler plastik davranışı etkilememektedir. Öte yandan, mikro-çatlama malzeme taneleri arasındaki bağı yok etmekte, elastik özellikleri etkilemekte ve aynı zamanda kalıcı deformasyonlara neden olabilmektedir. Bu da hasar mekaniği tarafından modellenenmektedir. Plastisite, tek başına hasar yayılması nedeniyle çekme ve basınç altındaki betonun yumuşama (göçme) davranışını temsil edememektedir. Öte yandan, hasar mekaniği sadece mikro çatlaklar ve boşlukların gelişimi nedeniyle oluşan rijitlik kaybını dikkate alır (Loland, 1980; Ortiz ve Popov, 1982; Krajcinovic, 1985; Simo ve Ju, 1987a, 1987b; Ju ve ark, 1989; Voyiadjis ve Kattan, 1989, 1999, 2006).

Betonun çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşük orantılı bir şekilde yaklaşık olarak %5-10 mertebesinde. Betonun tek eksenli çekme etkisi altındaki tipik gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 1.16’te gösterilmektedir. Genel olarak elastik sınır nihai çekme dayanımının yaklaşık %60-80’i olarak görülmektedir. Bu sınırı geçtikten hemen sonra ara yüzeydeki çatlaklar büyümeye başlar. Basınç durumundaki aksine, çekme durumunda çatlakların sıklığı azdır, yükün uygulandığı yönüne dik bir şekilde belirgin çatlak yayılmaktadır. Çekmede betonun şekildeğiştirme davranışı oldukça gevrek. Betonun çekme dayanımının düşük olmasının en önemli nedeni ara yüzeyinin çekme dayanımı agrega ve harç matrisindeki çekme dayanımından düşük olmasıdır.



Şekil 1.16. Tek eksenli çekme yük altında betonun gerilme - şekildeğiştirme eğrisi.

### 1.6.5. Plastisite ve Hasar Kombinasyonu

Yükleme altındaki betonun gerçek davranışını temsil etmek için analizde elastik rijitliğin değişimini tanımlanmalıdır. Yukarıda tartışıldığı gibi plastisite teorisine dayanan yöntemler rijitliğin değişimleri yansıtamaz. Aksi takdirde sürekli hasar mekaniğine dayanan yöntemlerde, elastik rijitliğin değişimini yakalamak için uygun teorik çerçeve sunulmaktadır ancak bu yöntemler tek başına geri dönmeyen kalıcı şekildeğiştirmeleri yakalamaz. Dolayısıyla betonun mekanik davranışını daha iyi tanımlamak için sürekli hasar mekaniği ile birlikte elastik-plastik bünye denklemlerin kombine ederek dikkate alınmalıdır. Efektif gerilme plastisite ve hasar modelinde, plastisite plastik etkili gerilme kullanıp geri dönüşümsüz olayları modellerken, sürekli hasar mekaniği Rijitlik kaybını temsil etmek için kabul edilmiştir. Bu model rijitlik kaybını plastik şekildeğiştirmelerden ayırabilme avantajına sahiptir.

### 1.6.6. Hasar Durumunun Modellenmesi

Patlama yüküne maruz bir yapıda çoğu durumda elastik davranış sınırları aşılarak doğrusal olmayan davranış ortaya çıkmaktadır. Betonun doğrusal olmayan davranışı, plastik malzeme davranışı ve çatlak gelişimine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Mikro çatlamanın neden olduğu hasarlar beton mukavemetinde ve rijitliğinde azaltmaya yol açar. Metallerin doğrusal olmayan davranışını modellemede kullanılan plastisite teorisi, beton malzemenin davranışını temsil etmek için de kullanılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, plastisite teorisi ve sürekli hasar mekaniğini birleştirerek modeller geliştirilmiştir (Lee ve Fenves, 1998; Faria ve ark; 1998; Salari ve ark, 2004).

Betonarme yapılarda hasarı simüle etmek için üç farklı çatlak modeli kullanılmaktadır (ABAQUS Analysis user's manual 6.1, 2010).

- (1) Dağılmış çatlak beton modeli (Smearred crack concrete model)
- (2) Kırılgan çatlak beton modeli (Brittle crack concrete model)
- (3) Beton Hasarlı Plastisite Modeli CDP (Concrete damaged plasticity model)

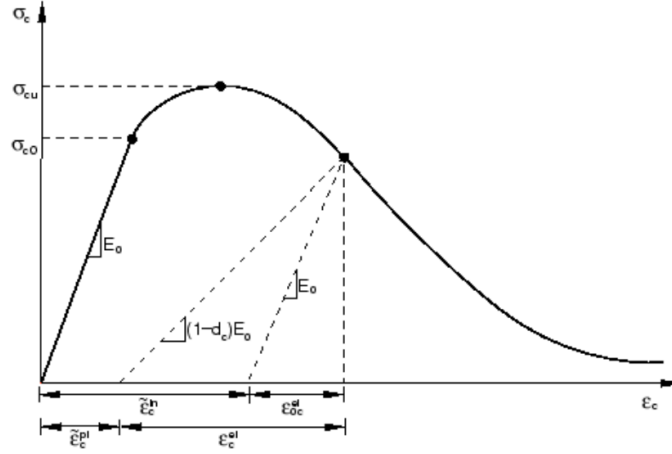
Bu çalışmada, beton hasarlı plastisite (CDP) modeli betonun hem çekme hem de basınç davranışını tam doğrusal olmayan şekilde temsil etme potansiyeline sahip olduğundan seçilmiştir. CDP modeli teorik olarak Lubliner ve ark tarafından tanımlanmış sonrasında Lee ve Fenves tarafından geliştirilmiştir (Lubliner ve ark, 1989; Lee ve Fenves, 1998). Bu modelde, betonun çekme çatlama veya basınç ezilmesi olarak iki kırılma mekanizması varsayılarak, biri çekme durumunda ( $d_t$ ) diğeri da basınç durumunda ( $d_c$ ) olmak üzere iki ayrı hasar katsayısı(oranlar) sunulmaktadır. Hasar oranlar sıfır (hasarsız) ile bir (tam hasarlı) değerleri arasında değişmektedir. Hasar genellikle rijitlik kaybı sonucunda meydana gelmektedir.

Betonun basınç davranışının modellenmesinde gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi sayısal olarak tanımlanmalıdır. Toplam şekildeğiştirme Şekil 1.17'da görüldüğü gibi elastik ve elastik olmayan şekildeğiştirmelerin toplamı olarak ifade edilmelidir (Denklem 1.24).

$$\begin{aligned}\varepsilon_c^{in} &= \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \\ \varepsilon_{0c}^{el} &= \sigma_c/E_0\end{aligned}\tag{1.24}$$

Burada,  $\varepsilon_c^{in}$  basınç elastik olmayan şekildeğiştirmesini,  $\sigma_c$  basınç gerilmesini,  $\varepsilon_c$  basınçta toplam şekildeğiştirmesini,  $\varepsilon_{0c}^{el}$  elastik şekildeğiştirmesini ve  $E_0$  başlangıç (hasarsız) elastisite modülünü göstermektedir.





Şekil 1.17. Tek eksenli yükleme altında beton basınç davranışı (ABAQUS Analysis user's manual 6.1, 2010)

Denklem (1.25) kullanarak elastik olmayan şekildeğiştirme değerleri plastik şekildeğiştirmesine dönüştürülmektedir.

$$\widetilde{\varepsilon}_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (1.25)$$

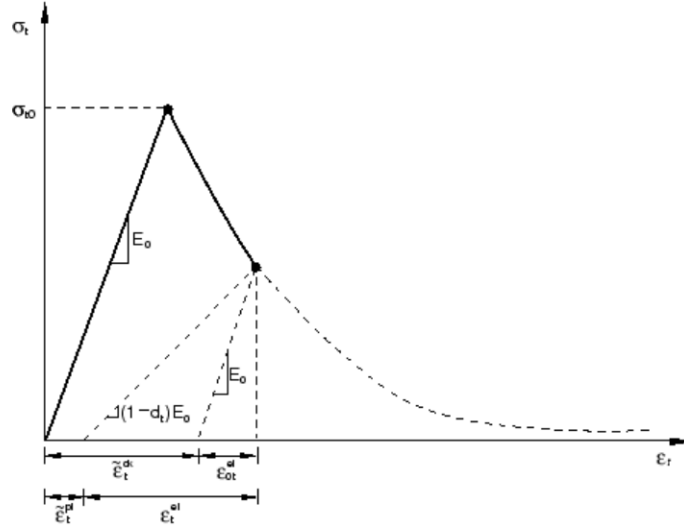
Burada,  $d_c$  basınç hasar oranını  $\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}$  eşdeğer plastik basınç şekildeğiştirmesini göstermektedir.  $\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}$  Plastik eşdeğeri sıfırdan büyük ise malzemenin plastik durumuna ulaştığını göstermektedir.

Betonun çekme davranışın modellemesinde de benzer yaklaşım kullanılır. Donatı olmayan ya da düşük donatı oranlı betonarme numunelerde opsiyonel olarak kırılma enerjini çatlama kriteri bu amaçla kullanılabilir. Çekme şekildeğiştirmesi, elastik ve plastik şekildeğiştirmelerin toplamına eşittir (Şekil 1.18). Denklem 1.27 kullanarak çatlama şekildeğiştirme değerleri plastik şekildeğiştirmesine dönüştürülmektedir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_t^{ck} &= \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \\ \varepsilon_{0t}^{el} &= \sigma_t / E_0 \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$\widetilde{\varepsilon}_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (1.27)$$

Burada,  $\varepsilon_c^{in}$  basınç elastik olmayan şekildeğiştirmesini,  $\sigma_c$  basınç gerilmesini,  $\varepsilon_c$  basınçta toplam şekildeğiştirmesini,  $\varepsilon_{0c}^{el}$  elastik şekildeğiştirmesini ve  $E_0$  başlangıç (hasarsız) elastisite modülünü göstermektedir.



Şekil 1.18. Tek eksenli yükleme altında betonun çekme davranışı  
(ABAQUS Analysis user's manual 6.1, 2010)

Betonun tek eksenli yükleme altında rijitlik kaybı dikkate alınarak gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi çekme ve basınç durumları için Denklem 1.28-1.29'da verilmektedir. CDP modeli tek eksenli veya çift eksenli yükleme altındaki betonun davranışını başarılı bir şekilde temsil ederken üç eksenli yükleme durumunda yeterli olmamaktadır.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \widetilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (1.28)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \widetilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (1.29)$$

Burada,  $\sigma_t$  çekme gerilmesini,  $\sigma_c$  basınç gerilmesini,  $\varepsilon_t$  çekme toplam şekildeğiştirmesini,  $\varepsilon_c$  basınç toplam şekildeğiştirmesini,  $\widetilde{\varepsilon}_t^{pl}$  eşdeğer plastik çekme şekildeğiştirmesini,  $\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}$  eşdeğer plastik basınç şekildeğiştirmesini ve  $E_0$  başlangıç (hasarsız) elastisite modülünü göstermektedir. İzotropik malzeme varsayılarak ani hasar durumu için CDP

modeline göre hasar etkisi Denklem 1.30'da gösterilmektedir.  $d$  hasar oranı basınç durumunda  $d_c$ , çekme durumunda ise  $d_t$  değerini almaktadır.

$$E = (1-d) \quad (1.30)$$

CDP modelinde efektif gerilme prensibi kullanılmaktadır. Bu modelde betondaki boşluklar ve oluşan çatlaklar hasar olarak sayılmaktadır. Efektif tek eksenli gerilmeler  $\bar{\sigma}_t$  ve  $\bar{\sigma}_c$  Denklem 1.31-1.32'deki şekilde elde edilebilmektedir.

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\varepsilon_t - \widetilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (1.31)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\varepsilon_c - \widetilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (1.32)$$

CDP modelinde, plastik davranış Lubliner'in önerdiği daha sonra Lee ve Fee tarafından geliştirilen akma fonksiyonuna dayalı olarak Denklem 1.33-1.36'daki gibi ifade edilir (Lubliner ve ark, 1989; Lee ve Fenves, 1998).

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta (\widetilde{\varepsilon}^{pl}) \langle \widetilde{\sigma}_{max} \rangle - \gamma \langle -\widetilde{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c (\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (1.33)$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)^{-1}}{2\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)^{-1} - 1}; \quad 0 \leq \alpha \leq 0.5 \quad (1.34)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c (\widetilde{\varepsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t (\widetilde{\varepsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (1.35)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2 K_c - 1} \quad (1.36)$$

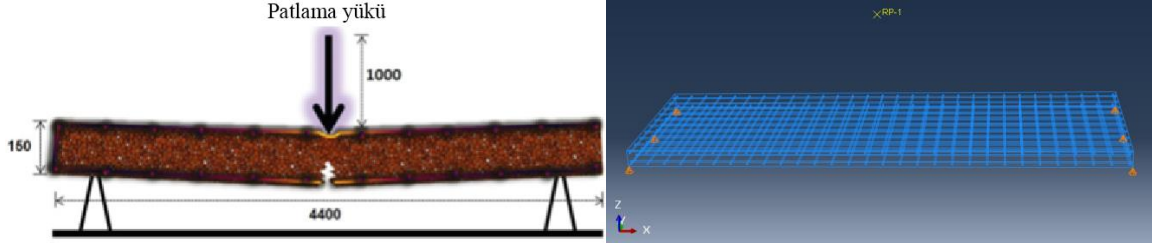
Burada,  $\langle \widetilde{\sigma}_{max} \rangle$  maksimum asal efektif gerilmesi,  $\left(\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}\right)$  başlangıçtaki çift eksenli akma gerilmesi başlangıçtaki tek eksenli akma gerilmesine oranını (genellikle 1.16 olarak varsayılmaktadır),  $K_c$  akma fonksiyonun çekme meridyendeki ikincil sabit gerilmesinin basınç meridyendekine oranını,  $p$  hidrostatik basınç gerilmesini,  $\bar{\sigma}_t$  etkin çekme kohezyon (birleşme) gerilmesi ve  $\bar{\sigma}_c$  etkin basınç kohezyon gerilmesini göstermektedir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında betonarme binaların patlama etkisindeki gerçek davranışının ve hasar durumunun belirlenmesi hedef alınmıştır. Bu amaçla öncelikle literatürde mevcut olan betonarme bir döşemenin patlama etkisindeki analizi doğrusal olmayan malzeme modeli ve CONWEP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Alañón ve ark, 2018). Abaqus/Explicit 2017 programında analizler sonucunda elde edilen hasar oranları ve dağılımları çalışmada sunulan deneysel ve teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analizden hasar görüntüleri ve deneyi sonuçları birebir örtüştüğü elde edilmiştir. Önerilen yöntemin doğruluğu bu şekilde teyit edildikten sonra mevcut üç katlı çerçevesel bir betonarme binanın patlama etkisinde analizleri gerçekleştirilmiştir. Binanın üç boyutlu modeli sayısal olarak sonlu eleman yöntemiyle Abaqus/Explicit (Açık) modellenmiştir. Daha sonra sonlu eleman boyutunun analiz sonuçlarına etkisini belirleyebilmek amacıyla için farklı sonlu eleman boyutları için analizler yapılmıştır. Hasar ve enerji sonuçları farklı eleman boyutları için karşılaştırılmıştır (Alañón ve ark, 2018). Enerjiye dayanan yaklaşım kullanılarak optimum sonlu eleman boyutu 10cm olarak belirlenmiştir. Son olarak bu binanın patlama etkisindeki davranışı, farklı patlayıcı miktarları kullanılarak binadan farklı mesafelerde ve zeminden farklı yüksekliklerde oluşturulan toplam 9 patlama senaryosu için analiz edilmiştir. Analizlerde hasar dağılımına ve enerji çıkışlarına bakılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

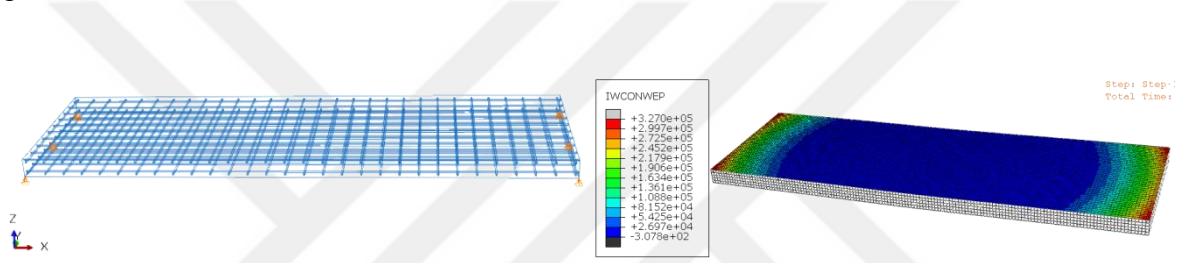
### 2.1. Kullanılan Yöntemin Doğrulaması

Önerilen yöntemin doğrulaması, Alañón ve ark (2018) tarafından bir betonarme döşeme için deneysel çalışma sonuçları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu betonarme döşeme sayısal olarak sonlu eleman yöntemiyle Abaqus 2017'de modellenmiştir (Şekil 2.1). Döşeme geometrik özellikleri uzunluğu, genişliği ve kalınlığı sırasıyla 440cm, 146cm ve 15cm olarak kullanılmıştır. Donatı uzunluğu ve genişliği iki yönde  $\phi 12/15$ cm iki ağ olarak yerleştirilmiştir. Şekil 2.2'de döşeme donatı detayları ve döşeme etkilenen yüzeyi gösterilmektedir. Patlama yükü 15kg TNT eşdeğerli patlayıcı ağırlığından kaynaklanmaktadır. Patlayıcı madde döşeme üst yüzeyin merkezinden 1m mesafesinde patlatılmıştır.



Şekil 2.1. Denedeyde kullanılan döşeme (Alañón ve ark, 2018).

Beton malzeme özelliği maksimum basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 25Mpa, 3.7Mpa ve 27.3Gpa olarak alınmıştır. Beton donatısı için B500S tipi çeliği kullanılmıştır. Tablo 2.1’de analizde kullanılan malzeme özelliklerini gösterilmektedir.



a. Donatı detayları.

b. Patlama etkilenen yüzey.

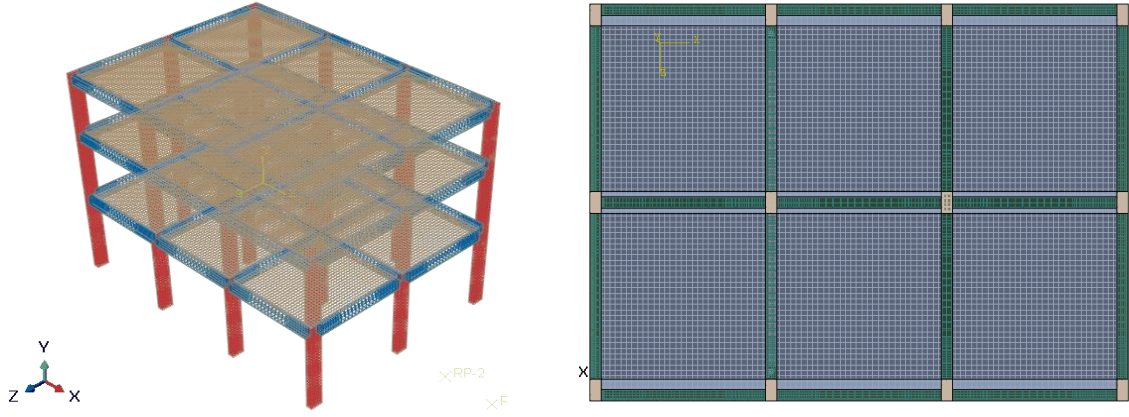
Şekil 2.2. Döşeme sonlu eleman modeli ve donatı detayları.

Tablo 2.1. Modellemesinde malzeme

	Yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	Elastisite modülü	Poissons oranı	Çekme/basınç dayanımı	Akma gerilmesi	Efektif plastik şekildeğiştirme
Donatı	7800	200	0.3	500	417	0.12
Beton	2400	210	0.2	3.7/25	----	----

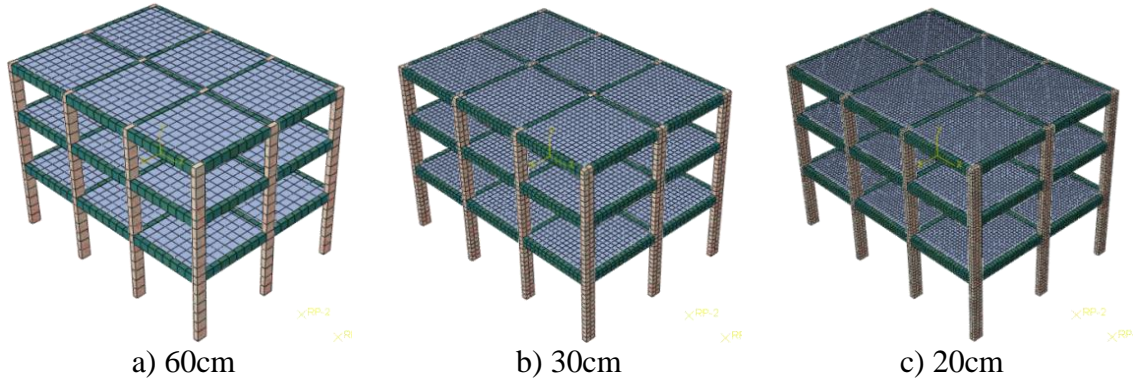
## 2.2. Sonlu Eleman Boyut Etkisinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, patlama etkisine maruz bir betonarme binada sonlu eleman boyutlarına bağlı olarak hasar dağılımının nasıl olacağı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla üç boyutlu olarak modellenen bir betonarme binanın patlama etkisindeki analizi, ABAQUS programında yer alan CDP modeli kullanarak CONWEP yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Modellenen üç katlı betonarme bina 1470\*1170cm taban alanını sahip olup kat yükseklikleri sırasıyla 4.5, 3.5 ve 3m’dir (Şekil 2.3).



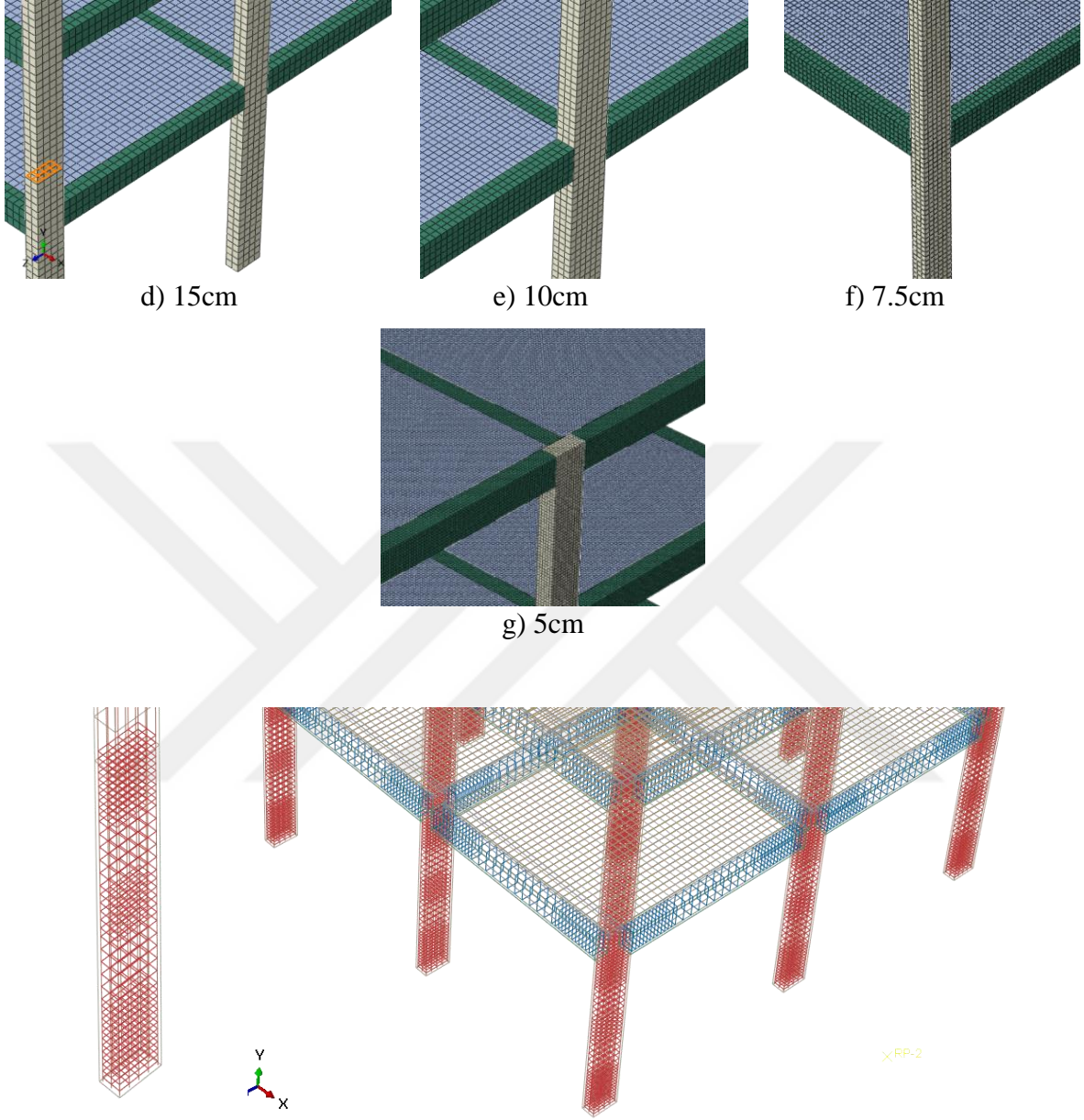
Şekil 2.3. Modellenen üç katlı betonarme binaya ait görüntüler

Patlama etkisindeki davranışı belirleyebilmek için kolon, kiriş ve döşemelerde kullanılan donatılar da modellenmiştir. Temel sistemi modellenmemiş bunun yerine kolon alt uçlarının tam tutulu olduğu varsayılmıştır. Bütün kolonlar aynı kesite (30\*60cm) sahip olup boyuna doğrultuda 12 adet 14mm çapında donatı ve enine 8-15cm arayla 8mm çapında etriye içermektedir. Bütün kirişler aynı kesitte (30\*50cm) olup çekme ve basınç bölgelerinde 3'er adet 12mm'lik boyuna donatı ve 9-20cm arayla 8mm çapında kesme donatısı barındırmaktadır. Döşemeler 495\*450\*15cm ebatlarında olup 15cm arayla 8mm çapında hasır donatı kullanılarak oluşturulmuştur. Farklı sonlu eleman boyutlarının, betonarme binanın patlama etkisindeki davranışını nasıl etkilediği 60, 30, 20, 15, 10, 7.5 ve 5cm olarak yedi farklı durum için incelenmiştir (Şekil 2.4). Binanın modellenmesinde kolon, kiriş ve döşemelerdeki donatılar modellemede dikkate alınmıştır (Şekil 2.5). Donatı detaylandırılması binanın statik çözümlemesi sonucunda betonarme hesaplarına göre yapılmıştır.



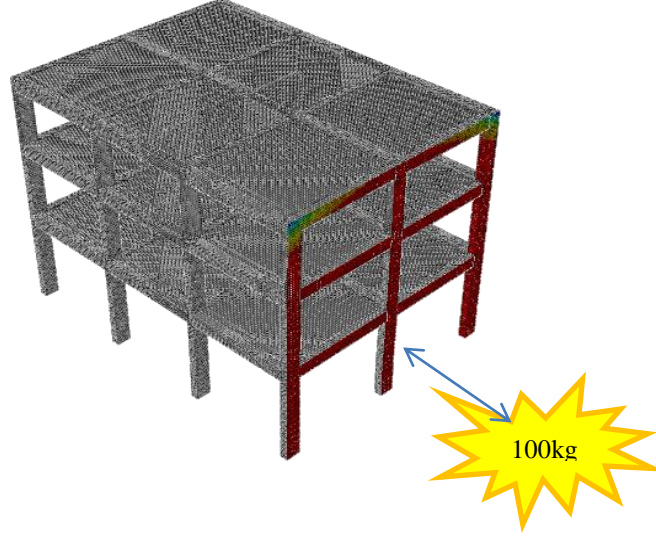
Şekil 2.4. Betonarme binanın farklı sonlu eleman boyutları için sonlu eleman modelleri.

Şekil 2.4' ün devamı



Şekil 2.5. Betonarme binanın donatı detayları.

Betonarme binadaki patlama etkisi, binanın dışında ve binadan 2.5m mesafede zemin seviyesinde 100kg'lık bir TNT patlayıcının patlatılması olarak dikkate alınmıştır (Şekil 2.6). Analizlerde patlama olayının zemindeki yansıma etkileri de hesaba katılmıştır. Patlamada ortaya çıkan basınç etkisi, binanın patlama yönündeki yüzeylerine uygulanmıştır.



Şekil 2.6. Binaya, patlama noktasına ve etkilenen yüzeye ait görüntü.

Seçilen binanın sonlu eleman modeli ABAQUS programında Explicit (açık) yöntemle analiz edilmiştir. Analizlerde betonun doğrusal olmayan davranışı ve doğrusal olmayan yüzey patlama yükü CONWEP yöntemi kullanılarak dikkate alınmıştır. Betonarme elemanlar, programın kütüphanesinde bulunan her düğüm noktasında üç serbestliğe sahip sekiz düğüm noktalı katı elemanlar (C3D8R) kullanılarak modellenmiştir. Donatı çeliğinin modellenmesinde üç boyutlu doğrusal kiriş elemanı (B31) kullanılmış ve donatı beton içine gömülü olarak tanımlanmıştır. Analiz süresini azaltmak için her bir elemanın davranışı doğrusal entegrasyonla tek bir noktada dikkate alınmıştır. Sıfır enerji ile deformasyon modları önlemek için Hourglass kontrolü dahil edilmiştir.

CDP yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde beton malzeme için aşağıda sıralanan özelliklerin tanımlanması gerekmektedir.

- Basınç davranışı gerilme-şekildeğiştirme diyagramı
- Çekme davranışı gerilme-şekildeğiştirme diyagramı (kırılma enerjisi) ( $G_f$ )
- Genleşme açısı ( $\Psi$ ) (beton için 30-40 derece arasında)
- Varsayılan akış potansiyeli eksantrikliği ( $C=0.1$ )
- Viskozite parametresi ( $\mu$ ) (algılama hızı)
- Basınç ve çekme için hasar koşulları ( $d_t$  ve  $d_c$ )
- Başlangıçtaki çift eksenli akma gerilmesinin tek eksenli akma gerilmesine oranı ( $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ )

Bu çalışmada beton ve çelik için elastik malzeme özellikleri Tablo 2.2’de ve beton için plastik malzeme özellikleri Tablo 2.3’te verilmektedir.



Tablo 2.2. Beton ve çelik için elastik malzeme özellikleri

Malzeme	E (GPa)	$f_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$\nu$	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )
Beton	26.6	30	----	0.2	2400
Çelik	210	----	420	0.3	7800

Tablo 2.3. Beton için plastik malzeme özellikleri

Basınç				
Akma Gerilmesi (MPa)	Kırılma şekildeğiştirmesi	Hasar ( $d_c$ )	Kırılma şekildeğiştirme	
15.3	0	0	0	
19.2	4.82E-05	0	4.82E-05	
22.5	0.00012	0	0.000119844	
25.2	0.000214786	0	0.000214786	
27.3	0.000333074	0	0.000333074	
28.8	0.000474708	0	0.000474708	
29.7	0.000639689	0	0.000639689	
30	0.000828016	0	0.000828016	
29.7	0.001039689	0.01	0.001039689	
28.8	0.001274708	0.04	0.001274708	
27.3	0.001533074	0.09	0.001533074	
25.2	0.001814786	0.16	0.001814786	
22.5	0.002119844	0.25	0.002119844	
19.2	0.002448249	0.36	0.002448249	
15.3	0.0028	0.49	0.0028	
10.8	0.003175097	0.64	0.003175097	
5.7	0.003573541	0.81	0.003573541	
Çekme				
Akma gerilmesi (MPa)	Çatlama şekildeğiştirmesi	Hasar ( $d_t$ )	Çatlama şekildeğiştirmesi	
3	0	0	0	
0.03	0.001167315	0.99	0.001167315	
Plastik parametreler				
$\Psi$	$\epsilon$	$f_{b0}/f_{c0}$	K	$\mu$
31	0.1	1.16	0.667	0

Oluşturan modellerin her biri patlama etkisinde 100ms süreyle analiz edilmiştir. Analiz sonrasında çekme ve basınç durumlarında hasar oranlarına (Damaget, Damagec) ve plastik eşdeğerlerine (PEEQ) bakılarak değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca ilk 15ms süre boyunca harici iş, dahili enerji, kinetik enerji ve şekildeğiştirme enerjilerindeki değişimler de dikkate alınmıştır. Burada,

- Harici iş, harici olarak uygulanan yükler tarafından yapılan iş,
- Dahili enerji, modelde depolanan enerjiyi,
- Şekildeğiştirme enerjisi hasar oluşurken serbest bırakılan enerjiyi,
- Kinetik enerji modelin hareketini

temsil etmektedir. Dahili enerji ( $E_I$ ), geri dönebilen elastik şekildeğiştirme enerjisinin ( $E_E$ ), plastik davranış yoluyla dağılmış enerjinin ( $E_P$ ), visko-elastik veya sürtünme yoluyla dağılmış enerjinin ( $E_{CD}$ ) ve yapay şekildeğiştirme enerjisinin toplamı ( $E_A$ ) olarak Denklem 2.1'de gibi elde edilir. Harici iş (ALLWK) ise dahili enerjinin ( $E_I$ ), kinetik enerjinin ( $E_K$ ) ve diğer yayılan enerjilerin toplamı olarak Denklem 2.2'de verilmiştir. Denklem 2.3'te verilen toplam enerjinin dengesi modelin davranışının değerlendirmesinde oldukça önemlidir.

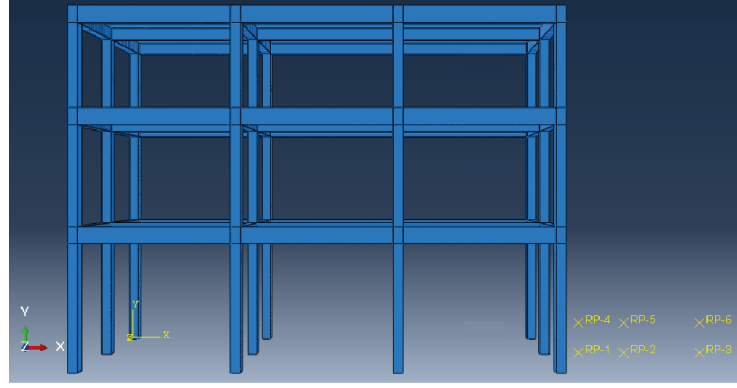
$$E_I = E_E + E_P + E_{CD} + E_A \quad (2.1)$$

$$ALLWK = E_I + E_K + \text{diğer enerjiler} \quad (2.2)$$

$$E_{total} = \Sigma(-ALLWK + E_I + E_K + \text{diğer enerjiler}) \quad (2.3)$$

### 2.3. Patlama Senaryoları

Bu tez çalışmasında uygun sonlu eleman boyutu bulunduktan sonra patlama noktasının hasarlara verdiği etkisini anlamak için, ilk olarak zemin yüzeyinde 100kg TNT patlayıcı için değişken mesafe 1m, 2.5m ve 5m için üç analiz yapılmıştır, daha sonra analizler aynı mesafeler için zemin yüzeyinden 1m yüksekte tekrarlanmıştır. Son olarak patlayıcı miktarının 250kg TNT olması durumunda benzer analizler yapılmıştır (Şekil 2.7.). Özetlenecek olursa bu betonarme binanın toplam 9 farklı durum için patlatma etkisindeki analizleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 2.7. Patlama senaryoları

Senaryo 1: Binadan 1m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu

Senaryo 2: Binadan 1m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu

Senaryo 3: Binadan 1m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu

Senaryo 4: Binadan 2.5m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu

Senaryo 5: Binadan 2.5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu

Senaryo 6: Binadan 2.5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu

Senaryo 7: Binadan 5m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu

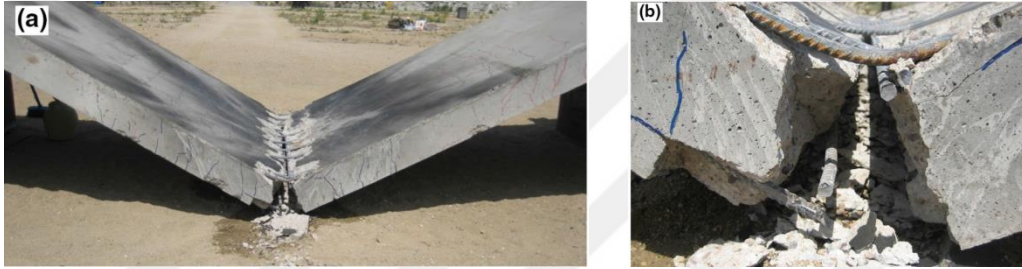
Senaryo 8: Binadan 5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu

Senaryo 9: Binadan 5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu

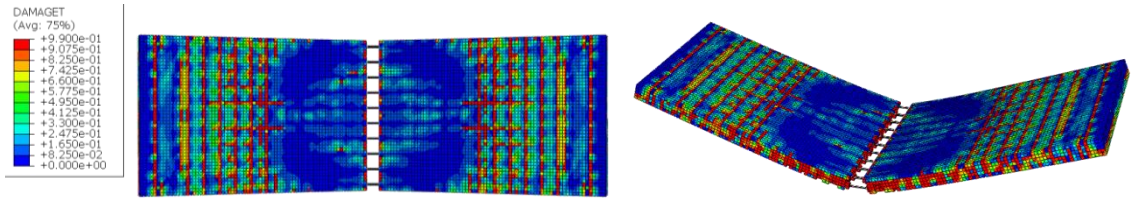
### 3. BULGULAR VE İRDELEMELER

#### 3.1. Doğrulama Modelinin Analiz Sonuçları

Deney ve modelleme sonuçlarına bakıldığında Şekil 3.1’de gösterildiği gibi döşemenin ortasında kırılma oluştuğu ve farklı yerlerde çatlama oluştuğu görülmektedir. Modellemede kullanılan 3cm’lik sonlu eleman boyutu için sonuçlar gerçek deneyle örtüşmektedir. Çelikte hasar ve kırılma eleman silmesiyle değil sonlu elemanda sonsuz uzama şeklinde gösterilmiştir.



Deney sonuçları (Alañón ve ark, 2018).



Önerilen yöntemle analiz sonuçları

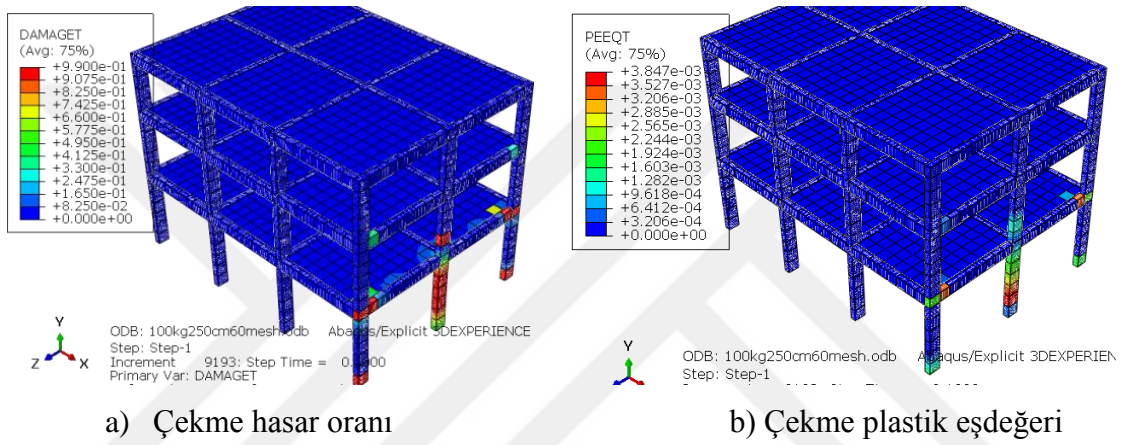
Şekil 3.1. Döşemenin hasar durumları.

#### 3.2. Boyut Etkisi Analiz Sonuçları

##### 3.2.1. Sonlu Eleman Boyutunun 60cm Olması

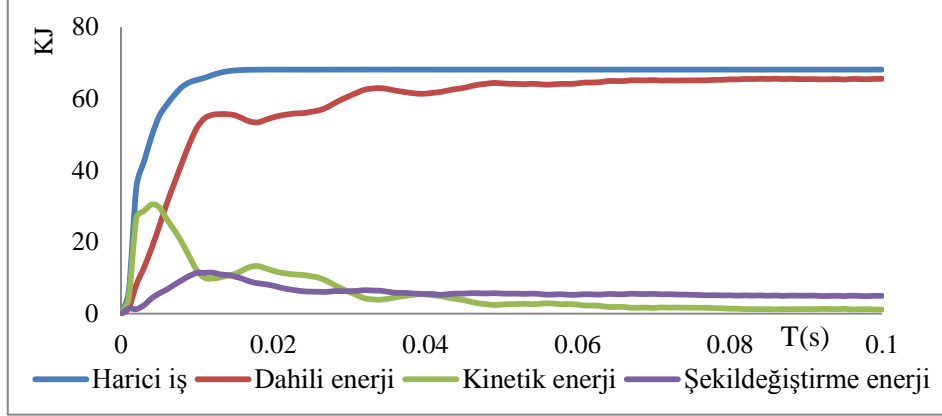
Betonarme binanın 60cm’lik sonlu eleman boyutları için gerçekleştirilen analizleri sonucunda, en önemli kriterler olan çekme plastik eşdeğer  $\widetilde{\varepsilon}_t^{pl}$  (PEEQT), çekme hasar oranı  $d_t$  (DAMAGET) ve asal plastik şekildeğiştirmenin maksimum değeri (PE) dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Hasar oranı 0-1 arasında değerler almakta; 0 değeri

malzemenin orijinal durumu temsil ederken 1 değeri tam hasarlı durumu temsil etmektedir. Şekil 3.2’de 60cm’lik sonlu eleman boyutları için elde edilen çekme hasar oranı ve çekme plastik eşdeğeri verilmektedir. Analizde  $PEEQT > 0$  ve  $PE > 0$  olan sonlu elemanlarda çatlak gelişimi gerçekleşmektedir (ABAQUS Analysis user’s manual 6.1, 2010). Analizler sonucunda, betonarme binada patlama etkileyen yüzeyde zemin kat orta kolonunda ve kolon kiriş birleşim bölgelerinde çekme hasar oranının en büyük değerler aldığı belirlenmiştir (Şekil 3.2a). Ayrıca bu durumda zemin kat orta kolonunda çatlakların oluşması beklenilmektedir (Şekil 3.2b).



Şekil 3.2. Betonarme binanın 60cm eleman boyutu için hasar değerlendirilmesi.

Patlama analizlerinde enerji değişimlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Çeşitli enerji bileşenleri arasındaki karşılaştırmalar, analizden elde edilen sonuçların uygun bir davranış verip vermediğinin değerlendirmesinde kullanılır. Çatlak ilerlerken potansiyel enerjinin belli miktarı serbest kalır. Serbest kalan enerji, emilen enerjiye eşit veya daha büyük ise bu durumda çatlakın ilerlediği varsayılır (Hillerborg ve ark, 1976). Şekil 3.3’te analiz sonucunda harici iş, dahili enerji, kinetik enerji ve şekildeğiştirme enerjilerindeki değişimler verilmektedir.

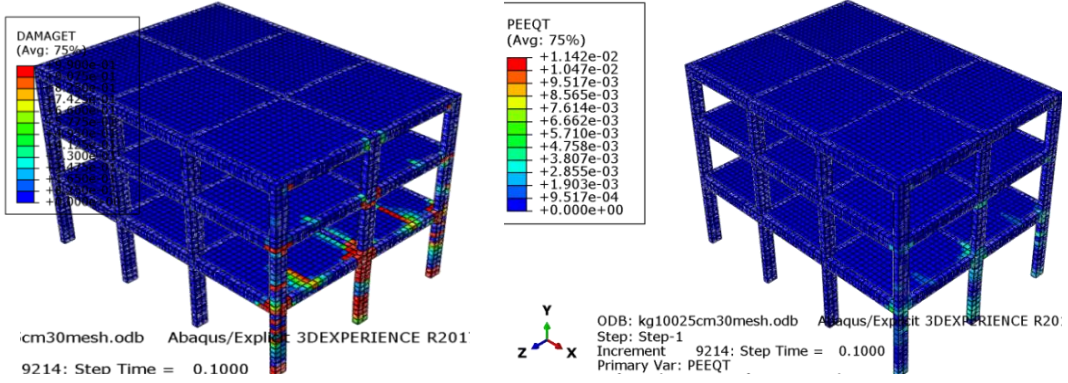


Şekil 3.3. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (60cm eleman boyutu için).

Analizden sonuçlarından harici işin maksimum 0.02s'de 68KJ olmuştur. Harici iş, kinetik enerji ve dahili enerjiye dönüşmektedir. Patlama etkisinde bina harekete başlamakta ve kinetik enerji diyagramına ilk aşamada ani bir artış oluşmaktadır. Maksimum kinetik enerji 30.5KJ olmaktadır. Bu da hızın büyük bir değer aldığını daha sonra da hızın ani azaldığı ve hareketin dindiği anlamına gelmektedir. Şekildeğiştirme enerji eğrisi elastik rijitlik kaybını ifade etmektedir ve maksimum değeri 11.5KJ'dur. Dahili enerji, genel olarak ilk aşamada hızlı gerçekleşen daha sonra yavaş devam eden bir artış gösterir.

### 3.2.2. Sonlu Eleman Boyutunun 30cm Olması

Betonarme binanın 30cm'lik sonlu eleman boyutları için gerçekleşen analiz sonunda çekme hasar oranları incelendiğinde, hasarların patlama etkileyen yüzeyde zemin kat orta kolonun mesnetlere yakın bölgelerinde ve kolon-kiriş birleşim bölgesinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu hasarların ikinci kattaki kolonlar ile kolon-kiriş birleşim bölgelerine ulaştığı görülmektedir. 60cm'lik sonlu eleman boyutunun aksine bu durumda çatlakların kolon-kiriş birleşim bölgelerinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 3.4.).

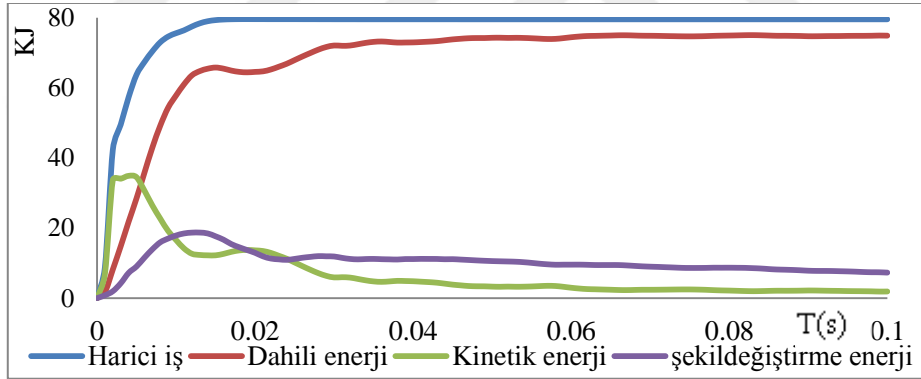


a) Çekme hasar oranı.

b) Çekme plastik eşdeğeri.

Şekil 3.4. Betonarme binanın 30cm eleman boyutu için hasar değerlendirilmesi.

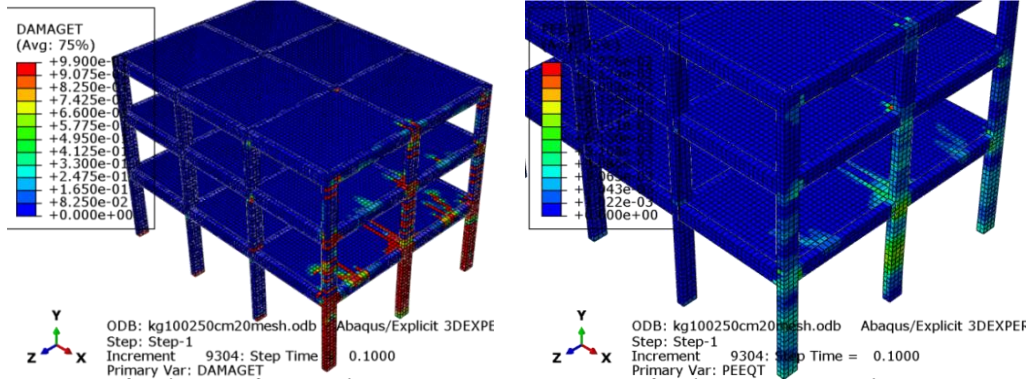
Analiz sonucunda enerji çıkışlarında önceki duruma göre bir artış görülmektedir. Kinetik enerjinin maksimum değeri 34.9KJ ve şekildeğiştirme enerjisinin maksimum değeri 18.7KJ olarak elde edilmiştir. Dahili enerji maksimum değer aldıktan sonra analiz süresi bitene kadar yatay sabit bir şekilde devam etmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (30cm eleman boyutu için).

### 3.2.3. Sonlu Eleman Boyutunun 20cm Olması

Betonarme binanın 20cm sonlu eleman boyutu için gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen çekme hasar oranı ve çekme plastik eşdeğeri dağılımı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu durumda hasar sadece patlama etkiyen yüzeyde zemin kat ortadaki kolonda olmayıp diğer kolonlara ve diğer katlara da yayılmıştır. Ayrıca kolon-kiriş birleşim bölgelerinde, kiriş orta bölgelerinde ve döşemelerde de hasar oluşumları gözlemlenmiştir.

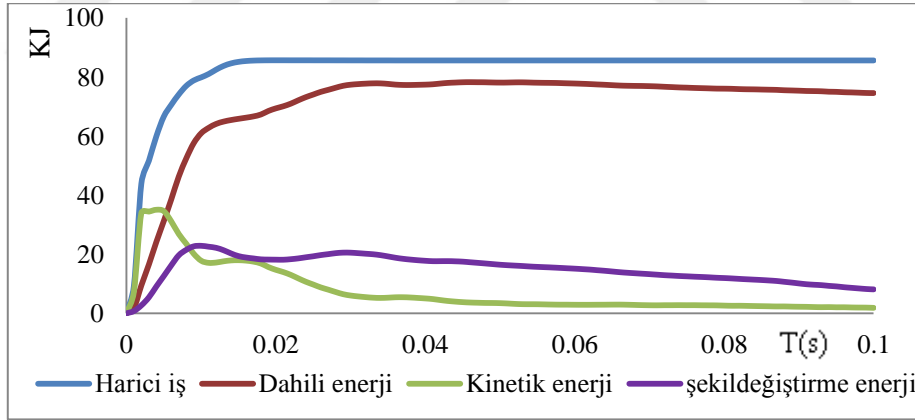


a) Çekme hasar oranı.

b) Çekme plastik eşdeğeri.

Şekil 3.6. Betonarme binanın 20cm eleman boyutu için hasar değerlendirilmesi.

Enerji çıkışlarında 20cm'lik eleman boyutu için, 30cm'lik ve 60cm'lik eleman boyutuna göre bir artış görülmektedir (Şekil 3.7). Kinetik enerjinin maksimum değeri 35.06KJ ve şekildeğiştirme enerjisinin maksimum değeri 22.86KJ olarak elde edilmiştir. Dahili enerjide, maksimum değere ulaştıktan sonra analiz süresi bitene kadar bir azalma gerçekleşmektedir.

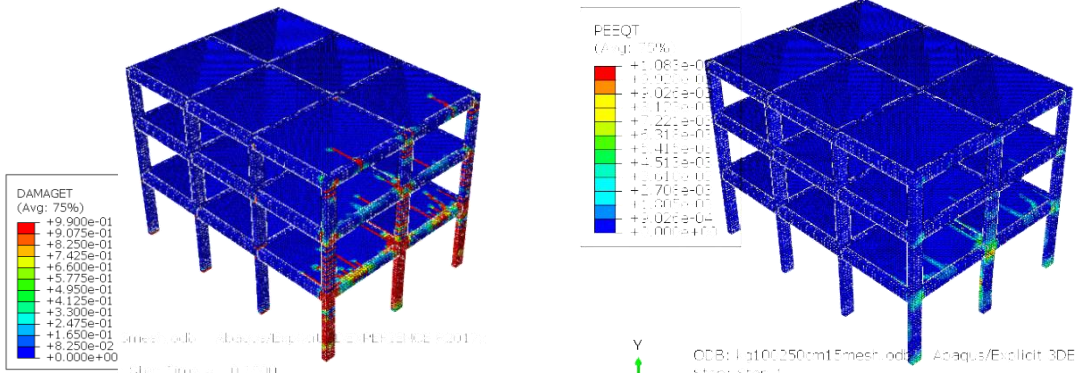


Şekil 3.7. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (20cm eleman boyutu için).

### 3.2.4. Sonlu Eleman Boyutunun 15cm Olması

Betonarme binanın 15cm'lik eleman boyutu için analiz sonuçlarından elde edilen hasar oranları incelendiğinde, 30cm ve 20cm'lik eleman boyutlarındaki hasar durumuna benzerlik görülmektedir. Bu durumda döşemelerdeki hasarların daha da belirginleştiği ve tüm hasarların en üst kata kadar yayıldığı belirlenmiştir (Şekil 3.8).



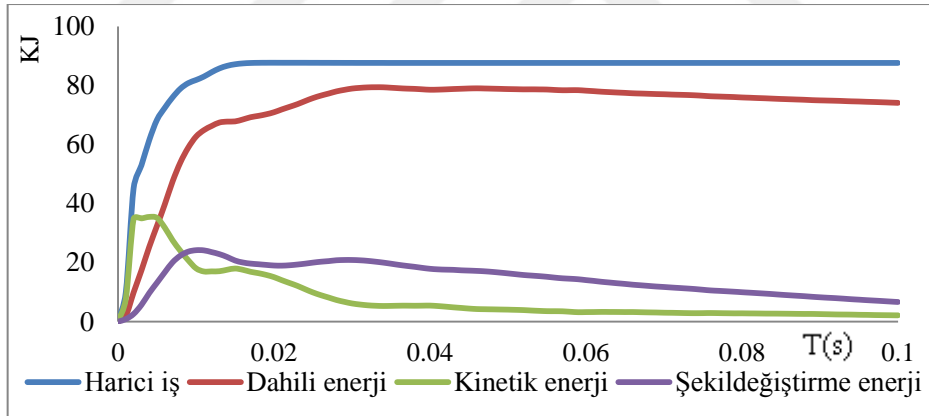


a) Çekme hasar oranı.

b) Çekme plastik eşdeğeri.

Şekil 3.8. Betonarme binanın 15cm eleman boyutu için hasar değerlendirilmesi.

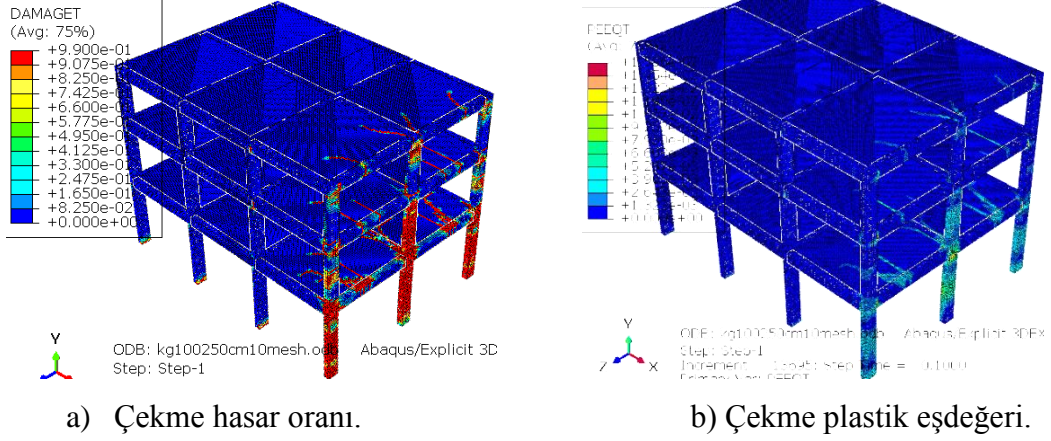
Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 34.96KJ ve şekildeğiştirme enerjisinin maksimum değeri 24.2KJ olarak elde edilmiştir. 20cm'lik eleman boyutlarındaki durum ile karşılaştırıldığında kinetik enerjide bir miktar azalma olmasına karşın şekildeğiştirme enerjisinde artış meydana gelmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (15cm eleman boyutu için).

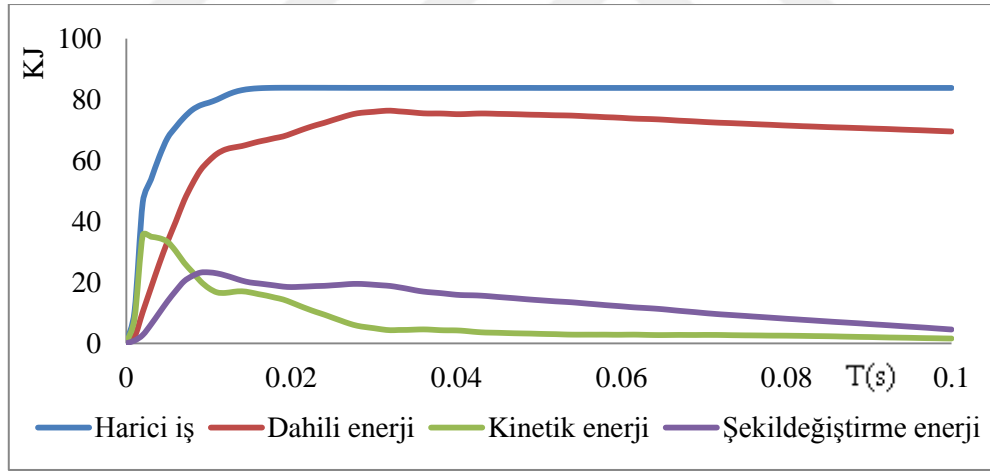
### 3.2.5. Sonlu Eleman Boyutunun 10cm Olması

Betonarme bina 10cm'lik eleman boyutu için analiz sonuçları Şekil 3.10'da gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin kattaki tüm kolonlar ile birinci ile ortadaki kolonun tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca etkilenen yüzeydeki kirişlerde kısmi hasarlar, zemin ve birinci katlarda ortadaki kolon-kiriş birleşim bölgelerinde tam hasar olduğu, döşemelerdeki hasarların daha içerilere kadar ilerlediği ve üçüncü kat döşemelerinde hasarların diyagonal bir yön aldığı görülmektedir.



Şekil 3.10. Betonarme binanın 10cm eleman boyutu için hasar değerlendirilmesi.

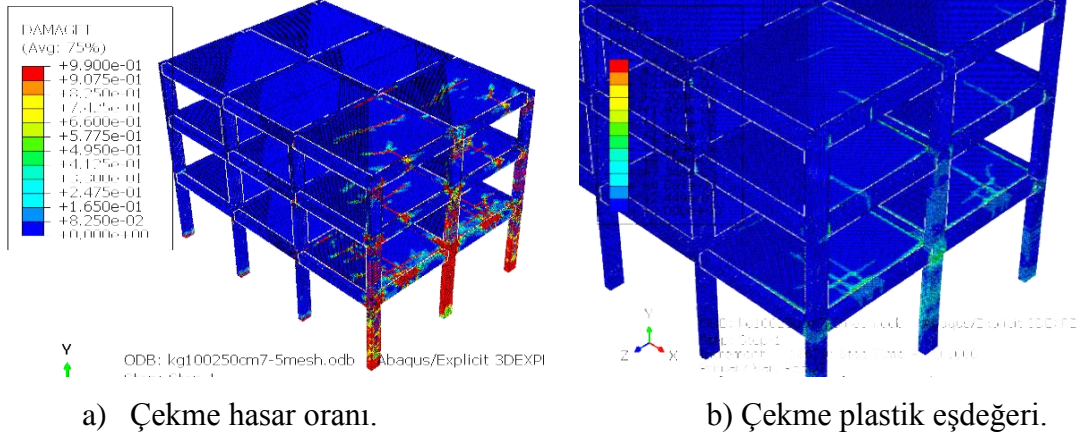
Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 35.5KJ ve şekildeğiştirme enerjisinin maksimum değeri 23.24KJ olarak elde edilmiştir. 15cm'lik eleman boyutlarındaki durum ile karşılaştırıldığında kinetik enerjide bir miktar artma olmasına karşın şekildeğiştirme enerjisinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (10cm eleman boyutu için).

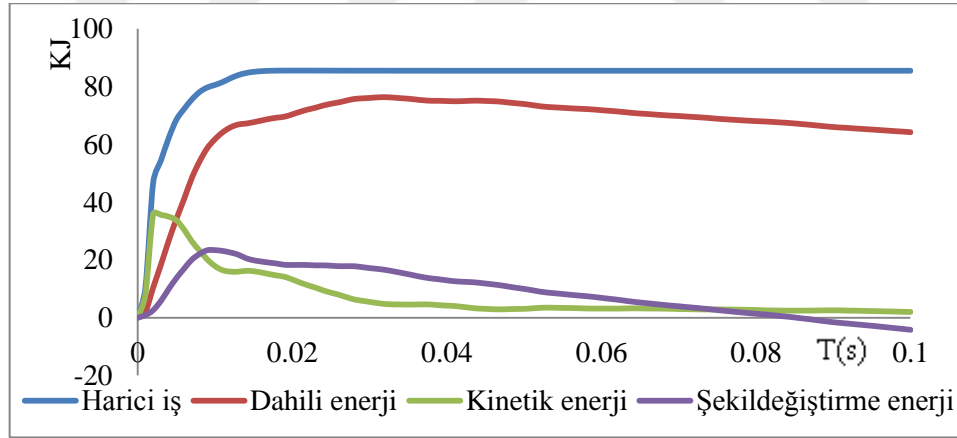
### 3.2.6. Sonlu Eleman Boyutunun 7.5cm Olması

Betonarme bina 7.5cm'lik eleman boyutu için analiz sonuçları Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Patlamadan etkilenen yüzeyde zemin kattaki üç kolonun tamamen hasarlı olduğu, birinci kattaki kolonlarda hasarların yoğunlaştığı belirlenmiştir. Döşemelerdeki hasarların daha iç kısımlara kadar ilerlediği ve döşeme ortalarına yakın bölgelerde patlama yüzeyine paralel hasar dağılımı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. Betonarme binanın 7.5cm eleman boyutu için hasar değerlendirilmesi.

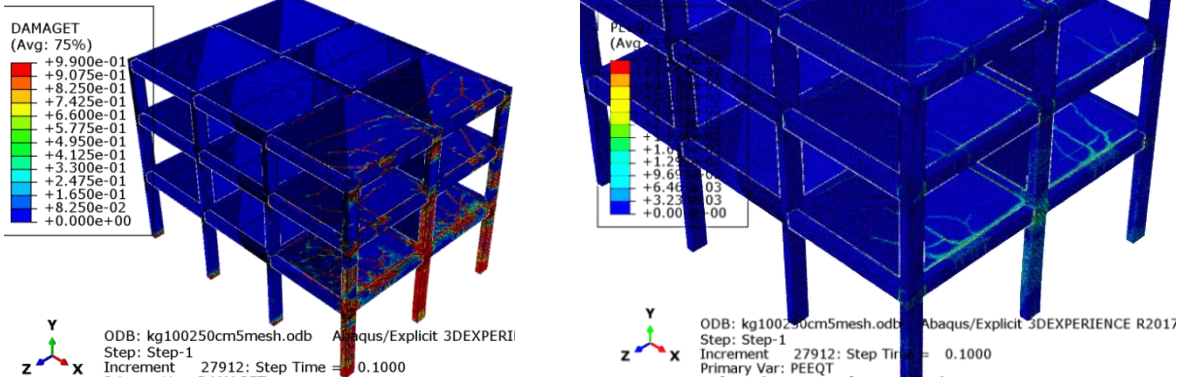
Enerji çıkışlarındaki en önemli fark şekildeğiştirme enerjisinin negatif değerler almasıdır (Şekil 3.13). Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 35.88KJ ve şekildeğiştirme enerjisinin maksimum değeri 23.37KJ olarak elde edilmiştir. 10cm'lik eleman boyutlarındaki durum ile karşılaştırıldığında kinetik enerji ve şekildeğiştirme enerjisinde değişim oldukça düşük olduğu bekirlenmiştir.



Şekil 3.13. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (7.5cm eleman boyutu için).

### 3.2.7. Sonlu Eleman Boyutunun 5cm Olması

Betonarme bina 5cm'lik eleman boyutu için analiz sonuçlarından, zemin kattaki üç kolonun tamamen hasarlı olduğu, ikinci kattaki hasarların kolon yüksekliğinin ortasında oluştuğun belirlenmiştir (Şekil 3.14). Döşemelerde hasarların daha fazla ve daha uzun olduğu ve çizgisel hasarlar şeklinde oluştuğu belirlenmiştir.

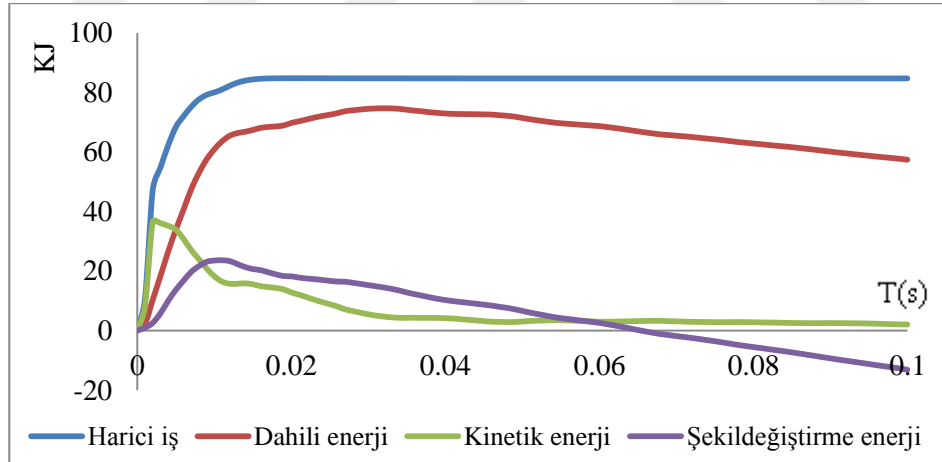


a) Çekme hasar oranı.

b) Çekme plastik eşdeğeri

Şekil 3.14. Betonarme binanın 5cm eleman boyutu için hasar değerlendirme

Enerji çıkışlarındaki en önemli fark şekil değiştirme enerjisinin negatif değerler almasıdır (Şekil 3.15). Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 36.5KJ ve şekil değiştirme enerjisinin maksimum değeri 23.6KJ olarak elde edilmiştir. 7.5cm'lik eleman boyutlarındaki durum ile karşılaştırıldığında kinetik enerji ve şekil değiştirme enerjisinde değişim oldukça düşük olduğu beklenmiştir.

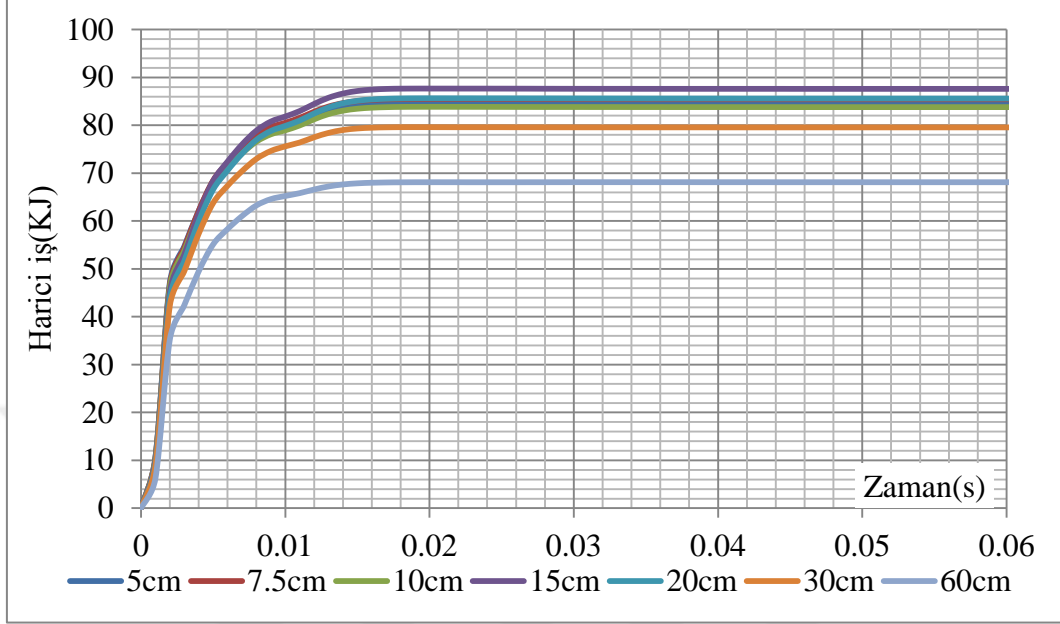


Şekil 3.15. Analiz süresince enerjilerindeki değişimler (5cm eleman boyutu için).

### 3.2.8. Harici İş Değişimi

Farklı sonlu eleman boyutu için analiz süresi boyunca harici işin zamanla değişimine ait diyagramlar Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Harici olarak uygulanan yükler tarafından yapılan işin sonlu eleman boyutundaki değişimden oldukça etkilendiği görülmektedir. 60cm boyutlarındaki elemanlar oluşturulan modelin gerçekten en uzak sonuçlar verdiği ve

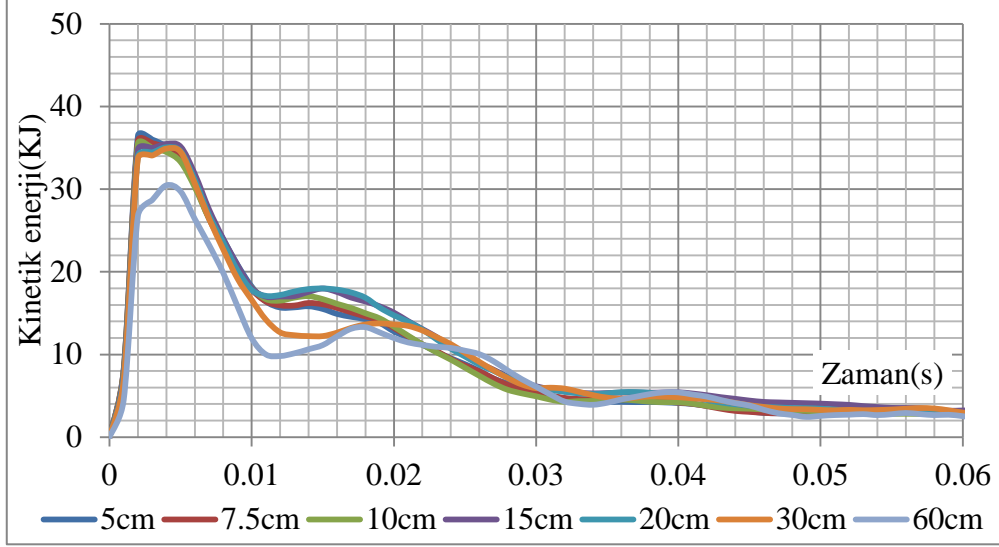
20cm'den daha küçük boyutlardaki sonuçların ise birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. 16. Farklı sonlu eleman boyutlar için harici işin zamanla değişimi.

### 3.2.9. Kinetik Enerji Değişimi

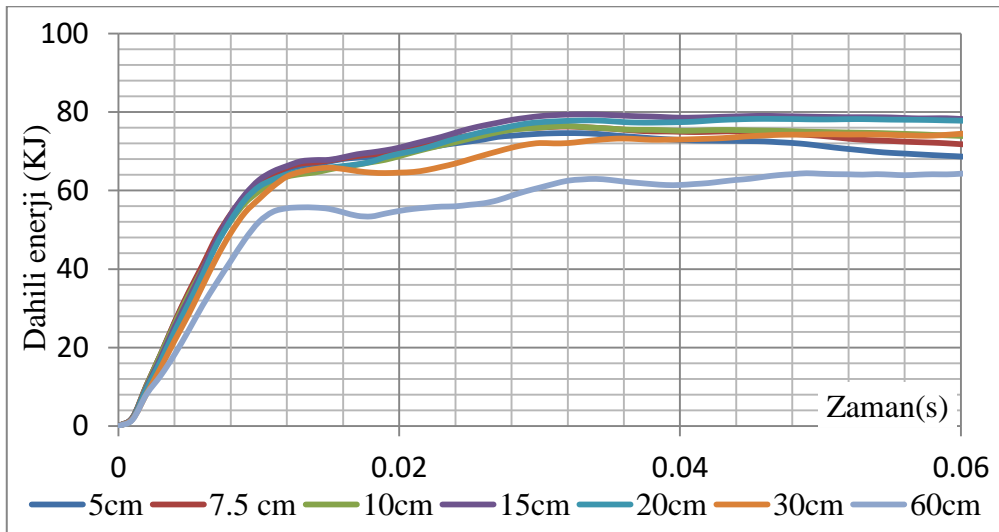
Farklı sonlu eleman boyutu için analiz süresi boyunca kinetik enerjinin zamanla değişimine ait diyagramlar Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Harici iş değişimine benzer şekilde kinetik enerjinin de 60cm'lik sonlu eleman boyutlarında gerçekten farklı sonuçlar aldığı ve 20cm'den daha düşük boyutlu elemanlar olması durumunda sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.17. Farklı sonlu eleman boyutları için kinetik enerjinin zamanla değişimi.

### 3.2.10. Dahili Enerji Değişimi

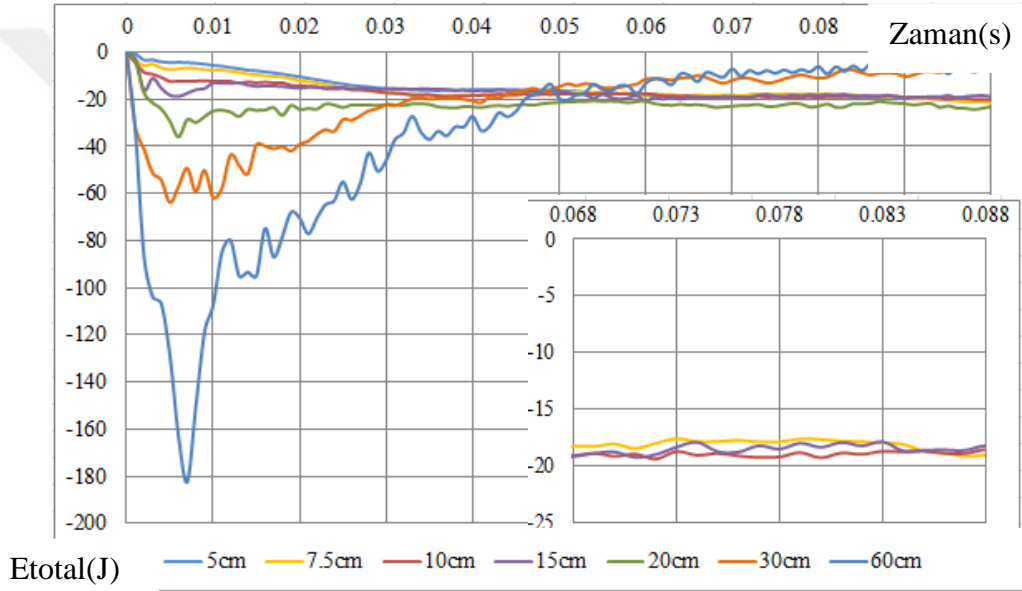
Farklı sonlu eleman boyutu için analiz süresi boyunca dahili enerjinin zamanla değişimine ait diyagramlar Şekil 3.18'de gösterilmektedir. Modelde depolanan enerjiyi temsil eden dahili enerjinin sonlu eleman boyutundaki değişimden oldukça etkilendiği görülmektedir. Dahili enerjinin 0.03ms'den sonra genellikle yatay devam ettiği belirlenmiştir. 60cm boyutlarındaki elemanlar oluşturulan modelin gerçekten en uzak sonuçlar verdiği ve 20cm'den daha küçük boyutlardaki sonuçların ise birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.18. Farklı sonlu eleman boyutları için dahili enerjinin zamanla değişimi.

### 3.2.11. Toplam Enerjinin Değişimi

En uygun sonlu eleman boyutunun belirlenmesinde diğer bir değerlendirmede toplam enerjideki ( $E_{total}$ ) değişimdir. Boulbes'e göre başlangıçta kinetik enerjiye sahip bir modelde  $E_{total}$  büyük bir değer almakta, fakat analiz süresi arttıkça sabit bir değer almalıdır (Boulbes, 2020). Toplam enerji farklı sonlu eleman boyutları analiz süresi için Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Tepki süresinde neredeyse sabit değerler 10cm'lik sonlu eleman boyutuna sahip modelden elde edilmiştir.



Şekil 3.19. Toplam enerjinin analiz süresince farklı sonlu eleman boyutlarına göre değişimi.

Analiz süresinin ilk 15ms'lik kısmı patlama etkisinin değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Bu süre içinde farklı sonlu eleman boyutlarına bağlı olarak analiz süreleri ve enerji çıkışların maksimum değerleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir. Analiz süresi ve enerji değerleri açısından 10cm'lik sonlu eleman boyutlarının daha uygun olduğu görülmektedir.

Maksimum dahili enerjinin farklı sonlu eleman boyutlarına göre değişimi Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi diyagram giderek azalırken 10cm eleman boyutuna tekabül eden kısımda yerel bir minimum değer almaktadır. Yerel bir minimum enerjinin varlığı aslında, şok dalgasının yayılması aşamasında yapıya aktarılan enerji optimum miktarını temsil eder. Bu nedenle, şok dalgalarından etkilenen sistemde beklenen hasara yol açan optimum miktarda emilen enerji var olduğunu

belirtilebilmektedir (Alañón ve ark, 2018). Weerheijm ve Van Doormaal tarafından yapılan çalışmaya göre böyle bir enerji model tarafından emildiğinde, mukavemet kriterinin yerine getirildiği denge durumuna ulaşılır, yeterli enerji mevcuttur ve tam bir hasar oluşturmak için kırılma bölgesine salınabilir (Weerheijm ve Van Doormaal, 2007).

Tablo 3.1. Farklı sonlu eleman boyutları için ilk 15ms'deki maksimum enerji değerleri.

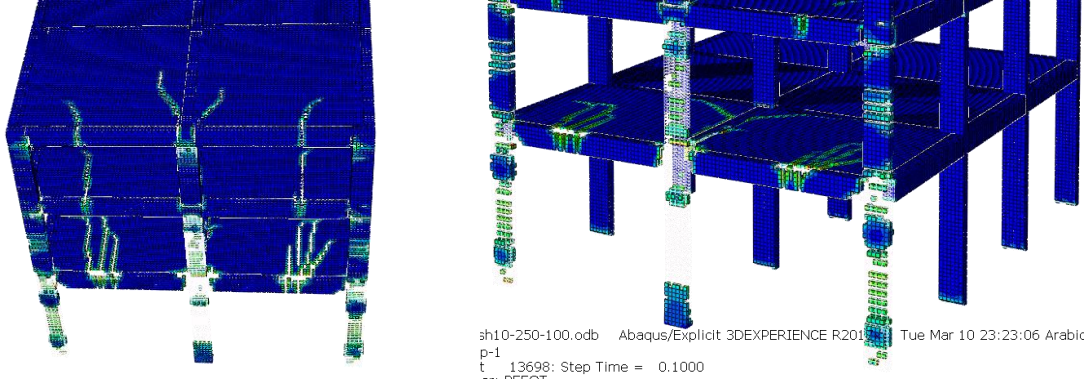
Sonlu eleman(cm)	Analiz bitirme süreleri	Maks dahili enerji	Maks kinetik	Maks harici iş	Dahili enerji/harici iş oranı
5	9 saat 31 dk. 18 s	66294.4	36475.6	84318.9	78.62
7.5	7 saat 30 dk. 17 s	66845.6	36029.8	85064.5	78.58
10	6 saat 39 dk. 13 s	64242.8	35498	83464.7	76.97
15	6 saat 22 dk. 40 s	67435.9	35739.5	87170.7	77.36
20	5 saat 52 dk. 57 s	64901.4	35061.2	85119.3	76.24
30	4 saat 50 dk. 12 s	64784.5	34902	79339.5	81.65
60	4 saat 8 dk. 11 s	55703.7	30461.8	67880.5	82.06



Şekil 3.20. Maksimum dahili enerjinin farklı sonlu eleman boyutlarına göre değişimi.

Bütün değerlendirmeler sonucunda, betonarme binanın patlama etkisindeki davranışının değerlendirilmesinde 10cm'lik sonlu eleman boyutunun en uygun boyut olduğu belirlenmiştir. Bu durum için yapıda oluşan bazı hasar görüntüleri Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



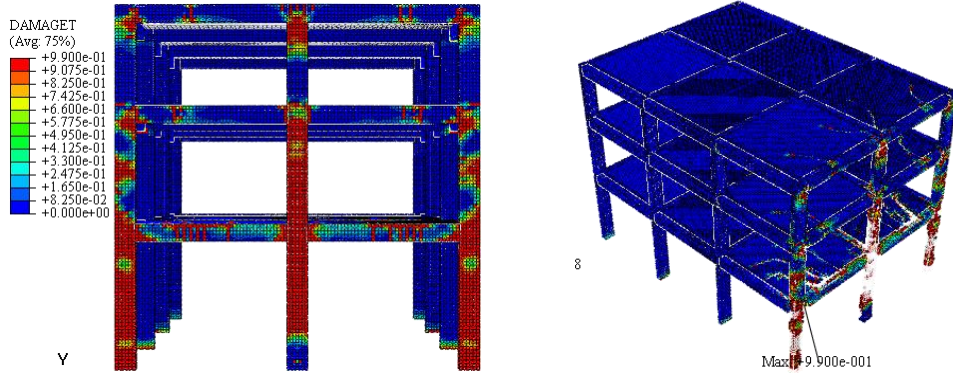


Şekil 3.21. Betonarme binanın 10cm'lik sonlu eleman boyutu için hasar görüntüleri.

### 3.3. Patlama Senaryoları Analiz Sonuçları

#### 3.3.1. Binadan 1m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu

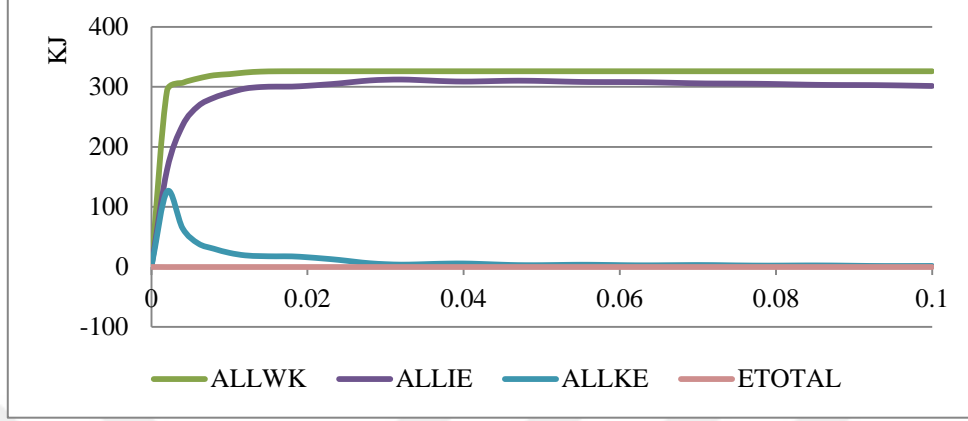
Betonarme binadan 1m mesafede zemin yüzeyinde 100kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.22'de gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin kattaki tüm kolonlar ile birinci ile ortadaki kolonun tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca etkilenen yüzeydeki kirişlerde kısmi hasarlar, zemin ve birinci katlarda ortadaki kolon-kiriş birleşim bölgelerinde tam hasar olduğu, döşemelerdeki hasarların içerilere kadar ilerlediği ve üçüncü kat döşemelerinde hasarların diyagonal bir yön aldığı görülmektedir.



Şekil 3.22. Binadan 1m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için hasar durumu.

Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 125.25KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 312.2KJ olarak elde edilmiştir. Önceki 2.5m'lik zemin yüzeyinde

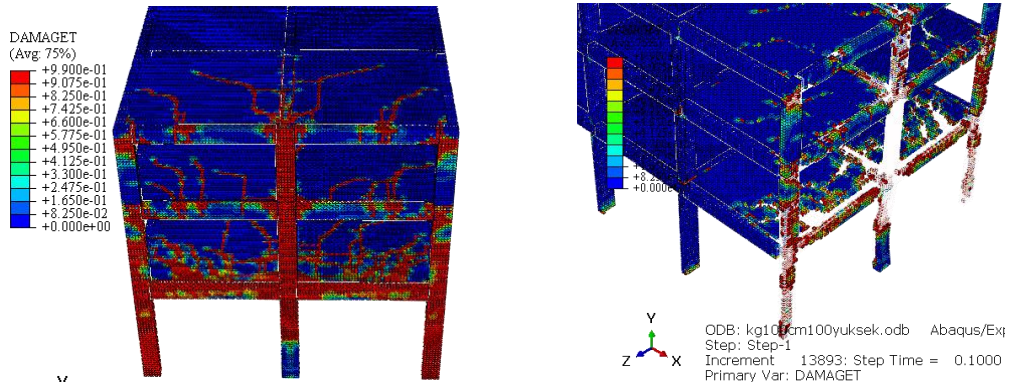
10cm'lik solu eleman yaşanan patlama enerji çıkışlarında büyük bir artış neredeyse üç katı elde edilmektedir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Binadan 1m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları.

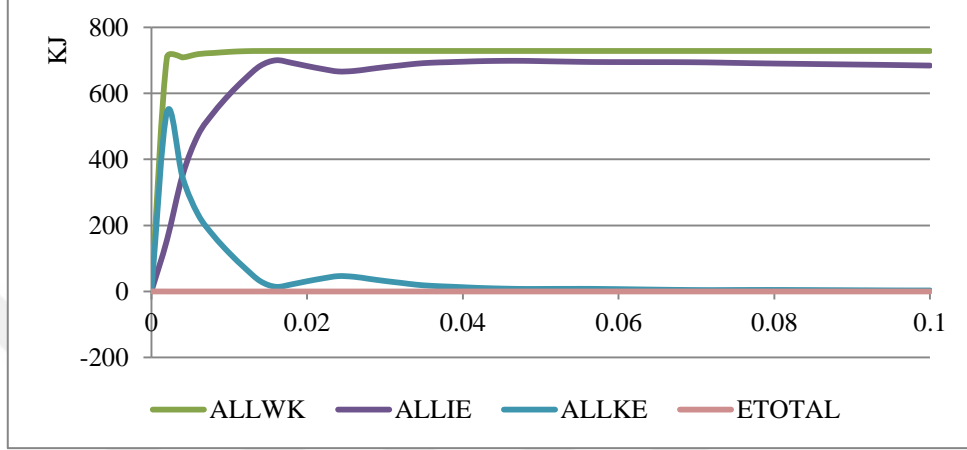
### 3.3.2. Binadan 1m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu

Betonarme binadan 1m mesafede zemin yüzeyinden bir metre yüksekliğinde 100kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.24'te gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin kattaki tüm kolonlar ile birinci ve ikinci ortadaki kolonun tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca etkilenen yüzeydeki birinci kat kirişlerde tam hasarlı, zemin ve birinci ile ikinci katlarda ortadaki kolon-kiriş birleşim bölgelerinde tam hasar olduğu ve döşemelerdeki hasarların içerilere kadar ilerlediği görülmektedir.



Şekil 3.24. Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için hasar durumu.

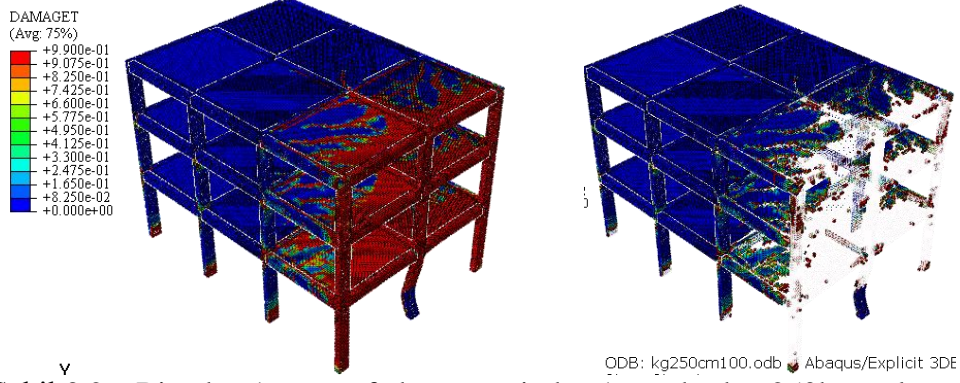
Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 542.4KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 700KJ olarak elde edilmiştir. Önceki 1m'lik zemin yüzeyinde yaşanan patlama enerji çıkışlarında büyük bir artış elde edilmektedir (Şekil 3.25). Kinetik enerjinin artışı binanın daha yüksek bir hızla hareket ettiğini anlamına gelmektedir.



Şekil 3.25. Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları

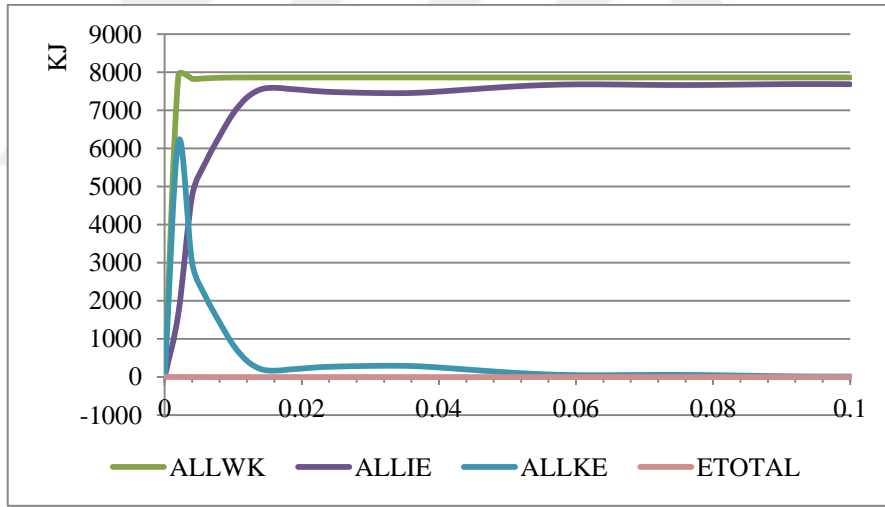
### 3.3.3. Binadan 1m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu

Betonarme binadan 1m mesafede zemin yüzeyinden bir metre yüksekliğinde 250kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.26'da gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde tüm kolonlar ile ortadaki kolona bağlanan tüm kirişler tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca etkilenen yüzeye bağlanan döşemelerde büyük hasar olduğu, alt katlarda döşemelerdeki hasarların içerilere kadar ilerlediği ve zemin kattaki tüm kolonları mesnet bölgelerinde hasar olduğu görülmektedir.



Şekil 3.26. Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için hasar durumu

Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 6183.2KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 7686.6KJ olarak elde edilmiştir. Önceki 100kg TNT patlayıcı ağırlığı durumu ile karşılaşma yapıldığında patlama enerji çıkışlarında büyük bir artış elde edilmektedir (Şekil 3.27).

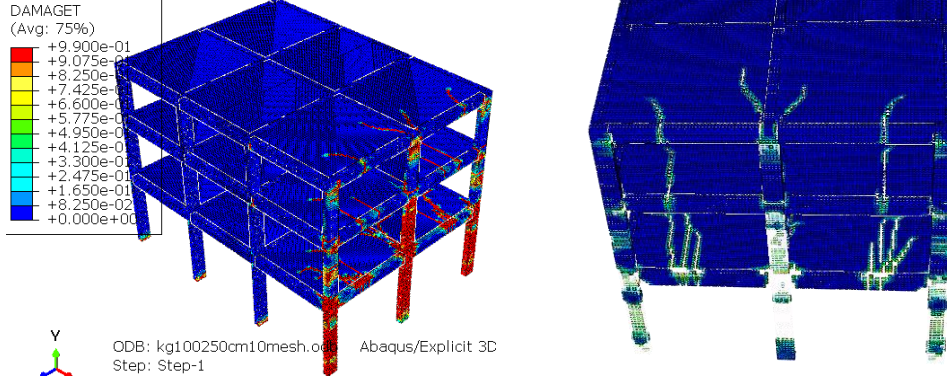


Şekil 3.27. Binadan 1m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu enerji çıkışları

### 3.3.4. Binadan 2.5m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu

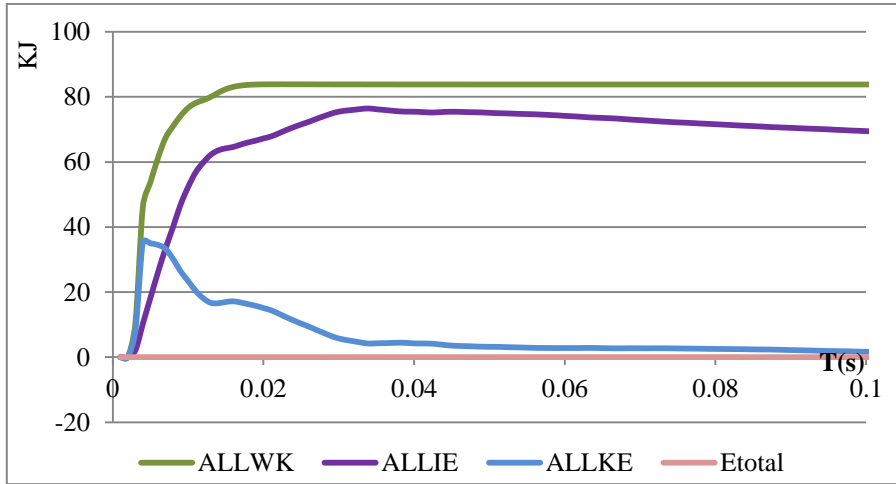
Betonarme binadan 2.5m mesafede zemin yüzeyinde 100kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.28’de gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin kattaki tüm kolonlar ile birinci ile ortadaki kolonun tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca etkilenen yüzeydeki kirişlerde kısmi hasarlar, zemin ve birinci katlarda ortadaki kolon-kiriş

birleşim bölgelerinde tam hasar olduğu, döşemelerdeki hasarların daha içerilere kadar ilerlediği ve üçüncü kat döşemelerinde hasarların diyagonal bir yön aldığı görülmektedir.



Şekil 3.28. Binadan 2.5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için hasar durumu.

Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 35.5KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 76.43KJ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.29). Enerji çıkışları önceki 100kg TNT ile 1m mesafe ve zemin yüzeyinde patlama noktasındaki ile karşılaştırıldığında dahili enerji değeri neredeyse dörtte birisini tekabül etmektedir.

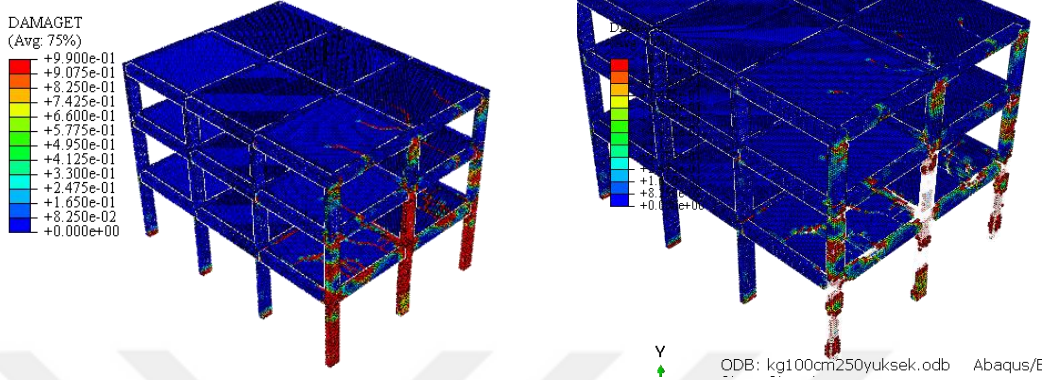


Şekil 3.29. Binadan 2.5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları (100kg).

### 3.3.5. Binadan 2.5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu

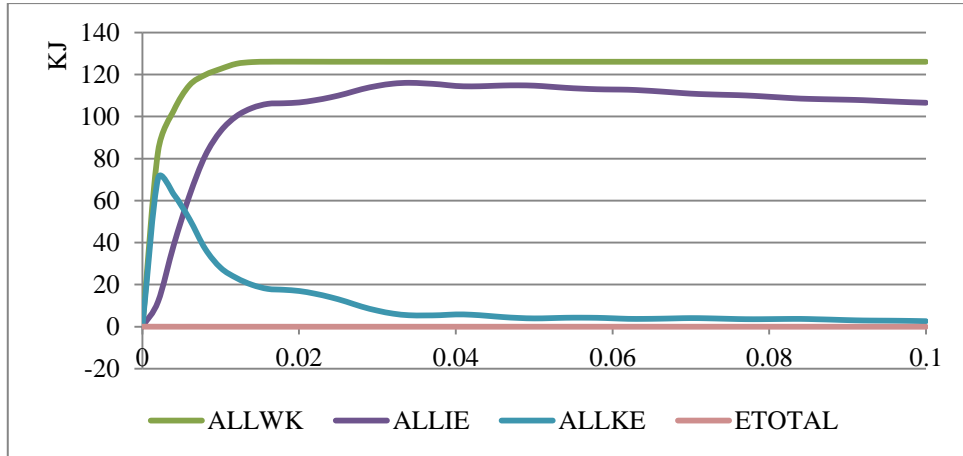
Betonarme binadan 2.5m mesafede zemin yüzeyinden bir metre yüksekliğinde 100kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.30'da gösterilmiş olup etkilenen

yüzeyde zemin kattaki tüm kolonlar ile birinci ile ortadaki kolonun tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Hasar durumu 2.5m'lik zemin yüzeyindeki ile karşılaştırıldığında benzeme görülmektedir.



Şekil 3.30. Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için hasar durumu.

Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 70.66KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 116.05KJ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.31). Önceki 2.5m'lik zemin yüzeyinde yaşanan patlama enerji çıkışlarında büyük bir artış elde edilmektedir kinetik enerjinin değeri iki katladığını görülmektedir.

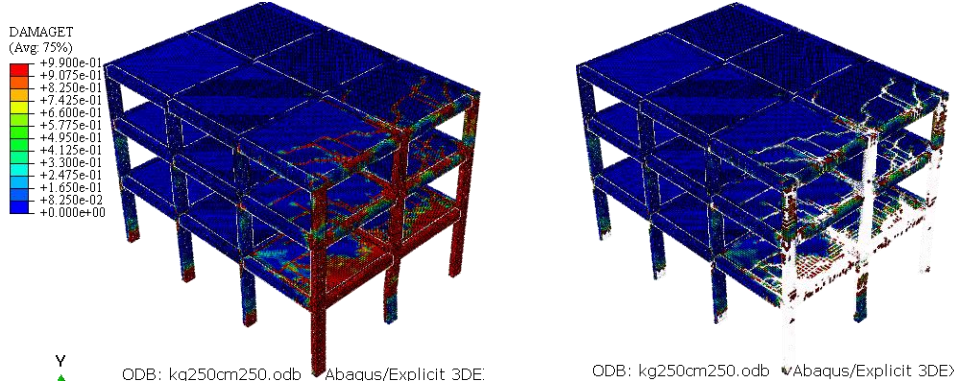


Şekil 3.31. Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları

### 3.3.6. Binadan 2.5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 250kg Patlama Senaryosu

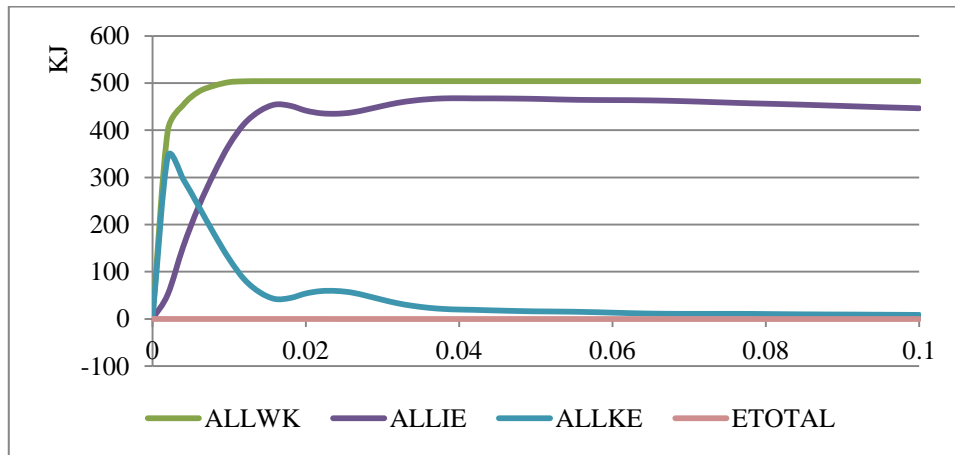
Betonarme binadan 2.5m mesafede zemin yüzeyinden bir metre yüksekliğinde 250kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.32'de gösterilmiş olup etkilenen

yüzeyde patlama noktası üzerinde orta kolon, zemin ve birinci katlardaki köşe kolonlar, zemin kattaki yüzey kırışleri tamamen hasarlı olduğunu belirlenmiştir. Ayrıca etkilenen yüzeye bağlanan döşemelerde büyük hasar oluştuğu, alt katlarda döşemelerdeki hasarların içerilere kadar ilerlediği ve zemin kattaki tüm kolonları mesnet bölgelerinde hasar oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.32. Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için hasar durumu

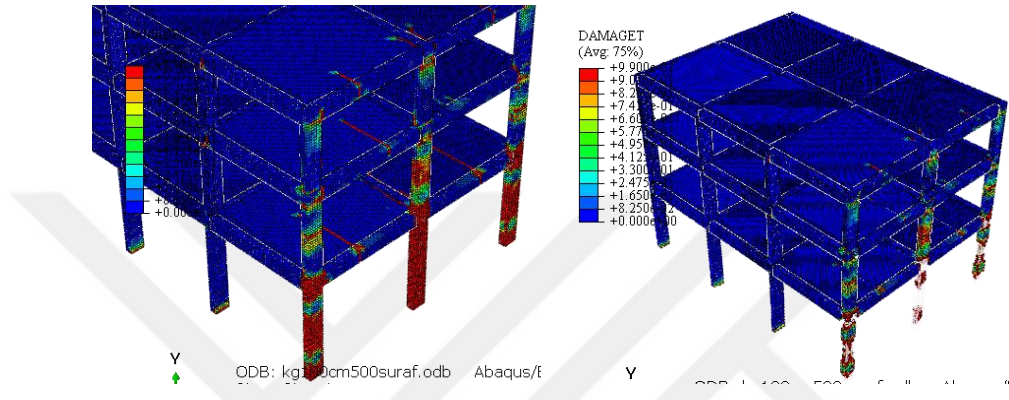
Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 343.9KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 467.9KJ olarak elde edilmiştir. Önceki 100kg TNT patlayıcı ağırlığı durumu ile karşılaşma yapıldığında dahili enerji dörde ve kinetik enerji beşe katladığını elde edilmektedir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Binadan 2.5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 250kg patlama senaryosu için enerji çıkışları

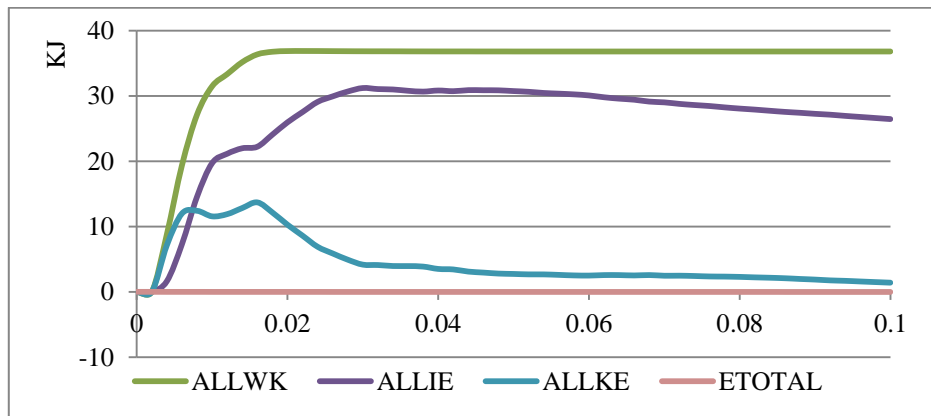
### 3.3.7. Binadan 5m Mesafede ve Zemin Yüzeyinde 100kg Patlama Senaryosu

Betonarme binadan 5m mesafede zemin yüzeyinde 100kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.34'te gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin kattaki kolonun tam hasarlı olup köşe kolonları yüksekliğin yarısında hasarların yoğunlaştığını belirlenmiştir. Döşemeler hafif hasarlar bulunmaktadır.



Şekil 3.34. Binadan 5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için hasar durumu.

Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 13.7KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 31.2KJ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.35) Önceki 2.5m'lik zemin yüzeyinde yaşanan patlama enerji çıkışlarında büyük bir artış elde edilmektedir kinetik enerjinin değeri iki katladığını görülmektedir.

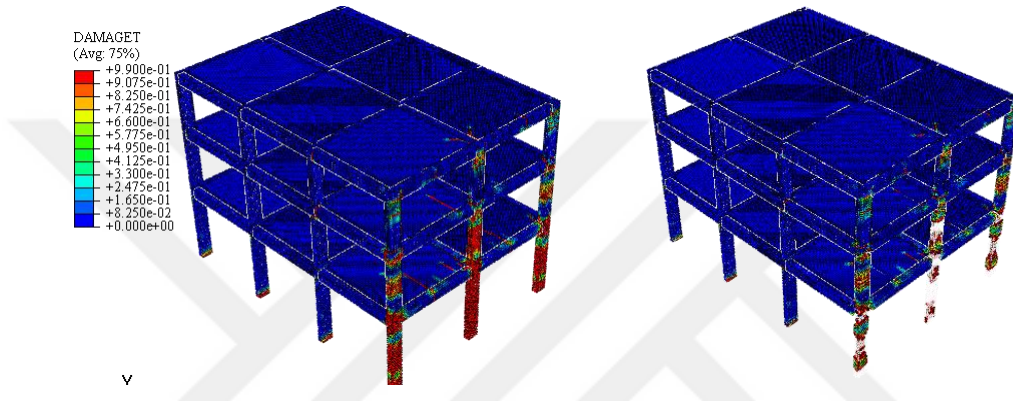


Şekil 3.35. Binadan 5m mesafede ve zemin yüzeyinde 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları.



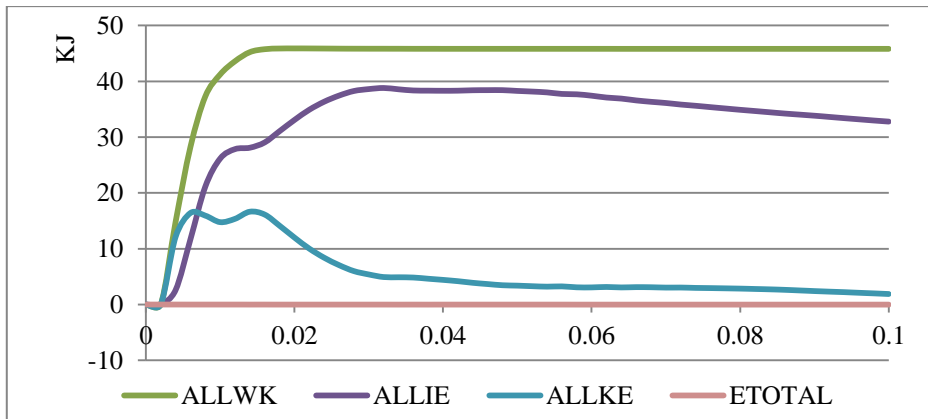
### 3.3.8. Binadan 5m Mesafede ve Zeminden 1m Yüksekte 100kg Patlama Senaryosu

Betonarme binadan 5m mesafede zemin yüzeyinden bir metre yüksekliğinde 100kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.36'da gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin kattaki kolonun ile kolon-kiriş birleşme bölgesinde tam hasarlı olup köşe kolonları yüksekliğin yarısında hasarların yoğunlaştığını belirlenmiştir. Hasar durumu 5m'lik zemin yüzeyindeki ile karşılaştırıldığında benzeme görülmektedir.



Şekil 3.36. Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için hasar durumu.

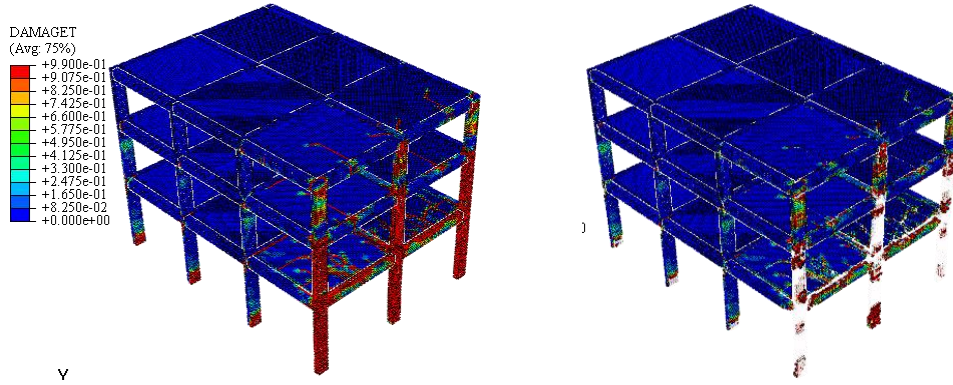
Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 16.6KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 38.8KJ olarak elde edilmiştir (Şekil 3.37) Önceki 5m'lik zemin yüzeyinde yaşanan patlama enerji çıkışlarında hafif bir artış elde edilmektedir.



Şekil 3.37. Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yüksekte 100kg patlama senaryosu için enerji çıkışları.

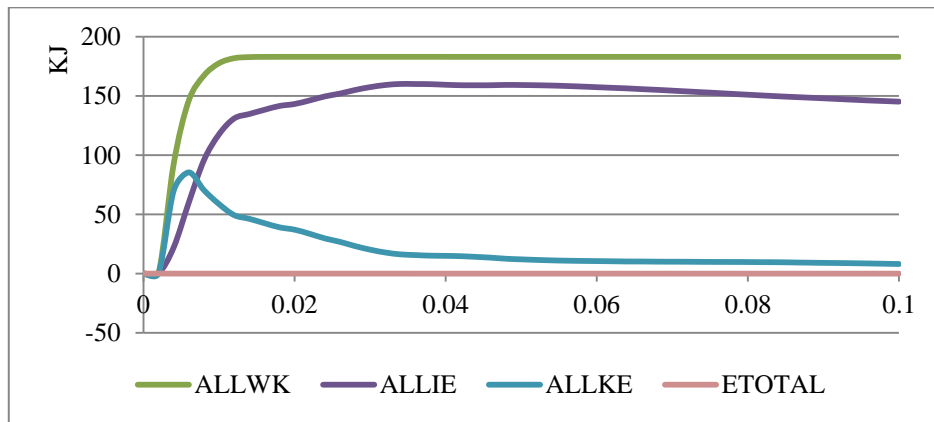
### 3.3.9. Binadan 5m Mesafede ve Zeminden 1m Yükseklerde 250kg Patlama Senaryosu

Betonarme binadan 5m mesafede zemin yüzeyinden bir metre yüksekliğinde 250kg TNT patlama senaryosu için analiz sonuçları Şekil 3.38'de gösterilmiş olup etkilenen yüzeyde zemin ve birinci kattaki tüm kolonlar tam hasarlı ve zemin kattaki yüzey kırımlarda kısmi hasar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca zemin kattaki tüm kolonları mesnet bölgelerinde hasar olduğu görülmektedir.



Şekil 3.38. Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yükseklerde 250kg patlama senaryosu için hasar durumu

Analiz sonucunda kinetik enerjinin maksimum değeri 85.4KJ ve dahili enerjisinin maksimum değeri 160KJ olarak elde edilmiştir. Önceki 100kg TNT patlayıcı ağırlığı durumu ile karşılaştırma yapıldığında patlama enerji çıkışlarında büyük bir artış elde edilmektedir (Şekil 3.39).

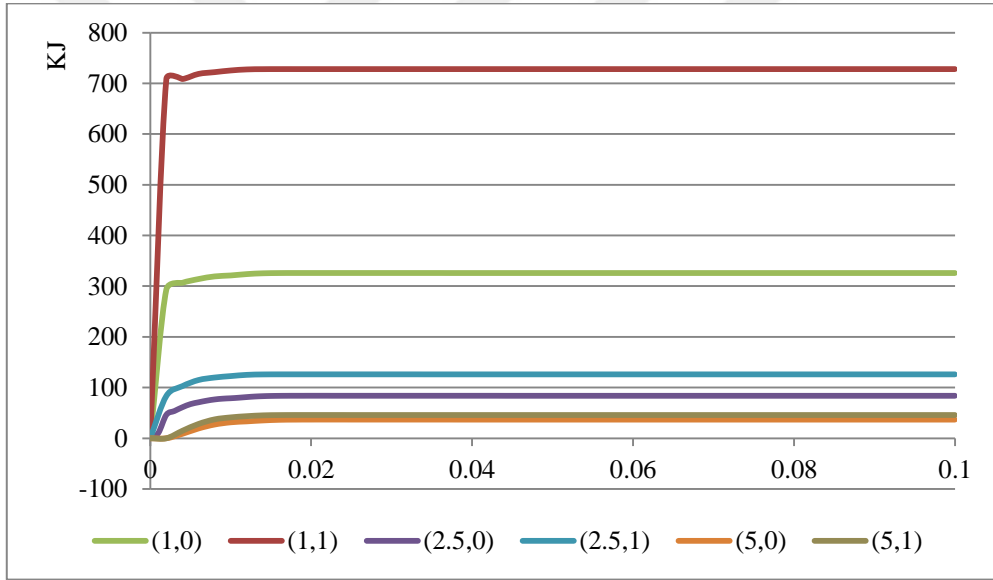


Şekil 3.39. Binadan 5m mesafede ve zeminden 1m yükseklerde 250kg patlama senaryosu için enerji çıkışları

### 3.3.10. Zeminde Yüksekliğin Patlamaya Etkisinin Değerlendirilmesi

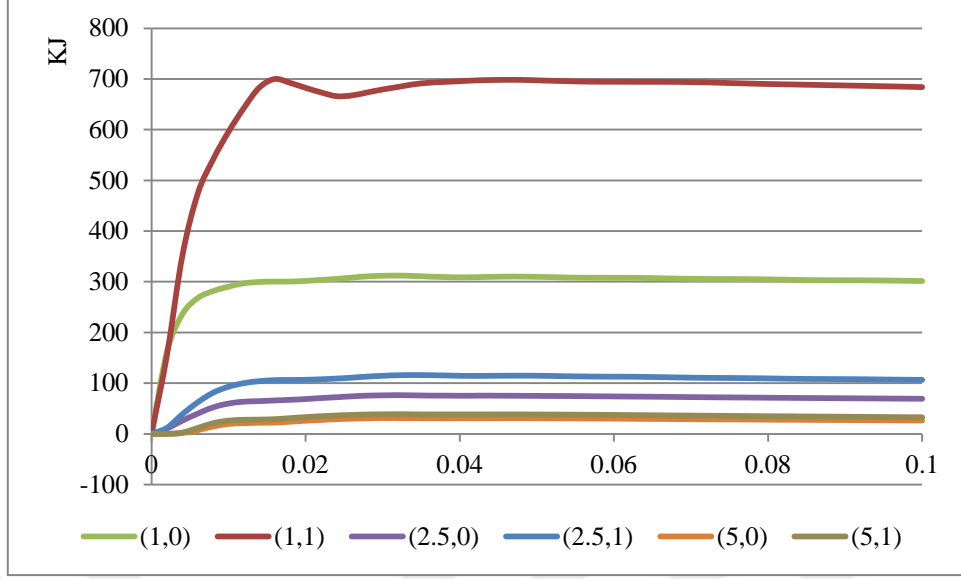
Farklı yükseklik ve mesafeler için harici iş-zaman diyagramları değerlendirildiğinde (Şekil 3.40):

- Yakın mesafe için harici iş değeri bir metre yüksekliğinde zemin yüzeyine göre iki katı düzeyde,
- Orta mesafede (2.5m) için harici iş değeri bir metre yüksekliğinde zemin yüzeyine göre bir buçuk katı düzeyde,
- Uzak mesafede (5m) için harici iş değeri bir metre yüksekliğinde zemin yüzeyine göre neredeyse eşit, olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.40. Farklı yükseklik ve mesafeler için harici iş-zaman diyagramları.

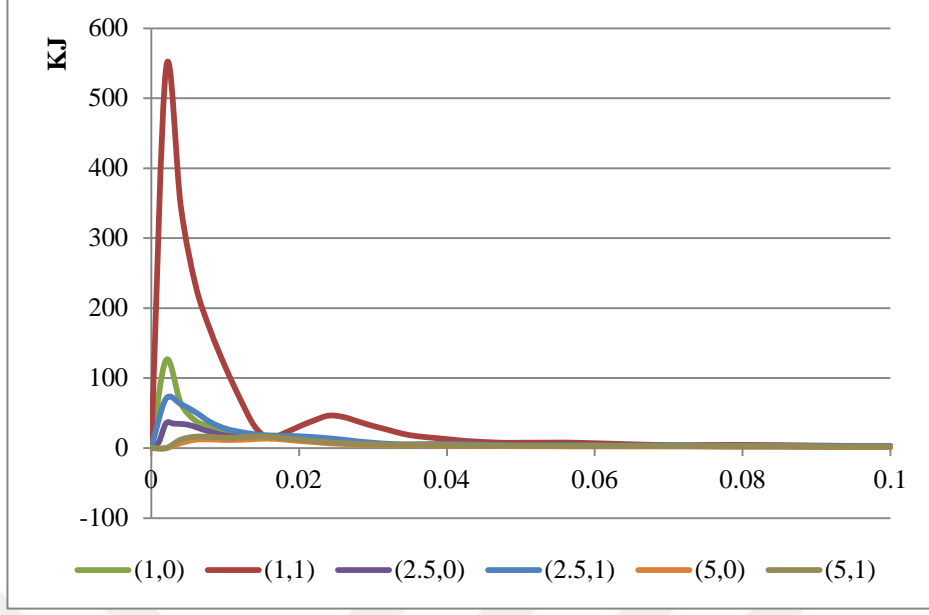
Farklı yükseklik ve mesafeler için harici iş-zaman diyagramlarına bakıldığında (Şekil 3.41) dahili enerji yakın mesafede büyük ve orta mesafeler küçük farklılık göstermektedir. Uzak mesafede depolanan dahili enerji yükseklikle pek değişmemektedir.



Şekil 3.41. Farklı yükseklik ve mesafeler için dahili enerji-zaman diyagramları.

Farklı yükseklik ve mesafeler için kinetik enerji-zaman diyagramlarına bakıldığında (Şekil 3.42);

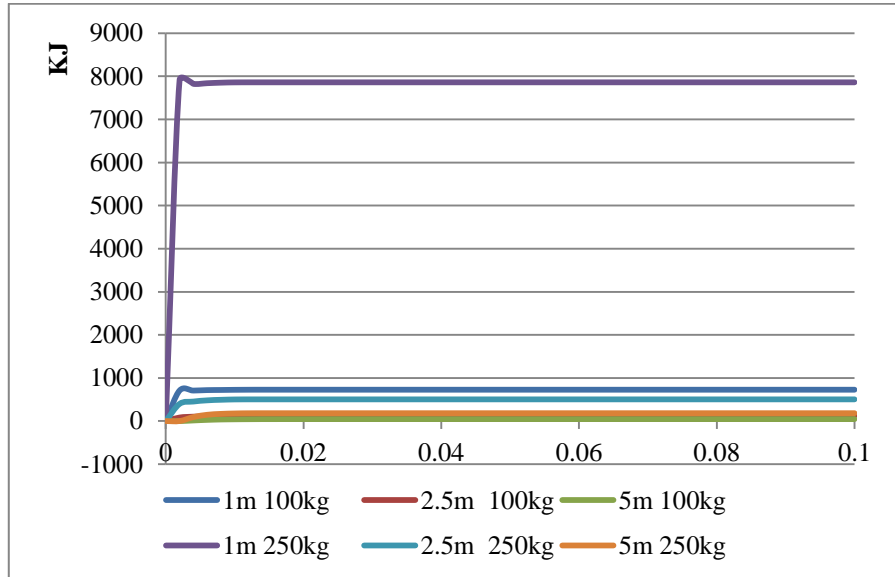
- Yakın mesafe için zemin seviyesinde ve 1m yüksekliğinde kinetik enerjinin maksimum değerleri sırasıyla 125.75KJ ve 542.4KJ neredeyse dört katı,
- Orta mesafe (2.5m) zemin seviyesinde ve 1m yüksekliğinde kinetik enerjinin maksimum değerleri sırasıyla 35.5KJ ve 70.7KJ neredeyse iki katı,
- Uzak mesafe (5m) zemin seviyesinde ve 1m yüksekliğinde kinetik enerjinin maksimum değerleri sırasıyla 13.7KJ ve 16.6KJ birbirine çok yakın, olduğunu elde edilmektedir.



Şekil 3.42. Farklı yükseklik ve mesafeler için kinetik enerji-zaman diyagramları.

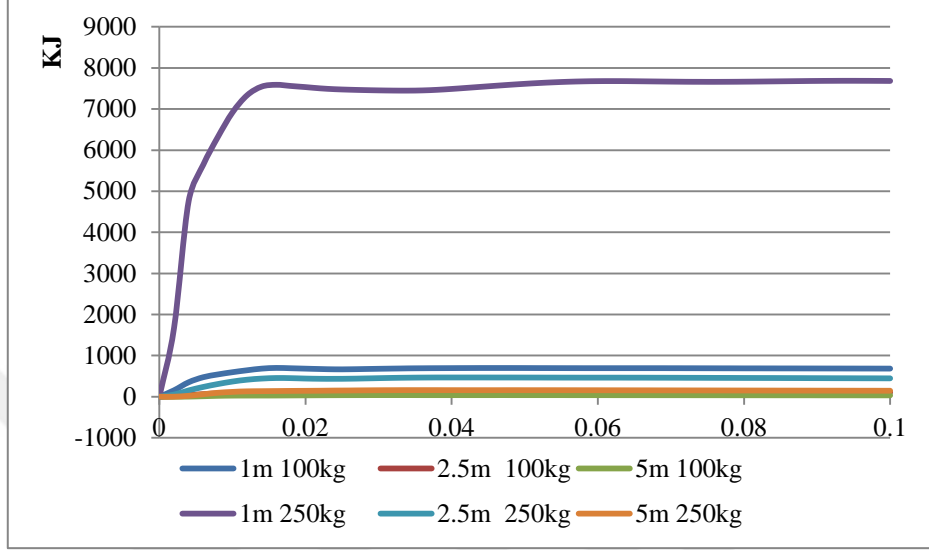
### 3.3.11. Patlayıcı Ağırlığının Patlamaya Etkisinin Değerlendirilmesi

Patlayıcı ağırlığın harici iş değerlerine etkisi 1m mesafe için oldukça büyük olup patlayıcı miktarının 250kg olması durumunda 100kg'a göre 11 katı olmaktadır. Bu değer orta ve uzak mesafeler için (2.5m-5m) 4 katına tekabül etmektedir (Şekil 3.43).



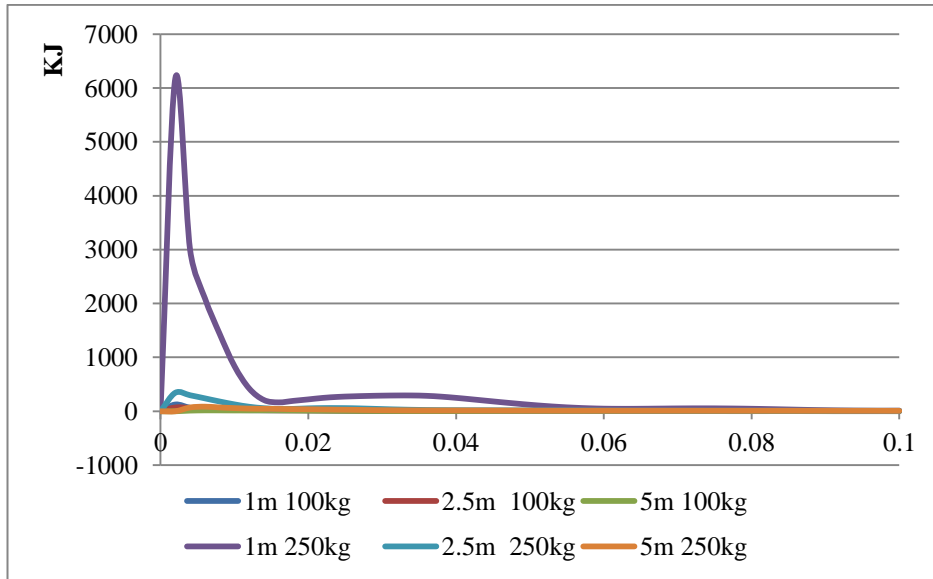
Şekil 3.43. Farklı patlayıcı ve mesafeler için harici iş-zaman diyagramları.

Patlayıcı ağırlığın dahili enerji değerlerine bir metre mesafe için oldukça büyük olup 250kg'daki 100kg'a göre 11 katı, orta ve uzak mesafeler için (2.5m-5m) 4 katına tekabül etmektedir (Şekil 3.44).



Şekil 3.44. Farklı patlayıcı ve mesafeler için dahili enerji-zaman diyagramları.

Patlayıcı ağırlığın kinetik enerji değerlerine bir metre mesafe için aşırı olup 250kg'daki 100kg'a göre 49 katı, orta ve uzak mesafeler için (2.5m-5m) 5 katına tekabül etmektedir (Şekil 3.45).



Şekil 3.45. Farklı patlayıcı ve mesafeler için kinetik enerji-zaman diyagramları.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışma kapsamında betonarme binaların patlama yükünün etkisindeki davranışı ve hasar durumlarını incelenmiştir. Bu amaçla seçilen üç katlı çerçeveli betonarme bir binanın modeli ABAQUS programında sonlu eleman yöntemiyle analiz edilmiştir. Beton malzemenin gerçek doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için beton hasarlı plastisite (CDP) modeli seçilmiştir. Çalışmanın uygulama kısmında ilk olarak modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sonlu eleman boyutunun sonuçlara etkisi yedi farklı sonlu eleman boyutu için analiz edilmiştir. Analizlerden dahili depolanan enerji ve toplam enerjiye dayanan yöntemle optimum sonlu eleman boyutu belirlenmiştir. Son olarak modellenen betonarme binanın önünde 100kg ve 250kg olmak üzere iki farklı patlayıcı miktarı için farklı mesafeler ve farklı yüksekliklerde patlama noktası için analiz edilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçları maddeler şeklinde aşağıda sunulmaktadır.

- Beton malzeme temsilinde kullanan plastisite ve hasar mekaniğine dayanan beton hasarlı plastisite model (CDP) betonun gerçek davranışı temsil edebilmektedir.
- CONWEP yöntemiyle hesaplanan patlama yükü hem gerçeğe yakın sonuçlar vermekte hem de analizlerin hızlı yapılabilmesi sağlanabilmektedir.
- Sayısal analizlerde sonlu eleman boyutunun sonuçlar üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bu nedenle gerçekçi sonuçlar elde etmek için sonlu eleman boyutunun değerlendirilmesi mutlaka yapılmalıdır.
- Sonlu eleman boyutları küçüldükçe hasar durumunda daha çok elemanda hasar oluştuğu belirlenmektedir.
- Hasar ilerleme doğrultusu 60-30-20-15cm sonlu eleman boyutlu modellerde şok dalgasıyla aynı yönde, 10cm eleman boyutlu modelde diyagonal yönde ve 10cm'den düşük eleman boyutlu modellerde şok dalgasına dikey yönde oluşmaktadır.
- Seçilen bina modeli için en uygun sonlu eleman boyutu, dahili enerjinin yerel minimum bir değer aldığı durum dikkate alınarak 10cm olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde toplam enerji bağlı değerlendirmeye sonucunda 10cm'lik sonlu eleman boyutunun yeterli olduğunu belirlenmiştir.

- Enerji çıkışları modelin davranışının belirlenmesinde oldukça önemlidir. Model tarafından emilen harici işin aniden kinetik enerji, depolanan enerji (dahili enerji) ve diğer enerjilere dönüşmektedir.

- Yerden belli bir mesafede yaşanan patlamaların yapıya en tehlikeli etki ve hasar verdiğini elde edilmektedir. Örneğin bir metre uzaklıkta patlamada kinetik enerji zemin yüzeyinde ve bir metre yükseklikte sırasıyla 35.5KJ-125.75KJ olarak elde edilmiştir. Bu da binanın daha hızlı (fazla) hareket ettiğini anlamına gelmektedir.

- Patlama yüksekliği benzer şekilde dahili enerji değerlerine etkilemektedir. Dahili enerji değerleri bir metre uzaklık için zeminden 0m ve 1m yüksekler için sırasıyla 312.2KJ-700KJ'dur, iki buçuk metre uzaklık için zemin yüzeyinde ve bir metre yükseklikte sırasıyla 76.43KJ-116KJ olarak belirlenmiştir.

- Patlama noktasının zeminden yüksekliğinin etkisi yakın mesafe için çok büyük, orta mesafeler için büyük ve uzak mesafeler için neredeyse etkisiz olduğunu elde edilmiştir.

- Kinetik enerjinin sifıra düşmesi modelin hareket dinmesi anlamına gelmektedir.

- Kinetik enerji yapıdaki hareketle sönmektedir. Dahili enerjini ise hasarlar oluşturarak ve sürtünme yoluyla yavaşça sönmektedir.

- Patlayıcı ağırlığının etkisi yakın mesafeler için enerji çıkışlarına (özellikle kinetik enerji) büyük etkiye sahiptir. Örneğin kinetik enerji bir metre uzaklıkta 100kg ve 250kg TNT patlayıcı ağırlığı için sırasıyla 125.75KJ-6183.16KJ olmakta yani patlayıcı ağırlığı 2.5 kat arttığında kinetik enerjinin 49 kat arttığı belirlenmiştir.

- Mesafe uzadıkça patlayıcı ağırlığının etkisi giderek azalmaktadır. Mesela 2.5m'de kinetik enerji değerleri 100kg patlayıcı için 70.6KJ'iken 250kg patlayıcı için 343.9KJ'dur.

- Patlayıcı ağırlığı benzer şekilde dahili enerji değerlerini etkilemektedir. Örneğin dahili enerji değerleri bir metre uzaklık için 100kg ve 250kg patlayıcı için sırasıyla 700KJ-7686.6KJ olarak yaklaşık 10 katı fazla elde edilmiştir.

Bu tez çerçevesinde elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Kolon şekillerinin binada hasar oluşumuna etkisi incelenebilir.

- Hasar oluşan yapısal elemanları silinerek binanın kendi ağırlığı altında göçme analizi yapılabilir.

- Binanın içinde farklı katlarda patlama senaryoları için analizler gerçekleştirilebilir



## 5. KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2010. Analysis user's manual 6.10-EF, Dassault Systems Simulia Corp, Providence, RI, USA.
- Adenaes, E., Gerstle, K.H. ve Ko, H. Y., 1977. Response of mortar and concrete to biaxial compression, J. Eng. Mech. Div. ASCE, 103, 4, 515-526.
- Adushkin, V.V. ve Korotkov, A. I., 1961. Parameters of a shock wave near to HE charge at explosion in air, PMTE, 5, 119123.
- Ahmad, S., Elahi, A., Pervaiz, H., Rahman, A.G.A. ve Barbhuiya, S., 2014. Experimental study of masonry wall exposed to blast loading, Materiales De Construcion, 64 (313), 2007.
- Alañón, A., Cerro Prada, E., Vázquez Gallo, M.J. ve Santos, A.P., 2018. Mesh size effect on finite element modeling of blast loaded reinforced concrete slab, Engineering with Computers, 34, 649–658.
- Alfarah, B., 2017. New Methodology For Calculating Damage Variables Evolution in Plastic Damage Model for RC Structures, Engineering Structures, 132, 70–86
- Alhussan, K., Stepanov, K.I., Stankevich, Y.A., Smetannikov, A.S., ve Zhdanok, S:A., 2011. Hydrodynamics of the initial phase of explosion, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 1627–1640.
- Armero, F. ve Oller, S., 2000. A general framework for continuum damage models. I. Infinitesimal plastic damage models in stress space, Int. J. Solids Struct, 37, 48-50, 7409–7436.
- Bajić, Z., 2007. Determination of TNT equivalent for various explosives, Master's University of Belgrade, Belgrade, Serbia.
- Bazant, Z.P. ve Ozbolt, J., 1990. Nonlocal microplane model for fracture, damage and size effect in structures, J. Eng. Mech. ASCE, 116, 11, 2485-2505.
- Bazant, Z.P., 1978. Endochronic inelasticity and incremental plasticity, Int J. Solids Struct., 14, 9, 691-714.
- Bicanic, N. ve Pearce, C.J., 1996. Computational aspects of a softening plasticity model for plain concrete, Mech. of Cohesive-frictional Mat., 1, 1, 7594.
- Boulbes, R.J., 2020. Troubleshooting Finite-Element Modeling with Abaqus with Application in Structural Engineering Analysis, Springer Nature Switzerland AG, Lyon, France.

- Brode, H.L., 1955. Numerical solution of spherical blast waves, Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, 26.
- Cicekli, U., Voyiadjis, G.Z. ve Abu Al-Rub, R.K., 2007. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete, International Journal of Plasticity, 23, 1874–1900.
- Cömert, M., 2010. Performance Based Assessment Of Reinforced Concrete Structures Against Blast Loading, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Dharmasena, K.P., Wadley, H.N.G., Xue, Z. ve Hutchinson, J.W., 2008. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structure to high intensity dynamic load, International Journal of Impact Engineering, 35, 1063–1074/1064.
- Draganić, H. ve Sigmund, V., 2012. BLAST LOADING ON STRUCTURES, Tehnički vjesnik, 19, 643-652
- Dragon, A. ve Mroz, Z., 1979. A continuum theory for plastic-brittle behavior of rock and concrete, Int. J. Eng. Sci., 17, 2, 121-137.
- Faria, R., Oliver, J. ve Cervera, M., 1998. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures, Int. J. Solids and Struct., 35, 14, 1533-1558.
- Feenstra, P.H. ve Borst, R.D., 1996. A composite plasticity model for concrete, Int. J. of Solids and Struct., 33, 5, 707-730.
- Förch, M., 2019. Analysis of Glass Panels Subjected to Blast Load, Doktor tezi, HafenCity Universität Hamburg, Hamburg, Germany.
- Gelfand, B. ve Silnikov, M., 2004. Blast Effects Caused by Explosions, DTIC Document, London, England.
- Gevrek, M.I., 2016. Çelik kiriş-kolon elemanların patlama yükü altında dinamik davranışlarının irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Grassl, P., Lundgren, K. ve Gylltoft, K., 2002. Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law, Int. J. of Solids and Struct., 39, 20, 5205-5223.
- Hafezolghorani, M., Hejazi, F. Vaghei, R., Saleh M.J. ve Karimzade, K., 2017. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete, Structural Engineering International, 1, 68-78.
- Held, M., 1983. Blast waves in free air, Propellants Explos. Pyrotech., 8, 1, 1-7, DOI: 10.1002/prop.19830080102.

- Henrych, J. ve Major, R., 1979. The dynamics of explosion and its use, Elsevier, Amsterdam.
- Hillerborg, A., Modeer, M. ve Petersson, P.E., 1976. Analysis Of Crack Formation And Crack Growth In Concrete By Means Of Fracture Mechanics And Finite Elements, Cement And Concrete Research, 6, 773-782.
- Hopkins-Brown, M.A. ve Bailey, A., 1998. Chapter 2 (Explosion Effects) Part 1., AASTP-4 Royal Military College of Science, Cranfield University, England.
- Ju, J.W., Monterio, J. M. ve Rashed, A.I., 1989. Continuum damage of cement paste and mortar as affected by porosity and sand concentration, J. Eng. Fract. ASCE, 115, 1, 105-130.
- Kachanov, L.M., 1958. On the creep fracture time, Izv. Akad. Nauk USSR Otd. Tech 8, 26-31.
- Kachanov, L.M., 1986. Introduction to continuum damage mechanics. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Kelliher, D. ve Sutton-Swaby, K., 2012. Stochastic representation of blast load damage in a reinforced concrete building, Structural Safety, 34, 407-417.
- Kinney, G. F. ve Graham, K. J., 1985. Explosive shocks in air, Springer-Verlag, Berlin and New York.
- Kotsovos, M.D. ve Newman, J. B., 1977. Behavior of concrete under multiaxial stress, ACI, 74, 9, 443-444.
- Kotsovos, M. D., 1980. A mathematical model of the deformational behavior of concrete under generalized stress based on fundamental material properties, Materiaux et Constructions, 13, 76, 289-298.
- Krajcinovic, D. ve Fanella, D., 1986. A micromechanical damage for concrete, Eng. Fract. Mech., 25, 6, 585-596.
- Krajcinovic, D., 1979. A distributed damage theory for beams in pure bending, J. Appl. Mech., 46, 3, 592-596.
- Krajcinovic, D., 1983b. Continuum damage mechanics, Appl. Mech. Rev., 37, 1-6.
- Krajcinovic, D., 1985. Continuous damage mechanics revisited: Basic concepts and definitions, J. Appl. Mech., 52, 4, 829-834.
- Krauthammer, T. ve Otani, R. K., 1997. Mesh, Gravity And Load Effects On Finite Element Simulations Of Blast Loaded Reinforced Concrete Structures, Computers & Structures, 63, 1113-1120.

- Kravchenko, G., Trufanova1, E., Kostenko, D. ve Tsurikov, S., 2016. Analysis of blast load on a reinforced concrete column in the time domain, MATEC Web of Conferences, 106-04019.
- Lale, E., 2011. Betonarme Elemanların Plastisite Ve Hasar Mekanîği Esasları Kullanılarak Doğrusal Olmayan Analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Larcher, M., 2008. Pressure-time functions for the description of air blast waves, Technical note, JRC.
- Lee, J. ve Fenves, G.L., 1998. Plastic-Damage Model For Cyclic Loading Of Concrete Structures, Journal Of Engineering Mechanics, 124(8), 892-900.
- Li, J. ve Ma, S., 1992. Explosion mechanics, Science Press, Beijing.
- Lim, K.M., Shin, H.O., Kim, D.J., Yoon, Y.S. ve Lee, J.H., 2016. Numerical Assessment of Reinforcing Details in Beam-Column Joints on Blast Resistance, International Journal of Concrete Structures and Materials, 10, 87-96.
- Loland, K. E., 1980. Continuous Damage model for load-response estimation of concrete, Cement Concrete Research, 10, 3, 395-402
- Low, H. Y. ve Hao, H., 2001. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading, Struct Saf, 23, 2, 157178, DOI: 10.1016/S0167-4730(01)00011-X.
- Lublimer, J., Oliver, J., Oller, S. ve Onate, E., 1989. A Plastic-Damage Model For Concrete, Int J Solids Structures, 25, 299-326.
- Luccioni, B., Oller, S. ve Danesi R., 1996. Coupled plastic-damaged model, Comp. Meth. in Applied Mech. and Eng., 129, 1-2, 81-89.
- Mazars, J. ve Pijaudier-Cabot, G., 1989. Continuum damage theory - application to concrete, J. Eng. Mech., 115, 2, 345-365
- Michal, S. ve Andrzej, W., 2015. Calibration of the CDP model parameters in Abaqus, The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Incheon, Korea.
- Miller, P., 2004. Towards The Modelling Of Blast Loads On Structures, Yüksek lisans Tezi, Department of Civil Engineering, University of Toronto, USA.
- Mindess, S., 1983. The application of fracture mechanics of cement and concrete: A historical review, Fracture mechanics of concrete, F. H. Wittmann, ed., Elsevier, New York, 1-30

- Nassr, A. A., 2012. Experimental and analytical study of the dynamic response of steel beams and columns to blast loading, Open Access Dissertations and Theses, McMaster University, Hamilton, Canada.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. ve Ramsay, J., 2007. Blast loading and blast effects on structures, EJSE Loading on Structures, Special Issue.
- Nica, G.P., Lupoae, M., Pavel, F. ve Baciuc, C., 2017. Numerical Analysis of RC Column Failure Due to Blast and Collapse Scenarios for an Irregular RC-Framed Structure, Int J Civ Eng, 16,1125–1136, DOI 10.1007/s40999-017-0265-9.
- Ortiz, M. ve Popov, E. P., 1982. Plain concrete as a composite material, Mech. Mat., 1, 2, 139-150.
- Park, H. ve Kim, J. Y., 2005. Plasticity model using multiple failure criteria for concrete in compression, Int. J. of Solids and Struct., 42, 8, 2303-2322.
- Pramono, E. ve Willam, K., 1989. Fracture energy-based plasticity formulation of plain concrete, J. Eng. Mech., 115, 6, 1183-1203
- Qureshi, Z.A.L. ve Madhekar, S.N., 2015. Response of 45 Storey High Rise RCC Building Under Blast Load, Advances in Structural Engineering, DOI 10.1007/978-81-322-2190-6\_37.
- Remennikov, A.M., 2003. A Review of Methods for Predicting Bomb Blast Effects on Buildings, Journal of Battlefield Technology, 6, 3, 5-10, Published by Argos Press Pty Ltd.
- Sadovskiy, M. A., 2004. Mechanical effects of air shock waves from explosions according to experiments, Selected Works Geophysics and physics of explosion, Nauka Press, Moscow.
- Saidou, S.N., 2018. Patlama Yükünün Betonarme Ve Yığma Binalara Etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Salari, M. R., Saeb, S., Willam, K. J., Patchet, S. J., ve Carrasco, R. C., 2004. A coupled elastoplastic damage model for geomaterials, Comp. Meth. in Applied Mech. and Eng., 193, 27-29, 2625-2643
- Simo, J. C. ve Ju, J. W., 1987a. Strain and stress-based continuum damage model, Part I: Formulation, Int. J. Solids Struct., 23, 7, 821-840.
- Simo, J. C. ve Ju, J. W., 1987b. Strain and stress-based continuum damage model. Part II: Computational aspects, Int. J. Solids Struct., 25, 7, 841-869.
- Siwiński, J. ve Stolarski, A., 2016. Modeling of Buildings Behavior Under Blast Load, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, DOI 10.1007/978-3-319-42402-6\_27.

- Sümer, Y. ve Aktaş, M., 2015. Defining parameters for concrete damage plasticity model, Challenge Journal Of Structural Mechanics, 1, 149–155.
- Tai, Y.S., Chu, T.L., Hu, H.T. ve Wu, J.Y., 2011. Dynamic response of a reinforced slab subjected to air blast load, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 56, 140–147.
- Taqieddin, Z.N, 2008. Elasto-Plastic And Damage Modeling Of Reinforced Concrete, Prof. Doktora tezi, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana, USA.
- Temsah, Y., Jahami, A., Khatib, J. ve Sonebi, M., 2018. Numerical analysis of a reinforced concrete beam under blast loading, MATEC Web of Conferences, 149, 02063.
- TM 5-1300, 1990. Structures To Resist The Effects of Accidental Explosions, Department of Defence, USA.
- Turcan, U.C., 2012. Kapali Hacimlerde Oluşan Patlamaların ve Darbe Basıncı Yükleri Altındaki Yapıların Davranışlarının Çözümlemesi, Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü, Ortadoğu Ünivirsitesi, Ankara, Türkiye.
- Uddin, N., 2010. Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites, Elsevier, New York, USA.
- UFC 3-340-02, 2008. Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Dept of Defense, Washington, USA.
- Ullah, A., Ahmad, F., Jang, H.W., Kim, S.W. ve Hong, J.W., 2016. Review of Analytical and Empirical Estimations for Incident Blast Pressure, KSCE Journal of Civil Engineering, 00, 000-0000.
- Voyiadjis, G. Z. ve Abu Lebdeh, T. M., 1992. Biaxial testing of repaired concrete, ACI J., 564-573.
- Voyiadjis, G. Z. ve Abu Lebdeh, T. M., 1993. Damage model for concrete using bounding surface concept, J. Eng. Mech., 119, 9, 1865-1885.
- Voyiadjis, G. Z. ve Kattan, P. I., 1989. Local Approach to Damage in ElastoPlastic Metal Matrix Composites, Int. J. Damage Mech., 2, 1, 92-114.
- Voyiadjis, G. Z. ve Kattan, P. I., 1999. Advances in damage mechanics: Metals and metal-matrix composites, Elsevier, Oxford.
- Voyiadjis, G. Z., ve Kattan, P. I., 2006, Advances in Damage Mechanics: Metals and Metal Matrix Composites, with an Introduction to Fabric Tensors, Second Edition, Elsevier, Oxford

- Wastiels, J., 1980. A softening plasticity model for concrete. Proc. International conference of the numerical method of nonlinear Problems, Pinebridge Press, Swansea, U.K., 481-493.
- Weerheijm, J. ve Van Doormaal, J.C.A.M., 2007. Tensile failure of concrete at high loading rates: New test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests, International Journal of Impact Engineering, 34, 609–626610.
- Wu, C. ve Hao, H. 2005. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions. Int. J. Impact Eng., 31, 6, 699-717.



## ÖZGEÇMİŞ

Alaaddin AL-JUNEED, 1988 yılında Suriye, Halep şehrinde doğdu. 2008 yılında lise aldığı başarı sonuçlarına %96.25 göre Halep Üniversitesinde, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. 2013 Yılında İnşaat Mühendisliği lisans eğitimini onur öğrencisi olarak "Aroma Mall Parking Using Flat Slabs" başlıklı bitirme projesi başarı bir şekilde tamamladı. Türkiye Bursları Programında 2016'da hak kazandı. Bir yıl Türkçe hazırlık bitirdikten sonara Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. Dersler başarı bir şekilde tamamlayıp 3.88 dersler not ortalamasıydı. Bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- Aljuneed, A. ve Türker, T, 2020. CONWEP Yöntemi ve CDP Modeli Kullanarak Patlama Etkisindeki Betonarme Bina Analizi, Teknik Dergi (incelemede).