İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM LEVHALARIN YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

DOKTORA TEZİ

Evren ÖZŞAHİN

Anabilim Dalı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

Programı : UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM LEVHALARIN YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

DOKTORA TEZİ

Evren ÖZŞAHİN
(511032003)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Ocak 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Şubat 2008

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. Süleyman TOLUN**
Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Zahit MECİTOĞLU**
Doç.Dr. Erol ŞENOCAK
Yrd.Doç.Dr. Zafer KAZANCI (Hava Harp Okulu)
Prof.Dr. Mehmet A.AKGÜN (Yeditepe Ü.)

ŞUBAT 2008

Ö N S Ö Z

Bu çalışmanın ortaya çıkmasındaki yönlendirici destek ve yardımlarından ötürü tez danışmanım Prof.Dr. Süleyman TOLUN'a; tez izleme komitesi üyeleri Prof.Dr. Zahit MECİTOĞLU ve Doç.Dr. Erol ŞENOCAK'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın, çok fazla etkeni içinde barındıran deneysel bölümünün gerçekleştirilmesindeki katkıları ve karşılaşılan sorunların çözülmesindeki kıymetli yardımlarından ötürü (E) Hv.Öğ.Alb. Mehmet Z. MUŞTU, Hv.Müh.Bnb. E.Aziz BULUT ve Kim.Müh. Ömer BAKIR'a, 1'inci ve 2'nci HİBM K.lıklarının değerli personeline, sayısal bölümde MSC PATRAN ve MSC DYTRAN yazılımlarının kullanılmasındaki desteklerinden dolayı Y.Müh. Serkan US, U.Çağrı DOĞAN ve BİAS Mühendislik'e minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Ayrıca, her zaman yanımda hissetmekten mutlu olduğum aileme ve bu çalışma boyunca gösterdiği inanç, sevgi, sabır ve desteği için sevgili eşim Elif'e sonsuz teşekkürler.

Şubat, 2008 **Evren ÖZŞAHİN**

İÇİNDEKİLER

Ö N S Ö Z i
İÇİNDEKİLER ii
KISALTMALAR iv
TABLO LİSTESİ v
ŞEKİL LİSTESİ vi
SEMBOL LİSTESİ x
ÖZET xii
SUMMARY xiv

1. GİRİŞ 1
1.1. Olay ve Önemi 2
1.2. Yapılan Çalışmalar 2
1.3. Tez Çalışmasının İçeriği 8
1.3.1. Kullanılan malzemelerin seçimi 9
1.3.2. Çalışma yöntemi 10

2. YÜKSEK HIZLI ÇARPMA MEKANİĞİ 11
2.1. Temel Yasalar 13
2.1.1. Kütlenin korunumu 13
2.1.2. Momentumun korunumu 14
2.1.3. Enerjinin korunumu 14
2.2. Dalga Yayılımı 14
2.2.1. Elastik dalgalar 15
2.2.1.1. Elastik dalga türleri 18
2.2.1.2. Elastik dalgaların sürekli ortamlarda yayılması 20
2.2.1.3. Elastik dalgaların yansıma ve kırılmaları 23
2.2.2. Plastik dalgalar 26
2.2.3. Şok dalgaları 30
2.3. Penetrasyon Mekaniği 33
2.4. Kirişlerin Dinamik Plastik Davranışları 35
2.5. Plakların Dinamik Plastik Davranışları 36
2.6. Hedef Levhada Hasar Mekanizmaları 40
2.7. Hedef Levhada Oluşan Delinme Miktarı 42
2.8. Büyük Yer Değiştirmeler İçin Hidrokod Formülasyonu 42

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 44
3.1. Deney Düzeneğinin Tanıtılması 44
3.2. Performans Belirleme Testleri 48
3.3. Levhalara Uygulanan Balistik Dayanım Artırma Yöntemleri 55
3.3.1. Isıl püskürtme ile kaplama 55
3.3.1.1. Plazma ile püskürtme 56
3.3.1.2. Diğer ısıl püskürtme yöntemleri 56
3.3.2. Destek katmanı ilavesi 57

3.3.3. RRA ısıl işlemi 58
3.4. Kaplamalı Levhaların Balistik Testleri 59
3.4.1. Atışlarda kullanılan levhaların hazırlanması 59
3.4.2. Yapılan atışlar 60
3.4.2.1. Birinci grup levhalara yapılan atışlar 60
3.4.2.2. İkinci grup levhalara yapılan atışlar 62
3.4.2.3. Üçüncü grup levhalara yapılan atışlar 66
3.4.2.4. Beşinci grup levhalara yapılan atışlar 70
3.4.2.5. Altıncı grup levhalara yapılan atışlar 74
3.4.2.6. Yedinci grup levhalara yapılan atışlar 78
3.4.2.7. Sekizinci grup levhalara yapılan atışlar 79
3.4.2.8. Dokuzuncu grup levhalara yapılan atışlar 83
3.5. Arka Destek Katmanlı Levhalara Yapılan Atışlar 87
3.6. Levhalarda Oluşan Şekil Değiştirme Miktarlarının Karşılaştırılması 90
3.7. Levhalarda Enerji Sönümlemesi 92
3.7.1. Isı enerjisi 93
3.7.2. Levhaların şekil değiştirme enerjisi 95
3.8. Tasarlanan Katmanlı Zırh Yapısı ve Yapılan Atış Sonuçları 99

4. SAYISAL UYGULAMA 105
4.1. Giriş 105
4.2. Sayısal Model 105
4.2.1. Model geometrisi 105
4.2.2. Modelin ağ yapısı 107
4.2.3. Başlangıç ve sınır koşulları 109
4.2.4. Mermi-levha temas tanımı 110
4.2.5. Malzeme modeli 111
4.3. Analiz Sonuçları 113

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 122
5.1. Deneysel Sonuçlar 122
5.2. Sayısal Sonuçlar 124
5.3. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar 125

KAYNAKLAR 127

ÖZGEÇMİŞ 139

KISALTMALAR

3D-CMM	**:**	Three Dimensional Coordinate Measurement Machine (3 Boyutlu Koordinat Ölçüm Cihazı)
AP	**:**	Armor Piercing (Zırh Delici)
EOS	**:**	Equation of State (Durum Denklemi)
FMJ	**:**	Full Metal Jacket (Tamamen Metal Kaplı)
IR	**:**	Infrared (Kızıl Ötesi)
PE	**:**	Polietilen
RRA	**:**	Retrogression and Reageing (Retrogresyon ve Yeniden Yaşlandırma)
SHPB	**:**	Split Hopkinson Pressure Bar (Ayrık Hopkinson Basınç Çubuğu)
UHMWPE	**:**	Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 Bazı malzemelerde dalga hızları 23
Tablo 3.1 Atışlarda kullanılan alüminyum alaşımların bileşimleri (%) 48
Tablo 3.2 Atışlarda kullanılan alüminyum alaşımların mekanik özellikleri 48
Tablo 3.3 Birinci grup ön test sonuçları 49
Tablo 3.4 Yapılan performans belirleme atışlarının sonuçları 54
Tablo 3.5 Hazırlanan levhaların ölçüleri 60
Tablo 3.6 2. grup levhalara yapılan atış sonuçları 64
Tablo 3.7 3. grup levhalara yapılan atış sonuçları 68
Tablo 3.8 5. grup levhalara yapılan atış sonuçları 73
Tablo 3.9 6. grup levhalara yapılan atış sonuçları 76
Tablo 3.10 8. grup levhalara yapılan atış sonuçları 81
Tablo 3.11 9. grup levhalara yapılan atış sonuçları 85
Tablo 3.12 UHMWPE destek katmanlı levhalara yapılan atış sonuçları 88
Tablo 3.13 3. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhalarda mermi hızı-sıcaklık ilişkileri ... 94
Tablo 3.14 Al-PE katmanlı yapıda atış sonuçları 103
Tablo 4.1 Modelde kullanılan eleman sayıları 109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Test cihazları a) ağırlık düşürme, b) gaz tabancası 13
Şekil 2.2 : Atomların sanki-durağan (quasi-static) elastik deformasyonu ($F_2>F_1$) .. 15
Şekil 2.3 : 2-boyutlu atomların dinamik elastik deformasyonu 16
Şekil 2.4 : Bozuntunun atomdan atoma aktarımı 16
Şekil 2.5 : Silindirik çubukta dalga oluşumu 17
Şekil 2.6 : Silindirik çubuk elemanı 17
Şekil 2.7 : Uzunlamasına dalgalar 19
Şekil 2.8 : Yarı-sonsuz ortamda dalga oluşumu 19
Şekil 2.9 : Kayma dalgaları 19
Şekil 2.10 : Dinamik yükleme durumunda birim gerilme elemanı 20
Şekil 2.11 : Elastik dalgaların arayüzeyde yansıma ve kırılması 23
Şekil 2.12 : Arayüzeye dik gelen dalgaların yansıma ve kırılması 24
Şekil 2.13 : Sünek malzemeler için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) çift-doğrusal elasto-plastik malzeme, b) pekleşme, c) akma gerilmesi-birim şekil değiştirme hızı ilişkisi, d) akma gerilmesi-birim şekil değiştirme hızı geçmişi ilişkisi 28
Şekil 2.14 : Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi 29
Şekil 2.15 : Plastik dalga yayılımı test düzeneği 29
Şekil 2.16 : Piston-silindir düzeneği 30
Şekil 2.17 : Kinetik enerji penetrasyonu 33
Şekil 2.18 : Düşük hızlı çarpma davranışı 34
Şekil 2.19 : Balistik limitin üzerindeki çarpmalar 35
Şekil 2.20 : m_p kütleli bir cismin, V_0 ilk hızıyla sabit mesnetli kirişe çarpması 35
Şekil 2.21 : Çarpma yükü altındaki sabit mesnetli kirişte oluşan deformasyon 36
Şekil 2.22 : Rijit-mükemmel plastik malzeme davranışı 36
Şekil 2.23 : Basınç yükü 37
Şekil 2.24 : Düzgün yayılı basınç yükü altındaki basit mesnetli dairesel plak 38
Şekil 2.25 : Basınç yükü altındaki dairesel plakta oluşan deformasyon 38
Şekil 2.26 : Yüksek hızlı çarpma yükü altında hasar biçimleri 40
Şekil 2.27 : İnce levhalarda eğilme hasarı 41
Şekil 3.1 : Tutucu sehpa 45
Şekil 3.2 : Atış sistemi 45
Şekil 3.3 : Oehler Research Model 55 hızölçer 45
Şekil 3.4 : Oehler Research Model 35P süreölçer 45
Şekil 3.5 : MKEK 9 mm Parabellum mermi 46
Şekil 3.6 : Derinlik mikrometresi 46
Şekil 3.7 : Çoklu atış fikstürü 47
Şekil 3.8 : 3 Boyutlu Koordinat Ölçüm Cihazı (3D-CMM) 47
Şekil 3.9 : 3D-CMM ile yapılan ölçümler 48
Şekil 3.10 : AA 6061 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.35 mm, mermi hızı=356 m/s) a) ön, b)arka 49

Şekil 3.11 : AA 6061 T6 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.40 mm, mermi hızı=376 m/s) a) ön, b)arka 50
Şekil 3.12 : AA 2024 T3 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.35 mm, mermi hızı=372 m/s) a) ön, b)arka 50
Şekil 3.13 : AA 6061 T6 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=8.00 mm) a) mermi hızı=349 m/s, b) mermi hızı=376 m/s 51
Şekil 3.14 : İnce levhaların çarpma sonrası görünümleri a) AA 2024 T3 (2.50 mm / 352 m/s), b) AA 6061 T6 (2.00 mm / 376 m/s) 52
Şekil 3.15 : Rockwell sertlik ölçüm cihazı 52
Şekil 3.16 : AA 6061 T6 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.40 mm / mermi hızı=385 m/s) a) ön, b)arka 53
Şekil 3.17 : Alüminyum levhaların, ön testlerde belirlenen balistik performansları . 55
Şekil 3.18 : Plazma ile püskürtme yöntemi 56
Şekil 3.19 : 1. grup kaplamasız levhaların çarpma sonrası görünümü 60
Şekil 3.20 : 1. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların çarpma sonrası görünümü 61
Şekil 3.21 : 1. grup 101SF kaplamalı levhaların çarpma sonrası görünümü 61
Şekil 3.22 : 2. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 62
Şekil 3.23 : 2. grup kaplamasız levhaların arka yüzeylerinin görüntüleri..... 62
Şekil 3.24 : 2. grup kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri a) 68F-NS-1, b) 101SF, c) 201NS, d) 71NS 63
Şekil 3.25 : 2. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri 65
Şekil 3.26 : 2. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri 65
Şekil 3.27 : 2. grup levhalarda kalınlık değişimi 66
Şekil 3.28 : 2. grup kaplamasız levhalarda hasar biçimleri 66
Şekil 3.29 : 3. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 67
Şekil 3.30 : 3. grup kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri a) 68F-NS-1, b) 201NS 67
Şekil 3.31 : 3. grup 101SF kaplamalı numunelerde, kaplama ayrılması 67
Şekil 3.32 : 3. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri 69
Şekil 3.33 : 3. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri 69
Şekil 3.34 : 3. grup levhalarda kalınlık değişimi 69
Şekil 3.35 : 5. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri (ön yüz)... 71
Şekil 3.36 : 5. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüsü (arka yüz).. 71
Şekil 3.37 : 5. grup levhalarda hasar biçimi 71
Şekil 3.38 : 5. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri .. 72
Şekil 3.39 : 5. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 72
Şekil 3.40 : 5. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri 73
Şekil 3.41 : 5. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri 74
Şekil 3.42 : 5. grup levhalarda kalınlık değişimi 74
Şekil 3.43 : 6. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 75
Şekil 3.44 : 6. grup levhalarda hasar biçimi 75
Şekil 3.45 : 6. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri .. 75
Şekil 3.46 : 6. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 76
Şekil 3.47 : 6. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri 77
Şekil 3.48 : 6. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri 77
Şekil 3.49 : 6. grup levhalarda kalınlık değişimi 78
Şekil 3.50 : 7. grup levhaların atışlardan sonraki görüntüleri a) kaplamasız, b) 68F-NS-1 kaplamalı 78
Şekil 3.51 : 7. grup levhaların arka yüzeylerinin atışlar sonundaki görüntüleri a) kaplamasız, b) 68F-NS-1 kaplamalı 79
Şekil 3.52 : 8. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 79

Şekil 3.53 : 8. grup kaplamasız levhaların arka yüzlerinde oluşan kırıklar 80
Şekil 3.54 : 8. grup kaplamasız levhalardan kopan parça (atış no:8-3) 80
Şekil 3.55 : 8. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri .. 80
Şekil 3.56 : 8. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 81
Şekil 3.57 : 8. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri 82
Şekil 3.58 : 8. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri 82
Şekil 3.59 : 8. grup levhalarda kalınlık değişimi 83
Şekil 3.60 : 9. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 83
Şekil 3.61 : 9. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri .. 84
Şekil 3.62 : 9. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri 84
Şekil 3.63 : 9. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri 86
Şekil 3.64 : 9. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri 86
Şekil 3.65 : 9. grup levhalarda kalınlık değişimi 86
Şekil 3.66 : Destek katmanı olarak hazırlanan UHMWPE levha 87
Şekil 3.67 : Destek katmanlı levhaların, atışlardan sonraki görüntüleri
a) 2. grup, b) 8. grup 88
Şekil 3.68 : 2. grup destek katmanlı levhalarda atış sonuçları a) çökme, b) şişme 89
Şekil 3.69 : 8. grup destek katmanlı levhalarda atış sonuçları a) çökme, b) şişme 90
Şekil 3.70 : Alüminyum levhaların çökme değerlerinin karşılaştırmaları
(6.35 mm) 91
Şekil 3.71 : Alüminyum levhaların şişme değerlerinin karşılaştırmaları
(6.35 mm) 91
Şekil 3.72 : Alüminyum levhaların çökme değerlerinin karşılaştırmaları
(4.80 mm) 92
Şekil 3.73 : Alüminyum levhaların şişme değerlerinin karşılaştırmaları
(4.80 mm) 92
Şekil 3.74 : Fluke 576 Uzaktan sıcaklık ölçüm cihazı 93
Şekil 3.75 : Sıcaklık ölçüm arayüzü (IRGraph) 93
Şekil 3.76 : 3. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların sıcaklık değişimleri 94
Şekil 3.77 : Mermi hızı ile sıcaklık ilişkileri 95
Şekil 3.78 : Doğrusallaştırılmış denklemin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması
(2. grup) 97
Şekil 3.79 : Önerilen denklemin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (2. grup) 98
Şekil 3.80 : Doğrusallaştırılmış denklemin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması
(3. grup) 99
Şekil 3.81 : Önerilen denklemin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (3. grup) 99
Şekil 3.82 : PE-Al katmanlı yapı 100
Şekil 3.83 : PE-Al katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (4 mm PE kalınlığında)
a) ön yüz, b) arka yüz 100
Şekil 3.84 : PE-Al katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (8 mm PE kalınlığında)
a) ön yüz, b) arka yüz 101
Şekil 3.85 : Al-PE katmanlı yapı 101
Şekil 3.86 : Al-PE katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (4 mm PE kalınlığında)
a) ön yüz, b) arka yüz 101
Şekil 3.87 : Al-PE katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (8 mm PE kalınlığında)
a) Alüminyum ön yüz, b) Alüminyum arka yüz 102
Şekil 3.88 : Al-PE katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (8 mm PE kalınlığında)
a) Polietilen ön yüz, b) Polietilen arka yüz 102
Şekil 3.89 : Al-PE katmanlı yapıda atış sonuçları 103
Şekil 3.90 : Al-PE-Al katmanlı yapı 103

Şekil 3.91 : Al-PE-Al katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları a) ön yüz, b) arka yüz 104
Şekil 4.1 : Sayısal modelde kullanılan mermi geometrisi 106
Şekil 4.2 : Sayısal modelde kullanılan levha geometrisi 106
Şekil 4.3 : Modelde kullanılan katı elemanlar a) CHEXA, b) CPENTA 107
Şekil 4.4 : Lagrange türü çözümde deformasyon 108
Şekil 4.5 : Merminin ağ yapısı a) pirinç yüksük, b) kurşun 108
Şekil 4.6 : Levhanın ağ yapısı 109
Şekil 4.7 : Levhadan alınan kesit 109
Şekil 4.8 : Levhada sabit mesnet sınır koşulu 110
Şekil 4.9 : Levhada temas tanımlanan bölüm (1/4 model) 111
Şekil 4.10 : Levha kesitinin analiz sonundaki görüntüsü (V_0=355 m/s) 113
Şekil 4.11 : Levha alt ve üst yüzeylerindeki deformasyon (V_0=355 m/s) 113
Şekil 4.12 : Enerji dağılımı 114
Şekil 4.13 : Kurşunda oluşan hasar a) yan görünüş, b) alt-üst görünüş 115
Şekil 4.14 : Kurşunda oluşan hasar (sayısal çözüm) 115
Şekil 4.15 : Pirinç yüksükte meydana gelen hasar 116
Şekil 4.16 : Pirinç yüksükte meydana gelen hasar (sayısal çözüm) 116
Şekil 4.17 : Levhada oluşan hasarın gelişimi (V_0=355 m/s) a)t=0, b)t=14 μs, c)t=37 μs, d)t=70 μs, e)t=97 μs, f)t=107 μs, g)t=111 μs, h)t=114 μs .. 117
Şekil 4.18 : Levhada oluşan hasarın zamana göre değişimi (V_0 = 355 m/s) 117
Şekil 4.19 : Levhada oluşan hasar a)V_0=355 m/s, b)V_0=362 m/s, c)V_0=375 m/s, d)V_0=396 m/s, e)V_0=401 m/s, f)V_0=408 m/s 118
Şekil 4.20 : Levhada oluşan çökme miktarları 119
Şekil 4.21 : Levhada oluşan şişme miktarları 119
Şekil 4.22 : Levha orta hattında oluşan yer değiştirme 119
Şekil 4.23 : Sınır koşullarının çözüme etkisi (çökme) 120
Şekil 4.24 : Sınır koşullarının çözüme etkisi (şişme) 120

SEMBOL LİSTESİ

a	**:**	İvme
A	**:**	Işınım alanı
A, B, C, n, m	**:**	Johnson-Cook bünye denklemi katsayıları
B	**:**	Genişlik
β	**:**	Hedef levhanın delinme direnci
C_0, C_l,	**:**	Uzunlamasına gerilme dalga hızları (ince çubuk, sonsuz ortam)
C_S,	**:**	Kayma gerilme dalga hızı
C_R,	**:**	Yüzey gerilme dalga hızı
d	**:**	Delik (mermi) çapı
dv	**:**	Hacim elemanı
D, p	**:**	Cowper-Symonds bünye denklemi katsayıları
Δ	**:**	Genleşme
e	**:**	Yayınım katsayısı
E	**:**	Elastisite modülü
ε	**:**	Birim şekil değiştirme
$\bar{\varepsilon}^{pl}$	**:**	Eşdeğer plastik birim şekil değiştirme
$\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$	**:**	Eşdeğer birim şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_0$	**:**	Referans birim şekil değiştirme hızı
F	**:**	Kuvvet
H	**:**	Levha kalınlığı
K_{E_1} , K_{E_2}	**:**	Hedef levhanın balistik çarpanları
κ_r	**:**	Levha orta yüzeyinin radyal eğriliğindeki değişim
κ_θ	**:**	Levha orta yüzeyinin dairesel eğriliğindeki değişim
L	**:**	Kiriş boyu (1/2)
λ, μ	**:**	Lamé sabitleri
m	**:**	Kütle, kiriş birim boyunun kütlesi
m_p	**:**	Mermi kütlesi
M_0	**:**	Plastik göçme (collapse) momenti
M_r	**:**	Radyal moment
M_θ	**:**	Dairesel moment
μ	**:**	Levha birim alanının ağırlığı
p, p_0	**:**	Levhaya uygulanan basınç yükü
p_c	**:**	Göçme yükü
P	**:**	Net ışınım gücü
Q_r	**:**	Yarıçap yönündeki kesme kuvvetleri
r, R	**:**	Yarıçap
ρ	**:**	Yoğunluk
ρ_p	**:**	Mermi yoğunluğu
ρ_t	**:**	Hedef yoğunluğu
σ	**:**	Stephan-Boltzman sabiti

σ_0	:	Akma gerilmesi
σ_d	:	Dinamik akma gerilmesi
σ_{ij}	:	Gerilme
t	:	Zaman
T	:	Anlık sıcaklık
T_0	:	Oda sıcaklığı
T_e	:	Ergime sıcaklığı
τ	:	Basınç yükünün uygulanma süresi
$\hat{T}$	:	Boyutsuz sıcaklık
u_i	:	Yer değiştirme
U	:	Dalga yayılma doğrultusu
U_p	:	Parçacıkların hareketi
V	:	Hız
V_0	:	Mermi hızı
V_p	:	Plastik gerilme dalga hızı
ν	:	Poisson oranı
w	:	Çökme miktarı
W	:	Sistemin yaptığı toplam iş
W_1, W_2	:	Levha merkezindeki çökme miktarları
ζ	:	Plastik mafsalların kiriş orta noktasına uzaklığı

ALÜMİNYUM LEVHALARIN YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

ÖZET

Alüminyum levhalar uçak yapıları, gemi, bina ve köprü gibi çok çeşitli uygulamaların yanında hafif korunma sistemlerinde de kullanım alanı bulmaktadır. Çarpma veya yüksek hızlı yükleme şartları, zırh sistemleri ile ilgili uygulama alanlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu uygulamalarda, yapının ağırlığı önemli bir tasarım ölçütüdür. Bu nedenle, geleneksel çelik ya da beton gibi malzemeler yerine alüminyum alaşımların tercih edildikleri bilinmektedir.

Tek ve çok katmanlı, yüksek mukavemetli metal ve kompozit levhaların kinetik enerjili mermilere karşı gösterdikleri balistik davranışın deneysel, kuramsal ve sayısal olarak incelenmesi çeşitli araştırmalara konu olmuştur.

Bu çalışmada; alüminyum levhaların yüzeye dik gelen yüksek hızlı çarpma dayanımlarına, mermi hızı, levha kalınlığı gibi girdilerle birlikte, çeşitli performans artırıcı yöntemlerin (yüzey kaplama, destek katmanı eklenmesi) etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Levhaların ön yüzlerine ısıl püskürtme yöntemi ile dört çeşit kaplama uygulanmıştır. Levhaların balistik dayanımlarına kaplama uygulamalarının etkilerinin belirlenmesi amacıyla atışlar hem kaplamasız, hem de farklı kaplama çeşitleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atışlardan sonra levhalarda oluşan çökme ve şişme miktarları ölçülmüştür. Kaplamanın uygulandığı levhaların çarpma dayanımlarında belirgin artışlar gözlenmiştir. Hem delinmeyle sonuçlanmayan mermi hızı seviyelerinin arttığı, hem de levhadaki çökme miktarlarının azaldığı belirlenmiştir.

Balistik zırhlarda katmanlı yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Zırh uygulamalarında rastlanan metal ve kompozit malzemelerin balistik olarak ön plana çıkan özelliklerinin birlikte kullanılması ile elde edilen zırh çözümleri hem ağırlık, hem de balistik yönlerden arzu edilen seviyede koruma sağlamaktadır.

Katmanlı zırhlar esas olarak ön katman ve destek katmanlarından oluşurlar. Asıl kullanım amacı, özellikle zırh delici mermi tehditlerine karşı mermi uç geometrisini balistik etkiyi azaltacak şekilde bozmak olan ön katmanlar sert metal ya da seramik gibi malzemelerden yapılmaktadır. Metal, kompozit ve/veya elastomer gibi malzemelerden oluşan destek katmanı ya da katmanları ise ön katman tarafından kısmen durdurulan tehdidin kalan enerjisini soğurmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, UHMWPE (çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen) elyaflı kompozit arka destek katmanı eklenmiş levhalara atışlar gerçekleştirilmiştir. Bu

atışların sonucunda, kaplama uygulanmış levhalara yakın balistik dayanım belirlenmiştir.

Yapılan atış testlerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda, en yüksek balistik performansa sahip olan 7075 alaşımı levhalar, polietilen (PE 1000) destek katmanlı olarak üç farklı tasarım koşulunda test edilmişlerdir. Alüminyum-polietilen katman sıralaması ile yapılan atışlarda, mermi polietilen levha tarafından tutulmuştur.

Sayısal çözümler, malzemelerin geniş bir hız aralığındaki çarpma şartları altındaki balistik performanslarının ortaya konması için kullanılabilecek kullanışlı araçlardır. Çarpma olayının benzetiminin yapılması, deney sayısının en aza indirilmesini, böylece malzeme ve zaman tasarrufunu sağlayacaktır.

Modelleme için MSC PATRAN ve çözüm için MSC DYTRAN ticari sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Model, 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T351 levhalara yapılan çeşitli hızlarda atışlar üzerine kurulmuştur. Levha ve mermide çapma nedeniyle oluşan hasar biçimleri, deneysel bulgularla uyumludur. Sayısal incelemede, sınır koşullarının çözüme etkileri de araştırılmıştır. Levhada oluşan çökme ve şişme değerleri açısından deneysel sonuçlara yakın ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

RESPONSE OF ALUMINUM PLATES SUBJECTED TO HIGH VELOCITY IMPACT LOADS

SUMMARY

Aluminum plates find their use in lightweight armor systems as well as aircraft structures, buildings and bridge decks. Impacts or other types of high-speed loading conditions are thus a relevant issue for several of these applications. In these applications, weight of a structure is an important design criterion. For this reason, it's known that aluminum alloys are preferred instead of conventional steel or concrete.

Ballistic response of single or multi-layered high strength metals and fabrics subjected to kinetic energy projectiles was investigated in many experimental, theoretical and numerical studies.

In this study, influence of projectile velocity, plate thickness and ballistic performance improving techniques e.g. surface coating and adding support on high velocity normal impact resistance of aluminum plates were analyzed experimentally and numerically.

Four different types of surface coating were applied to plates using plasma spray. Influence of surface coating on ballistic resistance of plates was tested. After the impact, penetration depth including plate bending in front face and bulging on back face of the target plate were measured. Improvement at the ballistic resistance of the plates was clearly observed in the coated ones. Both increase in non-perforating projectile velocity and decrease in penetration depth were experienced.

Layered structures are generally used in ballistic armor systems. Armors designed by using together the ballistic specifications of metal and composite materials used in armor applications provide the desired protection level regarding the weight and ballistic efficiency.

Layered armors basically consist of two main parts: front layer and support layer. Front layers are made from metal or ceramic materials. They aim to deform the nose shape of the projectile and to reduce its ballistic efficiency. Rear or support layers are assigned to absorb the remaining kinetic energy of the projectile. Metal, composite and/or elastomer materials are used in integral armor systems as a support layer.

In this study, UHMWPE (ultra high molecular weight polyethylene) fiber composite backed plates were also tested. After these tests, nearly the same ballistic resistance to that of surface coated plates was experienced.

Due to the results of the experiments, aluminum 7075 alloys supported with polyethylene which is the highest resistant were tested in three different configurations. Bullets were stopped in the configuration sequencing aluminum as a front layer and the polyethylene at the rear side.

Numerical solutions are practical tools that can be used to determine the ballistic performance of materials under impact loads in wide range of velocity interval. Simulation of the impact phenomenon minimizes the test numbers an saves the material and time.

MSC PATRAN for modeling and MSC DYTRAN for analyzing were used in numerical investigation. Numerical models were conducted on 2024 aluminum alloys of 6.35 mm thickness and varying bullet velocities. Deformation modes occurred in plate and projectile due to the impact loads are well-matched with test results. In numerical investigation, effects of boundary conditions on solution were also analyzed. Results obtained from simulations were compared with those of experiments and good correlation was found between the two.

1. GİRİŞ

Muharebe sahasının vazgeçilmez unsurlarından birisi olan zırh, kullanım açısından tarihin ilk savaşlarından beri önemini giderek artıran bir savunma aracı olmuştur. İnsanlık tarihi boyunca, silahla tanışılan zamanlarla paralel olarak silahtan korunma konusunda da araştırmalar yapılmış, böylece modern zırh tasarımı alanında hızlı adımlar atılmıştır. Özellikle askeri amaçlarla kullanılan zırh sistemleri modern silahlara karşı koruma sağlayabilecek şekilde tasarlanmak zorundadır. Bu nedenle, ele alınan zırhın yapısal olarak belirli mühimmatın çarpmasından kaynaklanan yükler altında işlevini etkin olarak yerine getirip getirmediği, yaygın bir araştırma konusudur [1].

Alüminyum levhalar uçak yapıları, gemi, bina ve köprü gibi çok çeşitli uygulamaların yanında, hareket halindeki cisimlerin hafif korunma sistemlerinde de kullanım alanı bulmaktadır. Çarpma veya yüksek hızlı yükleme şartları, zırh sistemleri ile ilgili uygulama alanlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu tip uygulamalarda, yapının ağırlığı önemli bir tasarım ölçütüdür. Bu nedenle, ağırlığı yüksek olan geleneksel çelik ya da beton gibi malzemeler yerine, daha hafif olan alüminyum alaşımların sıklıkla tercih edildikleri bilinmektedir [2].

Bu çalışmada; alüminyum levhaların yüzeye dik gelen yüksek hızlı çarpma yükleme şartları altındaki dayanımlarına mermi hızı, levha kalınlığı gibi girdilerle birlikte, çeşitli performans artırıcı yöntemlerin (yüzey kaplama, destek katmanı eklenmesi) etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Çalışmada, levhaların ön yüzlerine, ısıl püskürtme yöntemiyle uygulanan kaplamaların balistik dayanıma etkilerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen atışlardan sonra, levhaların ön ve arka yüzlerinde oluşan deformasyon miktarları ölçülmüştür.

Yapılan atış testlerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda, en yüksek balistik performansa sahip olan 7075 alaşımı levhalar, polietilen (PE 1000) destek katmanlı

olarak üç farklı tasarım koşulunda test edilmiş, en etkin korumanın hangi tasarımla elde edilebileceği araştırılmıştır.

Modelleme için MSC PATRAN ve çözücü olarak MSC DYTRAN ticari sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T351 levhalara yapılan çeşitli hızlardaki atışlar üzerine kurulan modelde, levhada oluşan çökme ve şişme değerleri açısından deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.1 Olay ve Önemi

Günümüze kadar uzanan teknolojik ilerlemelerin paralelinde zırh kullanımının gelişimi incelendiğinde, vücut korunumu ile başlayıp muharebe araçları, helikopterler, vb. uygulama alanlarının zırhlandırılması ile devam eden bir yol izlediği görülür.

Yakın zamanda gerçekleşen muharebeler göz önüne alındığında, gelişen silah sistemi ve mühimmata, yani gelişen tehdide karşı uygun zırh kullanımının, muharebe sahasında istenilen başarının anahtarı olduğu ispatlanmıştır. Bu gerçekten yola çıkılarak, zırh üretiminde hammadde olarak kullanılan malzemeler tekrar değerlendirilmiştir. Bu alanda, enerji emiş özelliği geliştirilmiş geleneksel malzemelerin ya da bunlara, gelişmiş üretim teknolojileri ile yeni malzemeler eklenerek oluşturulan tümleşik (entegre) zırh sistemlerinin kullanımı kaçınılmaz bir hal almıştır [3]. Koruyucu zırhın alansal yoğunluğu belirli bir değerin altına düştüğünde, aynı tehdide karşı koyabilmek için yeni ve gelişmiş koruyucu malzemelerin sisteme eklenmesi gerekir [4].

Son yılarda yapılan çalışmalarda, düşük ağırlıklı alüminyum metallerin kullanıldığı zırh sistemlerinden, çelik ve beton malzemelere oranla oldukça iyi sayılabilecek sonuçlar elde edilmiştir.

1.2 Yapılan Çalışmalar

Günümüzde, yüksek hızlı çarpma mekaniği ile ilgili çeşitli mühendislik uygulamaları mevcuttur. Bunlar askeri konularda olduğu kadar, sivil alanlarda da yoğun olarak yer almaktadır. Balistik uygulamalar ve hava-uzay yapıları konunun en belirgin örneklerini teşkil eder.

Yüksek hızlı çarpma konusunda sözü edilen bu geniş uygulama alanına rağmen, literatürde yer alan çalışmaların sayısı, düşük hızlı çarpma konusuna oranla oldukça sınırlı bir seviyede kalmaktadır. Bunun en önemli nedeni, yüksek hızda deneysel çalışmanın, özellikle ölçme hassasiyeti açısından çeşitli zorluklar içermesi ve dolayısıyla yeni çalışmalara temel oluşturacak verisel altyapının eksikliğidir [5].

Yapılan çalışmaların önemli bir bölümü, geleneksel malzemelerin yüksek hızlı çarpma yükleri altında, değişik şartlardaki davranışlarının ortaya konması üzerinedir.

Andersen ve Dannemann [6] 4.75 mm kalınlığında, iki farklı tipte alüminyum alaşım (AA6061-T6 ve AA7075-T6) kullanarak Sierra 165 mermilerle gerçekleştirdikleri atış testleri ile alüminyum alaşımların balistik davranışlarını belirlemeye çalışmışlardır. Testlerde, mermi hızları 260~370 m/s arasında değişmektedir.

Yapılan araştırmalar, sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının malzeme davranışını ve hasar biçimlerini yakından etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, merminin başlangıçta sahip olduğu kinetik enerjinin hangi enerji biçimlerine dönüşerek sönümlendiğinin bilinmesi, incelenen malzemenin balistik davranışının belirlenmesinde anahtar rol oynamaktadır.

Nemat-Nasser ve diğ. [7] SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar-Ayrık Hopkinson Basınç Çubuğu) kullanarak, oda sıcaklığı ve 600 K başlangıç sıcaklıklarında, yüksek kayma birim şekil değiştirmesine (γ=%170~910) uğramış tantal numunelerin mikroyapılarını incelemişlerdir. Yapılan incelemeler, belirli bir hat üzerinde yoğunlaşmış kayma gerilmelerinin, baskın hasar mekanizmasını oluşturduğunu göstermiştir.

Cheng ve diğ. [8] molibdenin düşük ve yüksek birim şekil değiştirme hızlarında farklı plastik davranışlarını deneysel olarak incelemişler ve bu sonuçlardan yararlanarak malzemenin dinamik davranışını ortaya koyan bünye denklemleri geliştirmişlerdir.

Nemat-Nasser ve Kapoor [9,10] tantal ve tantal-tungsten alaşımların yüksek birim şekil değiştirme hızlarındaki hasar davranışlarını ve bu esnada meydana gelen sıcaklık artışını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. IR (infrared-kızıl ötesi) sıcaklık ölçüm yönteminin kullanıldığı çalışma, yüksek birim şekil değiştirme hızlarında enerjinin yaklaşık %50'sinin ısı olarak biçim değiştirdiğini ortaya çıkarmıştır.

Yapılan çalışmalarda, plastik deformasyon bölgesinde, akma gerilmesi değerinin sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızı ile doğrudan ilişkili olduğu ve akma gerilmesi ile birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık arasında karmaşık bağlantılar bulunduğu ortaya konmaktadır [11-19].

Çarpma olaylarındaki enerji sönümü ve hasar biçimleri ile malzemelerin dinamik davranışları çeşitli çalışmalarda incelenmiştir [20-29].

Levhaların yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışlarına, kullanılan delici ya da mermilerin uç şekillerinin etkisi sıklıkla araştırılan konular arasındadır.

Børvik ve diğ. [30] 15~30 mm kalınlıklarda alüminyum (AA5083-H116) levhaların konik uçlu, sertleştirilmiş çelik delicilerin çarpmaları karşısında delinmelerini deneysel olarak incelemiştir. Tüm testlerde, delicilere ait ilk ve son hızlar yüksek hızlı kamera ile ölçülerek levhaların balistik sınırları belirlenmiştir. Literatürden faydalanılarak elde edilen balistik sınır değerleri ile deney sonuçlarının uyumlu oldukları gözlenmiştir.

Gupta ve diğ. [31,32] tarafından yapılan çalışmalarda; küt, konik ve küresel uç formuna sahip delicilerin alüminyum levhalara çeşitli hızlarda çarpmaları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerde, küresel uç formuna sahip delicilerin kullanıldığı durumlarda en yüksek balistik sınır değerleri elde edilmiştir. Konik uçlu delicilerin, delicilik özelliği en fazla olduğu ve levha kalınlığı arttıkça, küt delicilerin levhayı delmek için daha az kinetik enerjiye ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan alüminyum levhaların dinamik yükleme altındaki davranışlarının sayısal olarak modellenmesi için Johnson-Cook bünye denklemi katsayıları elde edilmiş, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ile kurulan sayısal modelin sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu oldukları saptanmıştır.

AA 6061 T651 levhalar ve faklı uç şekillerine sahip çelik deliciler kullanılarak orta ve yüksek çarpma hızlarında çarpma davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelendiği çalışmalar mevcuttur [33-35].

Børvik ve diğ. [36,37] ise farklı uç formlarındaki delicilerin çarpmaları karşısında çelik levhaların davranışlarını incelemiştir. Düşük hızlarda yapılan deneyler, küt uç formuna sahip delicilerin, küresel ve konik uçlu olanlara oranla daha etkin delme özelliğine sahip olduklarını göstermiştir. Çarpma hızı arttıkça, konik uçlu delicilerin levhayı delip geçmek (perforasyon) için daha az bir enerjiye ihtiyaç duyduğu

belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deneysel sonuçlara oldukça yakın sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada, metal levhalara konik ve dairesel uçlu delicilerin çarpmalarının 2-boyutlu olarak incelendiği bir durumda, uyarlanabilir (adaptive) ağ yapısının (mesh) kullanılmasının gerekliliği gösterilmiş, eleman boyutları küçüldükçe, sayısal sonuçların iyileştiği belirlenmiştir.

Dey ve diğ. [38] tarafından yapılan çalışmada ise üç farklı uç formuna sahip delici kullanılarak malzeme mukavemeti ile çarpma dayanımı ilişkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, küt uçlu deliciler için, malzeme mukavemeti arttıkça balistik sınır hızın düştüğünü, konik ve küresel uç formlarında ise bunun tersi sonuçların elde edildiğini göstermiştir.

Bazı araştırmacılar ise mermi uç formu ile birlikte çarpma açısının etkilerini de incelemişlerdir [39-43].

Yüksek hızlı bir çarpma olayında, levhanın davranışı kadar, çarpan cisim ya da mermilerin özellikleri de önemli bir etkendir. Burada, merminin rijit olması veya olmaması, yapılan incelemenin temel hareket noktasını oluşturmaktadır. Literatürde, rijit mermilerin farklı açılarla metal levhalara çarpmaları veya levhada oluşan delinme miktarı gibi konularda yapılan çalışmalar genellikle kuramsal alanda yoğunlaşmaktadır [44-49]. Rijit olmayan mermiler kullanılarak yapılan çalışmaların ise deneysel ve sayısal alana kaydığı veya nispeten kalın metal hedef levhaların kuramsal araştırmalara konu olduğu dikkat çekmektedir [50-53].

Belirli bir hedef ve merminin oluşturduğu özel şartların söz konusu olduğu bir durumda, perforasyonun gerçekleşmesi için gereken en düşük çarpma hızının bilinmesi oldukça önemlidir. Perforasyonu sağlayan bu en düşük hız “balistik limit” olarak tanımlanır. Çarpmaya maruz kalan hedefi oluşturan yapının iş görmezliğine (failure) neden olan çok çeşitli hasar biçimleri ve ölçütler mevcuttur. Çarpma hızı balistik limitin üzerine çıktıkça, merminin son hızı daha da önem kazanır. Çünkü hedefin arkasında kalan personel ya da teçhizat için ortaya çıkan tehdidin seviyesi bilinmelidir. Balistik limit ile ilgili incelemelerde, merminin şekli ve boyutları, çarpma hızı ve hedefin kalınlığı gibi etkenler hesaplamalarda ön plana çıkmaktadır.

Malzemenin iş görmezliğine neden olabilecek gerilme, katmanlar arası ayrılma gibi hasar biçimleri perforasyon için gerekli enerji miktarının, dolayısıyla balistik limitin saptanması ve uygun bir modelin ortaya çıkarılabilmesi için çok iyi belirlenmelidir.

Literatürde, balistik limitin belirlenmesi ve onu etkileyen faktörler üzerine yapılmış kuramsal, deneysel ve sayısal çalışmalar mevcuttur [54-57].

Ağırlığın kritik bir faktör olduğu personel taşıyıcı ve zırhlı araçlar, savaş uçakları ve helikopterler gibi uygulamalarda, balistik koruma için özellikle elyaf-kompozit malzemeler kullanılır. Yüksek hızlı uygulamalarda, seramik esaslı bir ön katman ve kompozit arka yüzeyden oluşan çeşitli uygulamalara da rastlanmaktadır. Seramik-kompozit tümleşik bu zırhlar kara araçlarında metalik zırhların yerini almış, havacılık uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Böylece ağırlık tasarrufu konusunda önemli bir kazanım elde edilmiştir. Seramik dış katman aynı zamanda merminin ucunda meydana getirdiği deformasyonla daha küt bir form almasını ve ilk anda oluşan yüksek çarpma yüklerinin daha geniş bir alana yayılmasını ve penetrasyonun zorlaşmasını sağlar.

Seramik malzemelerin zırh yapımında kullanımı, zırh ağırlığının azaltılması açısından oldukça avantajlıdır. Fakat kırılgan yapılarından dolayı seramiklerin tek başlarına zırh olarak kullanımları sınırlıdır. Bu nedenle seramiklerin üstün basma mukavemeti ve sertliklerinden yararlanan ve ön katman olarak seramik, arkada ise metal veya kompozit içeren katmanlı yapılar hafif zırh üretimi konusunda önemli bir potansiyele sahiptirler.

Espinosa ve diğ. [58] yaptıkları sayısal çalışmada, seramik-çelik katmanlı yapının yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışlarını delicilerin çap/uzunluk oranları, malzeme erozyonunun başlangıç seviyesi gibi yönlerden parametrik olarak incelemişlerdir.

Mahfuz ve diğ. [59] seramik, S-2 kompozit ve kauçuk ara katmandan oluşan tümleşik bir zırhın, çelik delicilerin çarpması karşısındaki davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiş, özellikle katmanlar arasındaki ayrılmalar ve gerilme dağılımlarını ele alarak sonuçları karşılaştırmışlardır.

Zukas ve Scheffler [60] aynı türden çok katmanlı bir yapı ile eşit kalınlıktaki tek bir levhanın çarpma davranışlarını sayısal olarak incelemişler, katmanlı yapının eşdeğer çarpma yüklerine karşı daha düşük bir direnç gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Pereira ve Lerch [61] ısıl işlemlerin balistik davranışa etkilerini araştırmışlardır. İki farklı tavlama ve yaşlandırma durumunun ele alındığı çalışmada, tavlanmış ve yaşlandırılmış malzemelerin statik davranışları arasında büyük farklar gözlenmiştir.

Tavlanmış numunelerde, yaşlandırılmış olanlara göre düşük mukavemet ve sertlik değerleri elde edilirken, kopma uzaması tavlama işleminde daha yüksek seviyededir. 150~300 m/s arasında değişen çarpma hızlarında yapılan yüksek birim şekil değiştirme hızlı deneylerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yadav ve Ravichandran [62] katmanlı yapıların balistik performanslarını inceledikleri deneysel çalışmada, yapının balistik performansını destek katman olarak kullanılan 6061-T6 alüminyumda meydana gelen delinme miktarına göre belirlemişler ve katmanlı yapının çarpma dayanımını artırdığını saptamışlardır.

Kim ve diğ. [63] arka katmanda kullanılan malzemenin, yapının toplam balistik dayanımına etkilerini incelemişlerdir.

Übeyli ve diğ. [64] alümina-AA2024-T6 kompozit zırhının 7.62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan numuneler, farklı alümina katman kalınlıklarında test edilerek oluşan hasar mekanizmaları ve numunelerin balistik performansları araştırılmıştır.

Cerit ve diğ. [65] seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin balistik performansını incelemişlerdir. Çalışmada, iki farklı tanecik takviye (Al_2O_3 ve SiC) ve matris olarak AA5083, AA7075 ve AA2024 kullanılarak alüminyum matrisli tanecik takviyeli kompozitler üretilmiştir. Balistik testler alüminyum 5083 destek levhaları kullanılarak 7.62 mm AK-47 mermisi ve 7.62 mm AP (armor piercing-zırh delici) G3 mermisi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, küçük tane boyutlu takviye elemanlarının balistik açıdan daha kullanışlı olduğu ve daha iyi özellikler gösterdiği görülmüştür.

Ben-Dor ve diğ. [66] iki katmanlı bir kompozit zırhın tasarımı konusunda en düşük ağırlık ve en yüksek balistik dayanım şartlarını sağlayan sonuçların elde edilmesi üzerine çalışmışlardır.

Park ve diğ. [67] balistik çarpmaya maruz kalan katmanlı bir yapının sonlu elemanlar ile modellenmesinde optimizasyon için kullanılabilecek unsurları içeren bir çalışma yapmışlardır.

Farklı veya benzer özellikteki katmanların bir araya getirilmesi ile oluşturulan zırh yapıları pek çok incelemeye konu olmuştur. Yüksek hızlı çarpma davranışları üzerine deneysel, sayısal veya ikisinin birlikte kullanıldığı yöntemler içeren çeşitli çalışmalarda; katmanlı metal yapılar, seramik-kompozit, metal-kompozit veya

seramik-metal tümleşik sistemler [68-77], kumaş ve metal matrisli kompozitler [78-87] ve sandviç yapılar [88-91] incelenmiştir.

1.3 Tez Çalışmasının İçeriği

Sürekli yenilenen ve etkinliği artan saldırı tehditlerine karşı koyacak, düşük üretim maliyetli, üstün balistik performanslı zırhlar savunma araştırmalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Tek ve çok katmanlı, yüksek mukavemetli metal ve kompozit hedef levhaların kinetik enerjili mermilere karşı gösterdiği balistik davranışın deneysel, kuramsal ve sayısal olarak incelenmesi çeşitli araştırmalara konu olmuştur. Bu çalışmalarda, yüksek mukavemet ve balistik dayanım özelliklerinin yanında, mümkün olan en düşük ağırlığa sahip olma, ulaşılmak istenen önemli tasarım hedeflerindendir. Çünkü merminin zırh içinde durdurulması ana amaç olmakla beraber, zırhın neden olduğu ilave ağırlık korunan personel ya da teçhizatın hareket yeteneğini kısıtlamaktadır. Yakın geçmişte yapılan araştırmalar neticesinde yüksek balistik özellikli, fakat düşük yoğunluklu kompozit zırh sistemleri göreceli olarak daha ağır olan tek katmanlı metal zırhlara alternatif oluşturabilecek konuma gelmiştir.

Balistik zırhlarda katmanlı yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Zırh uygulamalarında rastlanan metal ve kompozit malzemelerin balistik olarak ön plana çıkan özelliklerinin birlikte kullanılması ile elde edilen zırh çözümleri hem ağırlık, hem de balistik yönlerden arzu edilen seviyede koruma sağlamaktadır.

Katmanlı zırhlar esas olarak ön katman ve destek katmanlarından oluşmakla birlikte, ince bir koruyucu katman ile de kaplanabilmektedir. Asıl kullanım amacı, özellikle zırh delici mermi tehditlerine karşı mermi uç geometrisini balistik etkiyi azaltacak şekilde bozmak olan ön katmanlar sert metal ya da seramik gibi malzemelerden yapılmaktadır. Metal, kompozit ve/veya elastomer gibi malzemelerden oluşan destek katmanı ya da katmanları ise ön katman tarafından kısmen durdurulan tehdidin kalan enerjisini soğurmaktadır [71].

Bu çalışmada, tümleşik bir zırhın balistik davranışlarının incelenmesine yönelik kuramsal veya sayısal uygulamalara referans olabilecek deneysel bulguların elde edilmesi ve sayısal olarak deneysel sonuçların benzetiminin yapılması amaçlanmıştır. Deneysel bir çalışmada öncelikle belirlenmesi ve çalışmanın ilerleyişine yön vermesi

gereken temel noktalar vardır. Bu hususlar, yapılacak olan çalışmaya ait bilgileri içerecek şekilde, takip eden paragraflarda açıklanmıştır.

1.3.1 Kullanılan malzemelerin seçimi

Zırh çelikleri, titanyum ve alüminyum alaşımlı malzemeler kullanılan en yaygın metal zırh malzemeleridir. Bu malzemelerin sertlik değerleri oldukça yüksek seviyelere kadar çıkmaktadır. Yüksek malzeme yoğunluğu kullanımlarını sınırlandırmakla birlikte, çoklu vuruş performansı, düşük kalınlık ve birim maliyeti açısından bu malzemeler avantajlı olabilmektedir.

Yüksek performanslı UHMWPE (çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen), Aramid, Kevlar ve S2 Cam zırh uygulamalarında kullanılan önemli kompozit malzemelerdir. Bu malzemelerin tek başlarına kullanılmasıyla normal çekirdekli tehditlere karşı hafif balistik korunma çözümleri elde etmek mümkündür. Ayrıca, katmanlı zırhlarda destek katmanı olarak kullanılmaları ile zırh delici mermi tehditlerine karşı da hafif tasarımlar elde edilebilmektedir. Hafiflikleri ve kolay şekil verilebilmeleri sayesinde, başta ağırlık ölçütünün önemli olduğu personel zırhları ve hava araçları olmak üzere, kompozit malzemelerden oluşan katmanlı yapılar birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Alüminyum alaşımlar düşük yoğunluk, yüksek yapısal mukavemet ve enerji emiş kapasitesi özellikleri nedeniyle hafif zırh tasarımında çoklukla kullanılmaktadır. Alüminyumun ön plana çıkan bir diğer özelliği ise kolay şekil verilebilmesidir. Bu hususlar göz önüne alınarak, yapılan deneylerde yapay yaşlandırma, yüzey kaplama gibi birtakım işlemlerden geçirilerek dayanım özellikleri geliştirilmiş alüminyum alaşımlar kullanılmıştır.

Balistik çarpmalarda, penetrasyon merminin sahip olduğu kinetik enerji ile doğrudan bağlantılıdır. Bu bakımdan penetrasyonun ve özel olarak da perforasyonun önlenmesi için kinetik enerjinin çarpma esnasında soğrularak şekil değiştirme enerjisine dönüştürülmesi esastır. Son yıllarda çok yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler birçok üstünlüklerinin yanında enerji emiş kapasiteleri yönüyle de ön plana çıkmaktadırlar. Bu konuda, UHMWPE esaslı elyaflar kullanılarak oluşturulan kompozit yapılarda oldukça üstün balistik performans ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar, polietilenin düşük yoğunluk özelliğinin yanı sıra çok yüksek bir enerji emiş kapasitesine sahip olduğunu da ortaya koymaktadır. Bu nedenle, zırhın destek

katmanı olarak polietilen elyaflı kompozit malzemelerin üstün enerji emiş davranışları açısından uygun bir seçim olacaktır [92].

Malzeme seçiminde ortaya çıkan önemli bir konu da temin edilebilirliktir. Özellikle yurtdışı kaynaklı zırh malzemeleri temin açısından sorunlara neden olmaktadır. Konu bu yönüyle ele alındığında; yurtiçinde temin ve üretim olanağı bulunan malzemelerin kullanımı yurtdışına bağımlılığı da azaltacağından, çalışmada alüminyum levhaların kullanılması önemli bir kazanım olacaktır.

1.3.2 Çalışma yöntemi

Balistik çalışmalarda, teste tabi tutulacak zırhın sahip olacağı yapılandırma şeklinin belirlenmesi başta gelen tasarım unsurlarından biridir. İncelenen parametrelerin bu yapılandırmadan etkilenme derecesi, deney sonuçlarının en belirleyici özelliğini oluşturur. Deneylerde, balistik performans, yani zırhın mermiyi durdurabilme yeteneği araştırılacağına göre, merminin zırh içinde ne kadar ilerlediğinin kontrol edilmesi gereklidir. Ayrıca; penetrasyon derinliğinin zırh yapılandırmalarındaki değişimlerden etkilenme oranı da incelenmelidir.

Bu açıklamalar doğrultusunda; çalışmada alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma dayanımlarına mermi hızı, levha kalınlığı gibi girdilerle birlikte çeşitli performans artırıcı yöntemlerin (yüzey kaplama, destek katmanı eklenmesi, ısıl işlemler, vb.) etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçların sayısal olarak modellenmesi için MSC PATRAN ve MSC DYTRAN ticari sonlu elemanlar yazılımları kullanılmıştır. Çalışmada, dinamik yükler altındaki davranışların modellenmesinde kullanılan malzeme özelliklerinin bilinmesi nedeniyle AA 2024 T351 levhalar kaplamasız olarak kullanılmış ve sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır.

2. YÜKSEK HIZLI ÇARPMA MEKANİĞİ

Literatürde, balistik çarpma ile ilgili çeşitli tanımlamalar mevcuttur. Merminin hedefi tamamen delip geçmesi, yani perforasyonla sonuçlanan çarpmalar balistik çarpma olarak tanımlanırken, penetrasyonun gerçekleşmediği çarpmalar düşük hızlı çarpma konusunun içinde incelenirler.

Balistik çarpmalarla ilgili çalışmalarda, merminin son hızının doğru tespit edilmesi oldukça önemli bir konudur. Bu hesap, özellikle deneysel incelemelerde oldukça zordur. Çünkü mermi ve hedefe ait çok sayıda parçacık çarpma ve penetrasyon esnasında etrafa yayılır. Bu parçacıklar hız ölçümü ile ilgili hissedici düzenekleri harekete geçirebilir ve hesaplamada hatalara sebep olabilir. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için özel ölçme sistemleri geliştirilmiştir.

Çarpma problemlerinin çözüm yöntemleri üç ayrı biçimde şekillenebilir:

Bunların ilki çok sayıda deneysel bilginin elde edilip birbirleriyle ilişkilendirildiği yaklaşımdır. Bu yöntem belirli şartlara sahip olan problemlerin çözümü için kullanışlı olsa da var olan deneysel bilgiyi elde edildiği şartların dışında kalan problem sahalarında kullanmaya çalışmak oldukça zordur ve çözümü olanaksız hale getirebilir.

İkinci yöntem çarpmanın sayısal benzetimi için mühendislik modellerini geliştirmek ve kullanmaktır. Bu yaklaşım basit işleyişli tek boyutlu problemlerden, farklı hasar biçimlerine sahip, karmaşık, iki veya üç boyutlu çarpma problemlerine kadar değişik alanlarda uygulanabilir.

Son yöntem ise yapının küçük elemanlara bölünerek temel denklemlerin her eleman için ayrı ayrı uygulanmasına dayalı olan ayrıklaştırma (diskritizasyon) yöntemidir. Uygun olan sayısal çözüm tekniğinin -örneğin sonlu elemanlar veya sonlu farklar yönteminin- kullanılması yakınsak çözümler sağlamakla birlikte zaman alıcıdır. Çünkü girdilerdeki her değişiklik için çözümün tekrarlanması gerekmektedir.

Her yöntem kendine has güçlü ve zayıf yönlere sahiptir. Herhangi biri ile tek başına karmaşık bir problemin çözümü arzu edildiği ölçüde uygun sonuç vermeyebileceğinden, her üçünün de birlikte kullanılması en doğru yaklaşımdır [93].

Penetrasyon için model geliştirmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntem deney ve analiz sonuçları ile yapılan iterasyonlardır. Deneysel çalışma, modeli şekillendiren önemli bir etkendir. Modelden ve deneylerden elde edilen sonuçlar ne kadar örtüşürse kurulan modelin başarısı o kadar yüksek demektir. Aksi halde model hatalı sonuçlar verecektir.

Yüksek hızlı çarpmaya maruz kalan bir zırh ile ilgili olarak yapılacak analitik bir çalışmada, problemin anlaşılabilmesi için yapılması gereken ilk şey çarpma boyunca hedefe etki eden yüklerin belirlenebilmesini sağlayacak bir model geliştirmektir. Kurulan model hedef ve merminin hareketlerini ve hasar oluşumlarını uygun biçimde temsil edebilmelidir. Böylece hedefin dinamik davranışları doğrulukla tanımlanabilir. Birçok çalışmada, yapının hareketini modellemek için sanki-durağan (quasi-static) yaklaşımdan ve sistemdeki toplam enerjinin korunumu ilkelerinden yararlanılır. Ayrıca daha karmaşık plak kuramları ve iki veya üç boyutlu elastikiyet modelleri de kullanılabilir.

Yüksek hızlı çarpmayla ilgili incelemelerde, enerjinin korunumu fiziksel denklemlerin oluşturulması için temel hareket noktasıdır. Bir merminin sahip olduğu kinetik enerji, çarpmanın ilerleyen safhalarında büyük miktarda deformasyon enerjisi olarak hedefe aktarılır. Bu bakımdan, yapılan çalışmaların önemli bir bölümünü, hedef plağın çarpma yükleri altında gösterdiği enerji emiş davranışları oluşturur.

Yabancı bir maddenin bir yapıya çarpması malzemenin mukavemetini sınırlandıran bir hasara neden olur. Bu nedenle, çarpmaya maruz kalan bir yapının dinamik yükler altındaki davranışları iyi incelenmelidir. Bazı çarpmalar küçük bir bölgede hasara neden olurken, bazıları da yapının tamamını etkileyebilir. Kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve çarpma şartlarına bağlı olarak birbirlerinden çok farklı hasar biçimleri oluşabilir.

Yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen bilgilerin deneysel sonuçlarla uyumlu olması ve yapının dinamik yükler altındaki davranışlarının iyi anlaşılması gerekir. Günümüzde, değişik tipte çarpmaların benzetiminde kullanılabilecek çeşitli test düzenekleri mevcuttur. Düşük hızlı çarpmalar için genellikle büyük bir ağırlığın

düşük süratle test edilecek yapı üzerine düşmesi şeklinde çalışan "ağırlık düşürme (drop-weight tester)" cihazları kullanılır. Yüksek hızlı çarpmalar için ise düşük ağırlıkta bir cismin, hava ile çalışan "gaz tabancası (gas gun)" yardımı ile hedef üzerine yüksek hızda fırlatılması esasına dayanan düzenekler kullanılır (Şekil 2.1).



a) b)

Şekil 2.1: Test cihazları a) ağırlık düşürme [94], b) gaz tabancası [61]

Çalışmanın odak noktasını oluşturan parametrelerdeki değişimlerin tespit edilmesini sağlayacak ölçme sistemleri de test düzenekleri içinde bir bütün olarak ele alınmalıdır. Matematiksel modelden ve deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında, modelde kullanılan yaklaşımın doğruluğunun sınanabilmesi için uygun test/deney sisteminin seçimi önemlidir.

Sözü edilen bu yöntemlerin, bilimsel çalışmaların tamamında olması gerektiği gibi, doğadaki gerçek durumla karşılaştırılarak doğruluğunun kontrol edilmesi gerekir. Yöntemin güvenilirliği, ancak bu şekilde garanti edilebilir. Bu noktada, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş bulguların varlığı daha da önem kazanmaktadır.

2.1 Temel Yasalar

Gerilme dalga yayılımı, balistik modelleme ve sayısal çözüm içeren çarpma dinamiği konusunda yapılan çalışmaların tamamında fiziğin temel korunum yasalarından faydalanılır.

2.1.1 Kütlenin korunumu

Çok basit bir ifadeyle, fiziksel bir sistemde ele alınan çözümün her aşamasında sistemin toplam kütlesi sabittir.

$$\int_V \rho \mathrm{dv} = \text{sabit} \tag{2.1}$$

Burada, ρ birim hacimde bulunan kütle, yani yoğunluk, dv ise hacim elemanıdır.

2.1.2 Momentumun korunumu

Bu korunum yasası farklı şekillerde ifade edilebilir. Temel olarak Newton'un 2'nci Kanununa dayanır.

$$\vec{\mathrm{F}} = \mathrm{m}\frac{d\vec{V}}{dt} \tag{2.2}$$

n adet kütleden (m_i) oluşan ve hiçbir dış kuvvete maruz kalmayan kapalı bir sistemde momentumun korunumu şöyle yazılabilir;

$$\sum_{i=1}^{n} m_i \vec{V}_i = sabit \tag{2.3}$$

2.1.3 Enerjinin korunumu

Bu yasayı, sistemi *j* adet ayrık kütleden oluşmuş olarak düşünerek ifade edebiliriz. Başlangıç anında *i*, belirli bir zaman anında ise *f* alt indisini kullanarak;

$$\sum_j E_i + \sum_j \frac{1}{2} m V_i^2 = \sum_j E_f + \sum_j \frac{1}{2} m V_f^2 + W \tag{2.4}$$

yazılabilir. Bu ifadede, *E* sistemde depolanmış olan elastik enerji, *W* ise sistemin yaptığı toplam iştir.

2.2 Dalga Yayılımı

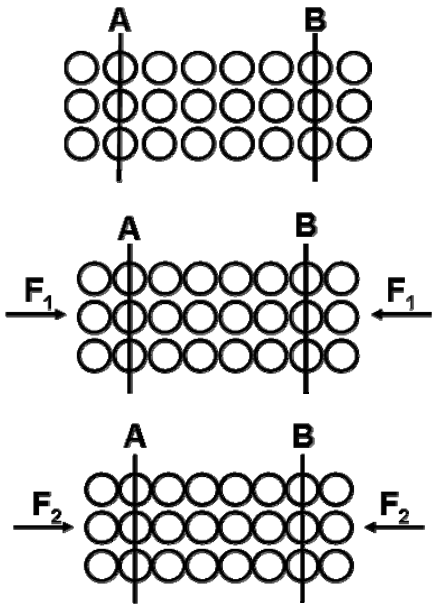
Rijit cisimlerin dinamiğinde, bir cismin herhangi bir noktasına kuvvet uygulandığında, gerilmelerin tüm noktalarda aynı anda hissedildiği ve uygulanan kuvvetin, ağırlık merkezinde açısal ivmelenme ile birlikte tüm yapıda doğrusal bir ivmelenmeye neden olduğu kabul edilir. Diğer yandan, elastisite kuramında, yapının uygulanan kuvvetler altında dengede olduğu düşünülür ve elastik deformasyonların statik değerlerine ulaştıkları kabul edilir. Bu kabuller, kuvvetin uygulandığı an ile dengenin sağlandığı an arasındaki sürenin, gözlemin yapıldığı süreye kıyasla çok

kısa olduğu problemler için geçerlidir. Aslında, çok kısa süre ile uygulanan veya hızlı bir şekilde değişen kuvvetler etkisi altında, gerilme dalga yayılımı etkileri dikkate alınmalıdır [95].

Gerçek katılar mükemmel elastik davranmazlar. Bu nedenle, katı ortamlarda herhangi bir rahatsızlık meydana getirildiğinde, mekanik enerjinin bir bölümü ısı ve iç sürtünme genel adıyla anılan çeşitli biçimlere dönüşür. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi yükleme esnasında izlediği yolu, yüklemenin ardından boşaltma durumu için izlemez. Bu duruma "histerizis" olayı denir. Yükleme ve boşaltma eğrileri arasında kalan alan, enerjideki değişimi ifade etmektedir. Statik yüklemelerde, bu durum ihmal edilebilir mertebelerdedir. Gerilme dalgalarının etkili olduğu yükleme durumlarında ise yapının her bölümü bu çevrime ardı ardına maruz kaldığı için histerizis olayı önemli bir faktördür [95].

2.2.1 Elastik dalgalar

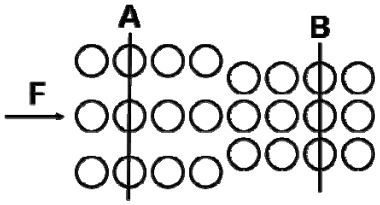
Bir yapıya bir dış yükün uygulanması, tanım gereği dinamik bir süreçtir. Ancak, kuvvetlerin uygulanma hızı düşük olduğunda, yükleme sürecinin, yapının statik olarak dengede olduğu küçük adımlardan oluştuğu düşünülebilir. Şekil 2.2'de, uygulanan kuvvete göre yapıyı oluşturan atomlar arasındaki mesafelerin değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2: Atomların sanki-durağan (quasi-static) elastik deformasyonu ($F_2>F_1$) [96]

Gerçekte, iç gerilmeler kuvvetin uygulandığı bölgeden diğer bölgelere aynı anda iletilmezler. Gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler atomdan atoma belirli bir hızla

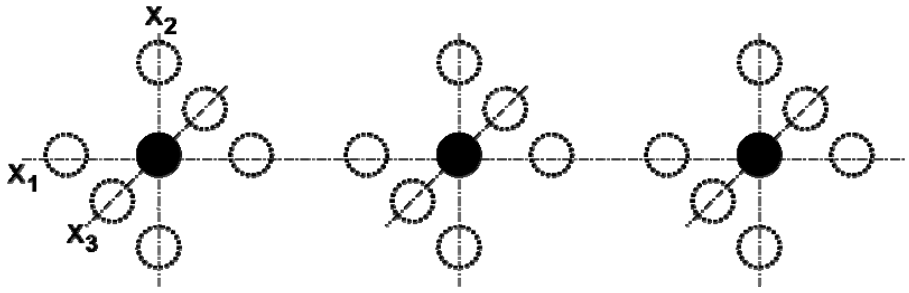
aktarılırlar. Şekil 2.3'te, dF/dt hızıyla uygulanan kuvvetin neden olduğu gerilmelerin bölgeden bölgeye değiştiği görülmektedir. Kuvvet A-kesitinde hissedildiği anda, B-kesiti henüz kuvvet etkisi altında değildir.



Şekil 2.3: 2-boyutlu atomların dinamik elastik deformasyonu [96]

Atomik seviyede dalga, darbenin komşu atomlar arasında birbirini izlemesi olarak düşünülebilir. Her atom, belirli bir hız seviyesine ivmelendiğinde, sahip olduğu momentumun tamamını ya da bir kısmını komşu atomlara aktarır. Kütle, atomların yerleşimi, kuvvet etkileri gibi faktörler gerilme dalgasının izleyeceği yolu belirler.

Bir yapıyı oluşturan atomlar teker teker ele alındığında, bu yapı içinde yayılan elastik dalga hızı oldukça gerçekçi ve basit bir şekilde hesaplanabilir. Atomlar denge konumları etrafında, saniyede yaklaşık olarak 10^{13} defa titreşirler. Bu titreşimler üç boyutlu olmalarına rağmen, üç eksende incelenebilir. Şekil 2.4'te, atomların denge konumlarını içleri dolu olan yuvarlaklar, üç eksende alabileceği uç konumları ise kesikli çizgili yuvarlaklar göstermektedir. Burada, atomlar sürekli bir titreşim halindedirler ve soldaki atom, kendisine gelen yükleri sağındaki komşu atoma aktarır.



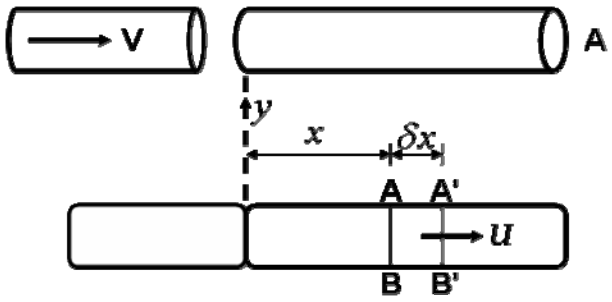
Şekil 2.4: Bozuntunun atomdan atoma aktarımı [96]

Tüm dalga yayılımı ifadeleri, Newton'un ikinci yasasının doğrudan sonucu olarak, malzemenin sürekli olduğu (kütlenin düzgün dağıldığı) kabulü ile türetilebilir. Ancak, atomlar arasında, atomları birbirlerine bağlayan küçük yaylar gibi kuvvetlerin olduğunu düşünmek daha doğru bir yaklaşımdır.

Soldaki bir atoma bir kuvvet uyguladığında, bu darbenin komşu atoma iletilmesinde, ortalama olarak atomların titreşim periyoduna (10^{-13} s) eşit bir gecikme meydana gelir. Ortadaki atomlar bu etkiyi aynı şekilde komşu atomlarına iletirler. Komşu atomlar arasındaki mesafe bilindiğinde, bu işlemin hızı kolayca hesaplanabilir. Örneğin, bir katı metal (demir) için bu mesafe 3 A ($3\times10^{-10}\ m$) olarak alınabilir. Dolayısıyla, dalganın yayılma hızını şu şekilde bulmak mümkündür;

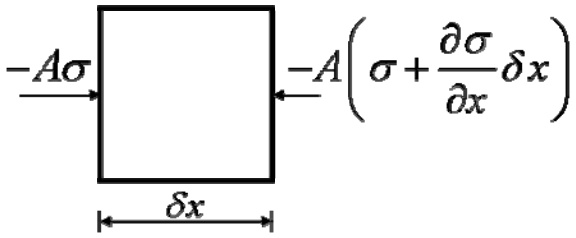
$$V = \frac{a}{t} = \left(3\times10^{-10}\right)\times10^{13} = 3\times10^{3}\, m/s \qquad \textbf{(2.5)}$$

Şekil 2.5'te, silindirik bir çubuğa V hızı ile çarpan bir çubuk görülmektedir. Burada, basma gerilme dalgaları soldan sağa doğru hareket etmektedir.



Şekil 2.5: Silindirik çubukta dalga oluşumu [96]

Herhangi bir t anında, bu dalga x konumundadır. AB kesiti ile bundan δx kadar uzaktaki A'B' kesiti (Şekil 2.6) ele alınarak ABA'B' üzerinde Newton'un 2'nci yasası uygulandığında;



Şekil 2.6: Silindirik çubuk elemanı [96]

$$F = ma \qquad \textbf{(2.6)}$$

$$-\left[A\sigma - A\left(\sigma + \frac{\partial\sigma}{\partial x}\delta x\right)\right] = A\rho\delta x\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \qquad \textbf{(2.7)}$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = \rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \qquad \textbf{(2.8)}$$

Yer değiştirme doğrusal elastik olduğundan, Hooke yasası geçerlidir;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[E\frac{\partial u}{\partial x}\right] = \rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{2.10}$$

(2.10) denkleminden bir dalga hızı tanımlamak mümkündür;

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2.11}$$

2.2.1.1 Elastik dalga türleri

Katılarda, parçacıkların hareketlerinin dalgaların yayılma doğrultuları ile nasıl ilişkilendirilebileceğine ve sınır şartlarına göre yayılan farklı dalga tiplerinden söz edilebilir. Burada kullanılan "parçacık" terimi ile katı ortamın ayrık en küçük bölümü kastedilmektedir. Zira atomlar genel hareket doğrultusundan farklı yönlerde hareket edebilirler.

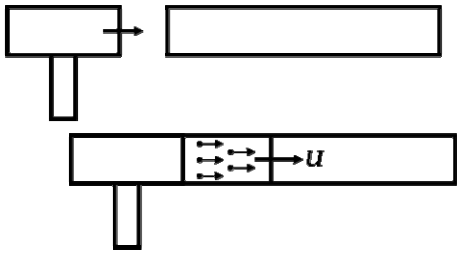
Eğer ortam kayma gerilmelerine maruz kalmıyorsa, tek bir çeşit dalga yayılımından söz edilebilir. Uzama yönünde şekil değiştirmiş (extended) izotropik katı ortamlarda ise genişleme (dilatation) ve çarpılma (distortion) olmak üzere iki çeşit elastik dalga yayılımı söz konusudur. Katı ortam deforme olduğunda, her iki gerilme dalga tipi de meydana gelir. Bu iki dalga tipine ek olarak, katı cismin yüzeyinde Rayleigh (yüzey) dalgaları yayılır. İki boyutlu olarak yayılan yüzey dalgaları ile ilişkili rahatsızlıklar, derinlikle birlikte üstel olarak zayıflar. Doğrusal gerilme-birim şekil değiştirme davranışına sahip katılarda iki dalga yayılımı tipi daha görülür: şok dalgaları ve plastik dalgalar. Şok dalgaları, bu tip yapılar içinde, büyük yer değiştirmelere ait yayılma hızlarının, küçük yer değiştirme durumlarındaki dalga hızlarından büyük olduğu durumlarda oluşur [95].

Katılarda yayılan dalga tipleri, en genel anlamda şunlardır [96];

- Uzunlamasına (longitudinal) dalgalar
- Kayma (distortional, shear) dalgaları
- Yüzey (Rayleigh, surface) dalgaları

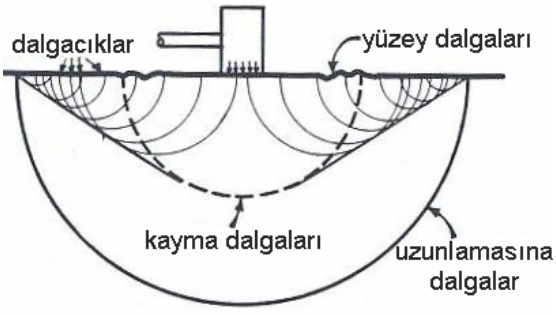
- Arayüzey (Stoneley) dalgaları
- Eğilme (bending, flexural) dalgaları

Uzunlamasına dalgalarda, dalga yayılımı doğrultusunda ileri ve geri hareket eden katı parçacıklarının hareketi (U_p) dalgaların yayılma doğrultusuna (U) paraleldir. Eğer dalgalar basma yönünde ise hareket aynı yönde, çekme yönünde ise ters yöndedir. Uzunlamasına dalgalar için Şekil 2.7'de basit bir örnek görülmektedir. Uzun bir silindirik çubuğun sol ucuna vurularak bu dalgalar oluşturabilir. Bu dalgalar (2.11) denkleminde verilen hızla hareket ederler.



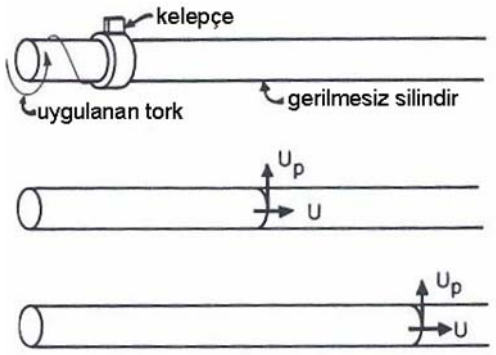
Şekil 2.7: Uzunlamasına dalgalar [96]

Şekil 2.8'de ise yarı sonsuz bir ortamda oluşan dalgalar görülmektedir. Burada, uzunlamasına dalgalarla birlikte kayma ve yüzey dalgaları da oluşmaktadır.



Şekil 2.8: Yarı-sonsuz ortamda dalga oluşumu [96]

Şekil 2.9'da, kayma dalgalarına bir örnek görülmektedir.



Şekil 2.9: Kayma dalgaları [96]

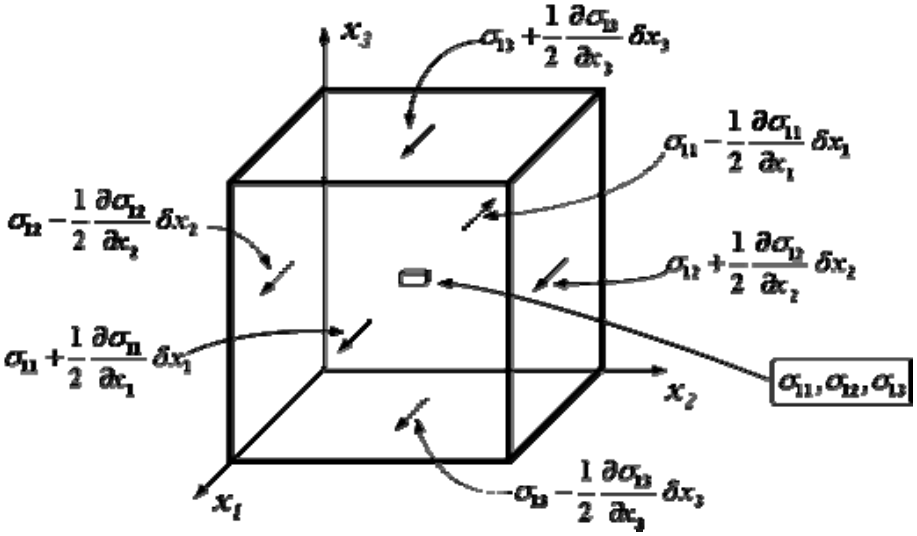
Ucuna bir burulma momenti (tork) uygulanan çubuğun uç kısmı ile kelepçe arasında kalan bölümünde, elastik enerji depolanır. Kelepçenin serbest bırakılmasının ardından, titreşim çubuk içinde sağa doğru hareket etmeye başlar. Burada, dalgaları izleyen parçacıkların hareketi (U_p) dalgaların yayılma doğrultusuna (U) diktir.

Eğer katı cisim bir serbest yüzeye sahipse ya da iki katı arasında bir arayüzey varsa, Rayleigh (yüzey) dalgaları oluşur [95]. Yüzey dalgaları su yüzeyinde oluşan dalgaları andırır. Su üzerinde yüzen bir cisim, su parçacıklarının hareketinin bir göstergesi gibi aşağı-yukarı ve ileri-geri hareket ederek eliptik bir yörünge izler. Bu dalgalar yüzeye temas eden bölgelerde belirgindir ve parçacıkların hareket hızları (U_p) yüzeyden uzaklaştıkça üstel biçimde hızla düşer. Katılarda Rayleigh dalgaları olarak bilinen yüzey dalgaları, arayüzey dalgalarının, malzemelerden birinin ihmal edilebilir seviyede yoğunluk ve dalga hızına sahip olması özel durumudur [96].

Elastik dalgalar arasında hızı en düşük olanlar yüzey dalgalarıdır. Uzunlamasına dalgalar ise en yüksek hıza sahip olan elastik dalgalardır. Enerjinin %67'si yüzey dalgaları tarafından taşınırken, uzunlamasına dalgalar için bu oran %7'dir [96].

2.2.1.2 Elastik dalgaların sürekli ortamlarda yayılması

Eğer Şekil 2.10'da görülen birim gerilme elemanı dinamik yükleme durumunda ise karşıt yüzeylerdeki gerilmeler eşit olmaz.



Şekil 2.10: Dinamik yükleme durumunda birim gerilme elemanı [96]

Sürekli ortamda dalga yayılımı denklemlerini elde etmek için, kenarları dik kartezyen eksen takımındaki eksenlere paralel olan bir paralelyüzlü içindeki gerilme değişimini incelemek gerekir. Eğer sonsuz küçüklükte bir paralelyüzlü ele alınacak

olursa, gerilmenin yüzeye dik ve paralel iki bileşeni mevcuttur. Elastik dalga yayılımı ifadelerini türetmek için momentumun korunumunun yazılması yeterli olacaktır. Sadece x_1 ekseninde denklemleri şu şekilde yazabiliriz;

$$F_{x_1} = ma_{x_1} \tag{2.12}$$

$$\sum dF_{x_1} = \left(\rho dx_1 dx_2 dx_3\right)\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \tag{2.13}$$

x_1 ekseninde gerilme elemanına etkiyen tüm gerilmeler yazılarak (2.13) denkleminin sol tarafına eklendiğinde, aşağıdaki ifade elde edilebilir;

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \tag{2.14}$$

Bu denklem, diğer yönleri de kapsayacak şekilde indis notasyonunda şöyle ifade edilebilir;

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \tag{2.15}$$

Diferansiyel ifadenin çözümü için öncelikle, gerilme ifadeleri, Hooke yasası kullanılarak birim şekil değiştirmeye dönüştürülmelidir;

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{11}, \qquad \sigma_{12} = 2\mu\varepsilon_{12} \\ \sigma_{22} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{22}, \qquad \sigma_{23} = 2\mu\varepsilon_{23} \\ \sigma_{33} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{33}, \qquad \sigma_{13} = 2\mu\varepsilon_{13} \end{aligned} \tag{2.16}$$

Bu denklemde λ ve μ Lamé sabitleri, Δ ise genişleme (dilatation) olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}, \qquad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \qquad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{2.17}$$

Böylece, birim şekil değiştirmeler cinsinden hareket denklemi elde edilmiş olur;

$$\left(\lambda+\mu\right)\frac{\partial\Delta}{\partial x_1}+\mu\nabla^2 u_1=\rho\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}$$
$$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x_i\partial x_i} \qquad \textbf{(2.18)}$$

x_1 ekseni için yazılan bu ifade, diğer eksenler için de aynı şekilde elde edilebilir. (2.18) denklemi, uzunlamasına ve kayma dalgalarının yayılımı için türetilecek ifadelerde kullanılabilir. Eğer bu denklemde yer değiştirmeler yerine birim şekil değiştirmeler kullanılırsa, bu kez şu ifade elde edilir;

$$\frac{\partial^2\Delta}{\partial t^2}=\left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\right)\nabla^2\Delta \qquad \textbf{(2.19)}$$

(2.19) denkleminde, sağ taraftaki çarpanın boyut analizi yapıldığında, $[L^2/T^2]$, yani hızın karesi boyutunda olduğu anlaşılmaktadır. O halde, uzunlamasına dalgaların hızı şu şekilde yazılabilir [96];

$$V_l=C_l=\left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\right)^{1/2} \qquad \textbf{(2.20)}$$

Benzer bir yöntemle, dalga boyunun levha kalınlığından büyük olduğu durumlar için, sonsuz levhalarda uzunlamasına dalga hızını şöyle ifade etmek mümkündür [95];

$$C_l=\left(\frac{4\mu\left(\lambda+\mu\right)}{\rho\left(\lambda+2\mu\right)}\right)^{1/2}=\left(\frac{E}{\rho\left(1-\nu^2\right)}\right)^{1/2} \qquad \textbf{(2.21)}$$

Eğer dalga boyu levha kalınlığından küçükse, bu kez uzunlamasına dalgaların yayılma hızı yüzey (Rayleigh) dalgalarınınkine eşit olacaktır.

(2.18) denkleminin x_2'ye göre türevi alınır, aynı ifade x_2 ekseninde yazılarak x_1'e göre türevi alınır ve bu ikisinin farkı yazılırsa, kayma dalgaları için aşağıdaki ifade elde edilir [96];

$$\frac{\partial^2\omega_{12}}{\partial t^2}=\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\omega_{12} \qquad \textbf{(2.22)}$$

$$V_S = C_S = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1/2} \quad \textbf{(2.23)}$$

Yüzey dalgalarının hızı ile kayma dalgaları hızı arasında şu oran yazılabilir [96];

$$k = \frac{C}{C_S}, \qquad C_R = \frac{0.862 + 1.12\nu}{1+\nu} C_S \quad \textbf{(2.24)}$$

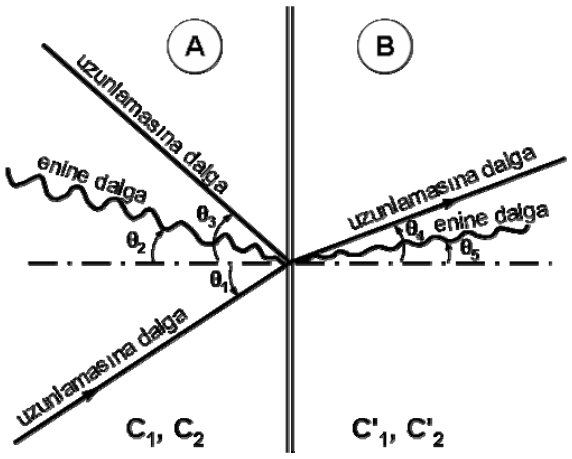
Bazı malzemeler için temel malzeme özellikleri ve dalga yayılımı hızları Tablo 2.1'de görülmektedir.

Tablo 2.1: Bazı malzemelerde dalga hızları [96]

Malzeme	uzunlamasına dalga hızı (m/s)		kayma dalga hızı (m/s) (C_S)
	ince çubuk (C_0)	sonsuz ortam (C_l)	
Uranyum	3012.7	3494.4	1867.6
Bakır	3812.5	4758.4	2325.6
Alüminyum	5102.6	6394.4	3109.1
Demir	5189.4	5960.6	3224.1
Alümina	9674.2	11225.0	6000.0

2.2.1.3 Elastik dalgaların yansıma ve kırılmaları

Katı cisimler içinde oluşan dalgaların herhangi bir türü, iki katı ortam arasındaki bir yüzeye çarptığında, hem yansıma (reflection), hem de kırılma (refraction) meydana gelir. Şekil 2.11'de, iki katı ortam (A, B) arasındaki arayüzeyde, uzunlamasına bir elastik dalganın yansıma ve kırılması ile birlikte enine dalgaların oluşumu görülmektedir.

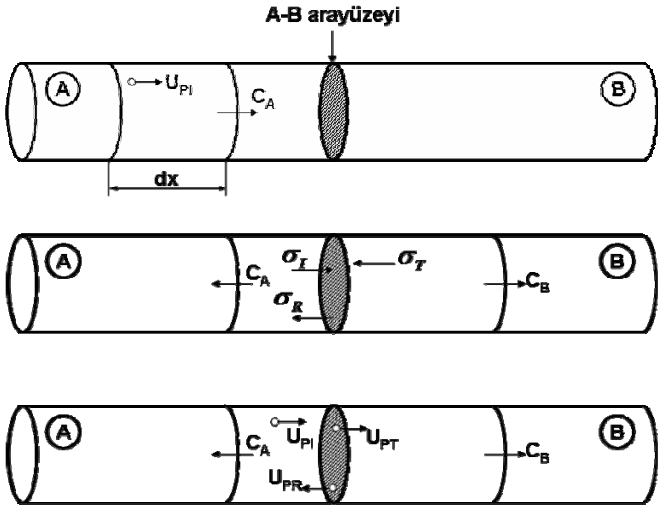


Şekil 2.11: Elastik dalgaların arayüzeyde yansıma ve kırılması [96]

Bu durum, dalganın farklı sonik genlik özelliklerine sahip bir ortamla karşılaşması durumunda meydana gelir. Sonik genlik, ortam yoğunluğu ile ortamdaki dalga hızının çarpımı şeklinde ifade edilebilir. Şekilde, A ortamındaki uzunlamasına ve kayma dalga hızlarını C_1 ve C_2, B ortamındakileri ise C'_1 ve C'_2 göstermektedir. Yansıma ve kırılma açıları arasındaki ilişki basitçe şöyle gösterilebilir;

$$\frac{sin\,\theta_1}{C_1} = \frac{sin\,\theta_2}{C_2} = \frac{sin\,\theta_3}{C_1} = \frac{sin\,\theta_4}{C_1'} = \frac{sin\,\theta_5}{C_2'} \qquad \textbf{(2.25)}$$

Dalganın arayüzeye geliş açısının dik olduğu özel durumda ($\theta = 0$), bu etkiler çok daha basit olarak incelenebilir. Bu durumda, uzunlamasına dalgalar ve kayma dalgaları hem yansır, hem de kırılırlar. Şekil 2.12'de, belirli bir kesit alanına sahip bir silindir içinde C_A hızıyla yayılan dalganın A-B arayüzeyinde yansıma ve kırılması özetlenmektedir.



Şekil 2.12: Arayüzeye dik gelen dalgaların yansıma ve kırılması [96]

Parçacık hızı U_P ve gerilme σ olmak üzere, katı ortamların yoğunlukları ve dalga hızları kullanılarak yansıyan (reflected) ve kırılarak diğer ortama iletilen (transmitted) dalgaların genliği hesaplanabilir. Öncelikle, eksenel gerilmeyi dalga ve parçacık hızlarına bağlayan bir ifade elde edilmelidir;

$$Fdt = d\left(mU_P\right)$$
$$\sigma A dt = \rho A dx U_P$$
$$\sigma = \rho \frac{dx}{dt} U_P$$

$$\sigma = \rho C U_P \qquad \textbf{(2.26)}$$

İncelenen doğrusal malzemede, uzunlamasına dalgalar ara yüzeye ulaştığında, yansıyan ve iletilen dalgalar oluşacaktır. Arayüzeyde, denge hali düşünülerek giriş (incident), yansıyan (reflected) ve iletilen (transmitted) gerilmeler arasında şu ilişki yazılabilir;

$$\sigma_I + \sigma_R = \sigma_T \tag{2.27}$$

Sürekli bir ortam ele alınmış olduğundan, parçacık hızları arasında da şu ilişki olmalıdır;

$$U_{pI} + U_{pR} = U_{pT} \tag{2.28}$$

A ortamının, B ortamından daha yüksek bir genliğe sahip olduğu kabul edilerek (2.26) denklemi yardımıyla parçacık hızları elde edilebilir [96];

$$U_{pI} = \frac{\sigma_I}{\rho_A C_A}, \quad U_{pT} = \frac{\sigma_T}{\rho_B C_B}, \quad U_{pR} = \frac{-\sigma_R}{\rho_A C_A} \tag{2.29}$$

Burada, yansıyan dalgalar için pozitif yöndeki gerilmenin negatif parçacık hızı anlamına geldiğine dikkat edilmelidir. (2.29) denklemi (2.28) denkleminde yerine konursa;

$$\frac{\sigma_I}{\rho_A C_A} - \frac{\sigma_R}{\rho_A C_A} = \frac{\sigma_T}{\rho_B C_B} \tag{2.30}$$

Böylece, gerilmeler arasındaki ilişkileri aşağıdaki şekilde elde etmek mümkün olacaktır [96**]**;

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_I} = \frac{2\rho_B C_B}{\rho_B C_B + \rho_A C_A} \tag{2.31}$$

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{\rho_B C_B - \rho_A C_A}{\rho_B C_B + \rho_A C_A} \tag{2.32}$$

(2.31) ve (2.32) denklemlerinden açıkça görüleceği gibi, malzemenin direnci (ρC) yansıyan ve kırılan (iletilen) dalgaların genliklerini belirlemektedir. Eğer $\rho_B C_B > \rho_A C_A$ ise aynı işaretli dalga yansırken, $\rho_B C_B < \rho_A C_A$ olması durumunda ters işaretli dalga

yansır. Bu ilişki kullanılarak serbest yüzeyde ve rijit arayüzeydeki durum incelenebilir.

Serbest yüzeyde $\rho_B C_B = 0$ olacaktır. Bu durumda $\frac{\sigma_T}{\sigma_I} = 0$ ve $\frac{\sigma_R}{\sigma_I} = -1$ olur.

Rijit arayüzeyde ise $C_B = \infty$ olarak düşünülebileceğinden;

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_I} = 2 / \left(1 + \frac{\rho_A C_A}{\rho_B C_B}\right) \cong 2 \text{ ve } \frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \left(1 - \frac{\rho_A C_A}{\rho_B C_B}\right) / \left(1 + \frac{\rho_A C_A}{\rho_B C_B}\right) \cong 1 \text{ olur.}$$

Benzer şekilde, (2.27) ve (2.29) denklemleri yardımıyla yansıyan ve iletilen parçacık hızları arasındaki ilişkiler aşağıdaki gibi elde edilebilir [96**]**;

$$\frac{U_{pT}}{U_{pI}} = \frac{2\rho_A C_A}{\rho_A C_A + \rho_B C_B} \tag{2.33}$$

$$\frac{U_{pR}}{U_{pI}} = \frac{\rho_A C_A - \rho_B C_B}{\rho_A C_A + \rho_B C_B} \tag{2.34}$$

Serbest yüzey için $\frac{U_{pT}}{U_{pI}} = 2$ ve $\frac{U_{pR}}{U_{pI}} = 1$ olarak elde edilir.

Rijit arayüzeyde ise $\frac{U_{pT}}{U_{pI}} = 0$ ve $\frac{U_{pR}}{U_{pI}} = -1$ olacaktır.

2.2.2 Plastik dalgalar

Sünek bir malzemede, hem sanki-durağan, hem de dinamik durumlarda, gerilme değeri elastik sınırın üzerine çıktığında plastik deformasyon oluşur. Eğer dalga genliği elastik sınırın üzerine çıkarsa, plastik dalga olacaktır. Bu durumu, üç ana grupta incelemek mümkündür [96**]**;

- Kiriş ve çubuklarda plastik dalgalara en belirgin örnek, uzun plastik çubuğun rijit bir levhaya çarpmasıdır. Eğer çubuğun yarıçapı yeterince küçükse, tek eksenli gerilme durumu oluşur.
- Yarı-sonsuz (semi-infinite) ortamlarda plastik dalgalar; gerilme yayılma doğrultusuna dik yanal (lateral) birim şekil değiştirmeler sıfıra eşit olduğunda oluşur.

- Plastik kayma dalgaları; çubuklarda burulma dalgaları ve yarı-sonsuz ortamlarda kayma dalgalarının genlikleri yeterince yüksek olduğunda oluşur ve plastik deformasyon meydana getirirler.

Malzemelerin dayanımı, birim şekil değiştirme ve birim şekil değiştirme hızına duyarlıdır. Şekil 2.13'te, çeşitli malzeme davranışları görülmektedir.

Metaller için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi genellikle çift doğrusal (bilinear) bir fonksiyonla gösterilir (Şekil 2.13.a). Burada birinci bölüm elastik, ikinci bölüm ise plastik davranışı temsil etmektedir.

Çoğu metalde, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi bir kuvvet fonksiyonuna çok yaklaşıktır (Şekil 2.13.b). Bu ifadede *n* pekleşme üsteli 1'den küçüktür.

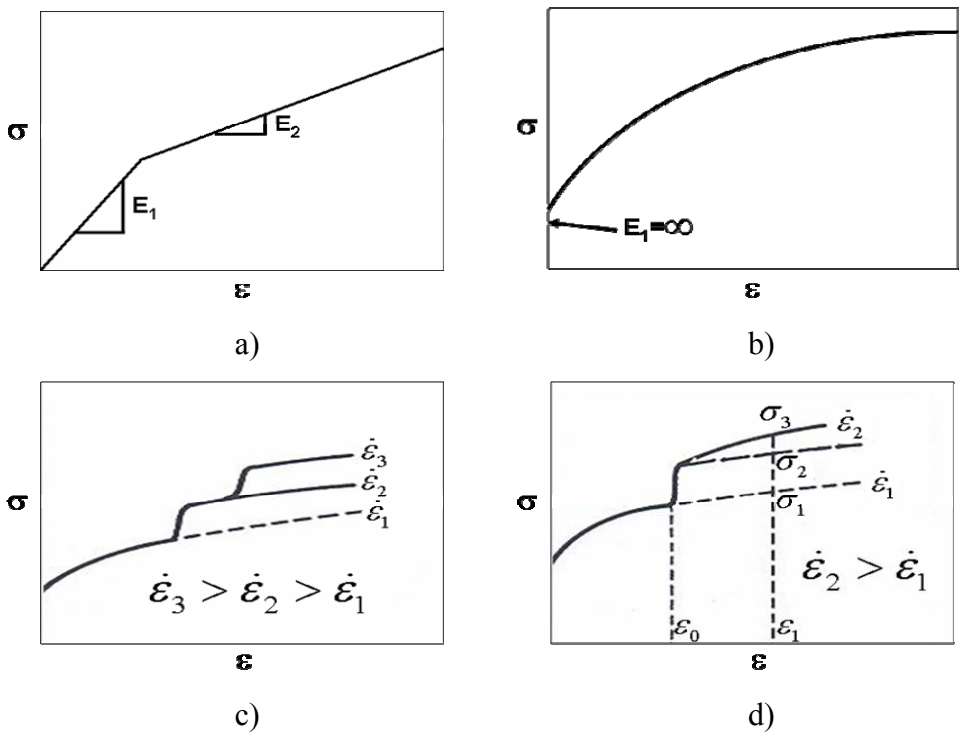
$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \tag{2.35}$$

Şekil 2.13.c'de, akma gerilmesinin birim şekil değiştirme hızından etkilenme derecesi görülmektedir. Test esnasında birim şekil değiştirme hızı değişirse, akma gerilmesi de buna bağlı olarak değişir. Bu etki genellikle şöyle ifade edilir;

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \tag{2.36}$$

Burada, *m* ($0<m<1$) birim şekil değiştirme hızı hassasiyetidir.

Malzemenin mekanik davranışında, birim şekil değiştirme hızı geçmişi de önemli etkenlerden biridir (Şekil 2.13.d). ε_1 birim şekil değiştirme değerinde birim şekil değiştirme hızı $\dot{\varepsilon}_1$'den $\dot{\varepsilon}_2$'ye değişirse, akma gerilmesi de σ_1'den σ_2'ye değişecektir. Eğer malzemenin birim şekil değiştirme hızı daha önce ε_0 birim şekil değiştirme değerinde iken değişmişse, yüksek birim şekil değiştirme hızları için malzemenin pekleşme hızı da değişir. Bu durumda, malzeme akma gerilmesi ε_1 birim şekil değiştirme ve $\dot{\varepsilon}_2$ birim şekil değiştirme hızı için σ_3 olacaktır.



Şekil 2.13: Sünek malzemeler için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri a) çift-doğrusal elasto-plastik malzeme, b) pekleşme, c) akma gerilmesi-birim şekil değiştirme hızı ilişkisi, d) akma gerilmesi-birim şekil değiştirme hızı geçmişi ilişkisi [96]

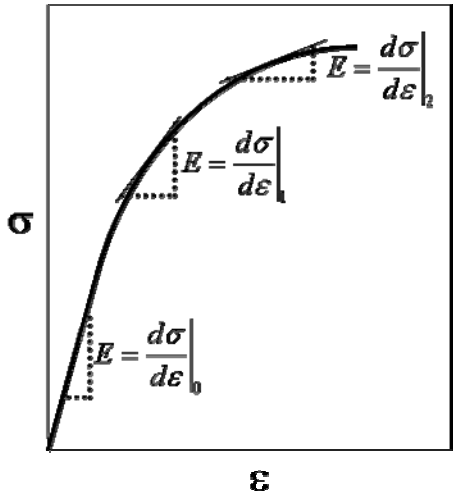
Bir telde plastik dalga hızı için şu denklem yazılabilir;

$$V_p = \left(\frac{d\sigma / d\varepsilon}{\rho} \right)^{1/2} \tag{2.37}$$

Burada, $d\sigma / d\varepsilon$ gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin plastik bölümünün eğimidir. Elastik bölgede bu değer, (2.11) denklemindeki gibi elastisite modülüne eşit olacaktır. Elastik dalga hızı, plastik dalga hızından daha yüksektir [96];

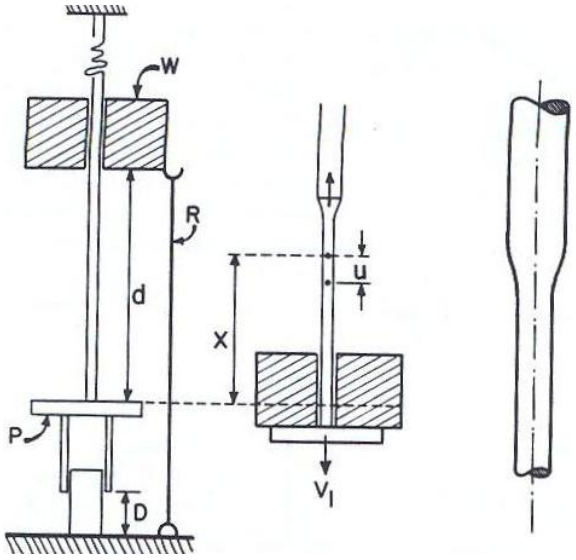
$$\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{el} > \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{pl} \tag{2.38}$$

Şekil 2.14'teki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi incelendiğinde, pekleşme nedeniyle plastik bölgede eğrinin eğiminin azalması nedeniyle, elastik dalga hızının plastik dalga hızından daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 2.14: Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [96]

Eksenel gerilme durumunda, plastik dalga yayılımının belirlenmesi için mümkün olan en basit yöntem, belirli bir hızla aşağıya doğru hareket eden ince bir telin kullanıldığı düzenektir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15: Plastik dalga yayılımı test düzeneği [96]

Test düzeneğindeki telin ucu rijit levhaya bağlanmıştır. Kauçuk bantlarla hızlandırılan bir ağırlık, belirli bir yükseklikten levha üzerine düşürülmektedir. Çarpmadan sonra, levhadaki yer değiştirmeyle birlikte, telde plastik deformasyon oluşmaktadır.

Newton'un 2'nci yasası uygulanırsa, dalga yayılımı için aşağıdaki ifadeler elde edilecektir [96];

$$dF = dm\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.39}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{d\sigma / d\varepsilon}{\rho_0}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{2.40}$$

$$V_p = \left(\frac{d\sigma / d\varepsilon}{\rho_0}\right)^{1/2} \tag{2.41}$$

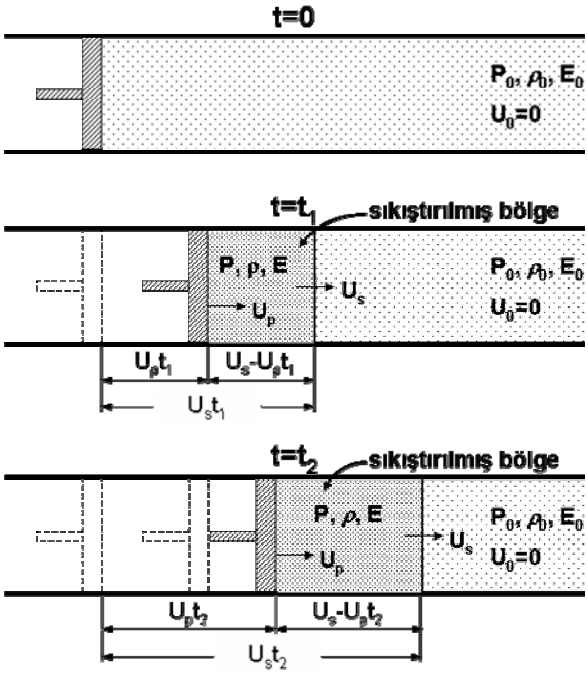
Benzer şekilde kayma dalgaları için de şu denklem elde edilir [96];

$$V_S = \left(\frac{d\tau / d\gamma}{\rho}\right)^{1/2} \tag{2.42}$$

2.2.3 Şok dalgaları

Gerilme dalgalarının genliği malzemenin dinamik akma gerilmesinin çok üzerine çıktığında, gerilmenin hidrostatik bileşenine kıyasla kayma gerilmeleri ihmal edilebilir düzeylerde kalır. Bu durumda, malzeme içinde ilerleyen bir yüksek basınç hali söz konusu olur.

Birim kesit alanına sahip bir piston-silindir düzeneği ele alalım (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: Piston-silindir düzeneği [96]

Başlangıçta hareketsiz olan piston, ilk durumdaki basıncı P_0 ve yoğunluğu ρ_0 olan sıkıştırılabilir malzeme içine doğru U_P hızıyla itilirse, pistonun hemen önünde bulunan sıkıştırılmış bölge $U_S t_1$ kadar ilerlemiş olur. Burada, U_S pistonun hareketi nedeniyle silindir içindeki malzemede oluşan rahatsızlığın hızıdır. Bu süre boyunca piston da $U_P t_1$ kadar ilerleyecektir. Burada, silindir içinde hareket halinde olan ve sabit duran malzemeyi birbirinden ayıran sınırı "şok dalgası" olarak adlandırabiliriz. Şok dalgaları pistondan daha yüksek hızda hareket edecektir. Silindir birim kesit alanına sahip olduğundan, kütlenin korunumunu şu şekilde yazabiliriz;

$$U_S \rho_0 = \left(U_S - U_P\right)\rho \tag{2.43}$$

Hız ve kütlenin çarpımı olarak ifade edilen momentumdaki değişim miktarı, sisteme verilen impuls'a eşit olacaktır. Başlangıçta, momentum sıfır olduğundan, herhangi bir zaman için momentumun korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\rho\left(U_S - U_P\right)U_P = \left(P - P_0\right) \tag{2.44}$$

Enerjinin korunumu "dış yüklerin yaptığı işlerin toplamının, iç enerjideki ve kinetik enerjideki değişim miktarlarının toplamına eşit olması" şeklinde ifade edilir. Sıkıştırılmış bölgede, herhangi bir anda iç enerjideki değişimi şöyle yazmak mümkündür;

$$E_1\left[\rho\left(U_S - U_P\right)t\right] - E_0\left[\rho_0 U_S t\right] = \left(E_1 - E_0\right)\rho_0 U_S t \tag{2.45}$$

Kinetik enerjideki değişim ise;

$$\frac{1}{2}\rho\left(U_S - U_P\right)U_P^2 t - 0 = \frac{1}{2}\rho_0 U_S U_P^2 t \tag{2.46}$$

(2.45) ve (2.46) denklemlerinden;

$$\left(E_1 - E_0\right) = \frac{1}{2}U_P^2 \tag{2.47}$$

Rankine-Hugoniot ilişkileri olarak bilinen (2.43), (2.44) ve (2.47) denklemleri sıkıştırılabilir ortamlardan (gaz) katılara kadar pek çok alanda kullanılabilir. Şok dalga parametrelerinin çözümü, en basit şekliyle bu denklemler üzerine kurulur.

Şok dalgaları dik bir ön ile karakterize edilir ve hidrostatik gerilme bileşeninin çok yüksek seviyelerde ele alınabileceği eksenel birim şekil değiştirme durumunu gerektirir. Hidrostatik gerilme bileşeninin, dinamik akma gerilmesinin üzerine çıktığı durumda, katının kaymaya karşı direnç göstermediği (μ=0) kabul edilebilir [96]. Ayrıca, şok dalgalarının hidrodinamik yöntemle çözümünde şu temel kabuller yapılır;

- Şok dalgası bir süreksizlik yüzeyi olup kalınlığı yoktur.
- Malzemenin kayma modülü sıfırdır.
- Şok dalgasında, bünye yükleri ve ısı iletimi ihmal edilebilir düzeydedir.
- Elasto-plastik davranış yoktur.
- Malzeme hal değişimi (phase transformation) göstermez.

Şok dalgalarında kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu şu denklemlerle ifade edilir;

$$\rho_0 U_S = \rho\left(U_S - U_P\right) \tag{2.48}$$

$$\rho_0 U_S U_P = P - P_0 \tag{2.49}$$

$$E - E_0 = \frac{P U_P}{\rho_0 U_S} - \frac{1}{2}\rho_0 \frac{U_S U_P^2}{\rho_0 U_S} \tag{2.50}$$

Enerjinin korunumu ifadesi daha genel olarak şöyle yazılabilir;

$$E - E_0 = \tfrac{1}{2}\left(P + P_0\right)\left(V_0 - V\right) \qquad \left[V = 1/\rho\right] \tag{2.51}$$

Yazılan korunum denklemlerinde, beş adet değişken (P, U_P, U_S, ρ, E) mevcuttur. Dolayısıyla, çözüm için şok dalga hızı (U_S) ile parçacık hızı (U_P) arasında deneysel olarak belirlenen bir ilişkinin bulunmasına ihtiyaç vardır. Doğrusal yaklaşımla, bu ilişki şu şekilde yazılabilir;

$$U_S = C_0 + S_1 U_P \tag{2.52}$$

Durum denklemi (equation of state, EOS) olarak bilinen bu denklemde, C_0 malzeme içinde sıfır basınçtaki ses hızı, S_1 ise deneye dayalı parametredir. Bu ifade, hal

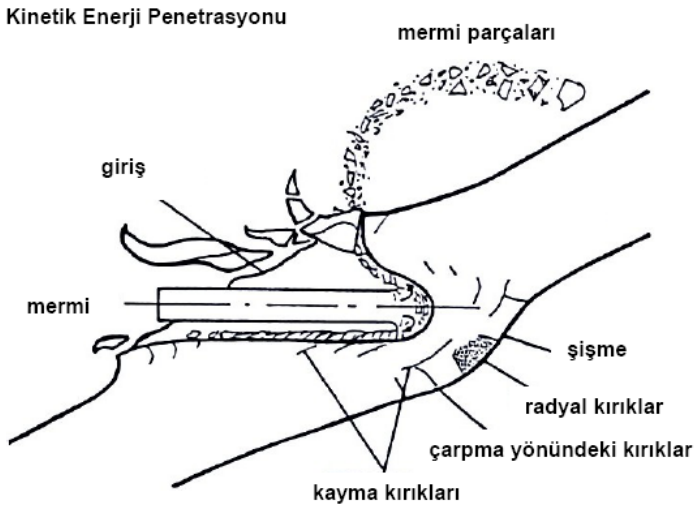
değişiminin olduğu durumlar için doğrusal haliyle geçerli olmayacağından, yeniden düzenlenmelidir.

2.3 Penetrasyon Mekaniği

Kinetik enerji penetrasyonu çok çeşitli problem sahalarında uygulama alanı bulan bir konudur. Bunlar genellikle askeri (balistik) uygulamalar olmakla beraber, çok yüksek hızda ya da kütledeki parçacıkların ve nükleer atıkların depolanması, zararlı maddelerin taşınma emniyeti, uzay araçlarının meteor çarpmalarından korunması, personel ya da taşıyıcı araçlar için hafif zırh tasarımı gibi konularla ilgili problemleri de kapsar.

Kavramsal olarak penetrasyon merminin hedef içine kısmen girmesi, yani hedef içinde durmasıdır. Uygun bir zırh tasarımının elde edilmesini amaçlayan bir çalışmanın temel dayanak noktası da budur. Perforasyon ise hedefin kalınlığı boyunca penetrasyonun devam etmesi, yani merminin hedefi tamamıyla delip geçmesi olarak tanımlanır.

Bir mermi hedefin içine girmek (penetrasyon) ya da onu delip geçebilmek (perforasyon) için hareketinden kaynaklanan kinetik enerjiyi kullanır. Bu nokta kinetik enerjili çarpışmaları, kimyasal enerji boşalımlarından ayırır. Kinetik enerji penetrasyonun gelişimi Şekil 2.17'de özetlenmektedir.

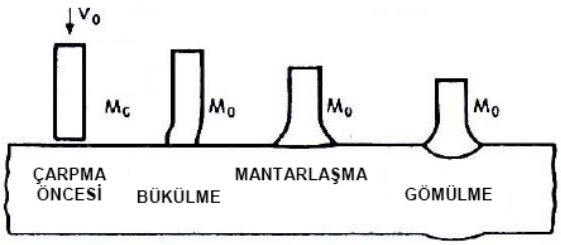


Şekil 2.17: Kinetik enerji penetrasyonu [93]

Merminin hedefe çarptığı andan itibaren hem mermide, hem de hedef cisimde gerilme dalgaları oluşur. Bu dalgalar çarpma hızı ve malzeme özelliklerine bağlı

olarak sesin malzeme içindeki hızında ya da daha yüksek hızlarda hareket ederler. Bunları daha yavaş hızlara sahip olan kayma dalgaları izler. Yüksek çarpma hızlarında, mermide, serbest yüzeye bağlı olarak dik çarpmalarda iki boyutlu, açılı çarpmalarda ise üç boyutlu gerilme durumu yaratan gevşeme (relief) dalgaları oluşur. Bunun sonucunda, sınır şartlarından dolayı basma yönündeki gerilme dalgaları çekme yönüne döner. Yüksek hızlarda bu dalgaların etkisi düşük hızlardakine oranla daha fazladır.

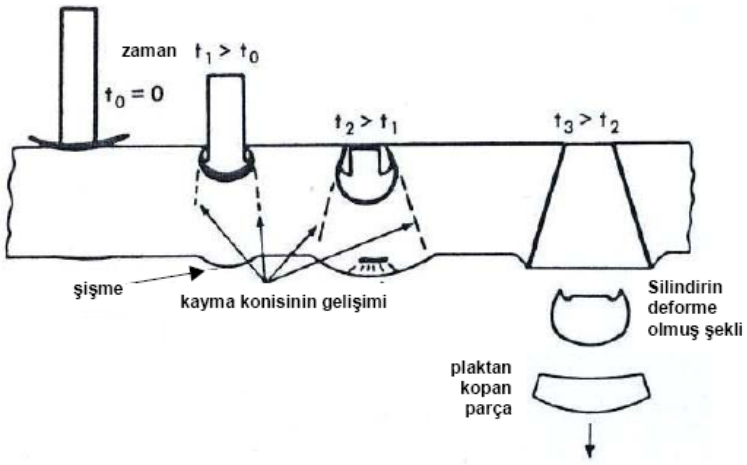
Eğer uzun, silindirik bir cisim balistik limitin (perforasyon için gerekli minimum hız) altında bir hızla hedef yüzeye çarparsa eğilmeye başlar. Çarpma hızı arttıkça, plastik deformasyon belirli bir bölgede yoğunlaşır ve silindirin uç kısmı hedefi delemeden mantar şeklinde deformasyona uğrar. Çarpma daha yüksek bir hızda gerçekleşirse plastik deformasyona ek olarak silindir hedef içine gömülür. Bu durum Şekil 2.18'de görülmektedir [93].



Şekil 2.18: Düşük hızlı çarpma davranışı [93]

Balistik limitin üzerindeki çarpmalarda penetrasyon, çarpma ile eş zamanlı olarak başlar (Şekil 2.19) [93]. Çarpmanın ilk anında, yüzeyler arası basınç hem hedef, hem de merminin malzeme mukavemetinin çok üzerinde olacağından, merminin ucunda erozyonla birlikte penetrasyon oluşurken, merminin geri kalan kısmı herhangi bir deformasyona uğramadan oluşan kraterde yol alır. Krater giderek derinleşirken, dip kısmı merminin ucundaki deformasyona uygun tarzda genişler ve temas yüzeyinde yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Belirli bir zaman sonra malzeme özellikleri, çarpma hızı ve hedefin kalınlığına bağlı olarak hedefin arka yüzeyinde şişme (bulging) ve yayılma şeklinde şekil değişiklikleri meydana gelir. Balistik penetrasyon ve perforasyon süresince mermi ve hedef, temas yüzeylerinden başlamak üzere eşit ve zıt yönde kuvvetlere maruz kalırlar. Ara yüzeyden itibaren yayılan dalgalar mermi ve hedefin içindeki gerilme ve yer değiştirmeleri biçimlendirir ve durumlarında değişikliklere neden olurlar. Mermi; hızının belli bir miktarını kaybeder, yörüngesinde değişiklikler olur, deforme olabilir, erozyona bağlı

olarak ağırlığının bir kısmını kaybedebilir, değişik boyutlarda parçacıkların hedeften kopmasına neden olabilir.

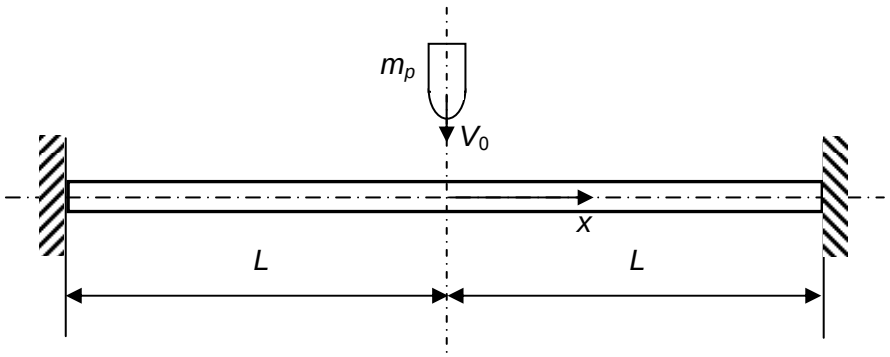


Şekil 2.19: Balistik limitin üzerindeki çarpmalar [93]

2.4 Kirişlerin Dinamik Plastik Davranışları

Bu bölümde, kirişlerin dinamik yükler altındaki davranışları ele alınacaktır [97]. Yapılan incelemede, m_p kütleli bir cisim V_0 hızıyla, kenarlarından sabit (ankastre) mesnetli $2L$ uzunluğundaki kirişe orta hattından çarpmaktadır (Şekil 2.20).

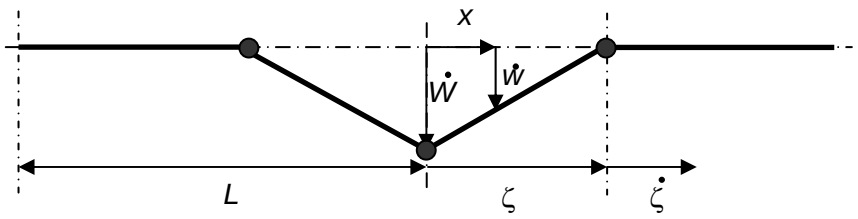
Çarpma anında, kirişin orta hattı V_0 ilk hızıyla çarpma yönünde eğilmeye maruz kalırken, kirişin diğer bölümleri hareketsiz durumdadır. Dinamik denge denklemlerini yazabilmek için çarpma ile oluşan şekil değiştirme dalgasının, kiriş orta noktasından kenarlara doğru yayıldığı süre boyunca cisim ile kiriş arasındaki temasın sürdüğü kabul edilmektedir.



Şekil 2.20: m_p kütleli bir cismin, V_0 ilk hızıyla sabit mesnetli kirişe çarpması

Olay iki farklı evrede incelenebilir. Birinci evrede, çarpmanın gerçekleştiği *t=0* anında, kirişin tam ortasında (temas noktası) plastik mafsal oluşur. İki ayrı plastik

mafsal ise merkezden sınırlara doğru yayılan şekil değiştirme dalgasıyla birlikte kirişin deforme olmamış bölümlerine doğru hareket eder (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: Çarpma yükü altındaki sabit mesnetli kirişte oluşan deformasyon

Plastik mafsalların kiriş sınırlarına ulaşması ile başlayan ikinci evrenin sonunda kirişteki toplam çökme miktarı için temel denge ifadeleri kullanılarak şu denklem elde edilmektedir [97];

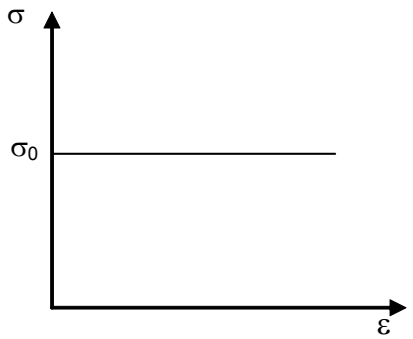
$$w_f = \frac{m_p^2 V_0^2}{24 m M_0}\left\{\frac{\bar{\alpha}-\beta}{(1+\bar{\alpha})(1+\beta)} + 2\ln\left(\frac{1+\bar{\alpha}}{1+\beta}\right)\right\}, \qquad 0 \le \beta \le \bar{\alpha}, \tag{2.53}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{mL}{M},\ \beta = \frac{mx}{M},\ M_0 = \sigma_0 \frac{BH^2}{4}$$

(2.53) denkleminde, *m* kirişin birim uzunluğunun ağırlığıdır.

2.5 Plakların Dinamik Plastik Davranışları

Bu bölümde, plakların dinamik plastik davranışları incelenirken, dinamik dış yük etkisinde kalıcı şekil değişimine uğrayan, rijit-mükemmel plastik malzemeden üretilmiş dairesel bir plak ele alınmıştır. Rijit-mükemmel plastik malzeme davranışı Şekil 2.22'de görülmektedir.



Şekil 2.22: Rijit-mükemmel plastik malzeme davranışı

Yeterince geniş bir plağın merkezine uygulanan yüksek hızlı çarpma veya dinamik yayılı yük gibi yükleme şartlarında, plağın davranışı eksenel simetrik olarak düşünülmelidir. Kare şeklinde, kenarlarından sabit mesnetli bir plağın merkezine (köşegenlerin kesişim noktası) belirli bir kütle ve ilk hıza sahip bir cismin çarpması sonucunda, plağın plastik şekil değişimine uğrayan bölgesinde, merkezinden itibaren dairesel basit mesnetli bir plağın davranışının görüleceğini söylemek mümkün olabilir.

Dairesel bir plağın dinamik eksenel simetrik davranışı aşağıdaki denklemler kullanılarak ifade edilebilir [97];

$$\frac{\partial\left(rM_r\right)}{\partial r} - M_\theta - rQ_r = 0 \tag{2.54}$$

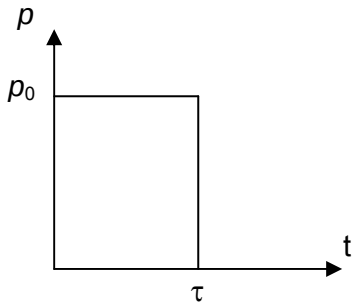
$$\frac{\partial\left(rQ_r\right)}{\partial r} + rp - \mu r\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \tag{2.55}$$

$$\kappa_r = -\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \tag{2.56}$$

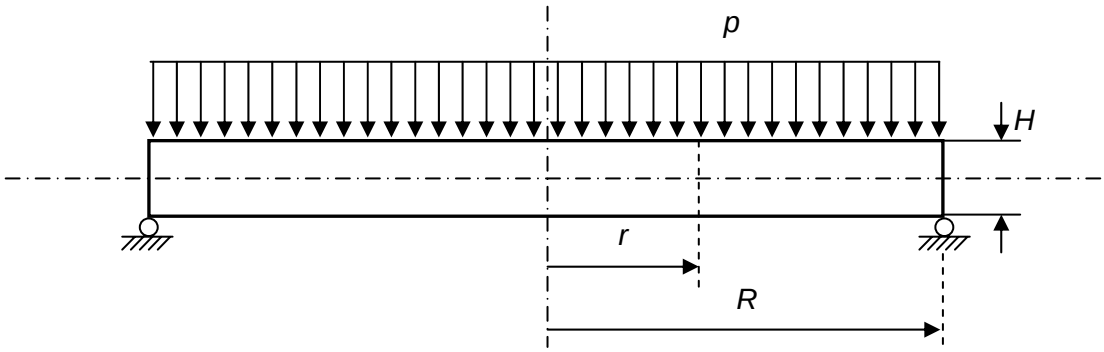
$$\kappa_\theta = -\frac{\partial w}{r\partial r} \tag{2.57}$$

(2.55) denkleminde kullanılan μ birim alan için ağırlığı belirtmektedir.

Şekil 2.23'de görülen eksenel simetrik, düzgün yayılı basınç yükü, Şekil 2.24'teki basit mesnetli dairesel plağın üzerine etkimektedir.



Şekil 2.23: Basınç yükü



Şekil 2.24: Düzgün yayılı basınç yükü altındaki basit mesnetli dairesel plak

Dairesel plağın statik basınç yüklemesi durumunda göçmesine neden olacak yük miktarı şu şekilde belirtilebilir [97];

$$p_c = \frac{6M_0}{R^2} \tag{2.58}$$

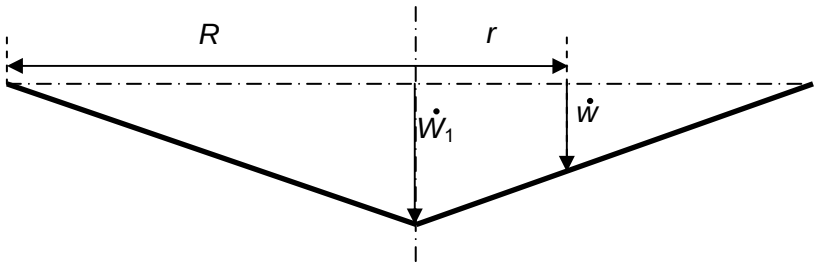
Dairesel plak, statik göçme yükünden daha büyük bir basınç yüküne maruz kalması durumunda ivmelenecektir. Eğer dinamik basınç yükü kısa bir zaman sonunda kaldırılırsa, plak bu kez dinamik dış enerjiyi emerek kalıcı şekil değiştirme ile birlikte denge konumuna ulaşacaktır.

Plağın dinamik davranışı iki ayrı evrede incelenebilir. Bunlardan birincisi basınç yükünün uygulandığı süreyi ($0 \le t \le \tau$), ikincisi ise yükün kaldırılışından sonraki süreyi ($\tau \le t \le T$) içermektedir.

Birinci evrede plak göçme yükünden büyük, düzgün yayılı basınç yükü etkisindedir.

$$p = p_0, \qquad 0 \le r \le R, \tag{2.59}$$

Bu durumda, plak üzerinde oluşan deformasyonun, Şekil 2.25'te gösterildiği gibi, statik göçme davranışına benzer bir karaktere sahip olması gerekir.



Şekil 2.25: Basınç yükü altındaki dairesel plakta oluşan deformasyon

Çökme hızı, yarıçap boyunca doğrusal değiştiği göz önüne alınarak şu şekilde ifade edilebilir [97];

$$\dot{w} = \dot{W}_1 \left(1 - \frac{r}{R} \right), \qquad 0 \le r \le R, \tag{2.60}$$

Burada, $\dot{W}_1$ plağın merkezindeki çökme hızıdır. Hareketin ilk evresinde, yarıçap boyunca çökme miktarı ve çökme hızı için sırasıyla şu denklemler elde edilebilir [97];

$$w = \left(p_0 - p_c \right) \tau^2 \left(1 - \frac{r}{R} \right) \frac{1}{\mu} \tag{2.61}$$

$$\dot{w} = 2 \left(p_0 - p_c \right) \tau \left(1 - \frac{r}{R} \right) \frac{1}{\mu} \tag{2.62}$$

İlk evrenin sonunda plağın sahip olduğu kinetik enerji miktarını (2.62) denklemini kullanarak şu şekilde yazabiliriz [97];

$$E_k = \pi R^2 \left(p_0 - p_c \right)^2 \frac{\tau^2}{3\mu} \tag{2.63}$$

Elde edilen bu değer, hareketin ikinci evresine aktarılacak olan kinetik enerjiyi ifade etmektedir. Hareketin ikinci evresi, yükün kaldırılmış olduğu andan sonrasını kapsamaktadır.

$$p = 0, \qquad 0 \le r \le R, \tag{2.64}$$

Düzgün yayılı basınç yükü kaldırılmış olmasına karşın, birinci evrenin sonunda var olan kinetik enerji nedeniyle plakta kalıcı şekil değişimi devam etmektedir. Çökme hızı (2.60) denklemindekine benzer şekilde elde edilebilir [97];

$$\dot{w} = \dot{W}_2 \left(1 - \frac{r}{R} \right), \qquad 0 \le r \le R, \tag{2.65}$$

İkinci evrede, plağın merkezindeki çökme aşağıdaki şekilde yazılabilir [97];

$$W_2 = p_0 \tau \frac{(2t-\tau)}{\mu} - \frac{p_c t^2}{\mu} \tag{2.66}$$

İkinci evrenin sona erdiği anda ($t=T$), çökme hızı $\dot{W}_2 = 0$ olacağından, hareketin süresi için aşağıdaki denklem yazılabilir [97];

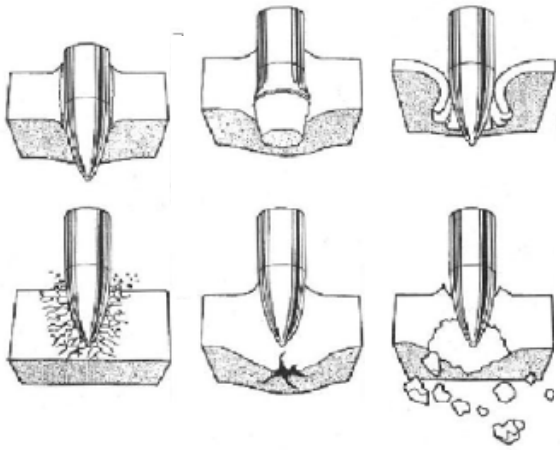
$$T = \eta\tau, \qquad (\eta = p_0 / p_c) \tag{2.67}$$

Her iki evre sonunda oluşan toplam çökmeyi de şöyle ifade etmek mümkündür [97];

$$w_f = \eta(\eta - 1) p_c \tau^2 \left(1 - \frac{r}{R}\right) \frac{1}{\mu} \tag{2.68}$$

2.6 Hedef Levhada Hasar Mekanizmaları

Balistik darbe sonucunda, mermi ve zırh malzemeleri için çeşitli hasar biçimleri ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.26'da gösterilen bu hasar biçimleri; yüksek basınç yükü altında kırılma, yansıyan şok dalgalarının birbirleri ile karşılaşmaları sonucunda oluşan çekme yükleri altında kırılma (spall fracture) veya kayma bantlarının oluşumu ile başlayan kayma (shear) şeklinde görülmektedir. Özellikle sert metaller ve seramik gibi malzemelerde, yüksek basınç yükü nedeniyle dinamik hasar görülmektedir [71].



Şekil 2.26: Yüksek hızlı çarpma yükü altında hasar biçimleri [71]

Zırh malzemelerinde balistik darbeye bağlı oluşan şok dalgaları katı içinde ilerler ve serbest yüzeylere ulaştığında geri yansır. Yansıyan şok dalgaları ile diğer dalgaların karşılaşması sırasında oluşan çekme gerilmeleri malzeme dayanım sınırlarını aşabilir. Bu nedenle mikro seviyede çatlaklar oluşur ve sonuçta tehdit yönüne göre arka

yüzeyden bir katman koparak ayrılır. Özellikle seramiklerde görülen bu hasar biçimi nedeni ile arka yüzeyde başlayan hasar çarpma yüzeyine doğru ilerler. Seramik malzemelerdeki hasarın başlangıcı, büyük ölçüde mikro seviyedeki malzeme hatalarına bağlıdır.

Çarpma problemleri genellikle çok karmaşık olduklarından, çözümleri için sayısal yöntemlere başvurulur. Fakat dik (normal) bir çarpma olayında, ideal mermi ve hedef levha geometrileri söz konusu ise kuramsal yaklaşık çözümler elde etmek mümkündür. Bazı durumlarda, daha basit problemlerin çözümleri, mevcut probleme uyumlu hale getirilerek kullanılabilir.

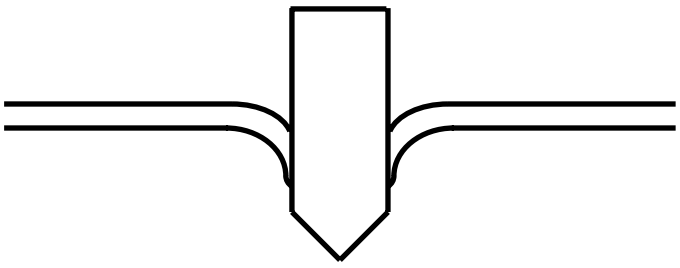
Sünek malzemeler için Taylor tarafından geliştirilen çözümde, hedef levhada oluşan dairesel delik için harcanan enerji şu şekilde ifade edilmektedir [93];

$$W = \frac{\pi}{2} d^2 \sigma_0 H \qquad \textbf{(2.69)}$$

Burada, σ_0 hedef levha akma gerilmesi, H levha kalınlığı ve d delik çapıdır. Deneysel çalışmalar, konik uçlu mermiler tarafından sünek levhaların delinmesi için gerekli olan kinetik enerji miktarının hesaplanmasında (2.69) denkleminin %10~20 hata mertebeleriyle yakınsama sağladığını göstermektedir.

Çarpma sonrasında eğilme ile birlikte oluşan delinme (Şekil 2.27) durumunda ise (2.70) denklemi kullanılabilir;

$$W = \frac{\pi}{8} dH \sigma_0 (d + \pi H) \qquad \textbf{(2.70)}$$



Şekil 2.27: İnce levhalarda eğilme hasarı

Levha kalınlığının, delik çapına oranla küçük olduğu durumlarda daha yakın sonuçlar veren (2.70) denkleminde, parantez içinde bulunan ikinci terim eğilme işini ifade etmektedir.

2.7 Hedef Levhada Oluşan Delinme Miktarı

Merminin rijit olduğu ya da olmadığı durumlar için önerilmiş çok sayıda model mevcuttur. Delinme direnci hedef levhanın akma gerilmesi, yoğunluğu ve çarpma hızının karesine göre belirlenir. Belirli bir uç şekline sahip rijit mermilerin çarpma durumları incelenirken, delinme miktarının, mermi yoğunluğu veya akma gerilmesinden bağımsız olduğu kabul edilir. Çünkü merminin delme işlemini gerçekleştirebilecek kadar dayanıklı olduğu düşünülür.

Merminin levha içinde ilerleme (delinme) miktarının belirlenmesi için kullanılabilecek en basit model, levhanın mekanik özellikleri ile birlikte çarpma enerjisi ve merminin fiziksel özelliklerine bağlı olmalıdır. Kalın (yarı-sonsuz) bir levha için böyle bir denklem şu şekilde önerilmektedir [49];

$$w = \frac{2m_p V_0^2}{\pi d^2 \beta \sigma_0} \tag{2.71}$$

Burada, m_p merminin kütlesi, V_0 çarpma hızı, d mermi çapı, β hedef levhanın delinme direnci, σ_0 levhanın akma gerilmesi ve w delinme miktarıdır. Benzer şekilde, çarpma yükü altındaki rijit-mükemmel plastik davranışa sahip dairesel ince plağın merkezindeki kalıcı yer değiştirme için önerilen bir denklem ise şöyledir [89];

$$w = \frac{0.28 \rho_t V_0^2 R^2}{\sigma_0 H} \tag{2.72}$$

2.8 Büyük Yer Değiştirmeler İçin Hidrokod Formülasyonu

Doğadaki olaylar genellikle kuramsal olarak çözümlenmesi ve matematiksel olarak ifade edilmesi zor olan karmaşıklıklar içerir. Bu gibi durumlarda, gözleme dayalı yöntemler veya yüksek donanımlı bilgisayarların kullanıldığı sayısal yöntemler kaçınılmaz olur. Gözlem ve deneye dayalı yöntemler oldukça pahalı ve zaman alıcı olduklarından, problemlerin çözümünde sayısal yöntemler tercih edilmektedir.

Hidrokod; sürekli ortamların davranışlarını modellemek için kullanılan bir araçtır. En yalın anlamıyla, tüm hızlarda akışkan hareketini modellemeyi sağlayan bir bilgisayar kodudur. Bu kod mukavemet problemlerine de kolaylıkla uygulanabilir. Hidrokod formülasyonu, özellikle yüksek hızlı çarpma gibi çok kısa zaman aralıklarında büyük

yer değiştirmelerin gerçekleştiği yüksek birim şekil değiştirme hızlı olayların sayısal yöntemlerle çözümünde, hidrodinamik korunum denklemleri ve bünye denklemlerinin çözümü için sıklıkla kullanılır. Bu denklemler genellikle açık (explicit) zaman integrasyonu kullanılarak çözülür [98,99]. Temelde, dış kuvvetler ve bünye yüklerinin ağ yapısı ile birçok elemana bölünmüş sistem üzerindeki etkileri dikkate alınır. Çok kısa bir zaman aralığının ardından, kuvvetler sabit kalmak üzere, sistemin geometrisi ve ağ yapısının yeni konumları belirlenir. Daha sonra kuvvetler yeniden hesaplanarak istenen çözüm elde edilinceye kadar bu işlemler tekrarlanır.

Bu tip problemlerde genellikle Lagrange türü hidrokod çözümler tercih edilir. Lagrange türü çözümde koordinatlar malzeme üzerine sabitlenmiş olduğundan, problemin modellenmesinde Euler türü çözüme oranla daha az elemana ihtiyaç duyulur. Ayrıca malzemenin mukavemeti ile ilgili davranışları daha doğrulukla çözülebilir.

Hidrokod sonlu farklar veya sonlu elemanlar gibi çeşitli sayısal yöntemlerin içinde de kullanılabilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın deneysel bölümünde, öncelikle, tümleşik bir zırhın balistik davranışlarının incelenmesine yönelik, sayısal uygulamalarda başvurulabilecek deneysel bulguların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma yönteminin kullanılmasıyla; tasarım isterlerini karşılayabilecek sayısal bir modelin, bir sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla deneysel sonuçlarla uyum sağlayacak şekilde modellenmesinin ardından, sayısal ve deneysel çalışmaların birbirlerini destekleyecek şekilde sürdürülmesi ve mümkün olan en az deney sayısı ile tasarımın tamamlanması amaçlanmaktadır.

Bu doğrultuda, öncelikle deneysel bölümde kullanılacak alüminyum levhaların mevcut çarpma dayanımlarının belirlenmesi amacıyla ön testler yapılmıştır. Böylece deneylerin devamına yönelik, malzeme tür ve kalınlığı konusunda bir fikir oluşturulmaya çalışılmıştır.

3.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Deneyler 2. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı (Kayseri) Atış Poligonunda gerçekleştirilmiştir.

Atışların yapıldığı poligonda bulunan hareketli tutucu sehpa (Şekil 3.1), hedef levhaların bağlanması ve istenen mesafeden atış yapılabilmesi için kullanılmaktadır. Çarpma yükleri etkisiyle yer değiştirmeyecek şekilde tasarlanmış olduğundan, hedef levhadaki hasarın tam olarak temsil edilmesi sağlanmaktadır.

Poligonda, değiştirilebilen namlusu sayesinde farklı çap ve markalarda mermileri uzaktan elektrikli ateşleme düzeneği yardımıyla atabilen bir atış sistemi de bulunmaktadır (Şekil 3.2).

Mermi hızlarının ölçümü için Oehler Research Model 55 hızölçer (Şekil 3.3) ile birlikte Model 35P süreölçer (Şekil 3.4) kullanılmıştır.



Şekil 3.1: Tutucu sehpa



Şekil 3.2: Atış sistemi



Şekil 3.3: Oehler Research Model 55 hızölçer



Şekil 3.4: Oehler Research Model 35P süreölçer

Atışlarda, MKEK (Makina Kimya Endüstrisi Kurumu) yapımı, 9 mm çapında ve 19 mm uzunluğunda, FMJ (full metal jacket-tamamen metal kaplı) Parabellum mermiler kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: MKEK 9 mm Parabellum mermi

Bu mermilerin MKEK tarafından verilen teknik özelliklerine göre ağırlığı 8±0.075 g ve standart hızları 370±10 m/s'dir. Mermi hızları, kovan içindeki barut miktarları değiştirilerek sınırlı ölçüde kontrol edilebilmektedir. Mermiler pirinç (CuZn36) malzemeden yüksük ve kurşun antimon alaşımı çekirdekten oluşmaktadır [100].

Performans belirleme testlerinde, merminin yarattığı hasarın belirlenebilmesi için Şekil 3.6'da görülen derinlik mikrometresi kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Derinlik mikrometresi

Yapılan ön deneylerde, bir levhaya yapılan atış neticesinde oluşan hasar, sayısal benzetim için esas alınan sınır şartlarından farklı olarak, levha sınırlarında eğilmeye neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, bir levhaya yapılan çoklu atışların, önceki atışlar nedeniyle oluşan mevcut eğilmeler dolayısıyla sonuçların sağlıklı olarak irdelenmesine engel olduğu belirlenmiştir. Bu sorunun çözümüne yönelik olarak, Şekil 3.7'de görülen çoklu atış fikstürü tasarımlanmış ve yapısal dayanımı yüksek, 8 mm kalınlığında DKP 1020 malzemeden üretilmiştir. Böylece, hem tek levhaya

birbirlerinin sonuçlarından etkilenmeyecek dört bağımsız atışın yapılması, hem de sınır şartlarının tam olarak benzetilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.7: Çoklu atış fikstürü

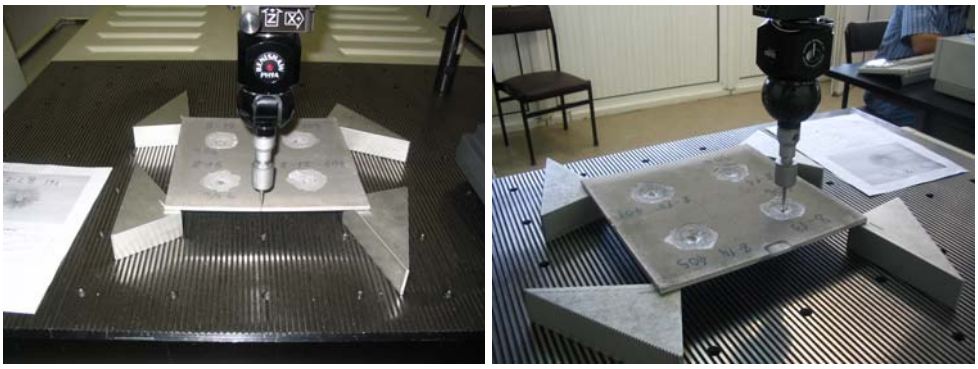
Performans belirleme testleri sonrasında yapılan atışlarda, mermilerin levha içine girme miktarları Şekil 3.8'de görülen 3D-CMM (Three Dimensional Coordinate Measurement Machine-3 Boyutlu Koordinat Ölçüm Cihazı) kullanılarak ölçülmüştür



Şekil 3.8: 3 Boyutlu Koordinat Ölçüm Cihazı (3D-CMM)

Ölçümler yapılırken, öncelikle tüm koordinatlar (x, y, z) için levha alt ve üst yüzeyleri ile yanlarından referans ölçüler alınmıştır. Daha sonra, oluşturulmuş olan bu referans düzleme göre cihazın uç kısmının bulunduğu noktanın koordinatları belirlenerek, her atış noktası için ölçüler elde edilmiştir. (Şekil 3.9).

Ölçümlerde, çarpma yönüne göre merminin açtığı çukur ve arka yüzeyde oluşturduğu şişme miktarları tespit edilmiştir. Burada, arka yüzeydeki değerlerin, levhanın arka yüzeyine göre şişme miktarını gösterdiğini belirtmek gerekir.



Şekil 3.9: 3D-CMM ile yapılan ölçümler

3.2 Performans Belirleme Testleri

Performans belirleme testleri kapsamında yapılan deneylerin amacı, farklı tip ve kalınlıklarda alüminyum levhaların belirli çarpma şartları altındaki balistik davranışlarının belirlenmesidir.

Atışlar için kullanılacak hedef levha numuneleri AA 2024 T3 (6.35 mm, 4.00 mm ve 2.50 mm kalınlıklarında), AA 6061 T6 (8.00 mm ve 6.40 mm kalınlıklarında), AA 6061 (6,35 mm kalınlığında) ve AA 7075 T6 (6,35 mm kalınlığında) olarak temin edilmiştir.

Atışlarda kullanılan alüminyum alaşımların bileşim oranları Tablo 3.1'de, mekanik özellikleri ise Tablo 3.2'de sunulmuştur [101].

Tablo 3.1: Atışlarda kullanılan alüminyum alaşımların bileşimleri (%)

	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
2024	90.7~94.7	0.1	3.8~4.9	0.5	1.2~1.8	0.3~0.9	0.5	0.15	0.25
6061	95.8~98.6	0.04~0.35	0.15~0.4	0.7	0.8~1.2	0.15	0.4~0.8	0.15	0.25
7075	87.1~91.4	0.18~0.28	1.2~2.0	0.5	2.1~2.9	0.3	0.4	0.2	5.5~6.1

Tablo 3.2: Atışlarda kullanılan alüminyum alaşımların mekanik özellikleri

	6061 T0	6061 T6	2024 T3	7075 T6
Yoğunluk (kg/m^3)	2700	2700	2780	2810
Akma mukavemeti (MPa)	48.3	276	310	503
Kopma mukavemeti (MPa)	117	310	448	572
Kopma uzaması (%)	25	17	18	11
Elastisite Modülü (GPa)	68.9	68.9	73.1	71.7
Poisson oranı	0.33	0.33	0.33	0.33
Kayma Mukavemeti (MPa)	75.8	207	276	331
Özgül ısı (J/g.°C)	0.896	0.896	0.960	0.960

Performans belirleme testleri için 200x200 mm ölçülerinde temin edilen alüminyum levhalara 5 metre uzaklıktan, toplam 35 adet atış yapılmıştır.

İlk grup atışlar 8.00 mm ve 6.40 mm kalınlıklarında AA 6061 T6, 6.35 mm kalınlığında AA 6061 ve 6.35 mm kalınlığında AA 2024 T3 levhalarla gerçekleştirilmiştir. Bu atışlar sonucunda mermilerin yarattığı hasarın belirlenmesi amacıyla çarpma noktalarında derinlik mikrometresi ile ölçüm yapılmıştır. Elde edilen değerler, ölçümün yapıldığı bölgedeki eğilme ile merminin levha içine girme miktarının toplamını, bir başka ifade ile çarpma bölgesindeki toplam çökmeyi ifade etmektedir.

İlk grup atışlar sonucunda elde edilen çökme değerleri Tablo 3.3'te görülmektedir. Tablo 3.3 incelendiğinde, herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış olan 6.35 mm kalınlığında AA 6061 levhaların 383 m/s ve 356 m/s çarpma hızlarında tamamen delindiği görülmektedir (Şekil 3.10).

Tablo 3.3: Birinci grup ön test sonuçları

Malzeme	Isıl İşlem	Kalınlık (mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)
6061	-	6.35	356	delindi
6061	-	6.35	383	delindi
6061	T6	6.40	362	5.42
6061	T6	6.40	376	6.19
6061	T6	8.00	349	3.51
6061	T6	8.00	370	4.42
2024	T3	6.35	360	3.66
2024	T3	6.35	372	3.48



a) b)

Şekil 3.10: AA 6061 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.35 mm, mermi hızı=356 m/s) a) ön, b)arka

Yapay yaşlandırma (T6) uygulanmış 6.40 mm kalınlığında AA 6061 ve ısıl işlem (T3) uygulanmış 6.35 mm kalınlığında AA 2024 levhaların ise mermilere direnç gösterdiği ve delinmediği görülmektedir (Şekil 3.11, Şekil 3.12).



a) b)

Şekil 3.11: AA 6061 T6 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.40 mm, mermi hızı=376 m/s) a) ön, b)arka



a) b)

Şekil 3.12: AA 2024 T3 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.35 mm, mermi hızı=372 m/s) a) ön, b)arka

Levhalarda oluşan hasar ölçümlerine göre, 6.40 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhalarda 376 m/s mermi hızında oluşan çökme 6.19 mm, 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T3 levhalarda 372 m/s mermi hızında oluşan çökme ise 3.48 mm olarak belirlenmiştir. 8.00 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhalarda 349 m/s ve 376 m/s mermi hızlarında oluşan çökmeler ise sırasıyla 3.51 mm ve 4.42 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.13). 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T3 levhaların 8.00 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhalara yakın dayanım gösterdiği anlaşılmaktadır.



a)



b)

Şekil 3.13: AA 6061 T6 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=8.00 mm)
a) mermi hızı=349 m/s, b) mermi hızı=376 m/s

Çeşitli özellikteki levhalar arasında, çarpma dayanımlarının ifadesi olarak kabul edilebilecek olan çarpma sonucunda oluşan çökme miktarları yönünden bir karşılaştırma yapıldığında, uygulanan ısıl işlem miktarının ve dolayısıyla malzemenin enerji soğurma yetisi (tokluk) ile sertliğinin balistik dayanımı yakından etkilediği sonucuna varmak mümkündür.

Bu sonuçlara göre; AA 2024 T3 alaşımının AA 6061 T6 alaşımına göre daha az hasar gördüğü, benzer şekilde, hiçbir ısıl işlem uygulanmamış AA 6061 levhaların T6 ısıl işlem uygulanmış levhalarla aynı kalınlıkta olmalarına rağmen 356 m/s mermi hızındaki çarpmalarda bile delindiği gözlenmiştir. Burada, uygulanan ısıl işlemlerin alüminyum levhaların çarpma dayanımlarını artırdığı söylenebilir.

Elde edilen bulgular ışığında, deneyde kullanılan levhaların daha düşük kalınlıklardaki çarpma davranışlarını belirlemek amacıyla 2.00 mm ve 4.80 mm kalınlıklarında AA 6061 T6 levhalar ile 2.50 mm ve 4.00 mm kalınlıklarında AA 2024 T3 levhalarla atışlar tekrarlanmıştır. Atışlar sonunda, tüm levhaların delindiği görülmüştür (Şekil 3.14).



a) b)

Şekil 3.14: İnce levhaların çarpma sonrası görünümleri a) AA 2024 T3 (2.50 mm / 352 m/s), b) AA 6061 T6 (2.00 mm / 376 m/s)

Çarpma dayanımlarındaki farklılaşmaların da işaret ettiği gibi, malzeme sertlik derecesi balistik etkinliği yakından etkilemektedir. Bu nedenle, deneyde kullanılan levhaların Rockwell (RE) sertlikleri de ölçülerek karşılaştırmalarda kullanılmıştır (Şekil 3.15).

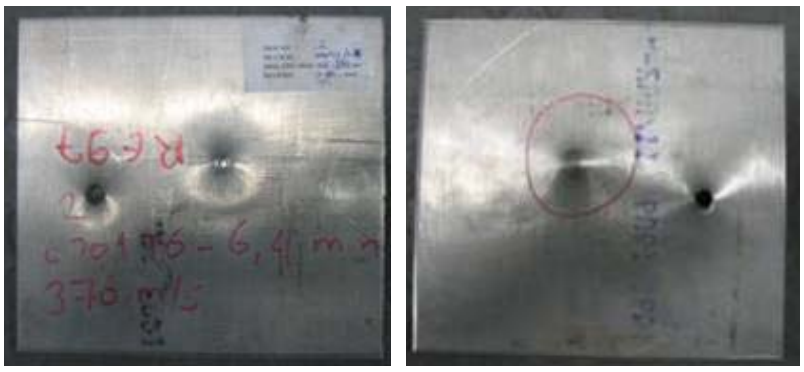


Şekil 3.15: Rockwell sertlik ölçüm cihazı

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda elde edilen değerler, enerji sönüm yeteneğine de bağlı olarak, sertliği fazla olan malzemenin çarpma direncinde artış olduğunu göstermektedir. 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T3 levhalar için ölçülen sertlik RE 102 iken, bu değer 6.40 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhalarda RE 91 ve 8.00 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhalarda RE 97 olarak ölçülmüştür.

Birinci grup atışlardan elde edilen sonuçların doğrulanmasına yönelik olarak, aynı levhalara atışlar yinelenmiştir. Bu atışların sonucunda, 6.40 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhanın 385 m/s mermi hızında delindiği gözlenmiştir (Şekil 3.16). Bu

durumda, söz konusu levhanın balistik limitinin 380 m/s civarında olduğu söylenebilir.



a) b)

Şekil 3.16: AA 6061 T6 levhaların çarpma sonrası görünümü (kalınlık=6.40 mm / mermi hızı=385 m/s) a) ön, b)arka

Son olarak 6.35 mm kalınlığında AA 7075 T6 levhalar kullanılarak atışlar yapılmıştır. Farklı mermi hızlarında elde edilen çökme değerlerine göre, sertlik derecesi diğerlerine oranla daha düşük olmasına rağmen, bu levhaların en yüksek çarpma dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir.

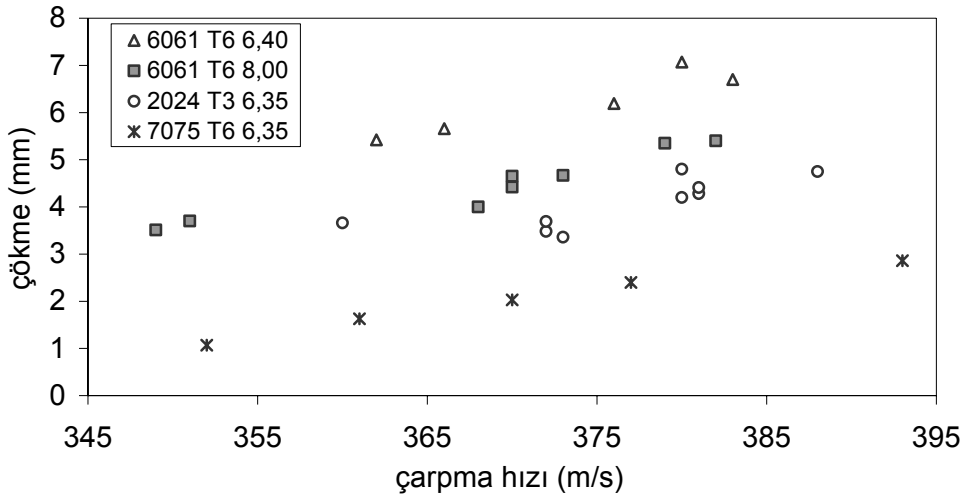
Performans belirleme testlerinde, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde kullanılması planlanan alüminyum levhaların mevcut şartlardaki çarpma davranışları belirlenmiştir.

Yapılan tüm atışların sonucunda elde edilen veriler, Tablo 3.4 ve Şekil 3.17'de görülmektedir.

Deney sonuçları, incelenen levhalar arasında en yüksek dayanımı gösterenin AA 7075 T6 olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 6.40 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 levhalar için balistik sınır 380 m/s dolayındadır. Böylece, NIJ (National Institute of Justice) standartlarına göre, yapılan testler kapsamında incelemeye alınan tüm levhaların Seviye-II (9 mm FMJ mermi, 8.06 g mermi ağırlığı, 358 m/s çarpma hızı) koruma sağladığı anlaşılmaktadır [102].

Tablo 3.4: Yapılan performans belirleme atışlarının sonuçları

Test No	Malzeme	Kalınlık (mm)	Sertlik (RE)	Çarpma hızı (m/s)	Çökme (mm)
I-8	2024 T3	6.35	103	360	3.66
I-4	2024 T3	6.35	102	372	3.48
IV-10	2024 T3	6.35	102	372	3.69
III-4	2024 T3	6.35	102	373	3.36
III-3	2024 T3	6.35	103	380	4.80
IV-8	2024 T3	6.35	102	380	4.20
IV-9	2024 T3	6.35	102	381	4.28
IV-12	2024 T3	6.35	102	381	4.41
IV-11	2024 T3	6.35	102	388	4.75
III-2	2024 T3	4.00	102	380	delindi
II-1	2024 T3	2.50	101	352	delindi
I-1	6061 T6	8.00	91	349	3.51
III-7	6061 T6	8.00	91	351	3.70
IV-1	6061 T6	8.00	90	368	4.00
I-6	6061 T6	8.00	90	370	4.42
IV-5	6061 T6	8.00	90	370	4.65
IV-3	6061 T6	8.00	88	373	4.67
IV-2	6061 T6	8.00	88	379	5.35
IV-4	6061 T6	8.00	90	382	5.40
I-7	6061 T6	6.40	97	362	5.42
III-5	6061 T6	6.40	97	366	5.66
I-2	6061 T6	6.40	97	376	6.19
IV-6	6061 T6	6.40	97	380	7.07
IV-7	6061 T6	6.40	97	383	6.70
III-6	6061 T6	6.40	97	385	delindi
III-1	6061 T6	4.80	93	359	delindi
II-2	6061 T6	2.00	92	376	delindi
I-5	6061 T6	6.35	-	356	delindi
I-3	6061 T6	6.35	-	383	delindi
V-1	7075 T6	6.35	78	352	1.07
V-5	7075 T6	6.35	78	361	1.63
V-3	7075 T6	6.35	78	370	2.03
V-4	7075 T6	6.35	78	377	2.40
V-2	7075 T6	6.35	78	393	2.86



Şekil 3.17: Alüminyum levhaların, ön testlerde belirlenen balistik performansları

3.3 Levhalara Uygulanan Balistik Dayanım Artırma Yöntemleri

Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif metaller ve alaşımları ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı endüstride yoğun biçimde kullanılmaktadır. Sağladıkları ağırlık tasarrufu nedeniyle kullanılma gerekliliği her gün artan hafif metal ve alaşımlarının yapısal özelliklerinin geliştirilmesi için uygulanan çok çeşitli yöntemler mevcuttur.

3.3.1 Isıl püskürtme ile kaplama

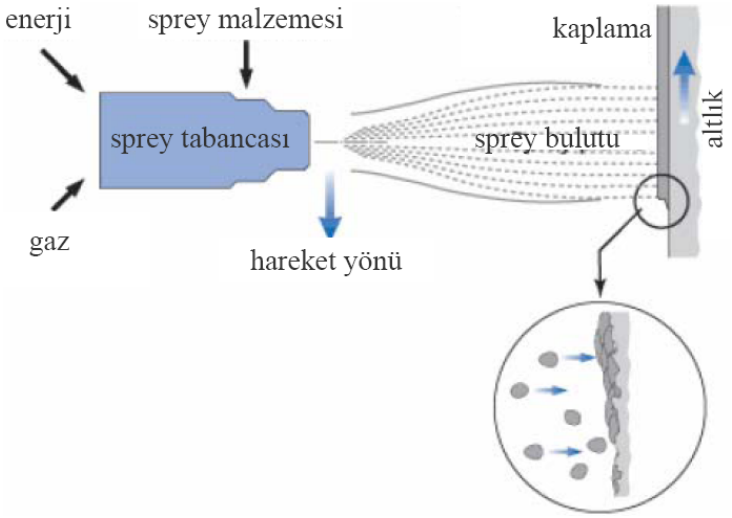
Hafif metal ve alaşımlarının yapısal özelliklerinin geliştirilmesi için 20. yy başından beri kullanılmakta olan ısıl püskürtme yöntemi yüzeylerin aşınmaya dayanıklı sert kaplamalarla kaplanmasıdır. Yöntemin esası toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin ergiyik veya kısmi ergiyik duruma getirilerek kaplanacak yüzeye olabildiğince yüksek hızda püskürtülmesine dayanır. Bu yöntemle oluşturulan alümina, krom oksit, zirkonya gibi kaplamalar yüksek aşınma direncinin arzu edildiği değişik endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Bu yöntemde toz, tel ya da çubuk haldeki kaplama malzemesi ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar ısıtılır ve oluşan ergiyik ya da yarı ergiyik damlacıklar bir gaz akımında hızlandırılarak kaplanacak yüzeye püskürtülür. Isıl püskürtme ile kaplama işlemi esnasında, altlıkta (metal ve alaşımları) önemli bir ısınma meydana gelmez. Bu sayede, işlenmiş ve ısıl işlem görmüş metalik parçalar çarpılma meydana gelmeden, mikroyapı ve özellikleri değişmeden kaplanabilir [103].

Başlıca ısıl püskürtme yöntemleri alevle püskürtme, plazma (sprey) püskürtme, patlamalı tabanca ve elektrik ark püskürtme olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerde sıcaklıklar ve püskürtme hızları değişkenlik göstermektedir. Parçacıkların hızı ve sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, kaplama yoğunluğu da o kadar yüksek olmaktadır.

3.3.1.1 Plazma ile püskürtme

Bu yöntemde, tungsten katot ve su soğutmalı bakır anot arasında elektrik arkı oluşturulur. Bu ark soy gazı iyonize ederek plazma haline dönüştürür. Toz halindeki kaplama malzemesi yüksek sıcaklık ve hızdaki gaz plazmanın içine enjekte edilir. Böylece toz ergir ve kaplanacak yüzeye yüksek bir hızla püskürtülür (Şekil 3.18).



Şekil 3.18: Plazma ile püskürtme yöntemi

Günümüzde saf metaller, alaşımlar, seramikler ve plastikler gibi 300'den fazla farklı malzemenin bu yöntemle püskürtülmesi mümkündür. Yapılan çalışmalar altlık alüminyum levhaların aşınma dirençlerinin, krom esaslı plazma kaplama uygulandığında 18 kat ve zirkonyum esaslı plazma kaplama uygulandığında 5 kat arttığını göstermektedir [103].

3.3.1.2 Diğer ısıl püskürtme yöntemleri

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan ısıl püskürtme yöntemlerinin en eskisi olan alevle püskürtme yöntemi günümüzde de en çok kullanılan ısıl püskürtme yöntemidir. Bu yöntemde, kaplama malzemesini eritmek için ısı kaynağı olarak yanıcı gazlar (oksijen-asetilen, oksijen-hidrojen, vb.) kullanılır. Bu yöntemle üretilen kaplamalar diğerlerine oranla daha gözenekli bir yapıya sahiptir.

Elektrik ark püskürtme yönteminde, benzer ya da benzer olmayan iki tel elektrot arasında sürekli bir ark oluşturulmakta ve oluşan ark telleri ergitmektedir. Ergitilen tel uçları hızlı ve soğuk hava jeti tarafından atomize edilmekte ve kaplamayı oluşturmak üzere iş parçası üzerine gönderilmektedir. Bu yöntemle yüksek dolgu oranları elde etmek mümkün olup yöntemin otomatik sistemlere uyarlanması kolaydır.

Patlamalı tabanca ile püskürtme yönteminde ise belirli miktarlarda oksijen ve asetilen sübaplar yardımı ile yanma odası içine beslenmektedir. Ateşleme bujisinin yanma odası içindeki gazı ateşlemesinin ardından, birkaç milisaniye içinde oluşan patlama ve şok dalgaları toz parçacıklarını ergime noktasına yakın sıcaklıklara ısıtmakta ve altlık malzeme üzerine püskürtmektedir. Bu yöntemle hemen hemen tüm metalik ve seramik malzemeler püskürtülebilmekte ve düzenli yapı ve kalınlıkta kaplamalar elde edilebilmektedir.

3.3.2 Destek katmanı ilavesi

Balistik zırhlarda katmanlı yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Zırh uygulamalarında rastlanan metal ve kompozit malzemelerin balistik olarak ön plana çıkan özelliklerinin birlikte kullanılması ile elde edilen zırh çözümleri hem ağırlık, hem de balistik yönünden arzu edilen seviyede koruma sağlamaktadır.

Katmanlı zırhlar esas olarak ön katman ve destek katmanlarından oluşmaktadır. Asıl kullanım amacı mermi uç geometrisini balistik etkiyi azaltacak şekilde bozmak olan ön katmanlar, sert metal ya da seramik gibi malzemelerden yapılmaktadır. Metal, kompozit ve/veya elastomer gibi malzemelerden oluşan destek katmanı ya da katmanları ise ön katman tarafından kısmen durdurulan tehdidin kalan enerjisini soğurmaktadır.

Zırh çelikleri, titanyum ve alüminyum alaşımlı malzemeler kullanılan en yaygın metal zırh malzemeleridir. Bu malzemelerin sertlik değerleri oldukça yüksek seviyelere kadar çıkmaktadır. Yüksek malzeme yoğunluğu kullanımlarını sınırlandırmakla birlikte, çoklu vuruş performansı, düşük kalınlık ve birim maliyeti açısından bu malzemeler avantajlı olabilmektedir.

Yüksek performanslı Polietilen, Aramid, Kevlar ve S2 Cam zırh uygulamalarında kullanılan en önemli ileri kompozit malzemelerdir. Bu malzemelerin tek başlarına kullanılmasıyla normal çekirdekli tehditlere karşı hafif balistik korunma çözümleri

elde etmek mümkündür. Ayrıca, katmanlı zırhlarda destek katmanı olarak kullanılmaları ile zırh delici mermi tehditlerine karşı da hafif tasarımlar elde edilebilmektedir. Hafiflikleri ve kolay şekil verilebilmeleri sayesinde, başta ağırlık ölçütünün önemli olduğu personel zırhları ve hava araçları olmak üzere, kompozit malzemelerden oluşan katmanlı yapılar birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Balistik çarpmalarda penetrasyon merminin sahip olduğu kinetik enerji ile doğrudan bağlantılıdır. Bu bakımdan, penetrasyonun ve özel olarak da perforasyonun önlenmesi için kinetik enerjinin çarpma esnasında soğrularak şekil değiştirme enerjisine dönüştürülmesi esastır. Son yıllarda çok yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler birçok üstünlüklerinin yanında, enerji emiş kapasiteleri yönüyle de ön plana çıkmaktadırlar. Bu konuda, polietilen esaslı elyaflar kullanılarak oluşturulan kompozit yapılarda oldukça üstün balistik dayanım ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar polietilenin düşük yoğunluk özelliğinin yanı sıra çok yüksek bir enerji emiş kapasitesine de sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, zırhın destek katmanı olarak polietilen elyaflı kompozit malzemeler üstün enerji emiş davranışları açısından uygun bir seçim olacaktır.

3.3.3 RRA ısıl işlemi

7XXX serisi alüminyum alaşımları yüksek sertlik ve mukavemet sağlayan T6 ısıl işlem durumunda korozyona karşı oldukça duyarlı olduğundan, geçmiş yıllarda bu alaşımların korozyon direncini iyileştirmek amacıyla T73 olarak bilinen aşırı yaşlandırma işlemi geliştirilmiştir. Ancak T73 ısıl işlemi alaşımın korozyon direncini arttırırken, mukavemeti %10-15 oranında azaltmaktadır. Mukavemet ve korozyon özelliklerini en iyi değerde bir araya getirmeyi amaçlayan çalışmalar sonunda, araştırmacılar tarafından RRA (retrogression and reageing - retrogresyon ve yeniden yaşlandırma) işlemi bulunmuştur.

RRA işlemi retrogresyon ve yeniden yaşlandırma olmak üzere iki aşamalı bir ısıl işlem süreci olarak tanımlanmakta ve T6 temper durumundaki alaşımlara uygulanmaktadır. RRA işleminin retrogresyon kademesinde, T6 temper durumundaki alaşım, çözeltiye alma ve yaşlandırma sıcaklığı arasında bir sıcaklıkta (genellikle 200-280°C) kısa süreli (1-100 saniye) tutulmakta, daha sonra alaşım T6 işleminin yaşlandırma sıcaklık ve süresi kullanılarak yeniden yaşlandırılmaktadır. Bu işlemler sırasında alaşım, her bir kademeden sonra hızla soğutulmaktadır [104].

Baydoğan [104] tarafından yapılan bir çalışmada, 7075 kalite alüminyum alaşımı sacların T6 temper durumu ile 220°C'de 15 saniye ile 60 dakika arasında değişen sürelerde retrogresyon uygulandıktan sonra 120°C'de 24 saat yeniden yaşlandırıldıklarında, mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan sertlik, çekme ve darbe deneylerinden elde edilen sonuçlara şunlardır:

1. Retrogresyon ve yeniden yaşlandırma işlemiyle T6 temper durumuna eşit ya da daha yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Sertlik ve mukavemet retrogresyon süresine bağlı olarak önce azalmakta, artarak en yüksek değerine ulaştıktan sonra tekrar azalmaktadır. Süneklik ve tokluk retrogresyon süresine bağlı olarak artmaktadır.

2. En yüksek sertlik değerinin elde edildiği RRA koşulunda (220°C'de 30 saniye retrogresyon sonrası yeniden yaşlandırma) sertlik T6 temper durumundan yaklaşık %7 oranında daha yüksektir. Akma ve çekme mukavemetleri sırasıyla yaklaşık %3 ve %5 azalırken, süneklik (kopma uzaması) değişmemekte, tokluk ise %100'den daha yüksek oranda artmaktadır.

Bu bilgiler doğrultusunda, yüksek hızlı bir çarpma olayında, hedef levhanın çarpma dayanımını belirleyen en önemli özellikler olan tokluk ve sertliği artırıcı etkisi nedeniyle 7075 kalite alüminyumlara RRA ısıl işleminin uygulanarak levhaların balistik dayanımlarındaki değişimlerin araştırılması faydalı olacaktır.

3.4 Kaplamalı Levhaların Balistik Testleri

2. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı Atış Poligonunda gerçekleştirilen deneylerde, hazırlanan numunelerin balistik performanslarının belirlenmesi ve uygulanan kaplamaların, levhaların çarpma dayanımına etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

3.4.1 Atışlarda kullanılan levhaların hazırlanması

Önceki dönemde yapılan performans belirleme testlerin sonuçlarından yola çıkılarak, Tablo 3.5'te görülen ölçü ve kalitelerde numuneler hazırlanmıştır. Balistik performans belirleme testlerinde, farklı ısıl işlemler uygulanmış 2024, 6061 ve 7075 kalite alüminyum levhaların performanslarının geliştirilmesi amacıyla, 1'inci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığında, Tablo 3.5'te özellikleri belirtilen levhalara,

ısıl püskürtme yöntemi kullanılarak Sulzer Metco firması standartlarında Metco 68F-NS-1 (kobalt, molibden, krom tozu), Metco 101SF (gri alümina tozu), Metco 201NS (zirkonyum oksit tozu) ve Metco 71NS (tungsten karbit-kobalt tozu) kaplamaları uygulanmıştır [105-109]. Uygulanan yüzey kaplamalarının tamamı 0.762 mm kalınlığındadır.

Tablo 3.5: Hazırlanan levhaların ölçüleri

S/N	Malzeme	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)
1	AA 2024 T351	4.00	250.00	250.00
2		4.80		
3		6.35		
4	AA 6061 T4	4.80		
5	AA 6061 T651	6.35		
6		8.00		
7	AA 7075 T651	4.00		
8		4.80		
9		6.35		

3.4.2 Yapılan atışlar

3.4.2.1 Birinci grup levhalara yapılan atışlar

Atışlar, öncelikle 4.00 mm kalınlığında AA 2024 T351 kalite levhalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir yüzey kaplama işlemi uygulanmamış olan levhalara yapılan iki adet atışta mermi hızları 386 ve 392 m/s olarak ölçülmüştür (Şekil 3.19).



Şekil 3.19: 1. grup kaplamasız levhaların çarpma sonrası görünümü

386 m/s hızdaki atış, levha arka yüzeyinde yırtılma ile sonuçlanırken, 392 m/s mermi hızındaki atışta ise levha tamamen delinmiştir.

1. grup levhalara uygulanan yüzey kaplama işlemlerinin, levhaların balistik performanslarına etkilerinin belirlenmesi amacıyla 68F-NS-1 ve 101SF kaplamalı levhalar kullanılarak atışlar tekrarlanmıştır.

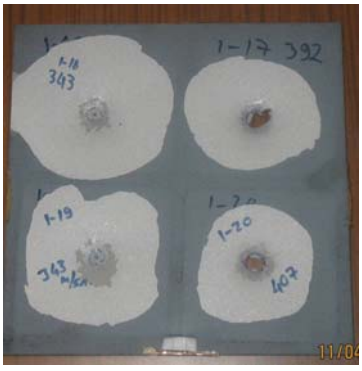
0.762 mm Metco 68F-NS-1 kaplanmış AA 2024 T351 levhalara 405 ve 382 m/s mermi hızlarında yapılan atışlar delinme ile sonuçlanmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20: 1. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların çarpma sonrası görünümü

Atışlar neticesinde, kaplamaların levha yüzeyinden ayrıldığı gözlenmiştir. Kaplamanın yüzey üzerine yeterince yapışamamış olması ile birlikte, merminin levhaya çarpmasının ardından serbest yüzeyde oluşan yüzey dalgaları katman ayrılmasına neden olmaktadırlar.

0.762 mm Metco 101SF kaplanmış AA 2024 T351 levhalara yapılan 4 atıştan, 392 ve 407 m/s çarpma hızlarında delinme gerçekleşirken, 343 m/s mermi hızındaki 2 çarpma merminin levha içine 5.10 mm ve 6.01 mm girmesiyle sonuçlanmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21: 1. grup 101SF kaplamalı levhaların çarpma sonrası görünümü

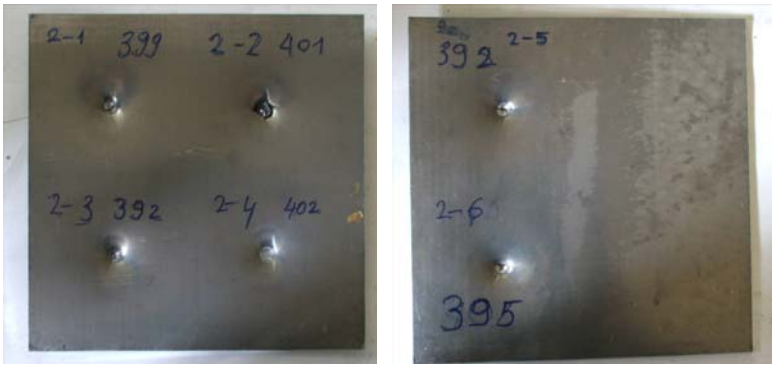
Ölçümler, çarpma bölgesinde kaplamanın kalkmış olması nedeniyle, levha kalınlığı üzerinden derinlik mikrometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 9.00 mm Parabellum mermi için MKEK tarafından verilen namlu çıkış hızında (370±10 m/s), 4.00 mm kalınlığında hazırlanan AA 2024 T351 levhaların delineceği öngörülerek bu gruptaki atışlar sonlandırılmış ve kalınlığı daha fazla olan levhalarla atışlara devam edilmiştir.

3.4.2.2 İkinci grup levhalara yapılan atışlar

Öncelikle, hiçbir yüzey kaplama işlemi uygulanmamış olan 2. grup levhalara çeşitli hızlarda atışlar yapılmıştır (Şekil 3.22).

392~402 m/s arası hızlardaki bu atışlar delinme veya levha arka yüzeylerinde delinmeye yakın yırtılmalarla sonuçlanmıştır (Şekil 3.23). Bu bakımdan, söz konusu levhalar için bu hızların balistik sınır olarak ele alınması doğru olacaktır.

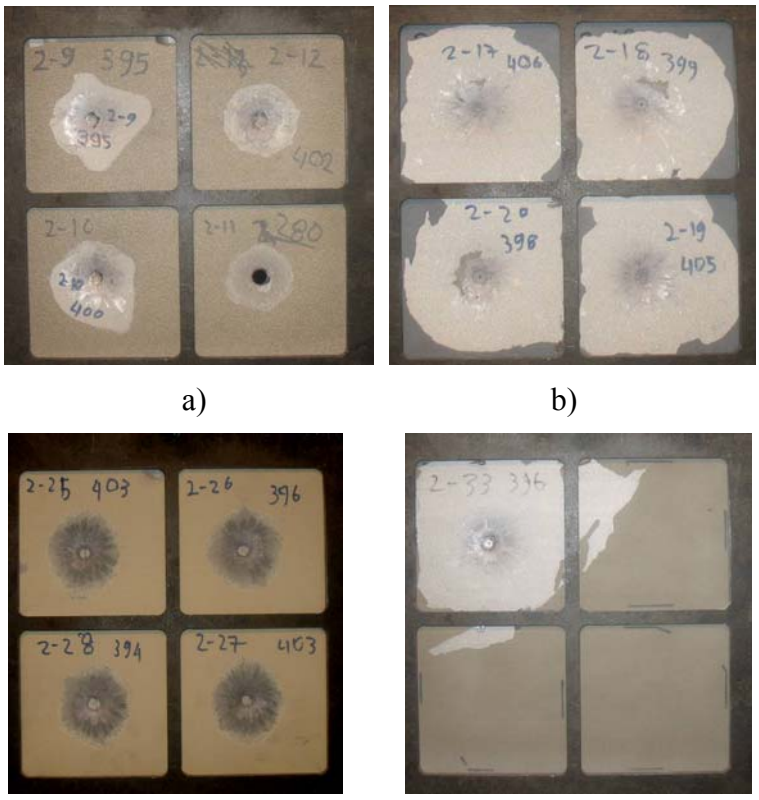


Şekil 3.22: 2. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri



Şekil 3.23: 2. grup kaplamasız levhaların arka yüzeylerinin görüntüleri

Yüzey kaplama işlemlerinin, levhaların balistik dayanımlarına etkisini belirlemek amacıyla kaplamalı levhalar üzerine atışlar yapılmıştır (Şekil 3.24). Kaplamaların tamamında, çarpma bölgesinde yüzeyden ayrılmalar meydana gelmiştir. Özellikle 101SF ve 71NS kaplamalarda, ayrılmaların daha büyük bir bölgede ve tekrar atışa izin vermeyecek ölçüde olduğu gözlenmiştir.



a) b)

c) d)

Şekil 3.24: 2. grup kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri
a) 68F-NS-1, b) 101SF, c) 201NS, d) 71NS

Atışlar, kovanlardaki barut miktarları değiştirilmek suretiyle, kaplamasız levhalara yapılan atışlara yakın hız seviyelerinde tekrarlanmıştır.

2. grup AA 2024 T351 kaplamasız levhalara yapılan atışlarda, balistik sınıra yakın olduğu anlaşılan hızlarda, levha arka yüzeylerinde yırtılmalar gözlenmiştir.

AA 2024 T351 malzemeden 4.80 mm kalınlığında üretilmiş 2. grup levhaların balistik etkinliklerin belirlenmesi amacıyla 3D-CMM cihazı kullanılarak yapılan ölçüm sonuçları Tablo 3.6'da, ön yüzeydeki çökme değerlerinin grafik gösterimi Şekil 3.25'te, arka yüzeydeki şişme değerleri ise Şekil 3.26'da görülmektedir.

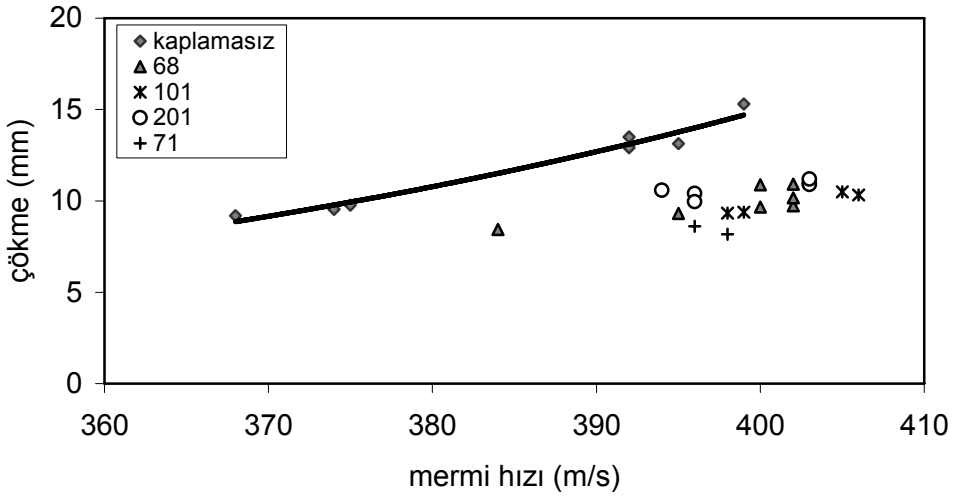
Tablo 3.6 ile birlikte Şekil 3.25 ve Şekil 3.26 incelendiğinde, kaplamaların neden olduğu balistik performans artışının ön yüzeydeki delinme ve arka yüzeydeki şişme miktarı açısından hemen hemen aynı seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır.

68F-NS-1 (kobalt, molibden, krom) ve 201NS (zirkonyum oksit) kaplama uygulanan levhalarda diğerlerinden farklı olarak bölgesel yüzey ayrılması görülmediğinden, tekrarlı çarpma yüklerinde daha etkin olarak kullanılmaları mümkün olabilecektir.

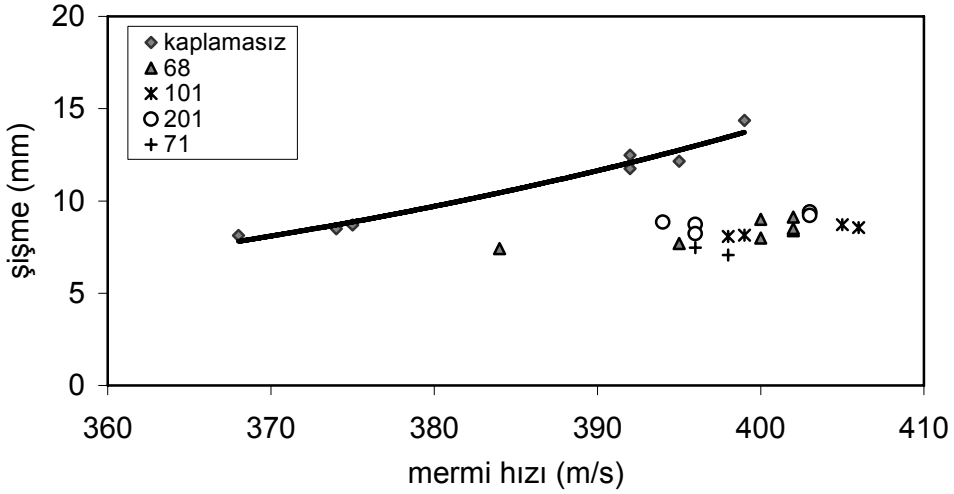
68F-NS-1 ile 201NS arasında bir karşılaştırma yapıldığında, 201NS kaplamalı levhalardaki delinme miktarının daha fazla olduğu, arka yüzeylerdeki yer değiştirmelerin ise aynı seviyelerde olduğu görülmektedir.

Tablo 3.6: 2. grup levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Kaplama (0.762 mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
2-38	kaplamasız	368	9.192	8.129
2-37		374	9.534	8.487
2-36		375	9.767	8.694
2-5		392	12.901	11.756
2-3		392	13.497	12.480
2-6		395	13.139	12.150
2-1		399	15.297	14.366
2-2		401	delindi	
2-7		401	delindi	
2-4		402	delindi	
2-13	68F-NS-1	384	8.435	7.420
2-9		395	9.308	7.700
2-10		400	9.652	7.990
2-16		400	10.889	8.998
2-14		402	9.729	8.390
2-12		402	10.163	8.502
2-15		402	10.913	9.126
2-20	101SF	398	9.324	8.065
2-18		399	9.379	8.140
2-19		405	10.490	8.707
2-17		406	10.317	8.565
2-28	201NS	394	10.591	8.849
2-26		396	10.415	8.725
2-30		396	9.950	8.224
2-27		403	10.904	9.396
2-29		403	10.965	9.331
2-25		403	11.205	9.208
2-33	71NS	396	8.618	7.468
2-34		398	8.170	7.072



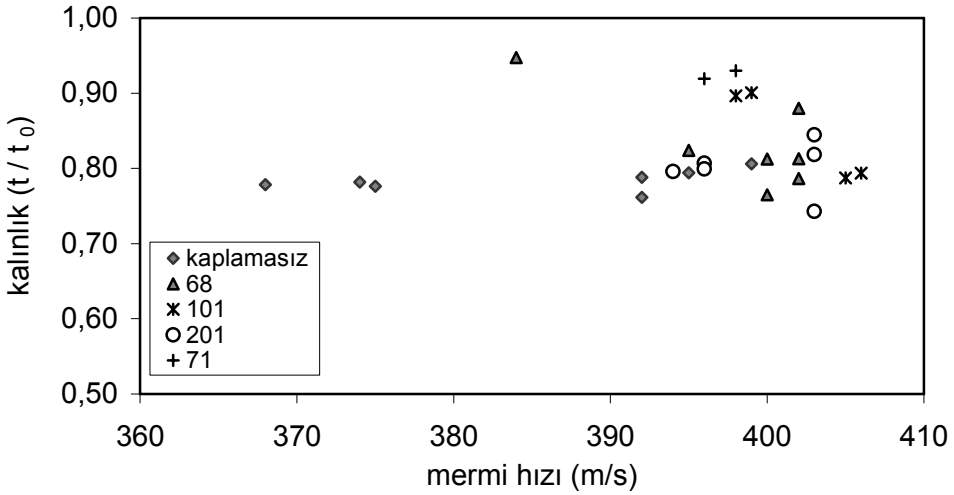
Şekil 3.25: 2. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri



Şekil 3.26: 2. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri

Ön yüzeydeki çökme ve arka yüzeydeki şişme miktarları arasındaki fark, merminin neden olduğu yapısal hasar konusunda da belirleyici olacaktır. Bu konuyu açıklamak amacıyla, şişme ve çökme miktarları arasındaki farklardan yola çıkılarak belirlenen, çarpma sonrasındaki levha kalınlığının, başlangıçtaki levha kalınlığına (alüminyum levha kalınlığı) bölünmesiyle boyutsuz hale getirilmiş değerleri Şekil 3.27'de görülmektedir.

Şekil 3.27'ye göre, kaplamasız levhalardaki kalınlık azalması, kaplamalı levhalara göre daha fazladır. Kaplamasız levhalarda, %20~30 arasında değişen oranlarda kalınlık azalması meydana gelirken, kaplamalı levhalarda bu oranın %20 veya daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.27: 2. grup levhalarda kalınlık değişimi

AA 2024 T351 levhaların hasar biçimleri incelendiğinde, arka yüzeydeki eğilmeyle birlikte oluşan yerel kırıkların kopmalara ve artan çarpma hızlarında delinmeye neden olduğu görülmektedir (Şekil 3.28). Bu durumu, parçalanma ile yapraklanma (petalling) birleşimi şeklinde bir hasar biçimi olarak tanımlamak mümkündür.



Şekil 3.28: 2. grup kaplamasız levhalarda hasar biçimleri

3.4.2.3 Üçüncü grup levhalara yapılan atışlar

Yapılan ön testlerle birlikte 1 ve 2. grup levhalara yapılan atışların sonuçlarından elde edilen bilgiler ışığında, AA 2024 T351 levhalardan hazırlanan son grup olan 6.35 mm kalınlığındaki 3. grup levhalara çeşitli hızlarda atışlar yapılmıştır.

Herhangi bir kaplama uygulanmamış levhalara yapılan atışların hızları 355~408 m/s arasında ölçülmüştür. Levhaların atışlar sonrasındaki görüntüleri Şekil 3.29'da görülmektedir.

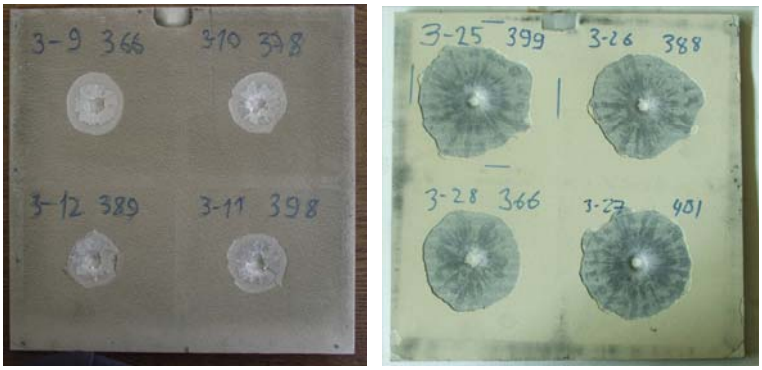
Yüzey kaplama işlemlerinin, levhaların balistik davranışlarına etkisini belirlemek amacıyla, kaplamalı levhalar üzerine atışlar, kovanlardaki barut miktarları değiştirilmek suretiyle, mümkün olduğunca benzer hız seviyelerinde tekrarlanmıştır (Şekil 3.30). Merminin levha içine girme ve arka yüzeydeki şişme miktarları, daha

önceki ölçümlerde olduğu gibi CD-CMM cihazı kullanılarak elde edilmiş ve değerler karşılaştırılmıştır.

101SF (Gri Alümina) kaplamalı levhalara yapılan atışlarda, 1 ve 2'nci grup atış sonuçları ile paralel biçimde, kaplamaların geniş bir bölgede yüzeyden ayrıldıkları belirlenmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.29: 3. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri



a) b)

Şekil 3.30: 3. grup kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri
a) 68F-NS-1, b) 201NS



Şekil 3.31: 3. grup 101SF kaplamalı numunelerde, kaplama ayrılması

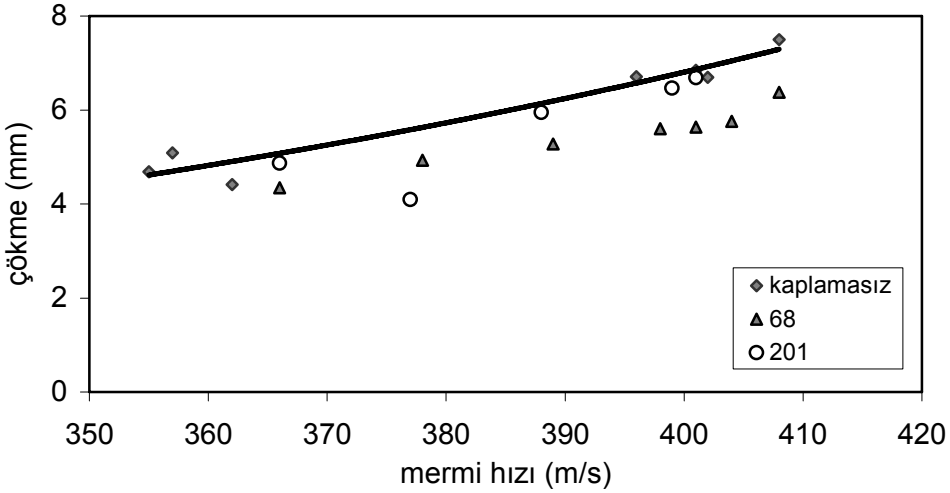
2. grup atışların da işaret ettiği gibi, uygulanan 71NS ve 101SF kaplamalarda ayrılmalar daha büyük bir bölgede, dört parçaya bölünmüş olan levhanın diğer

bölgelerine de taşacak şekilde ve tekrar atışa izin vermeyecek ölçüdedir. Dolayısıyla bu levhalarda ölçüm yapılamamıştır. 3. grup levhalarla yapılan atışlara ait sonuçlar Tablo 3.7'de sunulmuştur. 3D-CMM cihazı kullanılarak belirlenen, levha ön yüzündeki çökme (delinme) ve arka yüzündeki şişme miktarları Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te görülmektedir.

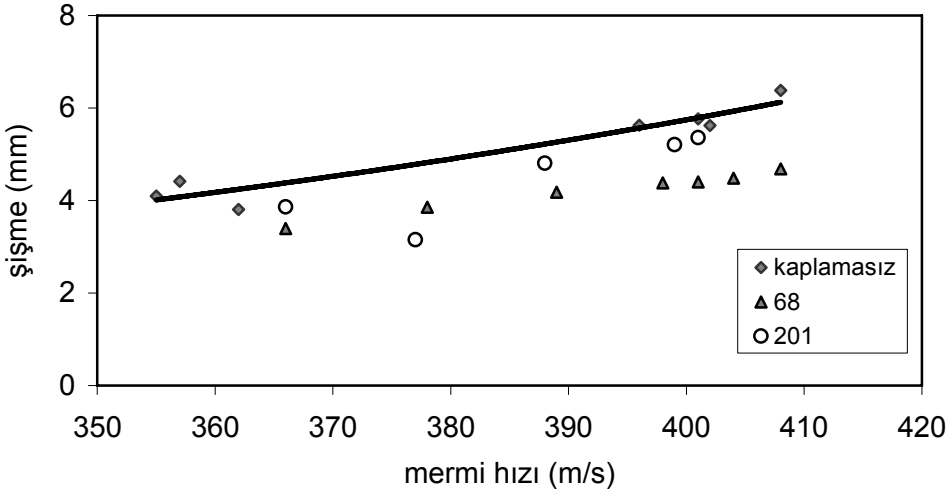
Tablo 3.7: 3. grup levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Kaplama (0.762 mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
3-2	kaplamasız	355	4.686	4.094
3-3		357	5.085	4.412
3-1		362	4.415	3.810
3-5		396	6.711	5.625
3-7		401	6.846	5.766
3-6		402	6.693	5.620
3-4		408	7.498	6.378
3-9	68F-NS-1	366	4.348	3.390
3-10		378	4.930	3.855
3-12		389	5.276	4.177
3-11		398	5.603	4.377
3-13		401	5.635	4.401
3-15		404	5.762	4.483
3-14		408	6.380	4.682
3-28	201NS	366	4.871	3.862
3-29		377	4.094	3.151
3-26		388	5.951	4.810
3-25		399	6.462	5.210
3-27		401	6.691	5.357

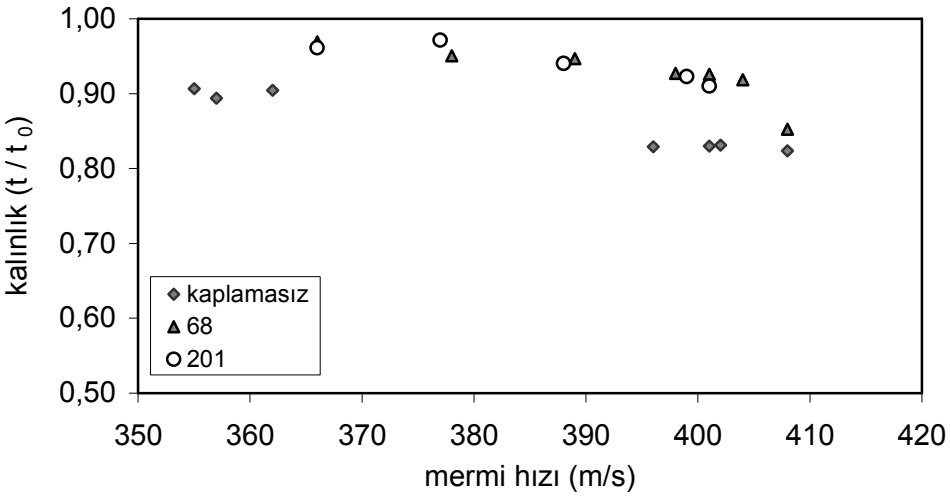
Çarpma hızlarına göre merminin levha içine girme miktarlarının gösterildiği Şekil 3.32 ve Şekil 3.33 incelendiğinde, 68F-NS-1 kaplamanın, 201NS kaplamaya oranla levhanın balistik davranışlarına daha fazla miktarda katkıda bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu etki mermi hızına bağlı olarak artmaktadır. Artan mermi hızlarında, 201NS kaplamalı levhada, hem çökme hem de şişme değerleri kaplamasız levhalarınkine yaklaşmaktadır. Çarpma noktasında, atışlar sonundaki levha kalınlıklarının başlangıçtaki levha kalınlığına bölünmesi ile elde edilen boyutsuz kalınlık değerlerini gösteren Şekil 3.34'e göre, kaplamalı levhalarda daha fazla kalınlık değişimi (incelme) görülmektedir. Mermi hızı arttıkça değerler düşmekte, yani levhada incelme ve dolayısıyla delinme süreci başlamaktadır.



Şekil 3.32: 3. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri



Şekil 3.33: 3. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri



Şekil 3.34: 3. grup levhalarda kalınlık değişimi

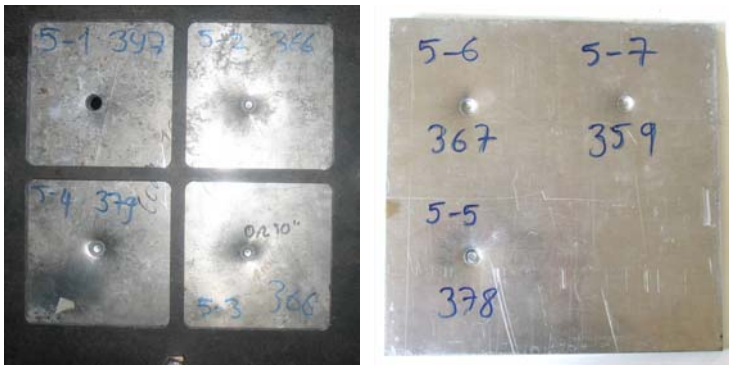
Şimdiye kadar yapılan atışların tamamından elde edilen bilgiler ışığında, bundan sonraki örneklerde 71NS ve 101SF kaplamalı levhalar incelemelerin dışına alınmıştır.

AA 2024 T351 levhaların balistik davranışlarının belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen 1, 2 ve 3. grup atışların sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; 4.00 mm kalınlığındaki 2. grup levhaların yapılan atışlarda tamamen delindiği, 4.80 mm kalınlığındaki 2. grup levhaların ise 400 m/s üzerindeki mermi hızlarında delindiği belirlenmiştir. Bu verilerden hareketle, 4.80 mm kalınlığındaki AA 6061 T4 (4. grup) ve 4.00 mm kalınlığındaki AA 7075 T651 (7. grup) levhaların balistik koruma sağlayamayacağı öngörüsüyle, bundan sonraki atış testlerinde kullanılmamaları uygun olacaktır. Ayrıca, 71NS ve 101SF kaplamaların uygulandığı levhalara yapılan atışlarda, büyük bir bölgede, levhanın balistik yönden yeniden kullanılmasını engelleyecek seviyede kaplamaların kalktığı gözlenmiş, daha sonraki atışlarda bu kaplamaların uygulandığı levhaların kullanılmamasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

3.4.2.4 Beşinci grup levhalara yapılan atışlar

6.35 mm kalınlığındaki AA 6061 T651 levhalarla (5. grup) gerçekleştirilen atışlarda, kaplamasız levhalarda 397 m/s hızda delinme saptanmıştır (Şekil 3.35). 378 m/s hızdaki atış ise levhanın arka yüzeyinde tabaksı kopmaya (disking) neden olmuştur (Şekil 3.36).

Delinmeyle sonuçlanan 397 m/s mermi hızının ölçüldüğü atışta, mermi çarpma bölgesinde mükemmele yakın bir delik oluşturmuştur. Delinmeye yakın bir hasarın görüldüğü 378 m/s mermi hızındaki atış sonucunda da benzer şekilde, levhadan kopmak üzere olan parçanın silindir şeklinde olduğu görülmektedir. (Şekil 3.37). Bu hasara biçimine, mermi ile levha arasındaki temas bölgesi sınırlarında oluşan kayma gerilmeleri neden olmaktadır. AA 6061 T651 levhaların, daha önce testleri yapılmış olan AA 2024 T351 levhalara göre daha sünek yapıda oluşu nedeniyle, baskın hasar biçimleri arasında, beklendiği şekilde belirgin bir biçim farkı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.35: 5. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri (ön yüz)



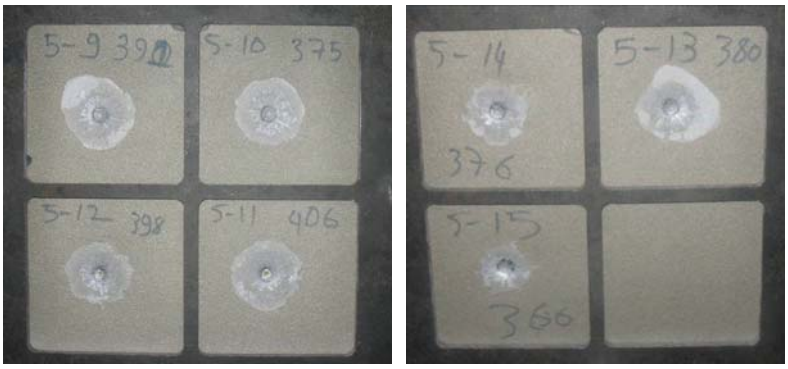
Şekil 3.36: 5. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüsü (arka yüz)



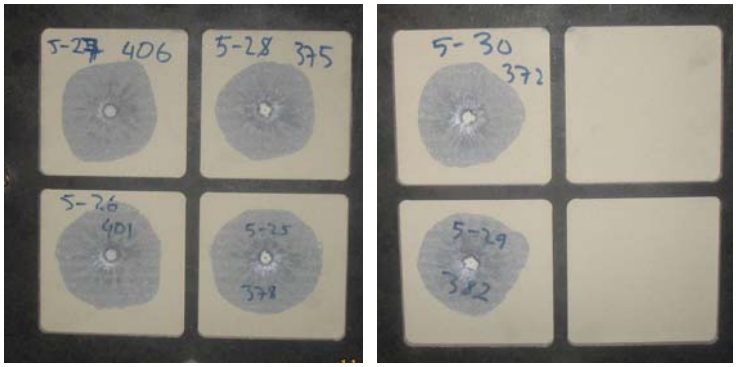
Şekil 3.37: 5. grup levhalarda hasar biçimi

68F-NS-1 (Şekil 3.38) ve 201NS (Şekil 3.39) kaplama uygulamalarının, levhaların balistik dayanımına etkisini belirlemek üzere yapılan atışlarda, kaplamasız durumda delinmenin görüldüğü hız seviyelerinde, mermi levha içinde durmuştur.

Kaplamalı levhalara yapılan atışlar sonucunda, daha önce yapılmış olan atışlarda olduğu gibi, çarpma bölgesindeki kaplamalarda farklı büyüklüklerde ayrılmalar gözlenmiştir. Bu ayrılma bölgesi 201NS kaplamalı levhalarda, 68F-NS-1 kaplamalı levhalara oranla daha geniştir.



Şekil 3.38: 5. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri



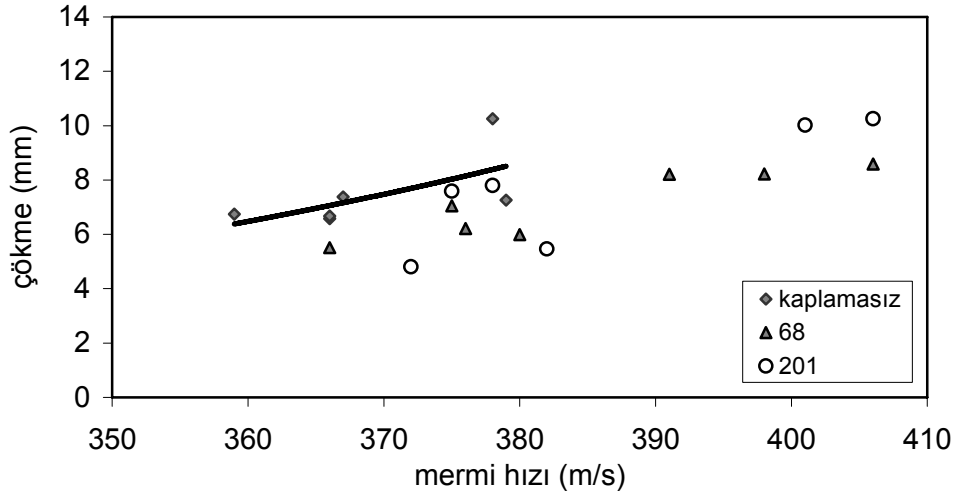
Şekil 3.39: 5. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

Bu gruba ait atışlar sonunda, levhaların ön ve arka yüzeylerinde, 3D-CMM cihazı kullanılarak yapılan çökme ve şişme miktarlarına yönelik ölçümler Tablo 3.8'de görülmektedir. 5-5 numaralı (mermi hızı 378 m/s) atışa ait değerlerin diğerleri ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu atışta, levha delinmeye yakın biçimde hasara uğramıştır (Şekil 3.37).

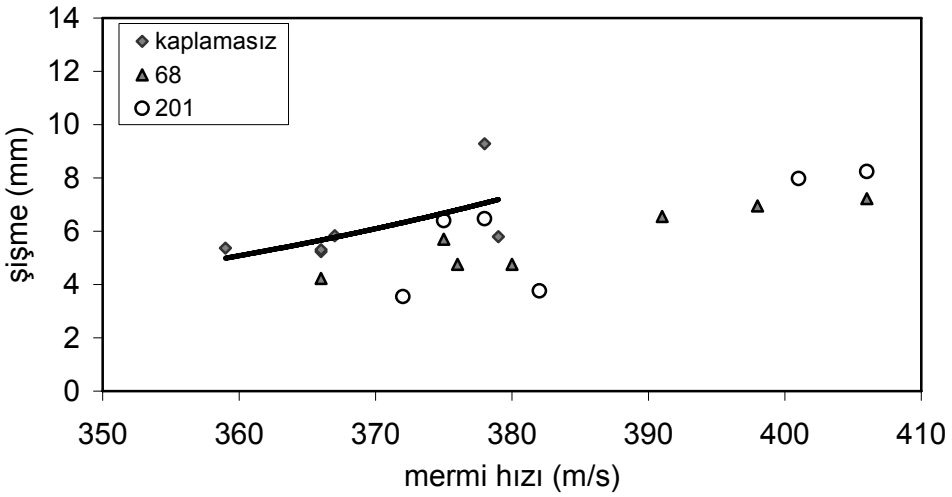
5. grup levalar kullanılarak gerçekleştirilen atışlara ait ölçüm sonuçlarını grafik halde gösteren Şekil 3.40 ve Şekil 3.41 incelendiğinde, çökme ve şişme karakteristiklerinin birbirlerine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Kaplama uygulanmamış olan levhalar 375~380 m/s civarındaki mermi hızlarında delinirken, kaplama uygulanmış levhaların 405 m/s üzerinde mermiyi tutabildiği anlaşılmaktadır. Burada, her iki kaplama uygulamasında da levhanın balistik sınırını artıran ve birbirlerine yakın seviyelerde katkılar gözlenmiştir. 68F-NS-1 kaplamalı levhalardaki çökme ve şişme değerleri daha düzgün bir dağılım göstermektedir.

Tablo 3.8: 5. grup levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Kaplama (0.762 mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
5-7	kaplamasız	359	6.738	5.365
5-3		366	6.582	5.238
5-2		366	6.672	5.305
5-6		367	7.375	5.838
5-5		378	10.248	9.280
5-4		379	7.263	5.797
5-1		397	delindi	
5-15	68F-NS-1	366	5.510	4.230
5-10		375	7.046	5.703
5-14		376	6.212	4.757
5-13		380	5.986	4.757
5-9		391	8.215	6.555
5-12		398	8.227	6.945
5-11		406	8.580	7.221
5-30	201NS	372	4.807	3.550
5-28		375	7.585	6.397
5-25		378	7.798	6.472
5-29		382	5.456	3.756
5-26		401	10.023	7.971
5-27		406	10.252	8.237

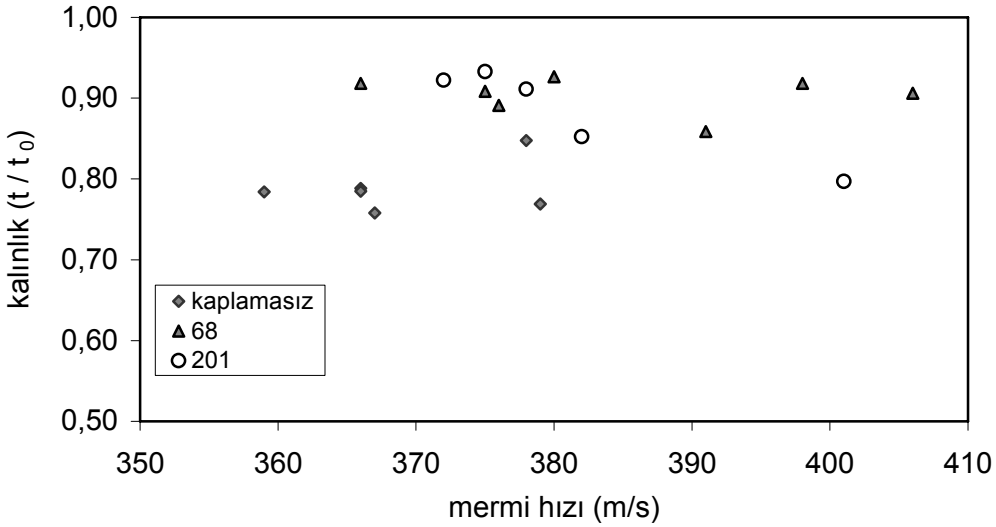


Şekil 3.40: 5. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri



Şekil 3.41: 5. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri

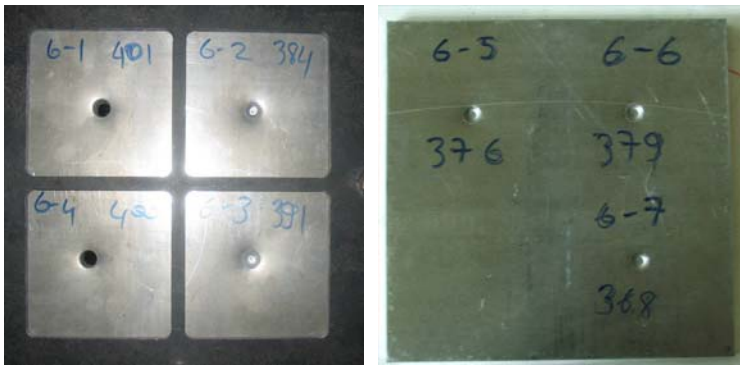
Mermi çarpma bölgesinde meydana gelen boyutsuz kalınlık değerleri Şekil 3.42'de görülmektedir. 5. grup atışlar sonunda çarpma bölgesindeki boyutsuz kalınlık değişimi oranları incelendiğinde, daha önce yapılmış olan atışlara benzer şekilde, kaplamalı levhalardaki kalınlık değişiminin daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.42: 5. grup levhalarda kalınlık değişimi

3.4.2.5 Altıncı grup levhalara yapılan atışlar

Herhangi bir kaplama uygulanmamış, 8.00 mm kalınlığındaki AA 6061 T651 levhalarla (6. grup) yapılan atışlarda 368~401 m/s arasında hızlar ölçülmüş, 400 m/s üzerindeki mermi hızlarında levhanın delindiği görülmüştür (Şekil 3.43).



Şekil 3.43: 6. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

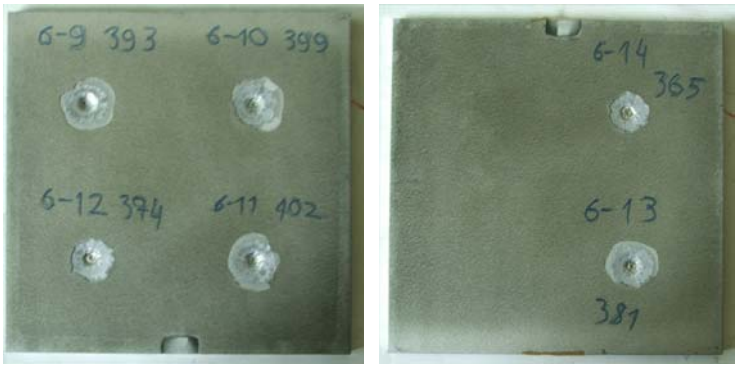
6.35 mm kalınlığındaki 5. grup atışlarda olduğu gibi, 8.00 mm kalınlığındaki 6. grup AA 6061 T651 levhalardaki hasar biçimleri, özellikle delinmeyle sonuçlanan atışlarda belirgin olarak tabaksı parçanın levhadan kopması şeklinde gözlenmektedir (Şekil 3.44).



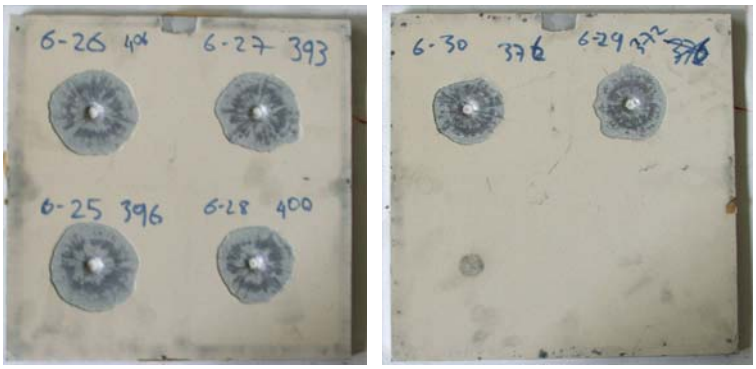
Şekil 3.44: 6. grup levhalarda hasar biçimi

Daha önce de belirtildiği gibi, bu hasar biçimine mermi ile levha arasındaki temas bölgesi sınırlarındaki kayma gerilmeleri neden olmaktadır.

Metco 68F-NS-1 ve 201NS kaplamalı levhalara yapılan atışlarda ise kaplamasız durumda delinme olan hız seviyelerinde, mermi levha içinde durmuştur (Şekil 3.45, Şekil 3.46).



Şekil 3.45: 6. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri



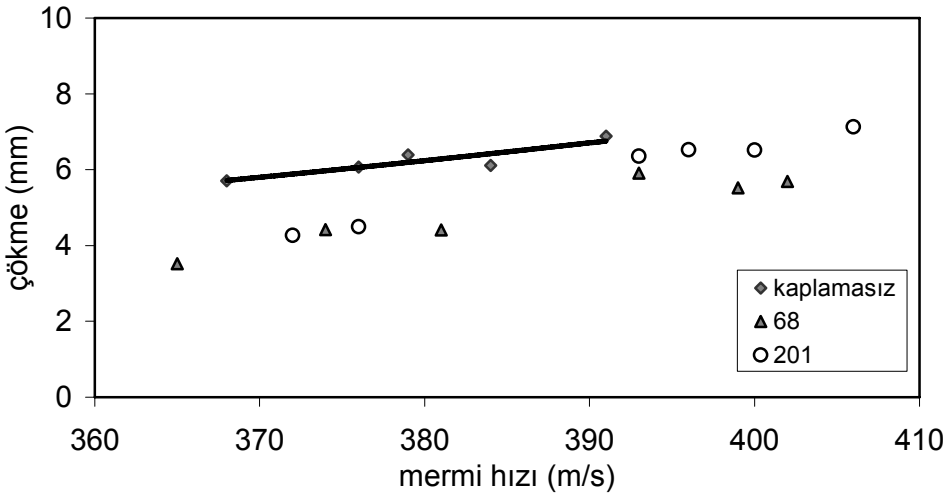
Şekil 3.46: 6. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

Çarpma sonucunda, kaplamalarda ayrılmalar gözlenmiştir. Bu gruptaki atışlarda, kaplama ayrılması görülen bölgenin genişliğiyle, levhanın balistik dayanımı arasında bir ilişki göze çarpmaktadır.

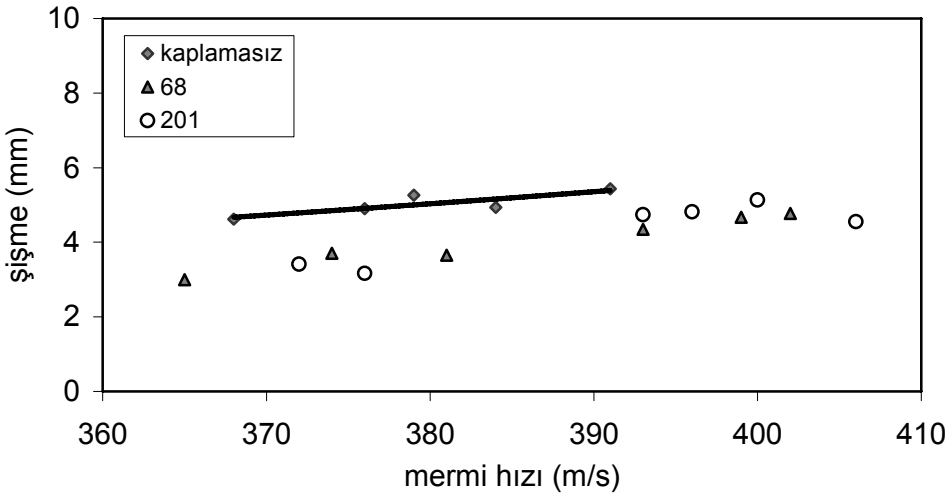
Bu gruba ait atışlar sonunda, levhaların ön ve arka yüzeylerinde, 3D-CMM cihazı kullanılarak yapılan çökme ve şişme miktarlarına yönelik ölçümler Tablo 3.9'da görülmektedir. Bu değerlerin grafik haldeki gösterimi Şekil 3.47 ve Şekil 3.48'dedir.

Tablo 3.9: 6. grup levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Kaplama (0.762 mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
6-7	kaplamasız	368	5.704	4.616
6-5		376	6.066	4.905
6-6		379	6.390	5.259
6-2		384	6.113	4.932
6-3		391	6.884	5.429
6-4		400	delindi	
6-1		401	delindi	
6-14	68F-NS-1	365	3.520	2.993
6-12		374	4.416	3.703
6-13		381	4.408	3.656
6-9		393	5.907	4.342
6-10		399	5.526	4.667
6-11		402	5.692	4.774
6-29	201NS	372	4.267	3.409
6-30		376	4.494	3.162
6-27		393	6.354	4.742
6-25		396	6.520	4.812
6-28		400	6.517	5.136
6-26		406	7.130	4.549



Şekil 3.47: 6. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri



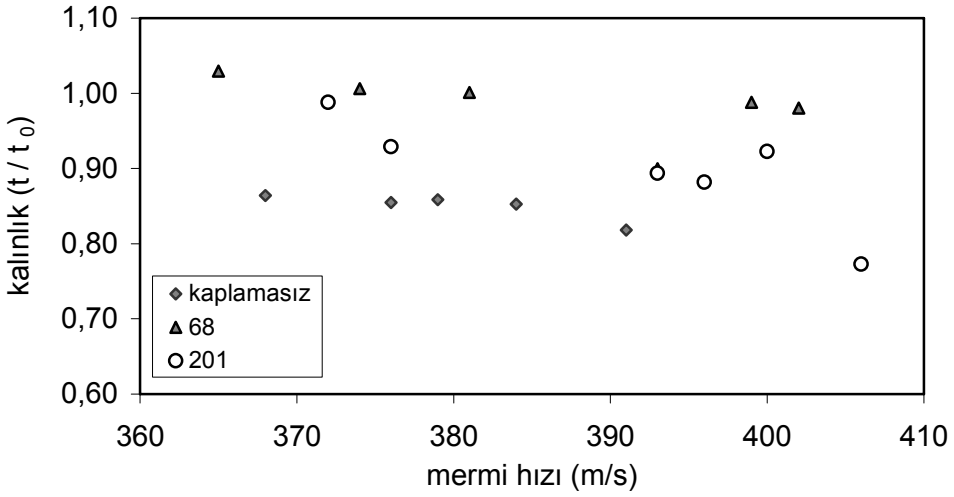
Şekil 3.48: 6. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri

Levhalarda oluşan çökme değerleri açısından bir değerlendirme yapıldığında, genel olarak kaplamalı levhalardaki delinme miktarının, kaplamasız levhalara göre daha düşük olduğu ve 68F-NS-1 ile 201NS kaplamalı levhalar karşılaştırıldığında, 68F-NS-1 kaplamadaki çökme değerlerinin bir miktar daha az olduğu anlaşılmaktadır.

Atışlar sonucunda, levha arka yüzeylerindeki şişme miktarları, her iki kaplama uygulamasının bu açıdan balistik dayanıma katkı sağladığını göstermektedir.

Levhalarda, atışlar sonundaki kalınlık değerlerinin, başlangıçtaki levha kalınlığına bölünerek boyutsuzlaştırılmış değerlerini gösteren Şekil 3.49 incelendiğinde, diğer atışlarda olduğu gibi, kaplamalı levhalardaki kalınlığın daha az değiştiği görülmektedir. Burada, 68F-NS-1 kaplamalı levhalardaki kalınlık değişiminin

özellikle düşük hızlarda 1'in küçük bir miktar üzerinde olduğu dikkat çekmektedir. Çarpma sonrasında, kaplama malzemesinin de merminin uç kısmıyla birlikte levha çarpma bölgesine yapışması nedeniyle kalınlıkta bir artışa neden olduğu, dolayısıyla alüminyum levha kalınlığının, başlangıçtaki seviyesini büyük oranda koruduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.49: 6. grup levhalarda kalınlık değişimi

3.4.2.6 Yedinci grup levhalara yapılan atışlar

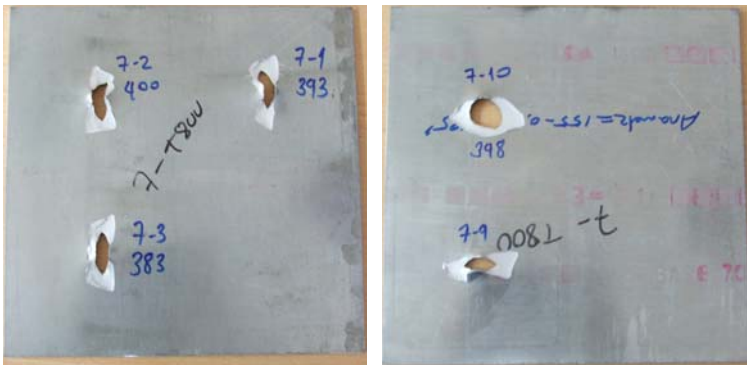
4.00 mm kalınlığındaki AA 7075 T651 levhalara yapılan atışların hızları 393~400 m/s arasında ölçülmüş, atışların tamamında levhalar delinmiştir (Şekil 3.50).

Bu kalınlıktaki levhalara yapılacak atışlarda delinmenin gerçekleşeceğine dair beklentiden daha önceki paragraflarda söz edilmişti. Burada, levhalarda daha öncekilerden farklı olarak, kırılma şeklinde deliklerin oluşması ve levhanın arka yüzeyindeki kırılma bölgesinin daha geniş olması dikkat çekicidir (Şekil 3.51).



a) b)

Şekil 3.50: 7. grup levhaların atışlardan sonraki görüntüleri a) kaplamasız, b) 68F-NS-1 kaplamalı



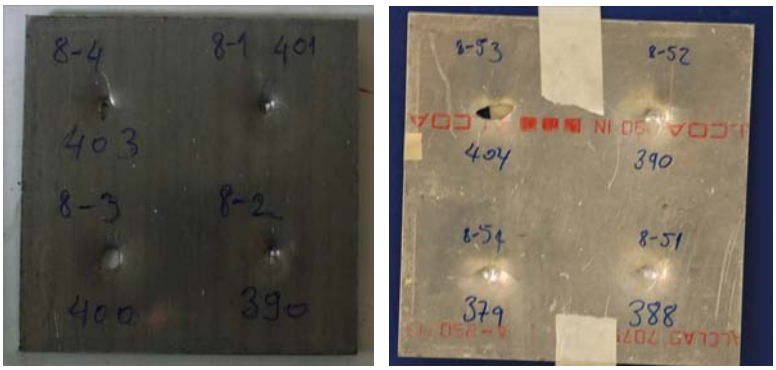
a) b)

Şekil 3.51: 7. grup levhaların arka yüzeylerinin atışlar sonundaki görüntüleri
a) kaplamasız, b) 68F-NS-1 kaplamalı

Bu noktada, 7075 alüminyum alaşımın malzeme özellikleri dikkate alındığında, sahip olduğu yüksek mukavemet yanında, kopma uzamasının düşük oluşu, yani daha kırılgan bir yapıda oluşu nedeniyle bu sonucun ortaya çıktığını söylemek mümkündür.

3.4.2.7 Sekizinci grup levhalara yapılan atışlar

Bu gruptaki ilk atışlar, 4.80 mm kalınlığındaki kaplamasız AA 7075 T651 levhalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.52).



Şekil 3.52: 8. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

Atışlarda, 379~404 m/s arasında mermi hızları ölçülmüş, 400, 403 ve 404 m/s mermi hızlarındaki atışlar delinme ile sonuçlanmıştır. Levhalarda, delinme ile birlikte oluşan hasar çarpma merkezinden daha geniş bir alanda oluşan kırılmalar şeklindedir (Şekil 3.53).



Şekil 3.53: 8. grup kaplamasız levhaların arka yüzlerinde oluşan kırıklar

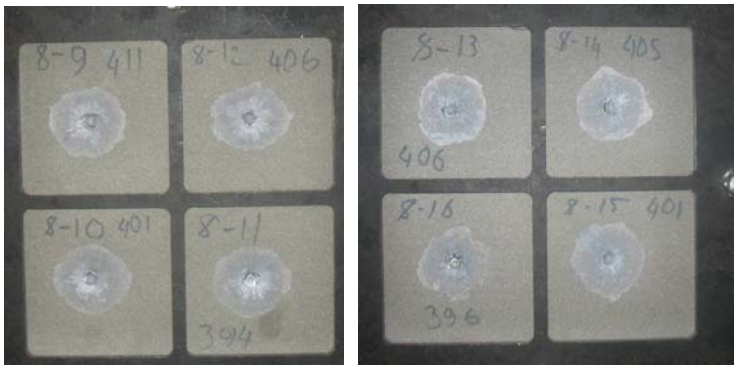
Çarpan merminin levhadan kırılma şeklinde kopardığı parçalar incelendiğinde, hasarın delinme şeklinde gerçekleşmediği, çarpma bölgesi civarında, fakat mermi iz bölgesinin dışında yoğunlaşan gerilmelerin kırılma nedeniyle hasar meydana getirdiği belirgin biçimde görülmektedir (Şekil 3.54).



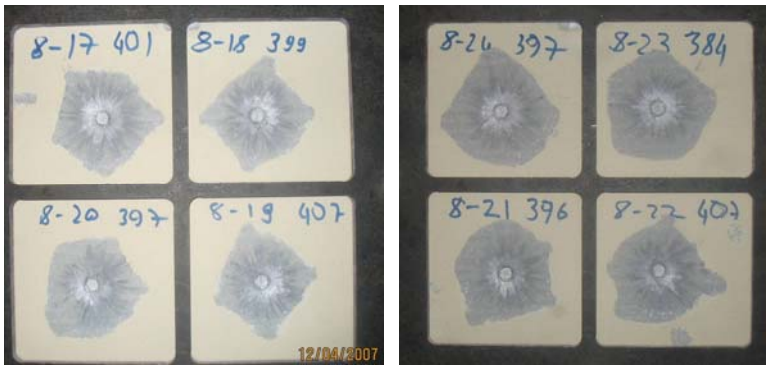
Şekil 3.54: 8. grup kaplamasız levhalardan kopan parça (atış no:8-3)

Metco 68F-NS-1 ve 201NS kaplamalı levhalardaki atışlarda ise 384~411 m/s arasında hızlar ölçülmüştür. Bu atışların tamamında mermi levha içinde kalmıştır (Şekil 3.55, Şekil 3.56).

8. grup atışlar sonunda, levhaların ön ve arka yüzeylerinde 3D-CMM cihazı kullanılarak elde edilen çökme ve şişme değerleri Tablo 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.55: 8. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

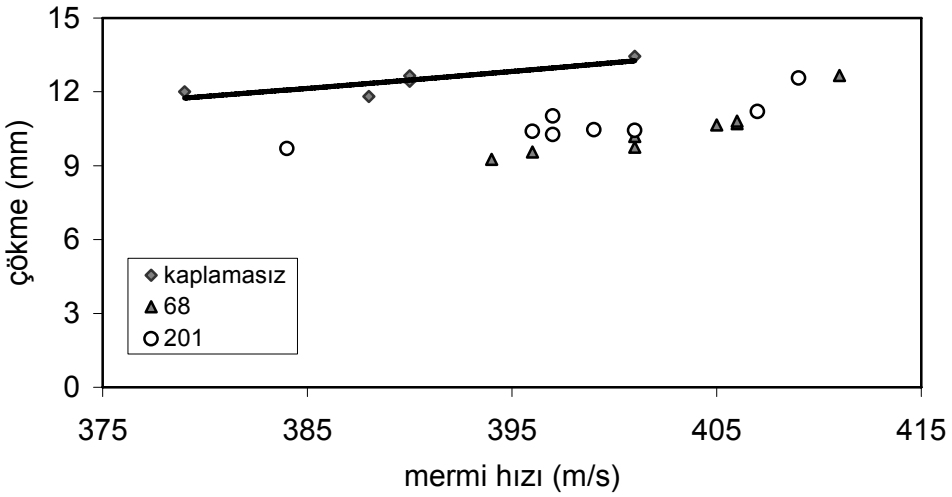


Şekil 3.56: 8. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

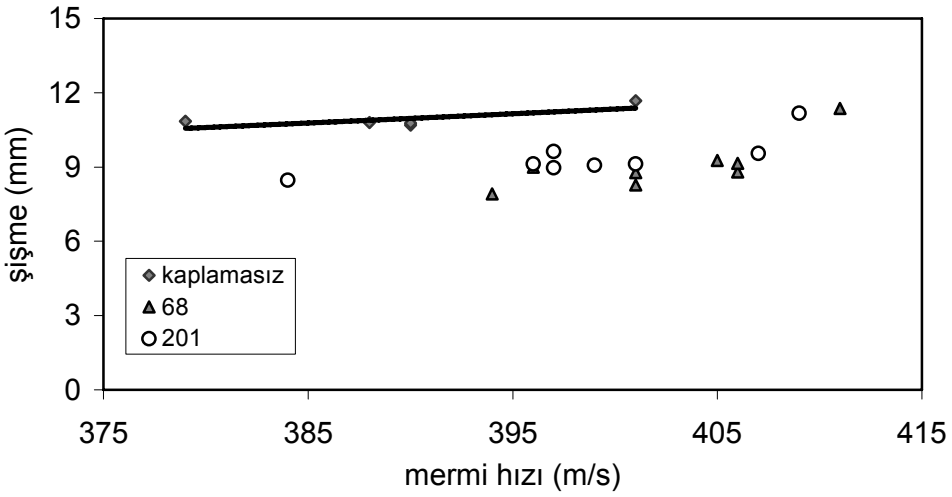
Tablo 3.10: 8. grup levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Kaplama (0.762 mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
8-54	kaplamasız	379	12.002	10.848
8-51		388	11.810	10.795
8-52		390	12.430	10.691
8-2		390	12.652	10.775
8-3		400	delindi	
8-1		401	13.441	11.670
8-4		403	delindi	
8-53		404	delindi	
8-11	68F-NS-1	394	9.260	7.908
8-16		396	9.551	8.999
8-10		401	9.754	8.274
8-15		401	10.190	8.774
8-14		405	10.653	9.266
8-12		406	10.703	8.806
8-13		406	10.817	9.154
8-9		411	12.670	11.367
8-23	201NS	384	9.697	8.463
8-21		396	10.394	9.120
8-24		397	10.269	8.970
8-20		397	11.025	9.621
8-18		399	10.459	9.073
8-17		401	10.430	9.120
8-19		407	11.207	9.549
8-22		409	12.564	11.172

Bu değerlerden, ön yüzeydeki çökme miktarının grafik olarak gösterildiği Şekil 3.57 ve arka yüzeydeki şişme miktarının gösterildiği Şekil 3.58 incelendiğinde, her iki grafiğin de birbirlerine yakın dağılımlar gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.57: 8. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri



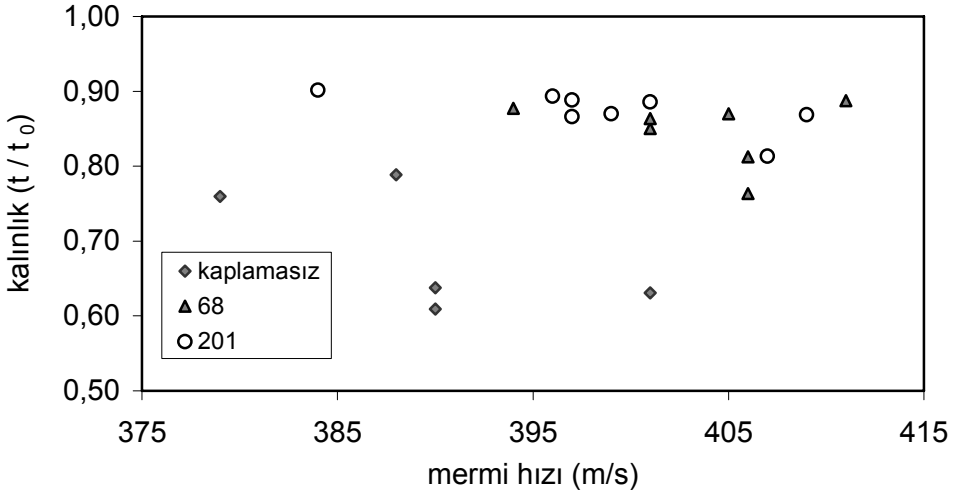
Şekil 3.58: 8. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri

Levha ön yüzlerinde oluşan çökmeler açısından, 68F-NS-1 kaplamalı levhalar bir miktar daha üstün olmak üzere, genel olarak kaplamalı levhalarda bir performans artışından söz etmek mümkündür.

Benzer durum, arka yüzeylerdeki şişme miktarları için de geçerlidir. Kaplama uygulanmış levhalarda görülen çarpma dayanımı artışı, 68F-NS-1 kaplamalı levhalarda bir miktar daha fazladır.

Çarpma noktasında (ölçüm yapılan nokta) levha kalınlığındaki değişim incelendiğinde, kaplamasız levhalar için değerlerin 0.75 civarında ve önceki atışlardan daha düşük oldukları anlaşılmaktadır (Şekil 3.59). Kaplamasız levhalarda, 390 m/s üzeri hızlarda kalınlık azalması daha fazla olmaktadır. Kaplamalı

levhalardaki kalınlık değişimleri dikkate alındığında, kaplama uygulamasının balistik etkinliğe katkısı belirgin biçimde görülmektedir.



Şekil 3.59: 8. grup levhalarda kalınlık değişimi

3.4.2.8 Dokuzuncu grup levhalara yapılan atışlar

Kaplama uygulanmamış 6.35 mm kalınlığındaki AA 7075 T651 levhalarla (9. grup) yapılan atışlarda, 404~441 m/s arasında hızlar ölçülmüştür (Şekil 3.60).

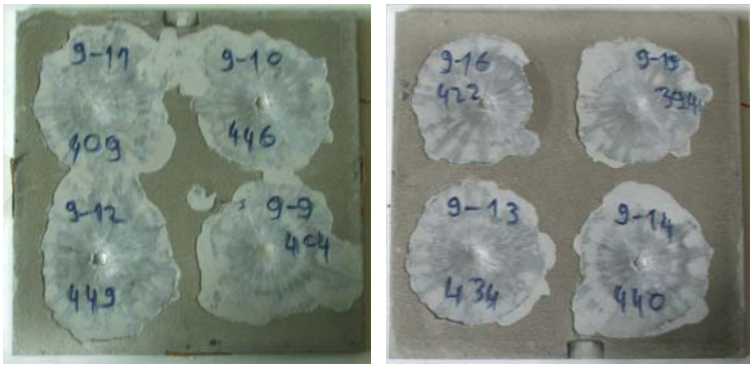
Bu atışlardan, 425 m/s üzerindeki mermi hızlarında, mermiler levha içinde kalmakla beraber, levha arka yüzeylerinde delinmeye yakın yırtılmalar saptanmıştır. AA 7075 T651 levhalar bu çalışma kapsamında incelenen alüminyum alaşımlar arasında mukavemeti en yüksek, fakat aynı zamanda en kırılgan olandır. Dolayısıyla, mermi hızı arttıkça levhada delinmeye neden olacak olan hasar biçimi kırılma, yapraklanma (petalling) veya ikisinin birleşimi şeklinde olacaktır.



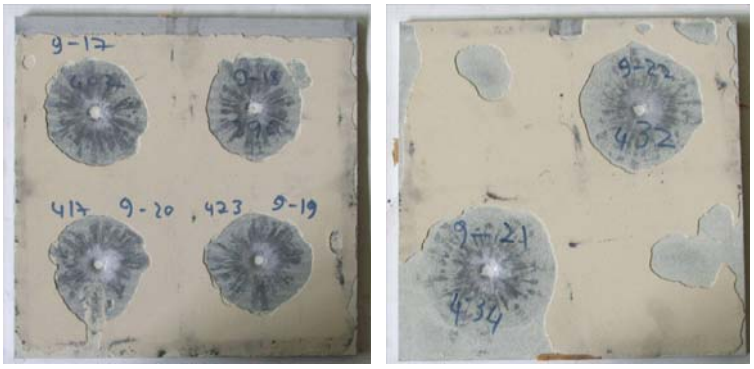
Şekil 3.60: 9. grup kaplamasız levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

Bununla birlikte, daha önce yapılmış olan testlerden elde edilen bilgiler ışığında, yeterli kalınlıkta kullanıldıklarında en yüksek balistik dayanım özelliği sunacak olan gruptur.

Bu grupta, 68F-NS-1 (Şekil 3.61) ve 201NS (Şekil 3.62) kaplamalı levhalara yapılan atışlarda ise kaplamasız durumda levhanın delinmek üzere olduğu gözlenen hız seviyelerinden (425 m/s) daha yüksek hızlarda (449 m/s), mermi levha içinde durmuştur. Bu atışlarda, daha önceki gruplara kıyasla hız seviyelerinin de yüksek oluşu nedeniyle, kaplamalarda daha geniş bir bölgede ayrılmalar tespit edilmiştir.



Şekil 3.61: 9. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri



Şekil 3.62: 9. grup 201NS kaplamalı levhaların atışlardan sonraki görüntüleri

Bu ayrılmalar çoklu atış fikstürü yardımıyla dört parçaya ayrılmış olan levhaların bir bölümüne yapılan atışlar sonucunda, özellikle artan mermi hızlarında, diğer bölümlerde de görülmektedir. Çoklu atış fikstürü her ne kadar levhayı birbirinden bağımsız dört küçük parçaya ayıracak sınır şartlarını oluştursa da çarpmanın etkisiyle yayılmaya başlayan gerilme dalgaları sadece yüzeyde değil, katı metal içinde de ilerlemeye devam ettiklerinden, atış yapılan bölüm dışında kaplama ayrılmasına rastlanması, özellikle yüksek mermi hızlarında beklenebilecek bir durumdur.

9. grupta yapılan atışlara ait sonuçlar Tablo 3.11'de görülmektedir.

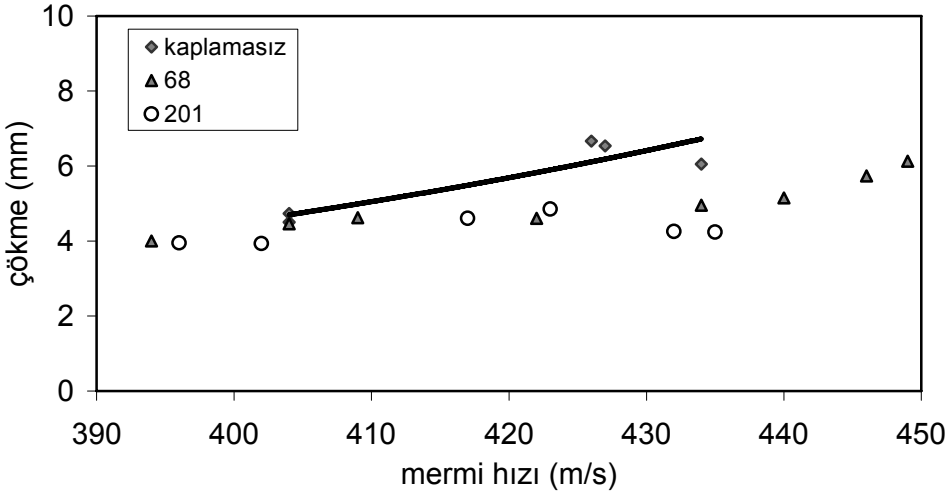
Tablo 3.11: 9. grup levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Kaplama (0.762 mm)	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
9-1	kaplamasız	404	4.502	3.909
9-2		404	4.732	4.109
9-5		426	6.663	6.125
9-6		427	6.539	5.874
9-7		413	5.718	5.081
9-4		434	6.048	5.267
9-8		434	7.423	6.886
9-3		441	6.550	5.796
9-15	68F-NS-1	394	4.004	2.979
9-9		404	4.460	3.399
9-11		409	4.625	3.634
9-16		422	4.602	3.897
9-13		434	4.953	4.203
9-14		440	5.146	4.487
9-10		446	5.733	4.873
9-12		449	6.130	5.312
9-18	201NS	396	3.949	3.258
9-17		402	3.933	3.386
9-20		417	4.602	3.962
9-19		423	4.851	4.147
9-22		432	4.253	3.720
9-21		435	4.238	3.639

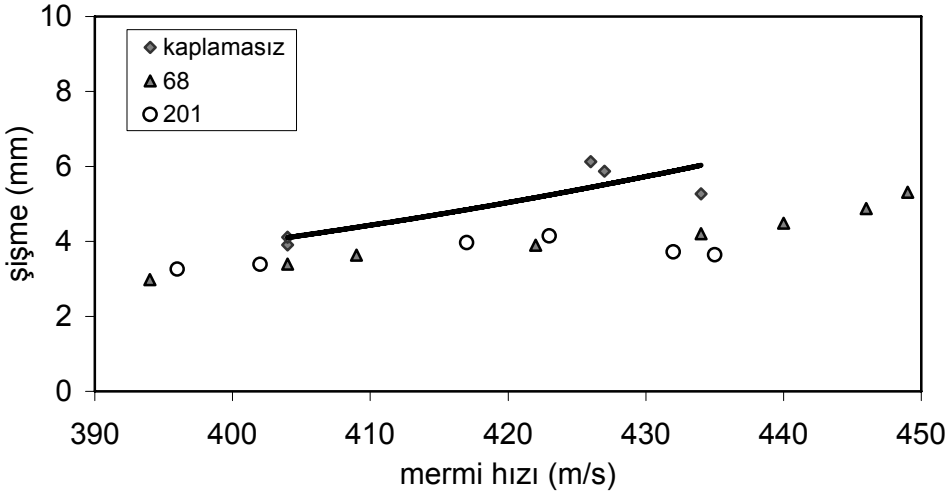
3D-CMM cihazı ile yapılan ölçümlerden elde edilen, ön yüzeydeki çökme miktarlarının grafik olarak gösterimi Şekil 3.63'tedir. Şekil 3.63 incelendiğinde, uygulanan kaplamaların ön yüzeydeki delinme miktarı açısından levhanın balistik dayanımına etkileri görülmektedir. Bu etki, her iki kaplama türü (68F-NS-1 ve 201 NS) için yaklaşık olarak birbirlerine yakın seviyelerde olup, mermi hızlarındaki artışla birlikte artmaktadır.

Çökme miktarı için gözlenen durum, arka yüzeydeki şişmeler için de benzer şekildedir (Şekil 3.64). Kaplamaların levha arka yüzeyindeki şişme miktarlarına olumlu etkileri, birbirleri ile yaklaşık olarak aynı seviyelerdedir.

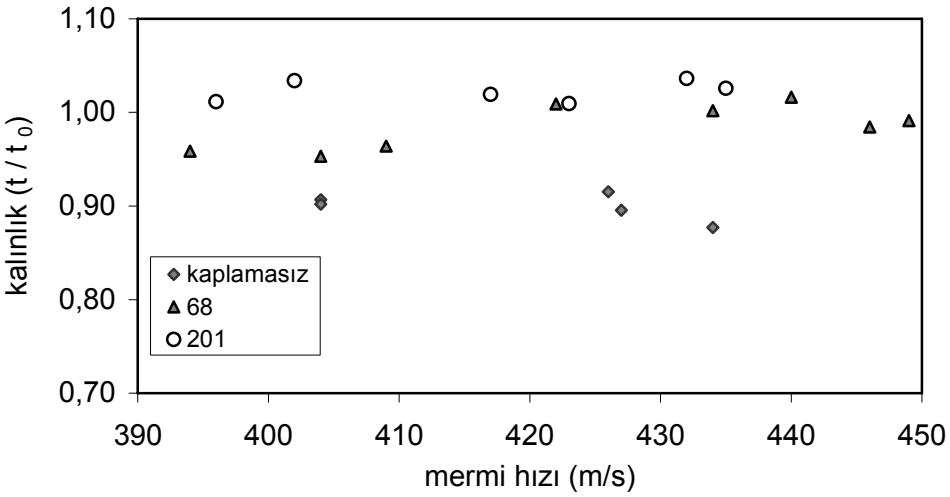
9. grup atışlar için, çarpma noktasında levhanın boyutsuz kalınlıklarındaki değişim miktarları Şekil 3.65'tedir.



Şekil 3.63: 9. grup levhalarda ön yüzeydeki çökme değerleri



Şekil 3.64: 9. grup levhalarda arka yüzeydeki şişme değerleri



Şekil 3.65: 9. grup levhalarda kalınlık değişimi

Şekil 3.65 incelendiğinde, tüm değerlerin daha önceki sonuçlardan daha yüksek oldukları görülmektedir. 201 NS kaplamalı levhalardaki değerler, 6. grup atış sonuçlarına benzer şekilde 1'in hafif üzerindedir.

3.5 Arka Destek Katmanlı Levhalara Yapılan Atışlar

Zırh teknolojileri ile ilgili gelişmeler paralelinde ortaya çıkan önemli bir kavram da tümleşik zırhtır. Tümleşik zırhlarda, merminin uç şeklini bozarak delicilik özelliğini azaltacak bir ön katmanın ve kalan kinetik enerjisini sönümleyecek bir arka katman kullanılmasıyla merminin zırh içinde durdurulması amaçlanmaktadır.

Bu noktadan hareketle, atışlarda kullanılan bazı levhaların arkalarına konan polietilen destek katmanlarının balistik dayanıma etkileri incelenmiştir. Destek katmanlı atışlar için 2 (AA2024T351, 4.80 mm) ve 8. (AA 7075 T651, 4.80 mm) grup levhalar kullanılmıştır.

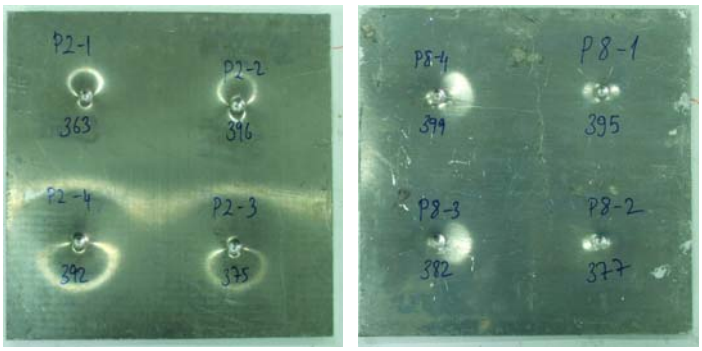
Destek katmanını oluşturmak için 250x250 mm ölçülerinde hazırlanan polietilen kumaşlar 120°C sıcaklığa çıkartılarak 20 dakika süreyle bu sıcaklıkta tutulmuştur. 14 adet tabaka, [0/90] konumlandırma açılarında yerleştirilerek 250 ton basınç altında sıkıştırılmışlar, daha sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır. Bu işlem sonucunda, 4.00 mm kalınlığındaki destek katman olarak kullanılacak kompozit levhalar elde edilmiştir (Şekil 3.66).



Şekil 3.66: Destek katmanı olarak hazırlanan UHMWPE levha

2 ve 8. grup levhaların, arkalarına destek katmanı konularak gerçekleştirilen atışlar sonundaki görüntüleri Şekil 3.67'dedir.

Arka destek katmanlı levhalara yapılan atışlar neticesinde, 3D-CMM cihazı kullanılarak ölçülen çökme ve şişme değerleri Tablo 3.12'dedir.



a) b)

Şekil 3.67: Destek katmanlı levhaların, atışlardan sonraki görüntüleri
a) 2. grup, b) 8. grup

Tablo 3.12: UHMWPE destek katmanlı levhalara yapılan atış sonuçları

Test No	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)	Şişme (mm)
P2-1	363	8.171	7.056
P2-3	375	8.760	7.579
P2-5	380	8.400	7.180
P2-4	392	9.637	8.325
P2-6	394	9.530	8.263
P2-2	394	10.329	8.826
P8-2	377	9.152	8.086
P8-3	382	9.592	8.518
P8-1	395	10.052	8.767
P8-4	399	11.010	9.645

Destek katmanının balistik dayanıma katkısının kaplama uygulamalarıyla karşılaştırılması bakımından, 2. grup levhalara yapılan tüm atışlar sonundaki çökme ve şişme değerlerini içeren grafikler Şekil 3.68'de sunulmuştur.

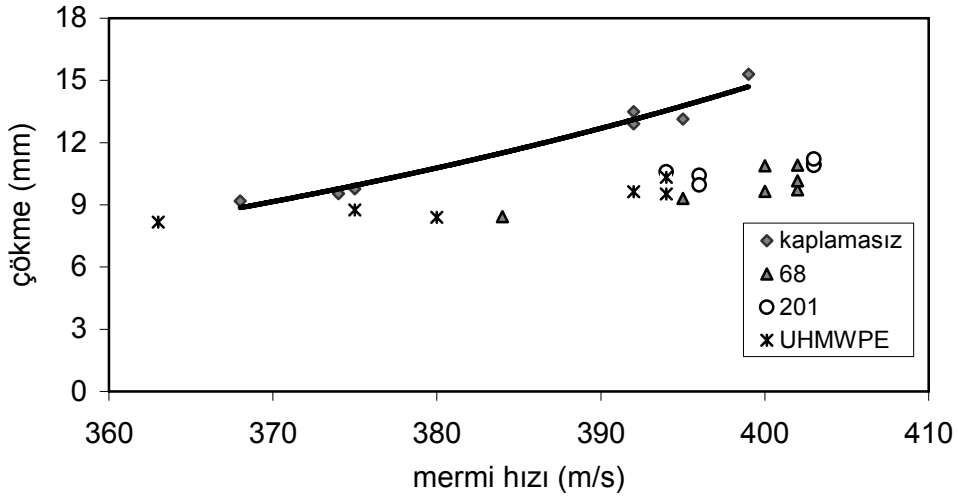
2. grup destek katmanlı levhalara yapılan atışlar sonunda ortaya çıkan balistik dayanım artışının, kaplamalı levhalardakine çok yakın seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır.

8. grup levhalara yapılan tüm atışlar sonundaki çökme ve şişme değerlerini içeren grafikler ise Şekil 3.69'dadır. 8. grup levhalara destek katmanı ilavesiyle yapılan atışlarda da 2. grupta yapılan destek katmanlı atış sonuçlarına yakın sonuçlar tespit edilmiştir.

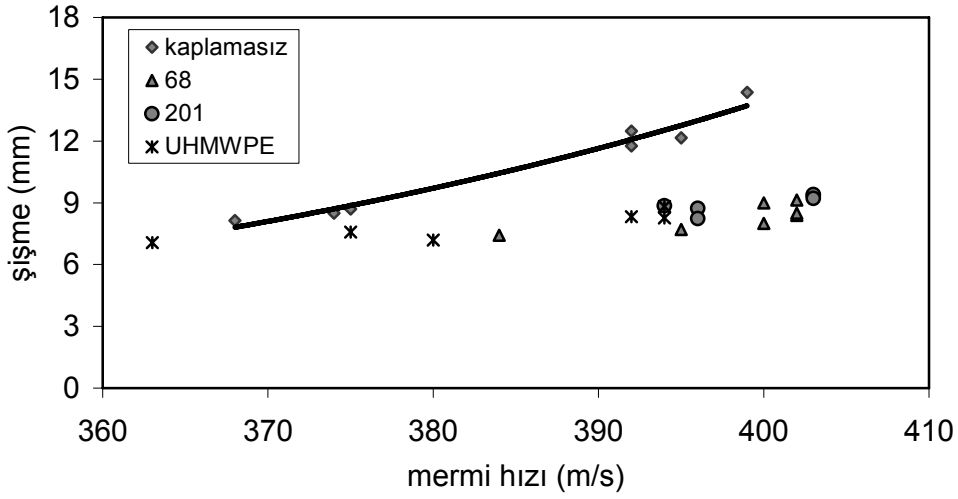
Destek katmanlı levhalara yapılan atış sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, polietilen destek katmanının tüm levhalarda balistik dayanımı artırdığı, kaplama

uygulamaları ile karşılaştırıldıklarında, 2 ve 8. grup levhalarda kaplamaların etkilerine yakın, ancak bir miktar daha az bir katkı sağladıkları anlaşılmaktadır.

Burada, ön katman olarak kullanılan alüminyum levhaların, merminin hızını düşürmek ve uç biçimlerini bozmak suretiyle delicilik özelliklerini azaltmaları, polietilen destek katmanları ise merminin kalan kinetik enerjisini soğurarak delinmenin gerçekleşmesini önlemeleri amaçlanmaktadır. Polietilen destek katmanlarında herhangi bir delinme işareti ile karşılaşılmamıştır. Dolayısıyla, mermilerin alüminyum ön katmanlar içinde durdukları anlaşılmaktadır. Böylece, kullanılan polietilen destek katmanların, yapının toplam balistik dayanımını da artırdıkları sonucuna varılmaktadır.

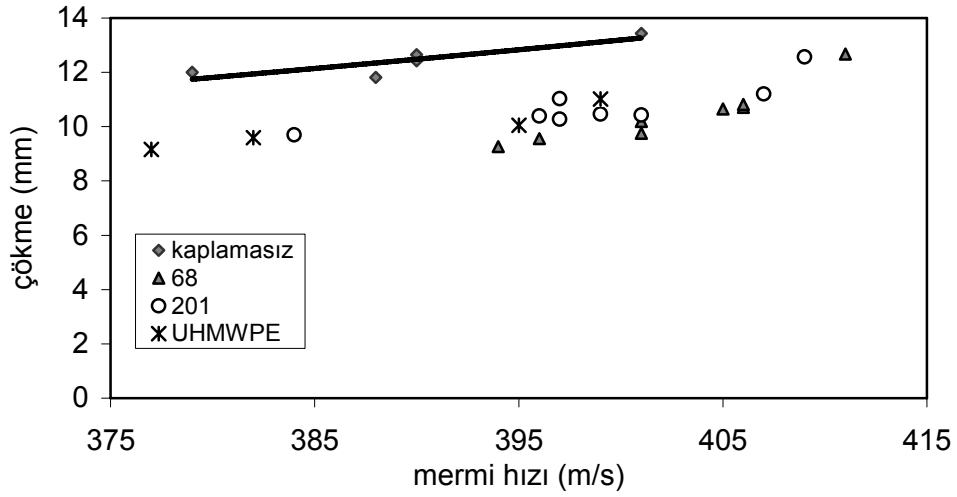


a)

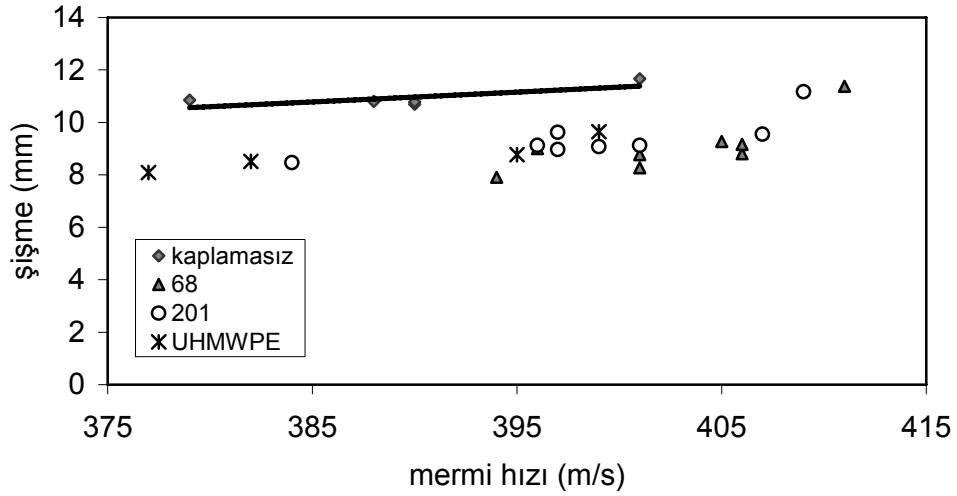


b)

Şekil 3.68: 2. grup destek katmanlı levhalarda atış sonuçları a) çökme, b) şişme



a)



b)

Şekil 3.69: 8. grup destek katmanlı levhalarda atış sonuçları a) çökme, b) şişme

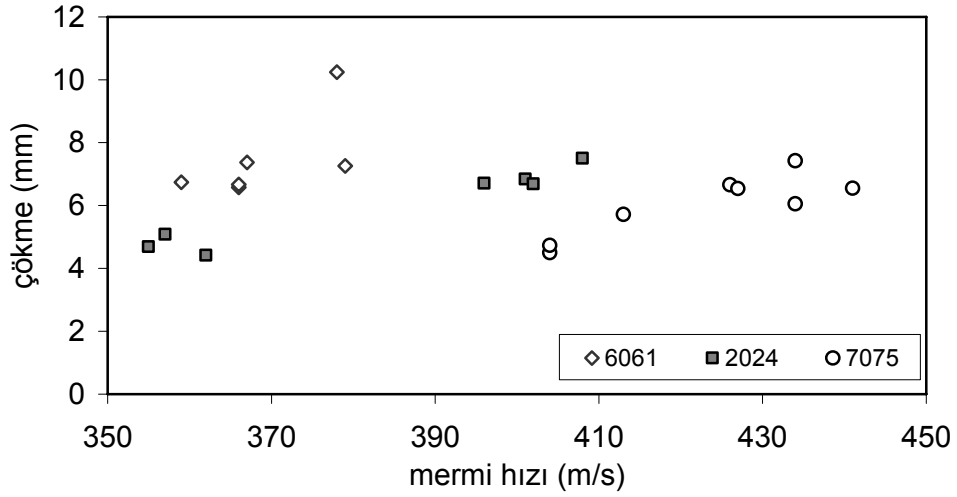
3.6 Levhalarda Oluşan Şekil Değiştirme Miktarlarının Karşılaştırılması

Deneylerde kullanılan alüminyum levhaların atışlardan sonra elde edilen çökme ve şişme değerlerine göre balistik dayanımları, levha kalınlıkları esas alınarak karşılaştırılmıştır.

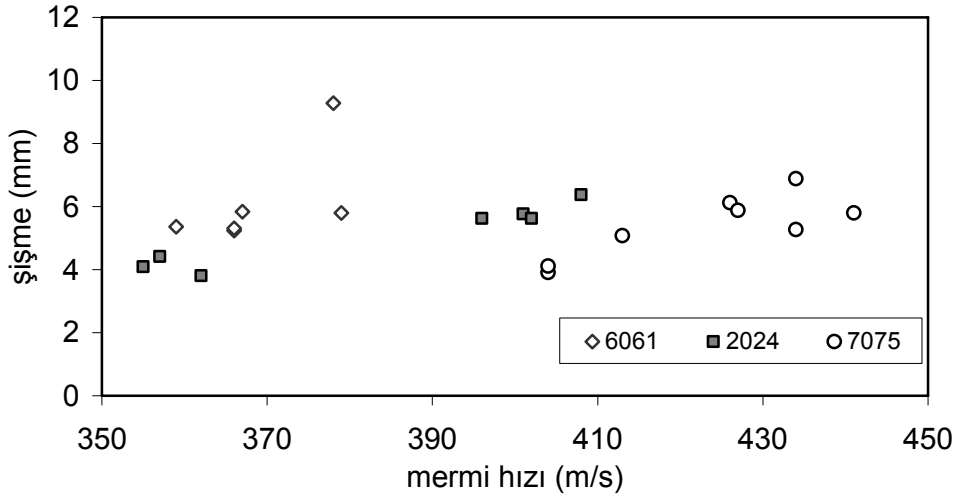
6.35 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların çeşitli hızlardaki çarpmalar nedeniyle oluşan çökme değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 3.70'te, hem direnç göstermeye devam ettiği mermi hızları, yani balistik limiti, hem de çökme değeri açısından AA 7075 T651 alaşımın en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Bunu AA 2024 T351 ve AA 6061 T651 izlemektedir. 6061 alaşımların balistik limitleri

380 m/s seviyelerinde iken, 2024 alaşımlar 410 m/s, 7075 alaşımlar ise 450 m/s'ye yakın mermi hızlarına karşı direnç gösterebilmektedir

Şişme değerlerinin karşılaştırıldığı Şekil 3.71'de de benzer bir eğilim gözlenmektedir.



Şekil 3.70: Alüminyum levhaların çökme değerlerinin karşılaştırmaları (6.35 mm)

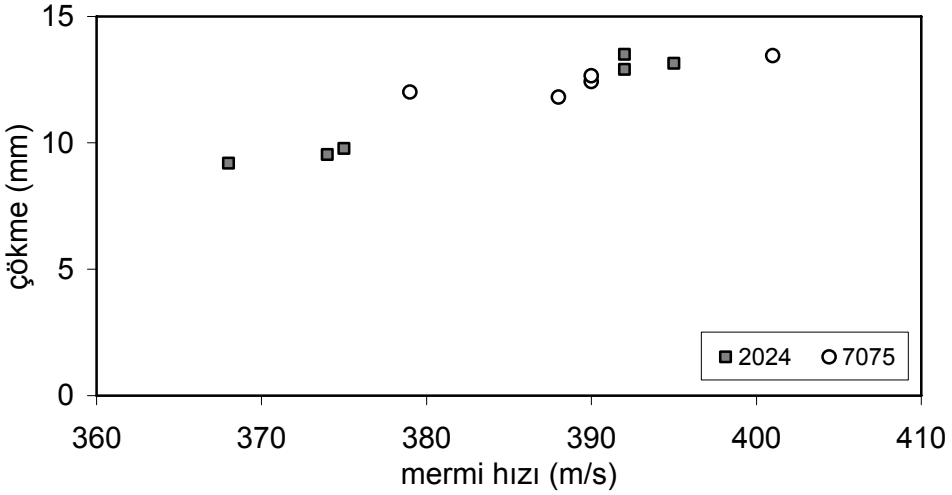


Şekil 3.71: Alüminyum levhaların şişme değerlerinin karşılaştırmaları (6.35 mm)

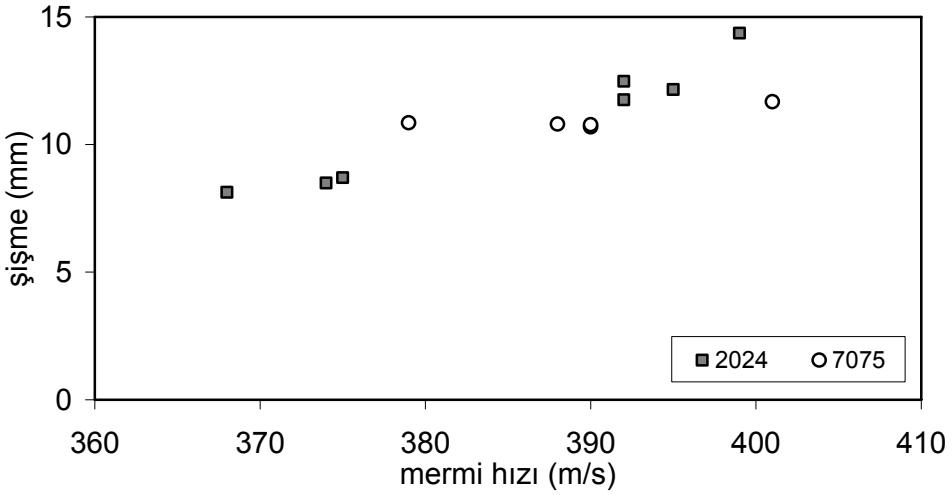
2024 ve 7075 alaşımlardan hazırlanan 4.80 mm kalınlığındaki levhalar (2 ve 8. grup levhalar) arasındaki karşılaştırmalar ise Şekil 3.72 ve Şekil 3.73'te görülmektedir.

Bu kalınlıktaki 6061 levhalar yapılan tüm atışlarda delindiklerinden değerlendirmeye alınamamışlardır. Bu grafikler incelendiğinde, 7075 alaşımların hafif bir üstünlükleri olmakla birlikte, aralarındaki farkın, 6.35 mm kalınlığındaki levhalardaki kadar belirgin olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, 4.80 mm kalınlığındaki levhalarda,

balistik sınıra yakın hızlarda yapılan bu atışlar sonucunda oluşan hasarların, ölçme değerlerini etkilemiş olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.72: Alüminyum levhaların çökme değerlerinin karşılaştırmaları (4.80 mm)



Şekil 3.73: Alüminyum levhaların şişme değerlerinin karşılaştırmaları (4.80 mm)

3.7 Levhalarda Enerji Sönümlemesi

Yüksek hızlı çarpma mekaniği ile ilgili bir incelemede ele alınması gerekli öncelikli konulardan biri de merminin sahip olduğu kinetik enerjinin çarpma sonunda hangi enerji türlerine dönüştüğüdür. Yüksek hızlı bir çarpmada birincil enerji emiş tarzları levha ve mermideki hasar oluşumu ile birlikte sıcaklık olmalıdır.

3.7.1 Isı enerjisi

Çarpma esnasında, sıcaklığın hangi seviyelerde önemli hale geldiğinin belirlenmesi amacıyla FLUKE 576 model uzaktan sıcaklık ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.74).



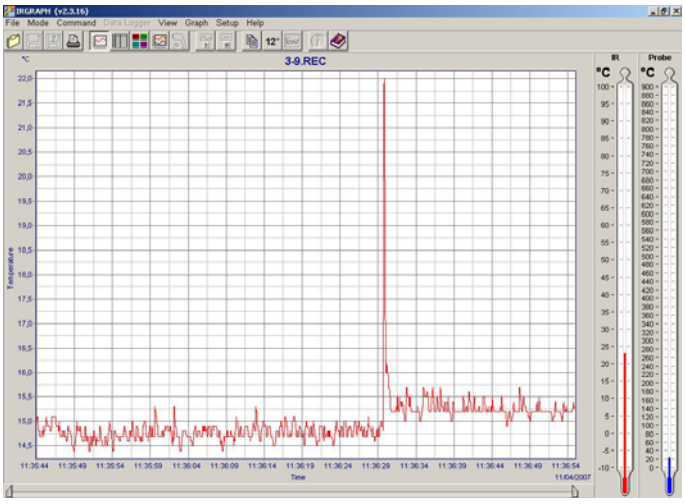
Şekil 3.74: Fluke 576 Uzaktan sıcaklık ölçüm cihazı

Işınım yoluyla yüzey sıcaklığı ölçen cihaz (3.1) denkleminde belirtilen Stephan-Boltzman kanunu temeline dayalıdır.

$$P = e\sigma A\left(T^4 - T_c^4\right) \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada; P net ışınım gücü, e yayınım katsayısı, A ışınım alanı, σ Boltzmann sabiti ($\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8}$ watt/m^{2}K^4), T ölçülmek istenen yüzeyin sıcaklığı ve T_c ise ortam sıcaklığıdır [110].

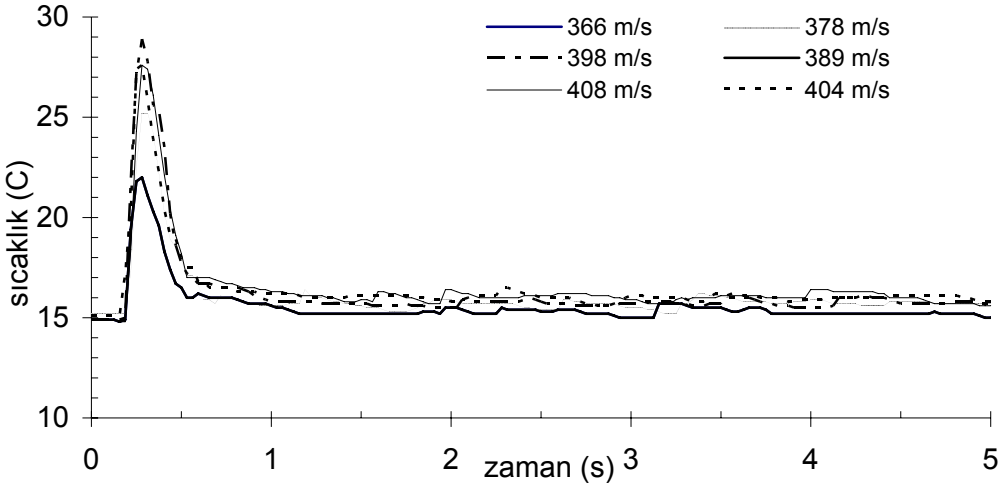
Anlık olarak ölçülen sıcaklığın bilgisayar ortama aktarılmasını sağlayan arayüz (IRGraph) yardımıyla, çarpma boyunca belirli bir bölgedeki sıcaklığın zamanla değişimi hakkında fikir oluşturulması mümkün olabilmektedir (Şekil 3.75).



Şekil 3.75: Sıcaklık ölçüm arayüzü (IRGraph)

Yüksek hızlı bir çarpma ile ilgili incelemelerde, enerjinin korunumu ilkesinin önemli bir yer tutması gerektiğinden daha önceki paragraflarda da söz edilmişti. Yapılan atışlarda, enerji sönüm tarzları açısından yapılabilecek değerlendirmeler, levhalardaki eğilmelerle birlikte uzaktan temassız sıcaklık ölçümü ile elde edilen bilgiler ışığında belirlenecektir.

Levhalardaki sıcaklık dağılımının belirlenmesine yönelik olarak, Fluke 576 uzaktan sıcaklık ölçer cihazı ile yapılan ölçümler neticesinde, çarpma anında ölçüm yapılan bölgedeki sıcaklığın ani olarak yükseldiği, ardından yine hızlı bir şekilde başlangıç sıcaklığının hemen üzerindeki bir değere düştüğü görülmektedir (Şekil 3.76).



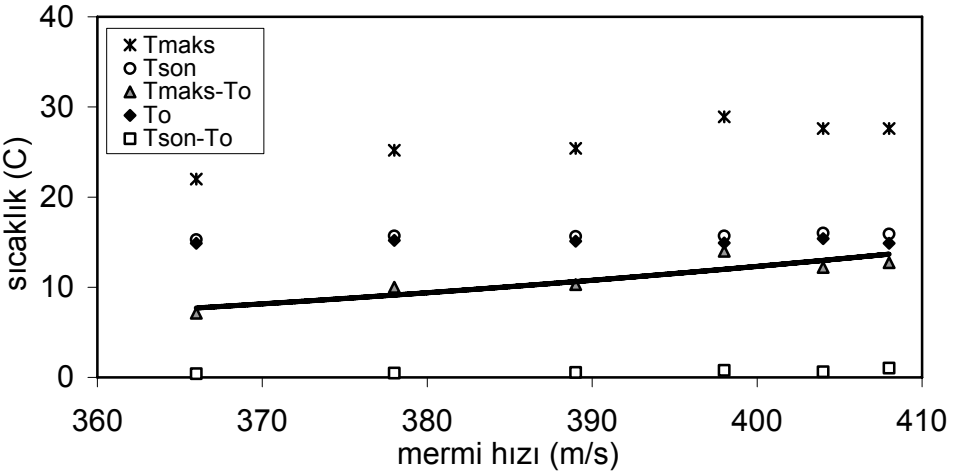
Şekil 3.76: 3. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhaların sıcaklık değişimleri

Şekil 3.76 incelendiğinde, sıcaklığın tepe noktası ve başlangıç sıcaklığı ile atış sonrası sıcaklık değerlerinin, atışların yapıldığı hız seviyelerinde birbirlerine çok yakın özellikler gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu noktadan hareketle, mermi hızı ile sıcaklık arasındaki ilişki Tablo 3.13'te görülmektedir.

Tablo 3.13: 3. grup 68F-NS-1 kaplamalı levhalarda mermi hızı-sıcaklık ilişkileri

Mermi hızı (m/s)	T_0 (°C)	T_{maks} (°C)	$T_{maks} - T_0$	T_{son} (°C)	$T_{son} - T_0$
366	14.89	22.00	7.11	15.29	0.41
378	15.20	25.20	10.00	15.69	0.49
389	15.10	25.40	10.30	15.64	0.54
398	14.91	28.90	13.99	15.69	0.78
404	15.40	27.60	12.20	16.02	0.62
408	14.87	27.60	12.73	15.90	1.03

Tablo 3.13'teki verilerin grafik halde gösterimi ise Şekil 3.77'dedir. Şekil 3.77'ye göre, mermi hızına bağlı olarak levhada ölçülen en yüksek sıcaklık (T_{maks}), başlangıç sıcaklığında çarpma nedeniyle oluşan artış (T_{maks}-T_0) ve levhanın ilk ve son sıcaklıkları arasındaki fark (T_{son}-T_0) da artmaktadır. Çarpma esnasında merminin sahip olduğu kinetik enerjinin ısı şeklinde levhaya aktarılan kısmının belirlenebilmesi için dikkate alınması gereken değişim, ölçülen en yüksek sıcaklıkla başlangıçtaki sıcaklık arasındaki farktır. Çarpmanın gerçekleştiği anda, sıcaklıkta ani bir sıçrama, sonrasında ise başlangıç sıcaklık değerinin bir miktar üzerine kadar hızlı bir şekilde düşme yaşanmaktadır.



Şekil 3.77: Mermi hızı ile sıcaklık ilişkileri

Deneysel çalışmalar esnasındaki gözlemler ve bu konuda yapılmış çalışmalar [9,10,67] doğrultusunda, sıcaklıkla ilgili olarak elde edilen veriler değerlendirildiğinde, sıcaklık ölçüm sonuçlarının genel eğilimleri literatürde yer alan çalışmalarla uyumlu olmakla birlikte, mertebe olarak beklenenden oldukça düşük bir seviyede olduğundan, kullanılan yöntem sonucunda elde edilen verilerin kullanılması uygun olmayacaktır.

3.7.2 Levhaların şekil değiştirme enerjisi

Yüksek hızlı bir çarpma olayında, merminin sahip olduğu kinetik enerji, mermi ile levhanın temasından itibaren mermi ve levhada oluşan deformasyon nedeniyle şekil değiştirme enerjisi ve sürtünme nedeniyle ısıya dönüşür. Levhanın balistik dayanımının belirlenebilmesi için balistik limitin, bir başka ifade ile mermi tarafından tamamen delinebilmesi için merminin sahip olması gereken en düşük

çarpma hızının bilinmesi gerekir. (2.69) ve (2.70) denklemleri delinmenin gerçekleşmesi için gereken en düşük enerji miktarını vermektedir. Bu enerji değerlerine karşılık gelen mermi hızı balistik limit olacaktır.

Balistik limit hızın altındaki çarpmalarda ise mermideki kinetik enerji, ana olarak levhadaki şekil değiştirme enerjisine dönüşür. Bu noktada, levhada oluşan şekil değiştirme miktarının analitik olarak belirlenmesi gerekir. Bu değer için çeşitli araştırmacılar tarafından merminin rijit oluşu, yarı sonsuz levha kalınlığı gibi belirli şartlar altındaki delinme miktarını veren çözümler önerilmiştir [49,89,97]. Bu çalışma kapsamında atış deneyleri yapılmış olan levhalarda oluşan çökme miktarlarının kuramsal olarak belirlenebilmesi için önerilecek bir ifade merminin çarpma hızının karesine, yani kinetik enerjisine, levhanın akma mukavemetine, mermi ve levhanın yoğunluklarının oranına ve levha boyutlarına bağlı olmalıdır. Atışlar sonucunda yapılan çökme ölçümlerinin genel dağılımları da dikkate alınarak levhada oluşan çökme için aşağıdaki gibi bir üstel ifade önerilebilir;

$$w = ae^{bV_0^2}, \qquad \left(a = K_{E_1} H, \;\; \mathrm{b} = \frac{\frac{1}{2} m_p}{\sigma_0 B H^2} \frac{\rho_p}{\rho_t} K_{E_2} \right) \tag{3.2}$$

Deneyler sonucunda 3D-CMM cihazı ile yapılan ölçümler, çarpma merkezinde oluşan çökme ile mermi hızı arasında üstel bir ilişkinin olduğuna işaret etmektedir. (3.2) ifadesinde, K_{E_1} ve K_{E_2} levhanın boyutsuz "balistik çarpanları"dır.

Önerilen üstel ifadede yer alan *a* ve *b* katsayılarının, mümkün olan en az hata miktarı ile belirlenmesi amacıyla, denklem doğrusallaştırıldıktan sonra en küçük kareler yöntemi kullanılarak doğrusal regresyon uygulanmıştır.

Doğrusallaştırma için, ifadenin doğal logaritması alınarak değişken dönüşümü yapılmıştır;

$$\ln w = \ln a + bV_0^2 \tag{3.3}$$

$$Y^* = A^* + B^* X^*, \quad (Y^* = \ln w,\; A^* = \ln a,\; B^* = b,\; X^* = V_0^2) \tag{3.4}$$

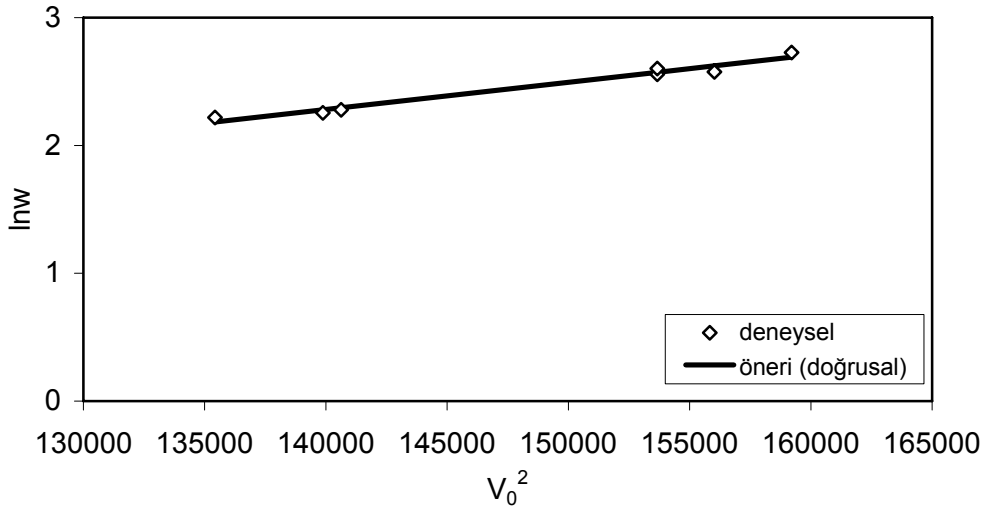
Elde edilen doğrusal (3.4) denklemindeki A^* ve B^* katsayıları en küçük kareler yöntemi kullanılarak bulunduğunda, önerilen doğrusal ifade için toplam hatayı en

küçük yapan doğru denklemi de elde edilmiş olacaktır. Bu katsayıların hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [111];

$$B^* = \frac{n\sum_{i=1}^{n} X_i^* Y_i^* - \sum_{i=1}^{n} X_i^* \sum_{i=1}^{n} Y_i^*}{n\sum_{i=1}^{n} (X_i^*)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^*\right)^2} \quad \textbf{(3.5)}$$

$$A^* = \overline{Y^*} - B^* \overline{X^*} \quad \textbf{(3.6)}$$

(3.6) denklemindeki $\overline{X^*}$ ve $\overline{Y^*}$ ortalama değerleri ifade etmektedir. A^* ve B^* katsayıları (3.5) ve (3.6) denklemleri kullanılarak hesaplandığında, sırasıyla -0.701 ve $2.130 \cdot 10^{-5}$ olarak elde edilmiştir. Şekil 3.78'de, doğrusal denklemin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması yer almaktadır.



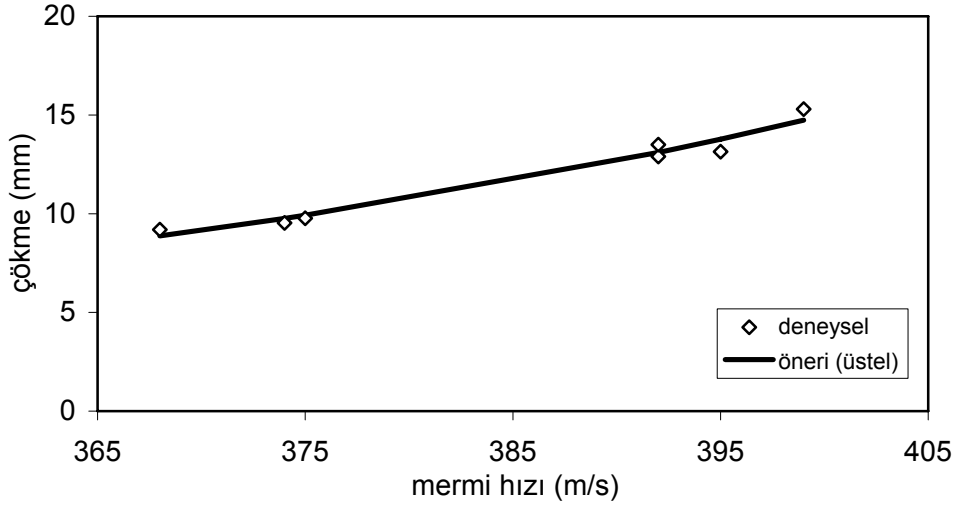
Şekil 3.78: Doğrusallaştırılmış denklemin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması (2. grup)

Doğrusal ifadenin 2. grup atış sonuçları için belirlilik (determination) katsayısı 0.97283 olarak elde edilmiştir. Bu değer, ifadenin deney sonuçlarını açıklama gücünün yüksek olduğuna işaret etmektedir [112].

(3.3) ve (3.4) denklemleri kullanılarak doğrusal ifade yeniden üstel hale getirildiğinde, *a* ve *b* katsayıları sırasıyla 0.496 ve $2.130 \cdot 10^{-5}$ olarak bulunmuştur. Bu katsayılar (3.2) denkleminde yerine konarak, 4.80 mm kalınlığındaki AA 2024 T351 levhalar için K_{E_1} ve K_{E_2} "balistik çarpanları" 0.103 ve 1.113 olarak bulunmuştur.

Üstel ifadeye ait belirlilik katsayısı ise 0.96815'tir. Doğrusal denklemdekine benzer şekilde, önerilen ifade deney sonuçlarını güçlü bir şekilde açıklamaktadır [112].

Bu değerler kullanılarak elde edilen üstel ifadenin sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 3.79'da görülmektedir.

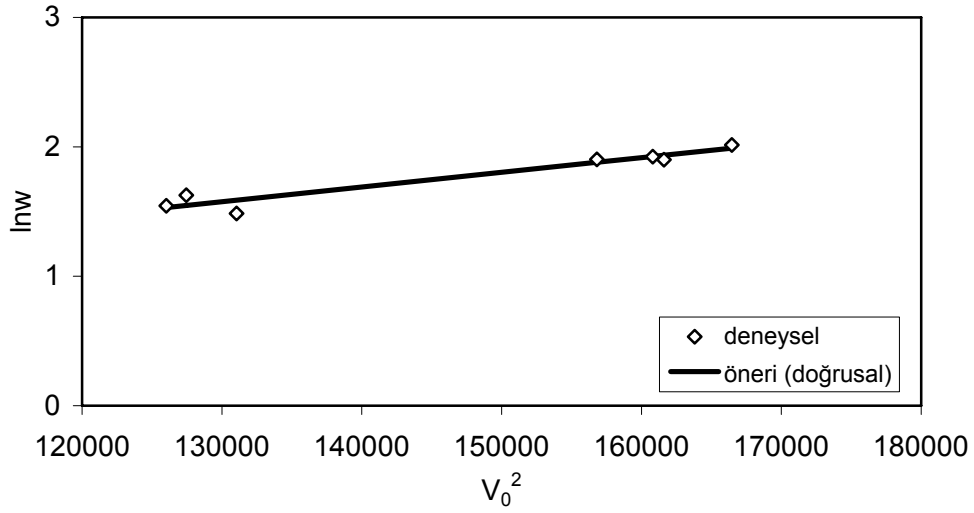


Şekil 3.79: Önerilen denklemin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (2. grup)

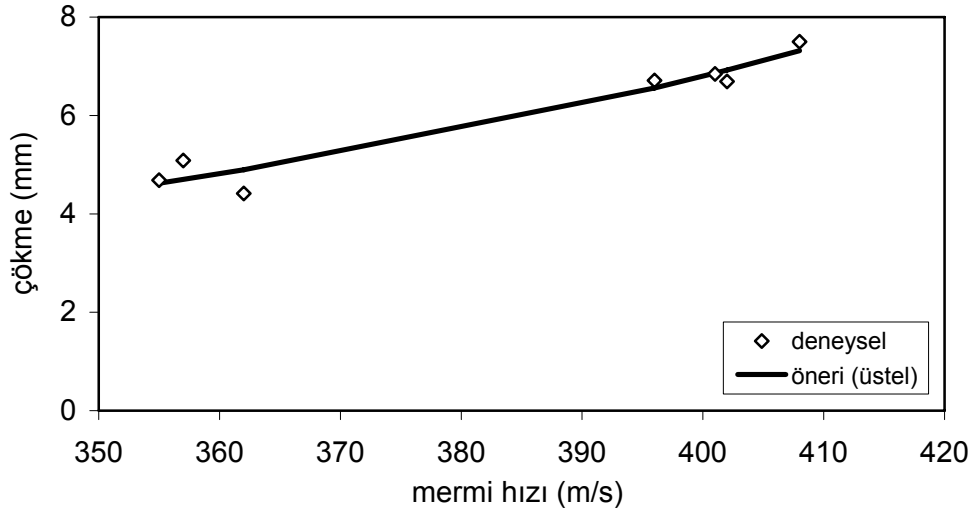
Benzer bir inceleme 3. grup levhalar için yapılmıştır. Doğrusallaştırılmış ifade için A^* ve B^* katsayıları 0.101 ve $1.135 \cdot 10^{-5}$ olarak elde edilmiştir. Doğrusal ifadenin belirlilik katsayısı 0.92869 olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlarla doğrusal ifadenin karşılaştırılması Şekil 3.80'de görülmektedir.

Doğrusal ifade yeniden üstel hale getirildiğinde *a* ve *b* katsayıları sırasıyla 1.106 ve $1.135 \cdot 10^{-5}$ olarak elde edilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T351 levhalar için K_{E_1} ve K_{E_2} "balistik çarpanları" 0.174 ve 1.037 olarak bulunmuştur. Üstel ifadeye ait belirlilik katsayısı ise 0.94536'dır. 2. grup levhalar için yapılmış olan incelemeye benzer şekilde, önerilen ifade deney sonuçlarını güçlü bir şekilde açıklamaktadır [112]. Bu değerler kullanılarak elde edilen üstel ifadenin sonuçlarının deney sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 3.81'de görülmektedir.

Bu sonuçlar, iki farklı kalınlıktaki AA 2024 T351 levha için çeşitli mermi hızlarındaki çarpmalar sonucunda oluşan çökme miktarlarının önerilen (3.2) denklemi yardımıyla elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 3.80: Doğrusallaştırılmış denklemin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması (3. grup)

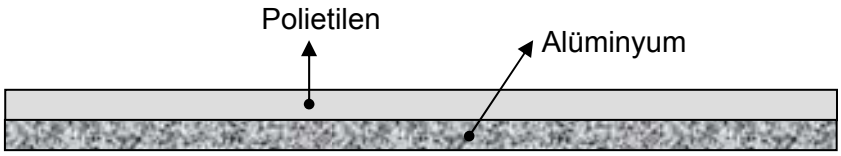


Şekil 3.81: Önerilen denklemin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (3. grup)

3.8 Tasarlanan Katmanlı Zırh Yapısı ve Yapılan Atış Sonuçları

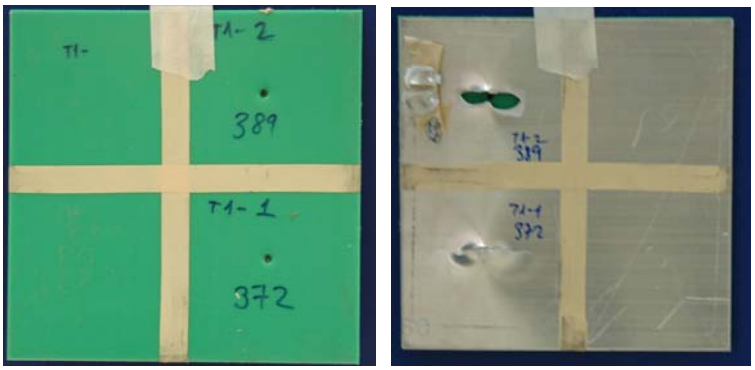
Daha önceki deneylerde, 9 mm Parabellum mermi ile yapılan tüm atışlarda delinmiş olan 4 mm kalınlığındaki AA 7075 T651 levhalar yüksek molekül ağırlıklı polietilen (PE 1000) levhalarla desteklenerek teste tabi tutulmuştur. Levhaların toplam kalınlıkları sabit kalmak üzere, destek katmanı önde, arkada ve 2 mm kalınlığındaki iki AA 7075 T651 levhanın arasında olacak şekilde üç farklı katmanlı tasarım denenmiş ve aralarındaki farklar incelenmiştir.

İlk tasarımda, çarpma yönüne göre öne polietilen, arkaya ise AA 7075 T651 levhalar yerleştirilmiştir (Şekil 3.82).



Şekil 3.82: PE-Al katmanlı yapı

Levha kalınlıkları başlangıçta polietilen ve alüminyum için 4.00 mm olarak alınmıştır. Yapılan atışlarda mermi hızları 372 m/s ve 389 m/s olarak ölçülmüş, her iki atışta da hem polietilen hem de alüminyum levhada delinme gözlenmiştir (Şekil 3.83).



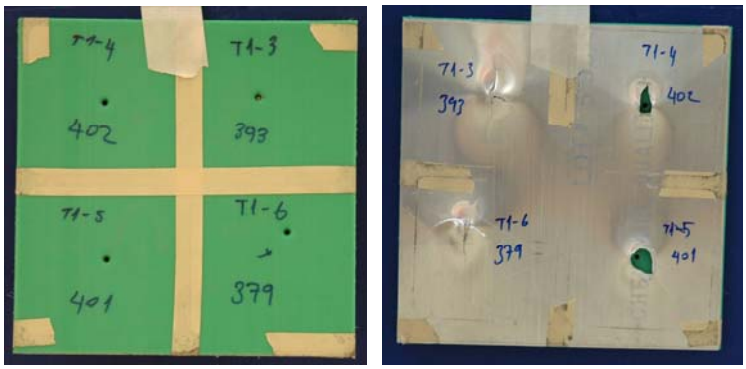
a) b)

Şekil 3.83: PE-Al katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (4 mm PE kalınlığında) a) ön yüz, b) arka yüz

Çarpmanın etkisi ile arka katman olarak kullanılan alüminyum levhada kopmalara rastlanmıştır. Bu durum, AA 7075 T651 levhalar kullanılarak daha önce yapılmış olan atışlarda da gözlenmiştir (Şekil 3.54). AA 7075 T651 levhaların kırılgan yapısı nedeniyle çarpma noktası ve çevresinde oluşan kayma gerilmeleri, mermi boyutlarından daha büyük parçaların levhadan kopması neticesinde delinmeye neden olmaktadır.

Elde edilen bu sonuç doğrultusunda, ön katmanda kullanılan polietilen levha kalınlığı 8.00 mm olarak değiştirilerek atışlar tekrarlanmıştır. Bu atışlarda 401 m/s ve 402 m/s mermi hızlarında her iki katmanda da delinme gerçekleşmiştir.

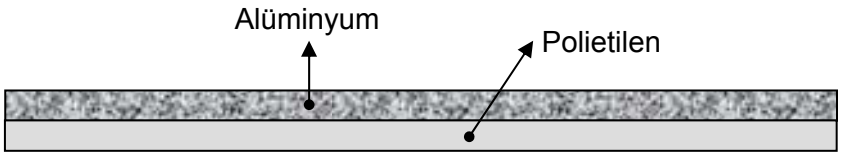
379 m/s ve 393 m/s mermi hızlarının ölçüldüğü atışlarda ise mermiler alüminyum levha içinde durmuşlar, ancak arka yüzeyde çok geniş çatlak ve kırılmalar gözlenmiştir (Şekil 3.84).



a) b)

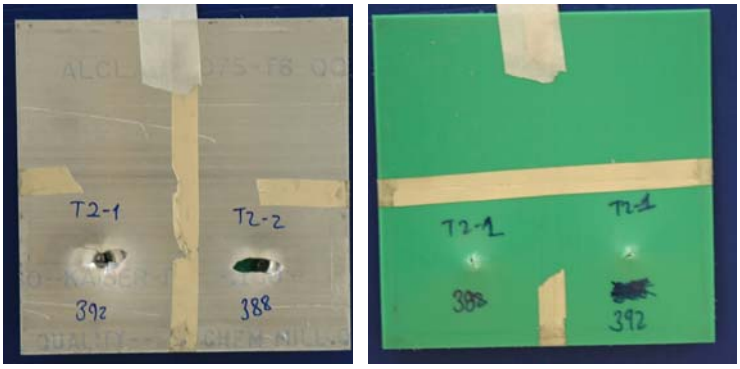
Şekil 3.84: PE-Al katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (8 mm PE kalınlığında) a) ön yüz, b) arka yüz

İkinci tasarımda, bu kez alüminyum levha ön katman olarak kullanılmış, polietilen levha ise destek katmanı olarak arkaya konmuştur (Şekil 3.85).



Şekil 3.85: Al-PE katmanlı yapı

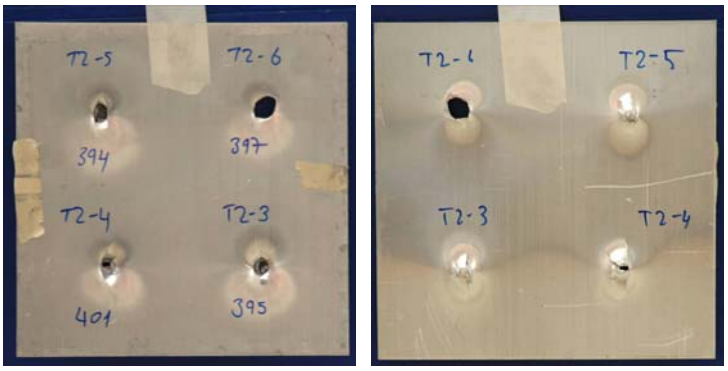
Her iki katman kalınlığının da 4.00 mm olarak belirlendiği bu yapılandırmada, 388 m/s ve 392 m/s mermi hızlarında her iki katmanda da delinme gözlenmiştir (Şekil 3.86).



a) b)

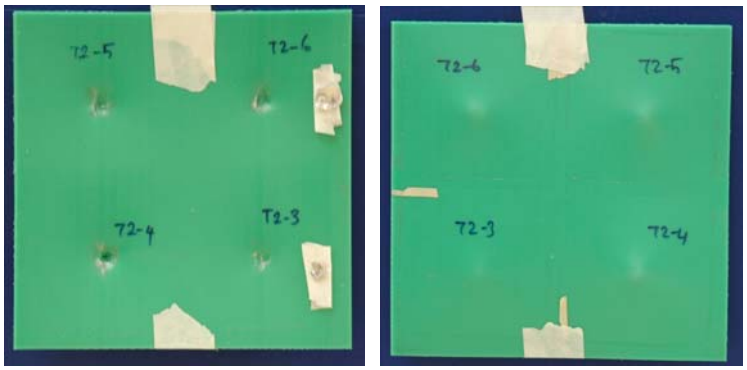
Şekil 3.86: Al-PE katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (4 mm PE kalınlığında) a) ön yüz, b) arka yüz

Polietilen destek katmanı kalınlığı 8.00 mm olarak değiştirilmiş ve atışlar tekrarlanmıştır. Yapılan 8 adet atışta, 391 m/s ile 401 m/s arasında mermi hızları ölçülmüştür. Bu atışlar sonunda, alüminyum ve polietilen katmanlara ait görüntüler Şekil 3.87 ve Şekil 3.88'dedir.



a) b)

Şekil 3.87: Al-PE katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (8 mm PE kalınlığında)
a) Alüminyum ön yüz, b) Alüminyum arka yüz



a) b)

Şekil 3.88: Al-PE katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları (8 mm PE kalınlığında)
a) Polietilen ön yüz, b) Polietilen arka yüz

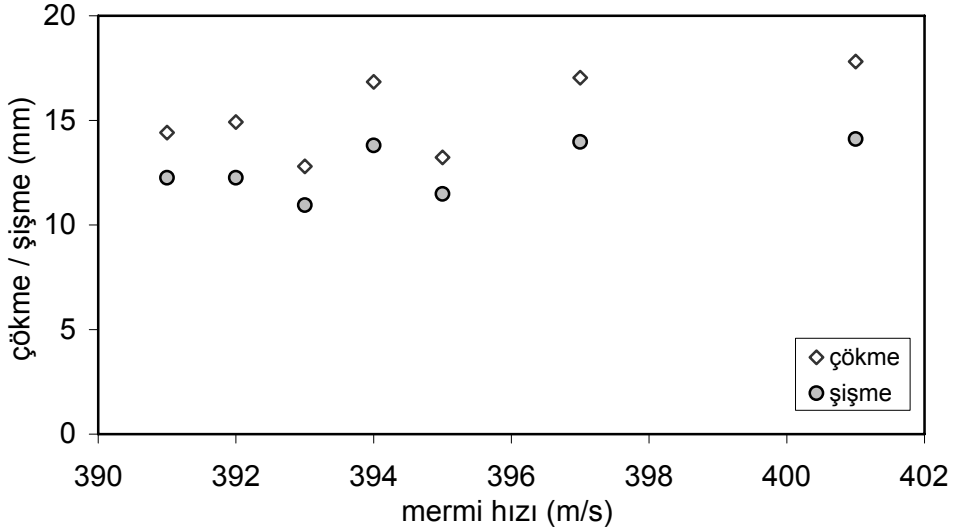
Bu grupta yapılan atışlarda, test edilen tasarımın performansını belirlemek amacıyla arka destek katmanı olarak kullanılan polietilen levhada çarpma yönündeki çökme ve arka yüzeydeki şişme miktarları ölçülmüştür. Bu ölçümlere ait sonuçlar Tablo 3.14 ve Şekil 3.89'da görülmektedir.

Son olarak, toplam kalınlığı değiştirmeyecek şekilde, 2.00 mm kalınlığında iki adet alüminyum levha arasına 8.00 mm kalınlığında polietilen levha konarak atışlar yapılmıştır (Şekil 3.90).

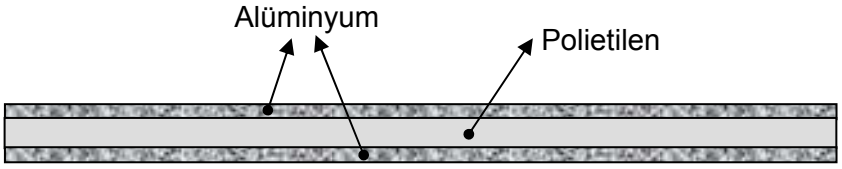
Bu grupta yapılan iki atışta, 398 m/s ve 400 m/s mermi hızları ölçülmüş, her iki atışta da levhaların tümünde delinme tespit edilmiştir (Şekil 3.91).

Tablo 3.14: Al-PE katmanlı yapıda atış sonuçları

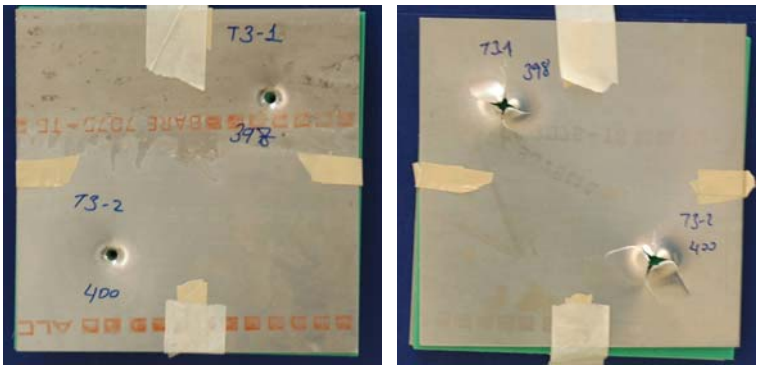
Test No	Çarpma Hızı (m/s)	Çökme (mm)		Şişme (mm)
		Ön (Al)	Arka (PE)	
T2-1	392	delindi	delindi	
T2-2	398			
T2-7	391	delindi	14.417	12.256
T2-10	392		14.920	12.257
T2-9	393		12.802	10.951
T2-5	394		16.838	13.801
T2-3	395		13.227	11.483
T2-8	396		delindi	
T2-6	397		17.041	13.972
T2-4	401		17.809	14.107



Şekil 3.89: Al-PE katmanlı yapıda atış sonuçları



Şekil 3.90: Al-PE-Al katmanlı yapı



a) b)

Şekil 3.91: Al-PE-Al katmanlı yapıya yapılan atış sonuçları a) ön yüz, b) arka yüz

Kullanılan alüminyum levhaların diğerlerinden ince olması, hasar biçimlerinde de belirgin farklılıklara neden olmaktadır. Önceki atışlarda kırılma ve kopmalar şeklinde gelişen hasar, ince levhalarda yırtılma şeklindedir. Ön yüzde meydana gelen delikler mermi boyutlarına yakındır. Arka yüzeyde ise merminin levhayı terk ettiği bölümde yapraklanma (petalling) şeklinde bir hasar oluşumu gözlenmektedir. Ön katman olarak kullanılan 2.00 mm kalınlığındaki alüminyum levhada, delinmeye rağmen bundan farklı bir hasar görülmesinin nedeni, polietilen destek katmanın arka yüzeydeki açılmayı engellemesidir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, denenen üç tasarımın da toplam katman kalınlıkları eşit olduğu halde, destek katmanı olarak kullanılan polietilenin alüminyum levhaların arkalarına yerleştirildikleri seçeneğin, balistik dayanımı en yüksek tasarım olduğu anlaşılmaktadır. Merminin çarptığı noktada oluşan kırıkların, polietilen destek katmanı tarafından tutulması bu sonucu önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle arka yüzeyde temas noktasından daha geniş bir bölgeye yayılmış olduğu gözlenen kırılma ve kopmalar nedeniyle, levhanın delinme direncinin ortadan kalkması, tamamen delinmiş olan AA 7075 T651 levhalardaki ana hasar biçimini oluşturmaktadır. Bu parçaların ve beraberlerinde hareketine devam etmekte olan merminin destek katmanla karşılaşması, çarpmanın delinmeyle sonuçlanmasını engellemektedir.

4. SAYISAL UYGULAMA

4.1 Giriş

Çalışmanın deneysel bölümünde, çeşitli kalınlıklarda üç farklı alüminyum kullanılarak atış testleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan alüminyum alaşımların çeşitli çarpma hızlarındaki davranışlarının belirlenmesi açısından, deney sonuçları büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu sonuçlar, yapılacak olan tüm sayısal çalışmalar için doğrulama aracı olacaktır.

Sayısal çözümler, deneysel bölümde balistik davranışları belirlenen alaşımların, daha geniş bir aralıktaki çarpma şartları altındaki performanslarının ortaya konması için kullanılabilecek kullanışlı araçlardır. Literatürde ABAQUS, LS-DYNA, NET2D, MSC DYTRAN gibi çeşitli ticari sonlu elemanlar yazılımlarının kullanılarak dinamik yükleme şartlarında başarılı sonuçların elde edildiği çalışmalar mevcuttur [2,31,32,35,37,56,64,113-116].

Çarpma olayının başarılı bir şekilde benzetiminin yapılması, çalışmanın ilerleyen bölümlerindeki deney miktarının en aza indirilmesini, böylece malzeme ve zaman tasarrufunu sağlayacaktır.

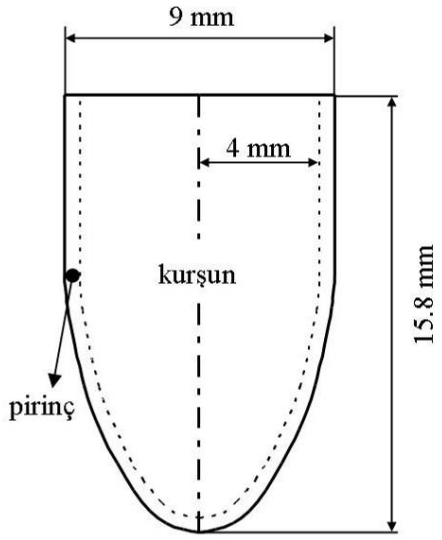
Bu amaçla, bundan önceki bölümlerde gerçekleştirilmiş olan deneylerin sayısal benzetimlerinin yapılması amacıyla; modelleme ve bilgi dosyasının (*.dat) oluşturulması (pre-processor) ve sonuçların incelenmesi (post-processor) için MSC PATRAN, çözücü (processor) olarak ise MSC DYTRAN ticari sonlu elemanlar yazılımları kullanılmıştır.

4.2 Sayısal Model

4.2.1 Model geometrisi

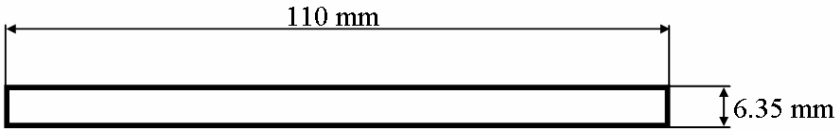
Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, deneylerde MKEK yapımı 9 mm çapında ve 8.00 g ağırlığında Parabellum mermiler kullanılmıştır. Bu mermiler pirinç (CuZn36) bir yüksük ve kurşun-antimon karışımından oluşmaktadır. Levhanın

çarpma yükleri altındaki davranışlarının belirlenmesinde, mermide oluşan hasarın da tam olarak modellenebilmesi anahtar bir rol oynayacağından, mermiyi oluşturan her iki bölüm de sayısal modelde kullanılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Sayısal modelde kullanılan mermi geometrisi

Deneylerde, 250x250 mm kalınlığında ve farklı kalınlıklarda üretilmiş olan alüminyum alaşımı levhalar çoklu atışa olanak sağlamak ve sabit mesnet sınır koşullarını temsil etmek amacıyla tasarlanan çoklu atış fikstürünün iki parçası arasına yerleştirilerek kullanılmışlardır. Bu durumda, sayısal modelde kullanılan levhaların ölçüleri, fikstür tarafından oluşturulan bölümlerden biri (110x110 mm) olarak alınmıştır. Levha kalınlığı için ise üç grup levhada da kullanıldığından 6.35 mm tercih edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: Sayısal modelde kullanılan levha geometrisi

Modelde, mermi başlangıçta levhanın 1.00 mm üzerinde olacak şekilde konumlandırılmıştır.

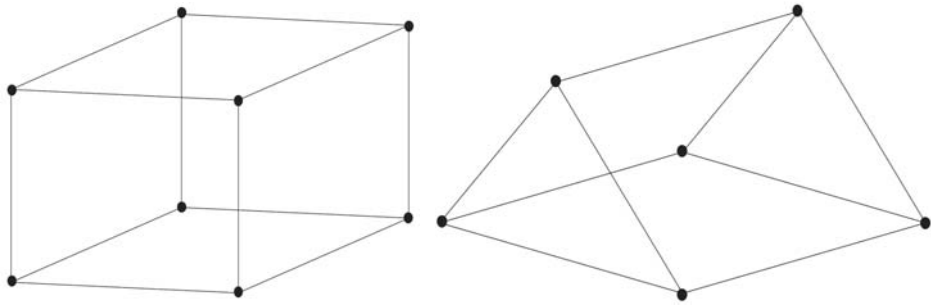
Geometrik olarak nokta, doğru ve yüzeyler oluşturulurken tüm ölçüler [mm] olarak kullanılmıştır. Modelin tamamında bu durum esas alınarak elastisite modülü, akma gerilmesi, özgül ısı gibi girdiler de [mm] türüne çevrilmiştir. Dolayısıyla, analizden elde edilen sayısal değerler de [mm] olarak dikkate alınmıştır.

4.2.2 Modelin ağ yapısı

Sayısal bir model oluşturulurken dikkat edilmesi gereken önemli konulardan biri de ağ yapısıdır (mesh). Kullanılan eleman tipi, eleman boyutları ve dağılımları gibi etkenler analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen unsurlardır. Zukas ve Scheffler [116] tarafından yapılan çalışmada, aynı problemin, aynı yazılım kullanılarak farklı kişilerce çözümünde ortaya çıkabilecek farklılıklar ortaya konmaktadır.

Sayısal modelin oluşturulmasında, kullanılan eleman tipi kadar, eleman boyutu da önem taşımaktadır. Ancak modelde çok küçük elemanların kullanılması en az hata yapılması anlamı taşımamalıdır. Çok küçük elemanlar analiz esnasında bazı sorunlara neden olabilecekleri gibi, uzun çalışma zamanı ve yüksek donanımlı bilgisayarlar gerektirirler [67].

Modelin tamamında üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır (Şekil 4.3) [117].

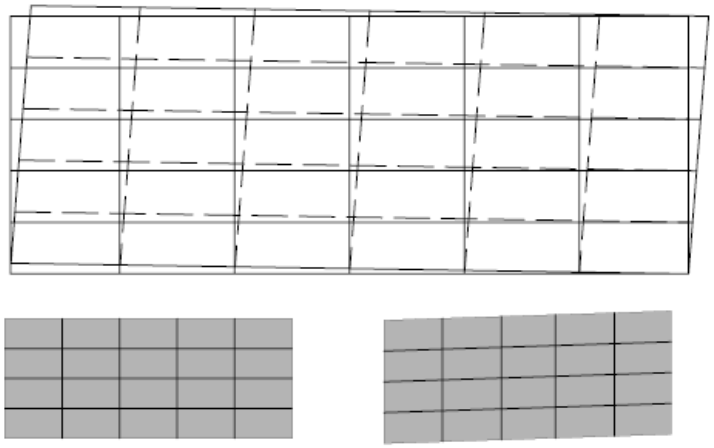


a) b)

Şekil 4.3: Modelde kullanılan katı elemanlar a) CHEXA, b) CPENTA [117]

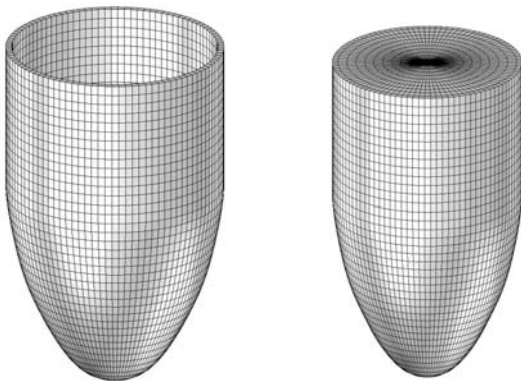
CHEXA 8 düğüm noktasına sahip bir dikdörtgenler prizmasıdır. CPENTA ise 6 düğüm noktasına sahip bir üçgen prizmadır. Mermi modelinde, geometriye uygun olarak her iki eleman türü birlikte kullanılmıştır. Levha ise tamamen CHEXA elemanlardan oluşmaktadır.

Modelde, Lagrange türü çözücü kullanılmıştır. Bu çözücü türünde, düğüm noktaları incelenen yapı üzerinde sabit olarak kalırlar. Bu düğüm noktalarının birleştirilmesiyle elemanlar ve elemanların birleşmesiyle de ana yapı oluşur. Yapıda deformasyon meydana geldiğinde, düğüm noktaları ve dolayısıyla elemanlar da deformasyona uğrarlar (Şekil 4.4). Lagrange türü çözümde, elemanların sabit kütlede hareketleri hesaba katılmaktadır [117,118].



Şekil 4.4: Lagrange türü çözümde deformasyon

Modelde, mermi iki parçadan oluşmaktadır: pirinç yüksük ve kurşun. Bu iki parça, kurşunun dış, yüksüğün ise iç sınırlarından birbirleri ile temas edecek ve temas yüzeyindeki karşılıklı düğüm noktaları aynı koordinatlara sahip olacak şekilde elemanlara bölünmüşlerdir. Her iki parça da katı (solid) olarak modellenmiştir (Şekil 4.5).



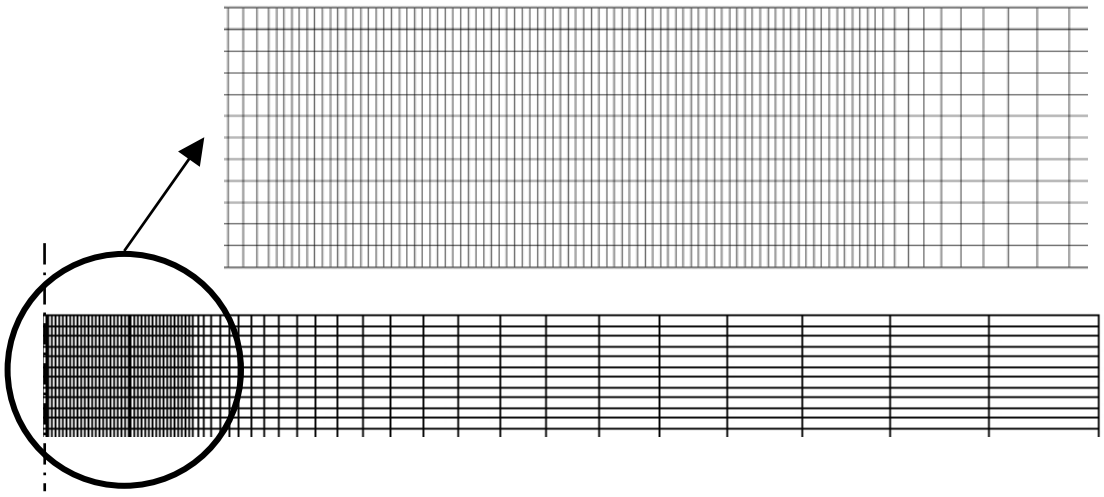
a) b)

Şekil 4.5: Merminin ağ yapısı a) pirinç yüksük, b) kurşun

Levha modelinde, mermi ile temas edecek bölüm daha yoğun (sık), kalan bölüm ise daha kaba (seyrek) ağ yapısına sahiptir (Şekil 4.6).

Hasarın daha çok olacağı levha orta bölümünde, yani merminin çarpma noktası civarındaki 15x15 mm büyüklüğünde bir bölgede yoğun ağ yapısı kullanılmıştır. Bu bölümdeki elemanlar 0.1875x0.1875x0.53 mm ölçülerindedir. Levhanın kalan bölümünde ise temas noktasından sınırlara doğru genişleyen daha kaba bir ağ yapısı kullanılmıştır.

Modelin tümünün ağ yapısına ait bilgiler Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

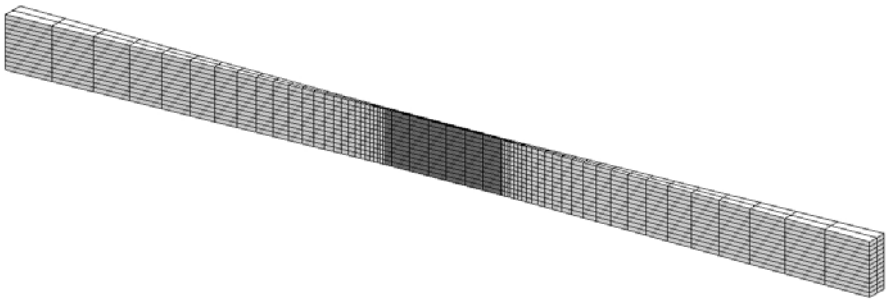


Şekil 4.6: Levhanın ağ yapısı

Tablo 4.1: Modelde kullanılan eleman sayıları

Parça Adı		Eleman Türü ve Sayısı		
		CHEXA	CPENTA	Toplam
Mermi	Yüksük	3900	100	4000
	Kurşun	37400	4100	41500
	Toplam	41300	4200	45500
Levha	Temas Bölgesi	76800	-	76800
	Kalan Bölüm	96000	-	96000
	Toplam	175800	-	175800

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kolaylık sağlaması açısından, levhanın orta bölümünden bir kesit alınmış, böylece levhada oluşan hasarın daha belirgin olarak araştırılabilmesi amaçlanmıştır (Şekil 4.7).

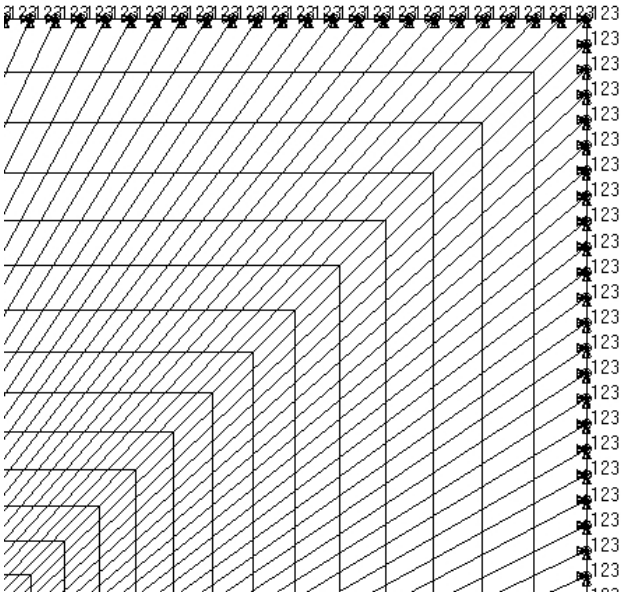


Şekil 4.7: Levhadan alınan kesit

4.2.3 Başlangıç ve sınır koşulları

Deneyler esnasında kullanılan çoklu atış fikstürünün, hedef levha sınırlarında, sabit mesnet sınır koşulu oluşturması, bir başka ifade ile fikstürün iki parçası arsına sıkıştırılan levhanın sınırlarının, normali çapma yönünde olan yüzeyde hareket

etmemesi amaçlanmıştır. Ancak, fikstür ile levha arasında doğrudan bir bağlantı (vida, perçin, vb) olmadığından, belirtilen yönde bir miktar hareketin oluşabileceği de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, öncelikle deney şartlarına uygun şekilde, levha sınırlarındaki düğüm noktaları, yer değiştirmeler sıfır olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 4.8). Analizin son bölümünde ise sadece çarpma yönündeki yer değiştirmeler kısıtlanarak oluşturulan sınır koşulu ile tüm çarpma hızları için sayısal çözümler tekrarlanmıştır.



Şekil 4.8: Levhada sabit mesnet sınır koşulu

Modeldeki başlangıç koşulu ise merminin (yüksük ve kurşun) başlangıç hızı, yani deneylerde ölçülen çarpma hızıdır.

4.2.4 Mermi-levha temas tanımı

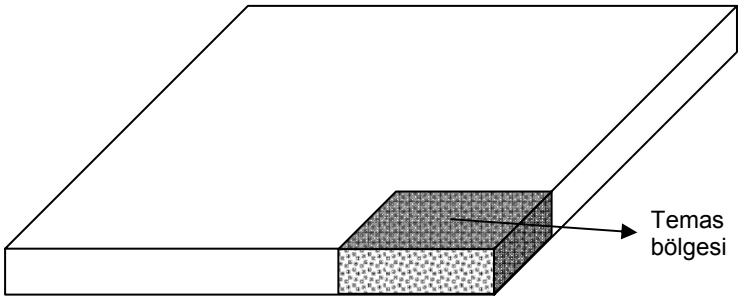
Yüksek hızlı çarpma içeren bir sayısal modelin kuşkusuz en önemli unsurlarından biri de mermi ile levha arasındaki temasın tanımlanmasıdır.

Modelde, uyarlanabilir yüzey teması (adaptive surface contact) kullanılmıştır. Bu temas türünde, temas tanımlanan yüzeylerde bulunan elemanların kritik birim şekil değiştirme değerlerine ulaşıp analiz dışına alınmalarına bağlı olarak temas yüzeyleri güncellenir. Bu elemanlardan iş görmez hale gelenlerin (failure) yerine, altlarında bulunan elemanlar temas elemanı olarak atanır [117].

Öncelikle, iki ayrı katı bölümden oluşan mermi için kurşun ve yüksük arasında bir temas tanımlanmıştır. Merminin levha ile ilk temasının ardından, farklı malzeme

özelliklerine sahip olan bu iki parça arasındaki temas merminin hasar biçimini yakından etkileyecektir.

İkinci olarak levha ile mermi (yüksük-kurşun) arasında uyarlanabilir temas tanımlanmıştır. Mermi ile temas halinde olan bölüm levha ortasında, daha yoğun elemanların kullanıldığı ağ yapısına sahip olan bölümdür (Şekil 4.9). Analiz boyunca levhanın diğer kısımlarının levha ile teması söz konusu olmayacağından temas tanımına dâhil edilmemiştir. Analiz süresinin kısaltılması amacıyla bu yol izlenmiştir.



Şekil 4.9: Levhada temas tanımlanan bölüm (1/4 model)

4.2.5 Malzeme modeli

Kullanılan malzeme modeli, özellikle yüksek hızlı çarpma gibi dinamik uygulamalarda, sonlu elemanlar benzetiminin yakınsaklığını büyük ölçüde etkilemektedir [119].

Yüksek hızlı çarpma gibi dinamik uygulamalarda kullanılmak üzere önerilmiş çeşitli parametreler içeren malzeme modelleri mevcuttur. Bu modellerin içerdiği malzeme özelliklerine yönelik katsayıların belirlenmesi için SHPB gibi deneysel cihaz ve yöntemler kullanılmaktadır [120,121]. Bu parametrelerin belirlenmesindeki zorluklar nedeniyle genellikle daha basit modeller tercih edilmektedir.

Pek çok ticari sonlu elemanlar yazılımının seçenekleri arasında yer alan Johnson-Cook bünye denklemi doğrusal termo-elastisite, akma, plastik akma, birim şekil değiştirme pekleşmesi, birim şekil değiştirme hızı etkisi, adyabatik ısınmaya bağlı yumuşama gibi çeşitli faktörleri içerdiğinden, yüksek hızlı çarpma için oldukça uygun bir modeldir [31]. Bu modele göre eşdeğer gerilme şu şekilde ifade edilebilir;

$$\bar{\sigma} = \left[A + B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n} \right] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left(1 - \hat{T}^{m} \right) \qquad \textbf{(4.1)}$$

Burada, A, B, C, n ve m malzeme parametreleri, $\bar{\varepsilon}^{pl}$ eşdeğer plastik birim şekil değiştirme, $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$ eşdeğer birim şekil değiştirme hızı, $\dot{\varepsilon}_0$ referans birim şekil değiştirme hızı ve $\hat{T}$ boyutsuz sıcaklıktır. $\hat{T}$, şöyle yazılır;

$$\hat{T} = \frac{T - T_0}{T_e - T_0}\ , \quad T_0 \le T \le T_e \tag{4.2}$$

Bu denklemde yer alan T anlık sıcaklık, T_e malzemenin ergime sıcaklığı ve T_0 oda sıcaklığıdır.

Dinamik yükleme ve yüksek birim şekil değiştirme hızları için kullanılan bir diğer malzeme modeli de Cowper-Symonds bünye denklemidir [56]. Bu modelde, statik akma gerilmesi σ_0 ile yüksek birim şekil değiştirme hızlı dinamik yük altında elde edilen akma gerilmesi σ_d arasındaki şu ilişki kullanılmaktadır;

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{1/p} \tag{4.3}$$

(4.3) denkleminde D ve p deneysel olarak elde edilen katsayılardır.

Oluşturulan sayısal modelin sonuçlarının güvenilirliği büyük ölçüde malzeme davranışının doğru temsil edilmesine bağlı olduğundan, deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlardan, Johnson-Cook bünye denklemi katsayıları mevcut olan AA 2024 T351 üzerinde sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir [93].

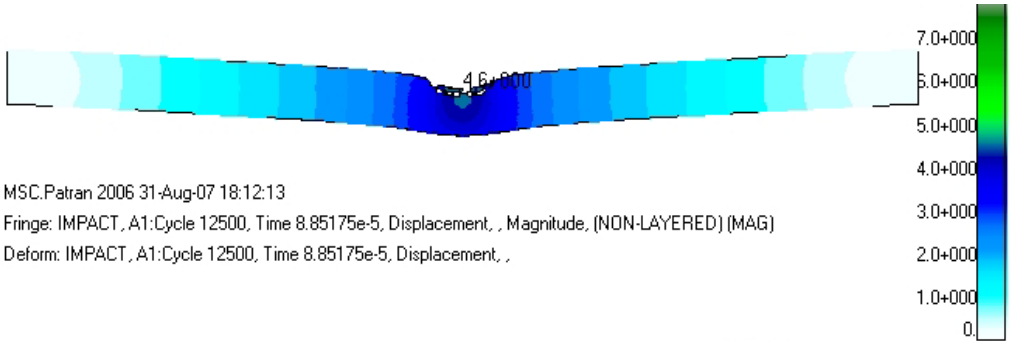
Böyle bir çarpma olayında, mermide oluşan hasar, levhanın balistik dayanımı ile yakından ilgilidir. Merminin başlangıçta sahip olduğu kinetik enerjinin bir bölümünün mermide meydana gelen plastik deformasyon için harcanmasının yanında, hasara uğrayan merminin delicilik özelliğinin ve böylece levhadaki delinme miktarının azalması söz konusudur. Deneyler boyunca belirlenen bu önemli durumdan yola çıkılarak, merminin rijit olarak tanımlanmasının modelde önemli bir hataya neden olacağı değerlendirilerek mermi için (pirinç yüksük ve kurşun) elasto-plastik malzeme modeli ve özellikleri kullanılmıştır [101].

4.3 Analiz Sonuçları

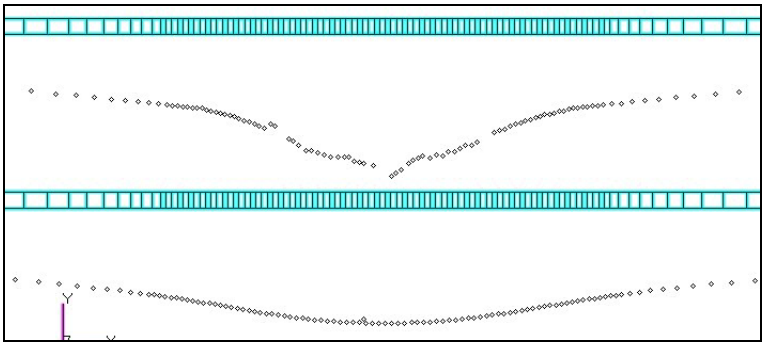
Analizler için 1.60 GHz işlemci ve 768 MB RAM donanımına sahip bir kişisel bilgisayar kullanılmıştır. Bu bölüme kadar ayrıntıları verilmiş olan modelin çalıştırılması için 32500 saniye (9 saat) civarında bir zaman harcanmıştır.

Analiz başlangıcındaki zaman adımı $0.15 \cdot 10^{-8}\ s$ ve analizin tamamı boyunca kullanılacak en küçük zaman adımı $0.045 \cdot 10^{-8}\ s$ olarak belirlenmiştir.

Mermi hızları için 3. grup (AA 2024 T351, 6.35 mm) levhaların atış sonuçlarını gösteren Tablo 3.7'nin ilk bölümü kullanılmıştır. Buna göre, 355 m/s mermi hızı ile geçekleştirilen ilk analize ait sonuçlar değerlendirildiğinde, deney sonuçlarına paralel olarak mermiyi oluşturan yüksük ve kurşunun deforme olduğu, levhada ise bir miktar delinme ile birlikte eğilme olduğu belirlenmiştir. Levha kesitinin analiz sonundaki görüntüsü Şekil 4.10'dadır. Levha kesitinin alt ve üst yüzeylerinin başlangıçtaki ve analiz sonundaki konumları ise Şekil 4.11'de görülmektedir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 incelendiğinde, deneylerde gözlenen sonuçlarla sayısal sonuçların, genel deformasyon biçimleri açısından uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.10: Levha kesitinin analiz sonundaki görüntüsü (V_0=355 m/s)

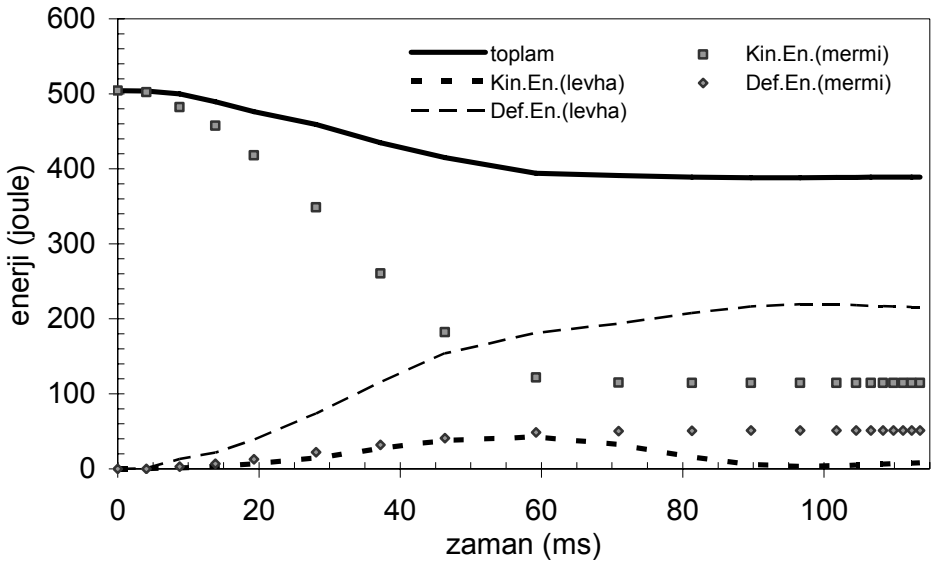


Şekil 4.11: Levha alt ve üst yüzeylerindeki deformasyon (V_0=355 m/s)

Yüksek hızlı çarpma içeren bir sayısal analizde kontrol edilmesi gereken parametrelerin başında enerjinin korunup korunmadığı gelmelidir. Merminin

başlangıçta sahip olduğu kinetik enerji mermi ve levhada deformasyon enerjisine dönüşmelidir.

Şekil 4.12'ye göre, 355 m/s'lik mermi ilk hızı nedeniyle, başlangıçtaki enerji miktarı merminin kinetik enerjisine (504 Joule) eşittir. Merminin levhaya çarpmasından itibaren, mermi ve levhada deformasyon enerjisi ile birlikte levhada oluşan yer değiştirme nedeniyle kinetik enerji değerleri artmaya başlamaktadır. Merminin tamamen durduğu an olan 60 μs civarından itibaren levha bir miktar geri salınım yaptığından, kinetik enerjisi azalmaktadır. Grafikte, bu noktadan sonra mermi durmuş olduğu halde, hem mermi hem de levhada kinetik enerji bulunmasının nedeni, iş görmezlik sınırını aştığı için analiz sonuçlarında görülmeyen ve serbest olarak hareketlerine devam eden elemanların sahip oldukları kinetik enerjidir. Toplam enerjide, merminin durduğu ana kadar görülen azalma ise temas tanılaması esnasında modele girilmiş olan sürtünme katsayısı nedeni ile kaybolan enerjidir. Bu nedenle, grafikte toplam enerjideki azalmayı başlangıçtaki kinetik enerjinin ısıya dönüşen miktarı olarak düşünmek mümkündür.



Şekil 4.12: Enerji dağılımı

Analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen bir başka olay da mermide (pirinç, kurşun) meydana gelen şekil değişimidir. Şekil 4.13'te kurşun bölümün deneyler sonundaki görüntüleri yer almaktadır.

Şekil 4.14'te ise kurşunun sayısal çalışmanın sonundaki görüntüleri bulunmaktadır. Sayısal analizden elde edilen mermi görüntüsü, uğradığı ana hasar biçimi açısından deney sonuçları ile benzerlik taşımaktadır.

Benzer şekilde, merminin kurşunu tutan parçası olan pirinç yüksükte meydana deformasyon da çarpmanın gelişimi açısından önem taşımaktadır. Şekil 4.15'te pirinç yüksüğün atışlar sonundaki görüntüleri yer almaktadır.

Sayısal çözüm sonunda, pirinç yüksüğün görüntüsü ise Şekil 4.16'da yer almaktadır. Hasar biçimleri açısından sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleri ile benzerlik taşımaktadır.

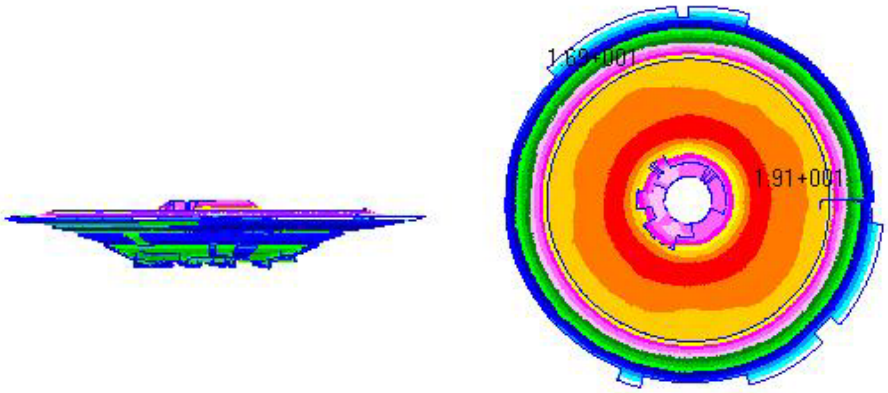


a)



b)

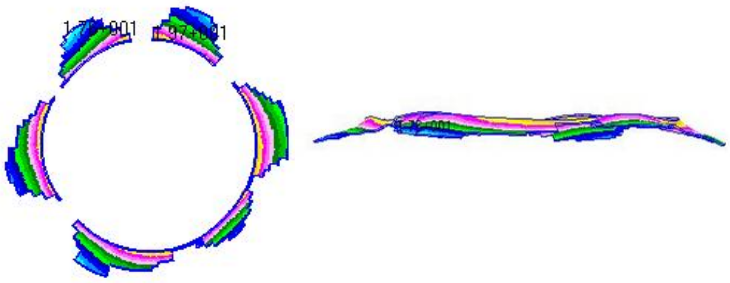
Şekil 4.13: Kurşunda oluşan hasar a) yan görünüş, b) alt-üst görünüş



Şekil 4.14: Kurşunda oluşan hasar (sayısal çözüm)



Şekil 4.15: Pirinç yüksükte meydana gelen hasar



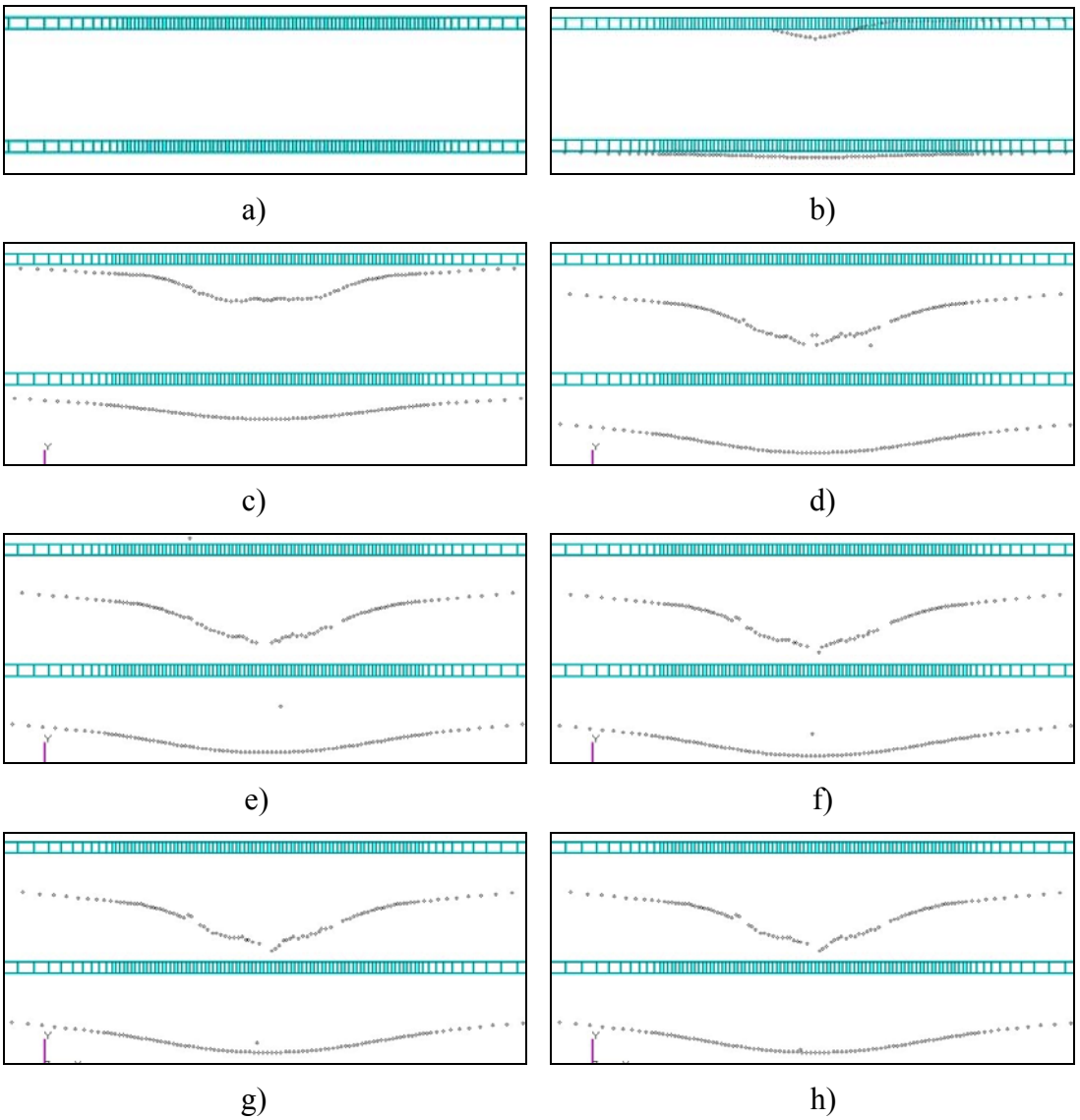
Şekil 4.16: Pirinç yüksükte meydana gelen hasar (sayısal çözüm)

Deneyler esnasında, çarpma sonucunda levhada meydana gelen hasarın seviyesini belirlemek amacıyla levha ön yüzündeki çökme ve arka yüzündeki şişme değerleri 3D-CMM cihazı ile ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda, 3. grup (AA 2024 T351, 6.35 mm) levhalara yapılan 355 m/s mermi hızındaki 3-2 numaralı atışa ait değerler çökme için 4.686 mm ve şişme için 4.094 mm olarak elde edilmiştir (Tablo 3.7).

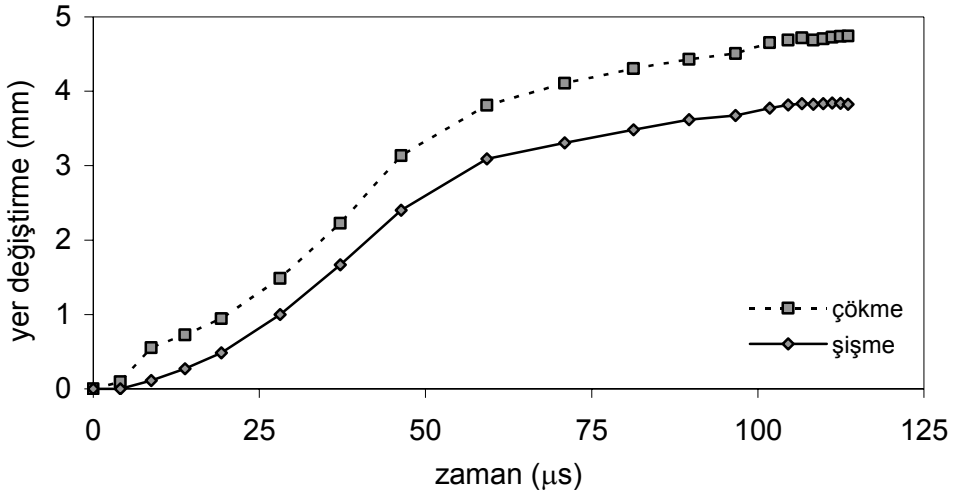
Sayısal analiz sonucunda ise aynı atış için çökme değeri 4.742 mm, şişme değeri ise 3.827 mm olarak belirlenmiştir. Sayısal değer elde edilirken, levhanın merkezinden itibaren her iki yönde 10 adet düğüm noktasına ait yer değiştirme değerinin ortalaması alınmıştır. Böylece, 3D-CMM cihazı ile yapılan ölçümler esnasındaki değere daha yakın bir sonuç alınması amaçlanmıştır.

Levha orta hattının yer değişimi açısından yapılacak bir karşılaştırma da sonuçların sağlıklı olarak karşılaştırılabilmesine katkı sağlayacaktır. Levha orta hattın deneyler sonunda ölçülen yer değiştirme miktarı 4.390 mm, sayısal çözümdeki yer değiştirme miktarı ise 4.285 mm olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de, 355 m/s mermi hızında levha alt ve üst yüzeylerinde oluşan hasarın zamana bağlı gelişimi izlenmektedir.



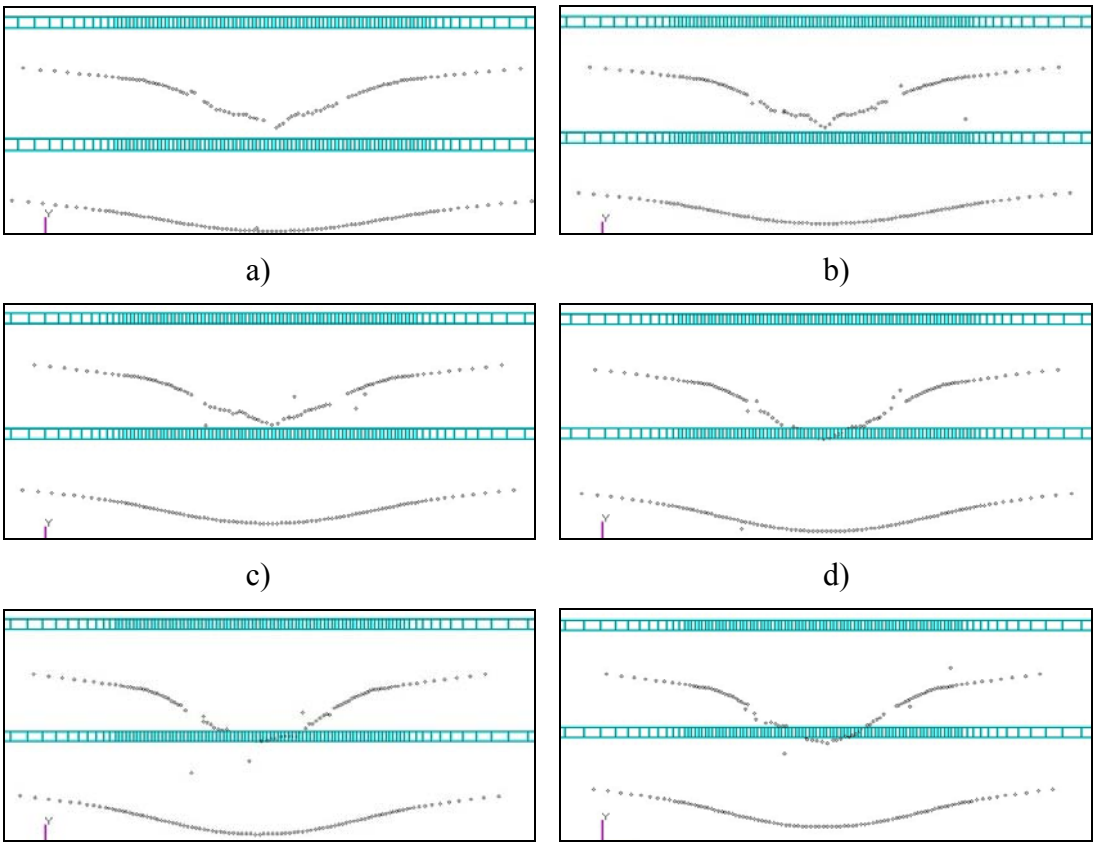
Şekil 4.17: Levhada oluşan hasarın gelişimi (V_0=355 m/s) a)t=0, b)t=14 μs, c)t=37 μs, d)t=70 μs, e)t=97 μs, f)t=107 μs, g)t=111 μs, h)t=114 μs



Şekil 4.18: Levhada oluşan hasarın zamana göre değişimi (V_0 = 355 m/s)

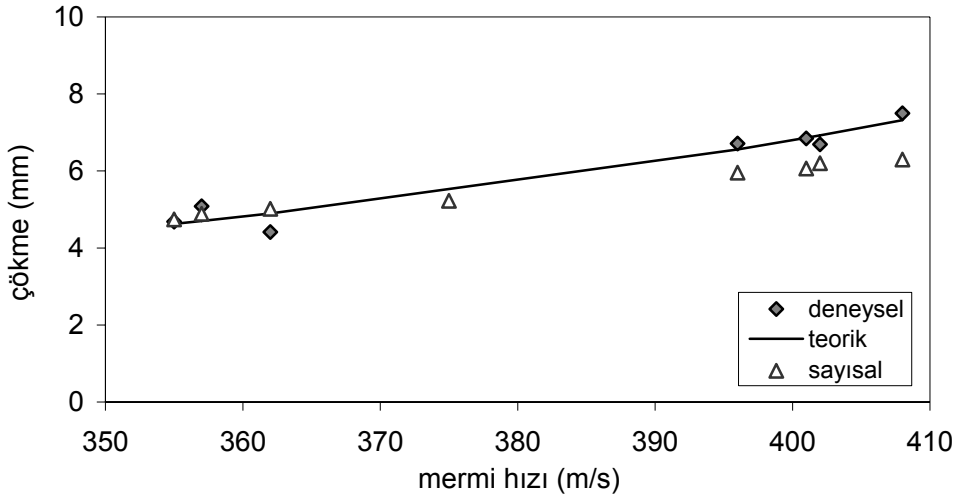
Levhadaki çökme ve şişme miktarlarının zamana göre değişimi incelendiğinde, çökme miktarı ile şişme miktarının paralel olarak ilerlemedikleri görülmektedir. Çarpmanın ilk anlarında, merminin temas ettiği noktada oluşan delinme nedeniyle çökme değeri daha fazla artmaktadır. Arka yüzeyde oluşan şişme ise çökmeyi izlemektedir. Ayrıca, çarpmanın ilk anlarında adımlar arasındaki farkların daha belirgin olduğu, sonlara doğru ise değerlerin daha küçük miktarlarda değiştiği anlaşılmaktadır. Analiz esnasında, modelleme sırasında istenen değerlere bağlı olarak zaman adımları bu değişime uygun şekilde güncellenmektedir. Böylece, mümkün olan en hassas çözümün, analiz süresini uzatmadan elde edilmesi sağlanmaktadır.

Şekil 4.19'da, deneylerde ölçülen çarpma hızlarında gerçekleştirilen sayısal çözümlerde, levhanın analiz sonundaki görüntüleri yer almaktadır.

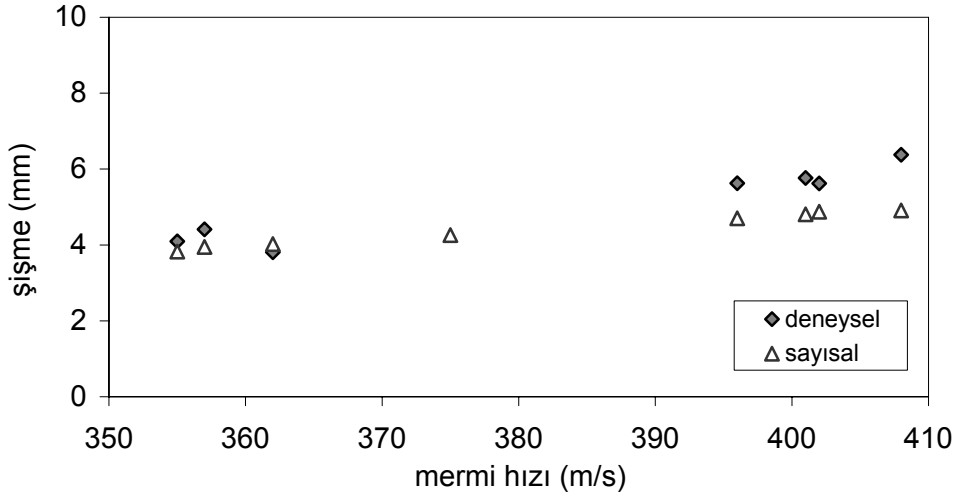


Şekil 4.19: Levhada oluşan hasar a)V_0=355 m/s, b)V_0=362 m/s, c)V_0=375 m/s, d)V_0=396 m/s, e)V_0=401 m/s, f)V_0=408 m/s

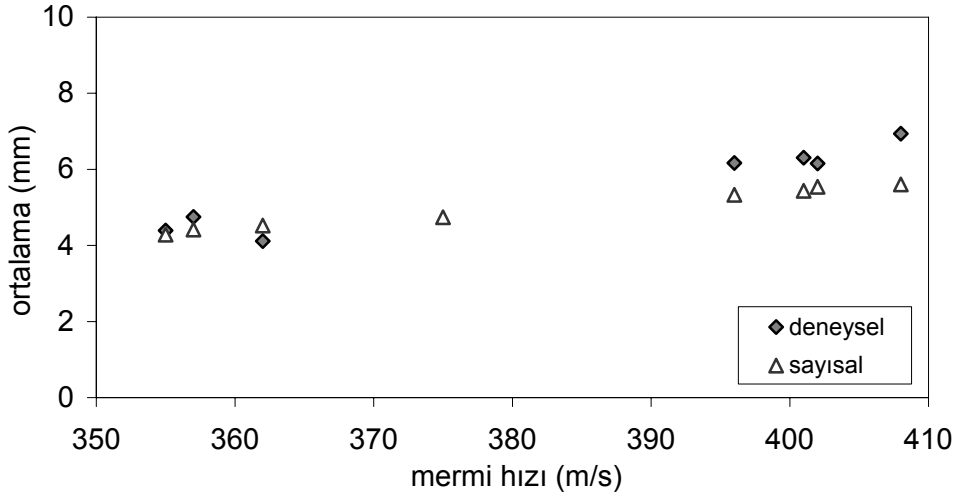
Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular deneysel ve sayısal sonuçları içerecek şekilde Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de görülmektedir.



Şekil 4.20: Levhada oluşan çökme miktarları

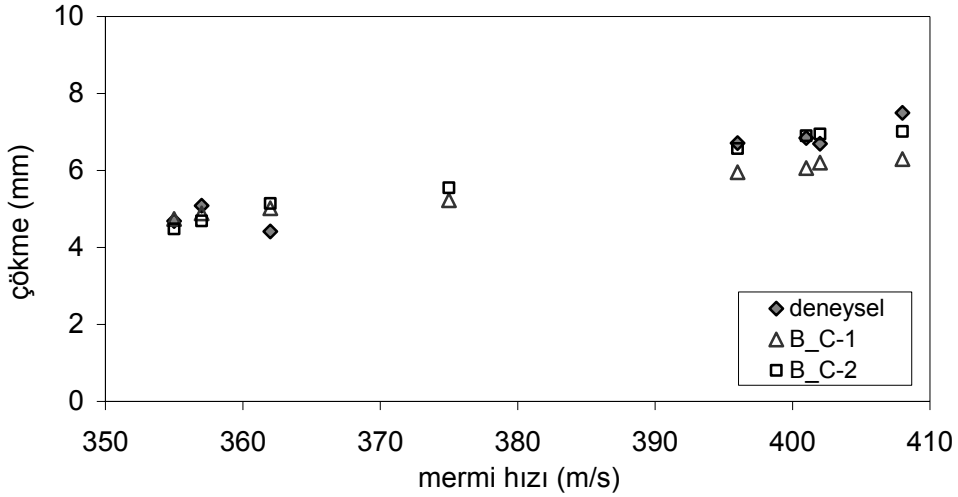


Şekil 4.21: Levhada oluşan şişme miktarları

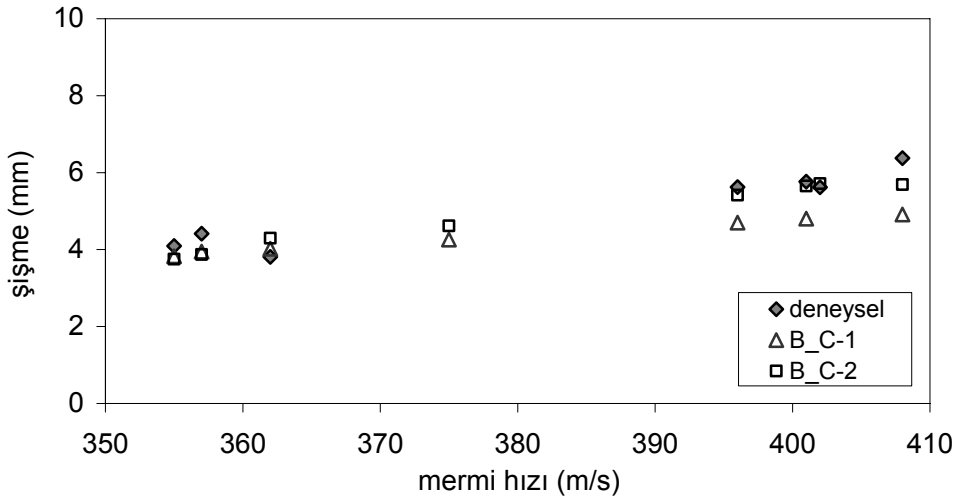


Şekil 4.22: Levha orta hattında oluşan yer değiştirme

Deneyler esnasında kullanılan çoklu atış fikstürü ile oluşturulmuş olan sınır koşulları sabit mesnet olarak (B_C-1) sayısal çözüme uygulanmıştır. Fikstür ile hedef levhalar arasında vida ya da benzeri bir sabitleme yöntemi uygulanmamış olduğundan, yatay düzlemde (mermi çarpma yönüne dik) levha kenarları yer değiştirme yönünde serbest bırakılarak (B_C-2) sayısal çözümler tekrarlanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sınır şartlarının uygulanması durumunda, levhada oluşan çökme ve şişme değerleri, deneysel sonuçlar ve sabit mesnet durumunda elde edilen değerlerle birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te görülmektedir.



Şekil 4.23: Sınır koşullarının çözüme etkisi (çökme)



Şekil 4.24: Sınır koşullarının çözüme etkisi (şişme)

Her iki sınır koşulu ile gerçekleştirilen sayısal çözümler ve deney sonuçlarını gösteren grafikler incelendiğinde, yatay düzlemde yer değiştirmelerin serbest

bırakıldığı (B_C-2) durumda, çözümün deney sonuçlarına daha yaklaştığı anlaşılmaktadır.

Sayısal çözümler için malzemenin dinamik davranışlarını modellemekte başarılı sonuçlar verdiği bilinen Johnson-Cook bünye denklemi katsayılarının mermiyi oluşturan pirinç yüksük ve kurşun için elde edilerek modelde kullanılması durumunda, sayısal sonuçların daha da iyileşeceği öngörülmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma dayanımlarına mermi hızı, levha kalınlığı gibi girdilerle birlikte çeşitli performans artırıcı yöntemlerin (yüzey kaplama, destek katmanı eklenmesi) etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

5.1 Deneysel Sonuçlar

Öncelikle, üç çeşit alüminyum alaşımın (2024 T351, 6061 T651, 7075 T651) mevcut balistik dayanımlarının belirlenmesi amacıyla ön testler yapılmıştır. İncelenen levhalar arasında en yüksek dayanımı gösterenin AA 7075 T651 olduğu, bunu sırasıyla AA 2024 T351 ve AA 6061 T651 alaşımların izlediği belirlenmiştir.

Levhalara çoklu atışın sağlanması ve test edilen levha parçasına ait sınır koşullarının temsil edilmesi amacıyla bir çoklu atış fikstürü tasarlanıp üretilmiş ve atışların tamamında kullanılmıştır.

Atışlardan sonra levhalarda oluşan çökme ve şişme miktarları 3D-CMM cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Alüminyum alaşımların balistik dayanım seviyeleri performans belirleme amaçlı ön testlerle uyumlu olarak elde edilmiştir.

Levhaların ön yüzlerine ısıl püskürtme yöntemi ile dört çeşit kaplama (Metco 68F-NS-1 (kobalt, molibden, krom tozu), Metco 101SF (gri alümina tozu), Metco 201NS (zirkonyum oksit tozu) ve Metco 71NS (tungsten karbit-kobalt tozu)) uygulanmıştır. Levhaların balistik dayanımlarına kaplama uygulamalarının etkilerinin belirlenmesi amacıyla atışlar hem kaplamasız, hem de farklı kaplama çeşitleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çeşitli kaplamalar uygulanmış levhaların atış testleri sonucunda, mermilerin çarpma noktaları civarlarında kaplamalarda yüzeyden ayrılmalar gözlenmiştir. Bu ayrılmaların, Metco 101SF (gri alümina) Metco 71NS (tungsten karbit-kobalt) kaplamalarda, levhanın tekrarlı atış için kullanılmasına izin vermeyecek seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Diğer iki kaplamanın uygulandığı levhaların (Metco 68F-NS-1 (kobalt, molibden, krom) Metco 201NS (zirkonyum oksit)) çarpma dayanımlarında

ise belirgin artışlar gözlenmiştir. Hem delinmeyle sonuçlanmayan mermi hızı seviyelerinin arttığı, hem de levhadaki çökme miktarlarının azaldığı belirlenmiştir.

Kaplama uygulanmış levhaların ardından, UHMWPE elyaflı kompozitlerden üretilen 4.00 mm kalınlığında arka destek katmanı eklenmiş levhalara atışlar gerçekleştirilmiştir. Bu atışların sonucunda, kaplama uygulanmış levhalara yakın balistik dayanım gözlemlenmiştir.

Yüksek hızlı çarpma olaylarında, merminin sahip olduğu kinetik enerjinin önemli bir bölümünün ısı olarak biçim değiştirdiği bilinmektedir. Bu davranışın belirlenmesi amacıyla, mermi çarpma bölgesindeki sıcaklıklar ışınım (kızıl ötesi) yoluyla sıcaklık ölçen FLUKE 576 uzaktan sıcaklık ölçer cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda, kinetik enerjinin ısıya dönüşme oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Genel olarak, sıcaklık değerleri literatürde yer alan bilgilerle örtüşecek şekilde, çarpmanın ardından ani bir yükselişle en yüksek değerine ulaşmış ve belirli bir zaman içinde başlangıçtakine yakın seviyelere düşmüştür. Ancak, hem ölçülen en yüksek sıcaklık değeri, hem de başlangıç sıcaklığına düşme zamanı bakımından, beklenen sonuçlar elde edilememiştir. Bu nedenle, söz konusu sıcaklık ölçüm sonuçlarının deneysel veri olarak değerlendirilemeyeceğine karar verilmiştir.

Elde edilen sınırlı sayıdaki deneysel verinin, balistik sınır hızın altında olmak koşulu ile herhangi bir mermi hızı için elde edilebilmesi amacıyla, levhada oluşacak çökme değerini verecek üstel bir ifade önerilmiştir. 4.80 mm ve 6.35 mm kalınlıklarındaki 2024 T351 alaşımı levhalar için en küçük kareler yöntemi ile belirlenen balistik çarpanlar kullanılarak, önerilen ifadenin deneysel sonuçları temsil edebilme gücünün yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan atış testlerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda, en yüksek balistik performansa sahip olan 7075 alaşımı levhalar polietilen (PE 1000) destek katmanlı olarak üç farklı tasarım koşulunda test edilmişlerdir. Alüminyum ve polietilen katman kalınlıkları sabit olmak üzere, sırasıyla çarpma yönünde polietilen ve arkasında alüminyum, çarpma yönünde alüminyum ve arkasında polietilen, son olarak da ön ve arka alüminyum levhaların arasına polietilen olacak şekilde atışlar gerçekleştirilmiştir. Alüminyum-polietilen katman sıralamasının kullanıldığı tasarım dışında, yapının tüm katmanlarında delinme tespit edilmiş, Al-PE katman sıralamasında ise mermi polietilen levha tarafından tutulmuştur. Geniş bir bölgede

oluşan yapısal kırıklar nedeniyle balistik direncini kaybeden alüminyum levha tarafından kısmen durdurulmuş ve mermi uç biçimi bozuntuya uğratılmış mermilerin kalan kinetik enerjilerinin alüminyum levhanın hemen arkasına yerleştirilmiş olan destek katman tarafından emilmesi nedeniyle böyle bir sonuç elde edilmiştir. Böylece, alüminyum levha ve destek kompozit katman kullanılan katmanlı bir yapı için en yüksek balistik dayanımın, çarpma yönüne göre alüminyum-polietilen sıralamasıyla elde edilebileceği deneysel olarak gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlarda çarpma nedeniyle oluşan hasar biçimleri de birbirlerinden farklılıklar göstermektedirler. Alaşımları meydana getiren elementlerin karışım oranları ve uygulanan ısıl işlemler nedeniyle levhaların sertlik, tokluk, akma dayanımı, süneklik gibi özellikleri hasar biçimlerindeki farklılaşmanın kaynağını oluşturmaktadır. 6061 alaşımlar sünek bir yapıya sahip olduklarından, çarpma yönündeki mermi-levha temas sınırlarında oluşan kayma yüzeyleri nedeniyle silindirik bir parçanın levhadan ayrılması şeklinde hasara uğramakta ve delinmektedirler. 2024 ve 7075 alaşımlarda ise ana hasar biçimini kırılmalar oluşturmaktadır. 2024 alaşımı levhalarda, levha arka yüzeyinde, çarpma noktası izinde meydana gelen şişme o bölgede kırılma ve levhadan kopmalara neden olmaktadır. 7075 alaşımı levhalarda ise arka yüzeyde, çarpma noktasına karşılık gelen nokta etrafında, iki yönde, levha ön yüzeyine doğru daralan dairesel kırılma ve sonucunda kopma meydana gelmektedir. Bu levhalara oranla daha ince olan 2.00 mm kalınlığında levhalarda ise yaprak şeklinde açılmayla karşılaşılmıştır.

5.2 Sayısal Sonuçlar

Sayısal modelleme için MSC PATRAN ve çözüm için MSC DYTRAN ticari sonlu elemanlar yazılımları kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T351 levhalara yapılan çeşitli mermi hızlarındaki atışlar üzerine kurulan modelde, mermi iki ayrı parçadan (pirinç yüksük ve kurşun) oluşturulmuş, modelin tamamında katı elemanlar kullanılmıştır. Deney sonuçları ile uyumlu sayısal sonuçların elde edilebilmesi için mermi deforme olabilir şekilde modellenmiştir. Mermi için elasto-plastik, hedef levha için ise Johnson-Cook bünye denklemi kullanılmıştır. Analizde, levha sınırlarında önce sabit mesnet sınır koşulu kullanılmış, daha sonra sadece çarpma yönünde yer değiştirmeler kısıtlanarak oluşturulan yeni sınır koşulu için çözüm yapılmıştır.

Sayısal çözüm sonunda, mermide (pirinç yüksük ve kurşun) deneysel sonuçlara benzer hasar biçimlerinin meydana geldiği belirlenmiştir. 6.35 mm kalınlığındaki AA 2024 T351 levhalar için tüm mermi hızlarında levhada oluşan çökme ve şişme değerleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar sonucunda, levha sınırlarında sadece çarpma yönünde yer değiştirmelerin kısıtlanmasıyla oluşturulan sınır koşulunun, sabit mesnet sınır koşuluna oranla deneysel bulgulara daha yakın sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Merminin dinamik yükler altındaki davranışlarının modellenmesi için Johnson-Cook bünye denklemi katsayılarının elde edilerek kullanılması durumunda, sıcaklık etkileri tam olarak incelemeye dâhil edilebileceğinden, elde edilen yakınsaklığın iyileşeceği öngörülmektedir.

Bu sonuçlara göre, MSC DYTRAN yazılımı kullanılarak deneysel olarak incelenmeyen mermi hız ve şekillerine ait sonuçların büyük bir doğrulukla elde edilmesi mümkün olabilecek, böylece deney için harcanacak malzeme ve zaman azaltılarak tasarım hedeflerine daha hızlı ulaşılabilecektir.

5.3 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Çalışmanın deneysel bölümünde, ısıl işlemlerin malzeme mukavemetine, dolayısıyla çarpma dayanımına etkileri görülmüştür. Bu kapsamda, farklı süreçlerden geçirilerek ısıl işlem uygulanmış alüminyum levhaların balistik dayanımlarına ısıl işlem parametrelerindeki değişikliklerin etkileri, ayrıca 7XXX serisi alüminyumlar üzerindeki sertlik artırıcı etkileri nedeniyle, RRA ısıl işlemi gelecek dönemde incelenmesi gerekli alanlardan biri olmalıdır.

Mermi kinetik enerjisinin önemli bir bölümünün ısı enerjisi olarak biçim değiştirdiği bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında da incelenen, ancak sonuçları üzerinde yapılan değerlendirmeler neticesinde geliştirilmeye ihtiyaç duyulduğu belirlenen, levhadaki sıcaklık değişimleri ve ısı enerjisi ilişkileri konusunda ayrıntılı bir çalışma yapılması uygun olacaktır.

Yüksek hızlı çarpma nedeniyle meydana gelen hasar biçimlerinin deneysel bölümde incelenen alaşımlar için farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Oluşan hasarın malzemenin mikroyapısında meydana getirdiği değişimin ya da malzemenin mikroyapısının hasar biçimleri üzerindeki etkilerinin yapısal dayanımın artırılması

için önem taşıdığı ve elde mevcut bulunan malzemeler kullanılarak incelenmesi faydalı olacaktır.

Sayısal çözümde kullanılan malzeme modelinin sonuçları yakından etkilediğini çeşitli araştırmalar ortaya koymuştur. Bu noktadan hareketle, dinamik testler yapılarak çeşitli malzeme modellerine ait katsayıların elde edilmesi ve sayısal çözümlerde kullanılması uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Vural, M.,** 2000. Ballistic performance and impact behavior of alumina armor ceramics, *Ph.D. Thesis,* Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul.

[2] **Børvik, T., Clausen, A.H., Eriksson, M., Berstad, T., Hopperstad, O.S. and Langseth, M.,** 2005. Experimental and numerical study on the perforation of AA6005-T6 panels, *Int. J. Impact Engineering,* **32,** 35-64.

[3] **Candan, C., Akdemir, A. ve Şahin, Ö,** 2005. Hafif silah tehdidine karşı UHMW-PE ve Seramik zırhların balistik koruma performanslarının incelenmesi, *7. Uluslararası Kırılma Konferansı*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 19-21 Ekim, s. 891-900.

[4] **Gama, B.A., Bogetti, T.A., Fink, B.K., Yu, C., Claar, T.D., Eifert, H.H. and Gillespie, J.W.,** 2001. Aluminium foam integral armor: a new dimension in armor design, *Composite Structures,* **52,** 381-395.

[5] **Özşahin, E.,** 2003. Entegre bir zırhın, yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışları, *Yüksek Lisans Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] **Andersen, C and Dannemann, K.,** 2001. Deformation and damage of two aluminium alloys from ballistic impact, *Proceedings of the 12th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter*, Atlanta, June 24–29.

[7] **Nemat-Nasser, S., Isaacs, J.B. and Liu, M.,** 1998. Microstructure of high-strain, high-strain rate deformed tantalum, *Acta Materialia,* **46,** 1307-1325.

[8] **Cheng, J., Nemat-Nasser, S. and Guo, W.,** 2001. A unified constitutive model for strain-rate and temperature dependent behavior of molybdenum, *Mechanics of Materials,* **33,** 603-616.

[9] **Kapoor, R. and Nemat-Nasser, S.,** 1998. Determination of temperature rise during high strain rate deformation, *Mechanics of Materials,* **27,** 1-12.

[10] **Nemat-Nasser, S. and Kapoor. R.,** 2001. Deformation behavior of tantalum and a tantalum tungsten alloy, *Int. J. Plasticity,* **17,** 1351-1366.

[11] **Rittel, D.,** 1998. The influence of temperature on dynamic failure mode transitions, *Mechanics of Materials,* **30**, 217-227.

[12] **Rittel, D.,** 1999. On the conversion of plastic work to heat during high strain rate deformation of glassy polymers, *Mechanics of Materials,* **31**, 131-139.

[13] **Nemat-Nasser, S., Cheng, J. and Guo, W.G.,** 1999. Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium, *Acta Materialia,* **47,** 3705-3720.

[14] **Nemat-Nasser, S. and Guo, W.,** 2000. High strain-rate response of commercially pure vanadium, *Mechanics of Materials,* **32,** 243-260.

[15] **Rittel, D.,** 2000. Experimental investigation of transient thermoplastic effects in dynamic fracture, *Int. J. Solids and Structures,* **37**, 2901-2913.

[16] **Nemat-Nasser, S., Guo, W-G. and Kihl, D.P.,** 2001. Thermomechanical response of AL-6XN stainless steel over a wide range of strain rates and temperatures, *J. Mechanics and Physics of Solids,* **49,** 1823-1846.

[17] **Zaretsky, E.B., Kanel, G.I., Razorenov, S.V. and Baumung, K.,** 2005. Impact strength properties of nickel-based refractory superalloys at normal and elevated temperatures, *Int. J. Impact Engineering,* **31,** 41-54.

[18] **Tanaka, K., Nishida, M. and Takada, N.,** 2006. High-speed penetration of a projectile into aluminum alloys at low temperatures, *Int. J. Impact Engineering,* **33**, 788-798.

[19] **Rosakis, P., Rosakis, A.,J., Ravichandran G. and Hodowany, J.,** 2000. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals, *J. Mechanics and Physics of Solids,* **48,** 581-607.

[20] **Shen, W.Q.,** 1995. Dynamic plastic response of thin circular plates struck transversely by nonblunt masses, *Int. J. Solids and Structures,* **32,** 2009-2021.

[21] **Nemat-Nasser, S., Guo, W-G., Nesterenko, V.F., Indrakanti, S.S. and Gu, Y-B.,** 1998. Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modelling, *Mechanics of Materials,* **33,** 425-439.

[22] **Nemat-Nasser, S., Guo, W. and Liu, M.,** 1999. Experimentally-based micromechanical modeling of dynamic response of molybdenum, *Scripta Materilia,* **40,** 859-872.

[23] **Simonsen, B.,C. and Lauridsen, L.,P.,** 2000. Energy absorption and ductile failure in metal sheets under lateral indentation by a sphere, *Int. J. Impact Engineering,* **24,** 1017-1039.

[24] **Cheng, J. and Nemat-Nasser, S.,** 2000. A model for experimentally-observed high-strain-rate dynamic strain aging in titanium, *Acta Materialia,* **48,** 3131-3144.

[25] **Rosakis, A.J. and Ravichandran, G.,** 2000. Dynamic failure mechanics, *Int. J. Solids and Structures,* **37,** 331-348.

[26] **Chen, X.W., Li, Q.M. and Fan, S.C.,** 2005. Initiation of adiabatic shear failure in a clamped circular plate struck by a blunt projectile, *Int. J. Impact Engineering,* **31,** 877-893.

[27] **Rittel, D., Ravichandran, G. and Venkert, A.,** 2006. The mechanical response of pure iron at high strain rates under dominant shear, *Materials Science&Engineering-A,* **432,** 191-201.

[28] **Nemat-Nasser, S., Maximenko, A. and Olevsky, E.,** 2006. Modeling the plastic response of thin metal membranes, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids,* **54,** 2474-2494.

[29] **Couque, H., Nicolas, G. and Altmayer, C.,** 2007. Relation between shear banding and penetration characteristics of conventional tungsten alloys, *Int. J. Impact Engineering,* **34**, 412-423.

[30] **Børvik, T., Clausen, A.H., Hopperstad, O.S. and Langseth, M.,** 2004. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose

steel projectiles-experimental study, *Int. J. Impact Engineering,* **30,** 367-384.

[31] **Gupta, N.K., Iqbal, M.A. and Sekhon, G.S.,** 2006. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminium plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles, *Int. J. Impact Engineering,* **32**, 1921-1944.

[32] **Gupta, N.K., Iqbal, M.A. and Sekhon, G.S.,** 2007. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates, *Int. J. Solids and Structures,* **44**, 3411-3439.

[33] **Piekutowski, A.J., Forrestal, M.J., Poormon, K.I. and Warren, T.L.,** 1999. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nose steel projectiles with striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s, *Int. J. Impact Engineering,* **23,** 723-734.

[34] **Forrestal, M.J. and Piekutowski, A.J.,** 2000. Penetration experiments with 6061-T6511 aluminum targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s, *Int. J. Impact Engineering,* **24,** 57-67.

[35] **Warren, T.L. and Poormon, K.I.,** 2001. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations, *Int. J. Impact Engineering,* **25,** 993-1022.

[36] **Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S. and Malo, K.A.,** 2002. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses-part I: Experimental study, *Int. J. Impact Engineering,* **27**, 19-35.

[37] **Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S. and Malo, K.A.,** 2002. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses-part II: Numerical study, *Int. J. Impact Engineering,* **27**, 37-64.

[38] **Dey, S., Børvik, T., Hopperstad, O.S., Leinum, J.R. and Langseth, M.,** 2004. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes, *Int. J. Impact Engineering,* **30,** 1005-1038.

[39] **Gupta, N.K. and Madhu, V.,** 1997. An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates, *Int. J. Impact Engineering,* **19,** 395-414.

[40] **Nesterenko, V.F., Goldsmith, W., Indrakanti, S.S. and Gu, Y-B.,** 2003. Response of hot isostatically pressed Ti–6Al–4V targets to normal impact by conical and blunt projectiles, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 137-160.

[41] **Chen, X.W., Li, Q.M. and Chen, Y.Z.,** 2003. Perforation of medium thick plate by a sharp projectile, *WIT Transactions on Engineering Sciences,* **49,** 147-156.

[42] **Warren, T.L., Hanchak, S.J. and Poormon, K.I.,** 2004. Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations, *Int. J. Impact Engineering,* **30,** 1307-1331.

[43] **Littlefield, D.L. and Dawson, A.,** 2006. The role of impactor shape and obliquity on crater evolution in celestial impacts, *Int. J. Impact Engineering,* **33,** 371-379.

[44] **Roisman, I.V., Yarin, A.L. and Rubin, M.B.,** 1997. Oblique penetration of a rigid projectile into an elastic-plastic target, *Int. J. Impact Engineering,* **19,** 769-795.

[45] **Yossifon, G., Rubin, M.B. and Yarin, A.L.,** 2001. Penetration of a rigid projectile into a finite thickness elastic-plastic target – comparison between theory and numerical computations, *Int. J. Impact Engineering,* **25,** 265-290.

[46] **Yossifon, G., Yarin, A.L. and Rubin, M.B.,** 2002. Penetration of a rigid projectile into a multi-layered target: theory and numerical computations, *Int. J. Engineering Science,* **40,** 1381-1401.

[47] **Chen, X.W. and Li, Q.M.,** 2003. Perforation of a thick plate by rigid projectiles, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 743-759.

[48] **Li, Q.M., Weng, H.J. and Chen, X.W.,** 2004. A modified model for the penetration into moderately thick plates by a rigid, sharp-nosed projectile, *Int. J. Impact Engineering,* **30,** 193-204.

[49] **Wijk, G., Hartmann, M. and Tyrberg, A.,** 2005. A model for rigid projectile penetration and perforation of hard steel and metallic target, *Swedish Defense Research Agency,* **FOI-R-1617-SE.**

[50] **Liu, D. and Strong, W.J.,** 2000. Ballistic limit of metal plates struck by blunt deformable missiles: experiments, *Int. J. Solids and Structures,* **37,** 1403-1423.

[51] **Roisman, I.V., Yarin, A.L. and Rubin, M.B.,** 2001. Normal penetration of an eroding projectile into an elastic-plastic target, *Int. J. Impact Engineering,* **25,** 573-597.

[52] **Rubin, M.B. and Yarin, A.L.,** 2002. A generalized formula for penetration depth of a deformable projectile, *Int. J. Impact Engineering,* **27,** 387-398.

[53] **Gee, D.J.,** 2003. Plate perforation by eroding rod projectiles, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 377-390.

[54] **Billon, H.,** 1998. A Model for Ballistic Impact on Soft Armor, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne.

[55] **Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S. and Malo, K.A.,** 1999. Ballistic penetration of steel plates, *Int. J. Impact Engineering,* **22,** 855-886.

[56] **Sciuva, M., Frola, C. and Salvano, S.,** 2003. Low and high velocity impact on Inconel 718 casting plates: ballistic limit and numerical correlation, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 849-876.

[57] **Lopez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R. and Navarro, C.,** 2005. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study, *Int. J. Impact Engineering,* **32,** 321-336.

[58] **Espinosa, H.D., Dwiwedi, S., Zavattieri, P.D. and Yuan,G.,** 1998. A numerical investigation of penetration in multilayered material/structure systems, *Int. J. Solid Structures,* **35,** 2975-3001.

[59] **Mahfuz, H., Zhu, Y., Haque, A., Abutalib, A., Vaidya, U., Jealani, S. and Gama, B.,** 2000. Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method, *Int. J. Impact Engineering,* **25,** 203-217.

[60] **Zukas, J.A. and Scheffler, D.R.,** 2001. Impact effects in multilayered plates, *Int. J. Solids and Structures,* **38**, 3321-3328.

[61] **Pereira J.M. and Lerch, B.A.,** 2001. Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment alications, **NASA/TM—2001-209660**

[62] **Yadav, S. and Ravichandran, G.,** 2003. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 557-574.

[63] **Kim, M-S., Shin, H-S. and Lee, H-C.,** 2003. The effects of back plate materials on perfect cone formation in impact-loaded soda-lime glass, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 281-290.

[64] **Übeyli, M., Yıldırım, R.O. ve Ögel, B.,** 2005. Alümina/AA2024-T6 katmanlı kompozitin balistik davranışının deneysel ve sayısal incelenmesi, *Zırh Teknolojileri Semineri,* Ankara, 10-11 Mart, s. 58-64.

[65] **Cerit, A.A., Karamış, M.B. ve Nair, F.,** 2005. Seramik partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin balistik performansının incelenmesi, *Zırh Teknolojileri Semineri,* Ankara, 10-11 Mart, s. 210-221.

[66] **Ben-Dor, G., Dubinsky, A. and Elperin, T.,** 2005. Optimization of two-component composite armor against ballistic impact, *Composite Structures,* **69,** 89-94.

[67] **Park, M., Yoo J. and Chung, D-T.,** 2006. An optimization of a multi-layered plate under ballistic impact, *Int. J. Solids and Structures,* **42,** 123-137.

[68] **Radin, J. and Goldsmith, W.,** 1988. Normal projectile penetration and perforation of layered targets, *Int. J. Impact Engineering,* **7,** 229-259.

[69] **Ben-Dor, G., Dubinsky, A. and Elperin, T.,** 1998. On the ballistic resistance of multilayered targets with air gaps, *Int. J. Solids and Structures,* **35,** 3097-3103.

[70] **Chocron, S., Anderson, C.E., Walker, J.D. and Ravid, M.,** 2003. A unified model for long-rod penetration in multiple metallic plates, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 391-411.

[71] **Şenel, F., Balya, B. ve Parnas, L.,** 2004. İleri kompozit zırh malzemelerin balistik analizi, *Savunma Teknolojileri Kongresi,* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 24-25 Haziran, s. 1-10.

[72] **Übeyli, M., Ögel, B. ve Yıldırım, R.,O.,** 2004. Katmanlama yapısının alumina/aluminyum katmanlı kompozitlerinin balistik davranımı üzerine etkisi, *Savunma Teknolojileri Kongresi,* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 24-25 Haziran, s. 79-88.

[73] **Fawaz, Z., Zheng, W. and Behdinan, K.,** 2004. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours, *Composite Structures,* **63,** 387-395.

[74] **Robbins, J.R., Ding, J.L. and Gupta, Y.M.,** 2004. Load spreading and penetration resistance of layered structures-a numerical study, *Int. J. Impact Engineering,* **30,** 593-615.

[75] **Übeyli, M., Yıldırım, R.O. ve Ögel, B.,** 2007. On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors, *Materials&Design,* **28,** 1257-1262.

[76] **Shokrieh M.M. and Javadpour, G.H.,** 2007. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor, *Composite Structures,* (article in press)

[77] **Chen, X., Chandra, N. and Rajendran, A.M.,** 2004. Analytical solution to the plate impact problem of layered heterogeneous material systems, *Int. J. Solids and Structures,* **41,** 4635-4659.

[78] **Zhu, G., Goldsmith, W. And Dharan, C.K.H.,** 1992. Penetration of laminated Kevlar® by projectiles-I. Experimental Investigation, *Int. J. Solids Structures,* **4,** 399-420.

[79] **Zhu, G., Goldsmith, W. and Dharan, C.K.H.,** 1992. Penetration of laminated Kevlar® by projectiles-II. Analytical Model, *Int. J. Solids Structures,* **4,** 421-436.

[80] **Billon, H.H. and Robinson, D.J.,** 2001. Models for the ballistic impact of fabric armour, *Int. J. Impact Engineering*, **25,** 411-422.

[81] **Tarım, N., Fındık, F. and Uzun, H.,** 2002. Balistic impact performance of composite structures, *Composite Structures,* **56,** 13-20.

[82] **Candan, C., Akdemir, A. ve Önal, G.,** 2003. Hafif silahlara karşı imal edilen para-aramid kompozit zırh malzemesinin balistik özellikleri, *6. Uluslararası Kırılma Konferansı*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 10-12 Eylül, s. 525-530.

[83] **Lim, C.T., Shim, V.P.W. and Ng, Y.H.,** 2003. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor, *Int. J. Impact Engineering,* **28**, 13-31.

[84] **Walley, S.M., Field, J.E., Blair, P.W. and Milford, A.J.,** 2004. The effect of temperature on the impact behaviour of glass/polycarbonate laminates, *Int. J. Impact Engineering,* **30,** 31-53.

[85] **Birol, Y.,** 2005. Hafif zırh uygulamaları için partikül takviyeli alüminyum kompozitler, *Zırh Teknolojileri Semineri,* Ankara, 10-11 Mart, s. 65-71.

[86] **Özden, S., Ekici, R. and Nair, F.,** 2007. Investigation of aluminium based SiC particle reinforced metal-matrix composites, *Composites-Part A: Applied Science and Manufacturing,* **38,** 484-494.

[87] **Thakur, S.K. and Gupta, M.,** 2007. Improving mechanical performance of Al by using Ti as reinforcement, *Composites-Part A: Applied Science and Manufacturing,* **38,** 1010-1018.

[88] **Skvortsov, V., Kepler, J. and Bozhevolnaya, E.,** 2003. Energy partition for ballistic penetration of sandwich panels, *Int. J. Impact Engineering,* **28,** 697-716.

[89] **Nemat-Nasser, S., Kang, W.J., McGee, J.D., Guo, W-G. and Isacs, J.B.,** 2007. Experimental investigation of energy-absorption characteristics of components of sandwich structures, *Int. J. Impact Engineering,* **34,** 1119-1146.

[90] **Zhao, H., Elnasri, I. and Girard, Y.,** 2007. Perforation of aluminium foam core sandwich panels under impact loading – An experimental study, *Int. J. Impact Engineering,* **34,** 1246-1257.

[91] **Zhu, F. and Lu, G.,** 2007. A Review of Blast and Impact of Metallic and Sandwich Structures, *EJSE Special Issue: Loading on Structures,* pp. 92-101.

[92] **Çetinel, H.,** 2000. Polietilen ve polipropilenin mekanik özelliklerinin incelemesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi,* **2,** 79-87.

[93] **Zukas, J.A.,** 1990. High Velocity Impact Dynamics, John Wiley&Sons Inc., Chichester.

[94] MEGA Danışmanlık, Temsilcilik ve Dış Ticaret Ltd.Şti., Malzeme Testi Çözümleri, <http://www.instron.com.tr> (04.09.2007)

[95] **Kolsky, H.,** 1963. Stress Waves in Solids, Dover Publications, New York.

[96] **Meyers, M.A.,** 1994. Dynamic Behaviour of Materials, John Wiley&Sons Inc., Chichester.

[97] **Jones, N.,** 1997. Structural Impact, Cambridge University Press, Cambridge.

[98] **Benson, D.J.,** 1990. Computational Methods in Lagrangian and Eularian Hydrocodes, University of California.

[99] **Colins, G.S.,** 2002. An Introduction to Hydrocode Modeling.

[100] Makina Kimya Endüstisi Kurumu, 9 mm x 19 Parabellum tabanca fişeği teknik özellikleri, <http://www.mkek.gov.tr> (10.07.2006)

[101] Automation Creations, Inc., Online Materials Information Resource, <http://www.matweb.com> (23.12.2006)

[102] **NIJ Standard–0101.04,** 2001. Ballistic Resistance of Personal Body Armor, *U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice*.

[103] **Akın, U.,** 2003. Alüminyum altlık üzerine ısıl püskürtme yöntemiyle kaplanan seramik ve seramik-polimer kaplamaların aşınma davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[104] **Baydoğan, M., Çimenoğlu, H. ve Kayalı, E.S.,** 2004. RRA işleminin 7075 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi, *İTÜ Dergisi/d,* **6**, 108-116.

[105] Sulzer Ltd, Thermal Spray Materials Guide, <www.sulzermetco.com> (12.02.2007)

[106] Metco 68F-NS-1 High Cobalt, Molybdenum, High Chronium Alloy Powder, Sulzer Metco Technical Bulletin 10-266, October, 2000.

[107] Metco 71NS-1 Tungsten Carbide-Cobalt Powder, Sulzer Metco Technical Bulletin 10-078, October, 2000.

[108] Metco 101 SF Grey Alumina Powder, Sulzer Metco Technical Bulletin 10-091, October, 2000.

[109] Metco 201 NS Zirconium Oxide Powder, Sulzer Metco Technical Bulletin 10-104, October, 2000.

[110] **English, S.,** 1999. Stephan Boltzmann Law and Boltzmann's Constant, Physics Department, The College of Wooster.

[111] **Chapra, S.C. ve Canale,** P.C., 2003. Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler, Literatür Yayıncılık, İstanbul. (çev:Heperkan, H. ve Kesgin, U.)

[112] **Devare, J.L,** 1995. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, Duxbury Press, Pasific Grove.

[113] **Kurtaran, H. ve Büyük, M.,** 2005. Zırhların bilgisayar destekli mühendislik yöntemleri ile tasarımı ve optimizasyonu, *Zırh Teknolojileri Semineri,* Ankara, 10-11 Mart, s. 85-117.

[114] **Özşahin, E. ve Tolun, S.,** 2006. Yüksek hızlı çarpma yüklerine karşı enerji emiş özelliği geliştirilmiş entegre zırh ön tasarımı, *MSC Software Kullanıcılar Konferansı'06,* İstanbul, 1-2 Haziran.

[115] **Walker, J.D., Mullina, S.A., Weissa, C.E. and Leslie, P.O.,** 2006. Penetration of boron carbide, aluminum, and beryllium alloys by depleted uranium rods: Modeling and experimentation, *Int. J. Impact Engineering,* **33,** 826-836.

[116] **Zukas, J.A. and Scheffler, D.R.,** 2000. Practical aspects of numerical simulations of dynamic events: effects of meshing, *Int. J. Impact Engineering,* **24**, 925-945.

[117] MSC Dytran® User's Manual version 2005, MSC.Software Corporation, USA.

[118] **Camacho, G.T. and Ortiz, M.,** 1997. Adaptive Lagrangian modeling of ballistic penetration of metallic targets, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,* **142,** 269-301.

[119] **Dey, S., Børvik, T., Hopperstad, O.S. and Langseth, M.,** 2007. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates, *Int. J. Impact Engineering,* **34,** 464-486.

[120] **Kaiser, M.A.,** 1998. Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, *M.Sc.Thesis,* Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, Virginia.

[121] **Memiş, G.,** 2005. Elastic wave propagation in metals under high strain rates, *M.Sc.Thesis,* Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Evren ÖZŞAHİN, 1975 yılında Sinop'ta dünyaya geldi. İlk ve orta öğrenimini Sinop'ta tamamladı. 1991 yılında girdiği Hava Harp Okulu Uçak Mühendisliği bölümünden 1995 yılında mezun oldu. 1997 yılında, Uçak Bakım Subay Temel Eğitiminin ardından 6'ncı Ana Jet Üs K.lığına (Bandırma/BALIKESİR) atandı. Bu birlikte çeşitli kademelerde üç yıl uçak bakım subayı olarak görev yaptı. 2000-2003 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümünde doktora öğrenimine başladı. Halen Hava Harp Okulu Dekanlığında öğretim elemanı olarak görev yapmaktadır. Evlidir.