

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZIRH TASARIMINDA FARKLI KATMAN SAYISI VE
FARKLI BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Ömer İBİŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez DanıŐmanı : Doç. Dr. Yaşar KAHRAMAN

Ocak 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIRH TASARIMINDA FARKLI KATMAN SAYISI VE
FARKLI BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN BALİSTİK
PERFORMANSA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Ömer İBİŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 04.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammed Ömer İBİŞ

04.01.2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Yaşar KAHRAMAN'a, araştırmanın fikir aşamasından yazımına kadar tüm aşamalarda değerli bilgi ve desteğini esirgemeyen ve titizlikle beni yönlendiren kıymetli hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat ÖZSOY'a ve deneylerin gerçekleştirilmesi için laboratuvarlarının kullanımına izin veren FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. ve kıymetli çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2020-7-24-119) teşekkür ederim.

Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması	3
1.1.1. Isıl işlem etkisi	3
1.1.2. Katman sayısı, dizilim ve boşluk etkisi	5
1.1.3. Ara yüzey etkisi	11
1.2. Motivasyon	12

BÖLÜM 2.

HASAR	14
2.1. Malzemelerin Dinamik Davranışları	14
2.2. Hasar Mekanizmaları	15
2.2.1. Zırlarda hasar modları	16
2.2.1.1. Sünek delik oluşumu	16
2.2.1.2. Tıpa atma	18
2.2.1.3. Disk atma	20
2.2.1.4. Delaminasyon	21

2.2.1.5. Konik kırılma ve dökülme	22
2.2.2. Yapıştırıcılarda hasar	23
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Malzeme Seçimi	27
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanışı	31
3.3. Deney Düzeneği	35
3.4. Nümerik Simülasyonlar	38
3.4.1. Johson-Cook (JC) model	43
3.4.2. Johnson-Cook hasar parametreleri	45
3.4.3. Epoksi yapıştırıcının modellenmesi	47
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Deneysel Sonuçlar	49
4.2. Nümerik Sonuçlar	60
BÖLÜM 5.	
GENEL SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SDO	: Sünek delik oluşumu
σ	: Gerilme
$\bar{\sigma}$: Hidrostatik gerilme
$\dot{\epsilon}$: Birim şekil değişimi hızı
$\dot{\epsilon}_0$: Referans birim şekil değişimi hızı
$\dot{\epsilon}^*$: Boyutsuz plastik birim şekil değişimi hızı
T	: Sıcaklık
T_0	: Oda sıcaklığı
T_m	: Ergime sıcaklığı
T^*	: Homolog sıcaklık
t	: Zaman
D_C	: Kritik hasar değeri
A	: Akma gerilmesi
B	: Pekleşme sabiti
n	: Pekleşme üsteli
C	: Birim şekil değişimi hızı sabiti
m	: Termal yumuşama üsteli
D_1, \dots, D_5	: Hasar parametreleri
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
C_p	: Özgül ısı
χ	: Taylor-Quinney katsayısı
α	: Genleşme katsayısı
K	: Gerilme şiddet çarpanı
K_{IC}	: Kırılma Tokluğu

G : Enerji salınım hızı
G_c : Eşik enerji salınım hızı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Birim şekil değişimi hızı bölgeleri (Hazel,2016).....	15
Şekil 2.2. Sünek delik oluşumu (Crouch,2017).	18
Şekil 2.3. Tıpa atma (Crouch,2017).	19
Şekil 2.4. Hasar mekanizmaları (Zukas,1990).	21
Şekil 2.5. Delaminasyon (Crouch,2017).	22
Şekil 2.6. Dökülme (Crouch,2017).	23
Şekil 2.7. Yapıştırıcı bağlantılarında ayrılma.	23
Şekil 2.8. Yükleme modları.	24
Şekil 3.1. 7.62 mmx51 (M61) zırh delici mermi a) fişek görseli, b) çekirdek görseli ve c) çekirdek teknik resmi	28
Şekil 3.2. 3M Scotch-Weld DP460 epoksi yapıştırıcı	30
Şekil 3.3. 48-50 RC sertliğinde 9 mm kalınlığında plaka	31
Şekil 3.4. 48-50 RC sertliğinde 1 mm kalınlığında plaka	32
Şekil 3.5. 48-50 RC sertliğinde 3 mm boyunda plaka	33
Şekil 3.6. Epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş 3 ve 9 katmanlı yapılar	34
Şekil 3.7. Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilmiş 3, 20 ve 40 katmanlı yapılar	35
Şekil 3.8. Balistik test sistemi	36
Şekil 3.9. Balistik test sistemi namı düzeneği arka ve ön görünüşü	37
Şekil 3.10. Numunelerin hedef düzeneğine bağlanması	38
Şekil 3.11. Plakaların farklı eleman sayıları için incelenmesi	40
Şekil 3.12. Eleman sayısının sonuçlara etkisi	41
Şekil 3.13. Plaka ve mermi çeyrek model görünümü	42
Şekil 3.14. 3 ve 9 katmanlı yapılar	43
Şekil 3.15. Tie-Break (LSTC, 2007).....	47
Şekil 4.1. Yekpare 4340 yapıların atış sonrası deformasyonları.....	50
Şekil 4.2. 3 katmanlı 4340 yapıların atış sonrası deformasyonları	51

Şekil 4.3. 9 katmanlı 4340 yapıların atış sonrası deformasyonları	52
Şekil 4.4. 3 ve 9 katmanlı yapılarda katmanların deformasyonu	53
Şekil 4.5. 3 katmanlı Ck75 yapıların atış sonrası deformasyonları.....	55
Şekil 4.6. 20 Katmanlı Ck75 yapıların atış sonrası deformasyonları.....	56
Şekil 4.7. 40 katmanlı Ck75 yapıların atış sonrası deformasyonları.....	57
Şekil 4.8. 3, 20 ve 40 katmanlı yapılarda toplam deformasyonun hız ile değişimi ...	58
Şekil 4.9. 3 ve 9 katmanlı yapılarda analiz görselleri	61

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. AISI 4340 (34CrNiMo6) çeliğinin kimyasal bileşimi	27
Tablo 3.2. 7.62 mmx51 (M61) zırh delici mermi özellikleri	28
Tablo 3.3. AISI 4340 ve mermi çelik çekirdeği malzeme özellikleri	29
Tablo 3.4. DP460 Epoksi Yapıştırıcı malzeme özellikleri.....	29
Tablo 3.5. Ck75 sulu yay çeliğinin kimyasal bileşimi	30
Tablo 3.6. AISI 4340 ve mermi çelik çekirdeği Johnson-Cook dayanım ve hasar parametreleri	46
Tablo 3.7. DP460 Yapıştırıcı temas mekanizması parametreleri (Boqaleh, 2015)....	48
Tablo 4.1. Farklı hızlar altında farklı katmanlarda Ck75 sulu yay çeliğinin balistik davranışı.....	59
Tablo 4.2. Farklı tasarımlarda analiz sonuçları.....	60

ÖZET

Anahtar kelimeler: Balistik dayanım, katmanlı yapılar, arayüzey etkisi, sonlu elemanlar yöntemi

Bu çalışmada, sertleştirilmiş AISI 4340 çeliğinden imal edilen yekpare, üç katmanlı ve dokuz katmanlı yapıların hasar mekanizmaları ve balistik performansları deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Katmanların kuru temaslı ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş durumlarının balistik başarıma etkisi de değerlendirilmiştir. 4340 çeliği ile sabit kalınlıkta daha yüksek katmanlara çıkılması mümkün olmamıştır. Daha yüksek katmanlı yapılar Ck75 sulu yay çeliği ile imal edilmiş ve üç, 20 ve 40 katmanlı durumlar deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, 7.62 mm x 51 (M61) zırh delici mermi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan deney düzeneği ile hedef yüzeylerine dik atışlar yapılmıştır.

Araştırma sonucunda elde edilen verilere göre, 4340 çeliğinden imal edilen yekpare yapıların balistik dayanımlarının üç ve dokuz katmanlı yapılardan daha üstün olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, katman sayısının artışı ile eğilme direncinde meydana gelen azalmadır. Yekpare yapılarda sünek delik oluşumu ile hasarlanma olurken, katmanlı yapılarda eğilme sonucunda iç bükey hasarlanma ortaya çıkmıştır. Katmanların yapıştırıcı ile birleştirilmesinin yapının eğilme direncini arttırdığı ve deformasyon miktarını azalttığı gözlemlenmiştir.

Sonlu elemanlar analizleri ile yapıların balistik olarak başarılı olma durumları doğru tahmin edilebilmiştir. Analizler sonucunda, yapılarda meydana gelen hasar mekanizmaları ve deformasyon şekilleri de deneysel verilerle uyum göstermiştir. Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilen plakalar incelendiğinde, 4340 çeliğine benzer şekilde katman sayısının artışı ile balistik dayanımın azaldığı anlaşılmıştır. Kullanılan yapıştırıcının dayanımına bağlı olarak katmanlı yapılarda delaminasyon oluşmuştur.

THE EFFECT OF DIFFERENT NUMBER OF LAYER AND DIFFERENT JOINING TECHNIQUES ON BALLISTIC PERFORMANCE IN ARMOR DESIGN

SUMMARY

Keywords: Ballistic resistance, layered structures, interface effect, finite element method

In this study, the failure modes and ballistic performances of monolithic, triple-layered and nine-layered structures made of hardened AISI 4340 steel were investigated experimentally and by the finite element method. The effect of dry contact and adhesive bonding of the layers on ballistic success was also evaluated. It was not possible to reach more layers at constant thickness with 4340 steel. More layered structures were fabricated with Ck75 spring steel and three-, 20-, and 40-layered cases were experimentally investigated. Experiments were carried out with 7.62 mm x 51 (M61) armor-piercing projectile. Perpendicular shots were made to the target surfaces with the experimental set-up used.

According to the data obtained as a result of the research, it has been seen that the ballistic resistance of monolithic structures made of 4340 steel is superior to that of triple- and nine-layered structures. The reason for this is the decrease in bending resistance with the increase in the number of layers. While there is failure by ductile hole formation in monolithic structures, dishing failure has occurred as a result of bending in layered structures. It has been observed that joining the layers with adhesive increases the bending resistance of the structure and reduces the amount of deformation.

With the finite element analysis, the ballistic success of the structures was correctly predicted. As a result of the analysis, the failure mechanisms and deformation patterns in the structures were also compatible with the experimental data. When the plates made of CK75 spring steel were examined, it was understood that the ballistic strength decreases with the increase in the number of layers, similar to 4340 steel. Depending on the strength of the adhesive used, delamination has occurred in the layered structures.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Tarih boyunca saldırı veya savunma amacı ile silah teknolojilerindeki gelişim zırh teknolojilerindeki gelişiminde sebebi olmuştur. Zincir zırhlar ve plaka zırhlar farklı üstünlükleri ile kullanıma sunulmuştur. Zincir zırhların ve plaka zırhların her ikisi de savurma ile kesilmelere ve saplamalara karşı etkin bir davranış gösterirken, özellikle gürz veya topuz gibi darp silahlarına karşı zincir zırhlar yetersiz kalmış ve bunun sonucu olarak darp etkisini azaltmak için zincir zırhlar üzerine plaka zırhlar giyilmeye başlanmıştır. Darbe enerjisinin tek bir noktaya yoğunlaştırılması ile plaka zırhlarında işlevi zamanla azalmıştır. Ateşli silahların gelişimi ile tehditlerin etkinliği ve menzili artmış buna mukabil zırh teknolojilerinde yeni arayışlar kaçınılmaz olmuştur. Giyilebilir zırhların haricinde denizde, karada ve havada kullanılan savaş makinelerinin ve askeri veya sivil personel taşımakla yükümlü taşıtların savunulması için tasarlanan yapılar modern zırhlara öncülük etmiştir. Günümüzde farklı etkinlikte kesici aletler, mermiler, patlayıcılar ve patlamalar sonucu meydana gelen yüksek hızlı parçalar gibi tehditlere karşı farklı malzeme türleri, farklı kombinasyonlar ve farklı birleştirme teknikleri ile muvakalet gösterilmeye çalışılmaktadır.

Metaller, seramikler ve kompozitler günümüzde yaygın olarak kullanılan zırh malzemeleridir. Metaller zırhlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Genel olarak zırh tasarımlarında kullanılan metaller çelik, alüminyum, titanyum ve magnezyumdur (Hazel, 2016). Seramikler yüksek sertlikleri ile mermileri kırarak veya aşındırarak engellemektedirler. Yoğunluklarının düşük olması bir diğer avantajıdır. Çoklu atışlara uygun olmayışı dezavantaj olarak karşımıza çıksa da parçalı seramik yapılar ile çözüm üretilebilmektedir. Maliyetleri ve imalat zorluğu diğer dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit kullanımı ile tehdit durumuna göre istenilen özelliklerde yapılar tasarlanabilmektedir. Yüksek maliyetleri, düşük toklukları ve işleme güçlükleri negatif yönleridir. Malzemelerin balistik dirençleri farklı parametrelere bağlıdır. Bu parametreler mermi ile ilgili olanlar (mermi boyutu, şekli, yoğunluğu ve sertliği),

Çarpma durumu ile ilgili olanlar (darbe hızı ve açısı) ve hedef plaka ile ilgili olanlar (sertlik/dayanım oranı, süneklik, mikroyapı ve kalınlık) Şeklinde sınıflandırılabilir.

Çelikler yüksek dayanım ve yüksek süneklik özellikleri ile zırh tasarımıda halen baskınlığını korumaktadır (Hazel, 2016). Bu zelliklerinin yanında diğer alaşımına göre uygun fiyatlarında tedarik edilebilirliği, işlenebilirliği, birleştirmeye tekniklerine yatkınlığı, yüksek yorulma dayanımı da çelikleri cazip kılmaktadır (Hazel, 2016). Diğer bir özelliği ise savaş alanında oluşabilecek tehditlere karşı çelikler üzerine uzun yıllardır yapılan çalışmaların geniş bir veri tabanı oluşturmasıdır.

Tehdit seviyesinin artması ile zırh bilimciler var olan çelik yapıları geliştirmek zorunda kalmıştır (Crouch, 2017). Çeliklere uygulanan ısıl işlemler ve imalat yöntemleri ile istenilen özellikler elde edilmeye çalışılarak veya farklı malzeme türleri ile birlikte kullanılarak, daha düşük ağırlıklarda balistik başarım elde edilmeye çalışılmaktadır. Çift sertlikli çelikler ve katmanlı yapılar ile farklı malzemelerin kombinasyonunu sağlayan zırh tasarımları bu türlerin örnekleridir. Bununla birlikte n yüzeyde delikli yapı oluşturulması ve açılı zırh tasarımları gibi çelikler üzerinde sadece tasarım değişiklikleri ile farklı kazançlar elde edilebilmektedir.

Katmanlı yapılar ile farklı malzemelerin özelliklerini belirli bir mantık çerçevesinde bir araya getirerek, optimum zırh tasarımları elde etmek, balistik çalışmalarda geçmişten günümüze ilgi çeken konulardan birisidir. Katmanlı yapıların başarımında malzeme özellikleri, malzeme kombinasyonu, ara yüzey etkileri, zırh n yüzey tasarımı gibi etkilerin yanında zırhlarda meydana gelen deformasyon mekanizmasını değiştirdiği için merminin uç Şekli de önemlidir.

1.1. Kaynak Araştırması

1.1.1. Isıl işlem etkisi

Übeyli ve ark. [3], 7.62 mm zırh delici mermi ile yaptıkları çalışmada, ısıl işlem uygulanarak çeliğin mekanik özelliklerinin değiştirilmesinin, balistik dayanımın ve hasar mekanizması üzerine etkisini incelemişlerdir. Hedefin sertliğinin artması ile merminin deformasyonu arttığı için penetrasyon kabiliyetinin azalmakta olduğunu ve bu nedenle yüksek sertliğin balistik başarımda önemli bir yerinin olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek sertliklerde hasar mekanizması sünek delik oluşumundan gevrek kırılmaya dönüşmüştür. Sertliğin ve kalınlığın balistik başarıma etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, ince plakalarda penetrasyonun düzlem gerilme şartları altında, kalın plakalarda penetrasyonun düzlem birim şekil değişimi altında meydana geldiği belirtilmiştir (Diskhit ve ark., 1995). T/D oranı (T: plaka kalınlığı, D: mermi çapı) 1'den küçük ise ince plaka, 1'den büyükse kalın plaka olarak adlandırılmaktadır. Çalışmaya göre sertliğin plaka balistik performansına etkisi düzlem gerilme veya düzlem birim şekil değiştirme durumlarına bağlı olarak değişmektedir. Düzlem birim şekil değişimi durumunda artan sertlikle balistik başarımlar artmış bunun nedeni olarak sönmülenen enerji miktarındaki artış ve merminin daha fazla deforme olması gösterilmiştir. Düzlem gerilim durumunda ise belli bir sertliğe kadar balistik dayanımın arttığı ancak daha ötesinde plaka penetrasyon direncinin azaldığı ifade edilmiştir.

Bir çalışmada, çeliklerin farklı temperleme sıcaklıkları etkisiyle mikro yapılarındaki ve mekanik özelliklerindeki değişimler, balistik performansları ile ilişkilendirilerek incelenmiştir (Jena ve ark., 2010). İyi bir balistik performans için ısıl işlemlerle optimum dayanım, sertlik ve tokluğun elde edilmesi gerektiği vurgulanarak, optimum değerlerin söz konusu çelik için 910°C östenitleme ve 200 °C temperleme işlemleri ile elde edilebildiği rapor edilmiştir. Holmen ve ark. [6] ise AA6070 alüminyum alaşımının dört farklı ısıl işlemi için yaptıkları balistik çalışmalarda, balistik darbe altında dayanımın süneklikten daha önemli bir özellik olduğu vurgulanmıştır.

Bir diğerk çalışmada, zırh çeliğinin farklı temperleme sıcaklıkları etkisinde balistik dayanımı araştırılmıştır. Temperleme sıcaklığının delinme sonrası merminin kinetik enerjisi üzerine etkisi incelenmiş; düşük temperleme sıcaklıkları için balistik performansın arttığı tespit edilmiştir. Ancak balistik performanstaki artışın, düşük temperleme sıcaklıklarında meydana gelen dayanım artışı ile orantılı olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca hedefin deformasyon davranışının penetrasyon hızına önemli etkisinin olduğu ve plastik şekil değişimine karşı direncin penetrasyon hızını düşürdüğü ifade edilmiştir (Senthil ve ark., 2015). Mishra ve ark. [8], temperleme sıcaklığının artışıyla sertlik ve dayanım değerlerinin düştüğünü ve bunun penetrasyon derinliğinde artışa sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Temperleme sıcaklığının artışı ile adyabatik kayma bantlarının sayısı ve neden olduğu çatlakların sayısının azaldığını ve plaka kalınlığının azalması ile yine adyabatik kayma bantlarının neden olduğu çatlakların azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca çelik yüzeyde, delikli yapının daha az veya daha kısa adyabatik kayma bantlarına sahip olduğu görülmüş ve bu yapı mermiyi kırdığı veya deforme ettiği için balistik dayanımı artırdığı belirtilmiştir.

Zırh delici mermi kullanılması durumunda, AISI 4140, AA5083 ve AA7075 malzemelerinin balistik dayanımları araştırılmıştır. AISI 4140 ve AA7075 malzemelerinin ısıt işlem uygulanması sonucu mekanik özelliklerinin değişimi ile darbe altındaki davranışları incelenmiştir. Alan yoğunluğu gözetilerek yapılan incelemelerde AA7075-T651'in en iyi balistik dayanımı gösterdiği ve alüminyum alaşımlarında ısıt işlemlerle sertlikteki artış ile balistik dayanımın arttığı görülmüştür. Çelik malzemede 53 RC sertlikte en iyi balistik başarıml sağlanmış ve sertlik artışı ile darbe direnci artsa da 60 RC sertlikte malzemenin kırılğan yapısından dolayı darbeye karşı mukavemetinin düştüğü belirtilmişti (Demir ve ark., 2008).

Orthe ve Thorsen [10] NVE36 yapısal çeliğinin yüzey sertleştirme uygulanmış hali ile ham halini kıyaslamış, balistik limit hızının yüzey sertleştirme ile %18-26 oranında arttığını belirtmişlerdir. Sertleştirilmiş yüzeyde radyal ve çevresel çatlaklar ve parçalanma meydana gelirken, ham halde sünek delinme gerçekleşmiştir. Başka bir çalışmada, 4340 çeliğini 4 farklı ısıt işlem durumu için deneysel ve nümerik olarak incelemiş, sertliğin artışı ile balistik dayanımın arttığı ve yüksek sertlikte adyabatik

katma bantlarından dolayı plakada parçalanma meydana geldiği aktarılmıştır (Deniz ve ark., 2010).

1.1.2. Katman sayısı, dizilim ve boşluk etkisi

Borvik ve ark. [12], aynı malzemeden imal edilmiş yekpare ve iki katmanlı zırhları deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Yekpare ve temas halinde iki katmanlı yapının balistik limit hızlarının eşdeğer olduğunu ve aralarında 30 mm boşluk bulunması durumunda balistik limit hızının düştüğünü bildirmişlerdir. Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin uyumlu olduğu ve hata payının %12'den az olduğu anlaşılmıştır. Bir diğer çalışmada; yekpare, iki katmanlı ve üç katmanlı yapılar, aynı malzemeden imal edildiği ve farklı malzemelerin kombinasyonu ile imal edildiği durumlar için irdelenmiştir (Flores-Johnson ve ark., 2011). Weldox 700E çeliği için, yekpare ve iki katmanlı yapılarda balistik başarımlar açısından belirgin bir farkın olmadığını ancak üç katmanlı zırhın dayanımının daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Al 7075-T651 için 20 mm kalınlığın altında yekpare ve katmanlı yapılarda önemli bir farkın olmadığı, ancak 30 mm kalınlığın üzerinde balistik başarımların üç katmana kadar katman sayısı arttıkça düştüğü belirtilmiştir. İki farklı malzeme kullanılarak tasarlanan katmanlı yapıların alan yoğunluğu eşit çeliklerle mukayesesi yapıldığı takdirde farklı malzeme kombinasyonları ile elde edilen yapılardan bazılarının daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Tüm bunlar göz önüne alındığında zırh alan yoğunluğunu azaltmak için katmanlı panel yapıların kullanılabilmesi ortaya konulmuş ve ilave çalışmalarla desteklenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Aynı çalışmada 800 m/s ve 950 m/s hızlarla yapılan analizler kıyaslandığında, 950 m/s hızda katman sayısının artışı ile balistik performansta düşüşün belirsizleştiği raporlanan bir diğer husustur.

Teng ve ark. [14] tarafından yapılan bir çalışmada, iki katmanlı zırhların balistik performansları sonlu elemanlar yöntemi ile irdelenmiştir. Düz uçlu mermi kullanılması durumunda iki katmanlı yapının yekpare yapıya göre %8-25 oranında balistik performansı arttırdığı keşfedilmiştir. Bu artışın nedeni hasar modunun enerji sönmüleme kabiliyeti düşük olan tıpa atmadan, enerji sönmüleme kabiliyeti daha

yüksek olan çekme ile uzamaya dönüşmesidir. Konik uçlu mermiler için katmanlı ve yekpare yapıların balistik dayanımlarının benzer olduğu da görülmüştür. Yüksek ve düşük süneklığe sahip iki farklı çelik için, yekpare ve iki katmanlı yapılar üzerinde konik ve düz uçlu deliciler ile analizlerin gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada, 400 m/s ve 800 m/s hızla yapılan atışlar sonucu atış hızına göre malzemenin hasar mekanizmasının ve balistik başarımı yüksek kombinasyonların değiştiği raporlanmıştır (Teng ve ark., 2008). 400 m/s hızda iki katmanlı yapının yekpare yapıya göre hem konik uç hem de düz uç için daha dayanıklı olduğu ifade edilmiştir. 800 m/s hızda her iki uç tipi içinde düşük süneklığe yüksek dayanıma sahip malzemenin balistik başarımının daha iyi olduğu görülmüştür. Bir diğer çalışmada, düz, ogival ve yarım küresel uçlu mermi tipleri için deneysel ve nümerik analizler yekpare ve katmanlı yapılar için gerçekleştirilmiştir (Gupta ve ark., 2008). Ogival ucun en etkili delici olduğu ve delme işlemi için daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu, yarım küresel ucun ise en etkisiz delici olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak katman sayısının artması ile alüminyum plakalardan oluşan zırhın dayanımının azaldığı ve yapılan sonlu elemanlar analizi ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu raporlanmıştır.

Wei ve ark. [17], düz uçlu delici için yekpare, katmanlı ve boşluklu katmanlı zırh yapılarını balistik limit hızı açısından kıyaslamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür ki yekpare yapının hasar modu membran uzaması da içeren eğilme ise katman sayısının artışı ile balistik limit hızı azalmaktadır. Ancak yekpare zırhta baskın deformasyon mekanizması kayma ise, yekpare hedefin balistik limit hızı katmanlı hedeften daha düşüktür. Katmanlar arası boşluk temaslı duruma göre balistik limit hızını azaltmıştır. Ara boşluklu katmanlı yapılar arasında ara boşluğun artırılmasının balistik başarımı arttırdığı elde edilen diğer bir çıktıdır. Yapılan bir diğer çalışmada; düz ve ogival uçlu delicilerin etkisi altında yekpare ve iki katmanlı çelik için balistik limit hızları deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Düz uçlu delici için iki katmanlı yapının balistik limit hızında yekpare yapıya göre yaklaşık %50 artış elde edildiği ve bunun sebebinin deformasyon ve hasar mekanizmasındaki değişim olduğu belirtilmiştir. Ogival uç kullanılırsa balistik performansın iki katmanlı yapı ile azaldığı ifade edilmiştir (Dey ve ark., 2007).

Woodward ve Cimpoeru [19] konik uçlu ve düz uçlu delicilerin etkisi altında, yekpare ve katmanlı alüminyum alaşımlarının balistik limit hızlarını, eğilme ve çekme deformasyon enerjilerini incelemiştirlerdir. Kalın yekpare hedefler tıpa çıkarma ile deforme olurken, katmanlı yapıların darbe yüzeyinde girinti şeklinde ve çıkış yüzeyinde parça ayrılma mekanizması ile deforme olduklarını tespit etmişlerdir. Daha ince katmanların eğilme ve uzama ile enerji sönmleyen parça ayrılması ile deforme olmaya daha fazla eğilimli olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca darbe yüzeyinde girinti oluşumunu, kalın parçalar için tıpa atma durumunu ve ince katmanlı yapılar için çıkış yüzeyinde parça ayrılması durumunu ifade eden nümerik bir yöntem geliştirmişlerdir. Bir diğer araştırmada; alüminyum ve polikarbon malzemelerin yekpare ve katmanlı yapılarının balistik dayanımları, hem iki malzemenin kombinasyonu, hem de tek malzeme için, düz uç ve konik uçlu mermiler ile 50-210 m/s hız aralığında incelenmiştir (Radin ve Goldsmith, 1988). Alan yoğunluğu bakımından polikarbonun %15 daha başarılı olduğu, yekpare yapının balistik direncinin bitişik katmanlı yapıdan daha üstün olduğu görülmüştür. Boşluklu katmanlı yapının balistik dayanımının ise bitişik katmanlı yapıya oranla daha düşük olduğu ancak yekpare durumla kıyaslandığında dayanım düşüşünün asıl nedeninin boşluk etkisinden ziyade katman etkisi olduğu raporlanmıştır. İki malzemenin kombine edilme durumunda dahi sistemin balistik limit hızı yekpare durumundan daha düşüktür.

Deng ve ark. [21], ogival uçlu mermilere karşı yekpare, iki, üç ve dört katmanlı yapıların dayanımlarını farklı kalınlık, katman ve dizilim koşullarında incelemiştirlerdir. Yekpare zırhların balistik dayanımlarının belli bir özel kalınlık altında, incelenen tüm hızlarda katmanlı zırhlara göre daha iyi olduğu ve katman sayısının artışı ile balistik limit hızının azaldığı görülmüştür. Belirli bir kalınlık değerinin üzerinde katmanlı yapının balistik limit hızının yekpare yapıya göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Katmanlar arası boşluk balistik dayanımı azaltmış ve ön tarafa ince arka tarafa kalın plaka koyulması ile en uygun dizilim elde edilmiştir. Belirli bir kalınlığın altında hasar mekanizmasında değişme olmadığı ancak kalın zırhlarda katmanlı yapı ve yekpare yapı arasında farklı hasar tiplerinin meydana geldiği anlaşılmıştır.

Çelik plakalar üzerine yapılan bir araştırmada, weldox çeliğinin zırh delici mermiye karşı balistik dayanımı mermi hızı, plaka kalınlığı ve plaka tasarımı açısından incelenmiştir (Bobbili ve ark., 2014). Merminin plakadan çıkış hızı üzerinde en önemli etkenin mermi hızı olduğu, kalınlığının diğer önemli bir etken olduğu ancak katmanlı tasarımın önemsiz olduğu belirtilmiştir. Cui ve ark. [23], yekpare ve iki katmanlı çelik yapılara ek olarak alüminyum köpük çekirdeğe ve çelik yüzeye sahip sandviç yapıları araştırmışlardır. Aynı kalınlıkta çelik plakaların ve sandviç yapıların enerji sönmleme kapasiteleri darbe hızı ile önce azalmış sonra artmıştır. Yarım küre şekilli uç yapısı için en iyi enerji sönmleme kapasitesine sahip yapı yekpare yapıdır ve iki katmanlı yapının enerji sönmleme kapasitesi boşluklu iki katmanlı yapıya göre daha yüksektir. Düz uçlu delicilere karşı yekpare zırh yapısı diğer iki tasarıma göre üstündür. Ancak temas halinde iki katmanlı ve boşluklu iki katmanlı yapı için zırhlar farklı hızlarda farklı davranışlar göstermektedir. Ayrıca zırhların düz uçlu delicilere karşı enerji sönmleme kapasitelerinin yarım küre uçlu delicilere kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Bir diğer çalışmada, yekpare ve katmanlı zırhların balistik davranışları hem normal hem de eğik atışlar altında ogival, düz, konik ve yarım küre uçlara karşı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir (Mohammad ve ark., 2020). Yekpare zırhlarda deneysel çalışmalar ve nümerik simülasyonlar arasında sapma %1,2 ile %17,5 arasında, katmanlı zırhlarda ise %1,2 ile %15,7 arasında değişim göstermiştir. Düz uçlarda eğikliğın artışı ile zırhın balistik dayanımı azalmış ancak diğer uç tiplerinde eğikliğın artışı ile balistik limit hızı artmıştır. En yüksek balistik dayanım yarım küre uçlu delicilere karşı gösterilmiştir. Yekpare tasarım düz uçlu mermiler hariç tüm mermi tiplerinde katmanlı yapıya göre daha üstün balistik dayanım sergilemiştir. İnce plakalar için yekpare, iki katmanlı ve sandviç zırh tasarımlarını düz ve yarım küre uçlara karşı 0°, 30° ve 45° eğik atışlar altında araştıran bir diğer çalışma gerçekleştirilmiştir (Zhou ve Stronge, 2008). 0°-45° eğimlerinde merminin daha fazla lokal deformasyonundan dolayı düz uçların balistik limit hızlarının yarım küre uçlara göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Düz uçlu delicilerin eğik darbelerinde katmanlı yapının balistik limit hızının yekpare yapıdan daha fazla olduğu görülmüştür. Yine

eğimli darbe durumunda yarım küre uçlar için yekpare ve katmanlı yapıların benzer balistik limit hızlarına sahip oldukları ifade edilmiştir.

Holmen ve ark. [26], 7.62 mm zırh delici mermilere karşı katmanlı ve yüzeyi sertleştirilmiş çelik zırhların balistik dayanımı deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Yüzey sertleştirmenin balistik limit hızını en az %20 arttırdığı görülmüş ancak katmanlı yapının balistik limit hızını arttırmadığı belirtilmiştir. Katmanlı yapı, yüzeyi sertleştirilmiş çelik yapının balistik dayanımını ham çelik yapıya kıyasla daha fazla azaltmıştır. Ham plakaların nümerik analizinin deneysel verilerden yaklaşık olarak %11 daha düşük sonuçlar verdiği ve katman sayısının artması ile bu sapmanın arttığı ifade edilmiştir. Yarım küre uçlu KE delicilerle (1600m/s) yapılan balistik deneylerde yekpare, 6 katmanlı ve boşluklu 6 katmanlı yapılar araştırılmıştır. Delici penetrasyonunun boşluklu katmanlıda en fazla olduğu, katmanlı yapıda delinme miktarının da yekpare zırha göre fazla olduğunu belirtmişlerdir (Copland ve Scheffler, 2003). Farklı katman sayılarında ve farklı darbe hızlarında yürütülen deneysel bir çalışmada, yekpare yapının katmanlı yapılardan daha üstün olduğu, hem boşluklu hem de bitişik durumda katman sayısının azalması ile balistik performansın arttığı raporlanmıştır (Almohandes ve ark., 1996). Çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç darbe hızının artışı ile yekpare ve katmanlı yapı arasındaki farkın belirsizleşmesidir.

3 mm toplam kalınlıkta yekpare, katmanlı ve 5 mm boşluklu katmanlı zırh tasarımlarının balistik dayanımını 7.62x39 zırh delici mermiye karşı inceleyen bir çalışmada; literatürle benzer şekilde yekpare zırhların balistik dayanımının en yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak farklı olarak 3 katmanlı temaslı zırhların 2 katmanlı zırhlardan daha üstün olduğu ifade edilmiştir (Abdel-Wahed ve ark., 2010). Bir diğer çalışmada; tungsten çubuklardan üretilmiş düz ve yarım küresel uçlu delicilerle yapılan atışlar sonucunda, çelikten üretilmiş yekpare, katmanlı ve sandviç yapıları zırhların balistik dirençlerini nümerik olarak araştırılmıştır. Katmanlı yapının balistik dayanımı arttırdığı ve sandviç yapılarda çelikler arasında sönüm malzemesi kullanımının balistik dayanıma olumlu etkisinin olduğunu belirtmişlerdir (Abdelshafy ve Oyadiji, 2007). Jankowiak ve ark. [31], konik uçlu mermi darbesi altında zırh

tasarımının balistik başarıma etkisini ve nümerik analizde kullanılan Johnson-Cook ve Rusinek-Klepaczko modellerinin başarımlarını irdelemişlerdir. İki katmanlı zırhların boşluklu ve bitişik durumları için yekpare zırhlara göre delinmeye karşı dirençlerinin daha az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bünye denklemlerinin balistik analizlerin doğruluğunda önemli bir yeri olduğu ve RK modelinin JC modele kıyasla deneysel verilere daha çok yakınsadığı ifade edilmiştir.

İki katmanlı çelik zırhı farklı sert-yumuşak katman dizilimleri ve farklı uç tipleri için inceleyen bir çalışmada, farklı dizilimlerin balistik dayanımı etkilediği raporlanmıştır (Yunfei ve ark., 2014). Ön katmanda yüksek sertlik ve düşük sünekliğe sahip malzeme ile arka katmanda yüksek sünekliğe sahip malzeme kombinasyonun zıttı dizilime göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Dizilim etkisi düz uçlu yapılarda daha belirgin iken ogival uçlar için fark düşüktür. Mermi bütünlüğünü korumada ogival uçların daha başarılı olduğu ve çok az deformasyona uğradığı ancak düz uçlarda boyca değişimin ve kütle azalmasının olduğu belirtilmiştir. Katman diziliminin mermi deformasyonuna etkisinin önemsiz olduğu sonucu diğer bir çıktıdır. Ayrıca hedef konfigürasyonunun balistik limit hızına etkisinin darbe hızının artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Ön katmanda yüksek sertlikte çelik ve arka katmanda alüminyum için çelik yüzeyinde oluşturulan deliklerin balistik dayanıma etkisini irdeleyen bir çalışmada; yapılan çalışma sonucunda delikli yapının balistik başarımları arttırdığı belirtilmiştir. Kare şeklindeki deliklerin dairesel şekilli deliklerden daha etkin olduğu ve delik boyutunun da önemli bir etken olduğu görülmüştür (Mishra ve ark., 2018). Metal-metal ve metal-elyaf katmanlı yapıların 7.62 zırh delici merminin 30° açılı çarpması durumunda balistik dayanımları üzerine yürütülmüş olan bir incelemede ise, çelik-elyaf katmanlı yapı durumunda yekpare çelik yapıya kıyasla ağırlıkta %46 azalma olduğu ifade edilmiştir (Jrna ve ark., 2009). Isıl işlemle çeliğin sertliği ve dayanımı artırılarak alan yoğunluğunda %21 azalma, çelik-alüminyum katmanlı yapısı kullanıldığında ise çelik yapıya göre alan yoğunluğunda %29 azalma sağlanmıştır.

1.1.3. Ara yüzey etkisi

Zaera ve ark. [35], metal ve seramik plakalar arasındaki adezif katman etkisini hem adezif katman kalınlığı hem de farklı ara yüzey malzemeleri için irdelemişlerdir. Daha kalın yapıştırıcı katmanlı yapılarda, arka metal plakanın plastik deformasyon alanının daha geniş olduğu ve böylece kinetik enerji sönümlenme miktarının arttığı belirtilmiştir. Ayrıca adezif katmanın daha kalın olmasıyla seramik katmanın daha erken parçalandığı görülmüştür. İkinci durumun zırh direncinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu ve balistik performansı birinci durumdan daha fazla etkilediği ileri sürülmüştür. Sonuç olarak yapıştırıcı katman kalınlığının mümkün olduğu kadar azaltılması gerektiği ifade edilmiştir. Diğer bir çalışmada, seramik ve alüminyum plakaların ara yüzeylerinde kullanılan yapıştırıcı kalınlığının etkisi araştırılmıştır (Lopez-Puente ve ark., 2005). Seramik katmanda parçalanmanın ince adezif katmanla azaldığı ancak alüminyum plakanın enerji sönümlenme kapasitesinin kalın adezif katmanla arttığı görülmüştür. Mermi penetrasyonu ve kalıntı mermi hızı açısından değerlendirildiğinde 0,3 mm kalınlıktaki adezif katmanın en iyi dayanımı gösterdiği rapor edilmiştir.

Taşdemirci ve ark. [37] seramik ve cam elyaf takviyeli kompozit zırh ara yüzeyinde kauçuk, teflon ve alüminyum köpük kullanılmasının zırh üzerine etkilerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Ara yüzey malzemesinin katmanlar arası gerilim dalga iletimini değiştirdiği ve kauçuk ara yüzeyin kompozit katmanda ilk gerilim oluşumunu etkilemediği tespit edilmiştir. Teflon ve alüminyum köpük ara yüzeyin ilk gerilim oluşumunda önemli bir gecikmeye neden olduğu ve kompozit arka plakaya iletilen gerilme büyüklüğünü azalttığı belirtilmiştir. Seramik katmandaki hasar kauçuk ara yüzeyde ve ara yüzey malzemesinin kullanılmadığı durumlarda mermi darbe bölgesine yoğunlaşmıştır. Teflon ve köpük kullanımı hasar bölgesinin radyal yönde genişlemesini sağlamıştır. Yapılan bir diğer çalışmada ise, alüminyum ve karbon fiber kompozit plakanın ara yüzey dayanımını araştırılmış, yapıştırıcı dayanımı arttıkça yapının enerji sönümlenme kapasitesinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca ara yüzey bağlantısı bulunmayan durumlara kıyasla da ara yüzey bağlantısının enerji sönüm kabiliyetini önemli oranda arttırdığı görülmüştür (Öberg ve ark., 2015).

1.2. Motivasyon

Literatür taraması ile elde edilen bilgiler doğrultusunda katmanlı yapının etkisi altı katmanlı yapılara kadar incelenmiş ve metal katmanlı yapıların ara yüzeylerinde sadece bitişik ve boşluklu durumlar irdelenmiştir. Sünek ince saclarda düzlem gerilme durumu için kırılma tokluğu değerinin düzlem birim şekil değişimi kırılma tokluğundan daha yüksek olduğu bilinmektedir. Buradan hareketle çok ince katmanlardan oluşmuş, toplam kalınlığı sabit, yüksek katman sayılı yapıların balistik dayanımının, yekpare ve düşük katmanlı yapılara kıyasla nasıl değişeceği merak konusu olmuştur. Literatürde düşük katmanlı yapılar için bile bir belirsizliğin hakim olduğu, farklı çalışmaların farklı yorumları beraberinde getirdiği açıktır.

Aydınlatılması gereken bir diğer husus ise metallerde katmanlı yapılar tasarlanırken katmanların yapıştırıcı ile birleştirilmesinin balistik dayanıma etkisidir. Yapıştırıcı etkisi, genelde farklı malzemelerin iki ve üç katmanlı tasarımlarının yapıştırılarak birleştirilmesi ve yüksek katman sayılı kompozit yapılar için araştırılmıştır.

Bu çalışmamızda yekpare, üç katmanlı ve dokuz katmanlı 48-50 RC sertliğinde temperlenmiş martenzitik AISI 4340 çeliğinin balistik başarımı deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar ile incelenmiş ve deneysel verilerle nümerik analizlerin uyumu irdelenmiştir. Katmanlar arası yapıştırıcı etkisini görmek amacıyla üç katmanlı ve dokuz katmanlı yapıların deneysel incelenmesi hem kuru temaslı hem de epoksi ile yapıştırılmış olarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile epoksi ara yüzeyi modellemesinde başarımlar araştırılmıştır. 48-50 RC sertliğine ulaşabilmek için gerekli ısıtma işlemleri yapılmıştır. Analizler balistik araştırmalarda başarımları kanıtlanmış Ls-Dyna sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Zırhta meydana gelen hasarın doğru tahmini ve katman etkisinin daha iyi görülmesi için literatürde yetkinliği açık olan Johnson-Cook bünye denklemi ve hasar parametreleri kullanılmıştır.

AISI 4340 çeliği ile 18 ve 36 katmanlı yapıların elde edilmesi için gerekli olan 0.5 mm ve 0.25 mm çelik plakaların, ısıtma işlemi parçalarda görülen yüksek çarpılmalar ve yüksek maliyetler nedeniyle imalatı çok güç olmaktadır. Bu nedenle yüksek katmanlı

yapıların deneysel olarak incelenmesi yukarıda belirtilen kalınlıklarda piyasadan hazır olarak temin edilebilen 47-49 RC sertliğinde Ck75 sulu yay çeliği ile gerçekleştirilmiştir. Ck75 sulu yay çeliği ile üretilen üç, 20 ve 40 katmanlı yapıların deneysel analizleri ile yüksek katmanlı zırhların balistik performansları araştırılmıştır. Bu çalışmalar ile elde edilen bilgiler ışığında terminal balistik literatüründe henüz aydınlatılmamış birçok nokta daha anlaşılır hale gelmiştir.

BÖLÜM 2. HASAR

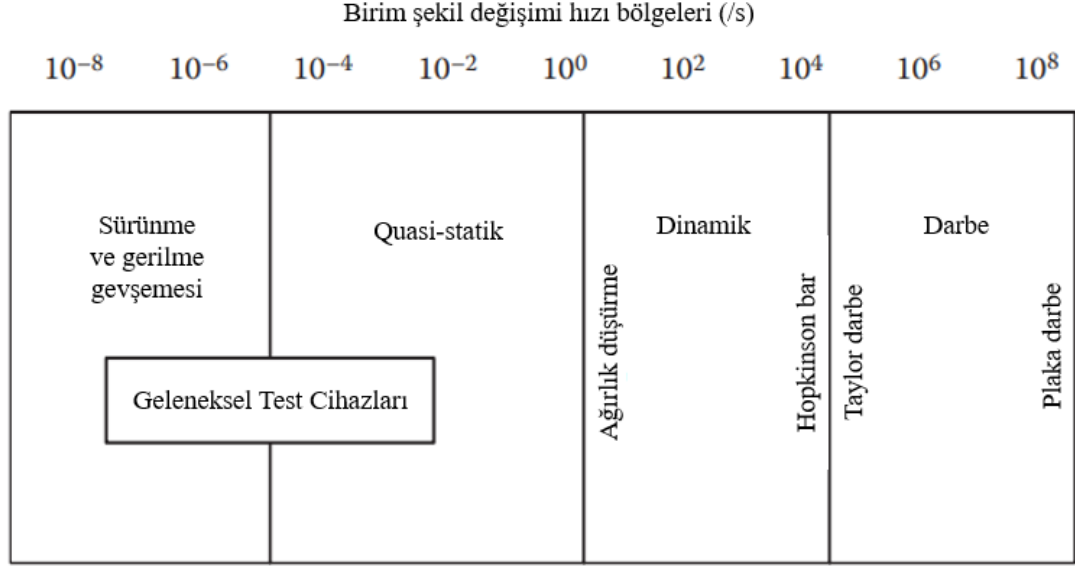
2.1. Malzemelerin Dinamik Davranışları

Bir mermi bir malzemeye çarptığı zaman, zırhta veya mermide meydana gelen deformasyon hızı, klasik quasi-statik malzeme testlerinde gözlemlenenlerden çok daha fazladır. Mermi ve zırhların davranışları yüksek hızlı yüklemelerde, nispeten düşük hızlı yüklemelere göre farklıdır. Uygun tasarımlar gerçekleştirebilmek için bir zırhın dinamik yüklemeler altında nasıl davrandığını anlamak önemlidir. Bu yüzden dinamik yükler altında mekanik özelliklerini ve davranışlarını belirlemek için yüksek hızlı şekil değişimi davranışlarının gözlemlenmesi imkân sağlayan testler yürütülmektedir. Şekil 2.1. mühendisler ve malzeme bilimciler ile ilgili olan birim şekil değişimi hız aralığını özetlemektedir. Ayrıca birimi s^{-1} olan birim şekil değişimi hızının artışı ile dinamik yükler altından gerilme durumunu ölçmek ve malzemeye etkilerini incelemek için kullanılan farklı deneysel yöntemler de ifade edilmiştir.

Yüksek birim şekil değişim hızına maruz kalan malzemelerin dayanımları değişebilir ve çoğu malzeme için belirgin bir şekilde artmaktadır. Daha genel konuşmak gerekirse, birim şekil değişim hızının artması ile metaller daha dayanıklı hale gelirken aynı zamanda süneklikleri azalır. Birim şekil değişimi hızı ile artan dayanımın nedeni malzeme doğasına bağlı olan karışık mikro yapısal davranıştır. Çoğu metaller için mekanizma, plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketinin engellenmesi ile açıklanabilmektedir. Uzun zincirli polimerlerde, birim şekil değişimi hızı hassasiyeti, yüksek yükleme hızlarında moleküllerin dolaşmasından ve bunun sonucunda hareketlerinin engellenmesinden kaynaklanmaktadır.

Malzemelerin dinamik davranışlarını nümerik olarak inceleyebilmek için birim şekil değişimi, birim şekil değişimi hızı ve sıcaklık gibi etkileri de göz önünde bulunduran çeşitli malzeme modelleri ileri sürülmüştür. Johnson ve Cook (1983), Zerilli ve

Armstrong (1987) ve Follansbee ve Kocks (1988) bunlardan bazılarıdır. Johnson-Cook bünye denklemi ve hasar modeli Bölüm 3.4.1’de daha detaylı açıklanacaktır.



Şekil 2.1. Birim şekil değişimi hızı bölgeleri (Hazel,2016).

Dinamik koşullarda hasar, gerilmenin, hidrostatik gerilmenin, birim şekil değişiminin, birim şekil değişimi hızının, sıcaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak inşa edilir. Bu hasar kritik bir değeri (D_c) aştığı zaman, yerel veya global hasar meydana gelir.

$$D(\sigma, \bar{\sigma}, \dot{\epsilon}, T, t) \geq D_c \quad (2.1)$$

2.2. Hasar Mekanizmaları

Hasar, tasarım sınırlarının ötesinde herhangi bir deformasyonu kapsar. Eğer metaller akma sınırının ötesinde bir gerilmeye maruz kalırsa kalıcı plastik deformasyona maruz kalırlar. Tek boyutta birim şekil değişimi için akma gerilmesinin tanımlanması yeterlidir, ancak daha karmaşık gerilme durumları için daha karışık akma kıstaslarına ihtiyaç duyulmaktadır. Plastik deformasyon, makroskobik olarak şekil değişimiyle, mikroskobik olarak kayma sınırları ile ve atomik olarak dislokasyon hareketleri ile incelenmektedir.

Gerilme-birim şekil değişimi durumu atomik bağların ayrılması ile ifade edilen kırılma ile sonuçlanabilir. Makroskobik açıdan çatlak ucundaki gerilme-birim şekil değişimi ile ilişkili çatlak ilerlemesi göz önüne alınabilir. Karmaşık gerilme durumlarının olduğu dinamik problemlerde, daha genel akma fonksiyonu yaklaşımları sık sık kullanılmaktadır. Hasar ile ilgili mikroskobik ve yüzeysel özelliklerin incelenmesi dinamik deformasyon problemlerinin çözümünde önemli bir yere sahiptir.

Bir sonraki bölümde incelenecek olan zırhlarda meydana gelen hasar modlarına geçmeden önce sünek kırılma ve adyabatik kayma gibi genel hasar durumlarını kısaca tanımlamak gerekmektedir. Sünek kırılma durumunda, boyun vermenin gözlemlendiği büyük birim şekil değişimi durumları için, çatlak ilerlemesi, kayma ve hidrostatik gerilmeler altında boyun verme ve kayma mekanizmalarını takiben boşlukların birleşmesi ve yavaşça büyümesi ile meydana gelmektedir.

Adyabatik kayma, merminin hedefe penetrasyonu boyunca termal yumuşama hızının pekleşme hızını aşması ile meydana gelmektedir (Hazel, 2016). Özellikle yüksek birim şekil değişimi hızında ortaya çıkmaktadır. Eğer bir test ısı akışının engellendiği adyabatik koşullarda yürütülürse, numunenin sıcaklığı artacak ve bunun sonucunda da pekleşme hızında azalma ile birlikte termal yumuşama meydana gelecektir. Adyabatik kaymanın meydana gelebilmesi için düşük ısı iletkenlik ve az deformasyon zamanı (yüksek hız) gereklidir. Bu yüzden adyabatik kayma darbe yüklemelerine özgüdür. Küt uçlu delicilerin çarpması ile metallerin deformasyonu adyabatik kayma ile gerçekleşmektedir. Buna ek olarak sivri uçlu mermilerin etkisi altında da gözlemlenebilmektedir.

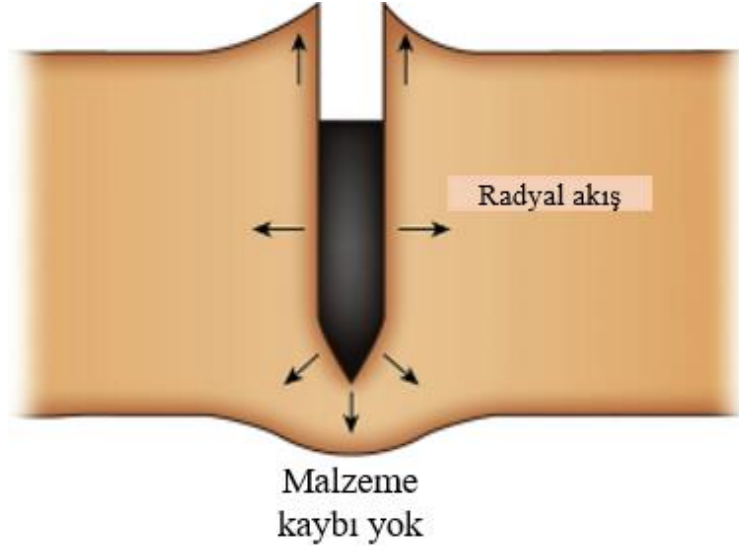
2.2.1. Zırhlarda hasar modları

2.2.1.1. Sünek delik oluşumu

Bu durum sivri uçlu mermilerin etkilediği zırhlarda görülmektedir ve etkili bir enerji sönmeme mekanizmasıdır. Zırh tarafından durdurulup durdurulmadığına bakılmaksızın sivri uçlu veya ogival şekilli mermiler, malzemenin şekil değişimi veya

plastik deformasyonu vasıtasıyla zırhta delinmeye sebep olur. Bu deformasyon tipinde zırhta malzeme kaybı olmamakla birlikte mermilerde çok az deformasyon görülebilir. Zırh malzemesi ister düşük dayanımlı çelik ister sünek alüminyum veya titanyum alaşımı olsun mermi ucundan dışa doğru özellikle radyal olarak akar (Şekil 2.2.). Malzemenin fiziksel şekil değişiminden dolayı, çok miktarda malzeme merminin önüne doğru itilir (zırhın arka yüzeyinde bombe oluşturur). Bunun yanında merminin zırha giriş bölgesinde hasarlanmış metal yaprakları (taç yapraklara benzerliğinden dolayı literatürde bu şekilde adlandırılmaktadır) geriye doğru oluşmaktadır. Böylece zırhta bombe oluşumu ve giriş kısmında yapraklanma ile mermi durdurulmaktadır. Bombe yüksekliğinin artması ile bombe ucunda yıldız benzeri çatlamlar görülebilir. Bu durdurma mekanizmasında hedef direncinin çoğu onun plastik akma özelliğinden gelmektedir. Zırhın delinmesi durumunda merminin zırha girdiği duruma benzer şekilde, çıkış bölgesinde de yaprak benzeri açılma meydana gelecektir. Mermi ile hedef malzemesi arasında meydana gelen sürtünme ile sıcaklık artışı olacağından, çelik hedeflerde sürtünme yüzeylerinde temper renklerinin görülmesi olağan dışı değildir.

Mümkün olan bütün hasar modları içerisinde, penetrasyon veya delinme sürecinin herhangi bir evresinde herhangi bir malzeme kaybı olmadığından dolayı, SDO için balistik direnç maksimum, zırh arkasında oluşan etkiler minimum olmaktadır. Sünek delik oluşumu (SDO) ile hasarlanan malzemelerin balistik performanslarının tahmini için Woodward (1978) akma dayanımına dayalı basit bir model ortaya koymuştur. Ancak günümüzde hasar tahmini daha fazla etkiyi kapsayan ve daha kesin sonuçlar veren akma ve hasar kriterlerinin kullanıldığı nümerik analizlerle yapılmaktadır.



Şekil 2.2. Sünek delik oluşumu (Crouch,2017).

İnce plakalarda ise penetrasyon sırasında hedef mermi önünde iç bükey olur. Burada plakada meydana gelen eğilme devam ettikçe iç bükey bölgenin yarıçapı artar ve uzamaya devam eder. İç bükey hasarlanma, plaka kalınlığının mermi çapından küçük olduğu durumlarda daha çok görülmektedir. Deformasyonun uzama ve eğilme ile meydana geldiği ince plakalarda hasarlanma için gerekli enerji, radyal akma ile delik oluşumuna maruz kalın plakaların hasarlanması için gerekli olandan daha azdır.

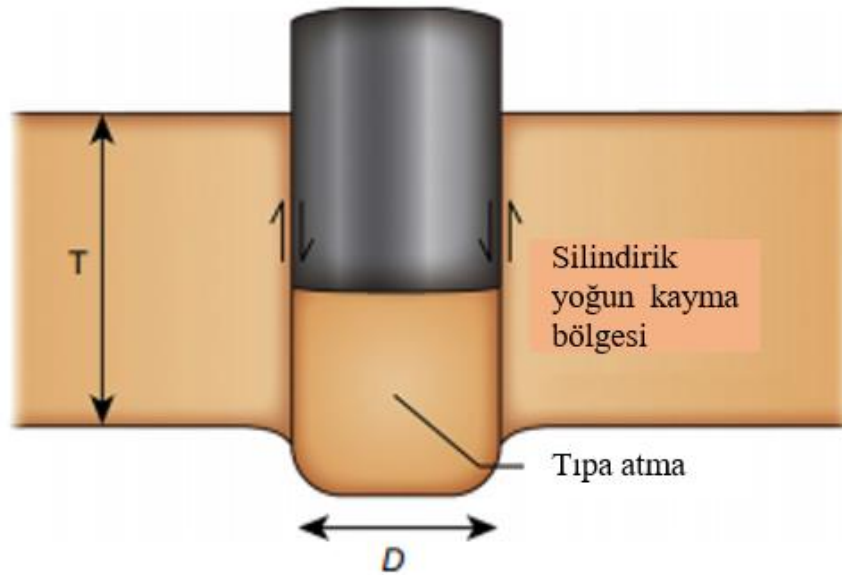
2.2.1.2. Tıpa atma

Tıpa atma, merminin önündeki malzemede yerel basınçların, kayma birim şekil değişiminin, birim şekil değişimi hızının ve sıcaklığın lokal olarak çok yüksek olması durumunda adyabatik koşullar altında kayma deformasyonu sonucu meydana gelen bir hasar mekanizmasıdır. Bir mermi hedefe çarptığı zaman, hedefin geri kalanı göreceli olarak durağan kalırken merminin önündeki malzeme hareketlenir. Düşük enerji sönümlenme kapasitesine sahip olan bu durum genel olarak kör uçlu nesnelere darbesine maruz kalan yekpare zırhlarda gözlemlenmektedir. Eğer malzeme kenarlarında tıpanın kayarak çıkmasına izin veren kayma bantları veya çatlak ilerlemesi gibi zayıflıklar varsa, sivri uçlu delicilerde malzemeyi iterek tıpa atmaya neden olabilir. Tıpa atmanın meydana gelmesi için dar kayma bölgesi oluşumunu

destekleyen koşullar gereklidir. Pekleşen metallerde, radyal akmadan tıpa atmaya geçiş bu gibi kayma bölgelerinin oluşum zorluğundan dolayı meydana gelmeyebilir.

Tıpa atma olarak bilinen delinme mekanizması hedef malzemenin enine kayma özellikleri tarafından kontrol edilir. Şekil 2.3.'te gösterildiği gibi tıpa atma, merminin hedefe yoğun, silindirik bir kayma gerilmesi uyguladığı ve bir şekilde hedefte kesme başlattığı zaman meydana gelir. Kayma olayı oldukça bölgesel olduğu için, darbe tarafında bile çok az plastik deformasyon meydana gelir. Tıpa atma durumu ile ilgili en iyi bilinen özellik mermi çapı ve zırh kalınlığı oranı 1:1'e yakınsa, bu durum ortaya çıkmaktadır. Günümüzde adyabatik kaymanın kesin sebebi ile alakalı halen net bir bilgi yoktur, ancak faz dönüşümü popüler bir hipotez olarak karşımıza çıkmaktadır.

Genelde tıpa atma SDO ile kıyaslandığında çok az kinetik enerji sönümler. Ayrıca tıpanın kendi adıyla anılan ikinci bir mermi oluşturur. Tıpa zırhtan ayrılması, mermi zırh içerisinde durdurulsa bile, önemli bir tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu oldukça tehlikeli hasar modunu engelleme isteği, hem yapılandırılmış lamineler (kalınlık boyunca kaymanın engellendiği) vasıtasıyla, hem de çelik/CFGK lamineler ile olsun, katmanlı hedeflerin tasarımında sürükleyici etmendir.



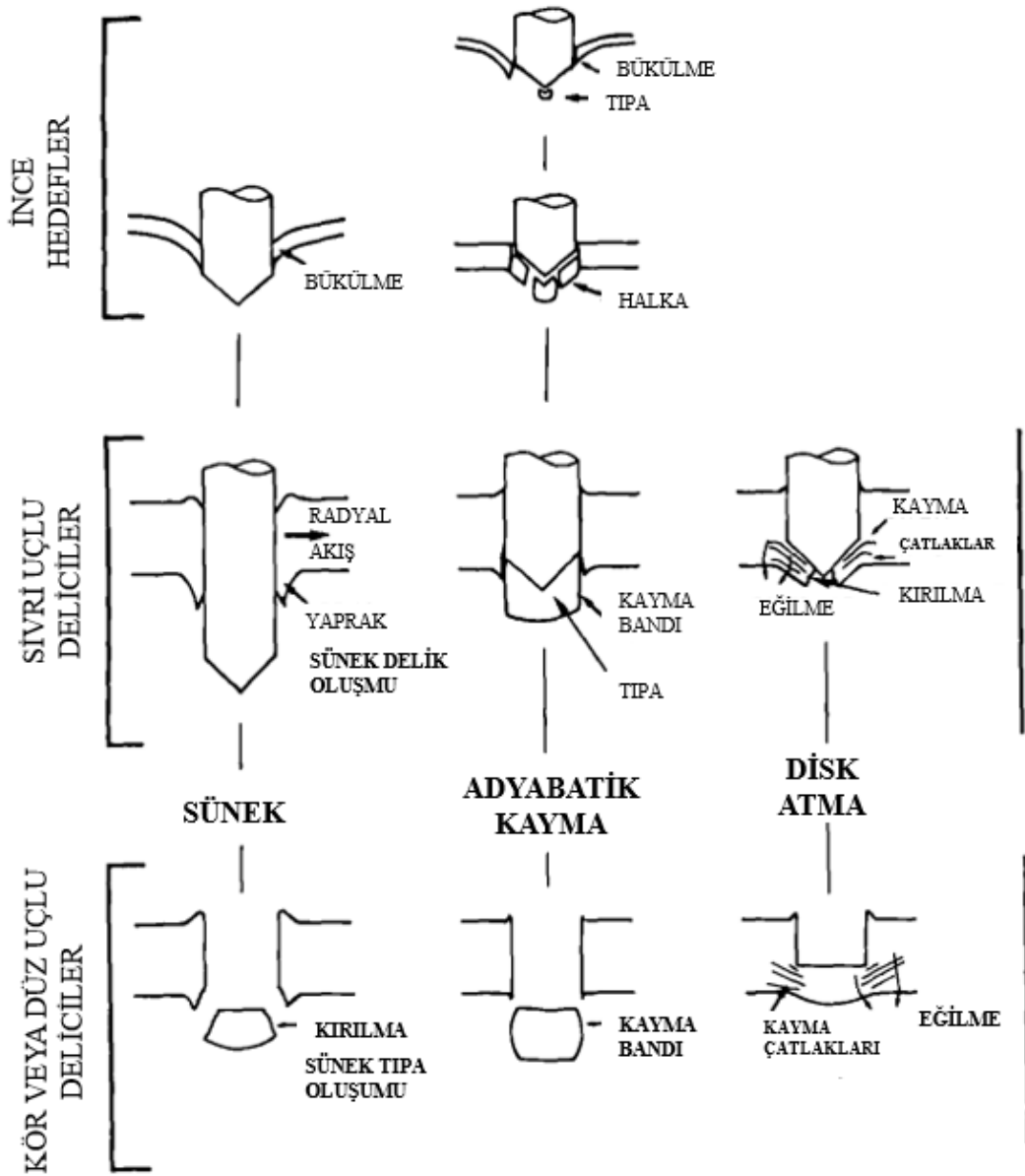
Şekil 2.3. Tıpa atma (Crouch,2017).

2.2.1.3. Disk atma

Bu durum yüksek hızlı mermilerin darbesine maruz kalan hedeflerde arka yüzeyde kopma şeklinde meydana gelen özel bir durumdur. Bu hasar modelinin varlığı zırh sistemlerinin balistik limit hızını önemli ölçüde azaltır ve düşük alaşımlıların balistik hasarında oldukça yaygındır. Erken hasarlanma durumu hedefte oluşan yoğun eğilme gerilmelerinden dolayı meydana gelir. Disk atma durumu bütün hedef tiplerinde görülebilmektedir: Kalın çelik hedefler, kalın alüminyum ve titanyum hedefler, bazı ince katmanlı malzemeler. Katmanlı malzemelerde delaminasyon bu hasar modunun öncüsü olabilir. Bütün durumlarda disk atmaya mekanik kırılma olayı sebep olmaktadır. Şok dalgalarının etkileşiminden dolayı meydana gelen klasik dökülme olayı ile karıştırılmamalıdır.

Crouch bu kırılma olayını detaylı bir şekilde tanımlamıştır (Crouch, 1992) ve sonra çelik diskler üzerinde detaylı bir çalışma yürütmüştür. Hasarda üç bölüm raporlanmıştır: (1) yoğun eğilme momentinin oluşumu ve katmanlar arası kayma çatlakları; (2) ana kopma düzlemi boyunca delaminasyon çatlağının hızla ilerlemesi; (3) düzlem içerisinde kırılma ile disk ayrılması.

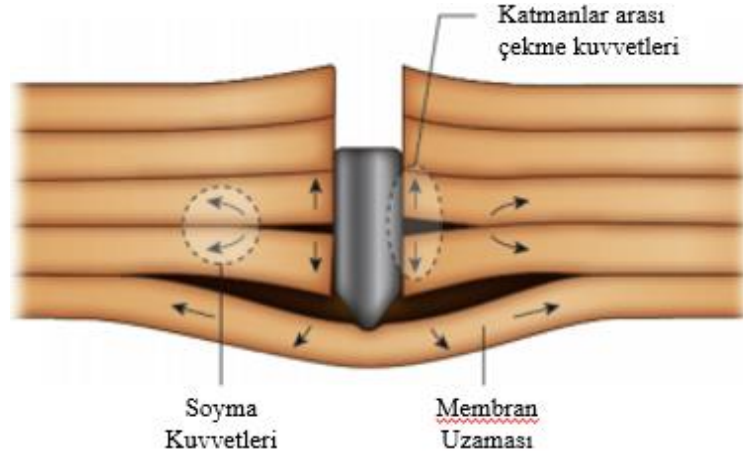
Zukas, sünek delik oluşumu, tıpa atma ve disk atma hasar modlarını, hasar mekanizmalarıyla birlikte detaylı bir şekilde ifade eden Şekil 2.4.'ü hazırlamıştır (Zukas, 1990).



Şekil 2.4. Hasar mekanizmaları (Zukas,1990).

2.2.1.4. Delaminasyon

Bu durum katmanlı zırhlar gibi ortotropik yapılarda gözlemlenmektedir. Küt mermilerin etkisi altında şiddetlense de mermi uç tipine bakılmaksızın zırhlarda meydana gelebilir. İki ana enerji sönmeme mekanizması delaminasyona eşlik eder; arka elemanların düzlem dışı plastik deformasyonunu ifade eden membran uzaması ve eğer varsa ara yüzeydeki yapıştırıcının çekme ve kayma deformasyonunu içeren katmanlar arası kırılma (Şekil 2.5.).

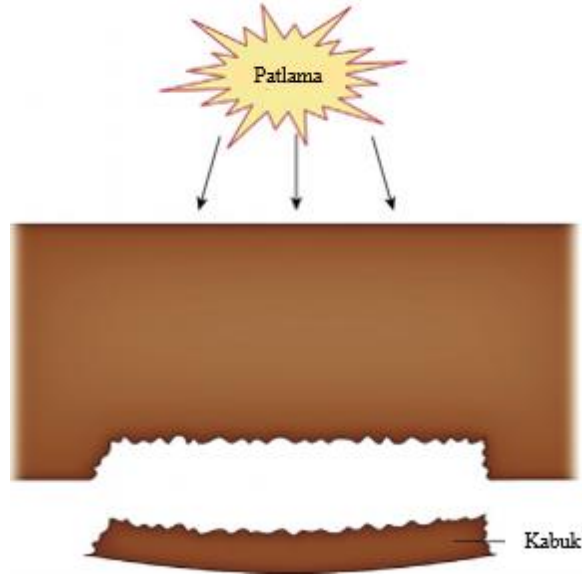


Şekil 2.5. Delaminasyon (Crouch,2017).

2.2.1.5. Konik kırılma ve dökülme

Konik kırılma ile meydana gelen hasar modu, çok yüksek sertlikteki çeliklerde, seramiklerde ve sert polimerlerde görülebilmektedir. Gevrek bir malzeme yüzeyine küt uçlu bir merminin darbesiyle yüzeyde bölgesel çekme gerilmeleri etkisi altında taze bir çatlak gelişir (Hertzian çatlakları). Merminin ileri yönlü hareketi ile başlangıç olarak temas yüzeyinin etrafını sarar ve hızla aşağılara doğru yayılarak malzemeyi konik keser.

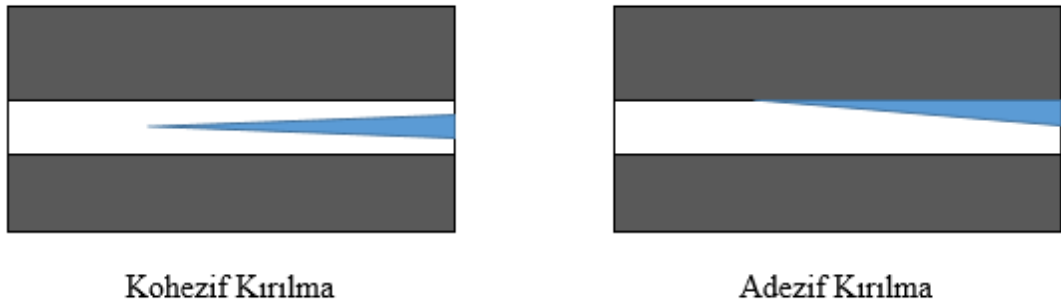
Dökülme, temas sonucu patlayan tahrip gücü yüksek başlıklı mermilerin saldırısı ile kalın, yekpare zırhlarda önemli hasarların meydana gelmesi durumudur. Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi, darbe noktasında üretilen güçlü bası gerilmesi dalgaları (elastik, plastik ya da şok) etkisiyle bir parça plaka arka yüzeyinden ayrılmaktadır. Dalgalar, yüzey bitiminde bası dalgaları ile ilişkili olan çeki dalgaları olarak yansımaktadır. Eğer bu ilişkinin boyutu kalınlık boyunca malzemenin çekme dayanımından büyükse, dökülme meydana gelir. Kalınlık boyunca çekme dayanımı, malzemenin parça kopmaması için gereken dökülme dayanımı olarak ifade edilebilir.



Şekil 2.6. Dökülme (Crouch,2017).

2.2.2. Yapıştırıcılarda hasar

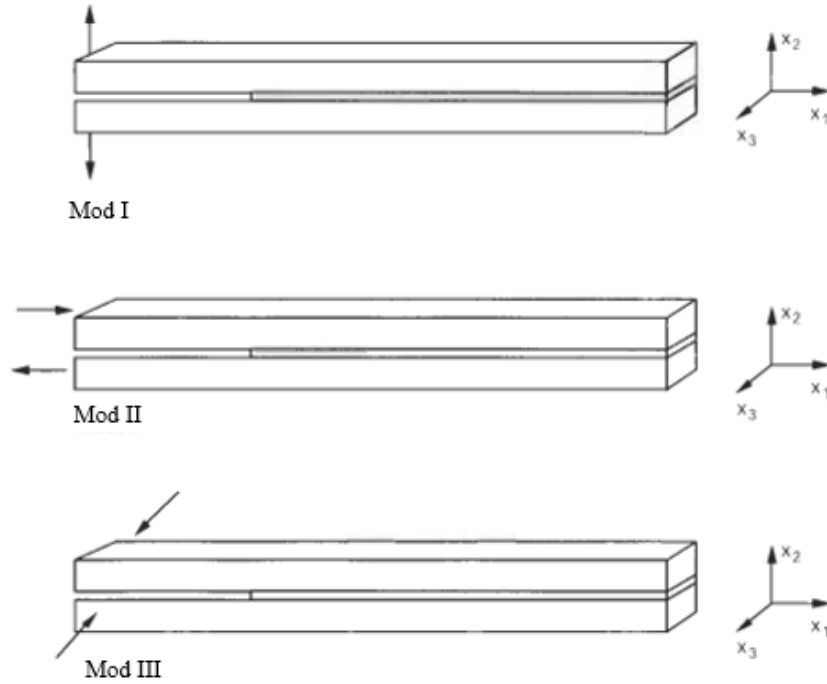
Temelde birbirine yapıştırıcı ile bağlanmış iki plakanın ayrılma durumunu iki şekilde inceleyebiliriz. Bunlardan birincisi tamamen yapıştırıcı katmanı içerisinde gerçekleşen kohezif kırılmadır. Bu durum yapıştırıcı ve yapıştırılan parçalar arasında bağlantının güçlü bir şekilde sağlandığını göstermektedir ve tercih edilen bir durumdur. İkincisi ise yapıştırıcı ve yapıştırılan parça ara yüzeyinde meydana gelen adezif kırılmadır. Kırılma özelliklerindeki bölgesel değişimler ile yapıştırıcı katmanındaki gerilme alanı arasındaki ilişkiden dolayı ara yüzey boyunca çatlaklar uzanır ve adezif kırılma ile sonuçlanır. Kohezif kırılmanın aksine bu tip bir hasarlanma yapıştırıcı bağlantılarında istenmemektedir.



Şekil 2.7. Yapıştırıcı bağlantılarında ayrılma.

Yapıştırma bağlantılarda meydana gelen hasarı ifade edebilmek için üç temel yaklaşım vardır; sürekli ortam mekaniği, kırılma mekaniği ve bu iki yaklaşımı da kapsayan hasar modelleri. Sürekli ortam mekaniğinde yapıştırıcı ile yapıştırılan arasında mükemmel bir bağlantının olduğu varsayılır. Bu yaklaşım bağlanan parçalarda gerilme ve deformasyonların belirlenmesine ve bağlantıya uygulanabilecek en büyük kuvvetlerin bulunmasına dayanmaktadır.

Kırılma mekaniği iki temel kıstasa dayanmaktadır; gerilme şiddet çarpanı ve enerji yaklaşımı. Malzeme içerisinde çatlaklar ve diğer düzensizlikler genelde gerilme yığılması noktalarıdır ve bunun sonucunda kırılmanın meydana gelmesi ve ilerlemesi için başlangıç noktalarıdır. Kırılmaya neden olan üç farklı yükleme modu vardır. Mod I açılma modu, mod II ve III kesme modlarıdır (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Yükleme modları.

Gerilme yığılması faktörü çatlak ucundaki gerilme durumdaki değişimleri ifade eder ve ilerleme kapasitesini ölçer. Mod I yüklemesini göz önüne alırsak;

$$K_I = K_{IC} \quad (2.2)$$

olmalıdır. K_{IC} mod I'de çatlak büyümesini engelleme kapasitesini ölçen bir malzeme özelliğidir ve mod I kırılma tokluğu olarak adlandırılır. K_I değeri K_{IC} değerinin altında olduğu sürece çatlak ilerleyemez. K_I parça geometrisine, çatlak geometrisine ve yükleme tipine bağlı bir değişken iken, K_{IC} bir malzemeye özgüdür ve malzemenin mekanik bir özelliğidir.

Enerji kıstası, kusur ucundaki enerji (G ; enerji salınım hızı) çatlak ilerlemesi için gerekli olan enerjiye (G_C ; eşik enerji salınım hızı) eşit olduğu zaman içteki kusurların büyümesi hipotezine dayanır. Belirli enerji salınım hızında çatlak ilerlemesinden kaçınmak için;

$$G \leq G_C \quad (2.3)$$

olmalıdır. Homojen malzemeler için sunulan yaklaşımlar şu denklemle ilişkilendirilebilir;

$$G = \frac{K^2}{\bar{E}} \quad (2.4)$$

düzlem gerilme durumunda $\bar{E} = E$ olur. Düzlem birim şekil değişimi durumunda ise $\bar{E} = E/(1 - \nu^2)$ olmaktadır.

Uygulamaların çoğunda uygulanan yükler çatlak ucunda eş zamanlı olarak meydana gelen modların birleşiminden kaynaklanmaktadır. Genelde çatlak mod I boyunca ilerleme eğilimindedir. Ancak yapıştırılan parçalar saf mod I çatlak ilerlemesini engelleyeceği için, çatlak karışık modda (I+II) ilerlemeye zorlanır. Yapıştırıcılarda hasarlanmanın tahmininde, enerji kıstasının gerilme yığılma faktöründen daha iyi olduğunu düşünülmektedir. Bunun iki sebebi vardır; (1) enerji kıstası çatlak enerji sönmemesi açısından önemlidir, (2) gerilme yığılması faktörünü elde etmek zordur. Uygun enerji kıstasına bu karışık modda (I+II) çatlak ilerlemesini tahmin edebilmek için ihtiyaç vardır.

Kırılma mekaniği, hasar başlangıcını yapay olarak simüle edecek olan ön çatlaklar olarak modellenen kusurların varlığına dayanmaktadır. Kırılma mekaniği ölçütü hasar başlangıcından ziyade hasar ilerlemesi için daha elverişlidir.

Kohezif hasar modelleri, hasar başlangıcını tanımlayan sürekli ortam mekaniği araçları ile çatlak ilerlemesi ile ilgilenen kırılma mekaniği araçlarını birleştirir. Genel olarak CZM (cohesive zone model) olarak ifade edilen bu modellerin hem çatlak başlangıcını (ön çatlağa ihtiyaç duymaksızın) hem de çatlak ilerlemesini kapsamaları en önemli avantajlarıdır. Yani CZM'nin ana avantajı çatlaksız yapıların davranışını tahmin edebilmesidir.

İki malzeme birbirinden ayrılırken kohezif kuvvetlerin tanımlanmasında CZM oldukça iyi bir yoldur. Yüzeyler ayrılmaya başladığı anda, çekme bir maksimuma ulaşmaya kadar artmaya başlar. CZM eleman sayısı, kohezif elemanların ayrılmasının tamamen gerçekleştiği bir noktada sıfıra kadar azalır. Ayrılmanın ilerlediği yapıştırıcı bölgesinde çekme ayrılma eğrisi noktaları gözlemlenebilmektedir. Çekme ayrılma eğrileri yukarıda bahsedilen yükleme modları için tanımlanabilmektedir (Boqaileh, 2015).

BÖLÜM 3. MALZEME VE METOT

3.1. Malzeme Seçimi

Balistik dayanımın arttırılabilmesi için yüksek hızlı darbe altında hem mermi ucunun körleşmesi hem de malzemenin olabildiğince çok enerji sönümlemesi istenmektedir. Mermi ucunu körleştirebilmek için kullanılacak malzemenin yüksek sertlikte olması, yüksek enerji sönümlene kapasitesine erişebilmek içinse önceki bölümlerde bahsedilen sünek delinme durumunun meydana gelmesi, dolayısıyla sünek malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu iki özelliğin optimizasyonu malzemelerin balistik dirençlerinde anahtar rol oynamaktadır.

AISI 4340 çeliği derin sertleştirilebilirlik, yüksek süneklik ve tokluk özelliklerini bir arada bulundurması ile zırh tasarımları için malzeme seçiminde önemli bir aday olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca orta karbonlu, düşük alaşımlı çelik ailesinden olan AISI 4340'ın tedarik edilebilirliği, ısıl işleme elverişliliği ve analiz parametrelerinin literatürde bulunabilirliği de diğer önemli özellikleridir. Tablo 3.1.'de tedarik edilen 4340 çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3.1. AISI 4340 (34CrNiMo6) çeliğinin kimyasal bileşimi

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
	0.35	0.23	0.58	0.021	0.027	1.58	1.62
%	Mo	Cu	Al	Sn	Ti	N	Cu+10Sn
	0.25	0.15	0.018	0.011	0.001	0.0130	0.26

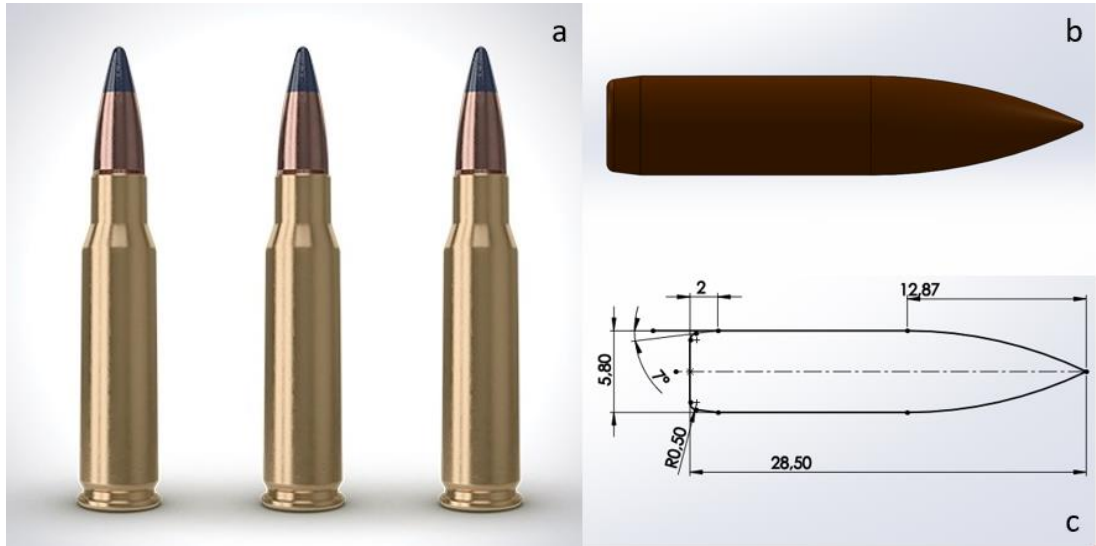
AISI 4340 çeliğinin alaşım elementlerini yüzeysel olarak incelenirse, genellikle belirli bir karbon oranında sertleştirilebilirliği arttırmanın en ucuz yolu mangan içeriğini arttırmaktır. Krom ve molibden de çelik sertleşme kabiliyetini artırıcı yönde etki eder.

Ancak krom, sertleşme kabiliyetini artırırken malzeme tokluğun düşüşe neden olabilir. Nikel, çeliklerin tokluğunda olumlu etki gösterir. Nikel ve krom birlikte kullanıldığı takdirde yüksek tokluk ve yüksek sertleştirilebilirlik kombinasyonuna erişilebilir. Molibden de en iyi etkiyi nikel ve kromla birlikte kullanıldığında sergiler.

Atış testleri 7.62 mmx51 (M61) Zırh Delici Mermi ile gerçekleştirilmiştir. Merminin genel özellikleri Tablo 3.2.'de, fişek ve çekirdek görselleri ve çekirdek teknik resmi Şekil 3.1.'de sunulmuştur.

Tablo 3.2. 7.62 mmx51 (M61) zırh delici mermi özellikleri

Fişek boyu	71,12 mm
Fişek ağırlığı	~ 24 g
Kovan Malzemesi	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)
Çekirdek Malzemesi	DIN 100Cr6 (61-62 HRC)
Mermi Ağırlığı	9,45 ± 0,15 g
Çekirdek Ağırlığı	4,6 ± 0,5 g
Hız (23,7 m)	838 ± 9,1 m/s



Şekil 3.1. 7.62 mmx51 (M61) zırh delici mermi a) fişek görseli, b) çekirdek görseli ve c) çekirdek teknik resmi

Tablo 3.3.'de hem AISI 4340 çeliğinin hem de mermi çelik çekirdeğinin malzeme özellikleri verilmiştir. Ek olarak 48-50 RC sertliğinde AISI 4340 çeliğinin akma dayanımı 1463 MPa, kopma uzaması değeri %13'tür (Goh ve ark., 2017, Demir, 2008).

Tablo 3.3. AISI 4340 ve mermi çelik çekirdeği malzeme özellikleri

Malzeme	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)	C_p (j/kgK)	χ	α (/K)
AISI 4340	207	0,29	7850	475	0,9	$1,2 \times 10^{-5}$
Çelik Çekirdek	210	0,33	7850	452	0,9	$1,2 \times 10^{-5}$

Katmanlı yapıların yapıştırılabilmesi için 3M Scotch-Weld DP460 Epoksi Yapıştırıcı kullanılmıştır. DP460 yüksek darbe direnci ve yüksek kayma direnci ile darbe altında metal katmanlı yapıların bir araya getirilmesinde en iyi seçeneklerden biridir. Üretici firma tarafından yüksek darbe direncinin gerektiği askeri ve uzay teknolojilerinde ve yüksek sıcaklık direncinin gerektiği uygulamalarda kullanımı tavsiye edilmiştir. Malzemenin analiz parametrelerinin bulunabilirliği ve tedarik edilebilirliği de bu yapıştırıcının seçiminde göz önünde bulundurulmuştur. Epoksi yapıştırıcının genel malzeme özellikleri Tablo 3.4.'te verilmiştir.

Tablo 3.4. DP460 Epoksi Yapıştırıcı malzeme özellikleri

Malzeme	E	ν	ρ	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı
DP460 Epoksi Yapıştırıcı	2.2 GPa	0.41	1200 kg/m ³	36 MPa	37.7 MPa



Şekil 3.2. 3M Scotch-Weld DP460 epoksi yapıştırıcı

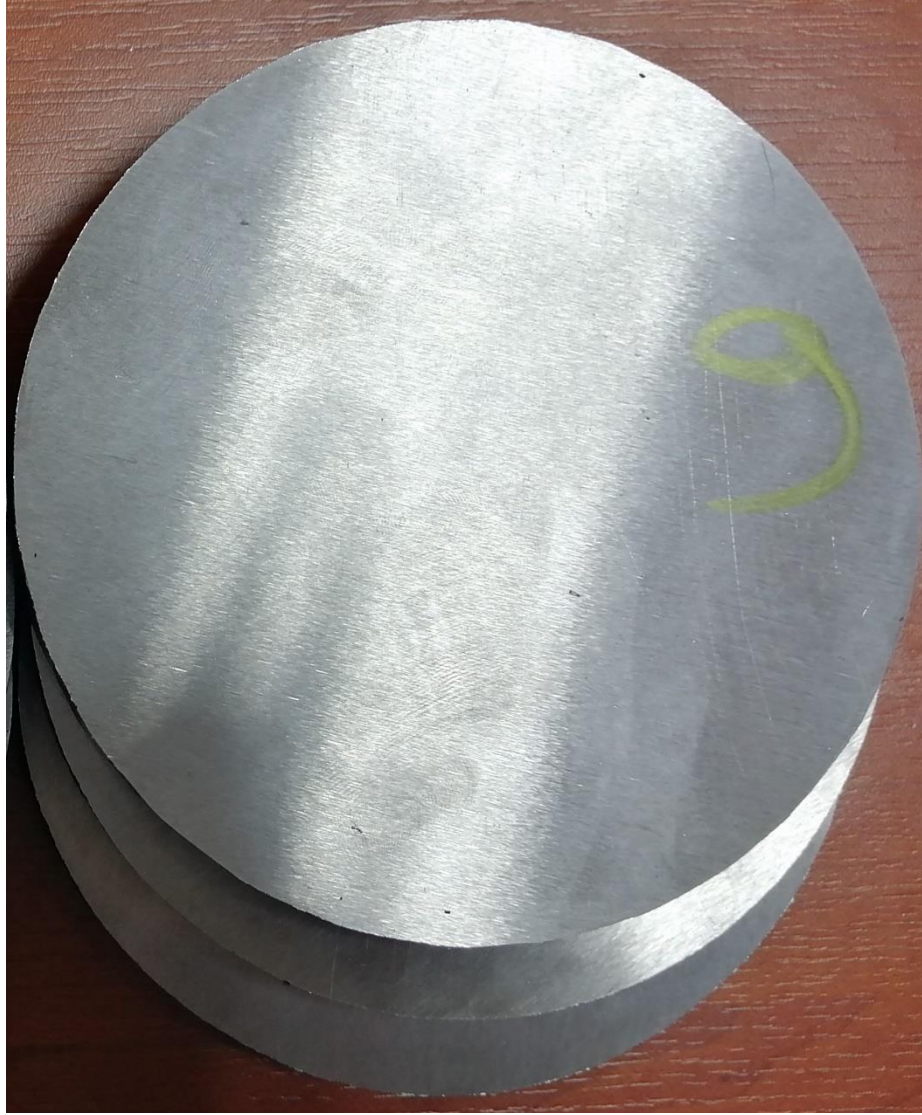
İmalatının oldukça zor olması ve maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle bir mm kalınlığının altında plakaların 4340 çeliğinden imal edilmesi neredeyse imkansız hale gelmektedir. Daha yüksek katmanlı yapıların incelenebilmesi için piyasadan tedarik edilebilir Ck75 sulu yay çeliği seçilmiştir. Ck75 sulu yay çeliği için literatürde nümerik analizler için gerekli parametreler bulunmadığı için sadece deneysel olarak araştırılmıştır. Piyasadan tedarik edilen 0.25, 0.5, 3 ve 4 mm kalınlığında sulu yay çeliklerinin kimyasal bileşimi Tablo 3.5.'te verilmiştir. Yüksek katmanlı Ck75 sulu yay çeliklerinin birleştirilmesi için EMS Force 58-15 Epoksi Yapıştırıcı kullanılmıştır.

Tablo 3.5. Ck75 sulu yay çeliğinin kimyasal bileşimi

%	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu
	0.77	0.65	0.19	0.024	0.006	0.12	0.006

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanışı

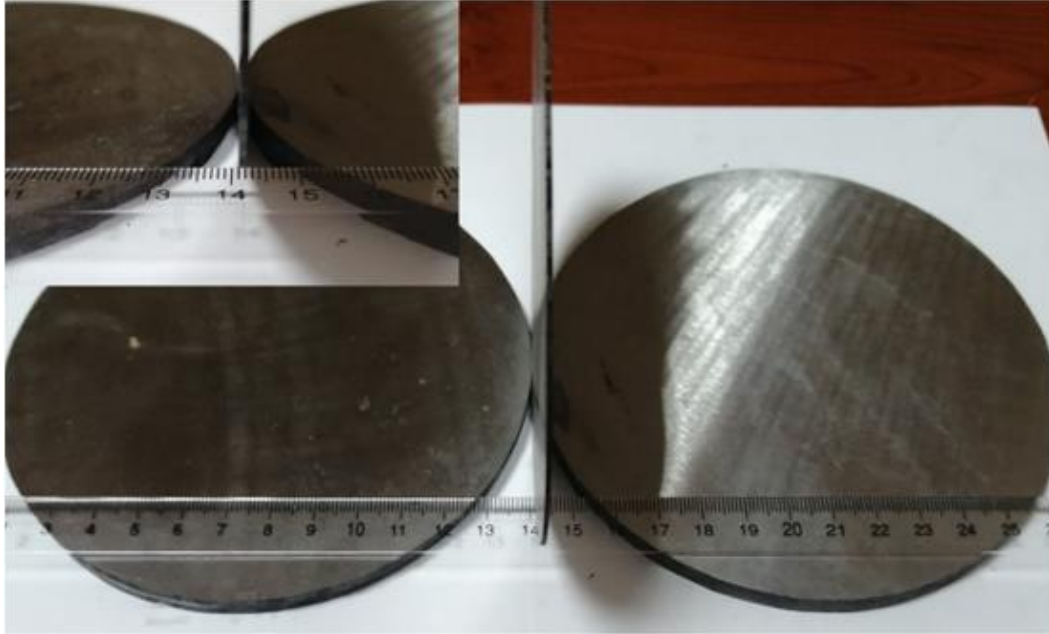
Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan 130 mm çapında plakalar 5 mm ve 10 mm boylarına testere ile kesilmiş olarak alındı. Öncelikle analiz parametrelerinin doğruluğunu test etmek için 9 mm yekpare yapılar atış testleri için hazırlandı. 10 mm boylarında 28 RC sertliğinde alınan plakalar öncelikle 9,2'ye torna tezgâhında işlenerek vakum altında ısıl işleme gönderildi. Isıl işlem sonrasında 48-50 RC sertliğine ulaşan plakalar 9 mm boyuna silindirik taşlama makinesinde düşük pasolarla işlendi ve atışlara hazır hale getirildi (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. 48-50 RC sertliğinde 9 mm kalınlığında plaka

Yekpare ve katmanlı yapı oluşturmak için imal edilen plakaların istenilen özelliklere getirilmesi için AISI 4340 çeliği 860 °C'de 90 dakika östenitlenmiş, ardından su verilmiş ve 450 °C'da bir saat temperlenmiştir.

Ara yüzey etkisini ve katman etkisini deneysel olarak incelemek ve epoksi yapıştırıcı analiz parametrelerinin doğrulamak amacıyla yapılacak olan atış testleri için 3 mm ve 1 mm boylarında plakalar hazırlandı. 5 mm'ye testere ile kesilmiş olarak elde edilen numuneler CNC dik işleme merkezinde manyetik tabla ile sabitlenerek 0,1 mm paso verilerek işlendi. Yüzey paralellliğini sağlamak için önce tüm plakalar (72 adet) ön yüzeyinden 4 mm'ye işlendi. Ardından plakaların 54 adedi arka yüzeylerinden 1,4 mm'ye, 18 adedi ise 3,4 mm'ye işlendi. 28 RC sertliğinde olan bu numuneler istenilen mekanik özelliklere erişilebilmesi için 48-50 RC'ye vakum altında sertleştirildi. Katmanlı zırhların imalinde kullanılacak olan plakalar 1 mm ve 3 mm'ye taşlanarak hem yüzey paralellliği sağlandı hem yapıştırma için uygun yüzey kalitesine erişildi.



Şekil 3.4. 48-50 RC sertliğinde 1 mm kalınlığında plaka



Şekil 3.5. 48-50 RC sertliğinde 3 mm boyunda plaka

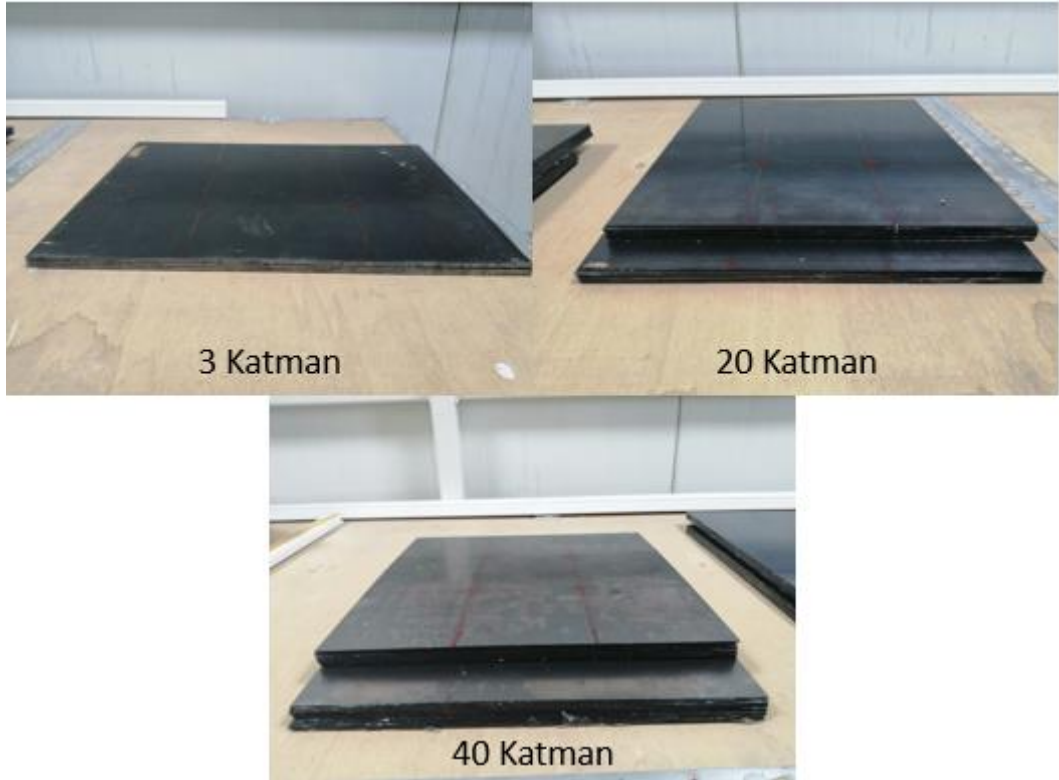
Hazırlanan 1 ve 3 mm kalınlığında plakalar epoksi yapıştırıcı ile sırasıyla dokuz katmanlı ve üç katmanlı yapı olarak birleştirilmiştir. Yapıştırma işlemi gerçekleştirilmeden önce yüzeyler asetonla temizlenmiş ve bağlantının zayıflamasına neden olacak kalıntılardan arındırılmıştır. Yapıştırıcı, yapıştırılan plakaların karşılıklı her iki yüzeyini tamamen kaplayacak şekilde uygulanmıştır. İmal edilmiş üç ve dokuz katmanlı yapılar Şekil 3.6.'da görülmektedir. Epoksi yapıştırıcı kullanılmaksızın dokuz ve üç katmanlı yapının oluşturulması, atış deneyleri yapılırken mengene ile sıkıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Katmanlar arasında boşluk bulunmasının balistik dayanımı azalttığı literatürde belirtilmiştir. Bu yüzden her iki durumda da arada boşluk kalmamasına özen gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş 3 ve 9 katmanlı yapılar

Piyasadan 300 mm x 300 mm boylarında 0,25 mm kalınlığında, 350 mm x 300 mm boylarında 0,5 mm kalınlığında, 400 mm x 300 mm boylarında 3 ve 4 mm kalınlığında Ck75 sulu yay çelikleri temin edilmiştir. Temin edilen bu çeliklerin sertlikleri ısıl işlem görmüş 4340 çeliği ile benzer olarak 47-49 RC'dir. 10 mm çelik kalınlığına sahip yapıların oluşturulması için 0,25 mm kalınlığında plakalardan oluşan 40 katmanlı, 0,5 mm kalınlığında plakalardan oluşan 20 katmanlı yapılar hazırlanmıştır. 10 mm

kalınlığında üç katmanlı yapıların ilk iki katmanı 3 mm kalınlığında plakalardan, üçüncü katmanı ise 4 mm kalınlığında plakadan oluşmaktadır. Her bir katman arasına sürülen epoksi yapıştırıcı ile plakalar yekpare hale getirilmiş ve epoksi yapıştırıcının tamamıyla kürlenmesi için bir gün beklenmiştir. Tüm yapılardan sekiz adet atış yapmaya uygun olarak ikişer numune hazırlanmıştır. İmal edilen numuneler Şekil 3.7.'de görülmektedir.

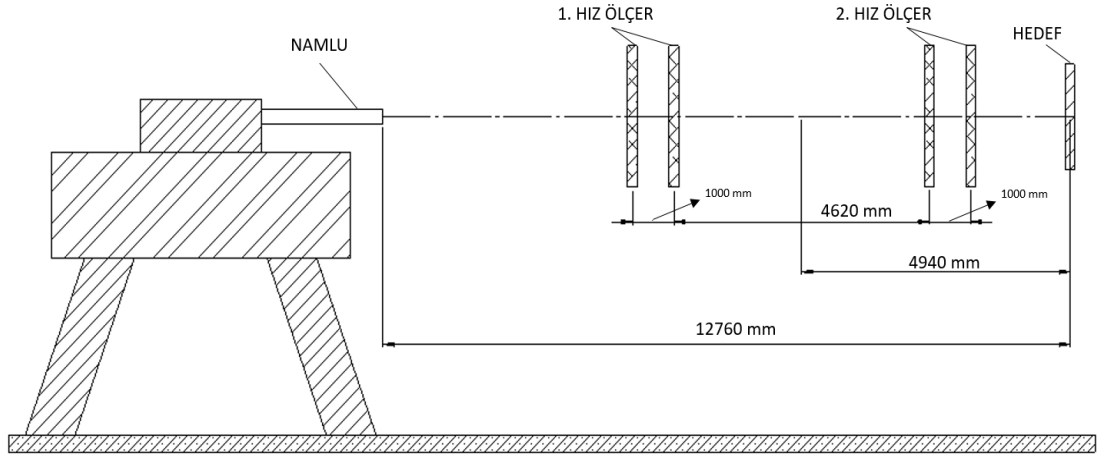


Şekil 3.7. Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilmiş 3, 20 ve 40 katmanlı yapılar

3.3. Deney Düzenegi

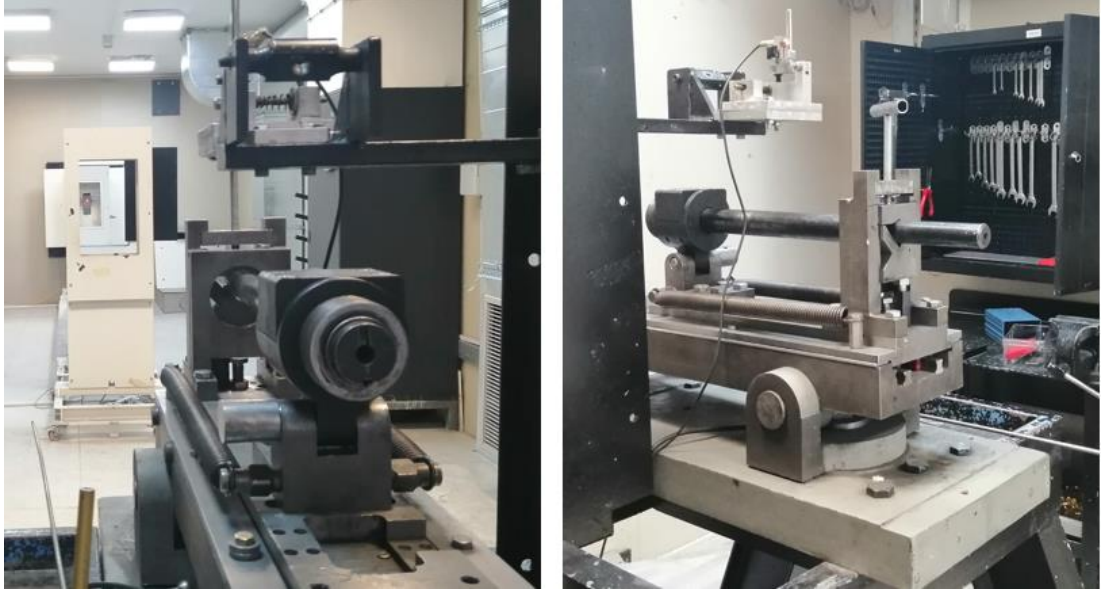
Hazırlanan tüm numunelerin balistik deneylerinin yapılabilmesi için Şekil 3.8.'deki deney düzenegi kullanılmıştır. Hedef şekilde de gösterildiği gibi namlunun 12,76 m uzağına yerleştirilmiştir. Mermi namludan çıktıktan sonra ilk hız ölçümü 4,51 m uzaklıktaki hız ölçer sistemi ile ikinci hız ölçümü ise 10,13 m uzaklıktaki hız ölçer sistemi ile gerçekleştirilmektedir. İki hız ölçer sisteminde de iki adet algılayıcı

bulunmaktadır. Mermi ilk algılayıcıdan geçtikten sonra sayaç çalışmakta ve ikinci algılayıcıdan geçince durmaktadır. Böylece merminin 1 m yolu ne kadar sürede aldığı hesaplanarak, mermi hızı ölçümü gerçekleştirilmektedir. Ayrıca nem ve sıcaklık değerlerinin de ölçümü sürekli olarak yapılmaktadır.



Şekil 3.8. Balistik test sistemi

MKE 7.62 mmx51 (M61) mermi atışı için uygun namlu seçilmiştir. Şekil 3.9.'da görüldüğü üzere, atış sırasında herhangi bir sapmanın olmaması için namlu iki ucundan yeterince rijit bir altlığa bağlanmıştır. Testlerin yürütüldüğü atış sisteminde, kullanılan barut miktarının değişimiyle istenilen mermi hızı elde edilebilmektedir. Öncelikle hız kontrolü için deneme atışı yapılmış ve deneme atışı sonrası ölçülen mermi hızına göre barut miktarı değiştirilmiştir. Mermi namluya yerleştirildikten sonra düzenekte bulunan bir kolun çekilmesi ile ateşleme sağlanmıştır.

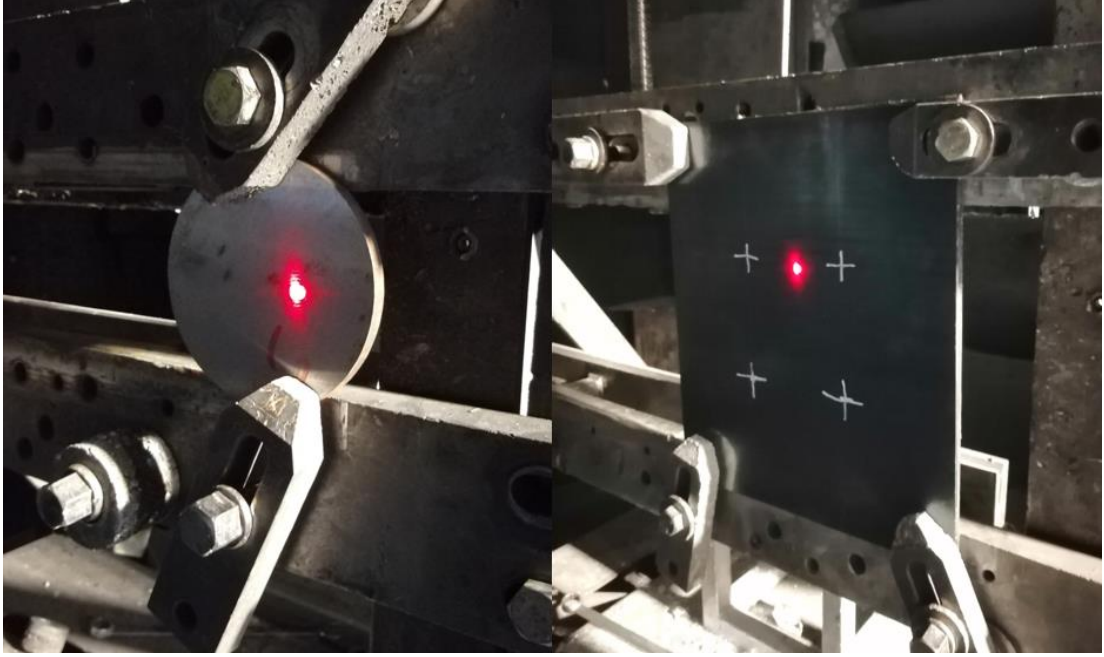


Şekil 3.9. Balistik test sistemi namlu düzeneği arka ve ön görünüşü

4340 çeliği için hazırlanan numunelere tek atış yapılacağı için atış noktalarını işaretleme gereksinimi duyulmamıştır. Ancak üç, 20 ve 40 katmanlı Ck75 sulu yay çeliklerinde her bir numuneye dörder atış yapılacağı için numune bağlanmadan önce atış noktaları Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi işaretlenmiştir. İlk yapılan atışlarının bir sonraki atışları etkilememesi için iki atış noktası arasında gerekli mesafenin bırakılması önemlidir. Bunun için 100 mm atış mesafesinin yeterli olduğu literatürde yapılan diğer bir çalışmada ortaya konmuştur (Borvik ve ark., 2009). 4340 çeliğinden hazırlanan yekpare, üç ve dokuz katmanlı numunelerin hepsine ikişer atıştan altı atış yapılmıştır. Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilen numunelerde ise üç katmanlıya dokuz atış, 20 ve 40 katmanlılara sekiz atış olmak üzere toplam 25 atış gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin bağlanması için kullanılan hedef düzeneğinde, iki adet yatay sütun istenilen boylarda yukarı aşağı hareket ettirilebilmektedir ve numunenin boyuna uygun konuma getirilerek sabitlenmektedir. Hedef düzeneğinin raylar üzerinde hareket edebilmekte ve bağlanmış numune istenilen konuma getirildiğinde fren sistemi ile hareketi engellenmektedir. Merminin atılacağı konum test düzeneği tarafından lazer ile gösterilmektedir. Böylece atışların kayda değer bir sapma olmaksızın istenilen noktalara yapılması sağlanmaktadır. 4340 çeliğinden imal edilen numuneler alt ve üst

kısımlarından olmak üzere iki kısımdan herhangi bir kaymaya fırsat vermeyecek şekilde tutturulmuştur. Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilen plakalar daha büyük olduğu için dört köşe noktasından rijit bir şekilde tutturulmuştur.



Şekil 3.10. Numunelerin hedef düzeneğine bağlanması

3.4. Nümerik Simülasyonlar

Zırh malzemeleri ve sistemlerini geliştirmek, özellikle uzun denemeler içerdiği zaman oldukça pahalı bir iştir. Penetrasyon ve delinme durumları farklı hasar mekanizmalarını kapsar ve oldukça karmaşıktır. Ayrıca darbe bölgesindeki fiziksel koşullar sıcaklık, birim şekil değişimi hızı, birim şekil değişimi, gerilme durumu, basınç ile değişebilir (Crouch, 2017).

Nümerik modelleme, bu karmaşık bazen tahmini oldukça zor dinamik olayları daha iyi anlamak için zırh biliminde hızlıca kullanılmaya başlanmıştır. Zırh tasarımında maliyetlerin azalması, sürecin hızlandırılması ve detaylar üzerindeki dikkatlerin artmasında oldukça etkili olmuştur. Nümerik simülasyonlar ve deneysel sonuçlar arasındaki fark daha hızlı bilgisayarların, daha güçlü yazılımların, kapsamlı yeni temas

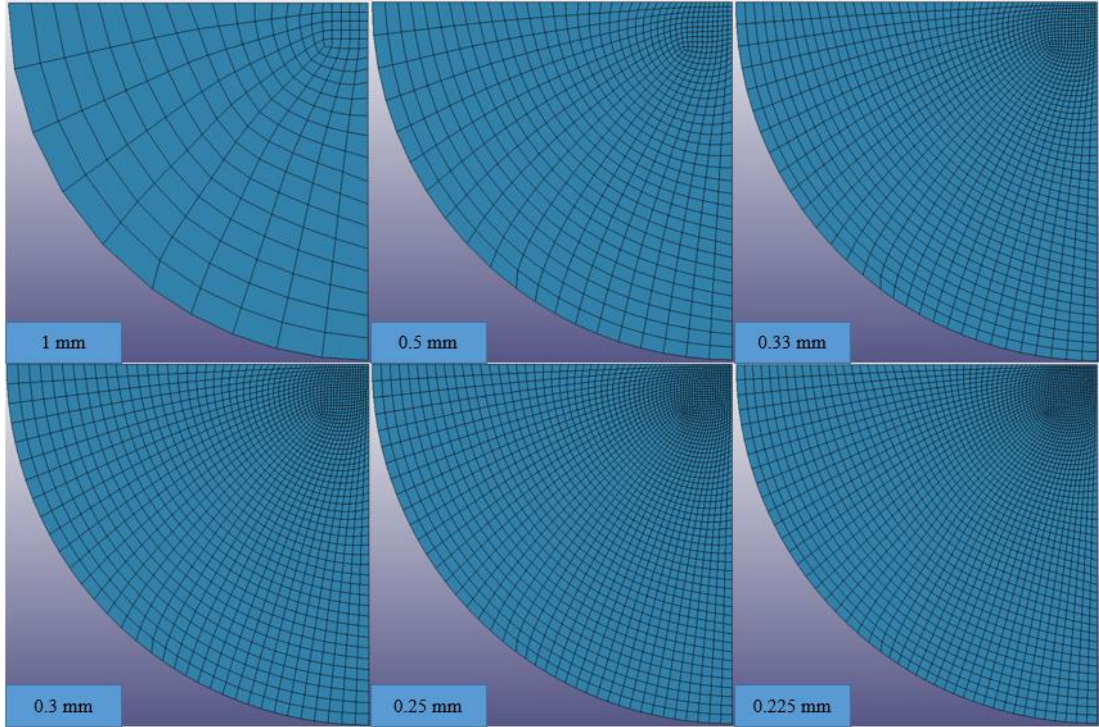
algoritmalarının, yeni elemanların ve malzeme modellerinin geliştirilmesi ile son 30 yılda önemli ölçüde azalmıştır.

Balistik üzerine yapılan değerlendirmeler elastik malzeme davranışı varsayımının ötesindedir. Bu yüzden kullanımda olan çeşitli plastisite modelleri konu üzerine çalışan mühendisler tarafından kavranmalıdır. Balistikte, sadece hidrostatik basınç etkilerini göz önüne alan yaklaşımın yetersizliğinin görülmesi ve deviatorik gerilme bileşenlerinin de tanımlanmasına imkan veren hidrokod yazılımlarının geliştirilmesi en önemli başarılardandır. Bu durum yıllar boyunca geliştirilen yeni malzeme modellerinin hidrokodlara uygulanması ile geliştirilmiştir. Zırh penetrasyon analizlerinde bütün hidrokodların altında enerji, kütle ve momentum korunumu denklemlerinin hesaplanması yatmaktadır. Bu boyut ve zaman ayrıştırması ile gerçekleşmektedir. İlki sonlu elemanlar, sonlu farklar, sonlu hacimler gibi yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Çoğu hidrokodlar korunum denklemlerinin zamana bağlı cevabını bulmak için büyük zaman aralıklı veya küçük zaman aralıklı çözüm metotları kullanır. Büyük zaman aralıklı metotta her bir zaman artışının yakınsaması gerekir ve uzun zaman aralıkları ayarlanabilir. Küçük zaman aralıklı yöntemde ise anlık durumdan belli bir zaman sonraki durum hesaplanır ve analizin her zaman aralığında yakınsamasına gerek yoktur. Küçük zaman aralıklı yöntemde çözümün doğruluğunu artırmak için zaman artışlarının azaltılması gerekmektedir. Terminal balistik ve patlama modellemesindeki gibi büyük ve ani deformasyonların meydana geldiği dinamik süreçlerde mikro ve nanosaniyelerde dalga ilerleme durumunu görmek ve bu problemlerin nonlineerliğini daha iyi modellemek için küçük zaman aralıklı integrasyon kullanılmalıdır (Crouch, 2017; Zukas, 2004).

Bu araştırmada, balistik analizlerde yetkinliği literatürde birçok çalışma ile kanıtlanmış LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. LS-DYNA özellikle küçük zaman aralıklı yöntem ile büyük deformasyona maruz yapıların nonlineer analizleri için kullanılan bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Balistik etki ile eleman silinmesi gibi zor temas problemlerinin analizine müsaade eden farklı temas-etki algoritmaları kullanılmaktadır. Çok geniş bir malzeme modeli kütüphanesi ve farklı

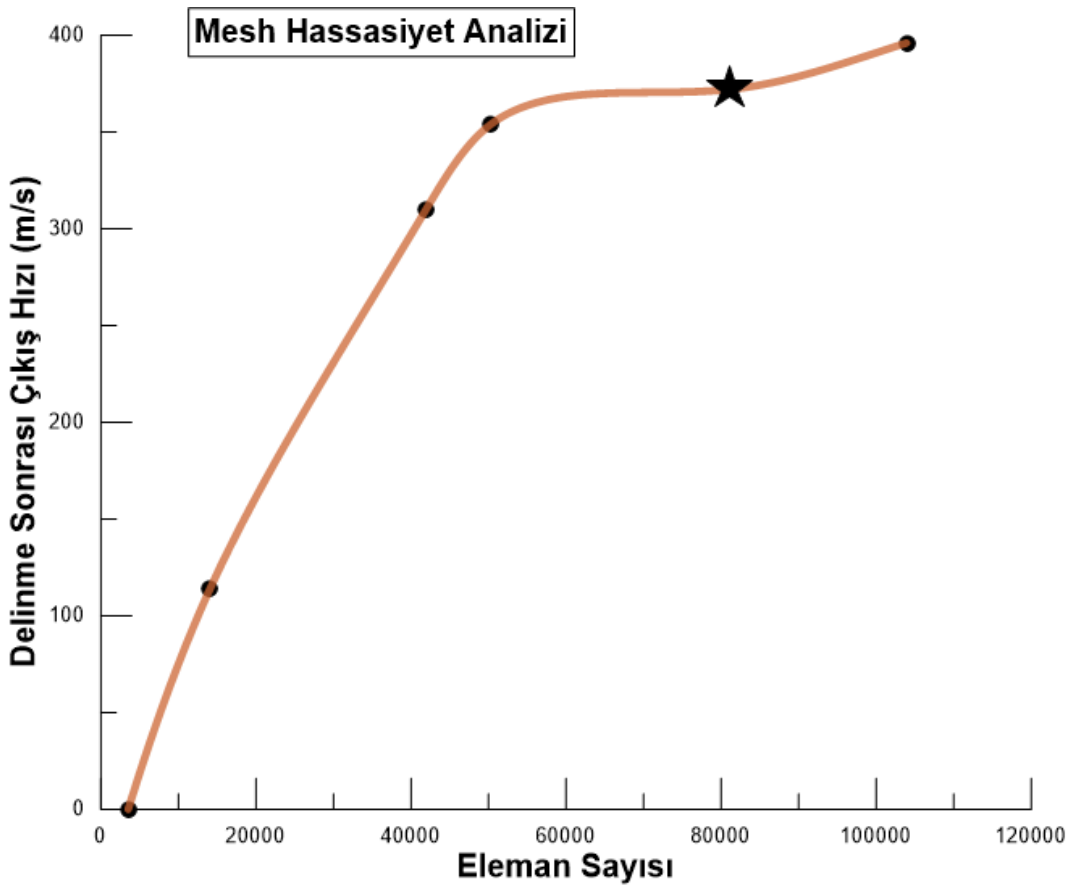
temas algoritması tiplerini sahip olan bu yazılımın etkin bir şekilde kullanımı için analize uygun veri kartlarının kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan Lagrange metodu, balistik simülasyonlarda hali hazırda var olan dinamik gerilme dalgası yayılımını çözmek için sürekli malzemenin bölümlenmesine dayanmaktadır (Crouch, 2017). Katı cisim ‘N’ adet elemana ayrılmaktadır ve buna ağ yapısı denilmektedir. Lagrange hesaplamalarında malzeme ağın içine gömülmektedir. Böylece ağ yapısının yer değiştirmesi, dönmesi ve bozulması malzeme davranışını ifade eder. Ağ yapısının yoğunluğunun artmasıyla hesaplamalarda doğruluğu artarken, çözüm zamanında da keskin yükselmelere neden olabilmektedir. Bu yüzden sonuçların değişimlerinde ihmal edilebilir seviyede sapmanın görüldüğü durumlara ulaşmak için en uygun ağ yapısı seçilmelidir. En uygun ağ yapısı, çözümlerde sapmaların ihmal edilebilir seviyeye geldiği en düşük hesaplama zamanının elde edildiği tasarımdır. Atış yapılan plakalarda hasar tahmini için, mermi ile temasta olan bölgede eleman sayısı yoğunlaştırılmış. İlgili bölgede küp şeklinde olan elemanın boyutları 1 mm’den 0.225 mm’ye kadar incelenmiştir (Şekil 3.11.).



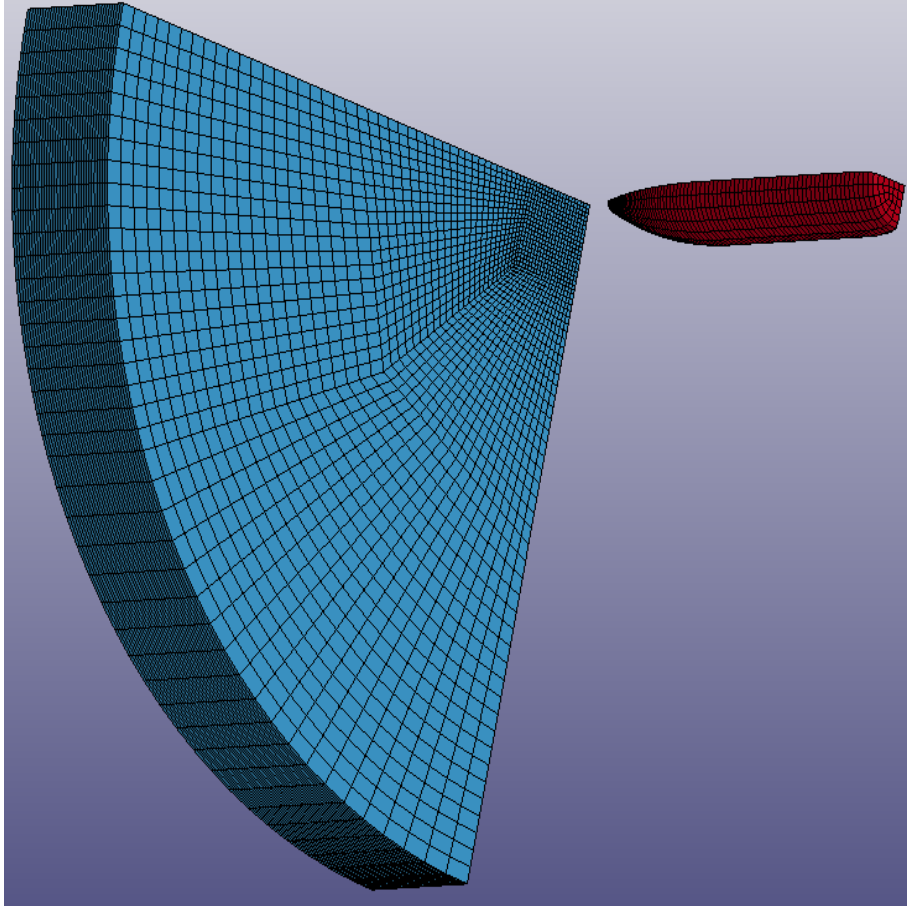
Şekil 3.11. Plakaların farklı eleman sayıları için incelenmesi

Literatürde yapılan benzer analizlerde metallere eleman sayısının yoğun olduğu bölgede $0.33 \times 0.33 \times 0.33 \text{ mm}^3$ ve $0.25 \times 0.25 \times 0.25 \text{ mm}^3$ boyutlarında elemanların kullanılmasının yeterli olduğu belirtilmiştir (Flores-Johnson ve ark., 2011; Borvik ve ark., 2009). Ek olarak, yapılan bu çalışma için yürütülen analizlerin eleman sayısına bağımlılığı incelenmiş ve Şekil 3.12.'de verilmiştir. En yoğun bölgesinde $0.25 \times 0.25 \text{ mm}^3$ boyutlarında eleman boyutuna ve 81048 elemana sahip modelle birlikte sonuçlarda kayda değer bir değişimin olmadığı görülmektedir.



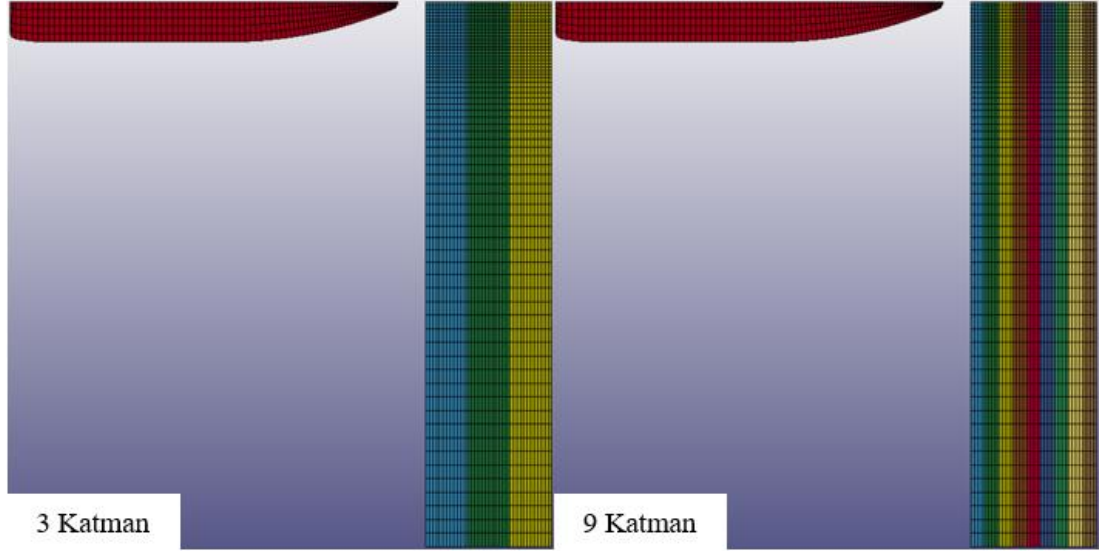
Şekil 3.12. Eleman sayısının sonuçlara etkisi

Analiz süresini kısaltmak için mermi ve plaka çeyrek model olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.13.). Uygun sınır koşulları ile simetri tanımlanmış ve çözüm başarısı literatürdeki deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler ışığında yapının çeyrek model olarak analiz edilmesinin literatürdeki veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.13. Plaka ve mermi çeyrek model görünümü

Katmanlı yapıların tanımlaması için temas mekanizmaları kullanılmıştır. Şekil 3.14.'te üç ve dokuz katmanlı yapıların tasarımda yapıştırıcının kullanılmadığı durumlar için hali hazırda LS-DYNA sonlu elemanlar programında mevcut olan CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE temas mekanizması kullanılmıştır. Katmanlar arasında herhangi bir boşluk bırakılmamış ve sürtünme katsayısı ihmal edilmiştir. Katmanlar arası bağlantının çift fazlı epoksi yapıştırıcı ile sağlandığı durumlar için ise Tie-Break temas mekanizması tercih edilmiştir. Bu mekanizmaya Bölüm 3.4.3.'te daha detaylı bir şekilde değinilecektir. Mermi çekirdeği ve plakalar arasındaki temas içinse yine kullanılan programda mevcut olan CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas mekanizması uygun görülmüş ve sonuçların doğru bir şekilde elde edilebilmesi için Hourglass kontrol opsiyonu kullanılmıştır.



Şekil 3.14. 3 ve 9 katmanlı yapılar

LS-DYNA, yazılımına dahil edilmiş ve her bir elemanların davranışını tanımlayan malzeme modelleri ile malzeme davranışını simüle etmektedir. Her bir malzeme modeli, malzemedeki her bir elemanın en doğru davranışını ortaya koymak için oluşturulmuştur. Mekanik davranışı en uygun şekilde modellemek için, farklı etkenleri belirli bir mantık çerçevesinde birleştiren bünye denklemleri tanımlamak önemlidir. Balistik simülasyonlarda, metal zırhların darbe altında davranışlarının modellenmesinde Johnson-Cook bünye denkleminin ve hasar modelinin yetkinliği literatürde birçok çalışma ile kanıtlanmıştır.

3.4.1. Johnson-Cook (JC) model

Johnson-Cook dayanım modeli, farklı birim şekil değişimi hızlarında ve çeşitli sıcaklıklarda yapılan deneyler sonucunda ortaya konulmuş akma gerilmesi denklemdir. Metal malzemelerin gerilme ve birim şekil değişimi ilişkilerini, yüksek deformasyon, yüksek birim şekil değişimi hızı ve yüksek sıcaklık şartlarında tanımlayabilmektedir (Johnson ve Cook, 1983).

$$\sigma_{e\dot{\epsilon}} = f(\epsilon_{e\dot{\epsilon}}, \dot{\epsilon}_{e\dot{\epsilon}}^*, T) \quad (3.1)$$

Bu parametreleri daha detaylı ifade edersek:

Plastik birim şekil değişimi ve ilgili pekleşme ($\varepsilon_{e\dot{\varepsilon}}$; A, B ve n malzeme sabitleri ile pekleşmeyi tanımlamaktadır.)

Birim şekil değişimi hızı ve dislokasyon yığılmasına bağlı birim şekil değişimi hızı pekleşmesi ($\dot{\varepsilon}_{e\dot{\varepsilon}}^*$; C sabiti ile birim şekil değişimi hızı pekleşmesini tanımlamaktadır.)

Sıcaklık ve adyabatik sıcaklık artışından kaynaklanan termal yumuşama (T; m sabiti ile termal yumuşamayı ifade etmektedir.)

JC modeli yukarıda belirtilen üç durumun çarpımı ile elde edilmektedir.

$$\sigma_{e\dot{\varepsilon}} = (A + B\varepsilon_{e\dot{\varepsilon}}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{e\dot{\varepsilon}}^*)(1 - T^{*m}) \quad (3.2)$$

Denklemdaki ilk parantez pekleşmeden dolayı akma gerilmesindeki artışı hesaba katmaktadır. Metal içerisinde sürekli kayma oluşturmak için gerekli kayma gerilmesi kayma birim şekil değişimindeki artış ile sürekli artar. Pekleşme, dislokasyonların birbiri ile ve kristal yapılar içerisinde onların hareketlerini engelleyen bariyerlerle etkileşiminin malzemede doğurduğu sonuçtur. İkinci parantez artan birim şekil değişimi hızı ile akma dayanımındaki artışı ifade etmektedir. $\dot{\varepsilon}_{e\dot{\varepsilon}}^*$ boyutsuz bir parametredir ve Denklem 3.3 ile gösterilmiştir.

$$\dot{\varepsilon}_{e\dot{\varepsilon}}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_{e\dot{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (3.3)$$

$\dot{\varepsilon}_0$ kullanıcı tarafından tanımlanan referans birim şekil değişimi hızıdır. Son parantez homolog sıcaklık T^{*} 'dir. Bu sıcaklığa bağlı ifade termal-plastik dengesizlikten dolayı malzemenin termal yumuşamasını ortaya koymaktadır. Bu terim arttırılmış sıcaklıktaki akma gerilmesinin oda sıcaklığındaki akma gerilmesine oranını değerlendirmektedir.

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_e - T_0} \quad (3.4)$$

Burada “o” alt indisi oda sıcaklığını “e” alt indisi ise ergime sıcaklığını belirtmektedir. Sıcaklık artışının adyabatik olarak gerçekleştiği varsayılmaktadır. Adyabatik ısınmadan dolayı sıcaklık artışı aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır;

$$DT = \int_0^{\dot{\epsilon}_{es}} \chi \frac{\sigma_{es} d\epsilon_{es}}{\rho C_p} \quad (3.5)$$

burada ρ malzeme yoğunluğunu, C_p özgül ısıyı ve χ plastik şekil değişimi işinin ısıya dönüşen oranını temsil eden Taylor-Quinney katsayısıdır. Taylor-Quinney katsayısının çelikler için 0.9 alınması uygundur (Borvik ve ark., 2009).

Orjinal Johnson-Cook modelinde, $\dot{\epsilon}_{es} < 1$ olduğu durumlarda istenmeyen etkilerden kaçınmak için birim şekil değişimi hızına hassasiyeti ifade eden ikinci parantez modifiye edilmiştir.

$$\sigma_{es} = (A + B\epsilon_{es}^n)(1 + \dot{\epsilon}_{es}^*)^C(1 - T^{*m}) \quad (3.6)$$

Bu çalışmada Denklem 3.6’da verilen modifiye edilmiş Johnson-Cook (MJC) malzeme modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

3.4.2. Johnson-Cook hasar parametreleri

Johnson-Cook dayanım modeline paralel olarak, Johnson-Cook hasar modeli gerilme üç eksenliliği ile ilgili bir çalışma üzerine geliştirilmiştir (Johnson ve Cook 1985). Gerilme üç eksenliliği durumuna ek olarak sıcaklık, birim şekil değişimi hızı ve birim şekil değişimi yönüne bağlılığın hasar üzerine etkisi tanımlanmıştır.

$$D = \sum \frac{\Delta\epsilon_{es}}{\epsilon_f} \quad (3.7)$$

Burada $\Delta\epsilon_{es}$, bir integrasyon döngüsü boyunca meydana gelen eşdeğer plastik birim şekil değişiminin artımını ifade etmektedir. ϵ_f , belirli birim şekil değişimi hızı, sıcaklık ve eşdeğer gerilme koşulları altında meydana gelen kırılma için birim şekil

değişimidir. Kırılma $D = 1$ olduğu zaman gerçekleşmektedir. Yani kırılmanın gerçekleşmesi için $\sum \Delta \varepsilon_{e\bar{s}} = \varepsilon_f$ olması gerekmektedir. Kırılma birim şekil değişimi için Johnson-Cook hasar parametreleri Denklem 3.8'de verilmiştir.

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}_{e\bar{s}}^*)) (1 + D_5 T^*) \quad (3.8)$$

Üç parantezin kırılma birim şekil değişimi üzerine etkileri sırasıyla, gerilme üç eksenliliği etkisi, birim şekil değişimi hızı etkisi ve sıcaklık etkisi olarak sıralanabilir. D_1, \dots, D_5 testlerden elde edilen malzeme sabitlerini ve $\sigma^* = \bar{\sigma} / \sigma_{e\bar{s}}$ gerilme üç eksenlilik durumunu simgelemektedir. Gerilme üç eksenlilik denkleminde $\bar{\sigma}$ ifadesi ile hidrostatik gerilme belirtilmiştir.

AISI 4340 çeliği ve mermi çekirdeği için literatürden alınan ve nümerik simülasyonlarda kullanılan Johnson-Cook dayanım parametreleri ve hasar parametreleri Tablo 3.6.'da verilmiştir.

Johnson-Cook hasar parametrelerine ek olarak sıcaklık temelli hasarlanma simülasyonlarda tanımlanmıştır. Kritik sıcaklık değeri $T_{kr} = 0,9T_e$ olarak alınmıştır (Borvik ve ark., 2009). Bu durum, sıcaklığın ergime sıcaklığının %90'ına ulaşması halinde elemanların silineceğini ifade eder. Kritik sıcaklığa ulaşıldığında, malzemenin dayanımının çok düştüğü ve darbeye karşı direnç sergileyemeyeceği varsayılmıştır. Hasar parametreleri mermi çekirdeği için tanımlanmamış, sadece sıcaklık ile hasarlanma göz önüne alınmıştır (Borvik ve ark., 2009).

Tablo 3.6. AISI 4340 ve mermi çelik çekirdeği Johnson-Cook dayanım ve hasar parametreleri

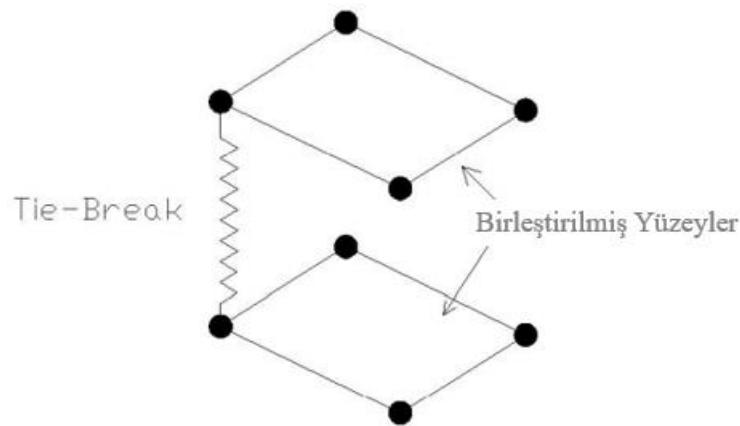
Malzeme	Dayanım Parametreleri				
	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
AISI 4340 (Goh ve ark., 2017)	1463	927	0,426	0,006	1,03
Mermi Çekirdeği (Borvik ve ark., 2009)	1200	50000	1	0	1

Tablo 3.6. (Devam)

Malzeme	Hasar Parametreleri				
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
AISI 4340 (Holmquist ve ark., 2001)	-0,8	2,1	-0,5	0,002	0,61
Mermi Çekirdeği	0	0	0	0	0

3.4.3. Epoksi yapıştırıcının modellenmesi

Epoksi yapıştırıcının modellenmesinde parçaların birbirine göre nasıl hareket edeceğini belirleyen Tie-Break temas mekanizması kullanılmıştır. Tie-Break elemanları, her bir düğüm noktasının farklı elemanlara ait olduğu iki düğüm noktalı yay elemanları olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 3.15.). Tie-Break, yapıştırılarak bir araya getirilen yapıların pek çok farklı senaryosunun modellenmesini yürütebilen bir temas mekanizmasıdır. Yapıştırılmış iki yüzeyin ayrılmasını modellemek için çok az hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır. Tie-Break temas mekanizmaları, kullanılan yazılımın kapasitesine göre bağlı olarak analizlerde birkaç farklı yolla kullanılabilir (Ricon, 2012).



Şekil 3.15. Tie-Break (LSTC, 2007)

Ls-Dyna sonlu elemanlar yazılımında, Tie-Break temas mekanizması kullanılması ile aşağıdaki çıktılar elde edilebilmektedir (Ricon, 2012):

1. Normal veya kayma bileşenlerinin veya her ikisinin kombinasyonunun bir fonksiyonu olarak hasar
2. Gerilme plastik akma ile sınırlandırılmaktadır ve bir hasar fonksiyonu ile tanımlanmaktadır
3. Gerilme kırılma kriterine eriştiği anda hasar başlangıcı

Ls-Dyna sonlu elemanlar yazılımında yapıştırıcıyı modellemek için kullanılan temas tipi `AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK`'tir. Bu temas tipi için ara yüzey davranışını modellemede kullanılan temas parametreleri Tablo 3.7.'de verilmektedir.

Tablo 3.7. DP460 Yapıştırıcı temas mekanizması parametreleri (Boqaleh, 2015)

Çekme hasar dayanımı (<i>SLSF</i>)	37.57 MPa
Kayma hasar dayanımı (<i>NFLS</i>)	20.67 MPa
Normal enerji salınımı (<i>ERATEN</i>)	2.82 N/mm
Kayma enerji salınımı (<i>ERATES</i>)	15.73 N/mm

BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Deneysel Sonuçlar

Yapılan deneyler sonucunda 4340 çeliğinden imal edilen yekpare, üç katmanlı ve dokuz katmanlı numunelerin balistik performansları ve hasar mekanizmaları araştırılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda, yapılarda meydana gelen deformasyon şekilleri ve miktarları gözlemlenmiştir. Numunelerin balistik dayanımları, yakın hızlarda yapılan atışlar sonucunda delinip delinmeme ve deformasyon miktarlarına göre kıyaslanmıştır.

İlk olarak Şekil 4.1.'de görülen yekpare yapı incelendiğinde, 9 mm kalınlığında 48-50 RC sertliğinde 4340 çeliğinin sünek delik oluşumu şeklinde deforme olduğu görülmektedir. 793 m/s hızında M61 zırh delici mermi ile gerçekleştirilen atış sonucunda plaka ön kısmında ve arka kısımda kenarlara doğru materyal yığılması gerçekleşmiştir. Aynı plakaya 652 m/s hızla ikinci darbede durumunu incelemek için deneme atışı yapılmış ve plaka ön yüzünde küçük bir oyuk oluştuğu görülmüştür. 746 m/s hızla atış yapıldığında ise plaka delinmemiş ve sadece ön yüzünde oyuk oluşmuştur. Arka yüzeyinde ise hafif bombe oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. Yekpare 4340 yapıların atış sonrası deformasyonları

Üç katmanlı yapıları incelediğimizde, kuru temaslı ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıların hasar mekanizmasının değişmediği görülmektedir (Şekil 4.2.). Her iki durumda da ön yüzde mermi atış doğrultusunda eğilme meydana gelmiştir. Plakalardaki deformasyon miktarı ilk katmandan son katmana doğru artmaktadır. Arka yüzeylerde çok hafif yapraklanmaya sebep olan eğilme durumu ortaya çıkmıştır. Bu durum ince sünek plakalarda iç bükey hasarlanmanın bir örneğidir. Kuru temaslı yapıda deformasyon yapıştırılmış yapı ile kıyaslandığında daha fazladır. Yapıştırılmış yapılarda delaminasyon sonucu plaka ayrılması tespit edilmemiş ve yapı bütünlüğünü korumuştur.



Şekil 4.2. 3 katmanlı 4340 yapıların atış sonrası deformasyonları

Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi katman sayısı dokuz çıkarıldığında, kuru temaslı ve yapıştırılmış yapıların arka yüzeylerde benzer hasar mekanizmaları görülse de deformasyon miktarları önemli ölçüde farklılaşmıştır. Her iki durumda da arka yüzeylerde yoğun yapraklanma ve yaprak kenarlarında hafif yırtılma meydana gelmiştir. İç bükey hasarlanma iki durumda da şiddetli olsa da kuru temaslı yapıda daha belirgindir. Ön yüzeyler incelendiğinde ise yapıştırılmış yapıda sadece mermi çapı kadarlık bir bölgede deformasyon olurken kuru temaslıda ince plakalarda iç bükey hasarlanmaya uygun olarak delik kenarlarında eğilme gözlemlenmiştir. Bu durum yapıştırılmış yapının ilk katmanlarında iç bükey hasarlanmanın olmadığını

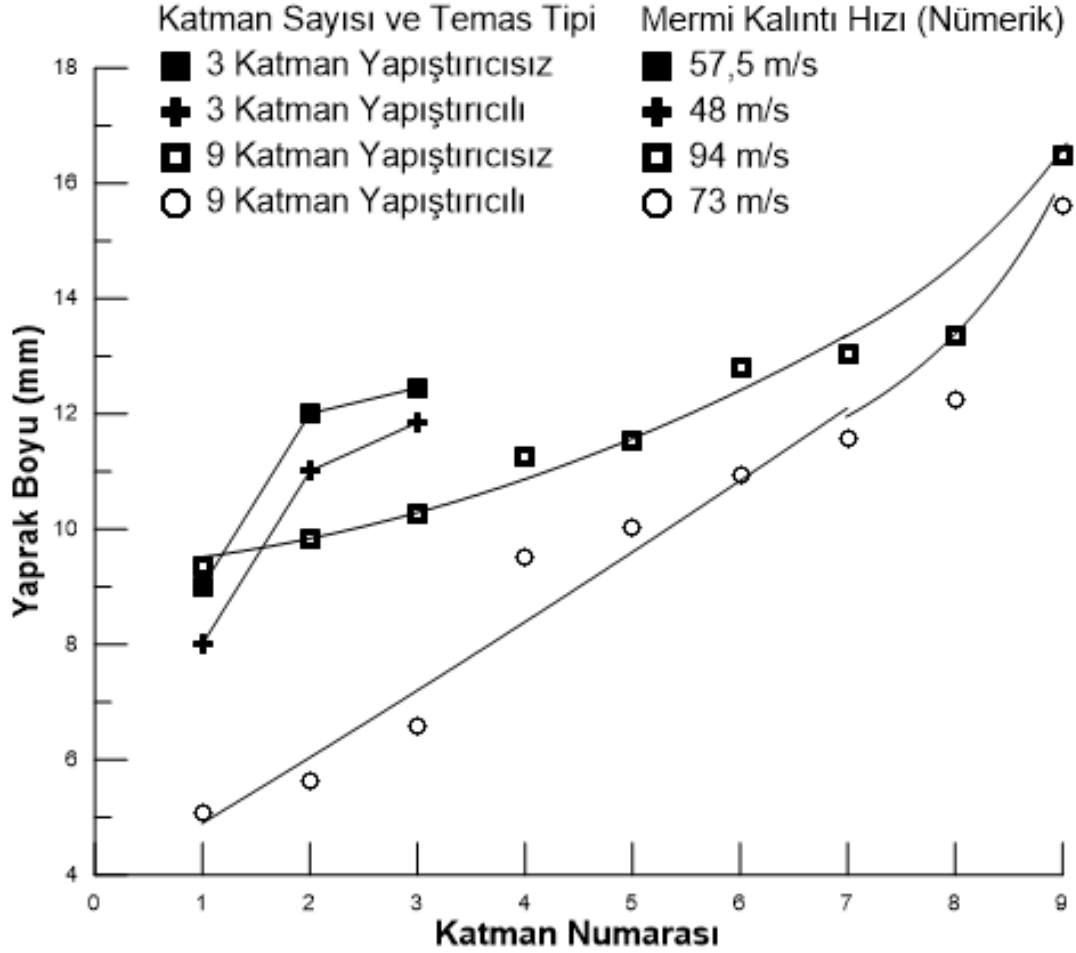
göstermiştir. Ayrıca yapıştırılmış yapılarda delaminasyon ile kısmi plaka ayrılması da görülmüştür.



Şekil 4.3. 9 katmanlı 4340 yapıların atış sonrası deformasyonları

Üç katmanlı ve dokuz katmanlı numunelerin katmanları ayrılmış ve şekil değişimi miktarları araştırılmıştır. Elde edilen veriler ışığında Şekil 4.4. oluşturulmuştur. Sonuçlar incelendiği takdirde dokuz katmanlı yapıda, yapıştırıcının her bir katmanda meydana gelen deformasyonu daha çok etkilediği görülmüştür. Üç katmanlı yapıda kuru temaslı ve yapıştırılmış durumlar için ilk katmandan son katmana kadar sabit oranda bir eğilme farkı elde edilmiştir. Ancak dokuz katmanlı yapıda ilk katmanlarda yapıştırıcı etkisi yüksekken son sıralara doğru belirsizleşmeye başlamıştır. Her iki

durumda da yapıştırıcının eğilme direncini arttırdığı açıktır. Ancak katman sayısının artışı ile bu etki daha da artmaktadır.



Şekil 4.4. 3 ve 9 katmanlı yapılarda katmanların deformasyonu

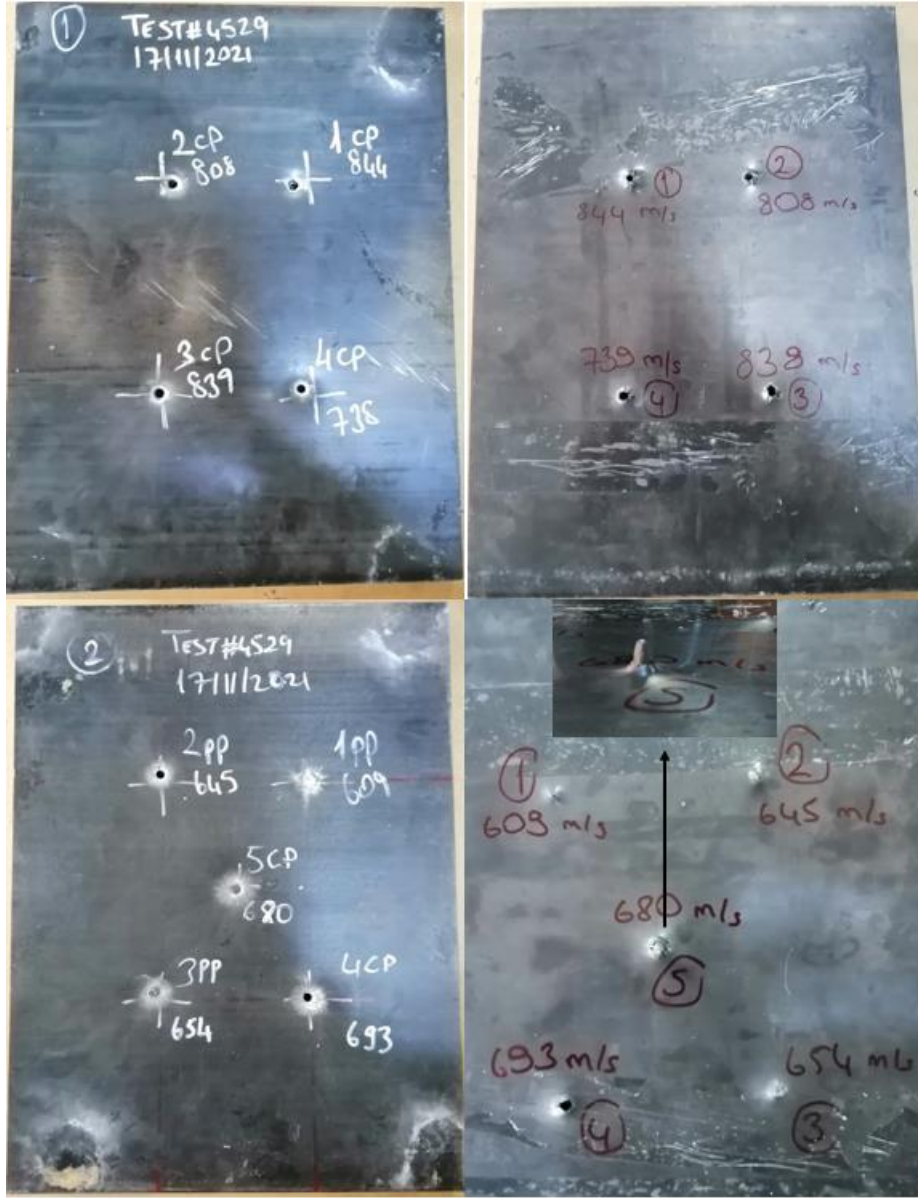
4340 çeliğinden imal edilen yekpare, üç katmanlı ve dokuz katmanlı yapılarla gerçekleştirilen deneyler sonucunda hasar mekanizmasının balistik dayanım üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Katman sayısının artışı ile yapının deformasyonunda şiddetlenme ve balistik dayanımında azalma olmaktadır. Bunun sebebi katmanlar arasında kayma gerilmesinin taşınamaması ve yapıyı oluşturan katmanların kalınlığının azalması ile daha kolay eğilebilir hale gelmesidir. Katmanlar arasında kayma gerilmesinin taşınamaması, her bir katmanın eğilme hareketini ayrıca kolaylaştırmakta ve sonuç olarak tüm yapının eğilme direncini düşürmektedir. Literatürde sınırlı katman sayısına kadar yapılan bir çok çalışma ile yapıyı katmanlı hale getirmenin eğilme direncini düşürdüğü ve eğilme direncinin düşmesi ile balistik

dayanımın azaldığı belirtilmiştir (Woodward ve Cimpoeru, 1998; Zukas ve Sheffler, 2001; Flores-Johnson ve ark., 2011; Wei ve ark., 2012).

İnce saclarda kırılma tokluğunun daha yüksek olması (düzlem gerilme durumu) beklenen bir durumdur (Dikshit ve ark., 1995). Ancak sonuçlardan da görüldüğü gibi balistik çalışmalarda her bir katmanı oluşturan plakaların kalınlığının azalması ile eğilme direncinde meydana gelen düşüş kırılma tokluğunda meydana gelen artışın üzerinde olmaktadır.

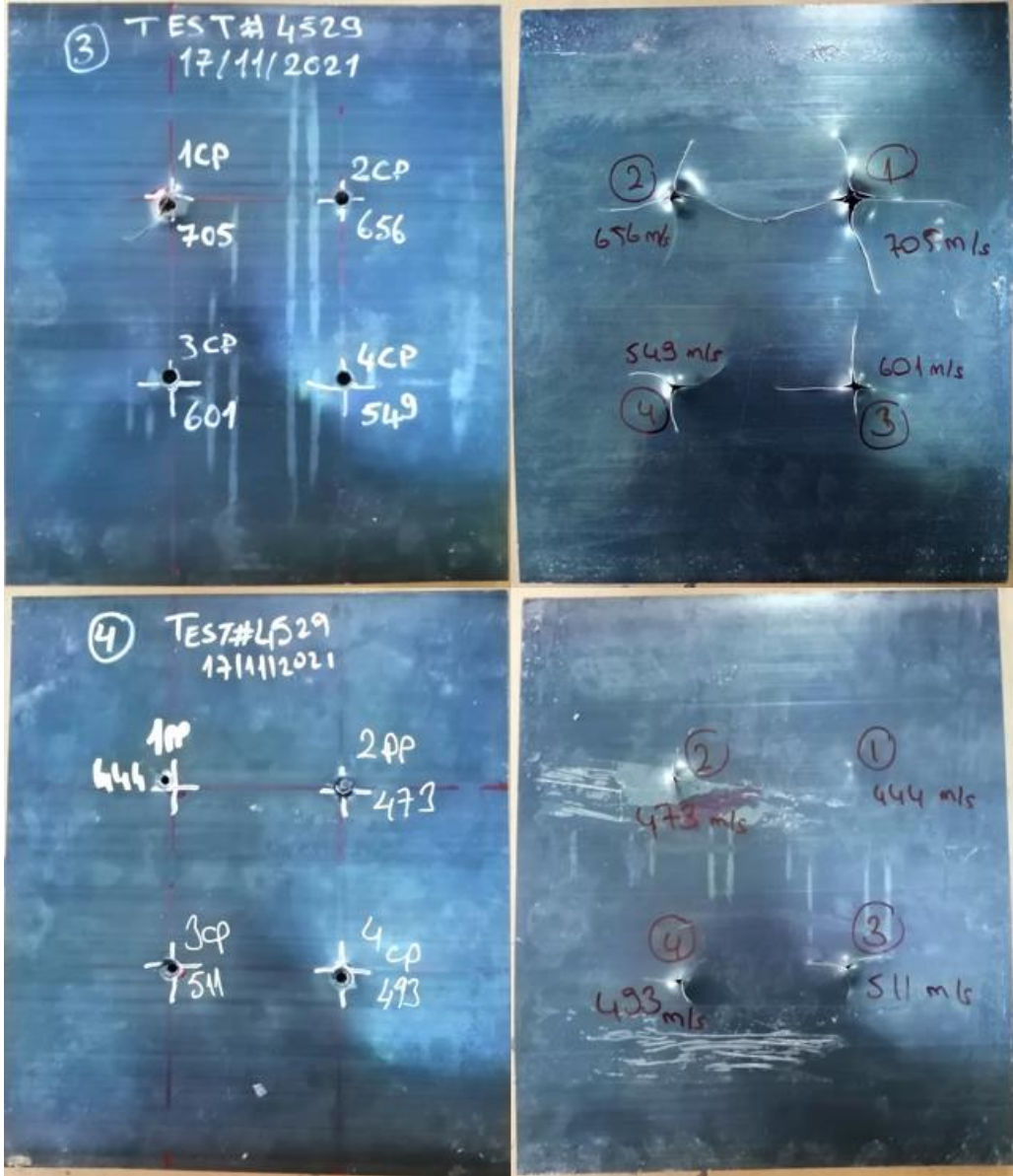
Numunelerin birbiri üzerinde kaymasının engellenmesi ve böylece eğilme direncini artırmak için ara yüzelerde yüksek dayanım epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. 4340 çeliği için yapılan deneylerde de görüldüğü gibi yapıştırıcı kullanılması ile eğilme direnci artmıştır. Özellikle dokuz katmanlı yapıştırılmış yapıyı oluşturan ilk katmanların eğilmediği, yapıştırıcı etkisi ile yekpare yapılara benzer bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak halen yekpare zırhların balistik dayanımı daha yüksektir. Eğer metal zırh tasarımında katmanlı yapı kullanılması gerekiyorsa, yapıştırıcı kullanımı ile eğilme direncindeki bu artış, ara yüzey bağlantısının güçlendirilmesi ile yekpare yapılara benzer sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca literatürde yapılan bir çalışmada, bu çalışmaya benzer şekilde ara yüzeyde yapıştırıcı kullanımının enerji sönüm kabiliyetini önemli oranda arttırdığı belirtilmiştir (Öberg ve ark., 2015).

Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilmiş üç katmanlı yapının farklı hızlar altında deformasyon davranışı Şekil 4.5.'te verilmiştir. Delinen numunelerin katmanlarının plaka arka tarafına doğru eğilmesi ile iç bükey hasarlanma meydana gelmiştir. Atışlar sonrasında delaminasyon sonucu üçüncü katman yapıştırıcı bağlantısı kopmuştur. Hız artışı ile hem ön hem de arka yüzeydeki deformasyon miktarı da artmıştır. Delinmeyen numunelerde ise arka yüzeylerde şişme ve bombe uç noktasında çatlaklar gözükmemektedir. Delinmenin olmadığı atış bölgelerinde ise yine delaminasyon etkisi ile yapıştırıcı bağlantısı soyulmuştur.



Şekil 4.5. 3 katmanlı Ck75 yapıların atış sonrası deformasyonları

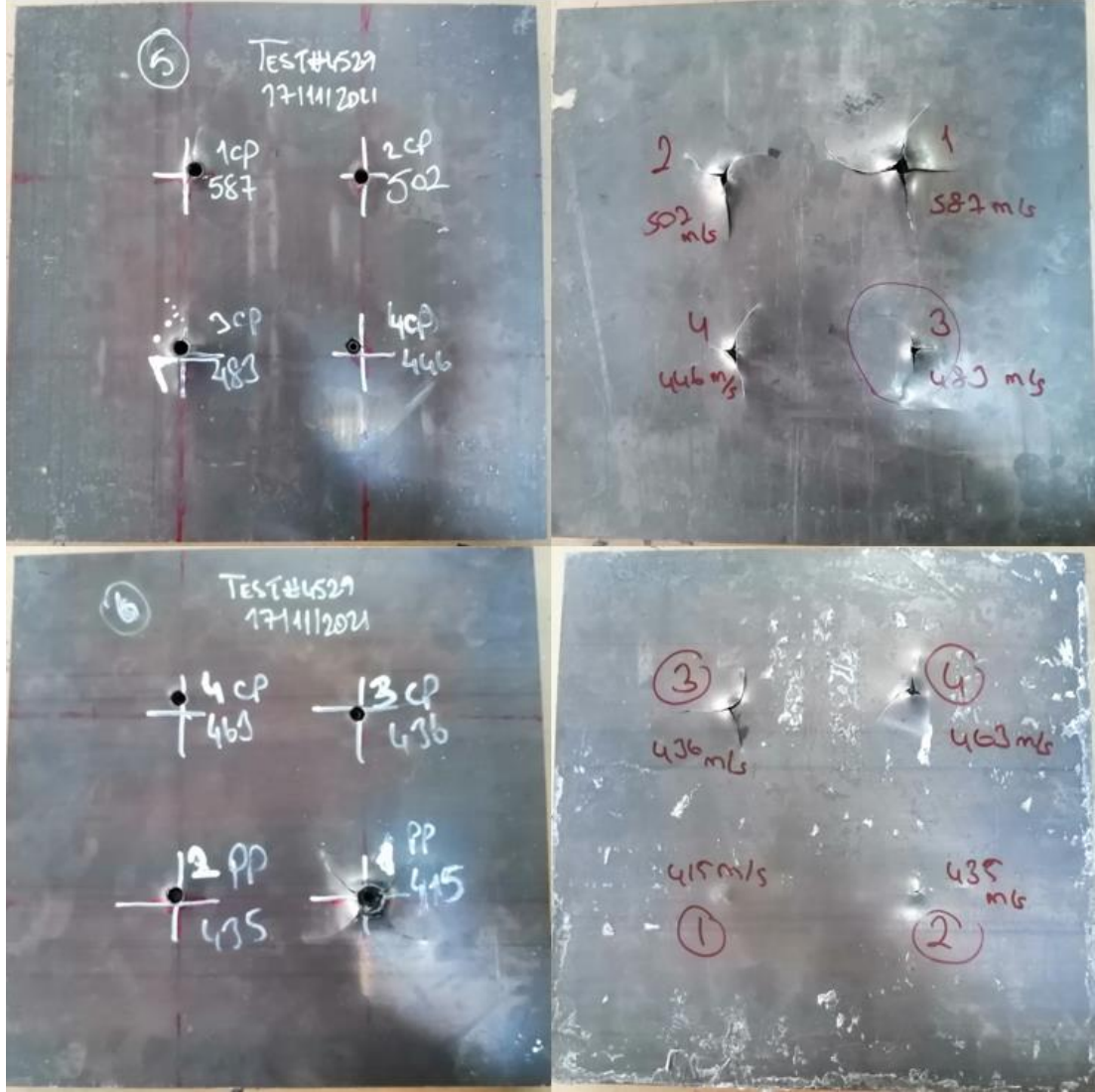
20 katmanlı yapının farklı hızlar altında deformasyon davranışı incelendiğini zaman 705 m/s hızda yapılan atışta ön yüzeyin mermi atış doğrultusunun tersi yönde eğildiği, delinmenin gerçekleştiği diğer durumlarda ise merminin temas ettiği bölge haricinde bir deformasyonun olmadığı görülmektedir (Şekil 4.6.). Zırhların başarısız olduğu tüm atışlarda arka yüzeyde yapraklanma ve bununla beraber yırtılmalar gözlemlenmiştir. 601 m/s ve üzeri atışlarda yaprak sayısı dört iken, bu hızın altında üçe düşmüştür. Atış hızının artmasıyla yaprakların deformasyonu ve yırtılma uzunluğu artmaktadır. Bu atışlarda da katmanlar arasındaki bağlantı delaminasyon sonucu soyulmuştur.



Şekil 4.6. 20 Katmanlı Ck75 yapıların atış sonrası deformasyonları

40 katmanlı yapılarda ön yüzey deformasyonu atış hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Şekil 4.7.). 1. ve 2. atışlarda arka tarafa doğru eğilme gözlemlenirken 3. atışta ön yüzeye doğru eğilme gözlemlenmiştir. Diğer delinme durumlarında ise 20 katmanlı yapıya benzer şekilde sadece mermi ile temas halinde olan bölgede eğilme meydana gelmiştir. Tüm delinme durumlarında arka yüzeyde yapraklanma oluşmuş, özellikle ilk üç atışta yırtılmalar belirgin ve hem yaprak uzunlukları hem de yırtılma miktarları hızla birlikte artmıştır. Ancak bu yırtılmalar 20 katmanlı yapıdaki kadar şiddetli olmamıştır. Atışlar sonrası plakalar arasında delaminasyon ile soyulmalar

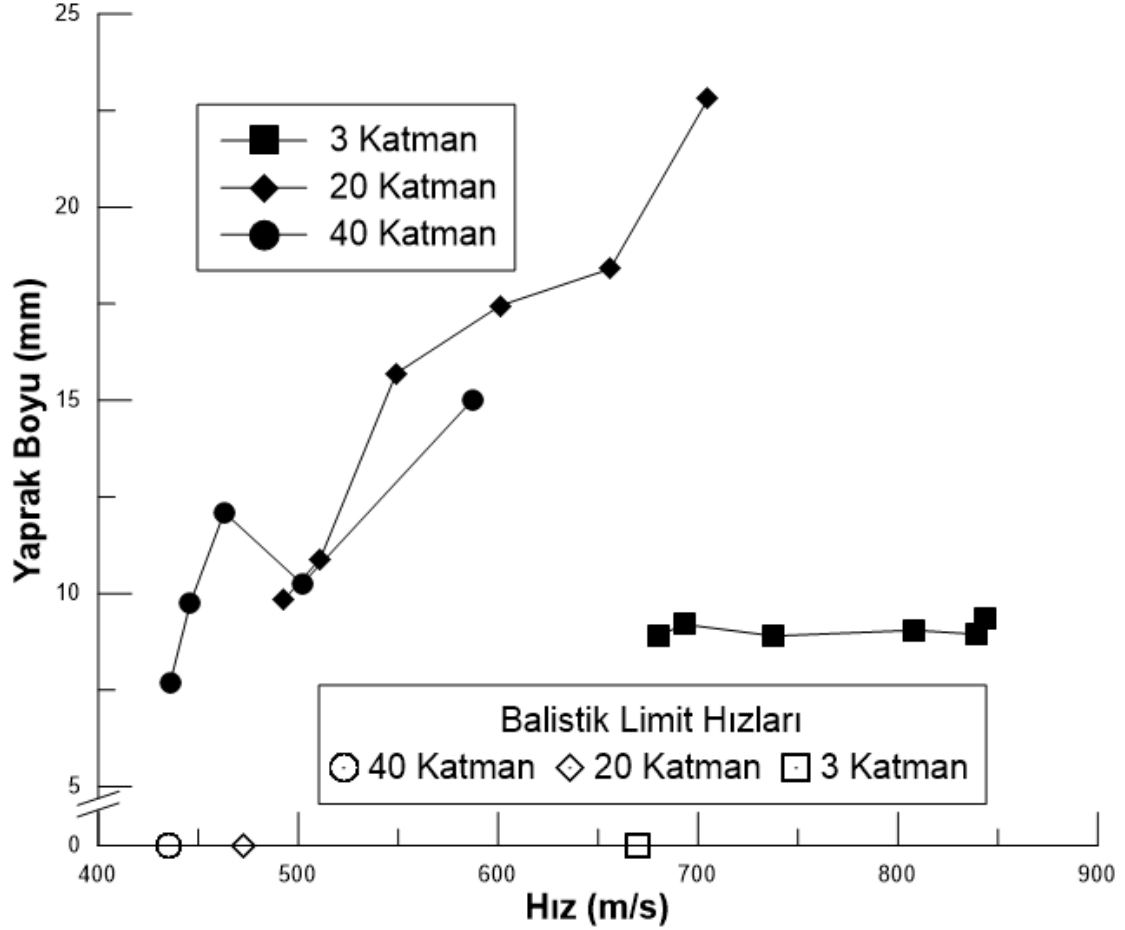
görülmüştür. Zırhların başarılı olduğu durumlarda ise arka yüzeylerde bombeler ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.7. 40 katmanlı Ck75 yapıların atış sonrası deformasyonları

Şekil 4.8.'de Ck75'ten imal edilen tüm numunelerde hızın değişimi ile toplam deformasyondaki değişim araştırılmıştır. Ayrıca balistik limit hızları da grafik üzerinde işaretlenmiştir. Üç katmanlı yapıda hızın değişimi toplam deformasyonu etkilememekte delinmenin gerçekleştiği tüm durumlarda benzer şekil değişimleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum 20 ve 40 katman için farklılaşmaktadır ve hızın artışı ile deformasyon miktarında artışlar olmaktadır. 40 katmanlı yapıda bir durum hariç

diğer tüm durumlar bu düzene uygundur. 20 katmanlı yapı diğer iki yapıdan daha fazla deforme olmuştur.



Şekil 4.8. 3, 20 ve 40 katmanlı yapılar da toplam deformasyonun hız ile değişimi

Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilmiş üç katmanlı, 20 katmanlı ve 40 katmanlı yapıların farklı mermi hızları etkisinde balistik başarımları Tablo 4.1.'de verilmiştir. Numunelerin balistik açıdan başarılı sayılmaları için merminin zırhı delip geçmemesinin yanı sıra zırhın arka tarafına ikinci bir parçanın da fırlamaması gerekmektedir. Bu koşullar altında üç katmanlı yapıda 680 m/s mermi çarpma hızında mermi zırhı geçmese bile zırhın arkasından ikinci parça fırlattığından dolayı başarısız olarak tanımlanmıştır. Numunelerin yaklaşık balistik limit hızları tablo üzerinden işaretlenmiştir. Katman sayısının artışı ile balistik limit hızında sürekli bir düşüş gözlemlenmektedir.

Tablo 4.1. Farklı hızlar altında farklı katmanlarda Ck75 sulu yay çeliğinin balistik davranışı

3 Katmanlı		20 Katmanlı		40 Katmanlı	
Mermi Hızı	Durum	Mermi Hızı	Durum	Mermi Hızı	Durum
844 m/s	Başarısız	705 m/s	Başarısız	587 m/s	Başarısız
808 m/s	Başarısız	656 m/s	Başarısız	502 m/s	Başarısız
738 m/s	Başarısız	601 m/s	Başarısız	483 m/s	Başarısız
693 m/s	Başarısız	549 m/s	Başarısız	463 m/s	Başarısız
680 m/s	Başarısız	511 m/s	Başarısız	446 m/s	Başarısız
*654 m/s	Başarılı	493 m/s	Başarısız	436 m/s	Başarısız
645 m/s	Başarılı	*473 m/s	Başarılı	*435 m/s	Başarılı
609 m/s	Başarılı	444 m/s	Başarılı	415 m/s	Başarılı

*Yaklaşık balistik limit hızları

Ck75 sulu yay çeliği ile yapılan çalışmalarla, imalat zorlukları ve yüksek maliyetler nedeniyle AISI 4340 çeliği ile çıkılamayan yüksek katmanlarda çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar 4340 çeliğinde olduğu gibi eğilme direncinin düşüşü ile çok yüksek katmanlı yapılarda da balistik başarımın düştüğünü göstermektedir. Ancak 20 katmanlı yapının delinme sonrası deformasyonunun 40 katmanlı yapıya göre daha fazla olması ilgi çekicidir. Bunun sebebinin 40 katmanlı yapıyı oluşturan 0,25 mm kalınlığında plakaların oldukça esnek olmasıdır. 0,5 mm plakalarda deformasyon alanı daha geniş olduğu için şekil değişimi miktarı artmasına rağmen balistik dayanımı 40 katmanlı yapıdan daha yüksektir.

İki farklı yapıştırıcı için delaminasyon mekanizmaları incelendiğinde 4340 çeliğinin yapıştırılmasında kullanılan çift bazlı epoksinin daha iyi birleşme sağladığı ve malzeme bütünlüğü korumada daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çoklu atışlara maruz yapılarda, ilk atışların delaminasyonla plakaları birbirinden ayırması sonucu boşluk etkisi oluşacak ve zırh dayanımı düşecektir. Katmanlar arasında bulunan boşluğun balistik dayanımı düşüreceği birçok çalışmada belirtilmiştir (Borvik ve ark., 2009; Wei ve ark., 2012; Deng ve ark., 2013). Bu yüzden yüksek dayanımlı yapıştırıcı kullanımı önemlidir. Bu durum yapıştırıcı dayanımı arttıkça yapının enerji sönmeme kapasitesinin arttığını belirten bir diğer çalışmada da ifade edilmiştir (Öberg ve ark., 2015).

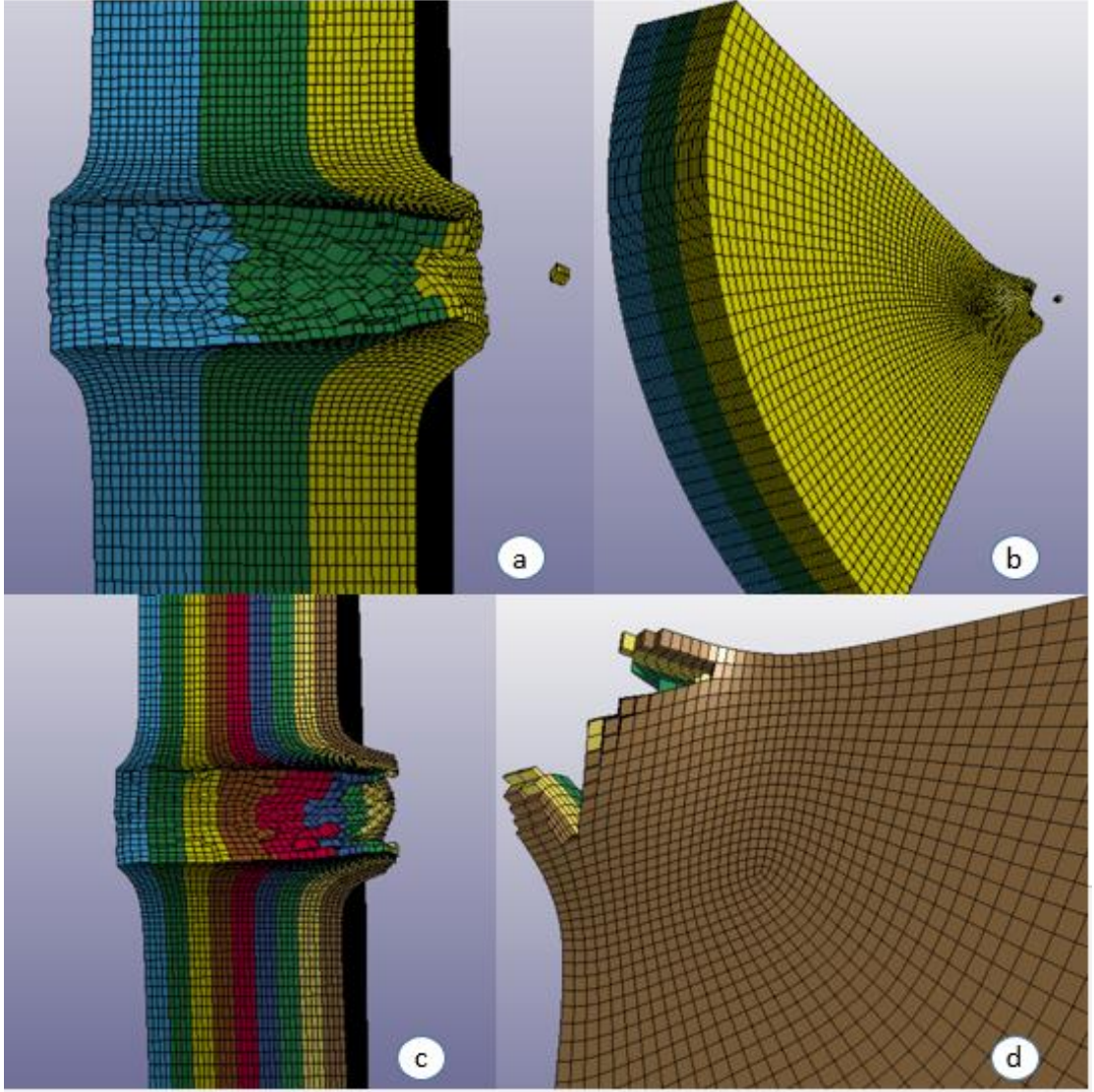
4.2. Nümerik Sonuçlar

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çalışmalarla 4340 çeliğinden imal edilen yekpare, üç ve dokuz katmanlı yapılar nümerik olarak da incelenmiştir. Zırhın deformasyonun doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için önceki bölümlerde bahsedilen malzeme karakterizasyonunun bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden sadece literatürde gerekli parametrelerin bulunduğu 4340 çeliği ve DP460 epoksi yapıştırıcı için analizler yürütülmüştür.

Tüm yapılar için atış hızları ve zırh delindikten sonra mermi çıkış hızları Tablo 4.2.'de belirtilmiştir. Balistik limit hızları Ck75 sulu yay çeliğinden imal edilen yapılar gibi belirlenememiştir. Ancak yakın hızlarda (± 20 m/s) yapılan atışlarda deneyler ile uyumlu olarak yekpare yapı başarılı olurken diğer katmanlı yapılar başarısız olmuştur. Yekpare, üç ve dokuz katmanlı yapılarda meydana gelen deformasyonlar incelendiğinde analizlerle uyumlu şekilde katman sayısının artışı ile balistik dayanımın azaldığı açıktır. Katman sayısının artışı ile balistik dayanımda meydana gelen azalma Ck75 sulu yay çeliği ile farklı katmanlar için yürütülen deneysel çalışmalarla da ortaya konmuştur.

Tablo 4.2. Farklı tasarımlarda analiz sonuçları

Yapı Tasarımı	Atış Hızı	Mermi Çıkış KE	Çıkış Hızı
Yekpare	746 m/s	0	0
3 Katman Kuru Temas	755 m/s	1,92 j	57,5 m/s
3 Katman Yapıştırılmış	758 m/s	1,35 j	48 m/s
9 Katman Kuru Temas	763 m/s	5,1 j	94 m/s
9 Katman Yapıştırılmış	756 m/s	3,07 j	73 m/s



Şekil 4.9. 3 ve 9 katmanlı yapılarda analiz görselleri

Analizlerde deformasyon durumunu görmek için atış sonrası modellerini incelediğimizde plakaların arka yüzeylerinde meydana gelen şekil değişiminin deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Üç katmanlı yapılarda arka yüzeyde eğilme deformasyonunun olduğu görülmektedir (Şekil 4.9.b). Katmanlarda meydana gelen şekil değişimi ilk katmandan son katmana doğru artmaktadır. Ön yüzeyler incelendiğinde ise sünek delik oluşumuna benzer şekilde materyal yığılması gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.9.a ve 4.9.c). Bu durum deneysel verilerde ortaya konan üç katmanda ön yüzeyde de hafif bir eğilmenin meydana geldiği ve dokuz katmanda sadece mermi çapı kadarlık bir alanda delinmenin gerçekleştiği durum ile örtüşmemektedir.

Dokuz katmanlı yapıların Şekil 4.9.d’de gözlemlendiği gibi atış sonrası arka yüzeyde yapraklanma ortaya çıkmış, deneysel verilere benzer şekilde kenarlarda hafif yırtılmalar meydana gelmiştir. Burada da ilk katmandan son katmana doğru deformasyon miktarı artmaktadır. Her iki yapıda da yapıştırılmış ve kuru temaslı durumların ayrı ayrı ele alınmamasının sebebi benzer hasar mekanizmalarına ve benzer deformasyon görüntülerine sahip olmalarıdır. Deneysel verilerde bu iki durumda küçük farklılıklar ortaya çıksa da, bu küçük farklılıklar analizlerde daha da belirsizleşmektedir. Ancak Tablo 4.2.’de belirtildiği gibi, analizlerde yapıştırıcı kullanılmasıyla üç ve dokuz katmanlı yapıların balistik performansları artmıştır. Deneysel verilerde yapıştırıcı kullanımı ile yapının eğilme direncinin arttığı görülmüştür ve bu durumun numune balistik performansını arttırması beklenmektedir. Dolayısıyla yapıştırıcı modellenmesinde Tie-Break temas mekanizmasının kullanılması nümerik ve deneysel sonuçların benzerliğini arttırmıştır.

Sonlu elemanlarla yapılan analizlerde, materyal karakterizasyonunu tanımlayan parametrelerin bilinmesi durumunda, numunelerin özellikle arka yüzeylerinde meydana gelen şekil değişimleri tahmin edilebildiği görülmüştür. Ayrıca darbe altında başarılı olup olmadıkları da gözlemlenmiştir. Ara yüzey modellemesinde kullanılan temas mekanizmasının yapıştırıcı etkisini analize taşıyabildiğinin görülmesi bir diğer çıktıdır. Ön yüzde meydana gelen deformasyonların tahmininde ise sapmalar ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni sonlu elemanlarda modellenen çelik katmanların hem kuru hem de yapıştırılmış yapılarda tam temas halinde olmasıdır.

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR

1. Yekpare yapıların balistik dayanımları katmanlı yapılara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni katmanlar arası kayma gerilmesinin taşınamaması ve katmanlı yapıyı oluşturan her bir katmanın yekpare yapıya kıyasla daha eğilebilir olmasıdır.

2. Yekpare yapılarda sünek delik oluşumu şeklinde olan hasar mekanizmasının katmanlı yapılarda eğilme ile deformasyona dönüştüğü gözlemlenmiştir. Eğilme miktarının, katman sayısının artışı ve buna bağlı olarak her bir katmanın incilmesiyle şiddetlendiği belirlenmiştir.

3. Katmanlı yapıların kuru temas yerine yapıştırıcı ile birleştirilmesi sonucu yapının eğilme direnci arttığı tespit edilmiştir. Katman sayısının artışı ile iki birleştirme tipi arasındaki fark daha belirgin olmuştur. Yüksek katmanlı yapılarda eğilme direncindeki artış ilk katman sıralarında, son katman sıralarına kıyasla daha fazla olmuştur.

4. Katmanlı yapıların birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcıların yüksek çekme ve kayma dayanımına sahip olmasının önemli olduğu anlaşılmıştır. Düşük çekme ve kayma dayanımına sahip yapıştırıcı kullanılması durumunda katmanlar arasında delaminasyon görülmüştür. Katmanlar arasında kayma dayanımı yeterince yüksek bir bağlayıcı bulunursa yekpare yapılara benzer balistik performansların elde edilmesinin mümkün olduğu tespit edilmiştir.

5. Sonlu elemanlar yöntemi ile hedef numunelerin özellikle arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyonların tahmin edilebilir olduğu belirlenmiştir. Ayrıca zırhların balistik başarımlarının delinme ve delinmeme durumuna göre belirlenebilir olduğu görülmüştür. Yapıştırıcı etkisinin de Tie-Break temas mekanizması ile balistik analizlere yansıtılabildiği sonucuna varılmıştır

KAYNAKLAR

- [1] Hazel, P.J., *Armour Materials, Theory and Design*, CRC Press Taylor & Francis Group, 177-207, 2016.
- [2] Crouch, I.G., *The Science of Armour Materials*, Woodhead Publishing, 55-115, 2017.
- [3] Ubeyli, M., Yıldırım, R.O., Ögel, B., On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armours. *Material and Design*, 28: 1257-1262, 2008.
- [4] Dikshit, S.N., Kutumbarao, V.V., Sundararajan, G., The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 16(2): 293-320, 1995.
- [5] Jena, P.K., Mishra, B., RameshBabu, M., Babu, A., Singh, A.K., SivaKumar, K., Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering*, 37: 242-249, 2010.
- [6] Holmen, J.K., Johnsen, J., Jupp, S., Hopperstad, O.S., Borvik, T., Effect of heat treatment on ballistic properties of AA6070 aluminium alloy. *International Journal of Impact Engineering*, 57: 119-133, 2013.
- [7] Senthil, P.P., Singh, B.B., SivaKumar, K., Gogia, A.K., Effect of heat treatment on ballistic properties of an armour steel against long rod projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 80: 13-23, 2015.
- [8] Mishra, B., Jena P.K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T.B., Gupta, N.K., Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic behavior and ASB formation of a high strength steel. *International Journal of Impact Engineering*, 44: 17-28, 2017.
- [9] Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, O.R., Investigation on the ballistic impact behavior of various alloy against 7.62 mm armor piercing projectile. *Material and Design*, 29: 2009-2016, 2008.

- [10] Orthe, E., Thorsen, H., Ballistic perforation of surface hardened mild steel plates. Norwegian University of Science and Technology, Yapısal Mühendislik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [11] Deniz, T., Ballistic penetration of hardened steel plates. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [12] Borvik, T., Dey, S., Clausen, A.H., Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 36: 948-964, 2009.
- [13] Flores-Johnson, E.A., Saleh, M., Edwards, L., Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 38: 1022-1032, 2011.
- [14] Teng, X., Dey, S., Borvik, T., Wierzbicki, T., Protection performance of double-layered metal shields against projectile impact. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(7): 1309-1330, 2007.
- [15] Teng, X., Wierzbicki, T., Huand, W., Ballistic resistance of double-layered armor plates. *International Journal of Impact Engineering*, 35: 870-884, 2008.
- [16] Gupta, N.K., Iqbal, M.A., Sekhon, G.S., Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates. *International Journal of Impact Engineering*, 35: 37-60, 2008.
- [17] Wei, Z., Yunfei, D., Sheng, C.Z., Gang, W., Experimental investigation on the ballistic performance of monolithic and layered metal plates subjected to impact by blunt rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 49: 115-129, 2012.
- [18] Dey, S., Borvik, T., Teng, X., Wierzbicki, T., Hopperstad, O.S., On ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 44: 6701-6723, 2007.
- [19] Woodward, R.L., Cimpoeru, S.J., A study of the perforation of aluminium laminate targets. *International Journal of Impact Engineering*, 21(3): 117-131, 1998.
- [20] Radin, J., Goldsmith, W., Normal projectile penetration and perforation of layered targets. *International Journal of Impact Engineering*, 7(2): 229-259, 1988.

- [21] Deng, Y., Zhang, W., Cao, Z., Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plate againsts ogival-nosed rigid projectile impact. *Material and Design*, 44: 228-239, 2013.
- [22] Bobbili, R., Paman, A., Madhu, V., Gogia, A.K., The effect of impact velocity and target thickness on ballistic performance of layered plates using Taguchi method. *Material and Design*, 53: 719-726, 2014.
- [23] Cui, J., Ye, R., Zhao, N., Wu, J., Wang, M., Assessment on energy absorption of double layered and sandwich plates under ballistic impact. *Thin-Walled Structures*, 43: 17-24, 2013.
- [24] Mohammad, Z., Gupta, P.K., Baqi, A., Experimental and numerical investigations on the behavior of thin metallic plate targets subjected to ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering* 146,2020.
- [25] Zhou, D.W., Stronge, W.J., Ballistic limit for oblique impact of thin sandwich panels and spaced plates. *International Journal of Impact Engineering*, 35:1339-1354,2008.
- [26] Holmen, J.K., Solberg, J.K., Hopperstad, O.S., Borvik, T., Ballistic impact of layered and case-hardened steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 110:4-14,2017.
- [27] Copland, A., Scheffler, D., Influence of air gaps on long rod penetrators attacking multi-plate target arrays. U.S, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground MD, Report No. ARL-TR-2906, 2003.
- [28] Almohandes, A.A., Abdel-Kader, M.S., Eleiche, A.M., Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates. *Composites Part B*, 27: 447-458, 1996.
- [29] Abdel-Wahed, M.A., Salem, A.M., Zidan, A.S., Riad, A.M., 2010. Penetration of a small caliber projectile into single and multi-layered targets. *Proc. of 4th European Conf. On Computational Mechanics (EECM 2010)*, Paris, France.
- [30] Abdelshafy, M.H., Oyadiji, S.O., 2007. Penetration behavior of steel plates. *Proc. ASME International Design Engineering Technical Conferences and 6th International Conference on Multibody System, Nonlinear Dynamics and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, 1131-1139.
- [31] Jankowiak, T., Rusinek, A., Wood, P., A numerical analysis of the dynamic behavior of sheet steel perforated by a conical projectile under ballistic conditions. *Finite Elements in Analysis and Design*, 65:39-49,2013.

- [32] Yunfei, D., Wei, Z., Yonggang, Y., Lizhong, S., Gang, W., Experimental investigation on the ballistic performance of double-layered plates subjected to impact by projectile of high strength. *International Journal of Impact Engineering*, 70: 38-49, 2014.
- [33] Mishra, B., Ramakrishna, B., Jena, P.K., Sivakumar, K., Madhu, V., Gupta, N.K., Experimental studies on the effect size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic limits. *Material and Design*, 130: 520-534, 2018.
- [34] Jena, P.K., Ramanjeneyulu, K., SivaKumar, K., Bhat, T.B., Ballistic studies on layered structure. *Material and Design*, 30: 1922-1929, 2009.
- [35] Zaera, R., Sanchez-Saez, S., Perez- Castellanos, J.L., Navarro, C., Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Composite Part A*, 31: 823-833, 2000.
- [36] Lopez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R., Navarro, C., The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*, 32: 321-336, 2005.
- [37] Tasdemirci, A., Tunusoğlu, G., Güden, M., The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*, 44: 1-9, 2012.
- [38] Öberg, E.K., Dean, J., Clyne, T.W., Effect of inter-layer toughness in ballistic protection systems on absorption of projectile energy. *International Journal of Impact Engineering*, 76: 75-82, 2015.
- [39] Zukas, J.A., *High Velocity Impact Dynamics*, The Wiley-Interscience Publication, 1990.
- [40] Woodward, R.L., The penetration of metal targets by conical projectiles. *International Journal of Mechanical Sciences*, 20: 349-359, 1978.
- [41] Crouch, I.G., Discing failures in both traditional and composite armour materials. *International Symposium on Ballistics*, Stockholm, 1992.
- [42] Zukas, J.A., *Introduction to Hydrocodes*, Elsevier, 2004.
- [43] Johnson, G.R., Cook, W.H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature. *Proceedings 7th International Symposium on Ballistics*, Lahey, 541-547, 1983.

- [44] Johnson, G.R., Cook, W.H., Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1): 31-48, 1985.
- [45] Borvik, T., Hopperstad, O.S., Berstad, T., Langseth, M., A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 20: 685-712, 2001.
- [46] Goh, W.L., Zheng, Y., Yuan, J., Ng, K.W., Effect of hardness of steel on ceramic armour module against long rod impact. *International Journal of Impact Engineering*, 109: 419-426, 2017.
- [47] Holmquist, T.J., Templeton, D.W., Bishnoi, K.D., Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high pressure applications. *International Journal of Impact Engineering*, 25: 211-231, 2001.
- [48] Boqaileh, K. 2015. Experimental testing and modelling of adhesively joined T-structures, Waterloo University, Mechanical Engineering, Master's Thesis.
- [49] Ricon, L.F.T. 2012. Analysis and performance of adhesively bonded crd-sh tube structures, Waterloo University, Mechanical Engineering, Master's Thesis.
- [50] Livermore software technology Corporation (LSTC), Version 971, 2007
- [51] Zukas, J.A., Scheffler, D.R., Impact effects in multilayered plates. *International Journal of Solids and Structures*, 38: 3321-3328, 2001
- [52] Demir, T. Metal Ve Katmanlı Zırh Malzelerin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammed Ömer İbiş

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği	2022
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi / Makine Fakültesi / Makine Mühendisliği	2018
Lise	Konya Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Sakarya Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Effect Of Layer Structure On Ballistic Protection For High Hardness AISI 4340 Steel

HOBİLER

Doğa gezileri, Filmler, Futbol