

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PATLAMANIN İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ
VE PATLAMA YARALANMA KRİTERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk ZIRH

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**PATLAMANIN İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ
VE PATLAMA YARALANMA KRİTERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ömer Faruk ZIRH
(501221027)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali SARI

EYLÜL 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF EXPLOSION ON THE HUMAN
BODY AND DEVELOPMENT OF BLAST INJURY CRITERIA**



M.Sc. THESIS

**Ömer Faruk ZIRH
(501221027)**

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Ali SARI

SEPTEMBER 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501221027 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ömer Faruk ZIRH, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “PATLAMANIN İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE PATLAMA YARALANMA KRİTERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ali SARI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Osman BULUT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk NEMUTLU
Bingöl Üniversitesi

Teslim Tarihi : 28 Ağustos 2024
Savunma Tarihi : 10 Eylül 2024





Canım aileme,



ÖNSÖZ

Tez kapsamında patlama dalgası özellikleri (tepe basıncı ve süresi) akciğerler, beyin, kas-iskelet sistemi gibi ana organlarda meydana gelen yaralanmalarla ilişkilendirilmiştir. Organ yaralanmaları için eşik değerleri belirlemek üzere çeşitli yaralanma ölçeklendirme kriterleri dikkatlice derlenmiştir. Tezin mevcut hali ile patlama yüklemesinin etkileri niceliksel olarak belgelenmiş ve insan vücudunun neredeyse tüm ana sistemleri için yaralanmaların ciddiyeti ile ilişkilendirilmiştir. Tezin patlama yaralanması ile ilgili daha sonraki çalışmalar için bağımsız bir referans olarak hizmet edeceğine inanılmaktadır.

Tez çalışmaları süresince her daim yanımda olan, bizlerle ilgilenme ve yardım için gerekli süreyi her zaman oluşturan, patlama konusunda gerekli tecrübe ve değerli bilgilerini bizlere aktaran saygıdeğer tez danışmanı hocam Prof. Dr. Ali SARI'ya tüm emekleri için en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında verilen desteklerden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bugünlere gelmemde üzerimde büyük emeği olan başta annem Fatma ZIRH ve babam Bülent ZIRH olmak üzere tüm aileme ve değerli hocalarıma en içten dileklerle şükran ve sevgilerimi sunarım.

Eylül 2024

Ömer Faruk ZIRH
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin İçeriği, Amacı ve Önemi	1
1.2 Patlama ve Patlayıcı Türleri	2
1.3 Patlama Dalgası.....	5
1.3.1 Patlama dalgası parametreleri	8
1.3.1.1 Maksimum yansıyan basınç, P_r	8
1.3.1.2 Dinamik (patlama rüzgarı) basınç, q_0	10
1.3.1.3 Şok yüzey hızı, U	10
1.3.1.4 Patlama dalgası uzunluğu, L_w	10
1.3.1.5 İdealleştirilmiş patlama dalgası parametreleri	11
1.4 Yapılarda Patlama Yüğü	12
1.4.1 Açık alan patlamaları	12
1.4.1.1 Serbest hava patlaması	12
1.4.1.2 Hava patlaması	15
1.4.1.3 Yüzey patlaması	15
1.4.2 Kapalı alan patlamaları	17
1.4.2.1 Tamamen havalandırılmalı patlama	17
1.4.2.2 Kısmen havalandırılmalı patlama.....	17
1.4.2.3 Tamamen kapalı alan patlaması	18
1.4.3 Ön duvar yüklemesi	20
1.4.4 Yan duvar yüklemesi	21
1.4.5 Çatı yüklemesi.....	22
1.4.6 Arka duvar yüklemesi	23
1.4.7 Çerçeve yüklemesi	23
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
2.1 Patlamanın İnsan Vücuduna Etkileri.....	25
2.1.1 Beyin	25
2.1.2 İşitsel sistem.....	27
2.1.3 Akciğer.....	30
2.1.4 Göz	32
2.1.5 Kalp.....	32
2.1.6 Kas iskelet sistemi.....	32

2.1.7 Karın bölgesi	33
2.2 Patlamanın İnsan Vücuduna Etkileri - Ek Çalışmalar	33
2.3 Patlamanın Yapılar Üzerindeki Etkisi	39
2.3.1 Tamamen kapalı alan patlaması	39
2.3.1.1 Şok dalgası süresi ve yarı statik aşırı basınç	42
2.3.1.2 Kapalı alan patlamasından kaynaklanan yaralanmalar	45
2.3.2 Açık alan patlaması	47
2.3.2.1 Açık alan patlamasına dair örnek çalışma	47
2.3.2.2 EYP yanal patlamasının hafif zırlı araçlar ve mürettebatı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	47
2.3.2.3 Sonlu elemanlar yöntemi analizi	48
2.3.2.4 Analiz sonuçları	49
3. PATLAMA YARALANMALARI	53
3.1 Patlama Yaralanmalarına Genel Bakış	53
3.2 Patlama Yaralanması Türleri ve Mekanizmaları	54
3.3 Yaralanma Ölçeklendirmesi	56
3.3.1 Kısıtlanmış yaralanma ölçeği (KYÖ)	57
3.3.2 Yaralanma şiddeti skoru (YSS)	57
3.3.3 Dinamik tepki indeksi (DTİ)	58
3.3.4 Lomber (bele ait) yük kriteri	59
3.3.5 Kafa yaralanması kriteri (KYK)	59
3.3.6 Boyun yaralanma kriteri (BYK)	61
3.3.7 Göğüs yaralanma kriteri	62
3.3.8 Femur kuvveti kriteri	62
4. TARTIŞMA VE LİTERATÜR SONUÇLARI	63
4.1 Patlama Yaralanması Görülme ve Ölüm Oranları	63
4.2 Patlama Yaralanmasında Limit Değerler	65
4.2.1 İnsan toleransı	65
4.2.1.1 Patlama basıncı	65
4.2.1.2 Yapısal hareket	66
4.2.1.3 Parçacık	68
4.3 Patlama Yaralanmasının Tedavi Prensipleri	70
4.3.1 Hafif patlama yaralanması	70
4.3.2 Orta şiddetli patlama yaralanması	70
4.3.3 Şiddetli patlama yaralanması	70
4.3.4 Aşırı şiddetli patlama yaralanması	71
4.4 Patlama Yaralanması Koruyucu Ekipmanları	71
5. SONUÇLAR	73
5.1 Çalışma Sonuçları	73
5.2 Gelecekteki Çalışmalar	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

ATC	: Antropomorfik test cihazı
BPY	: Birincil Patlama Yaralanması
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
BYK	: Boyun Yaralanma Kriteri
DİĞİ	: Devlet İş Güvenliği İdaresi
DTİ	: Dinamik Tepki İndeksi
EYP	: El yapımı patlayıcı
FMAGS	: Federal Motorlu Araç Güvenlik Standardı
Gİ	: Gastrointestinal
GKS	: Glasgow Koma Skalası
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
KYK	: Kafa Yaralanma Kriteri
KYÖ	: Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği
PAY	: Patlama akciğer yaralanması
SBTO	: Savunma Bilim ve Teknoloji Organizasyonu
TBH	: Travmatik beyin hasarı
TNT	: Trinitrotoluen
UKTGİ	: Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi
YŞS	: Yaralanma Şiddeti Skoru



SEMBOLLER

$\alpha(t)$	: Kuklanın başının kütle merkezinde hesaplanan ivme-zaman geçmişi
B_H	: Bina yüksekliği
B_L	: Bina uzunluğu
B_w	: Bina genişliği
C_d	: Hava sürtünme katsayısı
C_e	: Azaltma faktörü
C_r	: Yansıma katsayısı
F_z	: Üst boyun için eksenel kuvvet
F_{zc}	: Kritik eksenel kuvvet
H_{EXP}^d	: Söz konusu patlayıcının patlama ısısı
H_{TNT}^d	: TNT'nin patlama ısısı
I_o	: Pozitif impuls
I_o^-	: Negatif impuls
k_i	: TNT eşdeğer katsayısı, k_i (İmpuls)
k_p	: TNT eşdeğer katsayısı, k_p (Patlama aşırıbasıncı)
L_w	: Patlama dalgası uzunluğu
m	: Patlayıcı kütlesi
M_y	: Oksipital kondil etrafındaki moment
M_{yc}	: Oksipital kondil etrafındaki kritik moment
N_{ij}	: Boyun yaralanma kriteri
$P(t)$	: Patlama aşırı basıncının zamana bağlı olarak değişiminin fonksiyonu
P_a	: Yan duvarlar için etkin yanal aşırı basınç
P_b	: Arka duvarlar için etkin yanal aşırı basınç
$P_{g(qs)}$	: Yarı statik aşırı basınç
P_o	: Ortam basıncı
P_r	: Maksimum yansıyan basınç
P_s	: Durgunluk basıncı
P_{so}	: Pozitif faz için maksimum basınç
P_{so}^-	: Negatif faz için maksimum basınç
R	: Patlayıcıya olan uzaklık

S	: B_H ve $B_W/2$ değerlerinden küçük olanı
t_1	: Patlama başlangıç zamanı
t_c	: Yansıyan aşırı basınç etkisinin süresi
t_d	: Pozitif fazın süresi
t_d^-	: Negatif fazın süresi
t_{pr}	: Şok dalgası süresi
Δt	: İvmenin hesaplandığı maksimum zaman aralığı
U	: Şok yüzey hızı
W	: Patlayıcının TNT eşlenik ağırlığı
W_E	: Etkin patlayıcı ağırlığı
W_{EXP}	: Söz konusu patlayıcının ağırlığı
x	: Yükleme yoğunluğu (TNT ağırlığı / hacim)
x_{max}	: Maksimum penetrasyon mesafesi
q_o	: Maksimum dinamik (patlama rüzgarı) basınç

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Farklı patlayıcılar için patlayıcı TNT eşdeğer katsayıları [60].	4
Çizelge 1.2 : Ekipman, diğer yapılar ve altyapıdaki patlama hasarına ilişkin aşırı basınç değerleri (TNO Yeşil Kitap) [41].	19
Çizelge 2.1 : Glaskow Koma Skalası (GKS) ölçütleri ve puanlama sistemi [14].	26
Çizelge 2.2 : Personel üzerindeki patlama basıncı etkileri [49].	35
Çizelge 2.3 : NATO'ya göre farklı vücut bölümleri için yaralanma riskini değerlendirmek amacıyla kullanılacak yaralanma değerlendirme referans değerleri ve ilgili ATC [55].	36
Çizelge 2.4 : Yüzdeki kırılmalara ilişkin deneysel çalışmaların özeti [61].	37
Çizelge 2.5 : Patlama yaralanma mekanizmaları [47].	46
Çizelge 2.6 : Gerçekçi patlayıcı tehditleri için yaklaşık TNT eşdeğer patlayıcı kütleleri [59].	50
Çizelge 3.1 : Yaygın karşılaşılan yaralanma türleri [49].	55
Çizelge 3.2 : Patlama yaralanması mekanizmaları [1].	55
Çizelge 3.3 : Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği (KYÖ) skorları ve iki vücut bölgesi için örnek yaralanma tipleri [50].	57
Çizelge 3.4 : Yaralanmaya dayalı hasar seviyesi tanımları (YŞS) [58].	58
Çizelge 3.5 : Dinamik Tepki (DT) Sınırları [50].	58
Çizelge 3.6 : Kafa yaralanması kriterleriyle ilişkili olarak bilinç düzeyleri [46].	60
Çizelge 3.7 : Kafa yaralanması kriterleri tolerans seviyeleri [46].	60
Çizelge 4.1 : Yıllara göre patlama görülmesi ve buna bağlı can kaybı değerleri [62].	64
Çizelge 4.2 : Patlama türlerine göre kayıp dağılımı [n(%)] [62].	65
Çizelge 4.3 : Kemerlerle bağlanmış personel için izin verilen ve kabul edilen titreşim toleransları [38].	68
Çizelge 4.4 : Parçaların insan derisine nüfuz etme olasılığı %50 [38].	68
Çizelge 4.5 : Parçacık çarpması nedeniyle personelin ciddi yaralanma limitleri [38].	69
Çizelge 4.6 : Farklı vücut bölgeleri için patlama yaralanmasına karşı gerekli koruma ekipmanları [60].	72
Çizelge 5.1 : Küresel hava patlamalarında birincil patlama yaralanması için limit patlama basıncı değerleri.	74



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Patlama malzemesinin farklı üretim şekilleri [38].	5
Şekil 1.2 : Patlama dalgasının karakteristik türleri : şok dalgası (sol) ve basınç dalgası (sağ) [40].	6
Şekil 1.3 : Tipik basınç – impuls eğrisi [42].	7
Şekil 1.4 : Farklı yükleme tipleri için birim şekil değiştirme hızının değişimi [39].	7
Şekil 1.5 : Şok dalgası için yansıma katsayıları [41].	9
Şekil 1.6 : Basınç dalgası için yansıma katsayıları [41].	9
Şekil 1.7 : İdealleştirilmiş şok ve basınç yükleri [41].	11
Şekil 1.8 : İdealleştirilmiş eşdeğer basınç yükü [41].	11
Şekil 1.9 : Serbest hava patlaması ortamı [38].	13
Şekil 1.10 : Serbest hava patlaması için basınç-zaman değişimi [38].	13
Şekil 1.11 : Deniz seviyesinde serbest havada küresel TNT Patlaması için pozitif fazlı şok dalgası parametreleri [38].	14
Şekil 1.12 : Hava patlaması [38].	15
Şekil 1.13 : Yüzey patlaması [38].	15
Şekil 1.14 : Yer patlamasının şok dalgalarının binalar üzerindeki etkisi [60].	16
Şekil 1.15 : Tamamen havalandırmalı patlama [39].	17
Şekil 1.16 : Kısmen havalandırmalı patlama [39].	17
Şekil 1.17 : Tamamen kapalı alan patlaması [39].	18
Şekil 1.18 : Basit bir açık/serbest alan patlaması (a) ve bir kapalı alan patlamasının (b) basınç dalgası formu [49].	18
Şekil 1.19 : Dikdörtgen bir binada patlama yükünün genel dağılımı [40,41].	20
Şekil 1.20 : Ön duvar yüklemesi eşdeğer yük diyagramı [41].	21
Şekil 1.21 : Yan duvar yüklemesi basınç-zaman diyagramı [41].	22
Şekil 1.22 : Azaltma faktörünün (C_e) belirlenmesi [41].	22
Şekil 1.23 : Arka duvar yüklemesi (TNO Yeşil Kitap (Sol) / UFC 3-340-02 (Sağ)) [41].	23
Şekil 1.24 : Dikdörtgen bir bina üzerindeki net yanal yük [41].	24
Şekil 2.1 : Kulak anatomisi [19].	28
Şekil 2.2 : Patlama basıncına bağlı insan kulağı hasarı [38].	29
Şekil 2.3 : Akciğer yaralanmasında hayatta kalma için eşik değer eğrileri [38].	31
Şekil 2.4 : ATC türleri : a) H3 50th Male b) ES-2re c) MIL-Lx legform [56].	36
Şekil 2.5 : Kafatası kemikleri (Sol) ve orbita dahil yüz kemikleri (Sağ) [61].	37
Şekil 2.6 : Dikdörtgen bir sığınak için sol sensörden elde edilen aşırı basınç geçmişi [44].	40
Şekil 2.7 : SBTO tarafından 2008 yılında yapılan testlerden elde edilen, farklı patlayıcı şekilleri ve yönelimleri için deneysel aşırı basınç geçmişleri [44].	41
Şekil 2.8 : Tamamen kapalı bir ortamda tipik yarı-statik aşırı basınç [44].	41
Şekil 2.9 : 0,125 m ³ bir kapalı alan içinde 100 g küresel patlayıcının aşırı basınç geçmişi [44].	43

Şekil 2.10 : Parametrik çalışmalarda patlayıcı ve patlama noktasının bulunduğu hücre [44].	43
Şekil 2.11 : Gösterge 1’de yükleme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak şok dalgası süresi [44].	44
Şekil 2.12 : Yükleme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak yarı statik aşırı basınç [44].	45
Şekil 2.13 : Sayısal analizlerde kullanılan prizma şeklinde bir hava modeline sahip aracın sayısal modeli [46].	48
Şekil 2.14 : Patlama dalgasından etkilendiği varsayılan araç yolcusunun düzenini ve patlayıcının konumunu gösteren kesit resmi [46].	49
Şekil 2.15 : Farklı mesafelerde gerçekleşen küresel hava patlamalarından kaynaklanan patlama dalgası parametrelerine göre BPY kriterlerinin analizi [59].	50
Şekil 3.1 : Belirli bir KYK puanı için farklı şiddetlerdeki kafa travması seviyelerinin olasılıkları [46].	61



PATLAMANIN İNSAN VÜCUDUNA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE PATLAMA YARALANMA KRİTERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Günümüz dünyasında, gerek terörist bombalamalarında, gerek sanayi ve endüstri alanında, gerekse günlük hayatta sıkça patlama olayları ile karşılaşılıyor. Patlama ile birlikte oluşan patlama dalgaları yapıların ve insan vücudunun ciddi patlama yüklerine maruz kalmasına sebep olmaktadır. Patlama yüklerinden kaynaklı yapılarda ölümcül tehlikelere yol açabilen yıkımlar görülebilenken, insan vücudunun beyin, akciğer, kalp, işitsel sistem, göz, karın bölgesi ve kas iskelet sistemi gibi farklı bölümlerinde de darbe yükünün etkisiyle ciddi yaralanmalı ölümcül sonuçlar görülmektedir. Bu doğrultuda, bu tez çalışması kapsamında patlama dalgası özellikleri (tepe basıncı ve süresi) akciğerler, beyin, kas-iskelet sistemi gibi ana organlarda meydana gelen yaralanmalarla ilişkilendirilmiştir. Organ yaralanmaları için eşik değerleri belirlemek üzere çeşitli ölçeklendirme kriterleri dikkatlice derlenmiştir. Tezin mevcut hali ile patlama yüklemesinin etkileri niceliksel olarak belgelenmiş ve insan vücudunun neredeyse tüm ana sistemleri için yaralanmaların ciddiyeti ile ilişkilendirilmiştir. Tezin patlama yaralanması ile ilgili daha sonraki çalışmalar için bağımsız bir referans olarak hizmet edeceğine inanılmaktadır.

Beş bölümden oluşan tezin ilk bölümünde, öncelikle tezin içeriği ve amacı, patlama olayının meydana gelmesi ve farklı patlayıcı türleri ve patlayıcı malzemesi üretim şekilleri anlatılmıştır. Burada, Çizelge 1.1’de farklı patlayıcılar için patlayıcı TNT eşdeğer katsayıları verilirken, Şekil 1.1’de de patlama malzemesinin farklı üretim şekillerine ait örnekler verilmiştir. Sonrasında, şok dalgası ve basınç dalgası olarak patlama dalgasının iki farklı karakteristik türü belirtilmiştir. Şok dalgasının basınç - zaman geçmişinde basıncın bir anda pik yapıp, sonrasında ortam basıncına düştüğünü görürken, basınç dalgasında patlama basıncının zamanla pik değere ulaşip devamında ortam basıncına düştüğü görülmüştür. Denklem 1.2 kullanılıp yaklaşık olarak impuls değerini verecek ampirik formülasyonlar elde edilmiş, bu formülasyonlar ile üçgen, yarı sinüs veya üstel sönümlü şok dalgası için impuls değerlerinin elde edilebileceği belirtilmiştir. Devamında, patlama yüklerinin belirlenmesinde kullanılacak patlama dalgası parametreleri (Maksimum yansıyan basınç (P_r) , Maksimum dinamik basınç (q_0) , Şok yüzey hızı (U), Patlama dalgası uzunluğu (L_w)) anlatılmıştır. Şekil 1.7 ve Şekil 1.8’de sırasıyla patlama için idealleştirilmiş şok ve basınç yükleri ve idealleştirilmiş eşdeğer basınç yüküne ait basınç - zaman geçişleri verilmiş olup, bu yüklemelerin patlamaya dayanıklı yapı tasarımını basitleştirmek için kullanıldığından bahsedilmiştir. Bu bölümün son kısmında ise, yapılara etki edecek patlama yükleri incelenmiştir. Yapılara etkiyen patlama yükü incelemesi için öncelikle açık alan patlamaları ve kapalı alan patlamaları gibi farklı şekillerde meydana gelen patlamaları açıklamak gerekmiştir. Açık alan patlamaları; serbest hava patlaması, hava patlaması ve yüzey patlaması olarak ayrılırken, kapalı alan patlamaları ise tamamen havalandırılmalı patlama, kısmen havalandırılmalı patlama ve tamamen kapalı alan patlaması olarak ayrılmaktadır. Şekil 1.18’de ise basit bir açık alan patlamasına ve bir

kapalı alan patlamasına ait tipik basınç - zaman geçmişi verilmiştir. Sonrasında ise, patlama dalgasının bir yapıya çarpmasıyla yapının patlama dalgasının aşırı basıncı ve sürtünme kuvvetleri tarafından yüklendiği belirtilmiş olup, kapalı dikdörtgen şeklindeki bir bina ve binanın bileşenleri için maruz kalınan patlama yüklerinin hesapları, ön duvar yüklemesi, yan duvar yüklemesi, çatı yüklemesi, arka duvar yüklemesi ve çerçeve yüklemesi olarak verilmiştir.

İkinci bölümde, literatür araştırması kapsamında patlamanın insan vücudunun beyin, akciğer, kalp, işitsel sistem, göz, karın bölgesi ve kas iskelet sistemi gibi farklı doku ve organlarındaki etkileri üzerinde durulmuştur. Bu noktada, Çizelge 2.1’de patlama yaralanmalarında beyin hasarının hafif, orta veya yüksek şiddetli beyin hasarı olduğuna karar vermek için kullanılan Glasgow Koma Skalası’nın ölçütleri ve puanlama sistemi verilmiştir. Ölçütler sonucunda elde edilecek puanın 3-8 olması durumunda yüksek şiddetli beyin hasarı, 9-12 olması durumunda orta şiddetli beyin hasarı, 13-15 puan olması durumunda ise hafif şiddetli beyin hasarı olarak nitelendirileceğinden bahsedilmiştir. Şekil 2.2’de ise farklı patlama basıncı ve impuls değerlerinden kaynaklanan insan kulak zarındaki yırtılma ve işitme kaybına ait eşik patlama basıncı değerlerini içeren diyagram UFC 3-340-02 (2008) kılavuzunda belirtildiği gibi verilmiştir. Farklı patlama aşırıbasıncı ve ölçeklendirilmiş impuls değerlerine bağlı değişkenlik gösteren akciğer yaralanmasına ait hayatta kalma için eşik değer eğrileri ise Şekil 2.3’de verilmiştir. Patlamanın insan vücuduna etkilerine dair ek çalışmaların yer aldığı bölümde ise, insan kafası üzerine farklı çalışmalarda elde edilen sonuç bilgi ve değerlerinin özeti sunulmaktadır. Burada, Çizelge 2.3’de insan vücudunun farklı bölümleri için farklı yaralanma kriterlerine dayanarak NATO HFM-148 görev grubu tarafından belirlenen yaralanma değerlendirme eşik değerleri özet şeklinde verilmiştir. Çizelge 2.4’de ise Yoganandan [61] tarafından literatürden derlenmiş insan yüzündeki kırılmalara ilişkin deneysel çalışmaların sonuçlarını içeren özet tablo verilmiştir. Bu bölümün son kısmında ise tamamen kapalı alan patlaması ve açık alan patlamasına dair birer adet örnek çalışma incelenmiş olup, bu çalışmaların sonuçlarına dair grafikler ve özet tablolar verilmiştir. Kapalı alan patlaması için basınç – zaman geçmişlerine bakıldığında şok dalgası süresinin ve yarı statik aşırı basıncın öneminden bahsedilmiştir. Açık alan patlamasında ise, farklı mesafelerde gerçekleşen küresel hava patlamalarından kaynaklanan patlama dalgası parametrelerine göre birincil patlama yaralanması kriterlerinin analizini içeren diyagram Şekil 2.15’de verilmiştir. Çizelge 2.6’da ise gerçekçi patlayıcı tehditleri (patlama olayları) için yaklaşık TNT eşdeğer patlayıcı kütlelerine ait özet bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise genel başlık olarak patlama yaralanmaları konusu üzerinde durulmuştur. Öncelikle patlama yaralanmalarına genel bakış başlığı altında patlama yaralanmalarının yaralanma özellikleri ve epidemiyolojik özelliklerinin diğer yaralanma türlerinden farklı olduğu belirtildikten sonra, patlama yaralanmasının karakteristik özellikleri açıklanmıştır. Bu noktada, patlama yaralanmalarının karmaşık yaralanma içerdiği, çoğunlukla belirli, hedef organı etkilediği, hafif dış yaralanma fakat ciddi iç yaralanmaya sebebiyet verebileceği ve yaralanma durumunun hızla kötüleşebileceği özellikleriyle diğer yaralanmalardan farklılaştığı belirtilmiştir. Sonrasında, patlama yaralanması türleri ve mekanizmaları kısmında, insan vücudunun farklı bölümleri için karşılaşılan yaygın patlama yaralanma türlerine ve patlama yaralanmalarının birincil, ikincil, üçüncül, dördüncül ve beşincil patlama yaralanmaları olarak kategorize edildiğine dair özet tablolar ve bilgiler sunulmuştur. Bölümün son kısmında ise yaralanma ölçeklendirmesi genel başlığı altında; Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği (KYÖ), Yaralanma Şiddeti Skoru (YŞS), Dinamik

Tepki İndeksi (DTİ), Lumbar (bele ait) yük kriteri, Kafa Yaralanma Kriteri (KYK), Boyun Yaralanma Kriteri (BYK), Göğüs yaralanma kriteri ve Femur kuvveti kriteri gibi literatürde verilen yaralanma kriterleri ve bu kriterlerdeki yaralanmaya dair limit değerler üzerinde durulmuştur. Burada, Çizelge 3.3’de kafa ve omurga bölgesi için farklı kısaltılmış yaralanma ölçeği (KYÖ) skorlarına göre yaralanma tipleri verilmiştir. Denklem 3.1’de Yaralanma Şiddeti Skoru (YŞS) formülasyonu verildikten sonra, Çizelge 3.4’de farklı YŞS değerleri için yaralanma seviyesi ve örnek yaralanmalar özet şeklinde verilmiştir. Çizelge 3.5’de düşük, orta ve yüksek riskli dinamik tepki seviyeleri için x, y ve z yönlü ivmelenmelerdeki Dinamik Tepki (DT) sınırları verilmiştir. Kafa Yaralanması Kriteri (KYK) için ise farklı KYK puanlarına karşılık gelen KYÖ seviyeleri ve ilgili duruma ait beyin sarsıntısı ve kafa yaralanma seviyesinin açıklamasına dair özet Çizelge 3.6’da verilmiştir. Çizelge 3.7’de farklı kafa yaralanma kriterleri için 5 farklı tolerans seviyesi ve bu seviyelere ait yaralanma açıklaması ve limit değerler sunulmuştur. Şekil 3.1’de ise belirli bir kafa yaralanması kriteri puanı için farklı şiddetlerdeki kafa travması seviyelerinin olasılıkları belirtilmiştir. Grafiğe bakıldığında, 2500 gibi bir KYK puanı için %80 oranında ölümcül, %95 civarında da kritik kafa travması seviyelerinin olduğu görülebilir.

Dördüncü bölüm tartışma ve literatür sonuçlarından oluşmaktadır. Bu bölümde, öncelikle patlama yaralanması görülme ve ölüm oranlarına dair literatürde yer alan sayısal, istatistiksel değerler aktarılmıştır. Burada bir örnek olarak, Çizelge 4.2’de farklı patlayıcı türleri için gerçekleşen farklı sayıda patlamaların sayıları ve bu patlamalarda toplamda ölen, ciddi yaralanan, hafif yaralanan ve kayıp olanların sayısının belirtildiği bilgiler özet şeklinde verilmiştir. Sonrasında, patlama yaralanmasında limit değerler başlığı altında insanın patlama basıncına, yapısal harekete ve parçacık yaralanmasına dair toleransına ait limit değerler özet olarak sunulmuştur. Bu noktada, Çizelge 4.5’de farklı ağırlıklardaki parçacıkların insanın göğüs, karın ve kafa bölgesine çarpması durumu için limit parçacık hızı ve enerjisi değerleri verilmiştir. Bu limit değerler aşıldığında personelde ciddi yaralanmanın meydana gelebileceği belirtilmiştir. Devamında ise hafif patlama yaralanması, orta şiddetli patlama yaralanması, şiddetli patlama yaralanması ve aşırı şiddetli patlama yaralanması gibi farklı patlama yaralanmalarının tedavi prensiplerine dair özet bilgiler verilmiştir. Bölüm sonunda ise, insan vücudunun farklı bölümleri için patlama yaralanmasına karşı kullanılabilecek gerekli koruma ekipmanları özet tablo olarak verilmiştir (Çizelge 4.6).

Beşinci bölüm olan son bölüm ise sonuçlar bölümü olarak verilmiştir. Bu bölümde çalışmanın sonuçları başlığı altında küresel hava patlamalarından kaynaklanan patlama yaralanmalarında patlama dalgasının farklı pozitif faz süre aralıkları için limit patlama basıncı değerlerinin verildiği Çizelge 5.1 verilip, gerekli açıklamalar yapılmıştır. Son olarak, gelecekteki çalışmalar başlığı altında tezin gelecekteki çalışmalara nasıl katkı sağlayabileceği ve gelecekte patlama yaralanması ile ilgili ne tür çalışmaların yapılabilceği aktararak tez sonlandırılmıştır.



INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF EXPLOSION ON THE HUMAN BODY AND DEVELOPMENT OF BLAST INJURY CRITERIA

SUMMARY

In today's world, explosions frequently occur in terrorist bombings, industrial and manufacturing sectors, and daily life. The blast waves generated by explosions subject structures and the human body to significant blast loads. These blast loads can cause deadly structural collapses, and serious injuries or fatal outcomes can occur in various parts of the human body, such as the brain, lungs, heart, auditory system, eyes, abdominal region, and musculoskeletal system due to the impact of the blast load. In this context, this thesis initially discusses the blast wave and its characteristics (peak pressure and duration) as well as the parameters of the blast wave, which have been related to injuries occurring in the major organs of the human body. Subsequently, the effects of blast loading have been quantitatively documented under the headings of blast injuries, types and mechanisms of blast injuries, and the effects of explosions on the human body, correlating the severity of injuries with nearly all major systems of the human body. As a result, various injury scaling criteria have been carefully compiled to determine thresholds for major organ injuries, and ultimately, limit blast pressure values for different parts of the human body (lung, ear and head) have been proposed. The thesis will serve as an independent reference for further studies on blast injury.

The first section of the thesis discusses the content and purpose of the thesis, the occurrence of explosion events, different types of explosives, and the manufacturing methods of explosive materials. Here, Table 1.1 provides the TNT equivalent factors for different explosives, while Figure 1.1 presents examples of different manufacturing methods of explosive materials. It then explains the two characteristic types of blast waves that are shock waves and pressure waves. In the pressure-time history of the shock wave, it is observed that the pressure spikes abruptly and then drops to ambient pressure, whereas, in the pressure wave, the blast pressure gradually reaches a peak value and then decreases to ambient pressure. Using Equation 1.2, empirical formulations were derived to approximate the impulse value, indicating that the impulse values for triangular, semi-sinusoidal, or exponentially decaying shock waves can be obtained with these formulations. Furthermore, the parameters of the blast wave used to determine blast loads (Maximum reflected pressure (P_r), Maximum dynamic pressure (q_0), Shock front velocity (U), Blast wave length (L_w)) are described. Figures 1.7 and 1.8 respectively illustrate the idealized shock and pressure loads for explosions and the pressure-time histories of the idealized equivalent pressure load, noting that these loads are used to simplify the design of blast-resistant structures. The final part of this section examines the blast loads affecting structures. Different scenarios of unconfined and confined explosions are explained to understand the blast loads impacting structures. Unconfined explosions are categorized as free-air bursts, air bursts, and surface bursts, while confined explosions are classified as fully vented, partially vented, and fully confined explosions. Figure 1.18 provides a typical

pressure-time history for a simple open-air (unconfined) explosion and an enclosed space (confined) explosion. The section also provides calculations for the blast loads on a rectangular building and its components, including front wall loading, side wall loading, roof loading, rear wall loading and frame loading.

The second section of the thesis focuses on the effects of explosions on various tissues and organs of the human body, such as the brain, lungs, heart, auditory system, eyes, abdominal region, and musculoskeletal system, as part of the literature review. At this point, Table 2.1 presents the criteria and scoring system of the Glasgow Coma Scale, which is used to determine whether brain injury from blast injuries is classified as mild, moderate, or severe. It is noted that a points of 3-8 illustrates severe brain injury, a points of 9-12 expresses moderate brain injury, and a points of 13-15 demonstrates mild brain injury. Figure 2.2 shows a diagram of the threshold blast pressure values for eardrum rupture and hearing loss due to different blast pressures and impulse values, as indicated in the UFC 3-340-02 (2008) guidelines. The threshold survival curves for lung injury, which vary depending on different peak overpressure and scaled impulse values, are presented in Figure 2.3. It includes summaries of results and values obtained from various studies on the impact of explosions on the human head. In Table 2.3, the injury assessment threshold values for different parts of the human body, determined by the NATO HFM-148 task group based on different injury criteria, are summarized. Additionally, Table 2.4 provides a summary of experimental study results on facial fractures, compiled from the literature by Yoganandan [61]. The final part of this section reviews example studies on both fully confined and unconfined explosions, providing graphs and summary tables of the results. In the context of confined space explosions, the importance of shock wave duration and quasi-static overpressure is highlighted when examining pressure-time histories. For open-air explosions, Figure 2.15 presents a diagram analyzing primary blast injury criteria based on blast wave parameters from spherical air bursts occurring at different distances. Additionally, Table 2.6 provides summary information on approximate TNT equivalent explosive masses for realistic explosive threats (blast events).

The third section addresses the general topic of blast injuries. Initially, it highlights that the injury characteristics and epidemiological features of blast injuries differ from other types of injuries, explaining the characteristics of blast injuries. At this point, it has been noted that blast injuries are complex, often targeting specific organs, causing mild external injuries but potentially severe internal injuries, and can rapidly deteriorate, distinguishing them from other types of injuries. This section also categorizes blast injuries into primary, secondary, tertiary, quaternary, and quinary blast injuries, providing summary tables and information on the common types of blast injuries encountered in different parts of the human body. The final part of this section discusses injury scaling under the general heading, explaining injury criteria such as the Abbreviated Injury Scale (AIS), Injury Severity Score (ISS), Dynamic Response Index (DRI), Lumbar load criterion, Head Injury Criterion (HIC), Neck Injury Criterion (NIC), Chest Injury Criterion and Femur force criterion. Table 3.3 presents the types of injuries associated with different Abbreviated Injury Scale (AIS) scores for the head and spine. After providing the formulation of the Injury Severity Score (ISS) in Equation 3.1, Table 3.4 summarizes the injury levels and example injuries for different ISS values. Table 3.5 presents the Dynamic Response (DR) thresholds for low, medium, and high-risk dynamic response levels in x, y, and z directional accelerations. For the Head Injury Criterion (HIC), Table 3.6 summarizes the AIS levels corresponding to different HIC scores and the related descriptions of concussion and head injury severity. Table 3.7 presents five different tolerance levels for various

head injury criteria, along with injury descriptions and limit values for these levels. Finally, Figure 3.1 illustrates the probabilities of different severity levels of head trauma for a given HIC score. Looking at the graph (Figure 3.1), a HIC score of around 2500 is associated with an 80% probability of fatal head injury and approximately a 95% probability of critical head trauma.

The fourth section consists of discussions and literature results. This section provides numerical and statistical values from the literature on the incidence and mortality rates of blast injuries. As an example, Table 4.2 summarizes the number of explosions for different types of explosives, as well as the total number of fatalities, serious injuries, minor injuries, and missing persons resulting from these explosions. It then summarizes the threshold values for human tolerance to blast pressure, structural movement, and particle injuries. At this point, Table 4.5 provides the threshold velocity and energy values for particles of different weights impacting the chest, abdomen, and head regions of the human body. It is noted that exceeding these threshold values may result in severe injuries to personnel. Additionally, it outlines the treatment principles for different severity levels of blast injuries, including mild, moderate, severe and extremely severe blast injuries. At the end of the section, a summary table of the necessary protective equipment that can be used against blast injuries for different parts of the human body is provided (Table 4.6).

The fifth and final section is presented as the conclusion. In this section, under the title of the thesis's results, Table 5.1 is provided, showing the limit blast pressure values for different positive phase durations of blast waves resulting from spherical air explosions, along with the necessary explanations. Finally, under the title of future studies, how the thesis can contribute to future research and what types of studies could be conducted on blast injuries in the future are discussed, concluding the thesis.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin İçeriği, Amacı ve Önemi

Tez kapsamında öncelikle patlama, patlayıcılar ve türleri, tipik patlama dalgaları ve patlama dalgası parametreleri anlatılmıştır. Patlama dalgası özellikleri (tepe basıncı ve süresi) akciğerler, beyin, kas-iskelet sistemi gibi insan vücudunun ana organlarında meydana gelen yaralanmalarla ilişkilendirilmiştir. Sonrasında, yapılardaki patlama yükünün hesabı için açık alan ve kapalı alan patlamalarından bahsedilmiştir. Literatür taraması ile patlamanın insan vücudunun beyin, akciğer, kalp, işitsel sistem, göz, karın bölgesi ve kas iskelet sistemi gibi farklı bölümleri ve yapılar üzerindeki etkileri anlatılmıştır. Daha sonra, patlama yaralanması türleri ve mekanizmaları ve birçok organ yaralanması için eşik değerleri belirlemek üzere mevcut literatürdeki patlama yaralanma kriterleri (yaralanma ölçeklendirmesi) anlatılmıştır. Ayrıca, patlama yüklemesinin etkileri niceliksel olarak belgelenmiş olup, insan vücudunun neredeyse tüm ana sistemleri için yaralanmaların ciddiyeti ile ilişkilendirilmiştir. Tartışma ve literatür sonuçları başlığı altında da patlama yaralanması için tedavi prensipleri ve patlama yaralanmasına karşı kullanılabilecek koruyucu ekipmanlar anlatılmıştır. Sonuçlar kısmında ise tüm bu ön bilgilendirmelerden yola çıkılarak, küresel hava patlamalarından kaynaklanan patlama yaralanmalarında patlama dalgasının farklı pozitif faz süre aralıkları için limit patlama basıncı değerleri önerilmesi amaçlanmıştır.

Tez patlama yaralanması ile ilgili Türkçe literatüre kazandırılmış bir derleme çalışmasıdır. Türkiye'deki mevcut Türkçe literatürde patlama insan yaralanmaları ile ilgili bu tür bir çalışma eksikliği vardır. Dolayısıyla, tezin patlama yaralanmalarını insan vücudunun neredeyse tüm ana sistemleri için yaralanmaların ciddiyeti ile ilişkilendirmesi ve tüm organlar için yaralanma ölçeklendirme metodlarını toplu bir şekilde belirtmesi özellikleriyle Türkçe literatürdeki boşluğu dolduracağına inanılmaktadır. Ayrıca, Dünya literatüründe de patlama yaralanmaları ile ilgili çoğunlukla belirli yaralanma ölçeklendirme metodu odaklı çalışmalar bulunduğu için,

toplu bir şekilde yaralanma kriterleri ve ölçeklendirme metodlarını görebilmek adına tezin faydalı olacağı düşünülmektedir.

1.2 Patlama ve Patlayıcı Türleri

Sıvı veya katı bir maddenin anlık olarak ses, ısı, ışık ve basınç şeklinde enerji üreterek gaz fazına geçmesi sonucu patlamalar, patlamaların sonucunda ise patlama yaralanmaları veya ölümler meydana gelmektedir. Bu yaralanmalar genel olarak yüksek dereceli veya düşük dereceli patlayıcıların infilak etmesiyle oluşur. Yüksek dereceli patlayıcılar için C-4, Semtex, dinamit, amonyum nitrat, trinitrotoluen (TNT) örnekleri, düşük dereceli patlayıcı türleri için ise barut, molotofkokteyli, boru bombaları örnekleri verilebilir. Yüksek dereceli patlayıcılar saniyede 8000 metre hızla hareket edebilen ve atmosferik basıncın 30000 katına kadar basınçla sonuçlanan süpersonik patlamalar yaratır [1]. Düşük dereceli patlayıcılar ise isminden de anlaşılacağı üzere yüksek dereceleri patlayıcılara kıyasla daha az yıkıcı güce sahip olup, ikincil etkenlerle (çiviler, metal parçalar vs.) birleştiğinde şiddetli patlamalara sebep olabilir.

UFC 3-340-02 (2008) kılavuzunda sunulan patlama etkileri verilerinin büyük bir kısmı açık küresel TNT patlayıcısının patlama basınçları ile ilgilidir. Bu veriler, bu malzemelerin "etkin patlayıcı ağırlığının" patlayıcı enerjisini eşdeğer ağırlıktaki TNT'ninkiyle ilişkilendirerek potansiyel olarak diğer patlayıcı malzemeleri içerecek şekilde genişletilebilir. TNT'ye kıyasla malzemenin eşdeğerliğini enerji çıktısı gibi başka faktörlerde etkileyebilir. Bu faktörler arasında malzeme şekli (düz, kare, yuvarlak, vb.), patlayıcı madde sayısı, açık veya kapalı alan patlaması olma durumu ve dikkate alınan basınç aralığı (yakın, orta veya uzak menziller) yer alır.

Patlamaya dayanıklı tasarım için, belirli bir şekle sahip patlayıcı malzeme üzerindeki enerji değerinin benzer şekle sahip TNT'ninkine göre etkileri, çeşitli malzemelerin patlama ısısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [38]:

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \quad (1.1)$$

W_{EXP} : söz konusu patlayıcının ağırlığı

W_E : etkin patlayıcı ağırlığı

H_{EXP}^d : söz konusu patlayıcının patlama ısısı

H_{TNT}^d : TNT'nin patlama ısısı

Yaygın olarak kullanılan bazı patlayıcıların patlama ısısı UFC Tablo 2-1'de listelenmiştir. Denklem 1.1 açık alan (sınırlandırılmamış) patlamalarının şok etkileriyle ilişkili patlama çıktısına ilişkin parametredir. Patlayıcıların TNT eşdeğerliğini kapalı alanda (sınırlandırılmış) belirlemek için ise sınırlı sayıda test yapılmıştır. Bu nedenle, geçici bir prosedür olarak, TNT dışındaki kapalı alan patlayıcıları için şok basınçlarının belirlenmesinde denklem 1.1'e dayalı eşdeğerliklerin kullanılması önerilmektedir.

Patlayıcı muhafazası şok basınçlarının büyüklüğü üzerinde bir etkiye sahip olacaktır. Bu etkiler malzeme, kalınlık, şekil vb. gibi muhafazanın özelliklerine bağlıdır. Sınırlı miktarda yüzey patlatmalı test verilerinin incelenmesi, muhafaza etkilerinin ciddi olmadığını göstermiştir ve bu nedenle tasarım amaçları için muhafaza etkilerinin ihmal edilmesi önerilir [38].

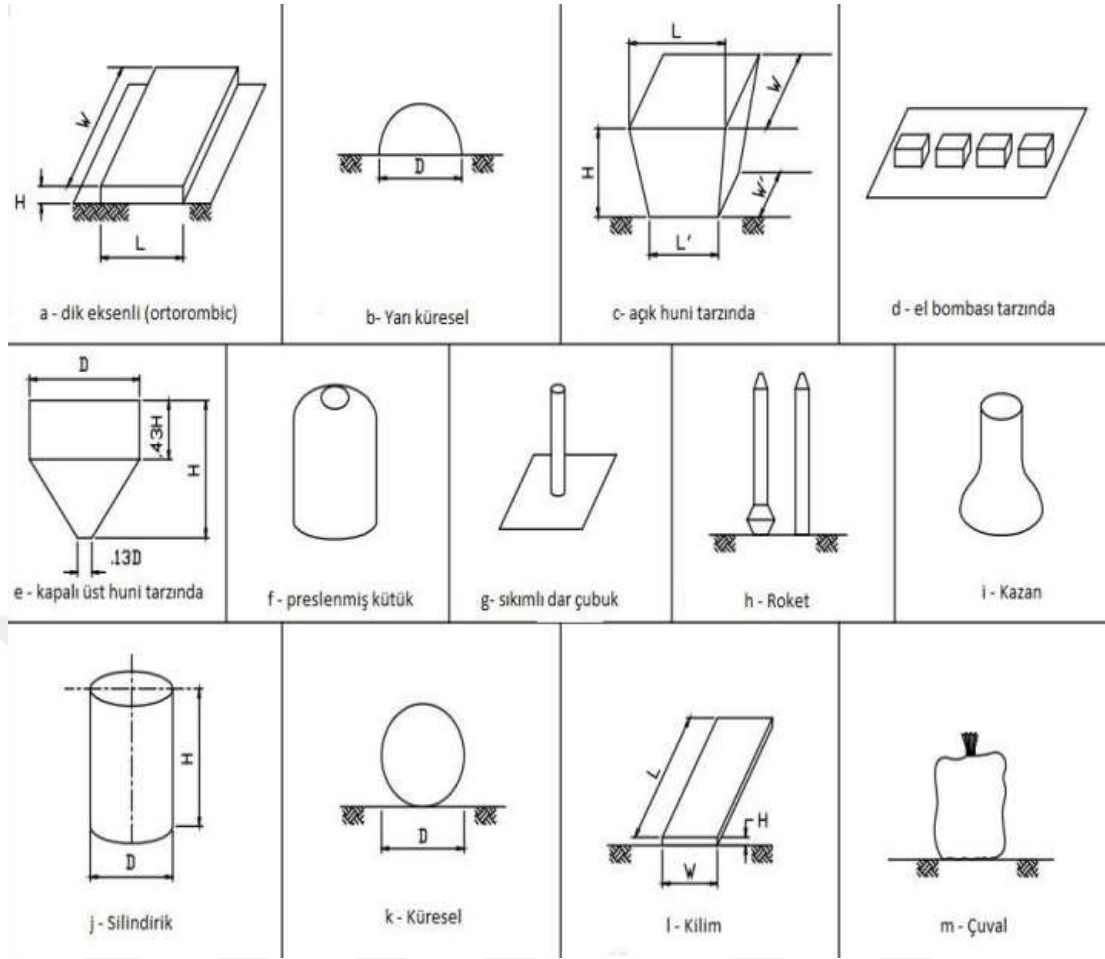
Sonuç olarak, yoğunlaştırılmış, yüksek enerjili patlayıcılardan kaynaklanan patlama dalgalarının özellikleri TNT tarafından üretilenlere açıkça benzerdir ve diğer patlayıcıların patlama parametreleri, küresel TNT'ye benzer patlama etkilerine sahip patlayıcılar kullanılarak hesaplanabilir. Buna patlayıcıların TNT eşdeğeri denir. Genel olarak, eşdeğer faktör göreceli karşılaştırmalarda kullanılır ve veriler farklı yüksek enerjili patlayıcıların hava patlama verilerinin karşılaştırılmasından elde edilir. Çizelge 1.1'de bazı patlayıcıların sonsuz hava ortamında patlaması için TNT eşdeğer katsayılarını, aşırı basınç ve impulsu hesaplamak için kullanılmak üzere liste şeklinde görülebilir [60]:

Çizelge 1.1 : Farklı patlayıcılar için patlayıcı TNT eşdeğer katsayıları [60].

Patlayıcı Madde	TNT eşdeğer katsayısı, kp (Patlama aşırıbasıncı)	TNT eşdeğer katsayısı, ki (İmpuls)	ka	Basınç aralığı (psi)
ANFO	0,82	-	0,82	1 - 100
A-3 plastik patlayıcı	1,09	1,076	1,083	5-50
B plastik patlayıcı	1,11	0,98	1,045	5-50
C-4 plastik patlayıcı	1,37	1,19	1,28	10-100
Cyclotol (70/30)	1,14	1,09	1,115	5-50
HBX-1	1,17	1,16	1,165	5-20
HBX-3	1,14	0,97	1,055	5-25
H-6	1,38	1,15	1,265	5-100
Minol II (70/30)	1,20	1,11	1,155	3-20
Octol (70/30, 75/25)	1,06	-	1,06	-
PBX-9404	1,13	-	1,13	5-30
PBX-9010	1,29	-	1,29	5-30
Pentolite-1	1,42	1,00	1,21	5-100
Pentolite-2	1,38	1,14	1,26	5-600
D plastik patlayıcı	0,90	0,93	0,915	-
Tetril	1,07	-	1,07	3-20
Tetrytol (75/25, 70/30, 65/35)	1,06	-	1,06	-
TNETB	1,36	1,10	1,23	5-100
TNT	1,00	1,00	1,00	Standart basınç aralığı
Tritonal	1,07	0,96	1,015	5-100

Not : $ka = (kp + ki) / 2$ şeklinde hesaplanmaktadır. Örneğin; $m_{TNETB} = 100 / ((1,36+1,10) / 2) = 81,3 \text{ kg}$

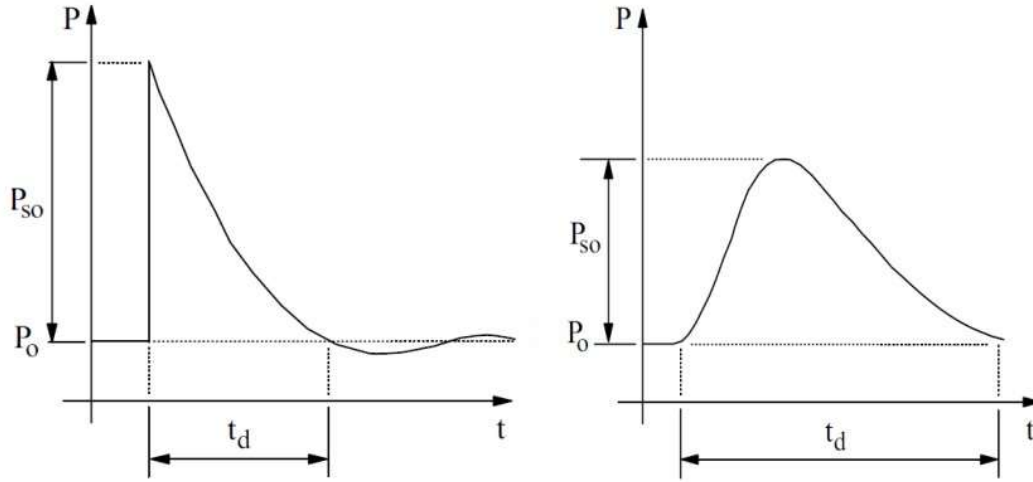
Patlama malzemesinin üretim şeklinin kare, silindir, küre ve yarı-küre olmasına göre etkiside farklıdır. Bu doğrultuda, farklı tipteki patlama malzemesinin şekilleri Şekil 1.1’de verilmiştir [38].



Şekil 1.1 : Patlama malzemesinin farklı üretim şekilleri [38].

1.3 Patlama Dalgası

Süpersonik veya sonik hızda patlama kaynağından dışa doğru her yönde yayılan patlama dalgasının şekli ve büyüklüğü enerjideki boşalmanın doğasına ve patlamanın merkez üssünden uzaklığına bağlıdır. Patlama dalgasının şok ve basınç dalgası olmak üzere iki farklı karakteristik türü vardır ve bunlara ait tipik basınç-zaman eğrileri Şekil 1.2’de verilmiştir [40].



Şekil 1.2 : Patlama dalgasının karakteristik türleri : şok dalgası (sol) ve basınç dalgası (sağ) [40].

Şok dalgasına ait patlama basıncı-zaman eğrisine bakıldığında; bu dalganın ortam atmosferik koşullarının üstündeki değerde, bir anda pik yapıp, sonrasında yüksek sönümlü çevre basınç salınımlarıyla birlikte kademeli olarak ortam basıncı seviyesine düştüğü görülmektedir. Bunun sonucunda, pozitif fazlı patlama dalgasını negatif fazlı basınç dalgasının takip ettiği söylenebilir.

Basınç dalgasına ait patlama basıncı-zaman eğrisine bakıldığında ise; basıncın zamanla artarak pik değere ulaştığını, sonrasında zamanla gerçekleşen basınç düşüşünün meydana geldiği görülmektedir.

Patlama dalgasının temel parametrelerini patlama yükünün binalardaki bileşenleri olarak tanımlamak gereklidir. Bunlar, pozitif faz için maksimum basınç, P_{so} , pozitif fazın süresi, t_d , ilgili pozitif impuls, I_o ; negatif faz için ise maksimum basınç, P_{so}^- , negatif fazın süresi, t_d^- ve ilgili negatif impuls, I_o^- şeklinde tanımlanır [40].

Basınç-zaman eğrilerinin altında kalan alanlar patlamaya ait impuls değerini verecektir.

$$I_o = \int P(t) dt \quad (1.2)$$

Üçgen bir dalga için : $I_o = 0,50 P_{so} t_d$

Yarı sinüs dalga için : $I_o = 0,64 P_{so} t_d$

Üstel sönümlü şok dalgası için : $I_o = c P_{so} t_d$

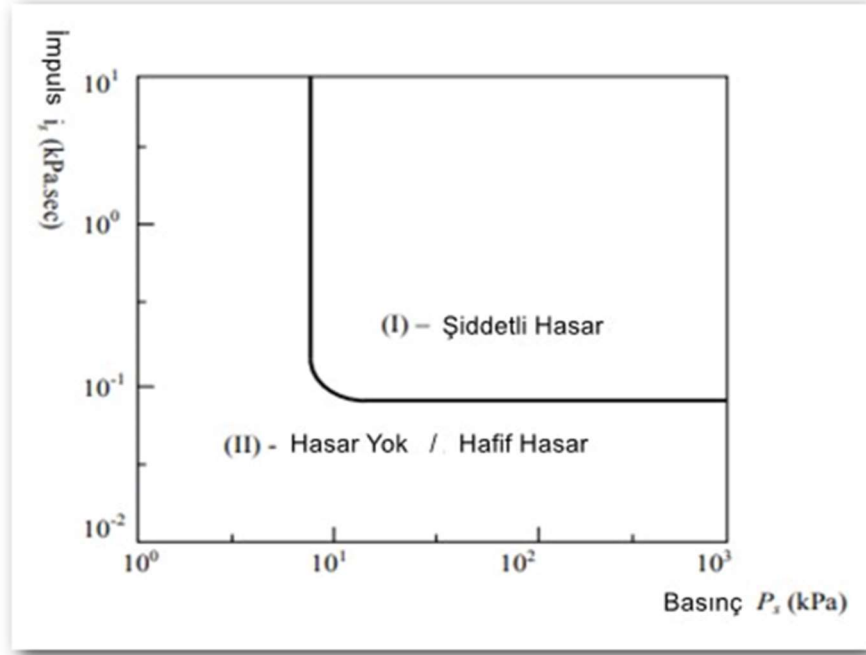
Burada, $P(t)$: aşırı basıncın zamana bağlı olarak değişiminin fonksiyonunu

P_{so} : maksimum yanal aşırı basınç değerini

t_d : pozitif fazın süresini

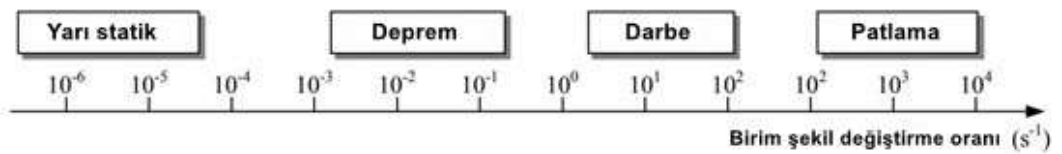
c : P_{so} 'ya bağlı olarak 0,2 ile 0,5 arasında değişen değeri göstermektedir.

Şekil 1.3'de tipik bir basınç-impuls diyagramı (P-I) verilmiştir. Basınç – impuls diyagramı, belirli bir yapısal elemana uygulanan patlama basınçları ve impulsların kombinasyonunu kullanıp, belirli hasar seviyelerini tespit etmek için kullanılır. Diyagrama (Şekil 1.3) bakıldığında; (I) bölgesi ciddi yapısal hasarı belirtirken, (II) bölgesi hasar olmadığını veya az hasar olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.3 : Tipik basınç – impuls eğrisi [42].

Ek olarak, patlama sonucu oluşan patlama dalgalarında $10^2 - 10^5 \text{ s}^{-1}$ aralığında çok yüksek birim şekil değiştirme hızları görülür. Ani ve fazla olan yükleme hızları hedef yapıların dinamik-mekanik özelliklerini ve bazı yapısal elemanlar için ise ön görülen hasar mekanizmasını değiştirir. Bundan dolayı, yükleme hızına insan yaralanmaları konusunda da kritik derecede önem verilmelidir. Şekil 1.4'de farklı yükleme tipleri için birim şekil değiştirme hızının değişken olduğu aralıklar verilmiştir [39].



Şekil 1.4 : Farklı yükleme tipleri için birim şekil değiştirme hızının değişimi [39].

1.3.1 Patlama dalgası parametreleri

Maksimum aşırı basınç, süre ve impulsa ek olarak, bir yapı için patlama yüklerinin belirlenmesine girebilecek diğer patlama dalgası parametreleri şunları içerir :

- Maksimum yansıyan basınç, P_r
- Maksimum dinamik (patlama rüzgarı) basınç, q_0
- Şok yüzey hızı, U
- Patlama dalgası uzunluğu, L_w

Genellikle, bu ikincil parametreler aşağıda tartışıldığı gibi birincil patlama dalgası parametrelerini kullanarak belirlenebilir.

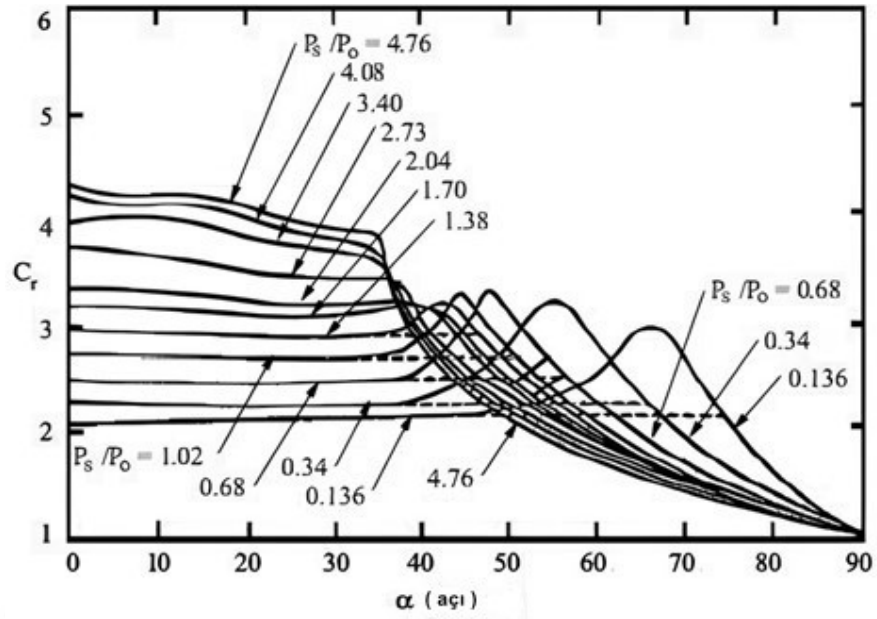
1.3.1.1 Maksimum yansıyan basınç, P_r

Bir açık alan patlamasından kaynaklanan patlama dalgası bir yüzeye çarptığı zaman yansır. Bu yansımanın etkisiyle, yüzey gelen yanal basınç değerinden çok daha fazla bir basıncın etkisi altında kalmaktadır. Yansıyan basıncın büyüklüğü gelen basıncın yükseltici bir oranı olarak belirlenir:

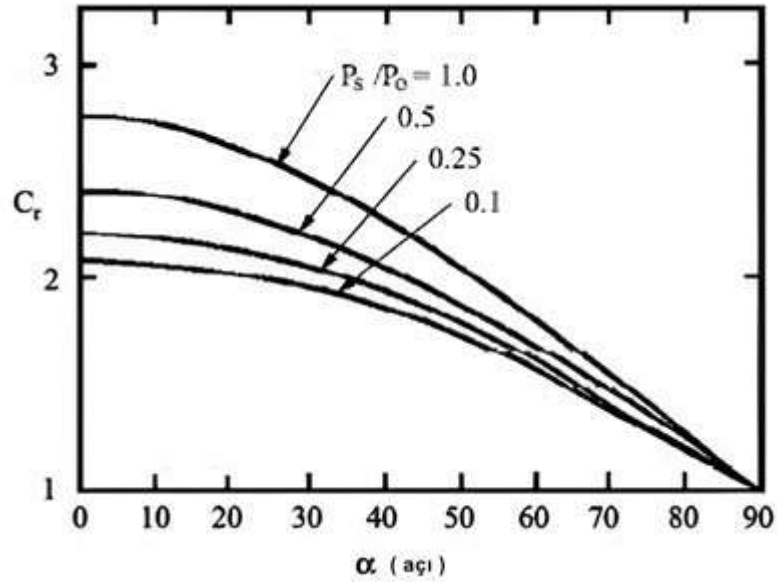
$$P_r = C_r P_{so} \quad (1.3)$$

C_r : yansıma katsayısı

Yansıma katsayısı pik aşırı basınç değerine, dalganın yansıtan yüzeye göre geliş açısına ve patlama dalgasının türüne bağlıdır. Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'daki eğriler, şok ve basınç dalgaları için, 0° ile 90° arasında değişen geliş açıları için ve atmosferik basıncın yaklaşık 5 katına kadar olan maksimum aşırı basınçlar için yansıma katsayılarını (C_r) göstermektedir [41].



Şekil 1.5 : Şok dalgası için yansımaya katsayıları [41].



Şekil 1.6 : Basınç dalgası için yansımaya katsayıları [41].

Çoğu hava patlamasında beklenen aralık olan 20 psi'ye (138 kPa) kadar olan maksimum aşırı basınç değerleri için, Newmark, normal 0° gelişteki patlama dalgası yansımaya katsayısı için aşağıdaki gibi basit bir formül sunmaktadır:

$$C_r = P_r/P_{so} \approx 2 + 0,05P_{so} \quad (P_{so} : [\text{psi}]) \quad (1.4)$$

$$C_r = P_r/P_{so} \approx 2 + 0,0073P_{so} \quad (P_{so} : [\text{kPa}]) \quad (1.5)$$

Yansıyan basıncın süresi ise yansıtan yüzeyin boyutlarına bağlıdır.

1.3.1.2 Dinamik (patlama rüzgarı) basınç, q_o

Patlama dalgası atmosferde yayılırken oluşan hava hareketinden kaynaklanan patlama rüzgar basıncı, hava partiküllerinin hızına, yani patlama dalgasının maksimum aşırı basıncına bağlıdır. Bu patlama etkisini hesaplamak üzere Baker ve UFC 3-340-02 veriler sağlamıştır. Normal atmosferik koşullarda, maksimum dinamik basınç Newmark'ın sunduğu ampirik formülasyon ile elde edilebilir [41]:

$$q_o = 2,5P_{so}^2 / (7P_o + P_{so}) \approx 0,022 P_{so}^2 \text{ (psi)} \quad (1.6)$$

$$q_o = 2,5P_{so}^2 / (7P_o + P_{so}) \approx 0,0032 P_{so}^2 \text{ (kPa)} \quad (1.7)$$

P_o ortamın atmosferik basıncını göstermektedir.

Bir yapı üzerindeki hava sürtünme katsayısı, C_d ile dinamik basıncın çarpımının sonucu net dinamik basıncı verir. Engelleyici yüzeyin yönü ve şekline göre hava sürtünme katsayısı (C_d) değişkendir. Dikdörtgen bir bina için hava sürtünme katsayısı ön duvar için +1,0, yan ve arka duvarlar ve çatı için -0,4 olarak alınabilir [41].

1.3.1.3 Şok yüzey hızı, U

Açık alan patlamasından kaynaklanan patlama dalgaları, yayıldığı ortamda akustik hız veya üzerinde bir hızda hareket eder. Yüksek enerji yayan TNT patlayıcılar için şok yüzey hızına karşı ölçeklendirilmiş mesafe grafikleri UFC 3-340-02'de verilmiştir. Basınç dalgası yayılımı için ise benzer grafikler mevcut değildir. Tasarımda kullanılmak üzere, bir şok dalgasının bir basınç dalgası ile aynı hızda hareket ettiği düşünülebilir. Düşük basınç aralığı ve standart atmosferik koşullar için, havadaki şok/basınç yüzeyi hızları Newmark'ın sunduğu denklemler ile elde edilebilir [41]:

$$U \approx 1130 (1 + 0,058 P_{so})^{0,5} \text{ (ft /s)} \quad (1.8)$$

$$U \approx 345 (1 + 0,0083 P_{so})^{0,5} \text{ (m/s)} \quad (1.9)$$

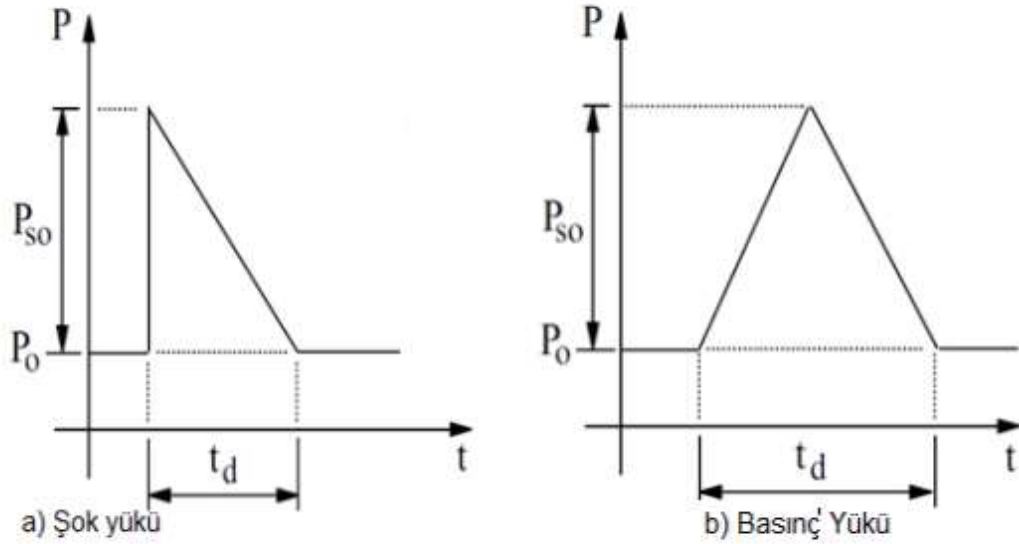
1.3.1.4 Patlama dalgası uzunluğu, L_w

Herhangi bir zaman anında yayılan patlama dalgası, şok/basınç yüzeyi dışarı doğru hareket ederken sınırlı bir radyel mesafe boyunca uzar. Basınç ön tarafta en büyüktür ve patlama dalgası uzunluğu olan L_w mesafesi boyunca ortam basıncına doğru azalım gösterir. Düşük basınç aralığında, patlama dalgasının uzunluğu yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir [41]:

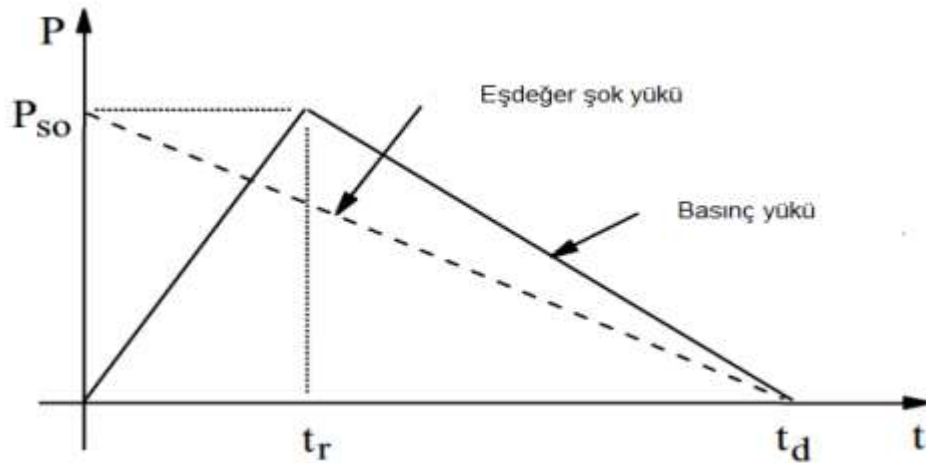
$$L_w \approx U t_d \text{ (m)} \quad (1.10)$$

1.3.1.5 İdealleştirilmiş patlama dalgası parametreleri

Patlamaya dayanıklı tasarım aşamalarını basitleştirmek için Şekil 1.2’de gösterilen genelleştirilmiş patlama dalgası profilleri idealize edilir veya Şekil 1.7’de şok dalgası ve basınç dalgası için gösterildiği gibi doğrusallaştırılır. Ek olarak, eşdeğer şok yüklemesi kullanımı ile bir basınç dalgası hesaplamalar için daha basit hale getirilir. Bunu yaparken basınç dalgasının eşdeğer halinde de aynı maksimum impuls değerine ve maksimum aşırı basınç değerine sahip olmasına dikkat edilir. Bu basitleştirme ile UFC 3-340-02’deki belirli formüller ve tasarım kriterleri kullanılabilir olmaktadır. İlgili basitleştirme Şekil 1.8’de gösterilmektedir. Bu basitleştirilmiş patlama dalgası parametrelerine dayalı olarak bir binanın çeşitli bölümleri üzerindeki patlama yükleri Bölüm 1.4’de ele alınmaktadır.



Şekil 1.7 : İdealleştirilmiş şok ve basınç yükleri [41].



Şekil 1.8 : İdealleştirilmiş eşdeğer basınç yükü [41].

1.4 Yapılarda Patlama Yüğü

UFC 3-340-02 (2008) kriterlerinde belirtildiğı üzere yüksek dereceli bir patlamadan kaynaklı bir yapıya etkiyen patlama yüğü çeşitli faktörlere bağıdır [38]:

- Patlamanın büyüklüğü
- Söz konusu yapıya göre patlamanın yeri (açık veya kapalı alan patlaması).
- Yapının geometrik konfigürasyonu
- Patlamaya ve zemin yüzeyine göre yapının yönelimi (yerin üstünde, aynı hizada veya altında)

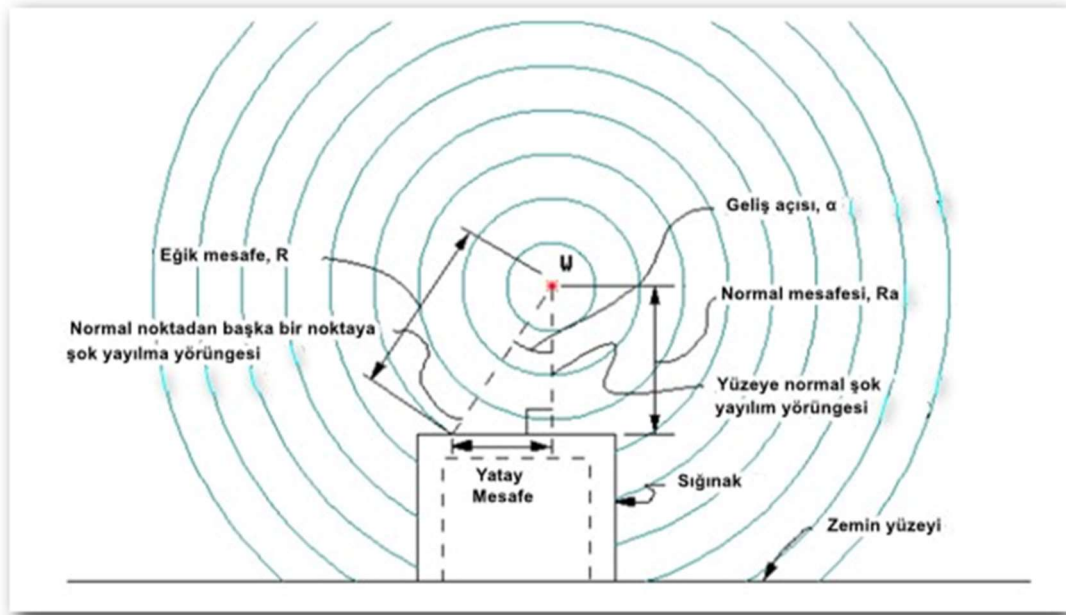
Bu doğrultuda, yapılara etkiyen patlama yükünün incelenmesi, patlamanın kapalı alanda veya açık alanda sınırlandırılmasına bağı olarak kapalı alan patlaması ve açık alan patlaması olarak iki ana gruba ayrılabilir.

1.4.1 Açık alan patlamaları

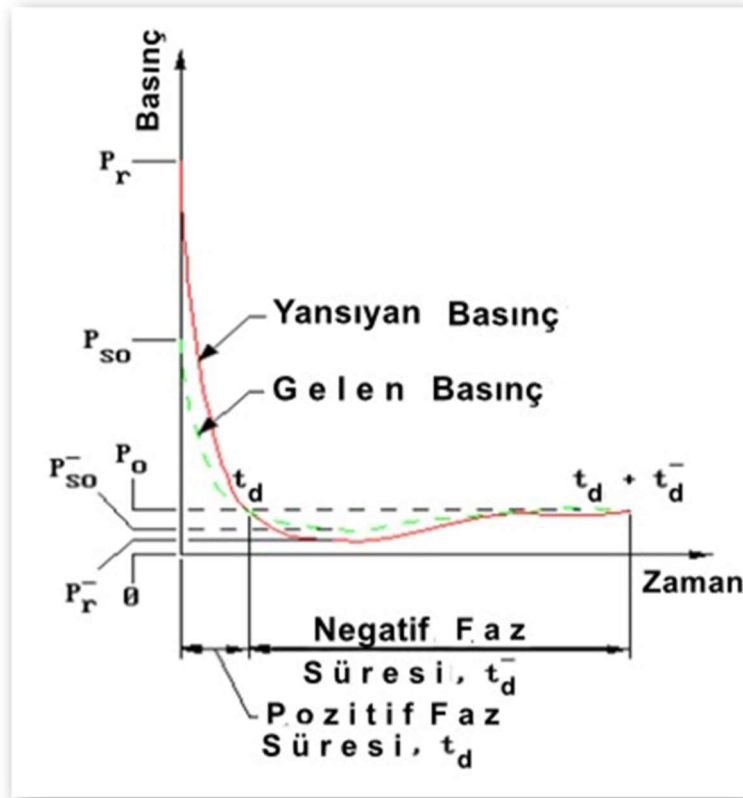
Açık alan patlamaları, serbest hava patlaması, hava patlaması ve yüzey patlaması olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir.

1.4.1.1 Serbest hava patlaması

Bir patlama, bir yapının yanında ve üzerinde meydana geldiğinde, patlayıcı kaynağı ile yapı arasında ilk şok dalgasının amplifikasyonu meydana gelmez, bu durumda yapıya etkiyen patlama yükleri serbest hava patlama basıncından kaynaklanmaktadır (Şekil 1.9). Patlamanın merkezinden radyal olarak uzaklaşan patlama dalgası yapıya çarpar ve çarpma sonrası ilk dalga güçlendirilmiş şekilde yansır (Şekil 1.9). Bu doğrultuda, sonsuz düzlem yansıtıcılar için Şekil 1.10'da verilen yansıyan basınç darbesi tipiktir [38].



Şekil 1.9 : Serbest hava patlaması ortamı [38].



Şekil 1.10 : Serbest hava patlaması için basınç-zaman değişimi [38].

Şekil 1.10'a bakıldığında; P_o ortam basıncını, P_{so} pik basınç değerini, P_{so}^- ise negatif faz için maksimum basınç değerini göstermektedir. Basınç – zaman diyagramı boyunca iki ana fazın gözlemlendiği görülmektedir. Ortam basıncının üstündeki bölgedeki süre patlamanın pozitif fazını belirtmekte iken, ortam basıncı altındaki

bölgedeki süre patlamada negatif fazı ifade etmektedir. Negatif faz süresinin pozitif faz süresinden daha uzun süreli ve daha düşük şiddetli olduğu da görülmektedir.

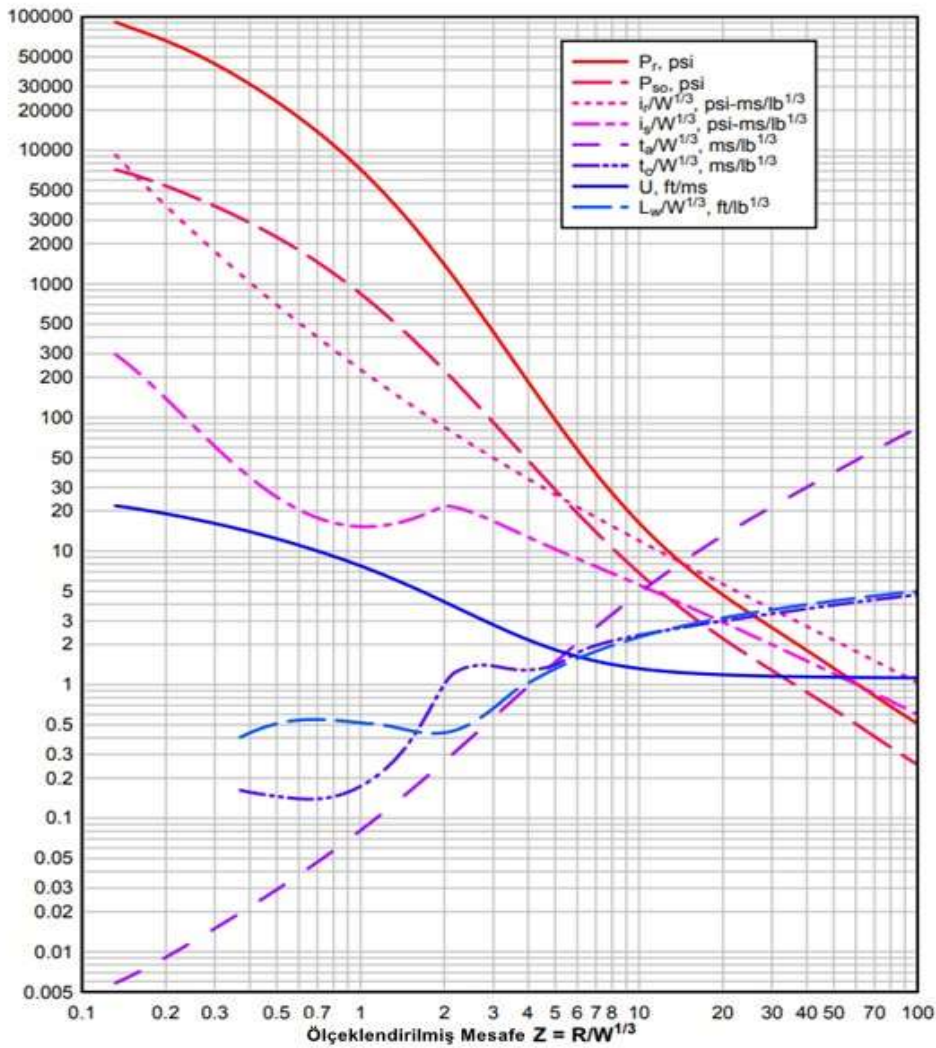
Yapı üzerindeki pik basınç ve impuls değerleri, R normal mesafesi (patlayıcı ile olan uzaklık) ile değişkenlik gösterir. Küresel bir TNT patlaması için bu şok ortamının pozitif faz basınçları, impulsları, süre ve diğer parametreleri ölçeklendirilmiş mesafeye göre değişkenlik gösterir (Şekil 1.11).

$$Z = R / W^{1/3} \quad (1.11)$$

Z : Ölçeklendirilmiş mesafe (ft / lb^{1/3} ; m / kg^{1/3})

R : Patlayıcıya olan uzaklık (ft ; m)

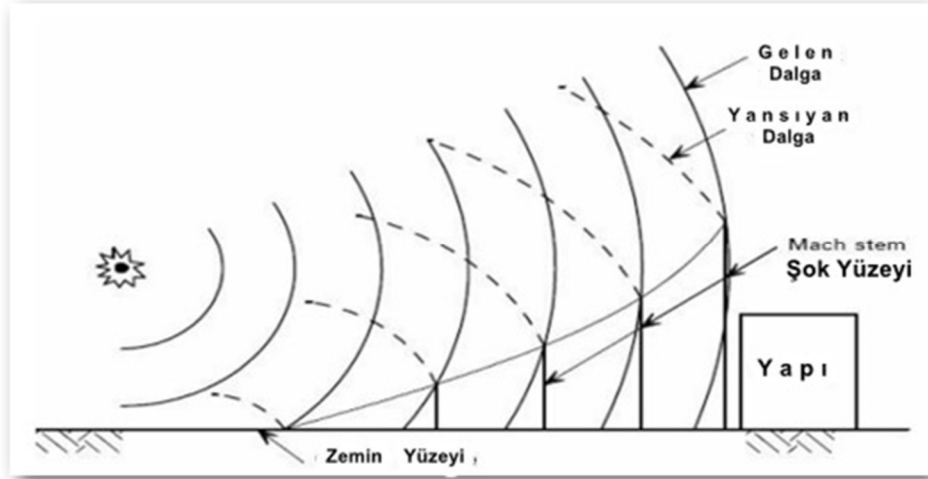
W : Patlayıcının TNT eşlenik ağırlığı (lb ; kg)



Şekil 1.11 : Deniz seviyesinde serbest havada küresel TNT Patlaması için pozitif fazlı şok dalgası parametreleri [38].

1.4.1.2 Hava patlaması

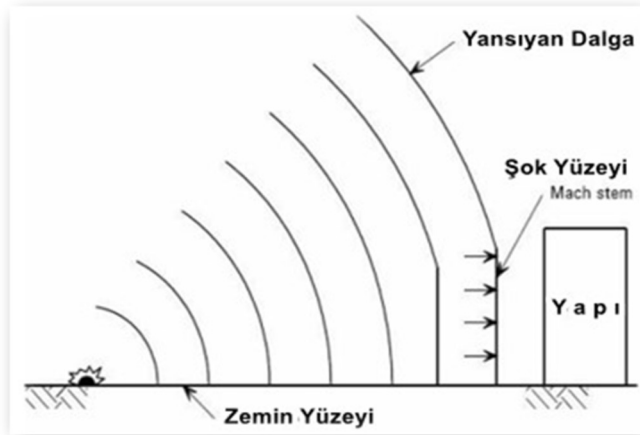
Zemin yüzeyinin üzerinde ve yapıdan uzakta meydana gelen patlamalar tarafından hava patlaması ortamı oluşur. Patlama sonucu ilk şok dalgası yapıya varmadan önce zemin yüzeyine çarpar. Şok dalgası zemin yüzeyi boyunca dışarıya doğru yayılmaya devam ederken, ilk dalga (gelen dalga) ve yansıyan dalganın etkileşimiyle ‘Mach stem’ adı verilen (şok yüzeyi) bir cephe oluşur (Şekil 1.12) [38].



Şekil 1.12 : Hava patlaması [38].

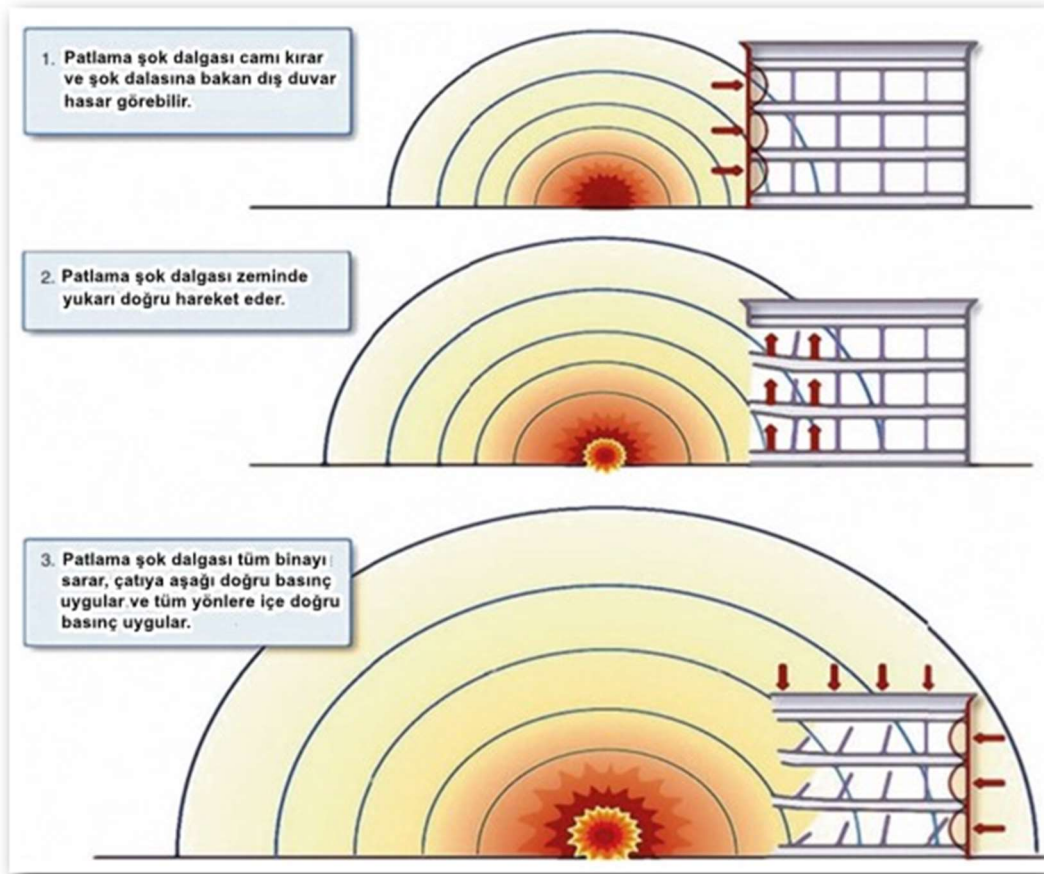
1.4.1.3 Yüzey patlaması

Yere çok yakın veya yerde olan patlama tipine yüzey patlaması denir. Yansıyan dalga ve gelen dalga patlama noktasında birleşip, hava patlamasının şok yüzeyine (Mach stem) benzer nitelikte, fakat yarım küre şeklinde tek bir patlama dalgası oluşturur (Şekil 1.13) [38].



Şekil 1.13 : Yüzey patlaması [38].

Bir yapıdan belirli bir mesafe uzakta yerde bir patlayıcı patladığında, dışa doğru yayılan güçlü bir şok dalgası oluşacaktır. Bu noktada, şok dalgası ilk olarak yapının patlama yönüne bakan tarafına varır. Zeminin yansıması havada olan engelsiz bir patlamaya kıyasla şok dalgasının gücünü artıracaktır. Şok dalgasının yükünün yapının patlama yükü yüzeyine etkisi, duvar yüzeyi ve taşıyıcı yapı üzerinde bir itme kuvveti oluşturur. Şok dalgası binanın duvar yüzeyinde hasara sebebiyet verip, camları kırabilir. Karmaşık bir şok dalgası dizisi binanın içine girip, yansıma ve kırılmaya maruz kalacaktır. Fakat şok dalgası iç mekana girdiğinde, genel etki olarak çatı ve zemin üzerinde yukarı doğru itme kuvveti oluşturur. Patlama dalgası tüm binayı sardığında, çatı aşağı doğru basıncı taşımak zorunda kalırken, binanın dört duvarı ve taşıyıcı yapısı içe doğru basınçla başa çıkmak zorunda kalacaktır (Şekil 1.14). Genel olarak, patlama dalgası yapısal bileşenlerde lokal zorlanmalara neden olacaktır ve bu tür lokal zorlanmalar tüm binanın çökmesine yol açmadığı sürece kabul edilebilir [60].



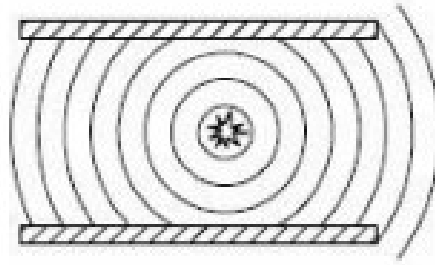
Şekil 1.14 : Yer patlamasının şok dalgalarının binalar üzerindeki etkisi [60].

1.4.2 Kapalı alan patlamaları

Kapalı alan patlamaları ise tamamen havalandırmalı, kısmen havalandırmalı ve tamamen kapalı alan patlamaları olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir.

1.4.2.1 Tamamen havalandırmalı patlama

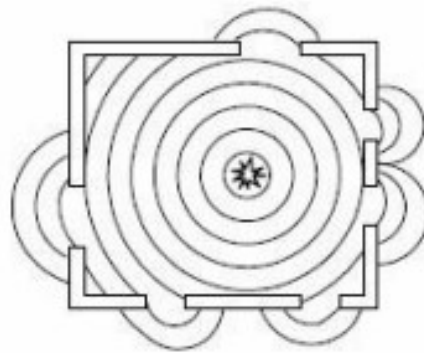
Bu tür bir patlama, patlayıcıların bir veya daha fazla yüzeyinin atmosfere açık olan bariyer veya kabin tipi bir yapının içine veya hemen bitişiğine yerleştirilmesiyle meydana gelir (Şekil 1.15). Yapı tarafından yansıtılan patlama dalgası tamamen atmosfere atılır ve yapıdan uzağa yayılan bir şok dalgası oluşturur.



Şekil 1.15 : Tamamen havalandırmalı patlama [39].

1.4.2.2 Kısmen havalandırmalı patlama

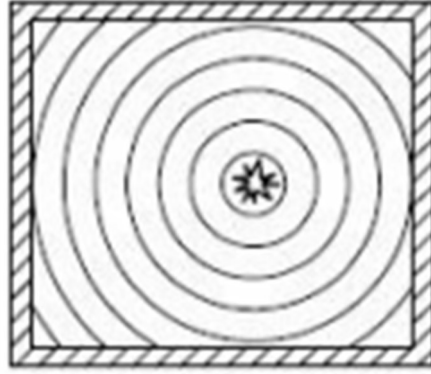
Patlamanın sınırlı boyutlarda açıklıkları olan bariyer veya kabin tipi bir yapı içinde meydana geldiği patlama türüdür (Şekil 1.16). Yapının hem kırılabilen hemde kırılmayan kısımları tarafından amplifike edilen dalga sonlu bir süre sonra atmosfere atılır.



Şekil 1.16 : Kısmen havalandırmalı patlama [39].

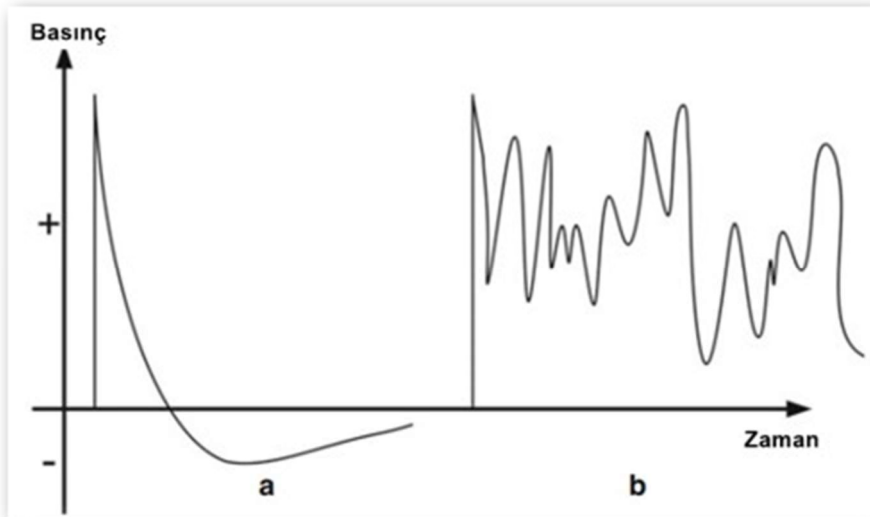
1.4.2.3 Tamamen kapalı alan patlaması

Tamamen kapalı alan patlaması ise isminden de anlaşılacağı üzere, patlamanın bir hücre yapısı tarafından tamamen sınırlandırılması durumunda meydana gelen patlamadır (Şekil 1.17). Havalandırılmamış şok yükleri ve çok uzun süreli gaz basınçlarından kaynaklı iç patlama yükleri oluşacaktır [39].



Şekil 1.17 : Tamamen kapalı alan patlaması [39].

Basit bir açık (serbest) alan patlamasına ve kapalı alan patlamasına ait tipik basınç dalgası formları ise Şekil 1.18’de verilmiştir. Basınç zaman geçmişlerine bakıldığında, patlama dalgası kapalı alan patlamasında uzun süreler boyunca büyük basınçların olduğu bir ortam yaratarak kazazedeye daha fazla enerji aktarımına olanak tanır ve bunun da patlamanın ölümcüllüğünü artırdığı söylenebilir [49].



Şekil 1.18 : Basit bir açık/serbest alan patlaması (a) ve bir kapalı alan patlamasının (b) basınç dalgası formu [49].

Çizelge 1.2’de ise TNO Yeşil Kitabında verilen patlama direnci verileri mevcuttur. Tabloya bakıldığında; farklı türdeki hasarlara neden olan patlamalarda aşırı basınç değerlerinin psi ve kPa cinsinden verildiği görülebilir [41].

Çizelge 1.2 : Ekipman, diğer yapılar ve altyapıdaki patlama hasarına ilişkin aşırı basınç değerleri (TNO Yeşil Kitap) [41].

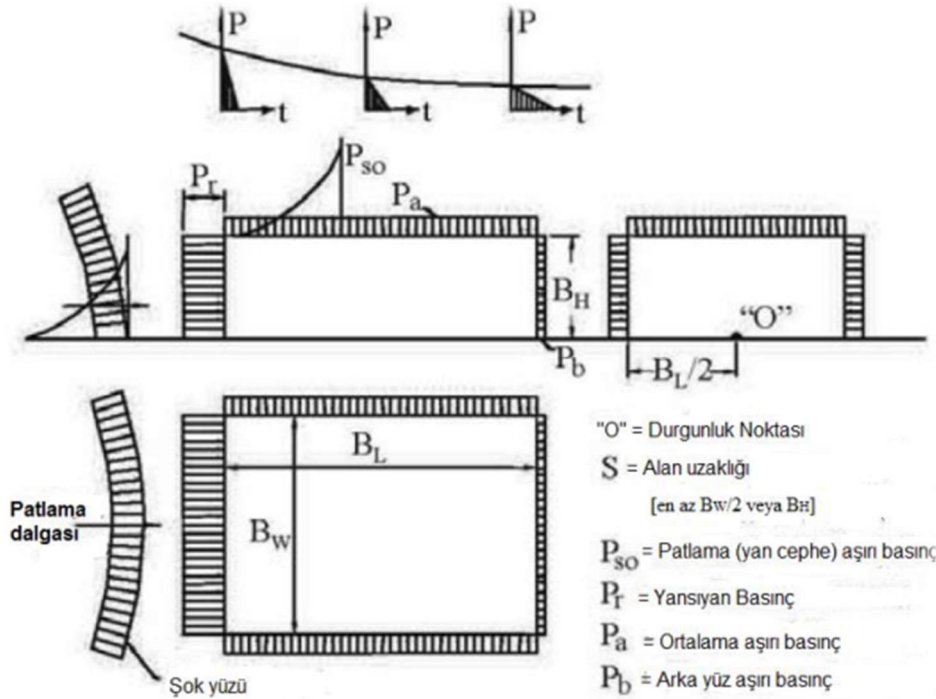
Hasar Açıklaması	Aşırı Basınç	
	psi	kPa
Depolama tankının çatısının çökmesi	1,0	7
Yuvarlak bir depolama tankının destekleyici yapısının çökmesi	14,5	100
Boş yağ depolama tanklarında çatlama	2,9 - 4,4	20 - 30
Silindirik bir depolama tankının yer değiştirmesi, bağlantı borularının çatlaması	7,3 - 14,5	50 -100
Kolonda kırılma hasarı	5,1 - 11,6	35 - 80
Boru sisteminde hafif deformasyonlar	2,9 - 4,4	20 - 30
Boru sisteminin bozulması, boruların kırılması	5,1 - 5,8	35 - 40
Boru sisteminin çökmesi	5,8 - 8,0	40 - 55
Otomobil ve kamyonların içe doğru bastırılmış kaplaması	5,1	35
Ahşap telefon direklerinin kırılması	5,1	35
Yüklü tren vagonlarının ters çevrilmesi	7,3	50
Büyük ağaçların devrilmesi	2,9 - 5,8	20 - 40

Patlamaya dayanıklı bir bina tasarımı için, tasarım mühendisi patlama anında yayılan patlama dalgasının bina ile olan etkileşimini anlamalı ve binanın bütününe ve duvar, çatı, çerçeve gibi her bir yapısal bileşene gelen yükleri, genellikle yapı sahibi tarafından sağlanan serbest alan patlama aşırı basıncına göre belirlemelidir.

Yapılar patlama dalgasına maruz kaldıklarında, sürtünme kuvvetleri ve patlama dalgasının aşırı basıncı tarafından yüklenirler. Yapı ile patlama dalgası arasında oldukça karmaşık bir etkileşim vardır. Ortaya çıkan patlama yükü, tasarım amacıyla, Bölüm 1.3.1.5’de tartışılan idealize edilmiş şok dalgasına dayalı olarak Şekil 1.19’da gösterildiği gibi basitleştirilebilir. Şekil 1.19’daki patlama dalgası yatay olarak soldan sağa doğru ilerlerken gösterilmiştir. Ancak, potansiyel patlama tehlikeleri konuma bağlı olarak değişmekte olup, patlama dalgası binaya herhangi bir yönden çarpabilir [41].

Bina ve bileşenleri negatif basınç (P_{so^-}), yanal aşırı basınç (P_{so}) ve yansıyan aşırı basınç (P_r) gibi çeşitli patlama etkileri kombinasyonlarına maruz kalacaktır. Yapı sahibinin belirlediği yanal aşırı basınç değeri ve süreye dayanarak, kapalı dikdörtgen şeklindeki

bir bina ve binanın bileşenleri için aşağıda gösterildiği gibi maruz kalınan patlama yükleri belirlenebilir [41].



Şekil 1.19 : Dikdörtgen bir binada patlama yükünün genel dağılımı [40,41].

1.4.3 Ön duvar yüklemesi

Yansıyan aşırı basınç patlama kaynağına bakan duvarlara etki edecektir. Yandan gelen aşırı basınç pulsunun yükselme süresi (t_r) ve geliş açısı (α) patlama dalgasının yansıyan aşırı basınç (P_r) amplifikasyonunu etkiler. Normal şok dalgası yansıma koşulları için tasarım patlama senaryosu aksini gerektirmedikçe $t_r = 0$ ve $\alpha = 0$ alınmalıdır. Yansıyan aşırı basınç, aşağıda tanımlandığı ve Şekil 1.20’de gösterildiği gibi yansıyan aşırı basınç etkisinin süresi (t_c) içinde durgunluk basıncına (P_s) düşer.

$$P_s = P_{so} + C_d q_0 \quad (1.12)$$

$$t_c = (3S / U) < t_d \quad (1.13)$$

S : B_H ve $B_W/2$ değerlerinden küçük olanını

B_H : bina yüksekliğini

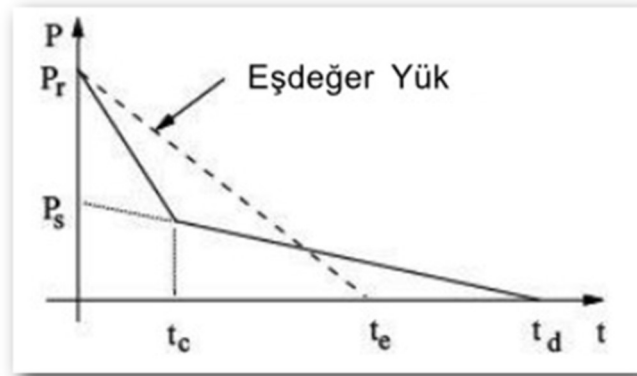
B_L : bina uzunluğunu

B_W : bina genişliğini göstermektedir.

Denklem 1.13’de belirtildiği üzere, serbest alan pozitif aşırı basıncının süresi (t_d) yansıyan aşırı basınç etkisinin süresinden (t_c) fazla olacaktır.

Şekil 1.20’de gösterilen bilineer basınç-zaman eğrisi üçgen şekilli, yüke dayalı dinamik tepki grafiklerini kullanmak için eşdeğer bir üçgen basınç-zaman geçmişi olacak şekilde basitleştirilebilir. Bu eşdeğer yük, aynı tepe basıncının (P_r) kullanılması ve her yük şekli için impulsun eşitlenmesi yoluyla hesaplanır. Bilineer basınç-zaman eğrisi altındaki impuls, I_w denklem 1.14 ile hesaplanabilir [41]:

$$I_w = 0,5 (P_r - P_s) t_c + 0,5 P_s t_d \quad (1.14)$$



Şekil 1.20 : Ön duvar yüklemesi eşdeğer yük diyagramı [41].

1.4.4 Yan duvar yüklemesi

Şekil 1.19’da gösterildiği gibi, yan duvarlar patlama kaynağına göre tanımlanır. Bu duvarlar, aşırı basınç yansımasının olmaması ve patlama dalgasının patlama kaynağından uzaklaştıkça zayıflaması nedeniyle ön duvarlara göre daha az patlama yüküne maruz kalacaktır. Yan duvar patlama yüklemesine ait genel basınç-zaman diyagramı Şekil 1.21’de gösterilmektedir.

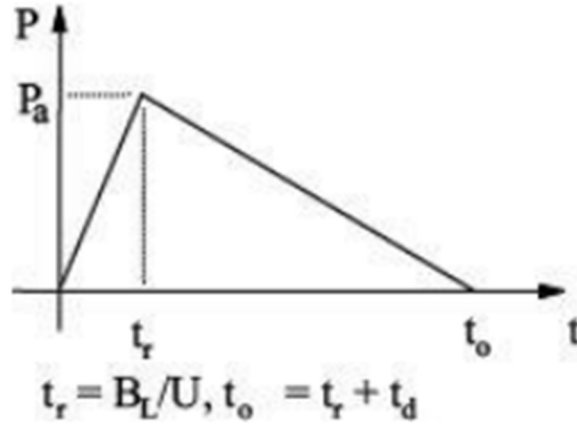
Maksimum yanal aşırı basınç hem mesafeye hem de zamana göre değişeceği için bir patlama dalgası yapısal bir elemanın uzunluğu boyunca ilerlerken eşit olarak uygulanmayacaktır. Bir azaltma faktörü olan C_e ise tasarım sırasında bu etkiyi hesaba katmak için kullanılmaktadır. Yapısal elemanın patlama dalgasının hareketi yönündeki uzunluğu (L_1) C_e için seçilecek değerleri değiştirecek olup, ilgili değerler Şekil 1.22’ye göre belirlenecektir.

Yan duvarlar için etkin yanal aşırı basıncı veren denklem ise aşağıdaki gibidir:

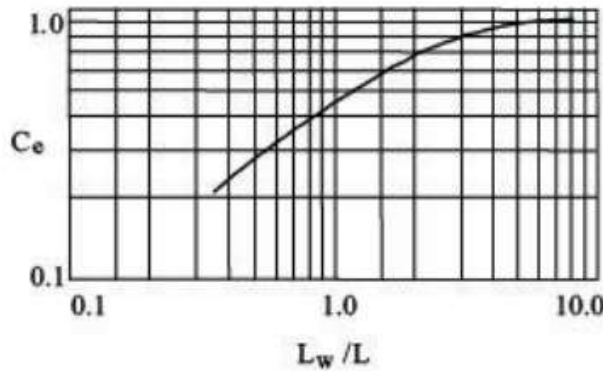
$$P_a = C_e P_{so} + C_d q_o \quad (1.15)$$

P_a etkin yanal aşırı basınç değerini göstermektedir.

Yan duvar yükü, patlama dalgasının dikkate alınan eleman boyunca ilerlemesi için geçen süreye eşit bir yükselme (basıncın pik değere ulaşması) süresine sahiptir. Toplam süre ise bu yükselme süresi ile serbest alan yanal aşırı basıncının süresinin toplamına eşittir (Şekil 1.21).



Şekil 1.21 : Yan duvar yüklemesi basınç-zaman diyagramı [41].



Şekil 1.22 : Azaltma faktörünün (C_e) belirlenmesi [41].

1.4.5 Çatı yüklemesi

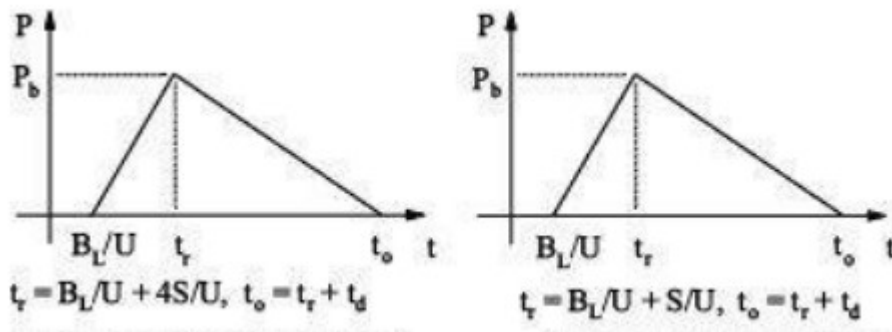
Patlama dalgası yatay olarak ilerlerken 10° 'den az eğimli, düz çatıya sahip bir bina için normalde yansımanın meydana gelmediği kabul edilir. Sonuç olarak çatı, yan duvarlarda olduğu gibi dinamik rüzgar basıncı ile birlikte yanal aşırı basınca maruz kalacaktır. Çatı üzerindeki dinamik rüzgar kuvveti aşırı basıncın tersi yönde (yukarı doğru) hareket eder. Ayrıca, patlama dalgasının bir çatı elemanı boyunca ilerlerken mesafe ve zamanla değişimi de dikkate alınmalıdır. Şekil 1.21'de gösterildiği gibi, patlama dalgasının yönüne göre yönelimi ve patlama dalgası uzunluğunun çatı elemanının açıklığına oranı ortaya çıkan çatı yükünü etkilemektedir. Yan duvara

benzer şekilde, çatı elemanları için etkin maksimum aşırı basınç denklem 1.15 kullanılarak hesaplanır [41].

1.4.6 Arka duvar yüklemesi

Ön duvar yüküne zıt yönde olan ve normalde sadece net toplam çerçeve yükünü hesaplamak için kullanılan arka duvar yükünün hesaplamalarda yer alması genel yanal patlama kuvvetini azaltacaktır. Arka duvar etkileri herhangi bir yönden patlama yükünün gelebileceği binalar için çoğu zaman ihmal edilir.

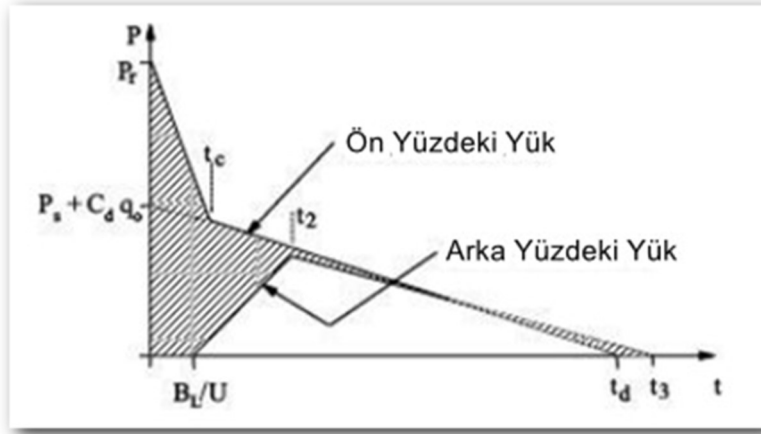
Arka duvar yükünün zamanla değişimi yan ve çatı yüklerine benzerdir, ancak yükselme zamanı ve süresi, çatı ve yan duvarlardan ve zemin yansıma etkilerinden kaynaklanan ve iyi anlaşılmayan bir yayılma modelinden etkilenir. Arka duvar patlama yükü, patlama dalgasının binanın B_L uzunluğunu kat etme süresi olan B_L / U kadar ön duvar yüküne göre gecikir (Şekil 1.23). Yan duvarlar için olan formülasyona benzer şekilde, etkin maksimum aşırı basınç da denklem 1.15 kullanılarak hesaplanır [41]. (P_a yerine arka duvar maksimum aşırı basıncını belirtmek için normalde P_b kullanılır.)



Şekil 1.23 : Arka duvar yüklemesi (TNO Yeşil Kitap (Sol) / UFC 3-340-02 (Sağ)) [41].

1.4.7 Çerçeve yüklemesi

Çatı yüklemesine ek olarak, binanın çerçeve sistemi, zaman aşamasını dikkate alarak ön ve arka duvarlardaki net yükleme olan fazla kırılma yüklemesine maruz kalacaktır. Yapısal çerçeve sistemi patlama dalgasının binanın önünden arkasına doğru ilerlerken geçen süre olan B_L / U süresi boyunca ön duvarda büyük yatay dengesiz basınca maruz kalacaktır. Bu zamandan sonra, arka duvar yükü ön duvar yükünü kısmen dengeleyecektir. Şekil 1.24'de yanal çerçeve yüklemesinin genel hali verilmiştir [41].



Şekil 1.24 : Dikdörtgen bir bina üzerindeki net yanıl yük [41].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Patlama yaralanmalarının insan vücuduna ve yapılara etkisi hakkında literatür çalışmaları yaygın olarak yapılmamasına rağmen, aktif olarak yapılmaktadır. Patlama durumunda oluşan darbe yükü göz önüne alınarak, bu impulsun yapılara ve insan vücudu üzerinde etkisi güncel olarak incelenmektedir. Patlama durumunda insan vücudunun davranışı ve tepkisi ile ilgili çeşitli sonuçların alındığı bazı çalışmalardan elde edilen sonuçlar yayınlanmıştır.

2.1 Patlamanın İnsan Vücuduna Etkileri

Patlamalar doğası gereği çok sayıda bileşenin zarar görmesine neden olur. Patlayıcının türüne, patlama dalgasının yönüne, şarapnelin varlığına ve dördüncül yaralanmaların etkisine bağlı olarak farklı sonuçlar meydana gelebilir [3]. Büyük patlamaların kritik yaralanmalarla birlikte politravmaya yol açtığı göz önünde bulundurulduğunda, patlama yaralanmalı hastaların değerlendirilmesi sistematik olmalıdır. Terörist bombalamalarının 3000'den fazla kurbanı üzerinde yapılan bir incelemede, patlamalardan kaynaklanan potansiyel yaralanmaların ciddiyetine işaret edecek şekilde, ani ölüm oranı %13 ve hayatta kalanlar için de hastaneye yatış oranı %30 olarak bulunmuştur [9]. Bu bağlamda, sıradaki başlıklarda patlamadan dolayı insan vücudunun farklı bölümlerinin tepkileri ve yaralanması ile ilgili bilgiler verilecektir.

2.1.1 Beyin

Travmatik beyin hasarı (TBH) veya kafa travması olarak bilinen yaralanma türü birincil patlama dalgasından kaynaklanan kinetik enerjinin beyin üzerindeki etkisinin sonucudur [8]. Genellikle patlama dalgasına ek olarak künt bir kuvvet (blunt force) de yaralanmayı karmaşık hale getirebilir.

Patlama, ikincil yaralanmaların delici etkisi veya üçüncül yaralanmaların neden olduğu kapalı kafa yaralanmaları ile beyni daha da fazla etkileyebilir. Patlama durumunda penetran kafa yaralanmasına ait spesifik ölüm oranı bilinmemektedir. Fakat, bir çatışmada ateşli silah yaralanması sonucu penetran kafa yaralanması olan hastaların %62'sinin ilk 48 saat içinde öldüğü belirtilmiştir [10].

TBH'ler tipik olarak birincil ve ikincil yaralanma fazları olarak sınıflandırılır. Birincil faz, kuvvetin intrakraniyal içeriğe aktarımından kaynaklanan doğrudan hasardır [11].

Patlama yaralanmalarında bu hasarın, patlama dalgasının beyin dokusu üzerindeki kesme, germe ve/veya açılmalardan mı yoksa patlama dalgasının enfarktüse yol açan gaz embolilerine neden olmasından mı kaynaklandığı belirsizdir [12]. Bu durum, serebral ödem, serebral kontüzyon, ekstra-eksenel hematomlar ve difüz aksonal hasarların kombinasyonunu içerebilir [13]. İkincil yaralanma fazı ise, ilk temas anında başlayan ve saatler veya günler boyunca devam eden bir dizi moleküler mekanizmayı içerir [11,13]. İlk yaralanmaya yanıt olarak ortaya çıkan gecikmiş fizyolojik olayları da içerdği için çok faktörlü bir fazdır.

Bir patlama yaralanmasında beyin hasarının hafif, orta veya yüksek şiddetli beyin hasarı olduğuna karar vermek için Glasgow Koma Skalası (GKS) ile değerlendirme yapılabilir [13]. Çizelge 2.1’de Glasgow Koma Skalası ölçütleri ve puanlama sistemine ait bilgiler görülebilir. Ölçütler sonucunda elde edilecek puanın 13-15 olması durumunda hafif şiddetli beyin hasarı, 9-12 olması durumunda orta şiddetli beyin hasarı, 3-8 puan olması durumunda ise yüksek şiddetli beyin hasarı olarak nitelendirilebilir.

Çizelge 2.1 : Glasgow Koma Skalası (GKS) ölçütleri ve puanlama sistemi [14].

GLASKOW KOMA SKALASI (GKS)		
ORGAN	YANIT	PUAN
GÖZLER	Spontan açık	4 Puan
	Sözel uyarana açar	3 Puan
	Ağrılı uyarana açar	2 Puan
	Cevapsız	1 Puan
SÖZEL CEVAP	Oryante	5 Puan
	Karışık konuşma ama cevap verebilir	4 Puan
	Anlamsız kelimeler ve yanıtlar	3 Puan
	Anlaşılmaz sesler	2 Puan
	Cevapsız	1 Puan
MOTOR CEVAP	Emirlere uyar	6 Puan
	Ağrıyı lokalize eder	5 Puan
	Ağrıya fleksör cevap	4 Puan
	Anormal fleksör cevap	3 Puan
	Ağrıya ekstansör cevap	2 Puan
	Cevapsız	1 Puan

Baş ağrısı, nöbet, baş dönmesi, hafıza kaybı, halsizlik, uyuşma ve konsantrasyon güçlüğü TBH’nin ek belirtileri ve semptomları arasında yer almaktadır [13].

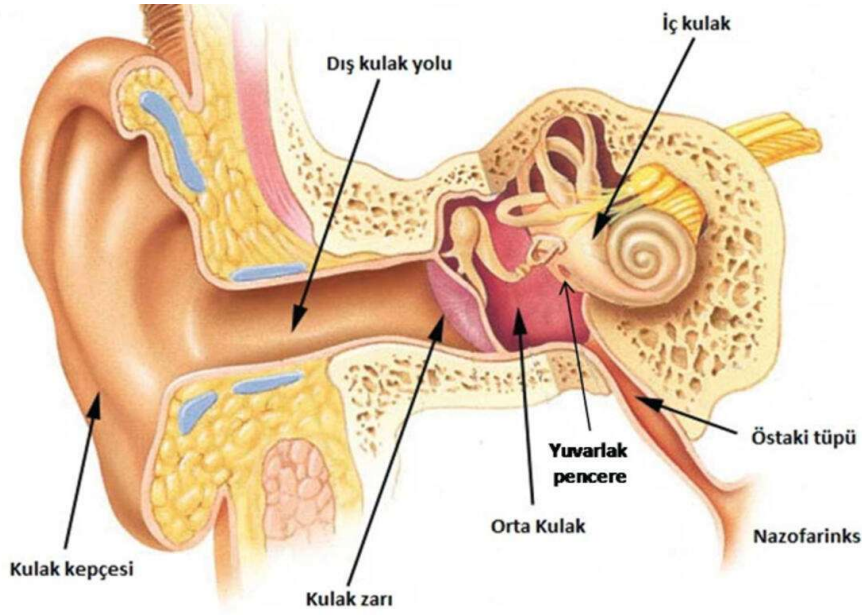
Beyin sarsıntısından intrakraniyal kanamaya ve şiddetli TBH'ye (GKS<9) kadar olan bir beyin hasarına birincil patlama dalgasıyla olan temas sebebiyet verebilir. Patlamalardan kaynaklanan hafif TBH, travma sonrası stres bozukluğu ile ilişkilendirilmiştir, ancak kesin mekanizma tam olarak anlaşılamamıştır [8,15].

Kan dolaşımının düzeni ve doku sıvılarının niteliğine bağlı olan hemodinamiğin optimizasyonu ve serebral perfüzyonun (kanın beyin içerisine akışı) sağlanmasından sonra, TBH'nin derecesini belirlemek için nörolojik muayene (kraniyel sinirler, duyuşal) ve mental durumun değerlendirilmesi gereklidir. Endişe verici semptomlar kaydedilmesi durumunda, başın bilgisayarlı tomografisi (BT) gibi ek görüntüleme gereklidir. BT görüntülemesi TBH belirtilerini (serebral kanama, ödem, kafatası kırığı) tespit edebilirken, patlama yaralanması sonrası TBH geçirenlerin yarısına kadarının ilk BT'sinde önemli bir bulgu yoktur [16].

Patlamadan kaynaklı TBH olan hastalar ile normal durumda TBH olan hastaların tedavisi arasında önemli bir fark yoktur [11]. Hafif TBH'li hastalar (GKS=13~15 puan) için gözlem, anormal BT bulguları veya nöbetleri olanlar için ise hastaneye yatış önerilmektedir [11,17]. Hiperkarbi, hipoksi, hipotansiyon, hipoglisemi ve hipotermiden kaçınılmalıdır. Travma sonrası hipoksi ve hipotansiyondan kaynaklanan ikincil hasarın boyutunu sınırlamak, cerrahi endikasyonu olmayan şiddetli ve orta TBH'lerde birincil amaçtır. Bunu yapabilmek için de hastayı övolemik tutmak gerekir [11].

2.1.2 İşitsel sistem

İşitme sistemi genellikle birincil patlama dalgasından etkilenir. Kulak zarı gelen basınç farkından dolayı kolayca gerilebilir ve diğer organlara zarar vermek için gerekenden çok daha az olan basınçlarda (<0,5 atm) delinebilir [18]. Kulak zarının yerinin de görülebileceği tipik kulak anatomisi Şekil 2.1'de verilmiştir [19].



Şekil 2.1 : Kulak anatomisi [19].

İlk travma değerlendirmeleri sırasında, patlamaya maruz kalan tüm hastalara özellikle kulak çınlaması ve işitme kaybı sorulmalıdır. Patlama dalgasından kaynaklanan kulak zarı yırtılması için düşük eşik göz önüne alındığında, tüm patlama yaralanması hastalarına rutin otoskopi yapılması önerilmektedir [20].

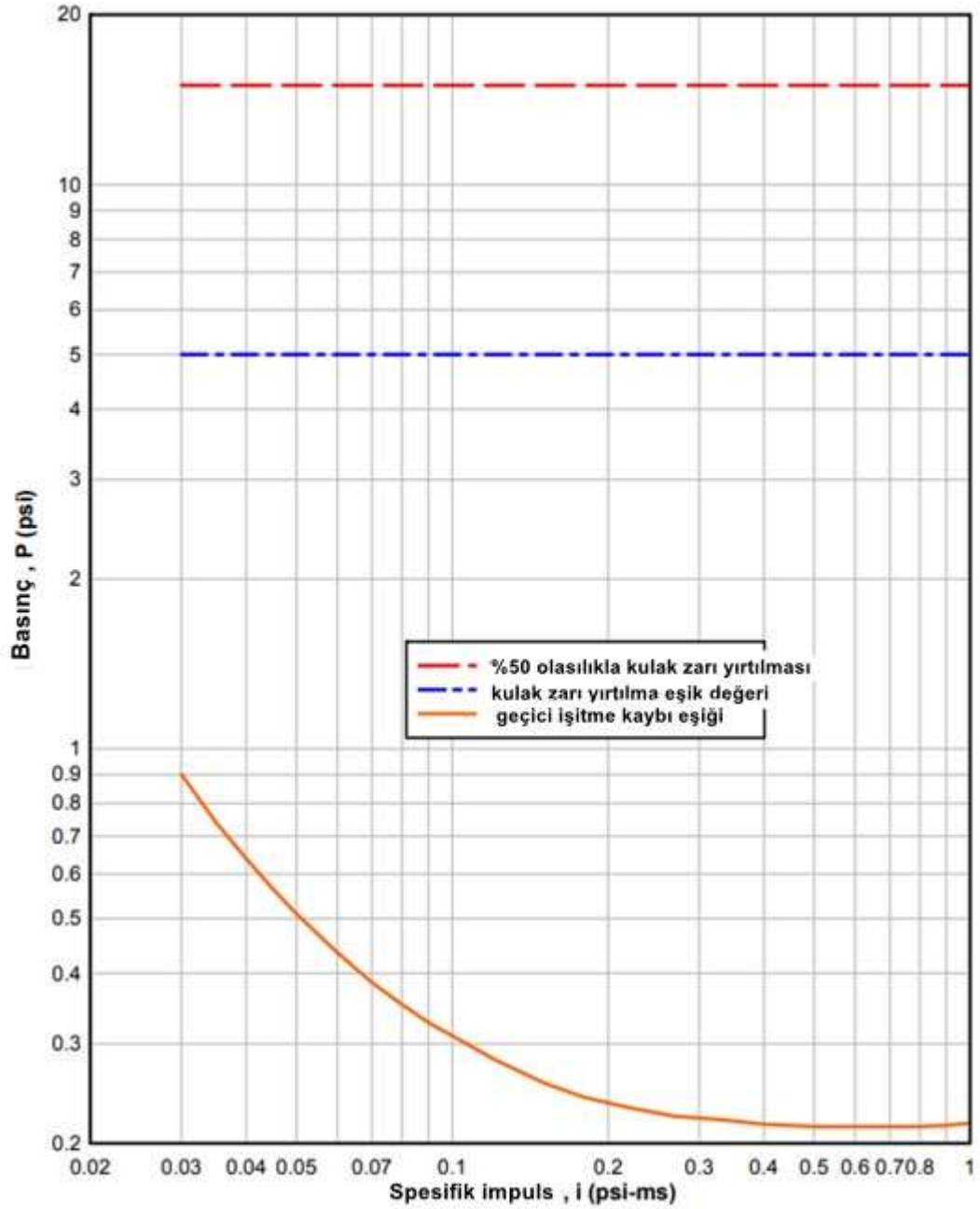
Kulak zarı yırtılmasının yönetimi esas olarak konservatiftir ve basınç farkından meydana gelen ek hastalıkların azaltılmasını içerir.

Uzun vadeli iyileşme için gürültünün azaltılmasıyla daha fazla işitsel hasarın önlenmesi önemlidir. İsrail’de 433 asker üzerinde yapılan bir çalışmada, gürültülü birimlerde kalanlara kıyasla daha sessiz birimlere taşınan işitsel hasarlı askerlerin işitmelerinde 3 kattan fazla iyileşme görülmüştür [21].

Hemodinamik olarak stabil olan, akciğer grafisinde bir belirti olmayan, kulak-burun-boğaz takibi yapılan ve 4-6 saatlik bir gözlem süresinden sonra patlama yaralanmasına dair ek semptom veya bulgusu olmayan ama kulak zarı yaralanması olan kişilerin çoğu herhangi bir müdahale olmaksızın iyileşme gösterirler, ancak bu kişilerin %30 kadarında bir dereceye kadar kalıcı işitme kaybı gelişir [22,23]. Kulak zarı yaralanması olan veya olmayan patlama mağdurlarında baş dönmesi, vertigo ve işitme sinirlerinin hasarından meydana gelen işitme kaybı perilenfatik fistülün göstergesi olabilir ve derhal kulak-burun-boğaz uzmanına sevk nedenleridir.

Farklı patlama basıncı değerlerinden kaynaklanan insan kulak zarındaki yırtılma ve işitme kaybına ait eşik patlama basıncı değerlerini içeren diyagram UFC 3-340-02

(2008) kılavuzunda belirtildiği gibi Şekil 2.2’de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında, patlama basıncına maruz kalan insan kulak zarlarının yüzde 50’si 15 psi basınçta yırtılırken, kulak zarı yırtılması olabilmesinin eşik basınç değeri ise 5 psi’dir. Geçici işitme kaybının ise kulak zarı yırtılmasının başlamasına neden olacak basınçtan daha düşük basınç seviyelerinde meydana geldiği görülmektedir [38].



Şekil 2.2 : Patlama basıncına bağlı insan kulağı hasarı [38].

2.1.3 Akciğer

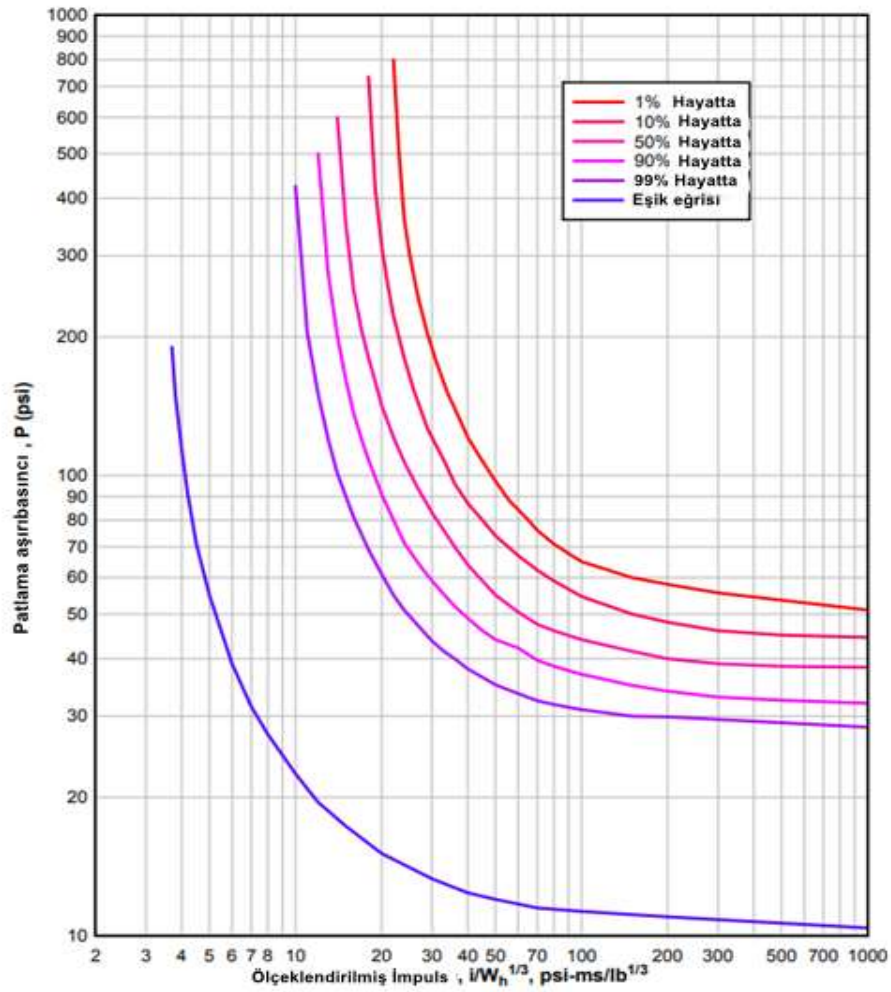
Akciğerler, organ boyunca yoğunluktaki büyük farklılıktan dolayı birincil patlama dalgası sonucu ağır hasar görebilir ve ölümcül sonuçlara sebep olabilir. Mağdurun patlamaya yakın olduğu durumlarda veya patlama dalgasının süresini artıran kapalı alanlarda yüksek dereceli patlayıcılar kullanıldığında birincil patlama akciğer yaralanması (PAY) daha sık ortaya çıkmaktadır. Patlama mahalinde hemen ölenlerde PAY'ın görülme sıklığı %13 ila %47 arasında değişen oranlarda oldukça yüksek olabilir [24].

Akciğer hasarı birincil patlama dalgasından kaynaklanır ve pulmoner (akciğere ait) kontüzyonları, intrapulmoner kanamayı ve alveolar kapillerlerin yırtılmasını içerir. Hipoksi, solunum sıkıntısı, hemotoraks ve pnömotoraks bu enerji dağılımının acil sonucu olarak ortaya çıkabilir. Ayrıca, hızla kalp durması veya kardiyojenik şoka yol açabilen alveolar kapillerlerin yırtılmasından kaynaklanan ani hava embolisi oluşma potansiyeli de vardır. Birincil patlama dalgasından absorbe edilen enerjinin derecesi akciğer hasarının seviyesini de etkilemektedir. Hastalar nefes darlığı (dispne), dokulardaki oksijen yetersizliği (hipoksi) ve/veya giderek artan öksürük ile başvurabilirler. Azalmış solunum sesleri, ronküsler ve taşikardi (dakikada 100 atımın üzerindeki kalp atış hızı) de bulunabilir.

Toraks (göğüs kafesi) üzerinde künt yaralanma belirtilerinin veya penetran bir yaranın varlığı göz önüne alındığında, enkaz veya uçan şarapnelden kaynaklanan ikincil patlama akciğer yaralanması muayenede daha belirgin olabilir.

Semptomları ve belirtileri hipoksi, dispne, solunum sıkıntısı, huzursuzluk veya hemoptizi olan PAY ilk değerlendirmede hemen belli olmayabilir. Bu semptomlar ilk yaralanmadan itibaren 6 saate kadar gecikebilir [25]. Klasik olarak görülen PAY bulguları arasında akciğer grafisinde görülen 'yarasa kanadı' veya 'kelebeğe' benzeyen kabarıklık, bulanık görüntüler yer alır. Hastada hipoksi, kardiyovasküler dekompanseasyon veya solunum sıkıntısı bulgularının kanıtları varsa BT önerilir [24]. Semptomatik hastalar solunum durumu ve oksijen saturasyonuna bağlı olarak yüksek akışlı oksijen, ilave oksijen ve diğer müdahalesiz solunum desteği formlarını almalıdır. Hedef oksijen saturasyonu $\geq$ %92-94'tür, ancak açık bir klinik endikasyon olmadıkça hiperoksiden kaçınılmalıdır [26].

Mevcut verilere dayanarak, insanın kısa süreli (3 – 5 ms) hızlı yükselen basınçlara (şok dalgası) verdiği tepkinin tahmini olarak akciğer hasarları için hayatta kalma eşik eğrileri UFC 3-340-02 (2008) kılavuzunda belirtildiği üzere Şekil 2.3’de verilmiştir [38]. Grafikte W_h (1 lbs = 0,454 kg) insan ağırlığını belirtmektedir. Grafiğe bakıldığında; akciğer kanaması olabilmesi için eşik basınç değerinin 30, 40 psi, şiddetli akciğer kanaması için 80 psi ve üzeri, akciğer hasarına bağlı ölümcüllük eşiğinin ise yaklaşık 100 ila 120 psi olduğu görülmektedir. Bahsedilen basınç değerleri maksimum etkili basınç değerleridir, yani gelen basınç, gelen basınç artı dinamik basınç veya yansıyan basınç değerlerinden en büyüğü olarak düşünülmelidir. Ek olarak, hayatta kalma olasılığı kütleyle bağlı olduğundan, bebeklerin hayatta kalma olasılığı çocuklardan, çocuklarınki ise yetişkinlerden farklı olacaktır. Bebekler için 11 lb (~5kg), küçük çocuklar için 55 lb (~25 kg), yetişkin kadınlar için 121 lb (~55 kg), yetişkin erkekler için ise 154 lb (~70 kg) kullanılması tavsiye edilmektedir [38].



Şekil 2.3 : Akciğer yaralanmasında hayatta kalma için eşik değer eğrileri [38].

2.1.4 Göz

Travmaya karşı oldukça hassas olan göz heterojen bir yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle organ, hem birincil patlama dalgasından hem de ikincil patlama yaralanmasından kaynaklanan hasarlardan kolay etkilenir. Hasta popülasyonuna bakıldığında nispeten yaygın olan patlama göz yaralanmaları nadiren ölümcüldür. En yaygın patlama göz yaralanmaları arasında kornea sıyrıkları, göz kapağı yaralanmaları, hem yüzeysel hem de intraoküler yabancı cisimlerden kaynaklanan yaralanmalar yer almaktadır [27]. Patlama hastalarında göz yaralanmalarının büyük çoğunluğunu uçan enkazdan kaynaklanan ikincil patlama yaralanmaları oluşturmaktadır. Bu yaralanma türleri göz nezlesi (konjunktivit), kornea sıyrıkları, göz kapağı yırtılmaları ve yüzeysel yabancı cisim yaralanmaları olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, birincil patlama dalgası göz küresi yırtılması, iris yırtılması ve görme siniri iltihaplı yaralanmasına (retrobulber hematom) da neden olabilir [28].

2.1.5 Kalp

Kalp ve ana damar yapıları gaz içermemesine rağmen, patlamaların basınç ve kinetik kuvvetleri nedeniyle yaralanabilir. Patlama kardiyak yaralanmaları, kardiyak kontüzyon, serbest/septal duvar kırılması, tamponad (kalbin etrafındaki kesede sıvı birikmesi), papiller kas yırtılması, kalp kapağı yaralanması, aortik yaralanmalar dahil olmak üzere künt kardiyak travmaya benzer patoloji ve içeriğe sahip görünmektedir. Patlamaya bağlı kardiyak fonksiyon bozukluğundan şüphelenildiğinde, ilişkili akciğer hasarı olasılığının yüksek olması nedeniyle agresif sıvı uygulaması yerine pozitif basınçlı ventilasyonun azaltılması ve inotropik destek önerilmektedir [29].

Göğüs ağrısı, nefes darlığı veya kardiyovasküler yaralanma açısından endişe verici hemodinamik denge bozukluğu ile başvuran patlama hastaları, benzer patolojileri ve içerikleri göz önüne alındığında künt göğüs (toraks) travması olanlarla benzer şekilde değerlendirilebilir [30].

2.1.6 Kas iskelet sistemi

Patlama yaralanmalarından kas-iskelet sistemi sıklıkla etkilenmektedir. 101 patlama mağdurundan oluşan bir grubun, %57'sinde ekstremiteler yaralanması vardı. Bunların %75,2'sinde en az bir kırık, %90'ından fazlasında ise açık kırık bulunmakta idi. Patlama mağduru patlamanın merkez üssüne ne kadar yakınsa, o kadar fazla kırık olma eğilimi vardır ve daha ciddi açık kırıklar var ise ölümcüllük ile ilişkilidir [31]. Pelvik

kırıkları olan, araçsız patlamaya maruz kalanlarda önemli ölümler görülmüştür. 2008 yılında patlamalar nedeniyle ölen ABD askeri kayıplarının %25'inden fazlasında pelvik kırıklar görülmüştür [32].

2.1.7 Karın bölgesi

Heterojen yoğunluğu ve gaz içeren bileşenleri nedeniyle gastrointestinal (Gİ) sistem, birincil patlama dalgasından kaynaklanan yaralanmalara karşı hassastır. Patlama yaralanmasından kurtulanlarda nadir görülen bir bulgu olsa da, birincil patlama dalgası kaynaklı bağırsakta yırtılma, tıkanıklık (enfarktüs), iskemi ve kanamaya yol açacak şekilde hasarlar görülebilir. Genellikle patlamaya yakın olanlarda görülen bu yaralanmalarda, birincil patlama dalgasından yüksek düzeyde enerji aktarımı gereksinimi vardır [29].

Literatür, abdominal (karın bölgesi) patlama mağdurlarında bulunan yaralanmaların %48'ini Gİ kanalındaki (kalın bağırsak, ince bağırsak, mide) yaralanmaların oluşturduğunu belirtmektedir [33]. Katı organlarında yaralanabileceği gibi, birincil patlama etkisine karşı en savunmasız olanlar Gİ kanalının gaz içeren mide, ince bağırsak ve kalın bağırsak bölümleridir. Ortamın daha yüksek kuvvetler uygulama kabiliyeti ve basıncı iletmesi nedeniyle gastrointestinal yaralanma su altı patlamalarında daha sık görülür. Hastanın birincil patlama dalgasının kaynağına yakınlığı ve genellikle yüksek dereceli birincil patlama dalgası böbrek, dalak ve karaciğer gibi katı organların yaralanmasını etkileyen önemli faktörlerdir [33].

Patlamaya maruz kalan hastalarda, patlamanın 14 gün sonrasına kadar abdominal semptomlar gelişebilir. Bu yüzden, gastrointestinal hasarın teşhisi için semptomların izlenmesi ve tekrarlayan değerlendirme süreçleri kritik derecede önemlidir [8].

2.2 Patlamanın İnsan Vücuduna Etkileri - Ek Çalışmalar

Sourabh Boruah ve arkadaşları [34], kemiğin izotropik bir şekilde davrandığı varsayımı altında, kafatasından, özellikle de kalvaryumdan alınan kortikal kemiğin Young modülünü, alt-osteon eleman boyutunda (50µm) incelemek amacıyla çalışma yürütmüşlerdir. On ölüm sonrası insan suretinin kalvaryumlarının kortikal tabakalarından işlenmiş doksan yedi kemik örneği kırılma noktasına kadar dinamik gerilimde test edilmiştir. Sonuç olarak, ortalama %0,6 birim şekil değiştirmede meydana gelen kırılmaya yakın bir kısma kadar, gerilme ve birim şekil değiştirme

arasında doğrusal bir tepki gözlenmiştir. Test numunesi (coupon) için etkin elastik modül $12,01 \pm 3,28$ GPa olarak bulunmuştur. Kafatası kortikal kemiğinin $50 \mu\text{m}$ 'lik bir eleman boyutu için ise Young modülünün ortalama 19 GPa olduğu tahmin edilmiştir.

Xuedong Zhai ve arkadaşları [35], insan ön kafatası kemiğinin kalınlık boyunca ve kalınlık yönüne dik olarak, basınç mekanik davranışlarının yarı statik (0,01/s), orta (30/s) ve yüksek (625/s) birim şekil değiştirmelerde deneysel olarak karakterize edilmesi adına çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaşları 70-74 arasında değişen üç erkek donörden hazırlanan toplam 75 numune yüksek (N=29 test), orta (N=23 test) ve yarı statik (N=23 test) birim şekil değiştirme oranları olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır. Yarı statik ve orta birim şekil değiştirme oranlarındaki deneyler hidrolik tahrikli bir malzeme test sistemi ile gerçekleştirilirken, kafatası kemiği örneğini yüksek birim şekil değiştirme oranlarında yüklemek için bir Kolsky sıkıştırma çubuğu kullanılmıştır. Sonuç olarak, insan kafatası yükleme yönüne bağlı bir mekanik davranış sergilemiştir. Kalınlığa dik yönde, kalınlık yönündekilere kıyasla daha yüksek nihai mukavemet ve elastik modül bulunmuş, mukavemet ve elastik modül için sırasıyla 2 ve 3 kata kadar artan bir oran görülmüştür. Bunun yanında yükleme hızının da etkisi belirgindir : Kafatası numuneleri, her iki yükleme yönü için de, birim şekil değiştirme hızı yarı statikten yüksek oranlara doğru arttıkça giderek daha kırılğan hale gelmiştir.

Sourabh Boruah ve arkadaşları [36] bir başka çalışmalarında travmatik beyin hasarı vakalarındaki artışı göz önüne alıp, bu hasarın incelenmesi, değerlendirilmesi ve azaltılması için insan kafatasının doğrulanmış bir sonlu elemanlar modelinin gerekli olduğunu belirtmiştir. Bu doğrultuda, insan kafatasının dinamik basınç mekanik özelliklerini belirlemek adına çalışma yapılmıştır. Ölüm sonrası 10 yetişkin erkek insan suretinden alınan toplam 84 kafatası kemiğinin silindirik kalınlıktaki örnekleri test edilmiştir. Bu numuneler ramp yer değiştirmesi kullanılarak sıkıştırılmıştır. Elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, kafatası çekirdeklerinin etkili malzeme özelliklerini hesaplamak için kullanılmıştır. Sonuçlara baktığımızda; numuneler için basınç elastik modülü 450 ± 135 MPa olarak belirlenmiş, kırılma gerilmesi ise 23 ± 6 MPa olarak tahmin edilmiştir. Bu malzeme özellikleri, numune yeri veya numunelerdeki ortalama görünür yoğunluk ile korelasyon göstermemiştir. Kırılma gerilmesinin trabeküler porozite ile ilişkili olduğuda ayrıca belirtilmiştir.

D. H. Robbins ve J. L. Wood [37], kafa travmasının mekanizmasına ilişkin bir araştırma projesinin ilk sonuçlarını gösteren çalışmalarını sunmuşlardır. Çeşitli kafatası kemiklerinin mekanik özelliklerini belirlemek, bunları yapısal denklemler halinde düzenlemek ve kafatasının yapısal bir modelini geliştirmenin mekanizmayı tanımlamaya başlamak için sırasıyla gereken aşamalar olduğu belirtilmiştir. Yöntem olarak, numuneler üzerinde çekme ve basınç testleri, kesme testleri ve dinamik gerilme-birim şekil değiştirme testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, kafatası üst bölümü kompakt kemiğinin ortalama $2,1 \times 10^6$ psi çekme ve basınç statik elastik modülüne sahip olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında, kopma gerilmesinin ise yaklaşık 9500 psi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, kesme kuvvetine maruz kalan bir kafatasının diploe tabakasında, çekme veya basınç durumlarındaki kırılma gerilmelerinin kesme durumundakinden daha büyük olduğu da bildirilmiştir.

Anthony M.J.Bull ve arkadaşları [49] ise yayınladığı kitaplarında, literatürdeki patlama aşırı basıncı nedeniyle meydana gelen yaralanmalardaki muhtemel basınç değerlerini Çizelge 2.2’de verildiği gibi özetlemişlerdir.

Çizelge 2.2 : Personel üzerindeki patlama basıncı etkileri [49].

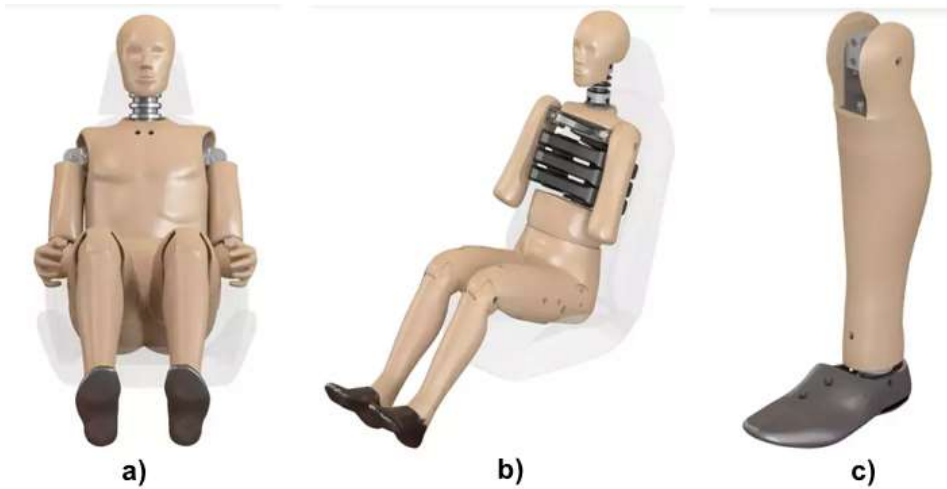
Basınç (atm)	Yaralanma Tipi
0,34	Kulak zarı yaralanması
1	%50 olasılıkla kulak zarı yırtılması
5,44	%50 olasılıkla akciğer yaralanması
9,14 - 12,66	%50 olasılıkla ölüm
14,06 - 17,58	Ölüm

Çizelge 2.3’de ise, NATO HFM-148 görev grubu tarafından önerilen farklı vücut bölümleri için kullanılması gereken yaralanma kriterleri, bu kriterlere göre yaralanma limit değerleri ve bunlara karşılık gelen antropomorfik test cihazlarının (çarpişma testi mankenlerinin) özeti verilmiştir. Araç çarpişmalarında insan yaralanma potansiyelini ölçmek için kullanılan, genellikle çarpişma testi mankeni olarak bilinen antropomorfik test cihazı (ATC) yüksek hassasiyetli bir test aracıdır. Çarpişma testi mankenleri, bir çarpişma sırasında oluşan darbelere, ivmelere, sapmalara, kuvvetlere ve atalet momentlerine karşı insan tepkisini simüle eder [55]:

Çizelge 2.3 : NATO'ya göre farklı vücut bölümleri için yaralanma riskini değerlendirmek amacıyla kullanılacak yaralanma değerlendirme referans değerleri ve ilgili ATC [55].

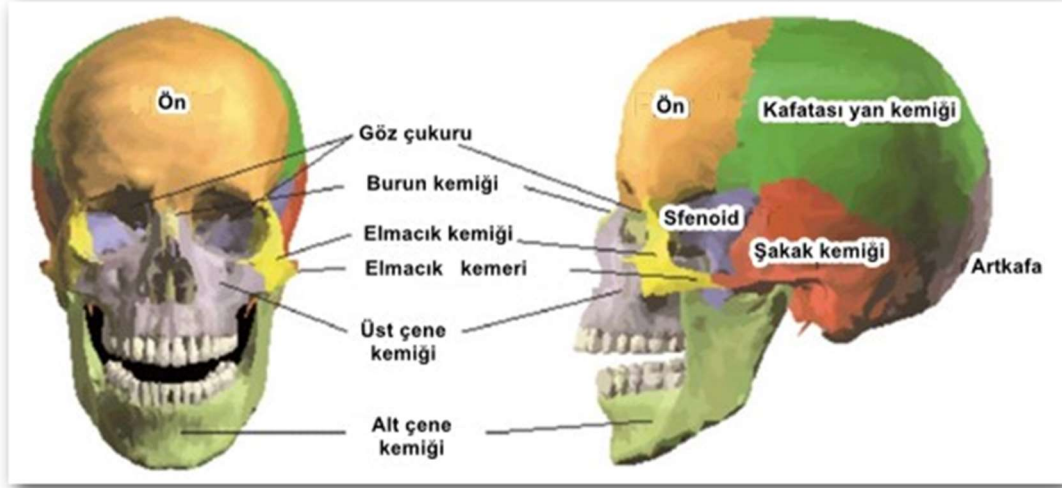
Vücut Bölümü	Yaralanma Kriteri	Parametre	Hasar Eşik Seviyesi	ATC
Kafa	Kafa yaralanma kriteri (KYK)	HIC15	250	H3 veya ES-2re + MIL-Lx
	Eksenel basınç kuvveti	Fz-	4 kN @0 ms / 1,1 kN >30 ms	
	Eksenel çekme kuvveti	Fz+	3,3 kN @0 ms / 2,8 kN @35 ms / 1,1 kN > 60ms	
Boyun	Kesme kuvveti	Fx± / Fy±	3,1 kN @0 ms / 1,5 kN @25-35 ms / 1,1 kN > 45 ms	ES-2re + MIL-Lx
	Eğilme momenti (+)	Moc _y +	190 Nm	
	Eğilme momenti (-)	Moc _y -	96 Nm	
Boyun	Eksenel çekme kuvveti	Fz+	1,8 kN	ES-2re + MIL-Lx
Omuz	Basınç kuvveti	Fy	1,4 kN	ES-2re + MIL-Lx
Göğüs (Kaburga - üst ve alt)	Kaburga sapma kriteri	RDC _{lateral}	28 mm	ES-2re + MIL-Lx
Göğüs	Toraksik basınç kriteri	TCC _{frontal}	30 mm	H3 + MIL-Lx
Göğüs	Viskoz kriteri	VC _{frontal}	0,70 m/s	H3 + MIL-Lx
Göğüs	Viskoz kriteri	VC _{lateral}	0,58 m/s	ES-2re + MIL-Lx
Karın	Abdominal pik kuvvet	F _{total}	1,8 kN	ES-2re + MIL-Lx
Omurga	Dinamik tepki indeksi (DTİ)	DT _z	18	H3 veya ES-2re + MIL-Lx
Kalça	Maksimum kasık kuvveti	Fy	2,6 kN	ES-2re + MIL-Lx
Üst bacak	Eksenel basınç kuvveti	Fz-	6,9 kN	H3 veya ES-2re + MIL-Lx
Alt bacak	Eksenel basınç kuvveti	Fz-	2,6 kN	H3 veya ES-2re + MIL-Lx
İç organlar / Akciğerler	Göğüs kafesi hız öngörücüsü	CWVP	3,6 m/s	H3 veya ES-2re + MIL-Lx

Burada, ilgili çarpışma testi manken tipleri Hybrid III 50th Male, ES-2re'dir. Hybrid III erkek modeli çarpışma testi mankenlerinin en yaygın kullanılanıdır. MIL-Lx, alt bacak ise standart bir Hybrid III ATC'ye takılır. Şekil 2.4'de ilgili ATC'ler örnek figürleri ile verilmiştir [56].



Şekil 2.4 : ATC türleri : a) H3 50th Male b) ES-2re c) MIL-Lx legform [56].

R. Bass ve Yoganandan [61], kafatası ve yüz kemiklerinin biomekanik olarak karmaşık olduğunu ve yüz kemiklerinin frontal, oksipital, parietal, temporal, sfenoid kemiklerinden oluştuğunu belirtmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Kafatası kemikleri (Sol) ve orbita dahil yüz kemikleri (Sağ) [61].

Birbirine bağlı kemikler içeren üst yüz iskeleti, kafatası ile eklemleşen karmaşık bir sistemden oluşur [11, 12]. İncelenen başlıca kemikler arasında maksilla, zigomatik kemik, burun kemiği ve orbita bulunmaktadır (Şekil 2.5).

Ayrıca, yüz bölgesindeki kırılmalarla ilgili literatürde bulunan deneysel çalışmalardaki sonuçları, kullanılan numune sayısını, darbenin lokasyonunu, darbeyi sağlayan maddenin geometrisini, patlama hızını ve kafanın ilgili bölümüne etkiyen maksimum patlama yükünü belirterek Çizelge 2.4’de verildiği gibi belirtmişlerdir [61].

Çizelge 2.4 : Yüzdeki kırılmalara ilişkin deneysel çalışmaların özeti [61].

Yazar (Yıl)	Numune sayısı	Darbe bölgesi	Çarma düzeneği geometrisi	Çarpma düzeneği alanı (cm ²)	Başlangıç Enerjisi (J)	Hız (m/s)	Pik kuvvet (N)
Schneider (1972)	13	Üst çene kemiği	Dairesel	6,5	4,9 - 26,3	3 - 5,4	625 - 1980
	27	Elmacık kemiği	Dairesel		6,4 - 46,7	3- 5,2	930 - 2850
	9	Üst çene kemiği	Dairesel	6,5	4,9 - 26,3	3 - 5,4	625 - 1980
Nahum (1975)	16	Elmacık kemiği	Dairesel	6,5	12,6 - 86,1	2,2 - 7,5	610 - 3470
	9	Elmacık kemer	Dairesel	6,5	6,4 - 46,7	3,0 - 5,4	930 - 1940
	21	Ön kemik	Dairesel	6,5	25,3 - 133,8	3,1 - 7,1	2670 - 9880

Çizelge 2.4 (devam) : Yüzdeki kırılmalara ilişkin deneysel çalışmaların özeti [61].

	Numune sayısı	Darbe bölgesi	Çarma düzeneği geometrisi	Çarpma düzeneği alanı (cm ²)	Başlangıç Enerjisi (J)	Hız (m/s)	Pik kuvvet (N)
	8	Alt çene kemiği	Düz	25	56,9 - 68,4	5,4 - 6,0	820 - 3400
	9	Alt çene vurgusu	Dairesel	6,5	37,3 - 46,7	4,9 - 5,4	1900 - 4100
Nyquist (1986)	11	Burun kemiği	Silindir	5	240 - 815	2,8 - 7,1	2000 - 4500
Allsop (1988)	6	Üst çene kemiği	Silindir	2 cm çapında çubuk	43 - 87	2,4 - 3,5	1000 - 1800
	8	Elmacık kemiği					900 - 2400
	9					0,0025	1200 - 2400
Yoganandan (1988)	yarıstatik 15 dinamik	Elmacık kemiği	Direksiyon simidi	--	--	2,0 - 6,9	1300 - 4600
Welbourne (1989)	8	Üst çene kemiği	Silindir	5	15,1 - 85,9	1,35 - 3,22	788
Garza (1993)	12	Elmacık kemiği	Silindir	NA	29,4 - 58,8	2,2 - 3,1	1100 - 2800
	6	Alt çene kemiği	Düz plaka	127	11,4 - 119	6,08 - 7,15	4500 - 6700
McElhaney (1995)	6	Baziler kafatası	--	N/A	4,3 - 14	Yarıstatik	2590 - 4880
	11	Baziler kafatası		182	N/A	2,4 - 3,5	1290 - 4290
Rhoe (2001)	14	Elmacık kemiği	Yuvarlatılmış çubuk ucu	3,0 - 13,9	N/A	2,0 - 6,9	1400 - 4600
Davis (2004)	11	Üst çene kemiği + Elmacık kemiği	Yuvarlatılmış silindir	13,8	57,3 - 81,2	4,2 - 5	1100 - 4400
	4	Ön kemik			14 - 84	33 - 69	2450 - 4080
Viano (2002)	5	Elmacık kemiği	Silindir	10,8	Eki.50	28 - 41	1520 - 2300
	6	Alt çene kemiği			16 - 28	36 - 47	1460 - 3710
Bisplinghoff (2008)	14	Üst çene kemiği + Elmacık kemiği	Eğimli silindir	5	1,6 - 57,2	1 - 6	N/A
Green (1990)	22	Göz çukuru	Yuvarlatılmış silindir	1,2	2,08 - 3,28	N/A	N/A
Waterhouse (1999)	47	Göz çukuru	Çubuk ucu	4,5	--	1,1 - 2,3	N/A
Warwar (2000)	21	Göz çukuru	Çubuk ucu	0,38 - 0,50	29 - 127 mJ	N/A	N/A

2.3 Patlamanın Yapılar Üzerindeki Etkisi

2.3.1 Tamamen kapalı alan patlaması

Tamamen kapalı alan patlaması, bir gemi, endüstriyel tesis veya bina gibi tamamen kapalı alanlarda olan patlamalardan meydana gelir. Bu tür patlamalar genellikle yanıcı bir gazın sızıntısı ve yayılması sonucu oluşur. Gaz bir ateşleme kaynağı ile temas edene kadar dağılır ve karışır. Bu tür patlamalarda büyük miktarlarda gaz salınımı ve geniş alanlar sıklıkla söz konusu olduğu için çok yıkıcıdır.

Patlamalar genel anlamda deneysel olarak belirlenebilen çeşitli özelliklerin fonksiyonudur. Bu özellikler; yanıcılık veya patlayıcılık limitlerini, kullanılan patlayıcı madde özelliklerini, tutuşma sonrası maksimum patlama basıncı ve maksimum basınç artış hızını içerir [43]:

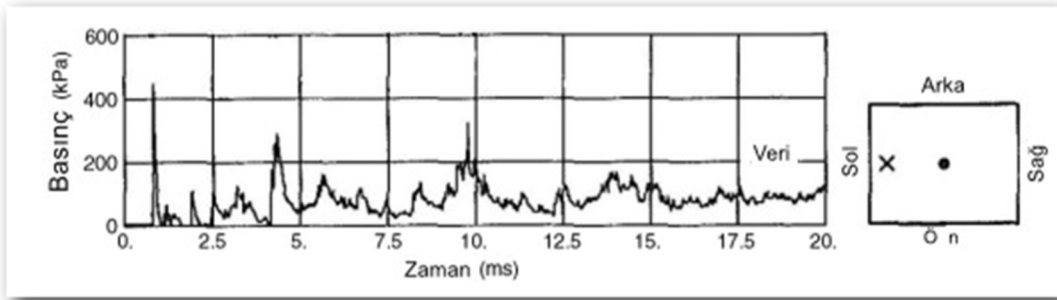
- Çalışma için güvenli konsantrasyonları belirlemek adına patlayıcılık veya yanıcılık limitleri kullanılır.
- Maksimum basınç artış hızı, alev cephesinin yayılma hızının ve dolayısıyla patlamanın büyüklüğünün göstergesidir. Farklı malzemelerin patlama davranışları bu sayede göreceli olarak kıyaslanabilir.
- Patlama basıncına dayanıklı tasarımda kullanılan maksimum patlama basıncında ise gerekli husus; öngörülen patlama basıncının tasarım basıncı için kullanılacak değerden daha düşük olmasıdır.

Binaya etkiyen patlama yükleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile bilgisayar programları kullanılarak belirlenebilir. Patlama kaynağını ve bitişik engelleri kapsayan bina ve çevresindeki alanı sonlu hacime sahip küçük düzenli hücrelere ayırmak HAD modellemesinin temel önermelerinin ilkidir. Devamındaki süreç ise, bitişik hücrelerin etkilerini hesaba katıp, her bir hücre içinde momentum, kütle ve enerjinin korunumu için gerekli yönetici denklemleri çözmektir.

Diğer kullanım alanlarının yanı sıra HAD, engellerin bulunduğu bir ortamda patlama dalgalarının yayılmasını simüle etmek, binalardaki açıklıklardan kaynaklı sızıntıyı simüle etmek, alışılmadık konfigürasyonlu binaları simüle etmek, yakın alan patlamaları ve iç patlamaları simüle etmek için kullanılabilir. Ayrıca, HAD yaygın olarak kompakt ve karmaşık yerleşimlerin kullanıldığı açık deniz uygulamalarında da kullanılmaktadır.

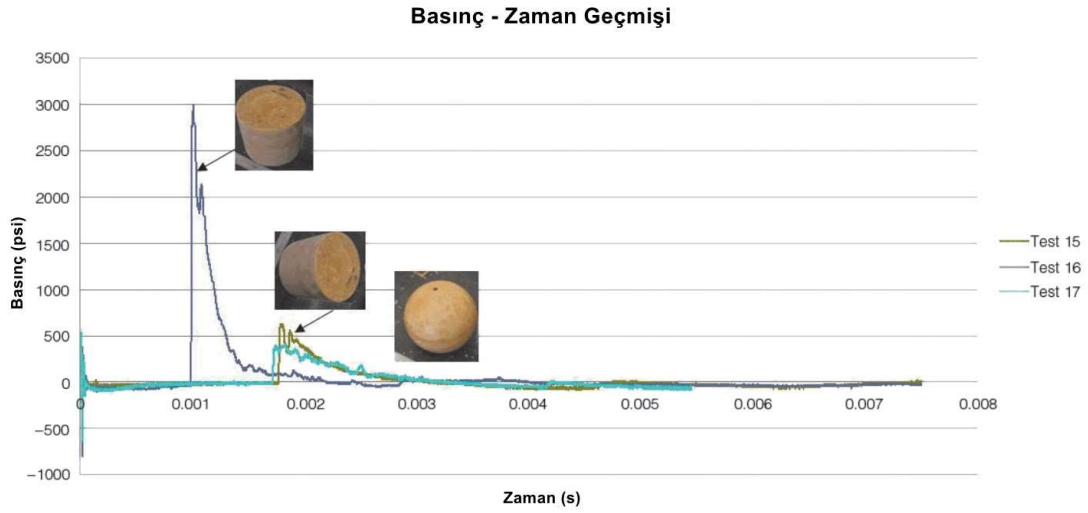
HAD programları, analizi hızlandırmak ve basitleştirmek için kılavuza ve test verilerine dayalı olarak patlama kaynağında basitleştirmelerin yapıldığı yarı ampirik bir yaklaşım veya detaylı yanma ve türbülans modellemesini içeren gerçek bir ilk prensip yaklaşımı kullanabilir. Çoğu simülasyonda olduğu gibi, model ne kadar ayrıntılı oluşturulduysa sonucun gerçeğe yakınlığı ve doğruluğu da o kadar fazla olur [41].

Önceki çalışmalar, kapalı patlamalarda aşırı basınç geçmişinin bir yapı içindeki patlama aşırı basınçlarının yansımalarından etkilendiğini ve serbest alandakinden daha karmaşık hale geldiğini göstermiştir. Dikdörtgen bir sığınakın merkezine yerleştirilen 1,1 bar'lık bir patlayıcı için sığınak içindeki patlama etkileri araştırılmıştır. Sol sensör için elde edilen, patlama aşırı basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Diyagrama bakıldığında, uzun bir süre boyunca önemli büyüklüklerde çoklu şok yansımalarının devam edebileceği görülmektedir [44].



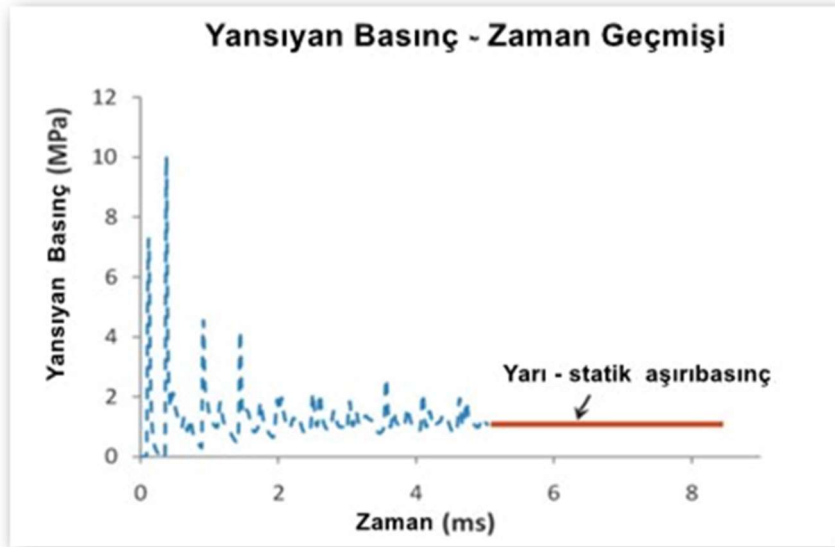
Şekil 2.6 : Dikdörtgen bir sığınak için sol sensörden elde edilen aşırı basınç geçmişi [44].

Sınırlandırılmış yapının geometrisinin, patlayıcının ağırlığının ve patlayıcıya olan uzaklığın, maksimum yansıyan aşırı basınç değerini, süresini ve impulsunu etkileyeceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, kapalı patlamalarda patlayıcının şekli ve yöneliminin de önemi vardır. Serbest alandaki hem sayısal hem de deneysel sonuçlar, levha yüzeylerinden yansıyan maksimum aşırı basınç değerinin silindirik patlayıcıların yöneliminden önemli derecede etkilendiğini göstermiştir. Savunma Bilim ve Teknoloji Organizasyonu (SBTO) tarafından 2008 yılında silindirik ve küresel patlayıcılar için (tüm durumlar için $L/D = 1$), 0,95 kg patlayıcı ağırlığı ve 0° geliş açısıyla 2 m patlayıcıya olan uzaklık için yapılan testlerden elde edilen deneysel aşırı basınç geçmişlerinin karşılaştırılması Şekil 2.7'de gösterilmektedir [44].



Şekil 2.7 : SBTO tarafından 2008 yılında yapılan testlerden elde edilen, farklı patlayıcı şekilleri ve yönelimleri için deneysel aşırı basınç geçmişleri [44].

Şekil 2.7’den de anlaşılacağı üzere; eksenel yönde dikey olarak yönlendirilmiş silindirik patlayıcı için yansıyan en yüksek aşırı basınç, radyal yönde yatay olarak yönlendirilmiş silindirik patlayıcı ve küresel patlayıcı için olandan önemli ölçüde daha yüksektir. Tamamen kapalı bir oda ortamında aşırı basıncı serbest bırakacak boşluklar olmadığından, patlayıcıların neden olduğu patlama aşırı basıncı belirli bir süre sonra sabit, kalıcı statik aşırı basınç (yarı statik aşırı basınç) şeklinde devam edecektir (Şekil 2.8). Ancak şok dalgasının sabit bir kalıcı statik aşırı basınca stabilize olmadan önce ne kadar süreceği bilinmemektedir [44].



Şekil 2.8 : Tamamen kapalı bir ortamda tipik yarı-statik aşırı basınç [44].

2.3.1.1 Şok dalgası süresi ve yarı statik aşırı basınç

Kapalı bir alan içinde olan patlama iki tipik basınç yüküne yol açar: şok dalgası ve yarı statik basınç. İç patlama basınç yükünün patlama - zaman geçmişi sınır koşullarının kısıtlılığı nedeniyle dış patlamadan çok daha karmaşıktır ve daha ciddi hasarlara yol açar. Kapalı alan içinde şok dalgası sürekli olarak yansır ve köşelerde üst üste binerek yapının lokal olarak kırılmasına ve plastik deformasyonlara neden olur. İlk yansıyan şok dalgası belirleyici iken, yarı statik aşırı basıncın yapısal hasar ve lokal hasara dayalı genel yıkım için belirleyici faktör olduğuna inanılmaktadır [45].

Tamamen kapalı alan patlama yüklemesi için şok dalgası süresi belirlenmeden önce, yarı statik aşırı basınç tanımlanmalıdır. Yarı statik aşırı basıncı hesaplamak için, aşırı basınç geçmişinin her 3 ms'si için impuls hesaplanır. İki sürekli impuls bölümü arasındaki fark %5'e eşit veya daha az olduğunda, t zamanından sonraki aşırı basıncın sabit olduğu, yani yarı statik aşırı basınç olduğu kabul edilir. T zamanından itibaren her 3 ms için impuls şu şekilde hesaplanır:

$$I_{t1} = \int_t^{t+3} P_r(t) dt \quad (2.1)$$

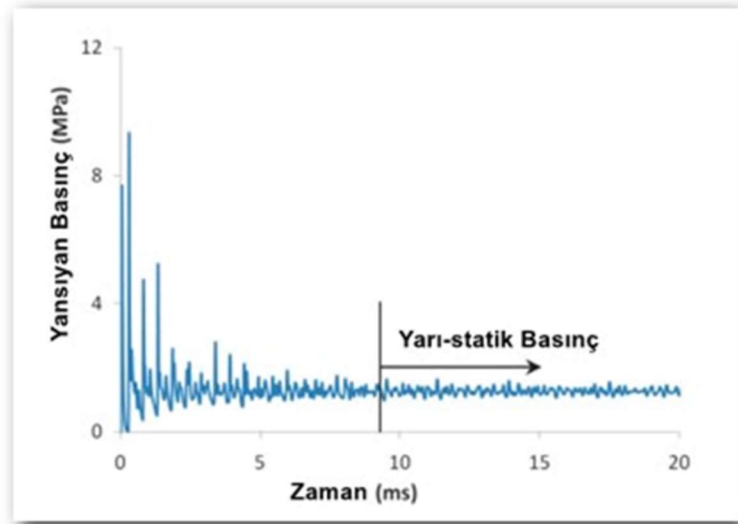
Başka bir 3 ms için sürekli impuls şuna eşittir:

$$I_{t2} = \int_{t+3}^{t+6} P_r(t) dt \quad (2.2)$$

İki sürekli impuls bölümü arasındaki fark ise denklem 2.3'deki gibi tanımlanır:

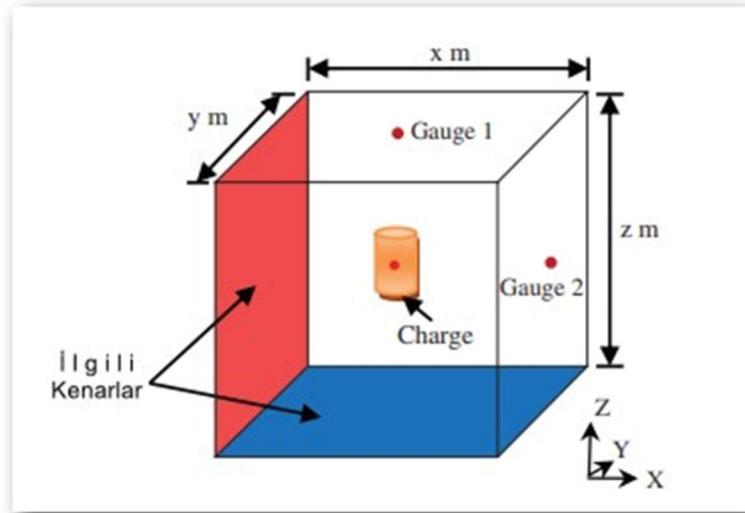
$$\text{Tolerans} = \frac{|I_{t2} - I_{t1}|}{I_{t2}} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de tanımlanan tolerans %5'e eşit veya daha az olduğunda, t zamanındaki aşırı basınç yarı statik aşırı basınç olarak tanımlanır. Şekil 2.9, 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m boyutlarındaki kübik bir kutuda 100 g küresel patlayıcı için 9 ms'de yarı statik basıncın oluştuğunu ve Şekil 2.10'da konumları gösterilen gösterge 1'deki tamamen kapalı ortamdaki patlama yarı statik basıncının 1,6 MPa civarında kaldığını göstermektedir [44].



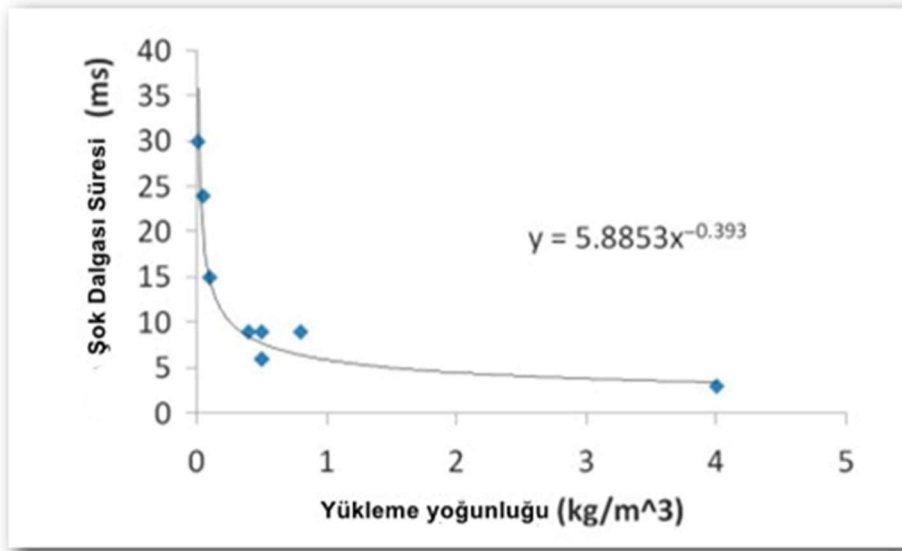
Şekil 2.9 : 0,125 m³ bir kapalı alan içinde 100 g küresel patlayıcının aşırı basınç geçmişi [44].

Bu durumda, 9 ms'den önce kaydedilen aşırı basınç, şok dalgaları olarak nitelendirilebilir.



Şekil 2.10 : Parametrik çalışmalarda patlayıcı ve patlama noktasının bulunduğu hücre [44].

1 numaralı göstergede simule edilen veriler kullanılarak, farklı küp hacimleri altında küresel yükler için yükleme yoğunluğu ve şok dalgası süreleri için yapılan tipik bir analiz Şekil 2.11'de verilmiştir. Görüldüğü üzere yük yoğunluğunun artmasıyla şok dalgası süresi azalmaktadır.



Şekil 2.11 : Gösterge 1'de yükleme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak şok dalgası süresi [44].

Yükleme yoğunluğu ve şok dalgası süresi için en küçük kareler eğrisi şu şekilde elde edilir:

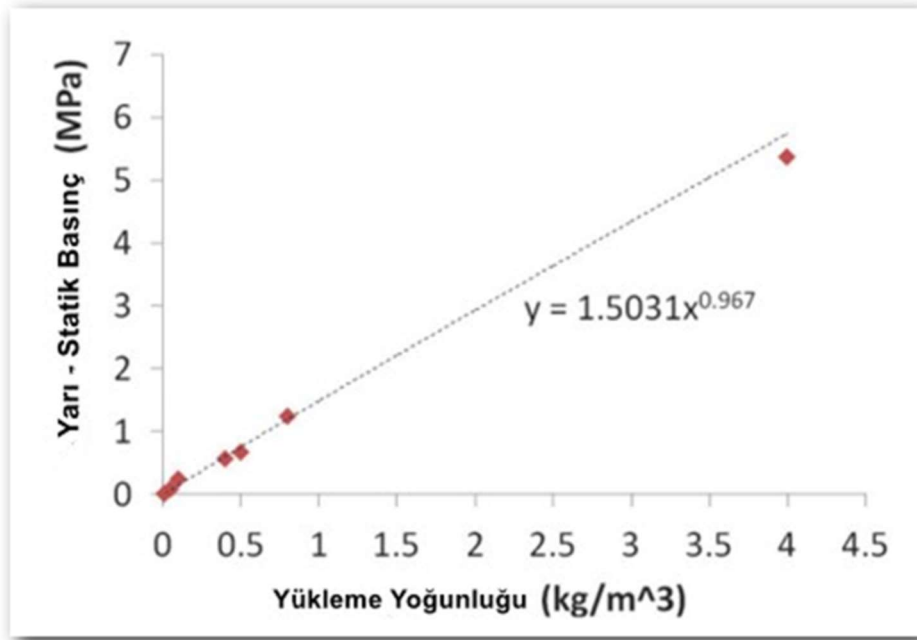
$$t_{pr} = 5,8853x^{-0,393} \quad (2.4)$$

Burada; $x \text{ kg/m}^3$ cinsinden yükleme yoğunluğunu (TNT ağırlığı / hacim), t_{pr} ise ms cinsinden şok dalgası süresini göstermektedir.

Ek olarak, ölçeklendirilmiş mesafe ile yarı statik aşırı basınç arasındaki ilişki tamamen sınırlandırılmış patlama yüklemesi için incelenmiştir. Şekil 2.12, gösterge 1'deki yükleme yoğunluğuna karşı yarı statik aşırı basıncı vermektedir. Simüle edilen verilere dayanarak, en uygun eğri için denklem şu şekilde türetilmiştir:

$$P_{g(qs)} = 1,5031x^{0,967} \quad (2.5)$$

Burada, $P_{g(qs)}$ MPa cinsinden yarı statik aşırı basıncı, $x \text{ kg/m}^3$ cinsinden yükleme yoğunluğunu göstermektedir. Denklem 2.5 sadece gösterge 1'de, kübik bir kutu içerisindeki küresel patlayıcılardan türetilmiş olmasına rağmen, kübik kutudaki küresel yüklerde herhangi bir nokta için uygundur, çünkü yarı statik aşırı basınç kübik kutu içinde her noktada aynıdır [44].



Şekil 2.12 :Yükleme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak yarı statik aşırı basınç [44].

2.3.1.2 Kapalı alan patlamasından kaynaklanan yaralanmalar

İç alan patlamalarında birincil yaralanma olasılığı, duvarlardan sürekli yansıyan tekrarlı şok dalgaları nedeniyle artar. Akciğerleri, gastrointestinal sistemi önemli ölçüde etkiler ve kulak zarlarının yırtılmasına ve beyin kanamasına neden olur. İkincil patlama yaralanmaları patlamanın arkasında bıraktığı şarapneller (uçan cisimler) ve yüksek hava hızları nedeniyle meydana gelecektir. Bu bakımdan, kapılara bakan yerler ve koridorlar özellikle tehlikeli alanlardır. Kapalı alanlar, patlama dalgası evrimini önemli ölçüde değiştirebilen etkiye sahiptir. Örneğin, sert yüzeylerden gelen patlama dalgası yansımalarının aşırı basınçları kat kat artırdığı bilinmektedir. Analizler patlamaların hapsedilmesinin daha ciddi yaralanmalara yol açtığını göstermiştir [47].

Gastrointestinal (Gİ), akciğer ve beyin yaralanmaları için yaralanmaya sebebiyet verecek spesifik patlama aşırı basıncı değerlerini belirlemek zordur. Bununla birlikte, patlama yaralanmalarına karşı hassas olan beyin, nispeten düşük aşırı basınç seviyelerinde bile önemli derecede hasara maruz kalabilir. Örneğin, 5-10 psi kadar düşük aşırı basınçlar bile davranışsal ve bilişsel bozukluklara yol açacak şekilde beyinde yapısal hasara neden olabilir.

Eşik değerler genel kılavuz çizgilerdir ve bir patlamanın insan vücudu üzerindeki gerçek etkileri patlamanın özel koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir.

Örneğin, şarapnel veya diğer tehlikelerin varlığı, patlama dalgasının yönü ve açısı ve kullanılan patlayıcı türü meydana gelen yaralanmaların şiddetini etkileyebilir.

TNT gibi yüksek dereceli patlayıcıların neden olduğu patlamalar gibi kimyasal patlamalar, dört ana yaralanma kategorisinde (birincil, ikincil, üçüncül ve dördüncül) sınıflandırılabilir. Çizelge 2.5 bu dört temel patlama hasarı mekanizmasının ayrıntılarını listelemektedir. Bu dört kategori, patlama dalgası, patlama rüzgarı ve çevresel faktörlerin insan vücudu üzerindeki etkisine dayanmaktadır.

Çizelge 2.5 : Patlama yaralanma mekanizmaları [47].

Yaralanma Mekanizması	Karakteristik Özellikler	Etkilenen Vücut Bölgesi	Yaralanma Türü
Birincil	Yüksek dereceli patlayıcıya özgüdür; aşırı basınç dalgasının vücut yüzeylerine çarpmasından kaynaklanır	Gaz dolu yapılar en hassas olanlarıdır: Akciğerler, Gİ sistem ve orta kulak	- Akciğer Patlaması - Kulak zarı yırtılması ve orta kulak hasarı - Gİ sistemde kanama veya perforasyon - Göz küresi yırtılması - Beyin sarsıntısı
İkincil	Uçan cisimler veya bomba parçalarından kaynaklanır	Herhangi bir vücut parçası etkilenebilir.	- Penetran balistik (parçacık) veya künt yaralanmalar - Göze parçacık penetrasyonu
Üçüncül	Patlama rüzgarı ile savrulan bireyleri kapsar.	Herhangi bir vücut parçası etkilenebilir.	- Kırık ve travmatik hasar - Kapalı ve açık beyin hasarı
Dördüncül	Birincil, ikincil veya üçüncül yaralanma mekanizmalarına bağlı olmayan hastalıklar	Herhangi bir vücut parçası etkilenebilir.	- Yanıklar (ani, kısmi) - Ezilmeler - Astım, KOAH veya toz, duman kaynaklı diğer nefes alma sorunları - Hiperglisemi ve hipertansiyon

2.3.2 Açık alan patlaması

2.3.2.1 Açık alan patlamasına dair örnek çalışma

Panowicz ve arkadaşları [46], el yapımı patlayıcının (EYP) infilak etmesi sonucu oluşan basınç dalgasının hafif zırhlı tekerlekli araç mürettebatı üzerindeki etkileşiminin sayısal simülasyonunu sunmaktadır. Ordunun farklı türdeki görevleri sırasında karşılaştığı tipik senaryolardan biri olan aracın yan tarafındaki patlama analiz edilmiştir. Sunulan sayısal incelemelerin amacı, patlatılan maddenin kütlesine göre dinamik itkinin vücudun karakteristik noktalarında mürettebat üzerindeki etkisini incelemektir. Bu makalede sunulan sayısal incelemeler, patlayıcının kütlesinin araç mürettebatının maruz kaldığı yük üzerindeki etkisini test etmeyi amaçlamıştır. Görevdeki askerlerin en yaygın ölüm nedenleri mayınlar ve el yapımı patlayıcılardır.

2.3.2.2 EYP yanal patlamasının hafif zırhlı araçlar ve mürettebatı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

EYP'nin patladığı bölgedeki araç patlama dalgasının güçlü etkisine maruz kalır. Patlama anında, bir patlama dalgası ortaya çıkar ve bu dalga ses hızından daha yüksek bir hızla olası tüm yönlere yayılır. Araç gövdesini çevreleyen bu dalga, elemanları üzerinde etkileşime girerek aşırı yüklenmelere neden olur. Patlayıcının patlamasından sonra, kütlesine ve türüne göre, ortaya çıkan patlama dalgası araç zırhında darbe yüklemelerine neden olur. Bu darbe birkaç milisaniye içinde yüksek ivmelenmelere yol açarak mürettebatın yaralanmasına ve hatta ölümüne neden olur. Mürettebat tehdidinin derecesi, mürettebatın patlama yerine olan mesafesine, aracın yapısına ve mürettebat bölmesinin içinin düzenlenmesine bağlıdır. Yanal patlama sırasında, yolcuların kafa ve vücutları en fazla yaralanmaya maruz kalan kısımdır.

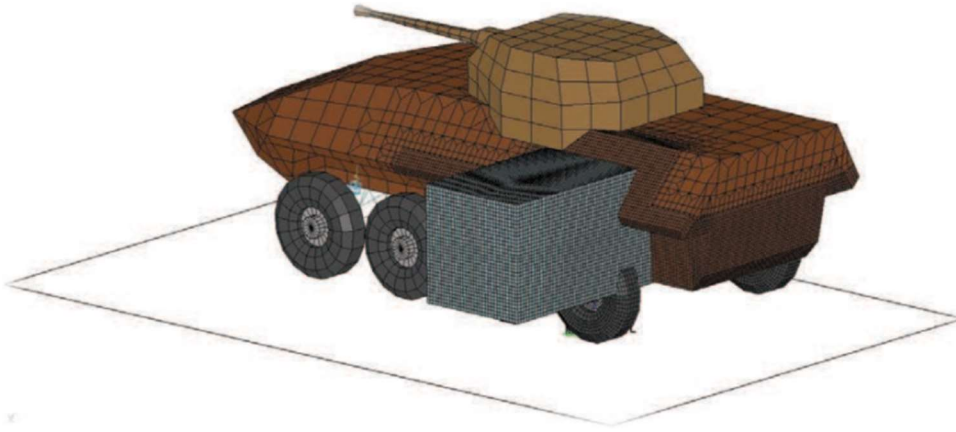
Deneyisel araştırmalara dayanarak geliştirilen ve insan vücudunun maruz kalabileceği aşırı yüklerin izin verilen değerlerini belirleyen çeşitli standartlar ve belgeler bulunmaktadır. Bu kapsamda en çok bilinen standartlar şunlardır [46]:

- *NATO Standardı - STANAG 4569* : El yapımı patlayıcı veya mayın patlamasından kaynaklanan patlama dalgasına karşı koruma alanında veya şarapnellere ve füzelere karşı balistik koruma alanında askeri bir standarttır.
- *Amerikan Standardı - UFC 3-340-02 (Kaza Sonucu Patlamalarda Yangın Etkilerine Dayanıklı Yapılar)* : Koruyucu yapı tasarımı sürecinde gerekli olan patlama ile yükleme parametrelerinin oluşturulmasını sağlar.

2.3.2.3 Sonlu elemanlar yöntemi analizi

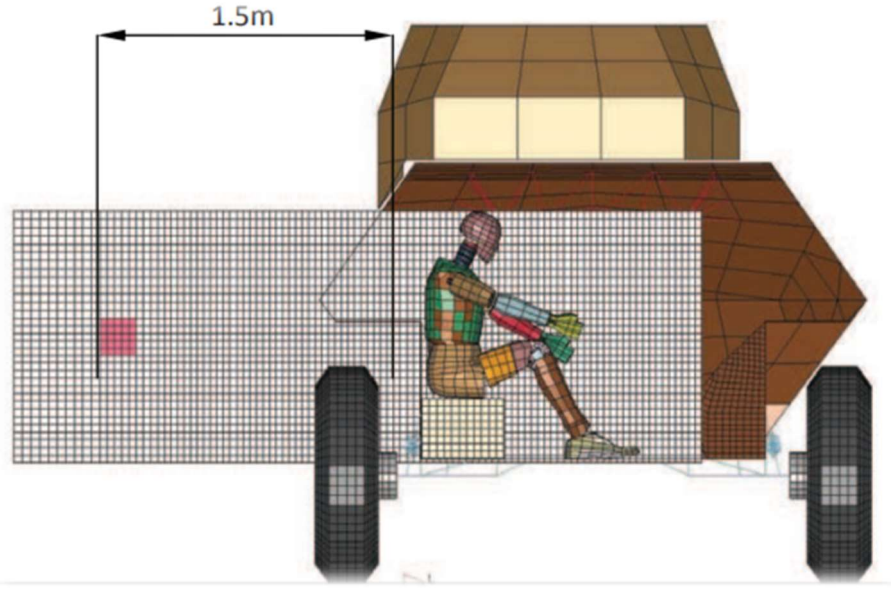
Sonlu elemanlar yöntemi ve zaman içinde açık entegrasyon algoritmasına dayanan Ls-Dyna yazılımı gerekli olan analizleri gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Özel aracın tam ölçekli bir modelinin geliştirilmesinden önce, bu tip araçların yapımında kullanılan zırh çeliğinin mekanik özellikleri üzerine laboratuvar testleri yapılmıştır. Patlama süreci, patlama dalgasının ön kısmının verilen sabit hızda hareket ettiği ve güçlü doğrusal olmayan bir yüzeyden kaynaklandığı varsayılan geometrik optik yaklaşımı ile modellenmiştir [46].

Analiz 5, 10 ve 15 kg'lık patlayıcılar için gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.13, içine bir insan modelinin yerleştirildiği hafif zırhlı bir aracın sayısal modelini sunmaktadır [46].



Şekil 2.13 : Sayısal analizlerde kullanılan prizma şeklinde bir hava modeline sahip aracın sayısal modeli [46].

Hesaplama sürecinde, çok sayıda çarpışma testinde doğrulanmış olan bir insan Hibrit III Erkek modeli uygulanmıştır. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi, aracın arka kısmına patlayıcı ile arasında 1,5 m mesafe olan bir kukla modeli yerleştirilmiştir.

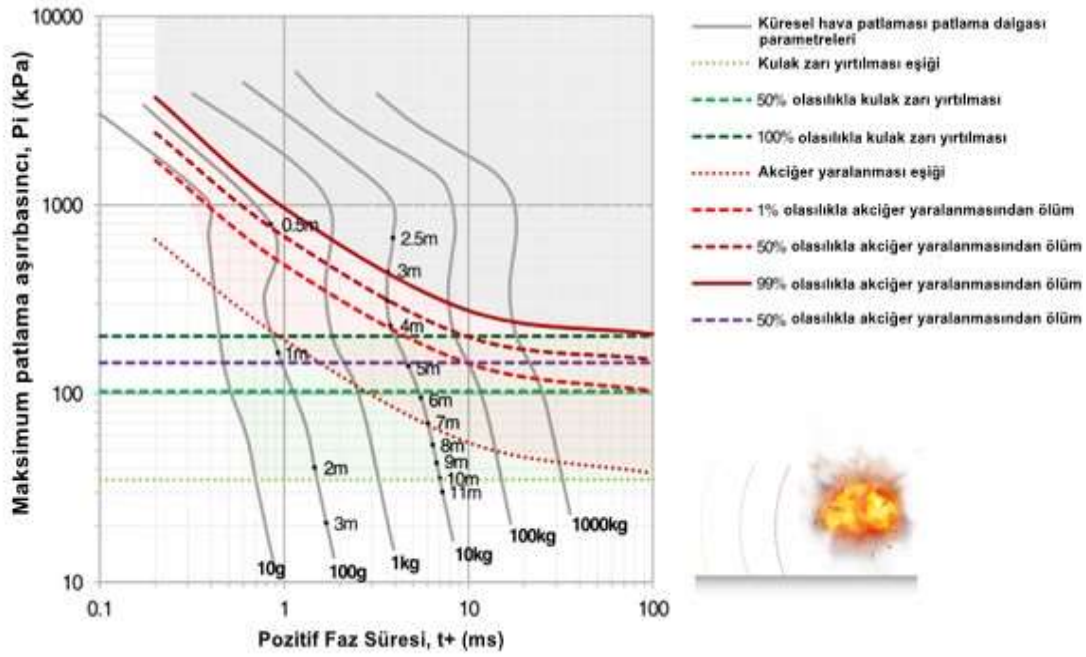


Şekil 2.14 : Patlama dalgasından etkilendiği varsayılan araç yolcusunun düzenini ve patlayıcının konumunu gösteren kesit resmi [46].

2.3.2.4 Analiz sonuçları

Mürettebatın hayati tehlikesinin değerlendirilmesinde kullanılan standart kriterler alt ekstremiteler (kol ve bacak), omurganın göğüs-omurga bölümü - DTİ (Dinamik Tepki İndeksi), boyun bölümü, omurga, göğüs, iç organlar ve baş ile ilgilidir. İncelenen makalede [46], LS-DYNA'da erişilebilen Kafa Yaralanması Kriterini kullanarak patlama dalgasının baş üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine odaklanılmıştır.

Ek olarak, farklı mesafelerde gerçekleşen küresel hava patlamalarında, patlama dalgası tepe basıncı ve pozitif faz sürelerinin kombinasyonlarını gösteren patlama dalgası parametreleri, ilgili patlayıcı kütlelerine göre gruplandırılmış bir dizi eğri olarak çizilmiş ve tahmini birincil patlama yaralanması (BPY) kriterleri ile üst üste getirilmiştir (Şekil 2.15) [59]. 100g ve 10kg'lık patlayıcılar için eğriler, düzenli aralıklara karşılık gelen, patlayıcıya olan mesafelerle birlikte çizilmiştir. Çizelge 2.6'da verilen gerçekteki patlama durumları için eşdeğer TNT patlayıcı kütleleri incelendiğinde, 100g ve 10kg'lık patlayıcı kütleleri sırasıyla anti-personel kara mayını ve el yapımı patlayıcı boyutlarındaki patlamaları yaklaşık olarak temsil etmektedir.



Şekil 2.15 : Farklı mesafelerde gerçekleşen küresel hava patlamalarından kaynaklanan patlama dalgası parametrelerine göre BPY kriterlerinin analizi [59].

Çizelge 2.6 : Gerçekçi patlayıcı tehditleri için yaklaşık TNT eşdeğer patlayıcı kütleleri [59].

Patlama Tehdit Grubu	Gerçekteki Örneği	Eşdeğer TNT Kütlesi
AP Kara Mayınları ve Beklenmedik Mühimmat	AP mayınları - 20-200g TNT Havan mermisi bombası (örn. 60mm HE80) - 200g TNT Misket bombası (örn. ShOAB 0.5) - 70 g TNT	20-250 g TNT
AV Kara Mayınları ve Patlayıcı Aygıtlar	Boru bombası – 2,3 kg AV mayınları - 3,5-7 kg TNT Canlı bomba kemeri - 4,5 kg Canlı bomba yeleği - 9 kg Bolonya demiryolu istasyonu terör saldırısı (1980) - 20 kg TNT Yuvarlanan bagaj bombası - 20-45 kg	1-50 kg TNT
Araç Kaynaklı EYP Tehditleri	Eski Bailey bombalı araç saldırısı, Londra (1973) - 80 kg TNT Bombalı araç saldırısı - 227-454 kg TNT Bombalı kamyon - 4500-13000 kg TNT Beyrut Uluslararası Havalimanı'nda bomba yüklü kamyon saldırısı (1983) - 5455 kg TNT	>75 kg TNT

Şekil 2.15'e göre, patlayıcı kütlesi arttıkça, yarananmayla ilgili tepe aşırı basınçlarda artan pozitif faz sürelerine sahip patlama dalgaları üretildiği görülebilir. Bu da daha büyük patlama tehditlerinin ve artan pozitif faz süreleriyle birlikte basınç eşikleri düştüğü için daha ciddi akciğer yaranmalarına yol açma olasılığının arttığı anlamına gelmektedir.

Belirli bir patlayıcı kütlesi için, farklı yaralanma türlerinin ve birincil patlama yaralanması riskinin ortaya çıktığı mesafe, BPY kriterleri ve Şekil 2.15'de verilen patlama dalgası parametrelerinin karşılaştırılması yoluyla analiz edilebilir. Örneğin, 100 g'lık bir patlayıcı için patlayıcıya olan 0,5 m'lik bir mesafede akciğer yaralanmasından kaynaklanan ölüm riski %50 iken, patlayıcıya olan 1 m'lik bir mesafede akciğer yaralanması eşik eğrisinin altında kaldığı için akciğer yaralanması beklenmez ancak kulak zarı yırtılması riski %100'e yakındır (Şekil 2.15). Ayrıca, 3 metrelik bir mesafede, beyinle ilgili yaralanma için herhangi bir minimum eşik kriteri bulunmadığından, etkili bir şekilde BPY beklenmeyecektir. Buna karşılık, 10 kg'lık bir patlayıcı için, patlayıcıya olan 3 m'lik mesafede akciğer yaralanmasından kaynaklanan %99'luk ölüm riski ve 3-7 metrelik mesafeler arasında ise akciğer yaralanmaları beklenir. Sonuç olarak, kütlesi daha büyük patlama tehditlerinin kütlesi daha küçük patlamalara kıyasla patlamadan daha uzak bir mesafede birincil patlama yaralanmalarına neden olduğu görülebilir. Daha küçük patlayıcı tehditleri için (örn. 100g TNT), BPY'larının söz konusu olduğu uzak mesafelerin nispeten sınırlı olduğu görülebilir [59].



3. PATLAMA YARALANMALARI

3.1 Patlama Yaralanmalarına Genel Bakış

Patlama yaralanmaları, yaralanma mekanizması, yaralanmaya neden olan durum, tedavi ve olay yeri ortamı gibi hususlar açısından diğer yaralanma türlerinden oldukça farklıdır. Bu nedenle, patlama yaralanmalarının yaralanma özellikleri ve epidemiyolojik özellikleri de diğer yaralanma türlerinden farklıdır.

Bir patlama yaralanması sırasında patlama dalgasının hem doğrudan hem de dolaylı etkileri vücuda etki ettiğinden, yaralanan doku ve organlar, yaralanma mekanizmaları ve süreçleri göz önünde bulundurulduğunda işler çok karmaşık hale gelebilir. Bu durum, yaralanmanın meydana geldiği ortam ve koşulların farklılığı nedeniyle daha da karmaşık bir hal almaktadır. Bu nedenle, patlama yaralanmaları diğer yaralanma türlerinde görülmeyen özelliklerle karakterize edilir. Genel olarak, patlama yaralanmasının özellikleri şunları içerir [60]:

- Karmaşık yaralanma : Bir patlama dalgasının dinamik basıncı, negatif basıncı ve aşırı basıncının tümü birlikte veya tek başlarına hareket ettiklerinde hem dolaylı olarak hem de doğrudan yaralanmaya sebebiyet verebilir. Yaralanma nedenleri ve yöntemlerindeki bu çeşitlilik, patlama yaralanması türlerinin ve koşullarının karmaşık olduğu anlamına gelir. Çoğu patlama yaralanması birden fazla vücut parçasında yaralanmadır ve çok sayıda organ ve vücut bölümünde dış ve iç yaralanmalar aynı anda meydana gelebilir. Patlama yaralanmalarının çoğu yanma-patlama kombine yaralanması, patlama-radyasyon kombine yaralanması veya patlama-parçalanma kombine yaralanması gibi birleşik yaralanmalardır.

- Patlama yaralanmaları çoğunlukla belirli, hedef organları etkiler. Patlama ile vücudun herhangi bir dokusu veya bölümü zarar görebilse de, şok dalgasının yayılma ortamı ve özellikleri nedeniyle, birçok patlama yaralanması belirli organları etkiler. Hava içeren organlar ve dokular su altı patlaması yaralanması ve hava patlaması yaralanmasının birincil mağdurlarıdır. Bu yüzden, bu tür patlama yaralanmalarında gastrointestinal sistemdeki, kulak zarındaki ve akciğerlerdeki yaralanmalar neredeyse kaçınılmazdır. Bu arada katı patlama yaralanması neredeyse her zaman şok dalgasının yayıldığı katı ortamla doğrudan temas halinde olan vücut parçalarında veya yayılan şok dalgasının uzunlamasına etki ettiği vücut bölümlerinde etkilidir. Bu nedenle,

patlama yaralanmasında hasar gören hedef organın belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

- Hafif dış yaralanma ve ciddi iç yaralanma: Bu özellik, patlama dalgasının mekanizmalarının ve etki biçimlerinin bir sonucudur. Bir şok dalgası vücuda etki ettiğinde, özellikle de sadece aşırı basınç veya negatif basınçtan kaynaklanan yaralanmalarda yüzeydeki yaralanmalar genellikle hafif görünür, hatta vücut yüzeyinde belirgin bir hasar belirtisi bile olmayabilir. Fakat, içerideki hedef organlar (gastrointestinal sistem veya akciğerler gibi) ise zaten ağır hasar almış olabilir. Büyük bir bomba patlaması deneyinde, bir hayvan patlamanın merkezine daha yakın olduğunda vücut yüzeyinde ve uzuvlarda gözle görülür dış yaralanma belirtileri olabilir, ancak iç organlardaki yaralanmalar her zaman daha ağırdır ve çoğu zaman ölümün birincil nedenidir.

- Yaralanmanın hızla kötüleşmesi: Ağır veya en kötü patlama yaralanmalarında, yaralanmadan hemen sonra kısa bir süre içinde nispeten istikrarlı bir telafi dönemi vardır, ancak tedavi derhal uygulanmazsa yaralının durumu hızla kötüleşir. Özellikle akciğer kanamaları, beyin hasarı, akciğerlerde ödem veya diğer organ hasarları kötüleşmeyi daha da hızlandıracaktır.

3.2 Patlama Yaralanması Türleri ve Mekanizmaları

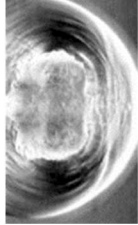
İnsan vücudunun kafa, boyun-omurilik, göğüs, karın, üst ekstremité ve alt ekstremité gibi farklı bölümleri için yaygın karşılan patlama yaralanması türleri özet olarak Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yaygın karşılaşılan yaralanma türleri [49].

İnsan Vücudu Bölümü					
Kafa bölgesi	Boyun-Omurilik	Göğüs bölgesi	Karın bölgesi	Üst Ekstremité	Alt Ekstremité
Kafatası kırılması (beyin açıkta)	Aşırı hareketlilik / Omurga kırığı	Aşırı morarma	Yabancı cisim penetran yaralanma	Üst/ön kol kırığı	Tibia/Fibular/Femur kırıkları
Üst çene kemiği kırılması	Paravertebral hematom	Yabancı cisim penetran yaralanma	Yırtılma	Omuz/dirsek/bilekte kesilmeler	Ayak yaralanması
Beyin dokusunun bozulması	Derin termal yanıklar	Yırtıklar	Termal yanıklar	El yaralanması	Pelvis kırığı / pelviste bozulma
İntrakraniyal kanamalar	Boyunda yabancı cisim penetran yaralanması	Hemotoraks / Pnömotoraks	Dalak parçalanması	Penetran yabancı cisim yaralanmaları (metalik, cam)	Penetran yabancı cisim yaralanmaları (metalik, cam)
Dokularda yırtılma (penetran yaralanma)	Yırtılma	Akciğer kontüzyonları	Böbrek hasarı	Travmatik amputasyon	Travmatik amputasyon
Kulak zarı yırtılması		Kaburgaların kırılması		Yırtılma ve soyulma	Yırtılma ve soyulma
Derin termal yanıklar		Derin termal yanıklar		Derin termal yanıklar	Derin termal yanıklar
Göz küresi yırtılması (yabancı cisim penetran yaralanması)		Solunum sıkıntısı			
Orbita yaralanması ve kırığı					
Morarma					

Çizelge 3.2’de ise, patlama yaralanmalarının birincil, ikincil, üçüncül, dördüncül ve beşincil olarak sınıflandırıldığı görülebilir [1].

Çizelge 3.2 : Patlama yaralanması mekanizmaları [1].

	Birincil	İkincil	Üçüncül	Dördüncül	Beşincil
Mekanizma					
Tanım	<u>Yüksek dereceli patlayıcılar :</u> -Aşırı basınç dalgasının vücut yüzeyleri üzerindeki etkisi	<u>Yüksek ve düşük dereceli patlayıcılar :</u> -Uçan cisimler, bomba parçaları ve diğer mermiler nedeniyle	<u>Yüksek dereceli patlama :</u> -Patlama rüzgarları veya yapısal çökme nedeniyle savrulan bireyler nedeniyle	<u>Birincil, ikincil veya üçüncül mekanizmalara bağlı olmayan patlamayla ilgili her türlü yaralanma, hastalık veya rahatsızlık :</u> -Önceden var olan hastalıkların alevlenmesini içerir	Yaralanma kompleksi ve travmanın şiddeti ile ilgili olmayan hiperinflamatuar davranış
Yüksek Oranlı Yaralanmalar	-Akciğer patlaması -Kulak zarı yırtılması -Karınsal kanama -Göz küresi yırtılması	-Yumuşak doku yaralanması -Yara kontaminasyonu	-Uçan insan yaralanması -Kemik kırığı -Kapalı ve açık beyin yaralanması	-Yanma -Ezilme yaralanması -Solunum rahatsızlığı	-Uzun süreli şok ve düşük tansiyon

Patlama sonucu oluşan patlama dalgası yaygın olarak akciğerler, kulak zarı ve bağırsak gibi gaz içeren organlara etki eden birincil patlama yaralanmalarına sebep olur [2]. Birincil patlama yaralanmaları tipik olarak üç farklı mekanizmadan kaynaklanır: parçalanma, iç patlama ve kesme yaralanmaları. Parçalanma, basınçlı patlama dalgası yoğun bir ortamdan daha az yoğun bir ortama (bağırsak duvarından gaz dolu bağırsağa geçiş) geçtiğinde meydana gelir. İç patlama, normal şartlarda sıkılaştırılamayan dokuların (katı-sert organlar) sıkılaştırılmasından kaynaklanır. Kesme yaralanma mekanizması ise, dokuların yer değiştirmesine neden olan hızlanma ve yavaşlamalardan kaynaklanarak yırtılma yaralanmalarına sebep olur.

İkincil yaralanma, bomba cihazından gelen şarapnel veya çevreden gelen ikincil parçalardan oluşabilir [3,4]. Bu yaralanma ‘uçan cisim’ yaralanmaları olarak da düşünülebilir ve patlama rüzgarının neden olduğu enkazın doğrudan etkisinin sonucudur. Bu tarz yaralanmalardaki hasar vücutta koruyucu ekipman (zırh gibi) kullanımı ile sınırlandırılabilir.

Üçüncül yaralanmalar, patlama rüzgarının tüm vücuda yayılması (uçan insanların yaralanması) veya yapısal bir çökmenin sonucudur [3,4,5].

Dördüncül yaralanmalar; yanıklar, inhalasyon yaralanmaları, radyasyon, ezilme yaralanmaları, psikolojik etkiler, baktariyel kontaminasyon ve birincil ile üçüncül yaralanmalar arasında sınıflandırılmayan acil yaralanmaları içeren diğer patlama etkileridir [3,4,5].

Son olarak, nispeten yeni tanımlanan bir tür olan beşinci derece patlama yaralanmaları, patlama ile ilişkili kimyasallara bağlı olabilen ve hiperpireksi, terleme, pozitif sıvı dengesi şeklinde kendini gösteren ve birkaç saatten 5 güne kadar süren gecikmiş bir hiper-inflamatuvar yanıttır [6,7]. Bazı tanımlar, radyasyon ve bakteriyel maruziyeti de dördüncül yaralanmalar yerine bu sınıfa dahil etmektedir [8].

3.3 Yaralanma Ölçeklendirmesi

Yaralanma ölçeği, travmatik yaralanmalara sayısal bir değerlendirme veya ciddiyet puanı atamak için kullanılan bir tekniktir. Amerikan Otomotiv Tıbbi Derneği tarafından geliştirilen ve ilk olarak 1971 yılında yayınlanan Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği (KYÖ) en yaygın olarak kullanılan yaralanma ölçeğidir.

3.3.1 Kısaltılmış yaralanma ölçeği (KYÖ)

KYÖ, farklı anatomik yaralanmalara 1 ila 6 arasında bir yaralanma şiddeti atayarak gruplandırma yapan bir yaralanma ölçeklendirme metodudur. Çizelge 3.3’de KYÖ tanımlamaları ve kafa ve omurga yaralanmalarına ait örnekler verilmektedir. Tüm birey için olası sonucu göstermemesi ve her bir yaralanmaya tek başına bakması KYÖ’nün birincil sınırlamasıdır [50].

Çizelge 3.3 : Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği (KYÖ) skorları ve iki vücut bölgesi için örnek yaralanma tipleri [50].

KYÖ	Şiddeti	Kafa	Omurga
0	-	-	-
1	Hafif	Baş ağrısı veya baş dönmesi	Akut zorlanma
2	Orta	Bilinci 1 saatten az kapalı - doğrusal kırık	Küçük kırık
3	Ciddi	Bilinci kapalı (1-6 saat) - depresif kırık	Sinir kökü hasarı ile birlikte disk yırtılması
4	Şiddetli	Bilinci kapalı (6-24 saat) - açık kırık	Tamamlanmamış servikal kord sendromu
5	Kritik	Bilinci 24 saatten uzun süredir kapalı	C4 veya altı servikal tam kord sendromu
6	Maksimum Yaralanma (Fiilen hayatta kalamaz)	Hayatta kalamaz	C3 veya üzeri servikal kord sendromu

3.3.2 Yaralanma şiddeti skoru (YŞS)

1974 yılında geliştirilen Yaralanma Şiddeti Skoru (YŞS) ise, birden fazla yaralanması olan travma hastasını karakterize eden bir yöntemdir ve KYÖ ile olan bağlantısından dolayı travma literatüründe yaygın kullanılan yaralanma ölçeklendirme sistemlerinden birisidir. YŞS, vücudun farklı bölümlerindeki yaralanmanın şiddetini tanımlayan KYÖ’ne dayanmaktadır [57].

$$YŞS = (A)^2 + (B)^2 + (C)^2 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de verilen A, B ve C değerleri vücut bölgelerinden en çok yaralanan üçünün kısaltılmış yaralanma ölçeğine göre puanını göstermektedir. A: baş, boyun ve yüz, B: göğüs ve karın, C: ekstremiteleri belirtmektedir. Her biri için maksimum KYÖ puanının 5 olduğu düşünüldüğünde, YŞS 0 ila 75 arasında değer almaktadır. Ancak, üç değerden biri 6 ise, YŞS otomatik olarak 75’e ayarlanır çünkü KYÖ puanı olarak 6 hayatta kalmanın mümkün olmadığı yaralanma türüne verilen skordur. Çizelge 3.4’de farklı değer aralıklarındaki yaralanma şiddeti skorları için oluşabilecek yaralanmanın tanımı, seviyesi ve örnek yaralanmalar belirtilmiştir [58] :

Çizelge 3.4 : Yaralanmaya dayalı hasar seviyesi tanımları (YŞS) [58].

YŞS Aralığı	Yaralanma Seviyesi	Yaralanma Tanımı	Örnek Yaralanmalar
$YŞS \geq 25$	Kritik	Ölümcül	Çok sayıda vücut bölümünde yaralanma ile olan ölümler
$10 < YŞS < 25$	Ciddi	Ciddi, hayatı tehdit eden yaralanma	Önemli kan kaybı ile olan yırtılmalar Şiddetli açık kemik kırıkları Ezilme yaralanmaları Kafatası kırıkları
$5 < YŞS \leq 10$	Orta	Hastaneye yatış gerekir, hayatı tehdit yok	Kemik kırılmaları Çok sayıda yırtılma Damar veya tendon yırtılması Beyin sarsıntısı
$1 < YŞS \leq 5$	Düşük	Tıbbi yardım gerekli. Hastaneye yatışa gerek yok	Yüzde ve vücutta cam parçalarından kaynaklanan yırtılmalar Gözde sıyrıklar Ezilmeler
$0 \leq YŞS \leq 1$	Minimal	Tıbbi yardıma gerek yok	Küçük morluklar ve kesikler İşitme kaybı Gözde küçük yabancı cisimler

3.3.3 Dinamik tepki indeksi (DTİ)

Dinamik Tepki İndeksi (DTİ) spinal kolonun (omurganın) maksimum dinamik basıncını temsil eder ve insan vücudunu bir kütle, yay ve sönümleyiciden oluşan analog, toplu kütle parametrelili mekanik bir model açısından tanımlayarak hesaplanır [51]. İnsan vücudunun geçici ivme-zaman profillerine verdiği tepkiyi DTİ modeli değerlendirir. DTİ, fırlatma koltuklarındaki pozitif z-ivmelenme ortamları için potansiyel omurga yaralanmasını tahmin etmede etkili olmuştur. DTİ için sınır ivme değerleri Çizelge 3.5’de verilmiştir:

Çizelge 3.5 : Dinamik Tepki (DT) Sınırları [50].

DT Seviyesi	İvmelenme yönü					
	x		y		z	
	$DT_x < 0$	$DT_x > 0$	$DT_y < 0$	$DT_y > 0$	$DT_z < 0$	$DT_z > 0$
Düşük	-28	35	-14	14	-13,4	15,2
Orta	-35	40	-17	17	-16,5	18
Yüksek Riskli	-46	46	-22	22	-20,4	22,4

3.3.4 Lumbar (bele ait) yük kriteri

Bel yükü kriteri, baskın darbe vektörünün omurganın dikey eksenine paralel olduğu bir çarpışma darbesi için test mankeninin pelvis ve bel omurgası arasında ölçülen maksimum basınç kuvvetinin 1500 lb'yi (6672 N) aşmaması gerektiğini belirtir. Ayrıca, basınç kuvveti 30 milisaniyelik bir aralıkta 3800 N'u da aşmamalıdır. Bu kriter, darbe testleri ve düşey çarpışma testlerinde en yaygın kullanılan kriterlerdendir. Omuriliğin ciddi şekilde sıkışması veya kopması anında felce veya ölüme de yol açabilir [50].

3.3.5 Kafa yaralanması kriteri (KYK)

Kafa Yaralanması Kriteri (KYK), bir darbeden kaynaklanan kafa yaralanması olasılığının bir ölçüsüdür. Normalde bu değişken, kukla darbe kuvvetlerine maruz kaldığında, kuklanın kafasının ağırlık merkezine monte edilen bir ivmeölçerin ivme/zaman geçmişinden elde edilir:

$$KYK = \max [(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{(t_2 - t_1)} \left[\int_{t_1}^{t_2} a(\tau) d\tau \right] \right)^{2.5}] \quad (3.2)$$

Burada $a(t)$ kuklanın başının kütle merkezinde hesaplanan ivme-zaman geçmişi'dir. Analitik olarak, denklem 3.3'de verildiği gibi 15 ms'lik bir zaman aralığında kuklanın başı için, x, y ve z yönlerinin ivme-zaman geçmişlerinin karelerinin toplamının karekökü olarak hesaplanır:

$$a(t) = \sqrt{(a_x^2(t)) + (a_y^2(t)) + (a_z^2(t))} \quad (3.3)$$

KYK formülasyonunda; t_1 başlangıç zamanını, ($\Delta t = t_2 - t_1$) ise ivmenin hesaplandığı maksimum zaman aralığını ifade etmektedir. $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq T$ koşulu dışında, t_1 başlangıç zamanı ve maksimum zaman aralığını ifade eden $\Delta t = t_2 - t_1$ 'in ilk başta rastgele seçilebileceği belirtilmiştir. Bunun dışında bazı basitleştirici model varsayımları da şöyle açıklanabilir [46]:

$t_2 - t_1 \leq 36$ ms olması talep edilmiştir. Deneyimlere göre, daha uzun yavaşlama süreleri yaralanma riskini artırmamaktadır.

Tepe ivme değerleri 3 ms sürmelidir. Bu gerekliliğin ölçüm tekniğinden kaynaklanan nedenleri vardır ve daha kısa süreli yavaşlamaların beyin üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı varsayımıyla desteklenmektedir.

Kafa travması kriterleri dört farklı yaralanma kriterinden oluşmaktadır [46]:

- Kafa Yaralanması Kriteri (KYK : [HIC]) : Düz cisim çarpmalarında beyin hasarı ve kafatası kırığı
- Kunt Cisim Kafatası Kırığı Yaralanma Kriteri [kN] : Kunt cisim darbelerinden kaynaklanan kafatası kırığı
- Yüz Yaralanma Kriteri [kN/mm] : Kunt cisim darbelerinden kaynaklanan yüz kırığı ve yaralanması
- Yüz Yırtılması Kriteri : Yüzde yırtılma

Kafa yaralanması kriteri ile ilgili seviyeler, bunlara karşılık gelen kısaltılmış yaralanma ölçeği (KYÖ) değerleri ve ilişkili olan kafa yaralanması veya bilinç düzeyine ait açıklamalar Çizelge 3.6’da verilmiştir:

Çizelge 3.6 : Kafa yaralanması kriterleriyle ilişkili olarak bilinç düzeyleri [46].

Kafa Yaralanması Kriterleri	KYÖ Kodu	Beyin Sarsıntısı ve Kafa Yaralanması Seviyesinin Açıklaması
135 - 519	1	Baş ağrısı veya baş dönmesi
520 - 899	2	Bilinci 1 saatten az kapalı - doğrusal kırık
900 - 1254	3	Bilinci kapalı (1-6 saat) - depresif kırık
1255 - 1574	4	Bilinci kapalı (6-24 saat) - açık kırık
1575 - 1859	5	Bilinci 24 saatten uzun süredir kapalı
> 1860	6	Hayatta kalamaz

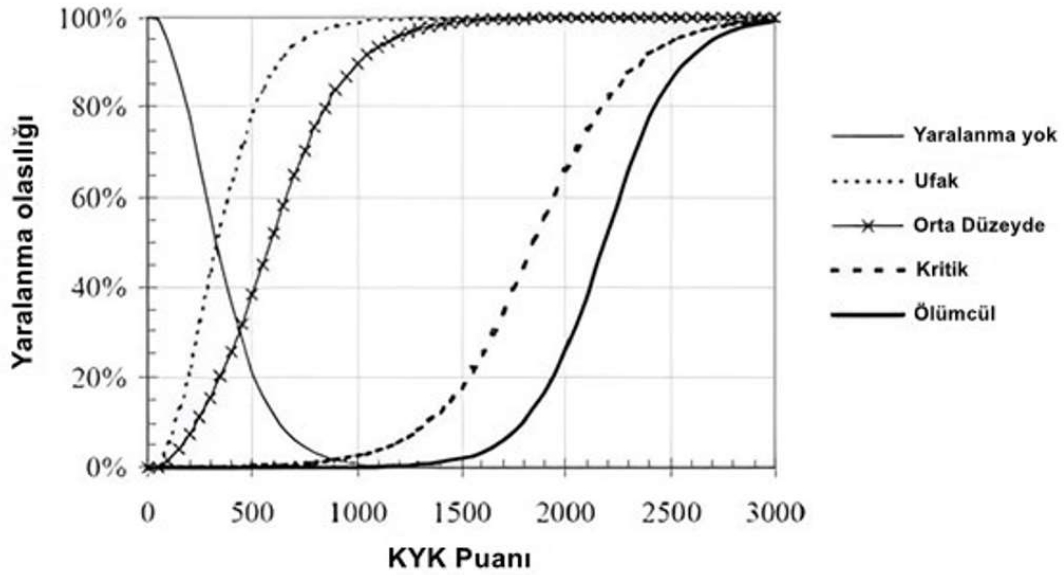
Çizelge 3.7’de ise farklı türlerdeki kafa yaralanması kriterlerine ait tolerans seviyeleri ve ilgili açıklamaları verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Kafa yaralanması kriterleri tolerans seviyeleri [46].

Yaralanma Kriterleri		Tolerans Seviyeleri				
Kriter	Birim	Seviye 0	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
		Yaralanma Yok	Hafif Yaralanma	Ağır Yaralanma	Ağır Yaralanma – Ciddi Tıbbi Yardım	Potansiyel Olarak Hayatta Kalamaz
KYK - Beyin Hasarı	HIC (15 ms)	<150	<150	150 - 500	500 - 1800	1800
KYK - Kafatası Kırığı	HIC (15 ms)	<500	<500	500 - 900	900 - 1800	1800
Kunt Nesne Kafatası Kırılması	kN	<2,2	<2,2	2,2 - 5,5	>5,5	<5,5
Yüz Yaralanması	kN/mm	>0,02	0,02 - 0,045	0,045 - 0,0825	>0,0825	>0,0825
Yüz Yırtılması	--	0	0	Orta Düzeyde	Büyük	--

Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7, yürütülen sayısal analizlerde kuklanın maruz kaldığı yaralanmaların değerlendirilmesi için kullanılır.

Belirli bir kafa yaralanması kriteri puanı için farklı şiddetlerdeki kafa travması seviyelerinin olasılıkları Şekil 3.1’de verilmiştir. Grafiğe bakıldığında, 2500 gibi bir KYK puanı için %80 oranında ölümcül, %95 civarında da kritik kafa travması seviyelerinin olduğu görülebilir [46].



Şekil 3.1 : Belirli bir KYK puanı için farklı şiddetlerdeki kafa travması seviyelerinin olasılıkları [46].

3.3.6 Boyun yaralanma kriteri (BYK)

Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi (UKTĞİ) tarafından önerilen boyun yaralanma, N_{ij} kriterleri, oksipital kondilde ölçülen kuvvetlerin ve momentlerin etkilerini birleştirir ve kraniyoservikal yaralanmaların daha iyi bir öngörücüsüdür. N_{ij} kriterleri, N_{TE} (çekme-uzama), N_{TF} (çekme-eğilme), N_{CE} (basınç-uzama) ve N_{CF} 'yi (basınç-eğilme) kriterlerini dikkate alır. Federal Motorlu Araç Güvenlik Standardı (FMAGS) 208, dört N_{ij} değerinden hiçbirinin herhangi bir noktada 1,4'ü aşmamasını gerektirir. Genelleştirilmiş boyun yaralanma kriteri N_{ij} ise aşağıdaki denklemde verilmektedir [52]:

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_y}{M_{yc}} \quad (3.4)$$

Burada, F_z üst boyun için eksenel kuvvet (N), F_{zc} kritik eksenel kuvvet (N), M_y oksipital kondil etrafındaki moment (Nm) ve M_{yc} ise oksipital kondil etrafındaki kritik moment (Nm) değerlerini göstermektedir.

3.3.7 Göğüs yaralanma kriteri

Üst torakstaki üç eksenli ivmeölçer ile ölçülen maksimum ivme 3 ms'den uzun süre 60 g'yi aşmamalıdır. Ayrıca, göğüs kafesinin arkasındaki bir göğüs potansiyometresi ile ölçülen göğüs sıkışması Hibrit III kukla için 7,62 cm'den (3 inch) az olmalıdır [53].

3.3.8 Femur kuvveti kriteri

Femur kuvveti kriteri, her bir üst bacak boyunca eksenel olarak iletilen basınç kuvvetinin belirli bir limit değerden küçük olması gerektiğini belirtir. Bu sınırı aşan darbe yükleri femur (kalça-uyluk) kemiğinin tamamen kırılmasına ve aşırı kanamaya neden olabilecek ana arterlerin kopmasına neden olabilir. Farklı referanslar izin verilen maksimum basınç eksenel kuvveti için farklı değerler belirtmektedir. Wayne State Üniversitesi izin verilen maksimum değer 10000 N olduğunu belirtmektedir. ABD Ordu Bakanlığı ise eksenel basınç kuvvetinin 10 milisaniyelik bir aralıkta 7562 N'u ve herhangi bir anda ise 9074 N'u aşmaması gerektiğini belirtmektedir [50].

Gerçek mankenlerde, mankenin bacağına yerleştirilen yük hücrelerinden femurdaki basınç kuvvetini elde etmek için kalibrasyon işlemi yapılır. Sayısal mankenlerde ise, bacak modeline sertliği bilinen ayırık yay elemanları tanımlanır ve bunlardan femurdaki eksenel basınç kuvveti kolayca elde edilebilir.

4. TARTIŞMA VE LİTERATÜR SONUÇLARI

4.1 Patlama Yaralanması Görülme ve Ölüm Oranları

Modern, yüksek teknolojili ve yüksek patlayıcılı silahlardaki ilerlemeler ve silahlı çatışma şekli ve yöntemindeki değişikliklerle birlikte, modern savaşta çeşitli türlerde yüksek hızlı ve yüksek patlayıcılı silahların (el yapımı patlayıcılar da dahil olmak üzere) kullanımı giderek artmış ve patlama ve infilaklardan kaynaklanan yaralanma ve kayıp oranları yükselmeye devam etmiştir.

Askeri eylemlere bakıldığında, 2001 ve 2014 yılları arasında Afganistan ve Irak'ta 6700'den fazla Amerikan askeri patlamalar sonucu hayatını kaybetmiş ve 50.000'den fazlası da yaralanmıştır. Mart 2003 ile Ekim 2011 arasında Irak'taki ABD kuvvetleri için, sadece el yapımı patlayıcılar (EYP) yaklaşık 2200 Amerikan askerinin ölümüne ve 22.000'inin de yaralanmasına neden olmuştur. Bu süre zarfında Irak'taki iki askeri hareket nedeniyle, Iraklı askerler ve normal vatandaşlar arasındaki ölüm ve kayıpların sayısını saymak ve hatta tahmin etmek daha da zordur [60].

Özellikle yıkıcı olan bombalı terör saldırıları olmak üzere, geçtiğimiz birkaç on yıl içinde dünya genelinde patlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilen pek çok şiddetli eylem yaşanmıştır. Sadece İsrail'de Eylül 2000 ile Aralık 2003 tarihleri arasında yaklaşık 20.000 terör saldırısı gerçekleştirilmiş, bu saldırılarda yaklaşık 900 kişi hayatını kaybetmiş, bunların 412'sini intihar saldırıları oluşturmuş ve toplam 45.789 kişi hayatını kaybetmiştir. UNESCO Barış Merkezi'nin raporuna göre 11 Eylül 1993 ile 10 Eylül 2009 tarihleri arasında dünya genelinde çok sayıda yaralanma ve ölümle sonuçlanan 624 bombalı terör saldırısı meydana gelmiş ve toplam 26.073 kişi hayatını kaybetmiştir. 2001'deki 11 Eylül saldırıları bir dönüm noktası olmuştur; önceki 8 yılda 68 büyük terörist bombalama eylemi (11 Eylül'ün kendisi de dahil olmak üzere) gerçekleşmiş ve 3921 kişinin ölümüyle sonuçlanmıştır. Sonraki 8 yılda ise 556 büyük terörist bombalama eylemi gerçekleşmiş ve toplam 22.152 kişi hayatını kaybetmiştir; olay sayısı ve vaka sayısı ilk 8 yıla göre sırasıyla 8,2 kat ve 5,7 kat daha fazladır [60].

Çin'deki Devlet İş Güvenliği İdaresi (DİGİ), patlamaların neden olduğu sivil kayıplara ilişkin ülke çapında bir veri tabanıdır (<http://www.chinasafety.gov.cn/newpage>). DİGİ veri tabanında 1 Ocak 2000 ile 30 Nisan 2017 tarihleri arasında toplam 2098 patlama kazası tespit edilmiştir. Toplam can kaybı 29.579'dur: 15.788 ölüm (%53,4), 6130 ağır

yaralanma (%20,7), 6507 hafif yaralanma (%22,0) ve 1154 kayıp (%3,9). Pearson korelasyon analizi, toplam patlama kazası sayısı ile ölüm sayısı arasında pozitif bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur ($r = 0.881$, $P = 0.0004$, Çizelge 4.1). 2004 ve 2005 yılları en yüksek patlama kazası ve buna bağlı ölüm sayısına sahiptir [62].

Çizelge 4.1 : Yıllara göre patlama görülmesi ve buna bağlı can kaybı değerleri [62].

Yıl	Toplam patlamalar (n=2098) [n(%)]	Toplam ölüm (n=29579) [n(%)]	Yaralı (n=12637) [n(%)]	Ölü (n=15788) [n(%)]	Kayıp (n=1154) [n(%)]	Toplam Nüfus (/10 ⁷)	Milyon kişi başına patlama yaralanması oranı *	Milyon kişi başına ölüm oranı #
2017	11 (0,5)	86 (0,3)	35 (0,3)	48 (0,3)	3 (0,3)	--	--	--
2016	41 (2,0)	576 (1,9)	260 (2,1)	306 (1,9)	10 (0,9)	139,0	0,29	2,20
2015	38 (1,8)	1878 (6,3)	1502 (11,9)	362 (2,3)	14 (1,2)	137,5	0,28	2,63
2014	61 (2,9)	1443 (4,9)	915 (7,2)	523 (3,3)	5 (0,4)	136,8	0,45	3,82
2013	74 (3,5)	1490 (5,0)	805 (6,4)	671 (4,3)	14 (1,2)	136,1	0,54	4,93
2012	63 (3,0)	1019 (3,4)	539 (4,3)	467 (3,0)	13 (1,1)	135,4	0,47	3,45
2011	107 (5,1)	1241 (4,2)	686 (5,4)	515 (3,3)	40 (3,5)	134,8	0,79	3,82
2010	135 (6,4)	1981 (6,7)	1182 (9,4)	756 (4,8)	43 (3,7)	134,1	1,01	5,64
2009	115 (5,5)	1480 (5,0)	700 (5,5)	744 (4,7)	36 (3,1)	133,5	0,86	5,57
2008	87 (4,1)	1049 (3,5)	464 (3,7)	559 (3,5)	26 (2,3)	132,8	0,66	4,21
2007	118 (5,6)	1381 (4,7)	507 (4,0)	804 (5,1)	70 (6,1)	132,1	0,89	6,09
2006	147 (7,0)	1979 (6,7)	747 (5,9)	1173 (7,4)	59 (5,1)	131,5	1,12	8,92
2005	168 (8,0)	2701 (9,1)	814 (6,4)	1824 (11,6)	63 (5,5)	130,8	1,28	13,94
2004	193 (9,2)	2275 (7,7)	741 (5,9)	1421 (9,0)	113 (9,8)	130,0	1,48	10,93
2003	219 (10,4)	2390 (8,1)	906 (7,2)	1382 (8,8)	102 (8,8)	129,2	1,70	10,70
2002	211 (10,1)	2051 (6,9)	512 (4,1)	1421 (9,0)	118 (10,2)	128,5	1,64	11,06
2001	201 (9,6)	2171 (7,3)	535 (4,2)	1407 (8,9)	229 (19,8)	127,6	1,58	11,03
2000	109 (5,2)	2388 (8,1)	787 (6,2)	1405 (8,9)	196 (17,0)	126,7	0,86	11,09

*Milyon kişi başına patlama yaralanması oranı = Kaza sayısı / Toplam nüfus x 10⁶;

#Milyon kişi başına ölüm oranı = Toplam ölüm / Çin'in toplam nüfusu x 10⁶

a: 2017'de sadece ilk dört ay dahil edilmiştir; "--" : Veri yok.

Buradaki patlamaların nedenleri havai fişekler, kömür madeni gazı, patlayıcı madde, yanıcı patlayıcılar, yüksek basınçlı ekipman, kimyasal ürün ve diğerleri olmak üzere yedi türe ayrılmıştır. Patlamaların dörtte üçünden fazlası kömür madeni gazından (1029, %49,1), havai fişeklerden (323, %15,4) veya yanıcı patlayıcılardan (260, %12,4) kaynaklanmıştır (Çizelge 4.2) [62].

Çizelge 4.2 : Patlama türlerine göre kayıp dağılımı [n(%)] [62].

Patlayıcı türü	Patlama sayısı	Toplam ölüm	Ciddi yaralı hastalar	Hafif yaralı hastalar	Ölümler	Kayıplar
Kömür madeni gazı	1029 (49,0)	14360 (48,5)	1641 (26,8)	2191 (33,7)	9620 (60,9)	908 (78,7)
Havai fişekler	323 (15,4)	3945 (13,3)	907 (14,8)	1105 (17,0)	1857 (11,8)	76 (6,6)
Patlayıcı patlatma maddesi	187 (8,9)	2970 (10,0)	683 (11,1)	937 (14,4)	1286 (8,1)	64 (5,5)
Kimyasal ürün	158 (7,5)	2897 (9,8)	583 (9,5)	1280 (19,7)	992 (6,3)	42 (3,6)
Yüksek basınç ekipmanları	112 (5,3)	919 (3,1)	333 (5,4)	130 (2,0)	449 (2,8)	7 (0,6)
Yanıcı patlayıcı	260 (12,4)	4260 (14,4)	1921 (31,3)	816 (12,5)	1468 (9,3)	55 (4,8)
Diğer	29 (1,4)	228 (0,8)	62 (1,0)	48 (0,7)	116 (0,7)	2 (0,2)

Hali hazırda, dünyanın herhangi bir yerinde bombalamaya bağlı yaralanmalarla ilgili nispeten tek tip bir veri tabanı bulunmamaktadır. Buna ek olarak, savaşta patlamaya bağlı yaralanmalarla ilgili veri toplamının zorluğu nedeniyle, patlama yaralanmalarının epidemiyolojisi hakkında dünya çapında veriler içeren, en azından nispeten kapsamlı bir rapor veya analiz halen mevcut değildir. Ancak, son zamanlarda yaşanan olaylardan da açıkça görüldüğü üzere, dünya genelinde patlamaların yaşandığı bombalı saldırılar artmakta ve patlamanın dünya genelindeki toplum için yıkıcılığı daha da kötüye gitmektedir.

4.2 Patlama Yaralanmasında Limit Değerler

4.2.1 İnsan toleransı

4.2.1.1 Patlama basıncı

Bir patlamada, patlama çıktısına karşı insan toleransı nispeten yüksektir. Bununla birlikte, basınç cephesinin şekli (kademeli yükleme veya yavaş veya hızlı yükselme) ve bir kişinin patlama cephesine göre yönelimi (otururken, yüzü basınç cephesine dönük veya yan, yüzüstü veya ayakta) meydana gelen yaralanma derecesini belirlemede önemli etkenlerdir.

Patlayıcı ve şok tüpü testleri, patlama basıncı yaralanmalarında kritik hedef organ olarak akciğerlerin hava içeren dokularının kabul edilebileceğini göstermiştir.

Akciğerlerin bozulmuş alveollerinden vasküler sisteme hava kabarcıklarının salınması muhtemelen ölümlerin çoğuna neden olmaktadır.

Ayrıca, 690-825 kPa patlama basıncı aralığı patlama kaynaklı ölüm için eşik değer aralığı olarak görülürken, 895-1240 kPa aralığındaki değerler %50 olasılıkla ölümün meydana gelebileceğini, 1380-1725 kPa aralığındaki patlama basıncı değerlerinde ise neredeyse %100 olasılıkla patlama kaynaklı ölümün meydana geleceği belirtilmiştir [38].

Ek olarak, Çizelge 5.1’de verilen küresel hava patlamalarında birincil patlama yaralanması için limit patlama basıncı değerleri önerilirken; mevcut literatürde yer alan çok sayıda çalışmadan [38,46,49,50,59,60], küresel hava patlamalarında patlama insan yaralanmaları için patlama basıncına bağlı eşik değerler incelenip, derlenmiştir. Bunu yaparken, güvenli tarafta kalmak adına her bir vücut bölümü için referanslarda verilen minimum değerler veya değer aralıkları patlama yaralanmasında kritik değer olarak ele alınmıştır. Sonrasında ise patlama yaralanması için limit basınç değerleri ve ilgili pozitif faz süre aralıkları belirlenmiştir. Bunun için de ilgili referanstaki [59] farklı mesafelerde gerçekleşen küresel hava patlamalarına ait birincil patlama yaralanma kriterlerinin analizi dikkatlice incelenmiş ve yorumlanmıştır. Yorumlama yaparken; limit patlama basıncı değerinin seçilmesinde yaralanmanın kritikliğini de düşünerek patlamanın pozitif faz süre aralıkları için üst limitteki pozitif faz sürelerine ait patlama basıncının seçilmesine karar verilmiştir.

Son olarak, patlamalara karşı yapılar iç basınç oluşumunu kontrol edecek şekilde tasarlanabilir, ancak bir açıklıktan geçen basınç tarafından üretilen jet etkisi açıklığın iç tarafındaki basınçların artmasına neden olabilir. Şok dalgasının geçişi sırasında, bu artan basıncın büyüklüğü yapının iç kısmına etki eden maksimum ortalama basıncın birkaç katı kadar olabilir. Bu nedenle, püskürtmenin meydana geleceği açıklıklar değerli ekipmanların ve personelin bulunacağı alanlara yönlendirilmemelidir [38].

4.2.1.2 Yapısal hareket

İnsanın iki tür şoka maruz kalmaya karşı toleransının göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

- Vücudun hızlanmasına / yavaşlamasına neden olan darbeler
- Yapının titreşim hareketinden kaynaklanan vücuttaki titreşimler

Akla yatkın olan çarpma sonucu yaralanma şekli, kişinin yapının yatay hareketleri nedeniyle dengesini kaybederek diğer ekipmanlara, duvarlara, kişilere ve diğer sert yüzeylere doğru savrulmasından kaynaklanmaktadır.

İncelemeler, darbe için güvenli hızın 3 m/s'ye eşit olduğunu göstermiştir. 5,5 m/s değerinde kafatasının kırılma olasılığı neredeyse %50 iken, 7 m/s değerinde bu olasılık neredeyse %100'dür. Bu durum, sert, düz yüzeylere çarpma için çeşitli vücut duruşlarında geçerlidir. Bununla birlikte, sert bir yüzeye kafa çarpması için itme hattı doğrudan vücudun uzunlamasına eksenini boyunca ise (önce kafası düşen bir örnek), kafa tüm vücut kütlelerinin toplam kinetik enerjisini alacağından yukarıdaki hız toleransı geçerli değildir. Köşelere veya kenarlara çarpmalar da ise 3 m/s'den daha düşük hızlar bile son derece kritiktir. Oldukça sert bir duruşa sahip personel için 3 m/s'lik bir çarpma hızının genellikle güvenli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, çarpma alanı büyükse veya vücut daha esnek bir pozisyondaysa daha yüksek çarpma hızları tolere edilebilir [38].

Yatay hareketin personelin dengesi üzerindeki etkisi (dengesini bozması veya yana doğru fırlatması) vücudun duruşuna ve pozisyonuna, ivmenin süresine ve şiddetine ve ivmenin başlama hızına bağlıdır. Otomobil ve yolcu trenlerindeki ani duruşlarla ilgili verilerin incelenmesi, personelin dengesini kaybetmeden 0,44g'den daha düşük yatay ivmelere dayanabileceğini göstermektedir. Bu ivmeler birkaç saniyelik sürelerle sahiptir. Kılavuzda belirtilen daha kısa süreli ivmelenmeler muhtemelen daha büyük olacağından, nükleer patlamalardan kaynaklanan yer şoku etkilerine karşı ayakta, oturur veya yatar pozisyonundaki (kemerlerle bağlanmamış) personelin korunmasını sağlamak için gereken izin verilen yatay ivme 0,50g'dir [38].

Mevcut personel titreşim verilerine dayanarak, sınırlı hareket kabiliyetine sahip personel (kemerlerle bağlanmış) için izin verilen ve kabul edilen titreşim toleransları ise Çizelge 4.3'de verildiği gibidir [38]:

- 10 Hz'den az titreşim için 2g,
- 10-20 Hz titreşim aralığı için 5g,
- 20- 40 Hz titreşim seviyeleri için 7g,
- 40 Hz üzerindeki titreşimler için ise 10g.

Çizelge 4.3 : Kemerlerle bağlanmış personel için izin verilen ve kabul edilen titreşim toleransları [38].

Titreşim toleransı (Hz)	İzin verilen tolerans (g)
< 10	2
10 - 20	5
20 - 40	7
> 40	10

4.2.1.3 Parçacık

Genel olarak, insanların parçacık etkisine karşı toleransı çok düşüktür; ancak barınak tipi yapılarla belirli bir koruma sağlanabilir. Parçacıklar boyutlarına, hızlarına, malzemelerine ve kaynaklarına göre sınıflandırılabilir. Örneğin;

- Genellikle patlamanın hemen bitişiğinde bulunan muhafaza ve/veya ekipmandan oluşan küçük, yüksek hızlı füzeler olan birincil parçalar ve
- Donör yapının parçalanması sonucu ortaya çıkan ikincil parçalar, donör yapı ve/veya patlamadan ciddi hasar gören alıcı yapılar içerisinde bulunan ekipmanlardır.

Bu parçacıkların arasındaki temel farklar boyutları ve hızları olduğundan, bu iki tür parçacığın insan toleransına ilişkin tartışmalar örtüşmektedir. Birincil parçacıkların etkisi, parçacığın genellikle küçük olduğu, genellikle metalden oluştuğu ve yüksek hızlarda hareket ettiği bir mermi çarpmasıyla ilişkilendirilebilir. Ordu için çok sayıda araştırma yapılmıştır; ancak bu testlerden elde edilen verilerin çoğu mevcut değildir. İnsanların bazı parçacık hızı penetrasyon verileri, 0,033 pound'a eşit veya daha az parçacık ağırlıkları için geliştirilmiştir ve parçacık alanının ağırlığa oranı arttıkça, insan derisine nüfuz etme olasılığının yüzde 50'sine karşılık gelen parçacık hızının artacağını göstermektedir. Hızdaki artışın parçacığın alanındaki artışla aynı zamana denk geldiği bu eğilim Çizelge 4.4'de gösterilmektedir [38].

Çizelge 4.4 : Parçaların insan derisine nüfuz etme olasılığı %50 [38].

Parçacık alanı / ağırlık oranı (ft ² / lb)	0,033 lb parçacık ağırlığına göre parçacık alanı (ft ²)	Hız (fps)	Eşik Enerji (ft-lb)
0,03	0,00099	100	5
0,10	0,00330	165	14
0,20	0,00660	250	32
0,30	0,00990	335	58
0,40	0,01320	425	93

Büyük bir kütleye sahip olan ikincil parçacıklar ise birincil parçacıkların neden olduğundan önemli derecede daha düşük hızlarda daha ciddi yaralanmalara neden olacaktır. Çizelge 4.5 ciddi insan yaralanması eşiğine karşılık gelen parçacık hız değerlerini göstermektedir. Yukarıda Bölüm 4.2.1.2'de belirtildiği gibi, 10 fps'den (3 m/s) daha düşük bir hıza sahip nispeten büyük bir kütlenin bir insana çarpması ciddi bedensel yaralanmalara neden olabilir. Ayrıca, daha yüksek hızlarla daha küçük kütlelerin çarpması (Çizelge 4.5), daha büyük kütleler tarafından üretilenler kadar ciddi yaralanmalara neden olabilir [38].

Çizelge 4.5 : Parçacık çarpması nedeniyle personelin ciddi yaralanma limitleri [38].

Kritik Organ	Ağırlık (lbs)	Parçacık Hızı (fps)	Enerji (ft-lb)
Göğüs	> 2,5	10	4
	0,1	80	10
	0,001	400	2,5
Karın ve uzuvlar	> 6,0	10	9
	0,1	75	9
	0,001	550	5
Kafa	> 8,0	10	12
	0,1	100	16
	0,001	450	3

Bu noktada, yabancı cisim penetran parçacık yaralanmaları konusunda ‘İnsan Hassasiyeti El Kitabı Kriterleri’ kesme modelinde belirtildiği üzere, cam parçacıkları için maksimum penetrasyon mesafesi ise aşağıdaki denklem ile elde edilebilir [54]:

$$x_{\max} = \frac{m}{\rho A C_l} \ln \left(1 + \frac{\rho l C_l}{\mu C_V} V_o \right) \quad (4.1)$$

Burada, $x_{\max}$: Maksimum penetrasyon mesafesini (cm)

ρ : Gelatin'in yoğunluğunu (1,07 g/cm³)

$C_V \mu / l$: Deneysel sabiti (= 47)

l : Fırlatıcıyı çevreleyen sıvılaştırılmış jel sınır tabakasının kalınlığını (cm)

A : Fırlatıcının alanını (cm²)

m : Fırlatıcının kütlesini (g)

V_o : Fırlatıcının fırlatma hızını (m/s)

C_l : Deneysel sabiti (= 0,15)

μ : Fırlatıcıyı çevreleyen sıvılaştırılmış jelin viskozite katsayısını göstermektedir.

4.3 Patlama Yaralanmasının Tedavi Prensipleri

Acil kurtarma, teşhis, hastaneye nakil ve tedavinin ve tahliye işlemlerinin hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ilgili önlemleri almadan önce, öncelikle patlama yaralanmasının ciddiyetinin belirlenmesi gerekir [60].

4.3.1 Hafif patlama yaralanması

Bu tür yaralanmalar çoğunlukla hafif akciğer kanaması, hafif beyin sarsıntısı, vücut yüzeyindeki kesikler ve çizikler ve genel işitme sistemi yaralanması gibi yaralanma çeşitleridir. Genellikle bu kategorideki mağdurlar en fazla sayıda olup tüm patlama yaralanması mağdurlarının yaklaşık yarısını oluşturur. Vücut genelinde semptomların olmaması ve belirgin iç organ hasarı olmaması nedeniyle, bu yaralanma sınıfı mağdurların kapasitesini ciddi şekilde etkilemez ve özel bir tedavi gerektirmez.

4.3.2 Orta şiddetli patlama yaralanması

Bu tür yaralanmalar çoğunlukla nispeten ciddi beyin sarsıntısı, ciddi işitsel sistem yaralanması, hafif akciğer ödemi, iç organ iç kanaması, hematoma ve diğerlerinin yanı sıra geniş yumuşak doku yaralanmasıdır. Genellikle vücut genelindeki semptomlarla birlikte görülür ve klinik semptomlar nispeten belirgindir. Orta dereceli akciğer yaralanmasından 1-3 gün sonra hemoptizi (kan öksürülmesi) yaygındır. Oskültasyonda ara sıra krepitus (anormal solunum) ve ral (anormal solunum sesi) saptanabilir ve yumuşak doku yaralanması için diğer yaralanmalara benzer semptomlar görülebilir. Bazı mağdurların durumları tahliye sürecinde diğer yaralanmaların veya yetersiz korumanın birleşimi nedeniyle kötüleşebilir, ancak genel olarak şok veya yaşamı tehdit eden riskler olmayacaktır. Mağdurların yalnızca küçük bir yüzdesi diğer yaralanmalar nedeniyle daha kötü bir durum yaşayacak, ancak çoğu sonunda oldukça iyi bir şekilde iyileşecektir.

4.3.3 Şiddetli patlama yaralanması

Bu tür yaralanmalar başlıca beyin yaralanması (konküzyon), yırtılmış veya delinmiş iç organlar (örn. karaciğer, dalak, mide, bağırsak), nispeten ciddi akciğer ödemi veya kanaması, kemik kırığı (örn. uyluk kemiği, omurga ve çoklu kaburga kırıkları) ve diğerleridir. Beyin konküzyonu bilinç kaybına ve kafa içi basıncında artışa neden olabilir. Akciğer yaralanması hemoptizi ve nefes darlığına yol açabilir, oskültasyonda geniş nemli hırıltılı alanlar tespit edilebilir ve göğüs perküsyonu donuk sesler

çıkabilir. Yırtılmış karın bölgesi organları karın duvarı gerginliği, karın ağrısı, geri tepme hassasiyeti ve diğer peritoneal tahrişlere neden olabilir. Dalak veya karaciğer yırtılması, yaygın karın içi enfeksiyonuna (peritonit) ve gastrointestinal yırtılma veya perforasyona yol açabilirken, ciddi şok veya iç kanama ile de sonuçlanabilir. Diğer yaralanmalarla benzer semptomlara sahip olan kemik kırıkları da diğer yaralanmalarda olduğu gibi tedavi edilmelidir.

4.3.4 Aşırı şiddetli patlama yaralanması

Bu tür yaralanmalar çoğunlukla ciddi beyin ve omurilik yaralanması, organ yırtılması, göğüs, karın ve omurga yaralanması, atardamar (arter) yırtılması, ciddi akciğer ödemi veya kanaması (hemoraji), yumuşak dokuda ciddi ezilme yaralanması ve amputasyon gibi çoklu ciddi yaralanmalardır. Ayrıca, bu tür mağdurlar radyasyon yaralanmasından veya ciddi yanıklardan da muzdarip olabilirler. Çoğunlukla sıfır noktasına yakın yerlerde bulunan bu kategorideki mağdurlar, genellikle aşırı yaralanma nedeniyle kısa bir süre içinde ölürlər. Erken ölümlerin çoğu ciddi kanamalar sonucu organların yırtılması (hemorajik şok), ciddi beyin ve omurilik yaralanmaları ve çoklu kırıklar (yağ embolisi) sonucu meydana gelir. Daha sonraki ölümler çoğunlukla perforasyon peritonisi, özelliklerde çocuklarda sık görülen solunum yolu enfeksiyonları (bronkopnömoni), kan zehirlenmesi (sepsis) ve diğer ikincil enfeksiyonlara bağlanmaktadır. Diğer yaralanmalarla benzer klinik semptomlara sahip olan çoklu iç organ yırtılmaları ve ciddi beyin yaralanmaları da genel yaralanmalar gibi tedavi edilmelidir. Aşırı derecede ağır yaralanan mağdurların çoğu ise bir gün içinde ölür.

4.4 Patlama Yaralanması Koruyucu Ekipmanları

Askerler için mevcut koruma ekipmanları, çoğunlukla mermi ve şarapnel penetrasyonuna karşı yüksek etkinlik sağlayabilen hafif koruyucu malzemelerin kullanımını vurgulamaktadır. Son yıllarda, ekipman araştırma ve geliştirme personeli yüksek mukavemetli para aramid, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen fiber, hafif kurşun geçirmez seramikler ve diğer yeni tip kurşun geçirmez malzemeleri test etmiş ve etkili ağırlık azaltımı ile kurşun ve şarapnel karşıtı performansı açıkça geliştirmiştir. Yine de araştırma sonuçları, normal kurşun geçirmez ekipmanın sadece patlama dalgasının nüfuzunu savunmada çaresiz kalmadığını, aynı zamanda koruma ekipmanının yüzeyine ulaşan şok dalgasının süperpoze olarak ilerlemesi ve yansıması nedeniyle hasarı artırabileceğini göstermiştir. Özellikle, kapalı bir alanda meydana

gelen patlamalarda, şok dalgasının uzun süreli düşük basınç etkisi ve duvar ve koruma ekipmanı yüzeyleri arasında birden fazla kez yansıma yapması nedeniyle daha da zarar verici olabilir. Bu nedenle, kurşun geçirmezlik performansını korumak ve ağırlığı kontrol etmek koşuluyla malzemenin şok dalgasına karşı koruma etkinliğini artırmak patlama dalgasının neden olduğu bedensel yaralanmaları azaltmak için zorunlu ve acildir. Şu anda, ölümleri ve patlama dalgası, parçacık ve ilgili ezilme yaralanmalarının neden olduğu yaralanmaları azaltmak için patlamadan en kolay yaralanan vücut bölümlerini ve organları korumak için ideal malzeme bileşimine ve yapısına sahip koruma ekipmanı (Çizelge 4.6) üzerinde çalışmaya ve geliştirmeye devam etmek gerekmektedir. Son on yılda Irak ve Afganistan'daki Amerikan askerlerinin yaralanma ve ölümlerine ilişkin veriler, şok dalgasının azaltılmasının (emilim ve yeniden yönlendirilmiş dağılım) ve mermiden gelen darbeye karşı korumanın, yaralanma ve ölümlerin %95,8'ini kurtarmak için çok önemli olduğunu ve ölümü azaltmanın başlıca yolunun patlama yaralanmasına karşı koruma ekipmanını geliştirmek ve kan kaybını durdurmak olduğunu göstermektedir [60].

Çizelge 4.6 : Farklı vücut bölgeleri için patlama yaralanmasına karşı gerekli koruma ekipmanları [60].

Yaralanan Vücut Bölgesi	Etkilenen Ana Organ ve Dokular	Koruma Ekipmanı
Beyin	Serebrum (beynin en büyük ana parçası), beyincik (serebellum) ve beyin sapı	Kask
Göğüs bölgesi	Akciğer, kalp ve timüs	Koruyucu (güvenlik) kıyafeti ve yeleği
Karın bölgesi	Karaciğer, dalak, böbrek, böbrek üstü bezi ve gastrointestinal sistem	Koruyucu (güvenlik) kıyafeti
Pelvis	İdrar yolu, femoral arter ve gastrointestinal sistem	Pelvis patlama koruyucu ekipmanı
Uzuvlar	Kaslar, kemikler ve kan damarları	Koruyucu (güvenlik) kıyafeti
İşitsel sistem	Kulak zarları ve işitsel kemikçikler	Kulak manşonları ve kulak tıkaçları
Yüz	Gözbebekleri ve çene kemiği	Yüz maskesi, göz siperliği, gözlük ve alt çene koruma ekipmanı
Boyun bölgesi	Büyük kan damarları ve servikal omurga	Boyun patlama koruyucu ekipmanı
Eller	Kaslar, kemikler ve sinirler	Koruyucu (güvenlik) eldiveni
Ayaklar	Kaslar, kemikler ve sinirler	Güvenlik ayakkabıları ve güvenlik botları

5. SONUÇLAR

5.1 Çalışma Sonuçları

İnsanların patlama toleransının hem şok süresine hem de şok basıncının büyüklüğüne göre değiştiğini patlayıcı testleri ve şok tüpü göstermiştir. Yani, kısa süreli patlama yükleri için basınç toleransının uzun süreli patlama yüklerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir.

10 ms'ye kadar pozitif faz süresine sahip patlamalarda mevcut literatürdeki verilerde kullanılarak, %50 olasılıkla patlama akciğer yaralanmasından kaynaklı ölümler için eşik patlama etkili basınç değeri yaklaşık 200 kPa olarak belirlenmiştir. 300 kPa ve üzerindeki basınç değerleri ise %99 olasılıkla patlama akciğer yaralanmasından kaynaklı ölümlere sebebiyet verecektir (Çizelge 5.1).

Yırtılan kulak zarı yüzdesi ile maksimum basınç arasında doğrudan bir ilişki kurulmuştur. Yani patlamaya maruz kalan kulak zarlarının %50'si hızlı yükselen basınçlar için 100 kPa basınçta yırtılırken, hızlı yükselen basınç için kulak zarı yırtılma eşiği ise 35 kPa'dır (Çizelge 5.1). Kafa yaralanmasında ise 150 kPa patlama maksimum etkili basıncı %50 olasılıkla hafif beyin kanamasının görüleceğine dair eşik değerdir.

Sonuç olarak, mevcut literatürde yer alan çok sayıda çalışmadan, küresel hava patlamalarında patlama insan yaralanmaları için patlama basıncına bağlı eşik değerler incelenip derlendiğinde, farklı pozitif faz süre aralıkları için insan vücudunun farklı bölümlerine ait patlama yaralanması için limit patlama basıncı değerleri Çizelge 5.1'de verildiği gibi önerilmektedir.

Çizelge 5.1'deki verilerle ilgili son olarak şunu belirtmek gerekir : Belirtilen basınç seviyeleri bireyin desteklendiğini ve dengesini kaybederek sert ve nispeten akıcı olmayan bir yüzeye çarpması nedeniyle yaralanmayacağını varsaymaktadır. Bu gibi durumda, insanların dayanabileceği basınç seviyeleri genellikle kulak zarı veya akciğer hasarına neden olanlardan çok daha düşüktür.

Çizelge 5.1 : Küresel hava patlamalarında birincil patlama yaralanması için limit patlama basıncı değerleri.

Pozitif Faz Süresi (ms)	Kriter	Akciğer	Kulak	Kafa - Beyin
$t_d \leq 10$	Maksimum Patlama Basıncı (kPa)	55 : Eşik değer 150 : %1 Ölümcül 200 : %50 Ölümcül 300 : %99 Ölümcül	35 : Eşik değer 100 : %50 Kulak zarı yırtılması 200 : %100 Kulak zarı yırtılması	150 : %50 Hafif beyin kanaması riski 270 : %50 Orta şiddetli beyin kanaması riski & Apne riski 400 : %50 Birincil patlama beyin ölümleri
$10 < t_d \leq 50$	Maksimum Patlama Basıncı (kPa)	42 : Eşik değer 110 : %1 Ölümcül 160 : %50 Ölümcül 220 : %99 Ölümcül	35 : Eşik değer 100 : %50 Kulak zarı yırtılması 200 : %100 Kulak zarı yırtılması	150 : %50 Hafif beyin kanaması riski
$50 < t_d < 200$	Maksimum Patlama Basıncı (kPa)	28 : Eşik değer 90 : %1 Ölümcül 125 : %50 Ölümcül 185 : %99 Ölümcül	35 : Eşik değer 100 : %50 Kulak zarı yırtılması 200 : %100 Kulak zarı yırtılması	150 : %50 Hafif beyin kanaması riski

5.2 Gelecekteki Çalışmalar

Tezin patlama yaralanması ile ilgili gelecekteki çalışmalar için bağımsız bir referans olarak hizmet edeceğine inanılmaktadır. Ayrıca, patlamaya dayanıklı koruyucu ekipman performans değerlendirmesi ve koruyucu ekipman geliştirilmesi süreçlerinde insan vücudunun farklı bölümleri için belirtilen limit patlama basıncı değerleri (Çizelge 5.1) kullanılabilir.

Ek olarak, patlama indirekt yaralanması konusunda spesifik olarak insan vücudunun belirli organlarına (binanın dışında gerçekleşen bir patlama için bina içerisinde bulunan insanın kafa yaralanması gibi) dair patlama yaralanması için limit değerlerin önerilmesi Türkiye ve Dünya literatüründeki boşlukları dolduracaktır. Gelecekteki çalışmalarda bu tarz spesifik konulara yönelerek literatüre ve patlama yaralanmasının literatürdeki yerinin genişlemesine katkı sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Bukowski, J., Nowadly, C. D., Schauer, S. G., Koyfman, A., & Long, B.** (2023). High risk and low prevalence diseases: Blast injuries. *The American Journal of Emergency Medicine*.
- [2] **Stein, M., & Hirshberg, A.** (1999). Medical consequences of terrorism: the conventional weapon threat. *Surgical Clinics of North America*, 79(6), 1537-1552.
- [3] **Housden, S.** (2012). Blast injury: a case study. *International emergency nursing*, 20(3), 173-178.
- [4] **Golan, R., Soffer, D., Givon, A., Peleg, K., & Israel Trauma Group.** (2014). The ins and outs of terrorist bus explosions: injury profiles of on-board explosions versus explosions occurring adjacent to a bus. *Injury*, 45(1), 39-43.
- [5] **Peters, P.** (2011). Primary blast injury: an intact tympanic membrane does not indicate the lack of a pulmonary blast injury. *Military medicine*, 176(1), 110-114.
- [6] **Finlay, S. E., Earby, M., Baker, D. J., & Murray, V. S.** (2012). Explosions and human health: the long-term effects of blast injury. *Prehospital and disaster medicine*, 27(4), 385-391.
- [7] **Kluger, Y., Nimrod, A., Biderman, P., Mayo, A., & Sorkin, P.** (2007). The quinary pattern of blast injury. *American journal of disaster medicine*, 2(1), 21-25.
- [8] **Smith, J. E., & Garner, J.** (2019). Pathophysiology of primary blast injury. *BMJ Military Health*, 165(1), 57-62.
- [9] **Frykberg, E. R., & Tepas 3rd, J. J.** (1988). Terrorist bombings. Lessons learned from Belfast to Beirut. *Annals of surgery*, 208(5), 569.
- [10] **Zafonte, R. D., Wood, D. L., Harrison-Felix, C. L., Valena, N. V., & Black, K.** (2001). Penetrating head injury: a prospective study of outcomes. *Neurological Research*, 23(2-3), 219-226.
- [11] **Yamamoto, S., DeWitt, D. S., & Prough, D. S.** (2018). Impact & blast traumatic brain injury: implications for therapy. *Molecules*, 23(2), 245.
- [12] **Taber, K. H., Warden, D. L., & Hurley, R. A.** (2006). Blast-related traumatic brain injury: what is known?. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, 18(2), 141-145.

- [13] Greve, M. W., & Zink, B. J. (2009). Pathophysiology of traumatic brain injury. *Mount Sinai Journal of Medicine: A Journal of Translational and Personalized Medicine: A Journal of Translational and Personalized Medicine*, 76(2), 97-104.
- [14] **Url-1:** <https://urgentmatters.smhs.gwu.edu/>
- [15] Svetlov, S. I., Prima, V., Kirk, D. R., Gutierrez, H., Curley, K. C., Hayes, R. L., & Wang, K. K. (2010). Morphologic and biochemical characterization of brain injury in a model of controlled blast overpressure exposure. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 69(4), 795-804.
- [16] Lee, B., & Newberg, A. (2005). Neuroimaging in traumatic brain imaging. *NeuroRx*, 2(2), 372-383.
- [17] Ingebrigtsen, T., Romner, B., & Kock-Jensen, C. (2000). Scandinavian guidelines for initial management of minimal, mild, and moderate head injuries. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 48(4), 760-766.
- [18] DePalma, R. G., Burris, D. G., Champion, H. R., & Hodgson, M. J. (2005). Blast injuries. *New England Journal of Medicine*, 352(13), 1335-1342.
- [19] **Url-2:** <https://www.izmirekolhastanesi.com/mikroskopik-orta-kulak-cerrahisi>
- [20] Esquivel, C. R., Parker, M., Curtis, K., Merkley, A., Littlefield, P., Conley, G., ... & Stockinger, Z. (2018). Aural blast injury/acoustic trauma and hearing loss. *Military medicine*, 183(suppl_2), 78-82.
- [21] Melinek, M., Naggan, L., & Altman, M. (1976). Acute acoustic trauma-a clinical investigation and prognosis in 433 symptomatic soldiers. *Israel Journal of Medical Sciences*, 12(6), 560-569.
- [22] Goh, S. H. (2009). Bomb blast mass casualty incidents: initial triage and management of injuries. *Singapore Med J*, 50(1), 101-106.
- [23] Yeh, D. D., & Schecter, W. P. (2012). Primary blast injuries—an updated concise review. *World journal of surgery*, 36, 966-972.
- [24] Scott, T. E., Johnston, A. M., Keene, D. D., Rana, M., & Mahoney, P. F. (2020). Primary blast lung injury: the UK military experience. *Military medicine*, 185(5-6), e568-e572.
- [25] Lavery, G. G., & Lowry, K. G. (2004). Management of blast injuries and shock lung. *Current Opinion in Anesthesiology*, 17(2), 151-157.

- [26] Douin, D. J., Schauer, S. G., Anderson, E. L., Jones, J., DeSanto, K., Cunningham, C. W., ... & Ginde, A. A. (2019). Systematic review of oxygenation and clinical outcomes to inform oxygen targets in critically ill trauma patients. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 87(4), 961-977.
- [27] Morley, M. G., Nguyen, J. K., Heier, J. S., Shingleton, B. J., Pasternak, J. F., & Bower, K. S. (2010). Blast eye injuries: a review for first responders. *Disaster medicine and public health preparedness*, 4(2), 154-160.
- [28] Liu, Y., Feng, K., Jiang, H., Hu, F., Gao, J., Zhang, W., & Yan, H. (2020). Characteristics and treatments of ocular blast injury in Tianjin explosion in China. *BMC ophthalmology*, 20, 1-8.
- [29] Mathews, Z. R., & Koyfman, A. (2015). Blast injuries. *The Journal of emergency medicine*, 49(4), 573-587.
- [30] Drakos, N. D. (2020). Emergency Medicine: Combat Lessons Learned. *Operational and Medical Management of Explosive and Blast Incidents*, 279-288.
- [31] Tahtabasi, M., Er, S., Karasu, R., & Ucaroglu, E. R. (2021). Bomb blast: imaging findings, treatment and clinical course of extremity traumas. *BMC emergency medicine*, 21, 1-10.
- [32] Rankin, I. A., Nguyen, T. T., McMenemy, L., Clasper, J. C., & Masouros, S. D. (2021). The injury mechanism of traumatic amputation. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 9, 665248.
- [33] Wani, I., Parray, F. Q., Sheikh, T., Wani, R. A., Amin, A., Gul, I., & Nazir, M. (2009). Spectrum of abdominal organ injury in a primary blast type. *World journal of emergency surgery*, 4(1), 1-5.
- [34] Boruah, S., Subit, D. L., Paskoff, G. R., Shender, B. S., Crandall, J. R., & Salzar, R. S. (2017). Influence of bone microstructure on the mechanical properties of skull cortical bone—A combined experimental and computational approach. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 65, 688-704.
- [35] Zhai, X., Nauman, E. A., Moryl, D., Lycke, R., & Chen, W. W. (2020). The effects of loading-direction and strain-rate on the mechanical behaviors of human

frontal skull bone. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 103, 103597.

[36] **Boruah, S., Henderson, K., Subit, D., Salzar, R. S., Shender, B. S., & Paskoff, G.** (2013, September). Response of human skull bone to dynamic compressive loading. In *Proceedings of the IRCOBI Conference* (Vol. 13, p. 497).

[37] **Boruah, S., Subit, D. L., Paskoff, G. R., Shender, B. S., Crandall, J. R., & Salzar, R. S.** (2017). Influence of bone microstructure on the mechanical properties of skull cortical bone—A combined experimental and computational approach. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 65, 688-704.

[38] **Department of Defense.** (2008). Structures to resist the effects of accidental explosions. UFC 3-340-02.

[39] **Kati, R., & Atetwe, A. T.** (2021). INTERNATIONAL JOURNAL OF CREATIVE RESEARCH AND STUDIES.

[40] **Nadyrov, S.** *Pencere camının ve çerçeve sistemlerinin patlamaya karşı davranışı* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[41] Task Committee on Blast-Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of ASCE. (2010, November). Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities. American Society of Civil Engineers.

[42] **Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J.** (2007). Blast loading and blast effects on structures—an overview. *Electronic journal of structural engineering*, (1), 76-91.

[43] **Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., & Van Wingerden, K.** (1997). Gas explosion handbook. *Journal of hazardous materials*, 52(1), 1-150.

[44] **Hu, Y., Wu, C., Lukaszewicz, M., Dragos, J., Ren, J., & Haskett, M.** (2011). Characteristics of confined blast loading in unvented structures. *International Journal of Protective Structures*, 2(1), 21-43.

[45] **Wang, C. H., Wang, S. S., Zhang, J. X., & Ma, F.** (2021). Pressure load characteristics of explosions in an adjacent chamber. *Shock and Vibration*, 2021, 1-9.

- [46] **Panowicz, R., Sybilski, K., & Kołodziejczyk, D.** (2011). Numerical analysis of effects of IED side explosion on crew of lightarmoured wheeled vehicle. *Journal of KONES*, 18, 331-339.
- [47] **Kokkinakis, I. W., & Drikakis, D.** (2023). Internal explosions and their effects on humans. *Physics of Fluids*, 35(4).
- [48] **Bowen, I. G., Fletcher, E. R., & Richmond, D. R.** (1968). Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast (p. 0037). Albuquerque, NM: Lovelace Foundation for Medical Education and Research.
- [49] **Bull, A. M., Clasper, J., & Mahoney, P. F.** (2016). Blast injury science and engineering. Switzerland: Springer.
- [50] **Tabiei, A. L., Lawrence, C., & Fasanella, E. L.** (2009, March). Validation of finite element crash test dummy models for predicting orion crew member injuries during a simulated vehicle landing. In 10th International LS-DYNA Users Conference (No. E-16677).
- [51] **Brinkley, James W.; Specker, Lawrence J.; and Mosher, Stephen E.** (1989): Development of Acceleration Exposure Limits for Advanced Escape Systems. AGARD CP-472.
- [52] **Croft, A. C., Herring, P., Freeman, M. D., & Haneline, M. T.** (2002). The neck injury criterion: future considerations. *Accident Analysis & Prevention*, 34(2), 247-255.
- [53] **Mertz, H. J., & Gadd, C. W.** (1971). Thoracic tolerance to whole-body deceleration (No. 710852). SAE Technical Paper.
- [54] **Url-3** : <https://www.ara.com/>
- [55] **Gallun, F. J., Diedesch, A. C., Kubli, L. R., Walden, T. C., Folmer, R. L., Lewis, M. S., ... & Leek, M. R.** (2012). Performance on tests of central auditory processing by individuals exposed to high-intensity blasts. *J Rehabil Res Dev*, 49(7), 1005-25.
- [56] **Url-4** : <https://www.humaneticsgroup.com/>

- [57] **Baker, S. P., o'Neill, B., Haddon Jr, W., & Long, W. B.** (1974). The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 14(3), 187-196.
- [58] **Meyer, S., Little, L., & Conrath, E.** (2004). Injury based glass hazard assessment. DTIC Document.
- [59] **Denny, J. W., Dickinson, A. S., & Langdon, G. S.** (2021). Defining blast loading 'zones of relevance' for primary blast injury research: A consensus of injury criteria for idealised explosive scenarios. *Medical Engineering & Physics*, 93, 83-92.
- [60] **Wang, Z., & Jiang, J. (Eds.).** (2023). *Explosive Blast Injuries: Principles and Practices*. Springer Nature.
- [61] **Bass, C. R., & Yoganandan, N.** (2014). Skull and facial bone injury biomechanics. In *Accidental Injury: Biomechanics and Prevention* (pp. 203-220). New York, NY: Springer New York.
- [62] **Wang, X., Du, J., Zhuang, Z., Wang, Z. G., Jiang, J. X., & Yang, C.** (2020). Incidence, casualties and risk characteristics of civilian explosion blast injury in China: 2000—2017 data from the state Administration of Work Safety. *Military medical research*, 7, 1-8.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ömer Faruk ZIRH

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (%100 İngilizce)
- **Yükseklisans** : 2024, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (%100 İngilizce) lisans programını 3.92 GPA ile bölüm 2.'si olarak tamamladı.
- 2022-2024 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği tezli yüksek lisans programına devam ederken, aynı zamanda Perform Mühendislik ve Müşavirlik şirketinde Yapısal Tasarım Mühendisi olarak çalıştı.
- Eylül 2024'de İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisansını tamamlayarak İnşaat Yüksek Mühendisi ünvanını almaya hak kazandı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- **Zırh Ö.F.**, Azar A.B, Sarı A. 2024. Patlamadan Dolayı Yapı İçerisindeki Yaralanmalar, *İTÜ – Azerbaycan Mimarlık Ve İnşaat Üniversitesi Ortak Konferansı* – 28-29 Kasım, 2023, Azerbaycan.
- **Zırh Ö.F.**, Sarı A. 2024. Review of Blast Injury and Developing Threshold Values for Human Injury, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 11(2).