

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Ön Yüzündeki Her Seramiği Karbon-Fiber Kompozitle
Sarılmış Çelik Zırhların Balistik Davranışlarının
İncelenmesi

Alemdar ONGUN

EKİM 2019

Makine Anabilim Dalında Alemdar ONGUN tarafından hazırlanan **ÖN YÜZÜNDEKİ HER SERAMİĞİ KARBON-FİBER KOMPOZİTLE SARILMIŞ ÇELİK ZIRHLARIN BALİSTİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ** adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Barış KALAYCIOĞLU
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Barış KALAYCIOĞLU
Üye : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU
Üye : Prof. Dr. Recep GÜNEŞ
Üye : Doç. Dr. Tunç APATAY

18/10/2019

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

ÖN YÜZÜNDEKİ HER SERAMİĞİ KARBON-FİBER KOMPOZİTLE SARILMIŞ ÇELİK ZIRHLARIN BALİSTİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ONGUN, Alemdar

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Barış KALAYCIOĞLU

Ekim 2019, 101 sayfa

Altıgen seramiklerden oluşan ön yüze sahip çelik zırhlarda ilk mermi darbesine maruz kalan altıgen seramiğin çarpışma anında hasara uğrayıp kırılması ile çevresinde bulunan diğer altıgen seramiklerde hasara yol açtığı, literatürde ki incelemelerden ve konuyla ilgili firma uygulamalarından tespit edilmiştir. Bu çalışmada, sözü edilen hasarın en aza indirilmesi için seramik ön yüze sahip çelik zırhlar kompozit malzeme ile desteklenerek zırh teknolojisinde yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Tasarımda zırhın seramik ön yüzeyi için 10 mm kalınlığındaki çevresi Karbon/Epoksi ($V_f = \% 60$) kompozit malzeme ile sarılmış Alümina (Al_2O_3) altıgen seramikler ve arka yüzeyi için Hardox zırh çeliğinden üretilmiş 6 mm kalınlığında plaka tercih edilmiştir. Kompozit desteğin zırhın balistik davranışına etkisi tez çalışmasında hem sayısal analiz yöntemi hem de balistik atış deneyleri yardımıyla incelenmiştir. Zırh sistemine ait sayısal analizler *Ansys Explicit/Dynamic* sonlu eleman programında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde çelik malzeme modeli için yüksek hızlarda plastik deformasyona izin veren Johnson-Cook ve seramik malzeme modeli olarak da Johnson-Holmquist modelleri kullanılmıştır. Yapılan sayısal analizlerde ilgili standartlara uygun şekilde, ön yüzündeki her seramiği 0,75 mm / 1 mm / 1,5 mm kalınlıklarında kompozit sargılı ve kompozit sargısız, arka yüzü çelik plakalı modeller oluşturulmuş ve 7,62 mm kalibreli mermi darbesinin zırh sisteminde oluşturduğu hasar incelenmiştir. Sayısal analizler sonucunda çıkan tasarım parametreleri ışığında zırh sistemine ait deney numuneleri üretilmiş ve balistik atış

deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tez çalışmasında 7,62 mm kalibreli mermi darbesi sonrasında seramiklerdeki kompozit sargının, zırh sisteminin arka yüzeyindeki çelik plakada oluşan plastik deformasyona etkisi de incelenmiştir. Bu aşamada zırhın arka plakası için hardox çeliği ne göre daha sünek bir çelik olan S235 çeliği kullanılmıştır. Balistik atışlar sonrası çelik plakada oluşan plastik deformasyon Hill'in membran teorisinden elde edilen şekil değiştirme denklemleri kullanılarak Matlab programında geliştirilen bir ara yüz ile elde edilmiş ve hem sayısal hem de deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda seramiklere sarılan kompozit sargının çevre seramiklerde oluşan hasarı önemli derecede azalttığı ve arka plakada oluşan plastik deformasyona olumlu veya olumsuz herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çelik plakada oluşan plastik deformasyona ait sehim eğrilerinin yapılan analizlerle ve deneysel çalışmalarla uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırh, Alümina Seramik

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE BALLISTIC BEHAVIOR OF STEEL ARMORS WITH EACH CERAMIC WRAPPED CARBON-FIBER COMPOSITE ON THE FRONT

ONGUN, Alemdar

Kırıkkale University

Graduate School of Natural And Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assistant Professor Barış KALAYCIOĞLU

October 2019, 101 pages

In the case of steel armor with hexagonal ceramic front face, the hexagonal ceramic which is subjected to the first bullet impact is damaged and broken during the collision. As a result of the investigations which were made in the literature and the company working on ballistics the hexagonal ceramics are damaged by other hexagonal ceramics. In this study, a new design has been developed in armor technology by supporting steel armor with ceramic front face with composite material due to minimize said damage. Alumina (Al_2O_3) hexagonal ceramics wrapped with carbon / epoxy ($V_f = 60\%$) composite material around 10 mm thickness for the ceramic front surface of the armor and 6 mm thick plates made of Hardox Armor Steel were preferred for the back surface of the armor. The effect of composite support on the ballistic behavior of the armor was examined by both numerical analysis and experimental tests of 7.62 mm caliber bullet impacts on 0.75 mm / 1 mm / 1.5 mm thickness composite and non-wounded steel armors in accordance with the relevant standards. Numerical analysis was performed in Ansys Explicit / Dynamic which is finite element program and in the analysis, Johnson-Cook model which permits high speed plastic deformation was used for steel material model and also Johnson-Holmquist model was used as ceramic material model. Furthermore, the effect of composite winding on the plastic deformation of the steel plate on the back surface of the armor was examined in the thesis. At this stage, S235 steel, a softer steel, was used instead of hardox steel for the back plate of the armor. Plastic deformation of the steel plate after ballistic shots was obtained by an

interface developed in Matlab program by using the deformation equations obtained from Hill's Membrane Theory and also both numerical and experimental results were compared. As a result of the studies, it was observed that the composite wrap wrapped in ceramics significantly reduces the damage to the surrounding ceramics and no positive or negative effect on the plastic deformation of the back plate. With this observation, the deflection curves of the plastic deformation formed on the steel plate were found to be consistent in the analysis and experimental study.

Keywords: Ballistic, Steel Armor with Ceramic on the Front, Alumina Ceramic



TEŞEKKÜR

Doktora tezimi hazırlarken yaptığım araştırmalar ve deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve görüşlerinden yararlandığım değerli danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Barış KALAYCIOĞLU' na, tez çalışmalarım esnasında, değerli destek ve yardımlarını sakınmayan saygı değer hocam Prof. Dr. Ali ERİŞEN' e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında mali desteğini esirgemeyen TÜBİTAK' a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez kapsamında yapılan balistik deneyler ve tecrübe paylaşımı için Nurol Teknoloji' ye teşekkür ederim.

Hayatımın her anında maddi ve manevi her türlü desteği vermekten kaçınmayan annem Nuray ONGUN' a, babam Aydın ONGUN' a, ayrıca en içten ilgi, alaka ve yardımlarını esirgemeyen, en zor günlerimde her zaman yanımda olan eşim ve hayat arkadaşım Özlem ONGUN' a ve hayatıma huzur katan kızım Eylül Neva ONGUN' a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhlar	2
1.1.1. Seramikler	2
1.1.2. Çelikler	4
1.1.3. Kompozit Malzemeler	5
1.1.3.1. Elyaf Malzemesi	6
1.1.3.2. Matris Malzemesi	6
1.1.4. Flaman Sargı Metodu.....	8
1.2. Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhlar ile İlgili Çalışmalar	9
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı	20
2. TEORİK ÇALIŞMALAR	22
2.1. Giriş.....	22
2.2. Balistik Hasar Mekanizmaları.....	22
2.2.1. Sünek Malzeme Delik Oluşumu.....	22
2.2.2. Tıkama Şeklinde Hasar Oluşumu.....	23
2.2.3. Tabaka Ayrılma.....	24
2.2.4. Konik Kırılma	24
2.2.5. Parçalanma	25
2.2.6. Çevresel Çatlaklar	26
2.3. Terminal Balistik	27
2.4. Zırh Sistemine Ait Malzemelerin Mekanik Davranışları	29
2.4.1. Johnson-Holmquist Malzeme Modeli	33
2.4.2. Kompozit Malzeme Modeli	35

2.5.	Çelik Plakada Oluşan Deformasyonun Analitik Çözümü.....	37
2.5.1.	Hasarın İlk Oluşma Aşaması	37
2.5.2.	Mermi Erozyon Aşaması ve Sabit Kütleyle Penetrasyon.....	39
2.5.3.	Şekil Değiştirme Enerjisi	41
2.6.	Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhların Sonlu Eleman Analizi.....	52
2.6.1.	Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhların Modellenmesi.....	52
3.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	56
3.1.	Balistik Atış Deneyleri	56
3.1.1.	Kompozit Sargısız ve Arası Boşluklu Numuneler İçin Balistik Atış Deneyleri.....	58
3.1.2.	Kompozit Sarımlı Numuneler İçin Balistik Atış Deneyleri	61
3.1.3.	Mermi Hızlarının Tespiti	66
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	68
4.1.	Tek Parça Kompozit Sargısız Seramiğin Sayısal Analiz Sonucu	68
4.2.	Tek Parça Kompozit Sargılı Seramiğin Sayısal Analiz Sonucu	69
4.3.	Çoklu Seramik Hasarına ait Sayısal Analiz Sonuçları	69
4.4.	Seramik Hasarına Ait Balistik Deney Sonuçları	72
4.5.	Deneysel Sonuçları ile Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	76
4.6.	Seramik Hasarının Nicelik Olarak İrdelenmesi	78
4.7.	Zırh Sistemine Gelen Mermi Darbesi Sonucu Çelik Plakada Oluşan Deformasyon Sonuçları	82
4.8.	Zırh Sistemine Gelen Mermi Darbesi Sonucu Çelik Plakada Oluşan Gerilme Durumu	86
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
	KAYNAKLAR	92
	ÖZGEÇMİŞ.....	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Balistik koruyucunun şematik gösterimi.....	2
1.2. Farklı geometrik yapılarda alümina seramikler	3
1.3. Elyaf takviyeli kompozit tipleri [16]	5
1.4. Elyaf sarım açısının gösterimi [22]	8
1.5. Armodilloların zırha benzer deri yapısı [23].....	10
1.6. Farklı epoksi uygulamalarında meydana gelen çatlaklar [31].....	13
2.1. Sünek malzemenin merminin kinetik enerjisini absorbe etmesi [61]	22
2.2. Malzemede oluşan tıpa şeklinde çıkma hasarı [61]	23
2.3. Tabaka ayrılmanın gösterimi [61]	25
2.4. Konik kırılmanın gerçekleşmesi [61].....	25
2.5. Kırılgan malzeme de sınırlı alanda meydana gelen ezilme [61]	26
2.6. Seramik malzemeye uygulanan mermi atışının x-ray görüntüsü a) Merminin geçtiği bölge, b) Konoid kırılma bölgesi, c) Radyal çatlaklar, d) Çevresel çatlaklar [61]	27
2.7. a) Stres dalgalarının yayılması b) Herhangi bir ara yüzeyde meydana gelen makaslama etkisi [61].....	28
2.8. Mermi çarpma hızına bağlı, delinme ihtimalinin şematik gösterimi [61].....	29
2.9. JH-2 Modeli [76]	34
2.10. Kompozite gelen eksenel ve kesme kuvvetleri neticesinde plakada oluşan maksimum gerilme ve maksimum gerilme eğrileri [21]	36
2.11. Seramik plakaya ilk penetrasyon aşaması [78].....	37
2.12. İkinci aşamadaki merminin penetrasyonu ve metalin elastik deformasyonu [78].....	40
2.13. Kuvvetin çubuk üzerine uygulanması [88]	41
2.14. Kuvvet-deformasyon grafiği [88]	41
2.15. Birim eleman gösterimi	43
2.16. Düzlem gerilme durumunda birim şekil değiştirmelerin tanımı	45
2.17. Birim elemanın gösterimi	46
2.18. Membrane teorisinin gösterimi	47
2.19. Matlab program ara yüzü ekran görüntüsü	51

2.20. Matlab programında plakanın yarıçapı boyunca deformasyon eğrisinin elde edilmesi	51
2.21. a) Çelik üzerinde alümina seramiklerin görünümü b) Mermi görünümü	53
2.22. SOLID186 SEM elemanı [90].....	54
2.23. Merminin ilk temas ettiği noktanın ve çevresindeki diğer alümina seramiklerin temas kısımlarının daha fazla detaylandırılmış hali	54
2.24. Kompozit sarıli seramiklerde kompozit kısmının detaylandırılmış hali	55
2.25. Çevresi kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırh sisteminin sayısal analiz modeli.....	55
3.1. Karbon liflerle sarımı yapılan alümina seramik.....	56
3.2. Balistik deneyler için üretimi gerçekleştirilen zırh sistemine ait deney numunesi	57
3.3. Seramik ön yüzli çelik zırha ait deney numunesinin balistik test için hazırlanan düzeneğe yerleştirilmesi	58
3.4. Çevresi kompozit sargısız arası boşluklu ve hardox çelik saca yapıştırılmış deney numunesi	59
3.5. Arası 1,5 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu.....	59
3.6. Arası 1 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu.....	60
3.7. Arası 0,75 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu	60
3.8. Flaman sarım metoduyla hazırlanan çevresi kompozit sargılı alümina seramik ...	62
3.9. Çevresi kompozit sargılı alümina seramik ön yüze sahipve arka yüzü hardox çelik sac olan zırh sistemine ait deney numunesi	62
3.10. 1 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu.....	63
3.11. 1 mm sarımlı hazırlanan numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu	63
3.12. 1,5 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerin görünümü - 1.....	64
3.13. 1,5 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerin görünümü - 2.....	64
3.14. Karbon liflerle 1 mm sarılmış numunenin deney sonucu.....	65

3.15. Mermilerin çarpma hızlarına bağlı numunelere uygulanan çarpma enerjileri (Joule).....	66
4.1. Tek parça kompozit sargısız seramiğin sayısal analiz sonucu	68
4.2. Tek parça kompozit sargılı seramiğin sayısal analiz sonucu.....	69
4.3. 1 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analiz sonucu	70
4.4. 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analiz sonucu	71
4.5. 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analizinde karbon kompozit üzerinde dağılan gerilmeler	71
4.6. Kompozit sargısız araları 1 mm boşluklu seramik ön yüze sahip çelik zırhların sayısal analiz sonuçları	72
4.7. Kompozit sargısız araları boşluksuz seramik ön yüze sahip çelik zırhların sayısal analiz sonuçları	72
4.8. Çevresi kompozit sargısız arası a) 0,75 mm, b) 1 mm ve c) 1,5 mm boşluklu seramik ön yüzü çelik zırhlarda çevre seramiklerin hasar durumu.....	73
4.9. Çevresi kompozit sargısız arası boşluksuz seramik ön yüzü çelik zırhta çevre seramiklerin hasar durumu	74
4.10. Çevresi a) 0,75 mm, b) 1 mm ve c) 1,5 mm kalınlıklarında kompozit sargılı seramik ön yüzü çelik zırhlarda çevre seramiklerin hasar durumu.....	74
4.11. Çevre seramiklerde oluşan hem sayısal hem de deneysel hasar durumu.....	76
4.12. 1 mm kompozit sargılı numunelerin çevre seramiklerde oluşan hem sayısal hem de deneysel hasar durumu	77
4.13. 1,5 mm kompozit sargılı numunelerin çevre seramiklerde oluşan hem sayısal hem de deneysel hasar durumu	77
4.14. Kompozit sargısız numunelerin çevre seramiklerde oluşan kütle kaybı.....	80
4.15. Kompozit sarımlı numunelerin çevre seramiklerde oluşan kütle kaybı.....	80
4.16. 0,75 mm boşluklu ve kompozit sarımlı numunelerde oluşan hasar karşılaştırılması.....	81
4.17. 1 mm boşluklu ve kompozit sarımlı numunelerde oluşan hasar karşılaştırılması.....	81
4.18. 1,5 mm boşluklu ve kompozit sarımlı numunelerde oluşan hasar karşılaştırılması.....	82

4.19. Çelik plakanın plastik deformasyon sonrası kesit görünüşü	83
4.20. Zırh sistemine ait deney numunesi üzerinde yapılan balistik deney sonrası çelik plakada meydana gelen plastik deformasyon	84
4.21. Seramiklerin çelik yüzeye kırıklar halinde yapışmış görüntüsü	84
4.22. Sayısal, deneysel ve analitik deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması	85
4.23. JC malzeme modelinin gerilme-gerinim grafiği	87
4.24. Çelik plakada oluşan von Mises efektif gerilme dağılımı	88



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Seramiklerin mekanik özellikleri [8].....	3
1.2. Zırh malzemesi olarak kullanılan bazı çeliklerin mekanik özellikleri [13,14].....	4
2.1. Şekil değiştirme hızına bağlı malzeme tepkisi.....	28
2.2. Analizde kullanılan malzeme modellerine ait JC parametre değerleri [36,69].....	32
2.3. Analizde kullanılan alümina seramikler için Johnson-Holmquist malzeme modeline ait parametre değerleri [77].....	35
2.4. Karbon/epoksi kompozit malzemenin mekanik malzeme özellikleri [16].....	37
3.1. Karbon elyaf / epoksi kompozitin mekanik özellikleri.....	61
3.2. Alümina seramiklerin mekanik özellikleri.....	61
3.3. Farklı ölçüm cihazından alınan ölçümler ve ortalama çarpma enerjileri.....	67
4.1. Kompozit Sargı Kalınlığına Bağlı Kompozite Gelen Gerilme Değerleri.....	70
4.2. Seramik ön yüze sahip çelik zırh sisteminin farklı tasarım konfigürasyonları.....	73
4.3. Balistik deney sonrası çevre seramiklerdeki hasar durumu.....	75
4.4. Arası boş bırakılan numunelerde gerçekleşen malzeme kaybı.....	78
4.5. Karbon fiber sarımlı numunelerde gerçekleşen malzeme kaybı.....	79
4.6. Çelik yüzeyde oluşan maksimum deformasyonlar.....	86

SİMGELER DİZİNİ

A	JC Malzeme akma mukavemeti (MPa)
A_p	Merminin efektif kontak alanı (m ²)
B	JC mukavemet katsayısı (MPa)
C	JC gerinim sertleşmesi katsayısı
c	Ses hızı (m/sn)
e_c	Seramik kalınlığı (m)
E	Elastisite modülü (GPa)
E_p	Plastik şekil değiştirme enerjisi (Joule)
F	Kuvvet (Newton)
G	Rijitlik modülü (GPa)
k	Deformasyon sabiti
K	Yığılma modülü (GPa)
L	Son uzunluk (m)
L_0	Başlangıç uzunluğu (m)
ΔL	Boydaki uzama (m)
$\dot{m}$	Kütle akış hızı (kg/sn)
M_p	Merminin ağırlığı (kg)
n	Pekleşme üsteli
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
R	JC farklı sıcaklıklardaki gerilme-gerinim oranı
R_c	Seramiğin dinamik akma mukavemeti (GPa)
T	Deney sıcaklığı (°C)
T_m	Erime sıcaklığı (°C)
T_r	Referans sıcaklığı (°C)
V	Hacim (m ³)
V_p	Mermi hızı (m/sn)
Y_p	Merminin dinamik akma mukavemeti (GPa)
w	Yer değiştirme miktarı (mm)
w_0	Maksimum yer değiştirme (mm)
ε	Birim şekil değiştirme (mm/mm)
ε_{ger}	Gerçek birim şekil değiştirme (mm/mm)

$\dot{\epsilon}_{\text{ger}}$	Gerçek birim şekil değiştirme hızı (mm/mm×sn)
$\bar{\sigma}$	Efektif gerilme (MPa)
σ	Mühendislik gerilmesi (MPa)
ν	Poisson oranı



KISALTMALAR DİZİNİ

API	Zırh Delici Mermi (Armor Piercing Incendiary)
CBM	Sürekli Model (Continuum-based Model)
JC	Johnson-Cook Malzeme Modeli
JH	Johnson-Holmquist Seramik Malzeme Modeli
MSM	Mikro Model (Microstructural Model)
NIJ	Ulusal Adalet Enstitüsü (Technology of the National Institute of Justice)
SPH	Düzleştirilmiş parçacıklar hidrodinamiği (Smoothed-particle hydrodynamics)
STANAG	NATO Standart Anlaşması (Standardization Agreement)
UHMWPE	Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen

1. GİRİŞ

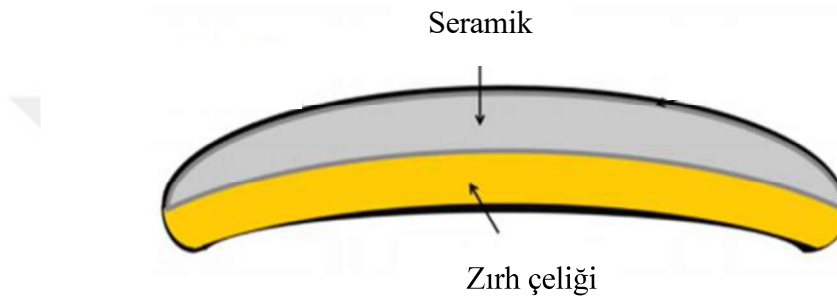
Son yıllarda zırh sistemlerinin kullanımı insanların korunması ve yüksek balistik koruma gerektiren askeri araçların gelişimi için kaçınılmaz hale gelmiştir. Önceleri geniş olarak kabul edilmiş yüksek sertliğe sahip çelikler oldukça iyi balistik performans sağlamalarından dolayı zırhların temel malzemesi olarak tercih edilmiştir. Fakat çelik malzemeler tek başlarına gelişen savaş teknolojileri ile yeterli performansı sağlayamamışlardır. Günümüzde seramik malzemeler ile desteklenmiş yeni tip zırh sistemleri çok daha dayanıklı olup geniş ölçekte kullanılır hale gelmiştir.

Bununla birlikte hali hazırda ülkemizde de üretimi gerçekleştirilen benzer yapıdaki seramik ön yüzlü çelik zırhlarda üstün dayanımlarına karşın balistik etki altında farklı tiplerde hasarların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle çoklu altıgen seramik ön yüze sahip çelik zırhlarda istenmeyen bir durum olarak, ilk mermi darbesine maruz kalan altıgen seramiğin çarpışma anında hasara uğrayıp kırılması ile çevresinde bulunan diğer altıgen seramik malzemelere zarar verdiği sahadaki tecrübelerden edinilmiştir. Bu çalışmada seramik ön yüzlü çelik zırhlarda, ilk mermi darbesine maruz kalan altıgen seramiğin çevresindeki seramiklerde meydana gelen hasarın en aza indirilmesi için kompozit malzeme destekli yeni bir zırh tasarımının yapılması amaçlanmıştır.

Zırhın tasarımında öncelikli olarak seramik ön yüzün, metal arka plakanın ve kompozit sargının malzemeleri seçilmiştir. Daha sonra çevresi farklı kalınlıklarda kompozit malzeme ile sarılmış seramik ön yüzlü çelik zırhların balistik davranışları sayısal olarak *Ansys Explicit/Dynamic* sonlu eleman programında yapılmıştır. Sayısal analizler sonucunda elde edilen tasarım parametreleri ışığında zırhların üretimleri sağlanmış ve balistik atış testleri standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve deneyler sonucunda kompozit sargının çevre seramiklerde oluşan hasar durumu ile arka metal plakadaki deformasyona olan etkileri incelenmiştir.

1.1. Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhlar

Tez konusunu teşkil eden Şekil 1.1.' de de şematik olarak gösterilmiş yeni tip seramik ön yüzlü çelik zırhlarda sert seramik ön yüz ilk çarpma anında merminin keskin yapısını köreltip büyük oranda şeklinin bozulmasını ve parçalanmasını sağlamaktadır. Arka taraftaki yüksek çekme dayanımına sahip çelik tabaka ise merminin geri kalan kinetik enerjisini absorbe ederek hem seramik ön yüzeye destek olmakta hem de zırhın daha ileri düzeyde hasara uğramasının önüne geçmektedir [1–4].



Şekil 1.1. Balistik koruyucunun şematik gösterimi

1.1.1.Seramikler

Son 30 yılı aşkın süredir, seramik malzemelerin zırh malzemesi olarak kullanımı dikkat çekmektedir [5]. Seramikler; balistik anlamda özellikle düşük yoğunluğu, yüksek elastisite modülü, yüksek sertliği ve basınç altında gösterdiği yüksek dayanımla, zırh yapımında son yıllarda tercih edilir olmuşlardır. Mermi zırha etki ettiği anda sert seramik yapı tarafından karşılanmakta ve sonuç olarak sivri uç kısmının yapısı bozularak etki alanı artmakta ve hasar etkisi azalmaktadır [6].

Balistik alanda bor karbür " B_4C ", silisyum karbür " SiC " ve alümina seramikler " Al_2O_3 " sıklıkla kullanılan seramik türleri olup Çizelge 1.1.' de mekanik özellikleri verilmiştir. Bor karbür, elmadan sonra sertliğiyle bilinen, kimyasal ve mekanik korozyona dirençli, düşük yoğunluğa sahip ve bu sebeplerden dolayı dayanım-ağırlık değeri yüksek bir malzemedir. Alümina seramikler ise ekonomik olmasından dolayı, elektrik-elektronik alanlarda, kesici takımlarında, sızdırmazlık elemanlarında, tıp sektöründe ve savunma

sanayisinde (kara ve deniz araçlarının zırhlanmasında, roket nozullarında, türbin yataklarında) sıklıkla kullanılmakta ve tercih edilmektedir. Silisyum karbürler, doğada direkt olarak olmamasına karşın, temel bileşenleri silisyum ve karbon kolayca bulunabilmektedir. Gerek ağırlık gerek maliyet olarak alümina seramikler ve bor karbür seramiklerin arasında kalan balistik seramiklerdir [7].

Çizelge 1.1. Seramiklerin mekanik özellikleri [8]

Özellikler	Al_2O_3	SiC	B_4C
Yoğunluk (kg/m^3)	3900	3100	2500
Sertlik (HV) (GPa)	1600 (15)	2700 (27)	3870 (38)
Elastisite Modülü (GPa)	370	410	460
Eğilme Mukavemeti (MPa)	380	550	750

Seramiklerin kullanım alanlarına ve amaçlarına bağlı olarak geometrileri değişmektedir. Şekil 1.2.' de örnek olarak gösterilen üçgen, kare, dikdörtgen, daire ve altıgen en sık rastlanan seramik geometri şekilleridir. Altıgen, bir alanın maksimum kullanımı için en uygun geometrik şekildir ve aynı zamanda birleşince arada hiçbir boşluk kalmamaktadır. Alümina seramikler uygun fiyatı ve altıgen geometrisiyle yapılan bu çalışmada tercih edilmiştir.



Şekil 1.2. Farklı geometrik yapılarda alümina seramikler

1.1.2.Çelikler

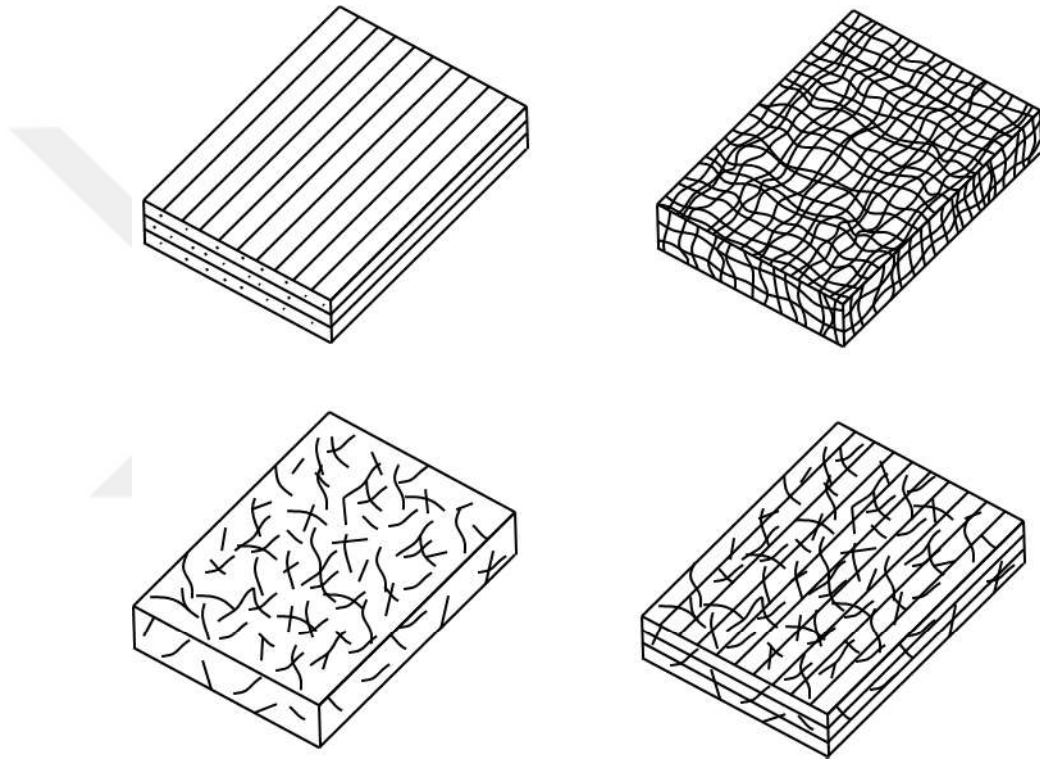
Çelik malzemeler zırh uygulamalarında uzun yıllardır, üstün mekanik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmakta ve özellikleri bakımından geniş bir veri tabanına sahiptirler. Çelikler yüksek mukavemet, yük taşıyabilme özelliği ve sünek davranışlarının kombinasyonuyla balistik darbe altında iyi bir darbe emici malzeme olarak görev yapmaktadır [9–11]. Zırh çelikleri, farklı tipteki mermilerin veya patlayıcıların etkisine karşı direnç göstermesi amacıyla savunma sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır. Malzeme sertliği, sadece çelik kullanılan tek katmanlı zırhlar için balistik performans da önemli bir kriterdir [12]. Farklı firmaların ürettikleri farklı mekanik özelliklere sahip çelikler Çizelge 1.2.' de gösterilmiş olup, bu çalışmada piyasadan tedarik edilebilen Hardox 500 malzemesi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra Hardox çeliğinde herhangi bir deformasyon oluşmadığından, analitik ve sayısal karşılaştırmaları yapabilmek adına S235 çelik malzeme de kullanılmıştır.

Çizelge 1.2. Zırh malzemesi olarak kullanılan bazı çeliklerin mekanik özellikleri [13,14]

Ticari Adı	Serlik (HB)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Charpy -V (-40 °C) (Joule)
M-Protect 500	480-540	1250	1600	20
Armox 440T	420-480	1100	1250-1550	45
Armox 500T	480-540	1250	1450-1750	32
Ramor 300	260-320	820	940	60
Ramor 500	490-560	1450	1700	20
Hardox 400	370-430	1000	1200-1400	45
Hardox 500	470-540	1400	1500-1600	37

1.1.3. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, takviye ve matris malzeme olarak da bilinen iki veya daha fazla malzemenin makroskopik yapıda birleştirilmesinden meydana gelmekte ve birleşen malzemelerin özelliklerinden farklı özelliklere sahip olmaktadır [15]. Elyaf, takviye malzemesi olarak kompozitlerde kullanılan en yaygın türdür. Kompozitler elyaf malzemesine göre Şekil 1.3.' te görüldüğü üzere; sürekli, kesikli, örgülü ve hibrit şeklinde çeşitlere ayrılmaktadır.



Şekil 1.3. Elyaf takviyeli kompozit tipleri [16]

Kompozit malzemelerin başlıca olumlu özellikleri sıralanacak olursa, hafiflik ve görünüm, şekil değiştirmeme, yüksek mekanik özellikler (Çekme, basma, darbe, çentik, yorulma dayanımları vb.), yüksek kimyasal direnç ve sıcaklık dayanımı (Kimyasal maddelere, çözücülere, asitlere vb. ortamlara dayanımları), elektriksel özellikler (İsteğe bağlı kazandırılabilir özellikler), çatlak ilerlemesi minimize ve titreşim absorbe özelliği örnek olarak verilebilir.

Olumsuz özellikleri ise; çoğu kompozitler anizotropiktir (Gösterdiği özellikler yöne bağlıdır; bu durum üstünlük de olabilir, zayıflık da olabilir), üretim güçlüğü (İmal usulleri yavaş ve pahalıdır), işleme güçlüğü ve istenen yüzey kalitesinin elde edilemeyeşi, geri dönüşümünün olmayışı ve kırılma uzamasının az oluşu örnekler olarak verilebilir [17].

1.1.3.1. Elyaf Malzemesi

Elyaf malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini belirleyen bileşenidir. Elyaf malzemesinin tipi, elyafın matris malzemesiyle hacimsel oranı, sarım açısı ve kompozit malzemenin elyafa göre yapılış şekli kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini direkt olarak etkilemektedir [16]. Endüstride karbon elyaf, cam elyaf ve kevlar® elyafı en çok bilinen elyaflardır.

Cam elyafı diğer elyaflar arasında en ucuz olan ve sanayide en sık kullanılan elyaftır. Dayanımı ve rijitliği (katılığı) iyi olmakla birlikte darbelere karşı direnci çok iyi değildir.

Aramid olarak da bilinen Kevlar49® elyafı yüksek dayanıma ve düşük yoğunluğa sahiptir. Darbe yüklerine ve sıcaklığa karşı dayanımı yüksek olmakla beraber düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir. Ayrıca Kevlar49® elyafının maliyeti Karbon elyafına göre oldukça uygundur [18].

Karbon elyafı dayanımı ve katılığı diğer elyaflar içerisinde en yüksek olan elyaftır. Yorulma yüklerine karşı dayanımı oldukça yüksek fakat darbeli yüklere karşı dayanımı azdır. Isıl genleşme katsayısı düşüktür. Karbon elyafı diğer elyaflar arasında en pahalı elyaftır.

1.1.3.2. Matris Malzemesi

Matris malzemesi plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerinde önleyici olarak görev yapmakta ve kompozit malzemenin hasara uğramasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir diğer amacı da elyaf

malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü elyaflar arasında homojen olarak dağıtmaktır. Sanayide matris malzemesi olarak polimerler, metaller ve seramikler kullanılmaktadır.

Bunların içinde polimerler, günümüzde kullanılan kompozitlerde sorunsuz olarak en çok kullanılan matris malzemeleridir. Polimerler yapı ve davranışlarına göre kendi içinde termoset ve termoplastik olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar [19].

1.1.3.2.1 Termoset Matrisler

Termoset matrisler kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyetlerinden dolayı en çok tercih edilen matris türüdür. Termoset matrisler düşük viskoziteye sahiptirler. Bu durum elyaflar ile kusursuz birleşme ve yüksek hızlarda işlem yapabilmeyi sağlar. En iyi bilinen termoset matrisler polyester, vinil ester, epoksi ve fenoliktir. Termosetler içerisinde epoksiler yüksek mekanik özellikleri ve korozyona dayanımlarından dolayı en çok tercih edilen matris malzemesidir [20].

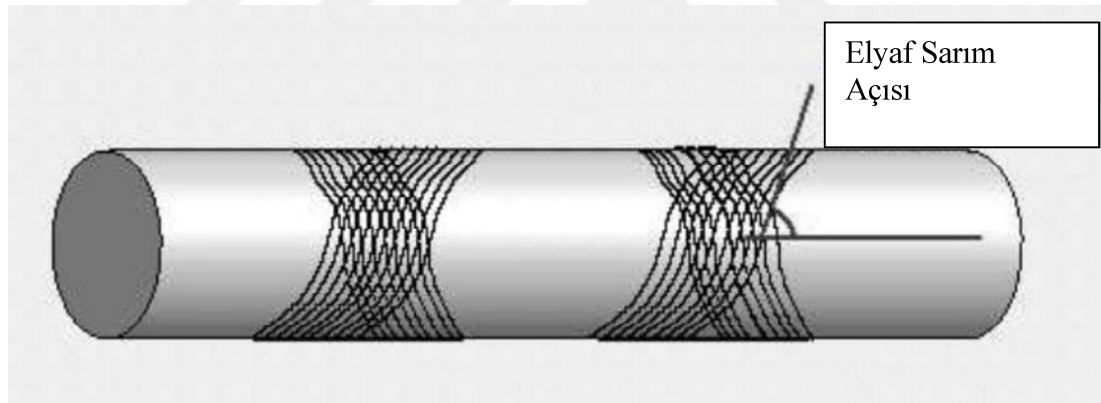
1.1.3.2.2 Termoplastik Matrisler

Termoplastik matrisler yüksek çekme dayanımına ve yüksek uzama kabiliyetine sahiptir. En iyi bilinen termoplastik matrisler poliamid (PI), poliyeter eter ketone (PEEK) ve polifenylene sulfone (PPS) dir. Termoplastik kompozit malzemelerin uygulanması esnasında matris malzemesinde herhangi bir kimyasal değişim olmaz. Ancak matris malzemesi uygulama esnasında ısıtılarak sert halden yumuşak hale getirilir ve bu sayede kolay bir uygulama gerçekleştirilir. İşlem bittikten sonra matris malzemesi eski sert halini alır. Termoplastikler işlem sırasında yüksek viskoziteye sahiptirler, bu özellikte onların işlemlerini zorlaştırır. Termoplastik matrislerin diğer matrislere göre üstün olan önemli bir özelliği ısıl kabiliyetleridir. Bu matrisler içinde poliyeter eter ketonunun (PEEK) yumuşama sıcaklığı 350 °C' ye kadar çıkmakta ve 450 °C' ye kadar kullanılabilir [21].

1.1.4.Flaman Sargı Metodu

Flaman sarım tekniği kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan ve bilinen en verimli yöntemlerden biridir. Günümüzde flaman sarım tekniği depolama tankları, uçak-helikopter parçaları, yel değirmeni palleri, roket namlu boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pnomatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdelerinin üretimi gibi alanlarda ve ekipmanlarda kullanılmaktadır [22].

Tasarımları üretilecek ürüne göre yapılmış sargı makineleriyle kafa ve malafa dönüş hızları belirlenerek istenilen sarım açılarında imalat yapılır. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan desenlerin bütün malafayı kaplaması halinde gerçekleştirilir. Belirlenen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Şekil 1.4.' de görüldüğü üzere sarım açısı malafa eksenini ile malafaya dik doğrultu arasındaki açı olup 4 ve üzeri eksene sahip CNC Flaman Sarım tezgâhlarında 15° ile 90° ve arasındaki açılarda sarım gerçekleştirilebilmektedir.



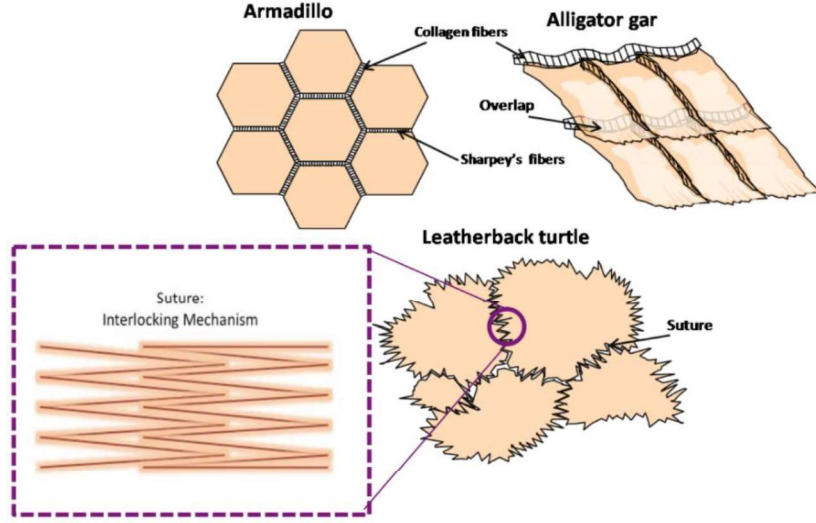
Şekil 1.4. Elyaf sarım açısının gösterimi [22]

Genellikle elyaflar içindeki matris malzemesi termoset olarak seçilir. Yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda, matris malzemesi sarım esnasında uygulanır. Alternatif yöntem olan kuru sarımda ise, önceden matrise emdirilmiş, “prepreg” elyaf/matris sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanır. Üretim işlemi malafanın çıkarılmasıyla tamamlanır. Gerekli durumlarda parça üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilir [22].

1.2. Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhlar ile İlgili Çalışmalar

Literatür araştırmalarında seramik ön yüzlü çelik zırhların balistik davranışlarının incelenmesine yönelik birçok akademik çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalar hem deneysel hem de teorik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Araştırmaların çoğunda mermi darbesinin seramik ön yüzlü çelik zırhlarda oluşturduğu balistik etkiye yönelik deneysel ve teorik çalışmalara yer verilmiştir. Seramik ön yüzün geometrisinin ve malzeme tipinin zırhın balistik performansına etkisi çalışmalarda yer almaktadır. Yine bu çalışmaların çoğunda mevcut düzendeki zırh tasarımına eklenen kompozit plakaların zırhın balistik performansını ne kadar değiştirdiği incelenmiş ve bu konu ile ilgili yenilik çalışmaları yapılmıştır. Tez konusu ile ilgili ve tez konusuna yardımcı olacak diğer çalışmalara ait özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

Öncelikle tezin konusu ülkemizde seramik ön yüzlü çelik zırh üreticisi olan NUROL Teknoloji A.Ş. nin yetkili mühendisleri ile yapılan görüşmeler sonucunda seramik ön yüzlü çelik zırhlarda karşılaşılan önemli bir problemin giderilmesine yönelik çalışmaları kapsamaktadır. Bahsi geçen problemin çözümüne yönelik yapılan literatür araştırmalarında Irene Chen [23] ve arkadaşları zırhlı hayvan olarak da bilinen armadilloların deri yapısı üzerine yaptıkları çalışmada armadilloların derilerinin tabaka şeklindeki sert pullardan oluştuğu ve bu sert pulların birbirine kolajen (bağ dokusu) elyaflarla bağlandığı (Şekil 1.5.) ve bu elyaf yapının sert pullara sahip deri yapısına esneklik kazandırdığı ayrıca sert pulların birbiri ile etkileşimlerinde darbeleri sönmülediğini tespit etmişlerdir. Tez çalışmasının temelini teşkil eden altıgen seramiklerin çevresinin kompozit malzeme ile sarılması ile mermi darbesi sonrası seramiklerin birbiriyle olan etkileşimlerinin en aza indirilmesi için, armadilloların deri yapısından esinlenilmiştir.



Şekil 1.5. Armodilloların zırha benzer deri yapısı [23]

“Balistique” Fransızcadan gelen, mermilerin silah içi-dışı hareketlerini ve tahrip edilen hedef üzerindeki hasarı inceleyen bilim dalıdır [24]. Atış bilimi diye de tabir edilen balistik, mermi ve füzelerin hareketlerini inceler ve dört bölüme ayrılır.

-İç Balistik: Mermi veya füzenin silahta veya uygulanan yerdeki hareketini yani merminin tahrikini inceler. Merminin namluda ateşlendiği andan çıkışına kadar olan kısmı inceler [25].

-Geçici Balistik: Ara balistik olarak da bilinir [26], mermi namludan çıktıktan sonra arkasındaki basınç dengeleninceye kadarki kısmını inceler [27],

-Dış Balistik: Merminin uçuş sırasındaki hareketini inceler,

-Terminal Balistik: Merminin hedef üzerindeki etkilerini ve davranışlarını inceler [28]

Terminal balistik, merminin vuruş hızı, açısı, hedef malzeme ve geometrisi, mermi malzeme ve geometrisine göre değişiklikler gösterir [24]. Terminal balistik; hedef üzerinde meydana gelen delinme, kopma, delaminasyon, patlama etkisi, yangın tesiri, zehirli gaz ve radyoaktif etkileri inceleyen, aynı zamanda hedef balistiği olarak da tanımlanan, balistiğin bir alt dalıdır [29].

Zırh sistemleri insan vücudunun, personel veya askeri amaçlı araçların korunmasında kullanılmaktadır. İnsan vücudunun korunmasında kullanılan zırh sistemlerinin hafif olması istendiğinden seramik ön yüzlü kompozit zırhlar tercih edilmektedir. Personel veya askeri amaçlı araçların korunmasında kullanılan zırh sistemlerinde ise daha çok seramik ön yüzlü çelik zırhlar tercih edilmektedir. Tez çalışmasında sayısal ve deneysel analizlerinin yapılması düşünülen zırh sistemi personel veya askeri amaçlı araçların korunmasında kullanılan zırh sistemi olarak düşünülmüştür.

Literatürde balistik çalışmalar için Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ), EN1063, NATO Standart Anlaşması (Stanag) vb. önemli standartlardan faydalanılmaktadır [7]. Standartlarda mermi mesafeleri, mermi hızları, mermi tipleri, mermi ağırlıkları gibi parametreler belirlenmiştir. Bu çalışmada bahsi geçen parametreler, standartlara askeri seviyede uyularak zırh sisteminin maruz kaldığı gerçek şartlara göre belirlenmeye çalışılacaktır. Bu kapsamda NIJ – 0108.01 Seviye 4' e göre koruma seviyesi referans alınıp, seviyenin belirttiği mermilerle 838 ± 15 m/sn hızlarında tek mermi atışı yapılmıştır. Deneyler de Stanag 2310, Aep-97 Edition A şartını sağlayan Makine ve Kimya Endüstri Kurumu tarafından üretilen mermiler kullanılmıştır.

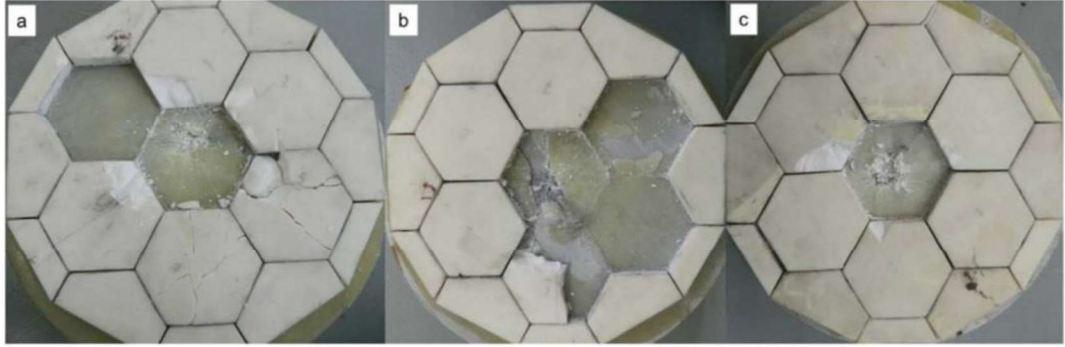
Kullanılan çelik malzeme kısmını incelediğimizde istenen temel özellikler sertlik ve tokluktur. Sertlik delinmeye karşı gösterdiği direnci, tokluk da enerjiyi absorbe etme yeteneği olarak önemli özellikleridir. Zırhlı araç tasarımlarında kullanılacak bölümler ve tehlikeler malzeme seçiminde ana parametreleri oluşturur.

Iqbal ve arkadaşları, Armox 500T çelik malzemesini farklı gerilme, gerinim ve sıcaklıklarda balistik olarak incelemişlerdir. Zırh delici mermi (Armor Piercing Incendiary Projectile-API) kullanmışlardır. Üç ekseninde gerilme ve buna bağlı olarak gerinimi arttırıp malzemeyi modellemişlerdir. Sıcaklığın artışına bağlı olarak malzeme sünekliğinde artış ve doğal sonucu olarak mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Yapılan testleri kalibre etmek için JC kırılma modeli kullanılmıştır. Hopkinson çubuklarıyla yüksek gerinim oranlarında yapılan testlerle nümerik sonuçlar doğrulanmıştır. 8 mm ve 10 mm kalınlığında Armox 500T malzemelere 7,62 mm ve 12,7 mm API mermiler yaklaşık olarak 830 m/s hızlarında çarpmıştır. Sonlu elemanlar analizleri hem Armox 500T hem de mermi malzemesi için JC modeli kullanılarak

ABAQUS/Explicit programında yapılmıştır. Kırılma mekanizması ve balistik direnci sunulmuş ve incelenmiştir. Nümerik olarak hesaplanan kırılma modelleri ve mermilerde kalan hızların deney sonuçlarıyla eşleştiği görülmüştür. Sıcaklık 200 °C çıkarıldığında mavi kırılma etkisiyle beraber mukavemetinde az bir artış gözlenmesiyle beraber sıcaklığı 300-900 °C çıkarıldığında kırılma şekil değiştirmesi artmasıyla beraber mukavemetinde düşüş gözlemlenmiştir. 900 °C de numunede % 54' lük uzama ölçülmüştür. Mermi malzemesi gerilme altında önemsiz bir şekil değiştirme göstermiş ve deneysel olarak 2300 MPa' da kopmuştur. Ayrıca mermi malzemesi eksenel gerilme ve gerinim oranlarına, Armox 500T' ye kıyasla çok az tepki göstermiştir. Bunun yanı sıra termal hassasiyetinin yüksek olduğu, sıcaklık arttıkça mukavemetinin düştüğü, kırılma şekil değiştirmesinin azaldığı görülmüştür [30].

Jiusti ve arkadaşları, altıgen seramiklerin dizilerek oluşturduğu koruyucu tabakaların aralarındaki dolgu malzemesinin seramikler üzerindeki balistik etkisini çalışmışlardır. Seramiklerin darbe karşısında yüksek bir koruma göstermesine rağmen ara yüzeylerinin savunmasız olması ve mermi sonucu oluşacak darbeye bağlı olarak seramikte meydana gelen genişleme ve kırık seramik parçaları bitişiğindeki seramik parçalara da darbe uygulayarak onlara da zarar verebilmektedir. Epoksi, geopolimer ve boş olarak üçer hedef hazırlamışlardır. Bitişik karolarda iletilen stres dalgaları ölçülerek saf epoksi reçinenin % 9, geopolimerin % 20 iletim sağladıklarını gördüler. 8 mm kalınlığında alümina seramik (ağırlıkça % 99 saf Al_2O_3) karolara yaptıkları deneylerde, 8 mm seramiğin kalınlığının ve yanal boyutları 7,62 mm mermi ve mermi hızına uygun aldıklarından dolayı, delinme meydana gelmemiştir. Dolgu malzemesi kullanımının yararlı olduğunu, mermi darbesinden gelen balistik etki alanını azalttığını, komşu karoların daha az zarar gördüğünü gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra geopolimer dolgu malzemesi kullandıkları hedeflerde seramik ayrılmasının önüne geçmesine rağmen Şekil 1.6. a, b ve c' de görüldüğü üzere karoların birbirinden ayrılmasına sebep olmuştur. Genel değerlendirmelerinde epoksi dolgulu mozaiklerin balistik olarak diğerlerine kıyasla önemli ölçüde üstün performans gösterdiklerini gözlemlemişlerdir. Dolgu malzemesinin empedansının doğrudan balistik performansı etkilediğini gözlemlemişlerdir. Dolgu malzemesi kullanılarak seramiklerin birbirleriyle teması engellenmiş ve çarpışma sonrası hasar gören bölge daha lokal kalarak, hasar görmeyen

bölge daha fazla kalmıştır. Uygun fiyatı , kolay uygulanabilirliği ve bulunabilirliğiyle epoksi balistik zırhlarda dolgu malzemesi olarak yaygın olarak kullanımının uygun olduğunu tespit etmişlerdir [31].



Şekil 1.6. Farklı epoksi uygulamalarında meydana gelen çatlaklar [31]

Wang ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada malzeme karakteristiklerinin belirlenmesini, mermi ve hedef arasındaki etkileşimi anlamaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada yenilikçi hafif hibrit kompozit plakalarda kullanılan alümina seramik peletleri, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), ve çift katman Ti-6Al-4V (TC₄) malzemeyle tasarlamışlardır. Tasarladıkları hedef insan vücudunu koruduğundan dolayı yoğunluk önemli bir paya sahiptir ve hedefin yoğunluğunu 7,98 g/cm³ olarak ölçmüşlerdir. Standart panel ölçüsünü 150×150×28 mm olarak hazırlamışlardır. Mermi hızı ortalama 818 m/s olan 12,7 mm API mermiler kullanılmıştır. Çalışmalarındaki alümina seramik % 99,7 saflığa sahip olup, peletin bombe yarıçap ve genişliği oranı 0.85:1 ve 1.28:1 şeklindedir. Çalışmalarının sonucunda yeni bir tasarımla üretilen ve ağırlığın azaltıldığı zırhın mermiye yeterli ölçüde sönümlediği, enerjisini absorbe edebildiği gözlenmiştir [32].

Tria ve Trebinski, kuramsal modelleri deneysel olarak doğrulayarak yeni bir metodoloji geliştirmek üzerine çalışmışlardır. Küçük silahlardan çıkan mühimmatın oluşturduğu terminal balistiği incelemek üzere nümerik algoritmalar kullanmışlardır. Metodolojileri, bir dizi bağımsız testle malzeme modellerinin tanımlanması, terminal balistikte önemli olan mermi-hedef etkileşimlerini incelemek için yeterli veri sağlamaktır. Deneylerde ölçülen verilerle düzgün bir model oluşturabilmek için; parametrelerin doğru

değerlendirilmesini sağlamak ve sapmaların karakterize edilmesini sağlamaktır. Çalışmada 7,62 mm API mermi ve hedef olarak etki hızında delinebilecek çelik plaka kullanmışlardır. Modellerin doğrulanabilmesi için plakaların deformasyonu ve sünekliği ölçüldükten sonra, mermi hızları ve mesafelerini belirlemişlerdir. Ansys Ls-Dyna programında sonlu elemanlar kodları kullanarak basit, karmaşık kuramsal modelleme ve çarpma sonrası terminal analizleri yapılmıştır. Hedefte ve mermide bulunan farklı balistik sonuçlar, katı Lagrange ve hibrid katı/gerçek parçacıklar hidrodinamiği (SPH) ayrılma yöntemlerinde kullanılan sonuçlarla karşılaştırılmışlardır. Oluşturdukları model deneysel sonuçlar için iyi bir yaklaşım oluşturmakta ve bazı fiziksel mekanizmaların tahmininde kullanılabilirliktedir. Geliştirilen model mermi penetrasyon mekanizmasını ve plakanın çarpışma sonrası hasarını, plakanın eğilme miktarını, tıkanmayı, şişmeyi ve mermide oluşan deformasyonu ve kırılmayı tahmin edilebilir kılmıştır. Bunların yanı sıra yüksek hız darbe analizlerinde mermi/plaka davranışları hasar/kırılma davranışları sonlu elemanlar ayırma yöntemine, kalibrasyonuna da bağlıdır. Geliştirerek oluşturdukları modelden elde edilen veriler farklı modelleri ve nümerik teknikleri araştırırken referans olabilir nitelikte açık olarak paylaşılmış ve yeni modellerin testinde ve analitik çözümünde kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir [33].

Sun ve arkadaşları, katmanlı ve kademeli bir yapı oluşturarak yeni bir koruyucu örtü şekli geliştirmeye çalışmışlardır. Hazırlanan hedeflerin balistik davranışlarını belirlemek amacıyla deneysel olarak yaptıkları çalışmaları 12,7 mm API mermilerle 537,7-596,5 m/s hız aralığında yapmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde koruyucu örtüyle hazırlanan hedeflerin atışlar sonucunda, distal bölgede üstün bir bütünlük sergilediği ve hasara uğramadığı gözlenmiş ancak örtüsüz olan numunede balistik hasar sonrası kırılmaların derinlemesine çatlaklar boyunca hedefin kalınlığı kadar ilerlediği görülmüştür. Bunun yanı sıra koruyucu örtü kaplı numune, diğerine kıyasla önemli miktarda merminin penetrasyon derinliğini azalttığı yani merminin daha az numuneye girdiği görülmüştür. Sonuç olarak 12,7 mm API mermilerin örtüsüz olan hedeflerde daha fazla tahribat oluşturduğu görülmüştür. Epoksi yapıştırıcılarla yapılan numunelerin testleri, silikon dolguyla veya seramik yapıştırıcıyla yapılanlara kıyasla daha verimli, daha sert ve yüksek mukavemetli davranış gösterdiği gözlemlenmiştir [34].

Iqbal ve arkadaşları, mermi şeklinin ve mermi giriş açısının balistik limitlerini ve tahrip mekanizmasını incelemişlerdir. Kurşun şeklini ve kurşunun tahrip edilecek numuneye giriş açısını değişik olasılıklarda sonlu elemanlar metoduyla modelleyerek, ABAQUS programında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 12 mm kalınlığında Weldom 460 E hedefe, 20 mm çelik kurşun, 6 farklı mermi ucu açısı (33.4° , 60° , 90° , 120° , 150° ve 180°) ve 5 farklı giriş açısıyla (0° , 15° , 30° , 45° , 60°) oluşan hasarı ön ve arka yüzeyleri dikkate alarak incelemişlerdir. Mermi ucundaki açının değişimine bağlı darbenin yol açtığı hasar tartışılmış, literatürde var olan diğer nümerik ve analitik model sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılmış ve oldukça yakın olduğu görülmüştür. Merminin ön ilk değen kısmının açısının artışıyla beraber hedefin genel deformasyonunda azalma görülmüştür. Bilgisayarda ABAQUS/Explicit modülünde yapılan analizler JC modeline göre yapılarak, analitik olarak hesaplanmıştır [35].

Serjouei ve arkadaşları, seramik ve metal çift katmanlı zırhların dayanabileceği balistik hız limitlerini, darbe esnasında momentum ve enerji dengelerini göz önünde bulundurarak ampirik olarak modellemeye çalışmışlardır. Darbe simülasyonları, farklı kombinasyonlarda; farklı kalınlıklarda, farklı ön kısma gelen seramikler ve arka kısma gelen metallerle, farklı mermi boyutlarında çalışmalar yapmışlardır [36].

Børvik ve arkadaşları, askeri ve sivil olarak balistik koruma sistemlerinde sıklıkla kullanılan beş farklı yüksek mukavemete sahip çelik plakayı EN1063 standardına uygun olarak iki farklı mermi çeşidinde 830 m/s çarpma hızlarında incelemişlerdir. Johnson-Cook modeli ve Cockcroft kırılma kriterleri tüm çeliklerde uygulanmış, merminin malzeme özellikleri literatürden alınmıştır [37].

Chi ve arkadaşları, seramik/metal zırh malzemelerinin balistik özelliklerini yarı-analitik çözüm metoduyla incelemişlerdir. 20 mm zırh delici mermiyle Ansys-Autodyn' de analizlerini gerçekleştirerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmalar yapmışlardır. Yarı-analitik modelin merminin ilk darbe sonrası kalıntı hızına, çarpma hızına ve zırhın balistik olarak çarpma hız limitlerine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaptıkları

Çalışmaların literatürde var olan deneysel sonuçlara göre makul derecede benzer olduklarını görmüşlerdir [38].

Serjouei ve arkadaşları, seramik/metal zırhların balistik dayanımlarını arttırmak amacıyla araştırma yapıp nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Tasarladıkları deney düzeneğinde konik tip uzun çubuk mermi kullanarak balistik olarak malzemeye etkiyen gerilme değerlerini ölçmüşlerdir. alışmalarını Ansys-Autodyn programında sonlu elemanlar metoduyla modelleyerek, gerilmeleri, delinme miktarlarını farklı plaka kalınlıklarında deneysel çalışmalarıyla karşılaştırmışlardır [39].

Gamble ve arkadaşları, katmanlı elik-alümina seramik malzemelerin yüksek hız darbe özellikleri üzerine çalışmışlardır. Seramik malzemenin balistik koruyuculuğunun sadece sertliğine bağlı olmadığını aynı zamanda mermi parçalandıktan sonra koruyucu malzemedeki akışına da bağlı olduğuna istinaden deneysel olarak alümina seramik ve iki kat elik balistik koruyucu malzemeyi küresel mermiyle tahrip ederek deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla DE tarafından geliştirilen ufanmanın ardından dilatasyonel yumuşama modelini kullanarak deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarda granüler akışın önemini gözlemlemişlerdir [40].

Serjouei ve arkadaşları, çift katmanlı seramik/metal balistik zırhlar üzerine ampirik model çalışmaları yapmışlardır. Çarpma işleminde bu malzemelerin balistik hız limitlerini, momentum ve enerji dengelerini belirlemeyi planlamışlardır. Farklı seramik ön katmanlarda, farklı mermi uzunluklarında çalışmalarını yapmışlardır. alışmalarını literatürde var olan çalışmalarla; seramik kalınlıklarına bağlı mermi hız limitlerini karşılaştırmışlardır [36].

Holland ve arkadaşları, seramik-metal çift katmanlı ve üç katmanlı kompozit tabakaları sonlu elemanlar metoduyla modelleyerek, 1000 m/s hızında elik bilye çarpıtılarak malzemelerin davranışlarını incelemişlerdir. alışmalarının sonunda, zırhın merminin enerjisini absorbe etmesinden ziyade, zırhın merminin enerjisini dağıtmasına öncelik verilerek tasarlanması ortaya ıkmiştir [41].

Mohagheghian ve arkadaşları, son yıllardaki araştırmalarda polimer-metal katmanlı tabakaların balistik olarak sadece metal levhalardan daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna istinaden polimer-metal katmanlı zırhları farklı katmanlarda ve üzerinde üç farklı mermi geometrisiyle balistik denemeler yaparak literatürde var olan sonuçlarla karşılaştırmışlardır [42].

Guo ve arkadaşları, seramik/UHMWPE kompozitlerinin, balistik özelliklerini ve dinamik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Hazırlamış oldukları düzenele 12,7 mm çapında mermileri değişik kalınlıktaki kompozitler üzerine atış yaparak denemişler ve sonlu elemanlar yöntemiyle Ansys Ls-Dyna programında modellemişlerdir. Deneysel ve analiz sonuçlarının yakın çıkmasına rağmen bu konuda yeni tasarım ve araştırmalar yapılmasını tavsiye etmişlerdir [43].

Feli ve Asgari, seramik/kompozit malzemelerin balistik davranışlarını yeni bir sonlu elemanlar analiziyle Ansys Ls-Dyna programında incelemişler ve literatürde var olan diğer modellerle karşılaştırma yapmışlardır. Değişik mermi giriş hızlarında balistik analizlerini gerçekleştirmiş, delme hızlarını 1000 m/s – 1600 m/s arasında, literatürde olan Chocron-Galvez nümerik [44] ve Feli ve arkadaşlarının [38,44] yaptığı analitik modellerine yakın değerler bulmuşlardır [46].

Rahbek ve arkadaşları, balistik koruyucu yeleklerde kullanılan seramiklerin, kompozit kaplı ve kaplı olmadan mermi hasarının nasıl geliştiğini incelemişlerdir. Deneysel ve sonlu elemanlar simülasyonlarını gerçekleştirip modelleri karşılaştırmışlardır. Beklenin aksine kompozit kaplı olan modellerde, kaplı olmayanlara nazaran daha fazla hasar gözlemlemişlerdir. Simülasyonlarla çatlama modellerini ve seramik plakalardaki hasarın gelişimini izlemişler ve kompozit kaplamanın mermi hasarını seramik üzerinde kırılma çatlaklarını arttırdığı belirlemişlerdir [47].

Borvik ve arkadaşları, weldox 460E çelik plakaların balistik penetrasyonunu araştırmışlardır. Araştırmalarında yüksek hızlı dijital kamera kullanıp, sonlu elemanlar metoduyla Ansys Ls-Dyna programında analizlerini gerçekleştirip % 10 sapma değerleriyle sonuçları karşılaştırmışlardır [48].

Liu ve arkadaşları, seramik malzemenin arkasına UHMWPE ve Ti6Al4V malzemelerini değişik katman sayısı ve kalınlıklarda yerleştirerek yaklaşık 818 m/s mermi giriş hızlarında deneysel ve nümerik olarak analizlerini yapmışlardır. En az mermi hasarının üç katman olan Ti6Al4V 3 mm / UHMWPE 5 mm / Ti6Al4V 2 mm olan kompozit malzemede olduğunu gözlemlemişlerdir [49].

Iqbal ve arkadaşları, kurşun şeklini ve kurşunun tahrip edilecek numuneye giriş açısını değişik olasılıklarda sonlu elemanlar metoduyla modelleyerek, ABAQUS programında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 12 mm kalın çelik hedefe, 20 mm çelik kurşun, 6 farklı mermi ucu açısı ve 5 farklı giriş açısıyla oluşan hasarı incelemişlerdir. Mermi ucundaki açının değişimine bağlı darbenin yol açtığı hasar tartışılmış, literatürde var olan diğer nümerik ve analitik model sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır [35].

Lim ve arkadaşları, kumaş elyafın sonlu elemanlar metoduyla modellemesini yaparak, balistik etkinin kumaşa non-lineer etkisini araştırarak analiz etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları deneysel ve nümerik sonuçlarla karşılaştırmışlardır [50].

Tan ve Ching, dokuma polimerik kumaşın balistik özelliklerini 3 boyutlu vizkoelastik malzeme modelini çıkararak balistik özelliklerini incelemişlerdir. Mermi olarak bilye kullanarak 110 m/s ve 400 m/s hızlarında analizlerini ve deneysel sonuçlarını kıyaslamışlardır. Dokuma aramid lifleri içeren sayısal modelle, deneylerin uyumlu sonuçlar verdiğini görmüşlerdir [51].

Zhikharev ve Sapozhnikov, iki farklı kalınlıkta cam elyaf/epoksi matris kompozit malzeme üzerinde farklı mermi hızlarında balistik testler yapıp, nümerik olarak

modellemişlerdir. Continuum-based (CBM) ve Microstructural (MSM) olarak modelledikleri çalışmaları Ansys Ls-Dyna ve Autodyn-3D programlarında analiz etmişlerdir. MSM modelinde, deneysel sonuçlara yakın değerler bulunmuştur. Delaminasyon bölgesi modelin öngördüğü şekilde görülmüştür. Bunun yanı sıra CBM modelde fazla veri olmamasından dolayı, bilgisayarla hızlı ve yakın sonuçlar almanın mümkün olduğu kanısına varılmıştır [52].

Barauskas ve Abraitene, çok katmanlı para aramid kumaşların, sonlu elemanlar yöntemiyle Ansys Ls-Dyna programında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve nümerik çalışmaları karşılaştırmışlardır [53].

Ha-Minh ve arkadaşları, dört katmanlı (3 boyutlu dokuma) para aramid kumaşın balistik davranışlarını, deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Deformasyon oranını liflerin mekanik özelliklerini statik ve dinamik nümerik olarak modelleyerek araştırmışlardır. Numuneler incelediğinde dinamik olarak modellemenin statığe nazaran daha iyi sonuçlara ulaştığını gözlemlemişlerdir [54].

Kim ve arkadaşları, amorf zirkonyum alaşım (LM1 alaşım) takviyeli kompozit tabaka elyafların balistik özelliklerini incelemişlerdir. Sert olan LM1 alaşımlarının yüksek hız darbe altında çatlaklar oluşturarak balistik darbeyi emdiğini görmüşlerdir [55].

Cuong ve arkadaşları, balistik darbe altında kompozitlerin hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Nümerik model kullanılarak 90 m/s ve 900 m/s mermi hızlarında sonuçları değerlendirmişlerdir. Küresel mermi kullanarak mezoskopik ve makroskopik olarak değişik oranlarda modelledikleri çalışmaları 60 m/s ve 245 m/s mermi hızlarında analiz ederek sonlu elemanlar metoduyla optimum hesaplama süresine indirgemeye çalışmışlardır [56].

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

Tez çalışmasında seramik ön yüzlü çelik zırhlarda istenmeyen bir problem olarak karşılaşılan ilk mermi darbesine maruz altıgen seramiğin çarpışma anında hasara uğrayıp kırılması ile çevresinde bulunan diğer altıgen seramiklere verdiği zararın en aza indirilmesi için yeni bir zırh tasarımının yapılması amaçlanmıştır.

Zırh tasarımında mermi darbesi sonrası çevre seramiklerin kırılmaya karşı dayanıklılıklarının yanında zırhın hafif olmasına da dikkat edilmiştir. Bu amacın sağlanabilmesi için yüksek mukavemetli aynı zamanda hafif malzeme özellikleri gösteren kompozit malzemeden yararlanılmıştır. Çarpışma sonrası çevre seramiklerin kırılarak hasara uğramasını en aza indirmek adına doğada bulunan hayvanların zırh sistemini andıran deri yapıları da dikkate alınarak seramiklerin çevresi kompozit malzeme ile sarılmıştır. Böylelikle mermi darbesi sonrası seramiklerin birbirleri ile doğrudan temasının engellenmesi ve zırh sistemine daha esnek bir yapı kazandırılması hedeflenmiştir. Kompozit malzemelerde asıl yükü taşıyan elyaf yapı için diğer elyaflara göre en büyük çekme dayanımına ve elastisite modülüne sahip, yüksek sıcaklıklara dayanabilen karbon elyafı, tercih edilmiştir. Matris malzemesi olarak da yüksek mekanik ve ısı özellikleri sebebi ile epoksi malzemesi seçilmiştir.

Mermi darbesi sonrası kompozit sargının, zırh sisteminin balistik performansına etkisi *Ansys Explicit/Dynamic* sonlu eleman programında 7,62 mm kalibreli mermiler ile yapılan atış analizleri yardımıyla incelenmiştir. Analizlerde arka plakada yer alan çelik malzeme modeli için yüksek hızlarda plastik deformasyona izin veren *Johnson-Cook* modeli [56,57], seramik malzeme modeli olarak *Johnson-Holmquist* modeli [58,59] ve kompozit malzeme modeli için orthotropik-elastik malzeme modeli kullanılmıştır.

Yapılan analiz sonuçlarından elde edilen tasarım parametreleri ışığında kompozit sargılı seramik ön yüzlü çelik zırhların üretimi gerçekleştirilmiştir. Zırh sisteminin üretiminde seramik ön yüzey olarak alümina seramik malzeme kullanılmıştır. Tez çalışmasının kompozit sargının mermi darbesi sonucu çevre seramiklerde oluşan hasara etkisinin incelenmesi aşamasında arka plaka için hardox çeliği seçilmiş, kompozit sargılı seramiklerin arka plakada oluşan plastik deformasyona etkisinin

incelenmesi aşamasında ise arka plaka için hardox çeliğine nazaran daha yumuşak bir çelik olan S235 çeliği tercih edilmiştir. Daha sonra üretimi gerçekleştirilen zırh sistemine ait balistik atış deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve deneyler sonucu elde edilen bulgular karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.



2. TEORİK ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

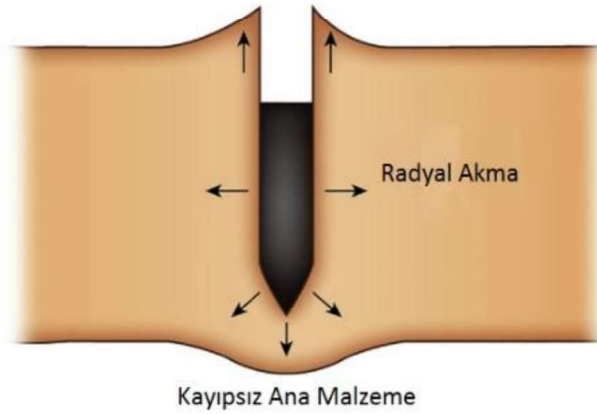
Bu kısımda balistik hasar mekanizmaları ve malzeme modelleri tanıtılmıştır. Devam eden kısımda modelin analitik çözümü ve sonlu elemanlar analiziyle ilgili tespitler yapılmıştır.

2.2. Balistik Hasar Mekanizmaları

Mermilerin zırha verdiği hasar çeşitlerinin anlaşılması balistik anlamda önemli bir yere sahiptir. Merminin enerjisinin ne kadarını sönümlediğini tespit edebilmek ve mermiyi ne kadar hasara uğrattığını belirlemek açısından önemlidir. Bu sebeple mermilerin zırh üzerinde oluşturduğu hasar mekanizmaları altı başlıkta incelenebilir.

2.2.1. Sünek Malzeme Delik Oluşumu

Monolitik (tek parça, homojen, katı) yapıda olan zırhın, merminin sahip olduğu kinetik enerjiyi verimli bir şekilde absorbe edebildiği yöntem olarak kabul edilir. Zırh üzerinde malzeme kaybı yaşanmaz. Düşük karbonlu sünek çeliklerde, alüminyumlarda ve titanyum alaşımlarında merminin girdiği yerden dışarı doğru, mermi çapına bağlı radyal olarak Şekil 2.1.' de görüldüğü üzere burun oluşumu meydana gelir.

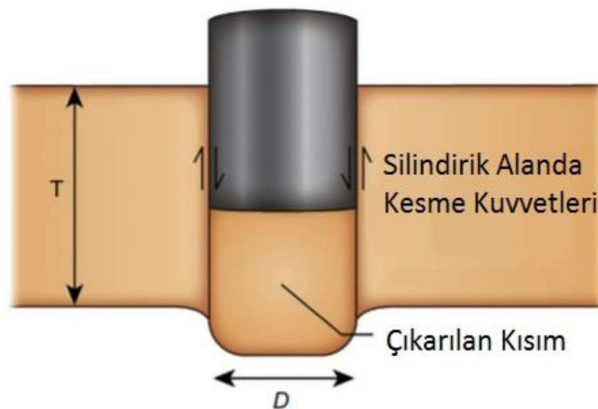


Şekil 2.1. Sünek malzemenin merminin kinetik enerjisini absorbe etmesi [61]

Kırık yapraklar şeklinde dışarıya doğru oluşan bu kısmın sebebi, mermi tarafından hızla ve fazla miktarda itilen malzemenin arka ve yan kısımlardan gelen tepkisinin mermi çerçevesinde dışarı doğru oluşmasıdır. Merminin dış çerçevesini tutan malzemede meydana gelen tüm bu etki malzemenin plastik akışıyla ilgilidir. Malzemenin sunduğu direncin çoğu, bundan kaynaklı plastik akma karakteristiğiyle özdeşleştirilir. Akışın büyük bir kısmı radyal olacağından direnç miktarı malzemenin düzlem içi basınç dayanımına, mukavemetine bağlı olacaktır. Sıcaklığa bağlı olarak çelik çerçesinde renklerin değişimi gözlenmesine rağmen en fazla enerji emilimi plastik deformasyon sayesinde olur. Sünek malzemede delik oluşumu esnasında penetrasyon direnci maksimum olurken, zırhın arka kısmındaki etki minimize olur. Penetrasyon veya delinme işlemi esnasında herhangi bir aşamada malzeme kaybı yaşanmaz.

2.2.2. Tıkama Şeklinde Hasar Oluşumu

Bu hasar mekanizması, izotropik yapıdaki zırhlarda veya zırh elemanlarında; ön kısmı düz mermilerle ve düşük enerji emilimi olan malzemelerle ilişkilendirilen türdür. Kör yani ön kısmı düz bir mermi hedefi vurduğu anda önünde kalan malzeme hareketlenir ve hızlanırken hedefin geri kalanı nispeten sabit durur. Bu merminin önündeki malzemenin lokal olarak sıkışmasına sebep olur. Burada dar bir kayma bölgesinde, adyabatik şartlar altında lokal olarak çok yüksek kayma gerilmelerine, yüksek şekil değiştirme hızlarına ve yüksek sıcaklıklara sebep olur.



Şekil 2.2. Malzemede oluşan tıpa şeklinde çıkma hasarı [61]

Hasar oluşumu malzemenin enine kayma özellikleri tarafından kontrol edilen bir mekanizmadır. Şekil 2.2.' de görüldüğü üzere kör mermi çarptığı anda hedefte enine kesilme meydana gelir. Kayma kesilmesi bölgesel olduğu için çok az plastik deformasyon meydana gelir. Bu hasar mekanizmasının en iyi bilinen geometrik ilişki özelliği; merminin kalibresi (çapı) ve malzeme kalınlığı oranı 1:1' e yakınsa oluşma ihtimali yüksektir. Örnek verilecek olursa 7,62 mm mermi için 5-8 mm aralığındaki ince çeliklerde bu hasarın meydana gelmesi olasıdır [61]. Bu hasar oluşumu delik oluşumundakine kıyasla çok daha az kinetik enerji sönümler, bunun yanı sıra ikinci mermi çok tehlikelidir çünkü hali hazırda burada merminin geçeceği bir yol açılmıştır. Tasarımcılar bunun önüne geçmek için tabakalı çelik veya kompozit plakalarla tasarımlar yaparak önlemler almışlardır.

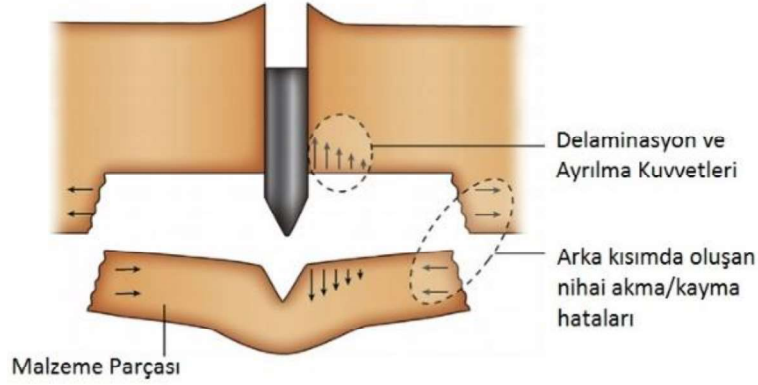
2.2.3.Tabaka Ayrılma

İzotropik ve katmanlı zırh malzemelerinde oldukça görülen merminin yüksek hızda çarpması sonucu arka yüzün ayrılması şeklinde meydana gelen durumdur. Hafif alaşımlı malzemelerde olağan olan bu durumun meydana gelmesi balistik direnç limitini önemli miktarda azaltmaktadır. Bir miktar delaminasyon öncül olarak bu hata mekanizmasında görülür. Mekanik kırılma kaynaklı oluşur ve penetrasyonun geç olmasına ve şok dalgasının etkileşimine neden olmaz. Klasik dağılma, ayrılmayla karıştırılmamalıdır. Üç aşama şeklinde izah edilmesi gerekirse; ilk aşamada yoğun eğme momentlerinin oluşması ve katmanlar arası kayma kaynaklı çatlaklarının başlaması, ikinci aşama delaminasyon çatlaklarının ayrılma düzleminde hızla yayılması ve üçüncü ve son aşama olarak da disk şeklinde malzemeden ayrılma şeklinde oluşur (Şekil 2.3.).

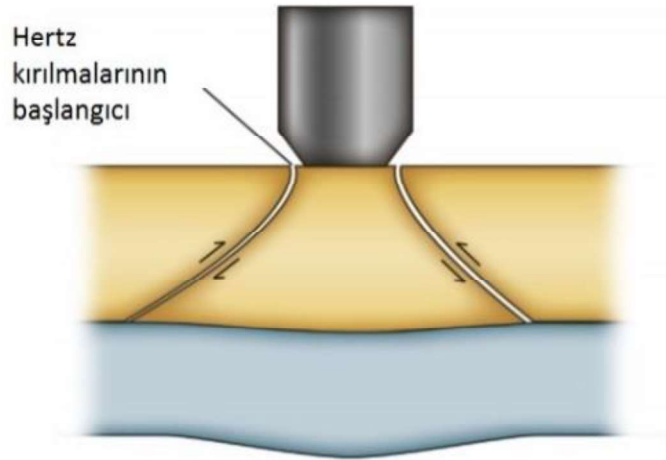
2.2.4.Konik Kırılma

Bu tip kırılma; camlarda, seramiklerde, yüksek sertlikteki çeliklerde ve polikarbonat gibi sert polimer malzemelerde görülmektedir. 1881 yılında Hertz tarafından tanımlanan mekanizma, kırılğan malzemenin kör veya körlenmiş mermiyle karşılaşması sonucu yüzeydeki ilk kusurun gerilmeyle lokal olarak etkilenmesi ve ardından merminin momentumuyla ilerlemesi, malzeme boyunca aşağı doğru yayılması ve Şekil 2.4.' te görüldüğü üzere ana malzemeden komple konik bir parçayı ayırmasına dayanır. Konik

kırılma, kırılğan malzemelerde balistik başarıyı önemli ölçüde aksaklığa uğratan, etkinliğini azaltan bir hasar mekanizmasıdır. Yapılan çalışmalarda koniklik açısı, çarpma hızı ve poisson oranının etkisi araştırılmıştır [61–63].



Şekil 2.3. Tabaka ayrılmanın gösterimi [61]

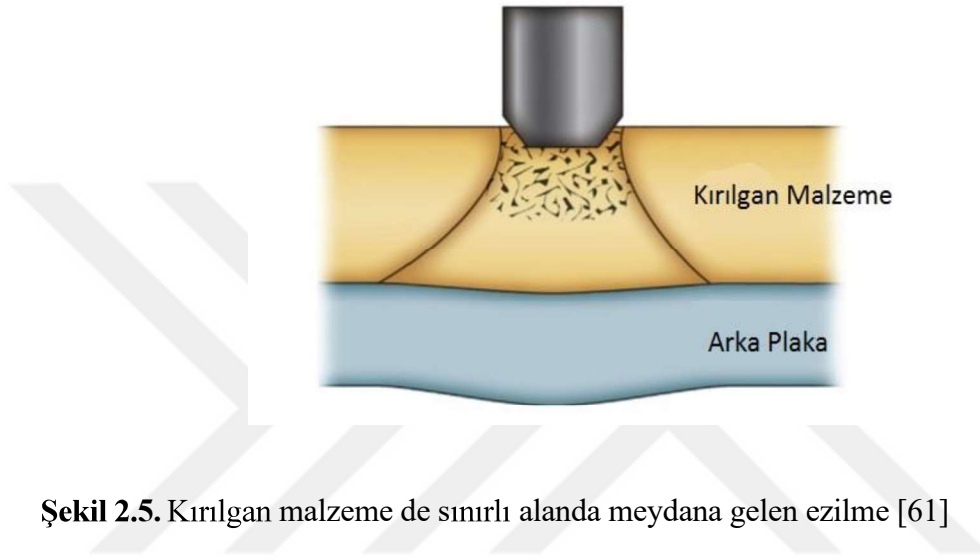


Şekil 2.4. Konik kırılmanın gerçekleşmesi [61]

2.2.5.Parçalanma

Parçalanma tabiri; katı malzemenin ortalama parça boyutunun ezilme, kesilme, titreşim veya buna benzer proseslerle daha ufak parça boyutuna indirgenmesi anlamına gelmektedir. Terminal balistik içinde incelenen parçalanma; kırılğan malzemelerde,

camlarda, seramiklerde ve konsantre aglomeralar da görülmektedir. Şekil 2.5.' te görüldüğü üzere etkilenen bölge mermi önüne gelse de parçalanma konik kırılmanın içinde kalır. Normalde hiper hızlarda uzun silindirik çubuğun malzeme üzerindeki hasarı olarak sıklıkla görülse de yüksek hızlarda ufak mermilerin açtığı hasar olarak da görülebilmektedir. Şekil 2.5.' de görüldüğü üzere hasar mekanizmasının incelenmesi ve farklı balistik koruma sistemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır [64,65].

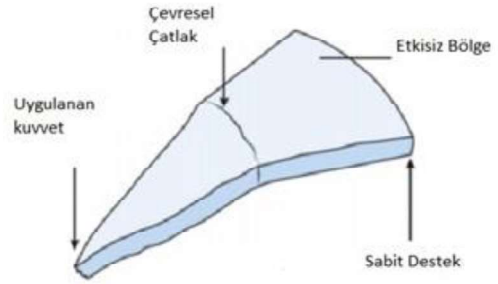
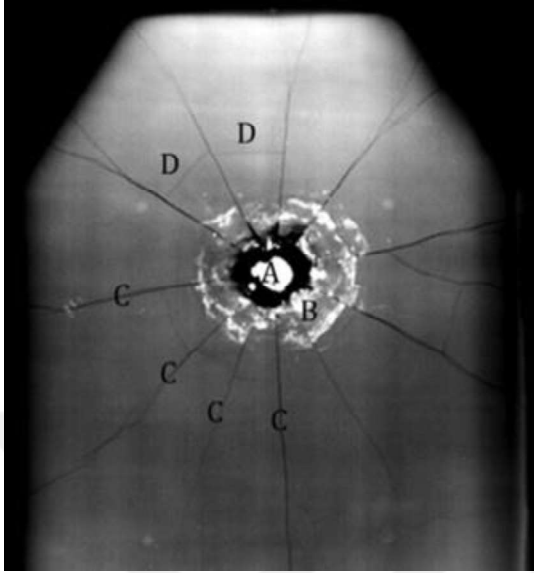


Şekil 2.5. Kırılgen malzeme de sınırlı alanda meydana gelen ezilme [61]

2.2.6.Çevresel Çatlaklar

Bu ikincil olarak meydana gelen çatlama şekli daima radyal çatlakların gelişimi izlemekte ve sert ön yüzlü zırh sistemlerinde oluşan eğilme tepkisini gösteren hasar türüdür. Şekil 2.6.' da görüldüğü üzere çoğunlukla etkinin çevresinde eş merkezli daireler oluşturarak yayılır. Radyal çatlaklar oluştuktan sonra meydana geldiği görülür ve bu nedenle merkezinden bağımsızdırlar. Bunun ortak bir sebebi olarak da hedefin lokal olarak tahrip etmesi ve arka destek plakasının tepkisi düşünülmelidir. Unutulmaması gereken bir ayrıntı sert ön yüzlü zırhların arka kısmında destek plakasının bulunmasıdır. Şekil 2.7.' de görüldüğü üzere standart bir darbeye mermi arka destek plakası tarafından tutulur ve ani olarak plaka tarafından ön zırha geri itilir. Bu her bir parçada radyal eksen boyunca eğilme momenti oluşturur. Çevresel çatlaklar çok katmanlı zırh sistemlerinde, kırılgen olan ön tabaka ne kadar iyi desteklenebilirse o kadar azaltılabilir. Çevresel çatlakların sayısını, özellikle radyal çatlakların sayısını,

azaltmak çok önemlidir çünkü bu balistik performansı iyileştirmede ve ikincil darbelerde daha etkin olmasını sağlamaktadır [67].

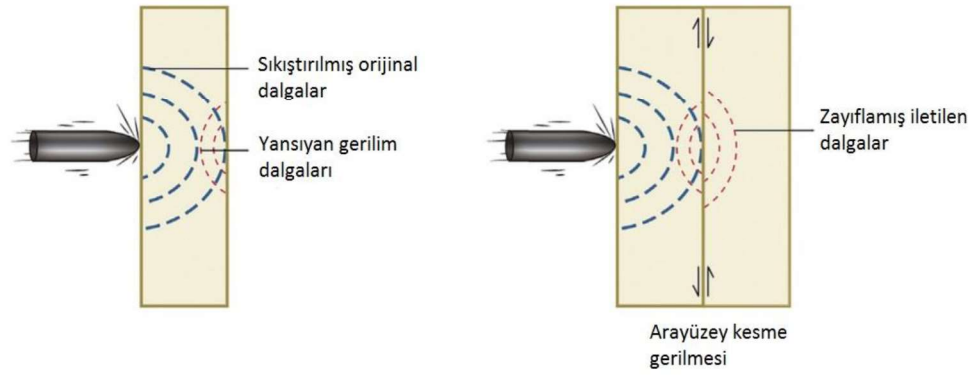


Şekil 2.6. Seramik malzemeye uygulanan mermi atışının x-ray görüntüsü a) Merminin geçtiği bölge, b) Konoid kırılma bölgesi, c) Radyal çatlaklar, d) Çevresel çatlaklar [61]

2.3. Terminal Balistik

Terminal balistik mermi ve hedefi arasındaki etkileşimi inceleyen balistiğin bir alt koludur. Terminal balistik binalarda, tanklarda, zırhlarda vb. meydana gelen tüm darbe etkilerini, kinetik enerji dönüşümlerini, kimyasal enerji dönüşümlerini, patlayıcı etkisini araştıran bilim alanıdır. Şekil 2.7.' de görüldüğü üzere, mermi hedefe çarptığı anda parçada stres dalgaları meydana gelir. Bunlar seviyelerine bağlı olarak elastik, plastik veya sadece dalga şeklinde olabilir.

Malzemelerin gösterdiği önemli bir özellik birim şekil değiştirme hızına bağlı olan hassasiyetidir. Malzemeler şekil değiştirme hızına bağlı olarak farklı davranışlar gösterirler. Düşük veya orta hızlarda yüklemelere maruz malzemelerde; malzeme sürünme, elastik, elastik-plastik şekillerinde davranış gösterebilirler.



Şekil 2.7. a) Stres dalgalarının yayılması b) Herhangi bir ara yüzeyde meydana gelen makaslama etkisi [61]

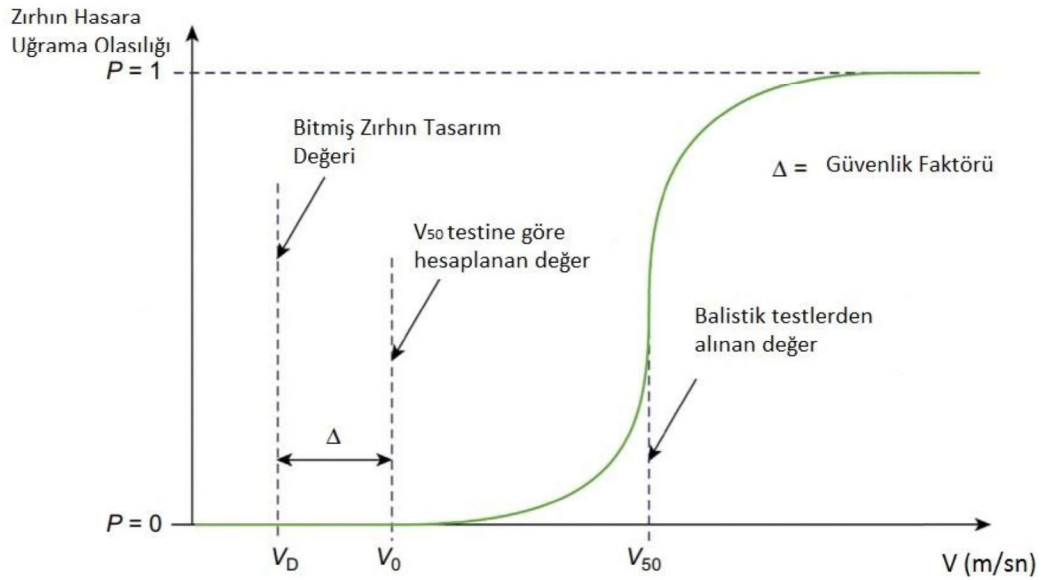
Balistik yüklemelerde yani yüksek hıza sahip darbe yüklerinde, birbirine kitlenerek veya sabit kalarak direnç gösterebilirler. Çizelge 2.1., bu ayrımın net olarak hangi aşamalarda yapıldığını göstermektedir [61].

Çizelge 2.1. Şekil değiştirme hızına bağlı malzeme tepkisi

Şekil Değiştirme Oranı (s^{-1})	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-4} - 10^{-2}$	10^0	$10^2 - 10^4$	$10^5 - 10^6$
Karakteristik Zaman (s)	$10^6 - 10^4$	$10^2 - 10^0$	10^{-2}	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-8}$
Test Çeşidi	Sürünme	Yarı-statik		Düşük Hız Darbe	Yüksek Hız Darbe
Malzemenin Tepkisi			Mekanik Rezonans	Elastik-plastik dalga yayılması	Şok dalgalarının yayılması

Şekil 2.8.' de zırhın delinme olasılığının mermi çarpma hızına bağlı olan grafiğidir. Grafikte yer alan V_{50} önemli bir noktadır, çünkü bu çarpma hızında yapılan deneylerde zırhlarda % 50 oranında delinmeye rastlanmıştır anlamı çıkmaktadır. V_0 çarpma hızında ise yapılan deneylerde, analizlerde zırhta herhangi bir delinme görülmez dolayısıyla güvenli bölgedir. Bunun yanı sıra mühendisler güvenliği garanti edebilmek için bununda altına inerler, güvenlik faktörünü (Δ) ekleyip, V_D hızını tehdit olarak alıp, tasarımlarını ona göre yaparlar. P değeri zırhın hasara uğrama olasılığını göstermektedir. Örnek

verecek olursak; $P=1$ iken, mutlak hasar durumudur. Mermi hızını belirlerken en kötü senaryo olan merminin dik bir şekilde zırha etki etmesi planlanır ve testler buna göre yapılır. Bunun yanı sıra gerçek koşullarda elbette mermi açılı gelebilir veya kullanılan zırh mermiye karşı açılı durabilir. Bunun negatif anlamda bir olumsuzluğu bulunmamaktadır.



Şekil 2.8. Mermi çarpma hızına bağlı, delinme ihtimalinin şematik gösterimi [61]

2.4. Zırh Sistemine Ait Malzemelerin Mekanik Davranışları

Zırh sisteminin sayısal analizlerinde çelik malzeme modeli olarak yüksek hızlarda plastik deformasyona izin veren Johnson-Cook malzeme modeli ve seramik malzeme modeli olarak da Johnson-Holmquist malzeme modeli kullanılmıştır. Bu bölümde, bahsi geçen malzeme modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Johnson-Cook malzeme modeli plastik şekil değişimi özelliği gösteren metal malzemelerin yüksek hızlarda ve sıcaklıklardaki malzeme davranışlarını modellemek ve tahmin etmek için kullanılmaktadır [68]. JC modelinin ampirik olarak elde edilmiş formülü incelendiğinde birim şekil değiştirme, birim şekil değiştirme hızı ve farklı sıcaklıklardaki dayanım parametrelerini içinde barındırdığı görülmektedir [58]. Ayrıca model sonlu eleman analizlerinde yüksek hızlardaki plastik şekil değişimine izin vermekte ve malzemedeki kırılma hasarının simülasyonuna izin vermektedir [57].

Bu model ortaya çıktığından beri deneysel çalışmalarla başarılı olarak örtüştüğü gözlemlenmiştir. JC modeli eşitliğinde kullanılan sabitler genel alanlarda açık olarak paylaşılacakla beraber savunma sanayi her ülke, her kuruluş için özel olduğundan çok fazla paylaşılmamaktadır. Her kurum kendi bilgi havuzunda biriktirdiği bilgiler, tecrübeler ve deneysel sonuçlarla malzeme modellerinde daha fazla iyileştirme yaparak, deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde etmektedir. Malzeme deformasyonunu gerçeğe yakın olarak belirlemek ilk başta önemsiz görülebilir fakat bu sayede dışarıdan gelecek tehditleri (mermi geometrisi, hızı, patlama vb.) gerçek değil bilgisayar ortamında simüle etmek ciddi zaman ve maliyet kazanmak demektir. Ayrıca kullanılacak parçayı üretip, deneyip, revize etmek yerine farklı malzeme ve geometrilerde tasarımsal olarak bilgisayar ortamında modelleyip balistik olarak incelemekte zaman ve maliyet tasarrufu aynı zamanda da farklı fikirlerin kolayca kontrol edilebilir olmasını sağlamaktadır.

JC malzeme modeli literatür incelendiğinde metallerin yüksek deformasyon hızlarında deforme edilerek modellenmesi için uygundur. Parça işlemede torna, freze vb. alanlarda da kullanılmaktadır. JC modelinin tanımı aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$\sigma^0 = (A + B(\varepsilon^p)^n) \left(1 + C \log \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) (1 - \hat{T}^m) \quad (2.1)$$

$$\hat{T} = 0 \quad T < T_r \quad (2.2)$$

$$\hat{T} = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad T_r \leq T \leq T_m \quad (2.3)$$

$$\hat{T} = 1 \quad T > T_m \quad (2.4)$$

ε^p efektif plastik gerinimi, $\dot{\varepsilon}^p/\dot{\varepsilon}_0$ boyutsuzlaştırılmış plastik gerinim oranını, $\hat{T}^m$ normalize edilmiş sıcaklığı, T deney yapılan sıcaklığı, T_m erime sıcaklığını, T_r referans sıcaklığını göstermektedir. A referans sıcaklık altında ölçülmüş akma gerilmesini ifade etmektedir. B ve C deneyler sonucu elde edilen malzeme sabitleri olup grafiklerden bulunur. JC malzeme modeline ait 2.1 denkleminde, 1. parantez arası ifade $\dot{\varepsilon}^p/\dot{\varepsilon}_0 = 0$

ve $\hat{T}^m = 0$ in bir fonksiyonu olarak gerilmeyi ifade eder. 2. parantez arası bölüm birim şekil değiştirme hızı oranının etkisini, 3. parantez arası bölüm ise termal yumuşamanın etkisini göstermektedir. JC malzeme modelinde sırasıyla pekleşmeyi, birim şekil değiştirme hızına bağlı pekleşmeyi ve sıcaklığı ifade eden her bir parantez arası bölüm, birbiri ile çarpılarak, malzemeye ait akma gerilmesinin efektif plastik gerinim, plastik gerinim hızı ve sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak elde edilmesine imkân sağlar. Formülün amacı gerinim sertleşmesi, gerinim sertleşmesi oranları ve sıcaklık bağımsız değişkenler olarak tanımlanıp birbirlerinden türetilip efektif olarak plastik şekil değiştirme, şekil değiştirme oranı ve sıcaklığı bulabilmektir. Bir çok farklı etkinin izolasyonuna izin verdiği için bu temel modeli düzenlemek kolaydır. Katsayıları kalibre ederek gerçek sonuçlara ulaşmak, çeşitli etkileri izole edebildiği için kolaydır. Bu sebeplerden balistik alanlarda kullanımı yaygındır [68].

Formül hazırlanırken genel ampirik formüllerde bilindiği üzere temel amaç verileri toplayarak grafik şeklinde uygun bir biçimde ayrı ayrı gösterebilmektir. A, B, C, n ve m sabit katsayıları çeşitli, özel şartlar altında yapılan deneylerden alınan sonuçların uygun şekilde değerlendirilmesiyle alınan verilerdir.

JC formülünün 3. kısmında yer alan T_m ifadesindeki m'yi elde etmek için ilk önce denklem 2.5' te görülen "R", gerilme ve şekil değiştirmenin farklı sıcaklıklardaki oranı bulunur. Bulunan "R" logaritmik olarak oranlanır ve m katsayısı bulunur. 2.1 numaralı denklemin 3. kısmı diye ifade edilen termal yumuşa durumu ihmal edilir çünkü oda sıcaklığında yer alan numunede termoplastik bir etki meydana gelmez, bu sebeple 3. kısım 1 olarak alınır [69]. R ve m' nin hesaplanması aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$R = \frac{\sigma_0^{(1)}(\varepsilon_*^p, \dot{\varepsilon}_*^p)}{\sigma_0^{(2)}(\varepsilon_*^p, \dot{\varepsilon}_*^p)} = \frac{1 - (\hat{T}^{(1)})^m}{1 - (\hat{T}^{(2)})^m} \quad (2. 5)$$

$$m = \frac{\log (1-R)}{\log (\hat{T}^{(1)})} \quad (2. 6)$$

Uygulanan yer değiştirme “d” ve bileşke kuvvet “P” olarak gösterilirse 2.7 ve 2.8 numaralı eşitlik elde edilir. 2.7 ve 2.8 numaralı eşitlikler oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta yapılan deneysel sonuçlardan alınan verilerle “σ- ε_p” grafiği oluşturulur. 2.5 numaralı eşitlikteki “R” oranı, “ε_p” ‘nin geniş bir aralığında tespit edilir ve son olarak 2.6 numaralı denklemde ki “m” belirlenir. Gerilme ve birim şekil değişimi aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$\hat{\sigma} = k_1(1 - k_2\hat{\epsilon}) \frac{P}{Dt} \quad (2.7)$$

$$\hat{\epsilon} = k_3 \frac{d-d_y}{h} \quad (2.8)$$

Dinamik gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde C birim şekil değiştirme oranı etkisine karşılık gelen semboldür. Deneysel yüklemeye bağlı yer değiştirme eğrisi 2.5 ve 2.6 numaralı denklemler yardımıyla indirgenmelidir. Daha önce belirlenen veriler yardımıyla 2.1. numaralı eşitliğe uyum sağlayan tek bilinmeyen olarak kalır ve sabit elde edilir.

Tez alışması kapsamında kompozit sargının mermi darbesi sonucu evre seramiklerde oluşan hasara etkisinin incelenmesi aşamasında arka plaka için hardox çeliği seçilmiş, kompozit sargılı seramiklerin arka plakada oluşan plastik deformasyona etkisinin incelenmesi aşamasında ise arka plaka için hardox çeliğine nazaran daha sünek bir elik olan S235 eliği tercih edilmiştir. Hardox ve S235 elikleri için JC malzeme modeline ait parametreler izelge 2.2.’ de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Analizde kullanılan malzeme modellerine ait JC parametre değerleri [36,69]

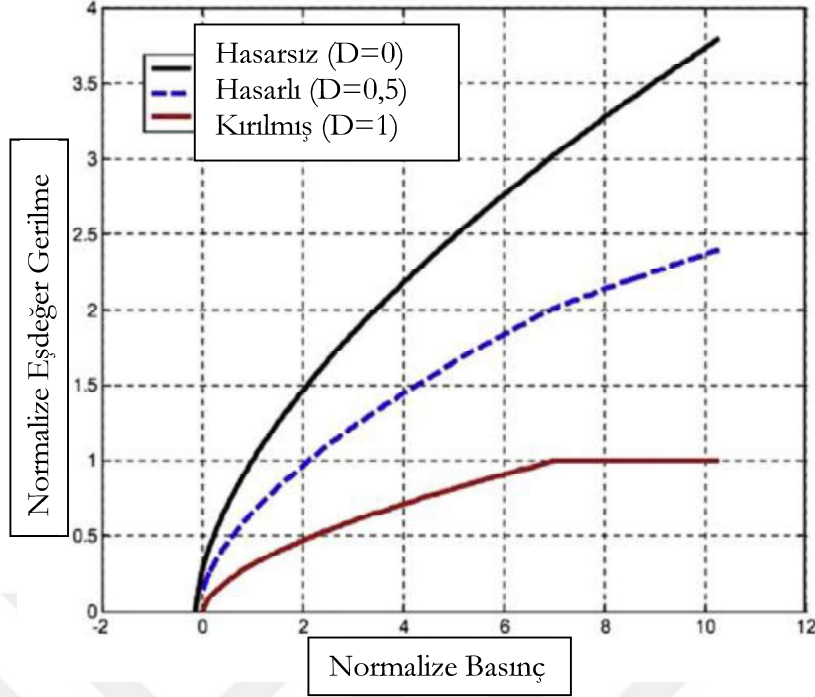
Malzeme	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
Hardox	1350	362	1	0,0108	1
S235	280	667	0,72	0,071	0,269
Kurşun	24	50	1	0,1	1

2.4.1.Johnson-Holmquist Malzeme Modeli

Seramik malzemeler kristal veya amorf yapıda olmakla beraber, iyonik veya kovalent bağlarla birbirlerine bağlanırlar. Sıcak preslemede sinterleme yapılarak birbirine tutunan malzemeler plastik deformasyon oluşmadan kırılma eğilimindedir, bu da zayıf bir tokluk demektir. Çünkü bu malzemelerde üretimden kaynaklı boşluklu olma eğilimi yüksektir. Bu boşluklardan oluşan kusurlarda özellikle çekme yükü altında gerilme yoğunlaşmaları meydana gelir ve bu da malzemenin çekme yükü altında dayanımını ve darbelere karşı olan direncini yani tokluğunu düşürür. Malzemeye kuvvet uygulanınca kırılmalığından ötürü kırılma olur. Kimyasal bağlarla bağlı olan metallerde ise metalik bağlardan ötürü hasara uğrarken sünek bir kırılma meydana gelir [71].

Seramik malzemelerin efektif olarak balistik koruma sağlaması için yüksek sertlik, yüksek kırılma direnci, yüksek elastisite modülü ve düşük yoğunluk gibi özellikleri taşınması beklenir. Balistik uygulamalar için çeşitli seramik malzemeler kullanılmakla beraber en çok kullanılanlar bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC) ve alüminadır (Al_2O_3).

Johnson-Holmquist (JH) darbe yükleri altında, seramiklerin inelastik olan deformasyonu ve kırılması üzerine, kuramsal bir model oluşturmak için çalışmışlardır. İki çeşit gerilme değeri referans alınmış olup; birincisi malzemenin hasarsızken ölçülen eşdeğer gerilmesi olup, diğeri ise hasar sonrası ölçülen eşdeğer gerilmedir. İki farklı model, JH-1 ve JH-2 olmak üzere geliştirilmiştir. Şekil 2.9.' da görülen JH-2 modelde ek olarak kuvvet kaynaklı gerilme, uzama oranları, deformasyondan sonraki kuvvet değerlerini içermektedir ve literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir [71–74].



Şekil 2.9. JH-2 Modeli [76]

Seramik malzeme için JH modelinde normalize eşdeğer gerilme aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\sigma = \sigma_i^l - D(\sigma_i^l - \sigma_f^l) \quad (2.9)$$

σ_i ilk durumdaki gerilme, σ_f hasar durumdaki gerilme, D ise hasar faktörüdür ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\sigma_i^l = A(P^* + T^*)^N(1 + \ln e^*) \quad (2.10)$$

$$\sigma_f^l = B(P^*)^M(1 + C \ln e^*) \quad (2.11)$$

A, B, C, M ve N sabit değerler olup, P^* normalize basınç gerilmesini, T^* ise maksimum hidrostatik çekme gerilmesini ifade eder. e^* , birimsiz uzama oranıdır. K_1 bulk modülü, K_2 ve K_3 malzeme sabitleri, $\dot{c}$ sıkıştırılabilirlik faktörü olmak üzere basınç artışının da toplanmasıyla hidrostatik gerilme elde edilir ve 3 farklı durumu inceler. D=0 hasarsız durum, D=0.5 hasarlı ve D=1 kırılma durumlarıdır. Normalize basınç aşağıdaki denklemle ifade edilir. Seramik malzeme modeli için; A sağlam dayanım sabiti, N

sağlam dayanım üsteli, HEL hugonoit elastik limiti, B kırılma dayanım sabiti, M kırılma dayanım üsteli, C şekil değiştirme oranı sabit olmak üzere alınan değerler Çizelge 2.3.’te verilmiştir.

$$P = K_1\dot{c} + K_2\dot{c}^2 + K_3\dot{c}^3 + \Delta P \quad (2. 12)$$

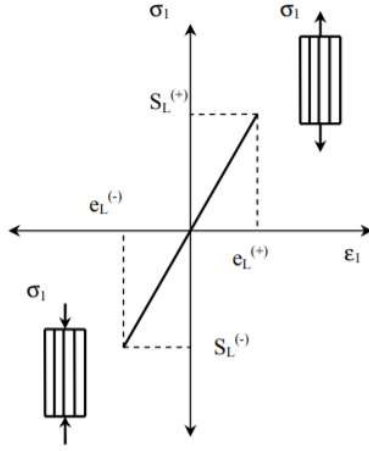
Çizelge 2.3. Analizde kullanılan alümina seramikler için Johnson-Holmquist malzeme modeline ait parametre değerleri [77]

A	N	HEL (MPa)	B	M	C
0,989	0,3755	5900	0,77	1	0

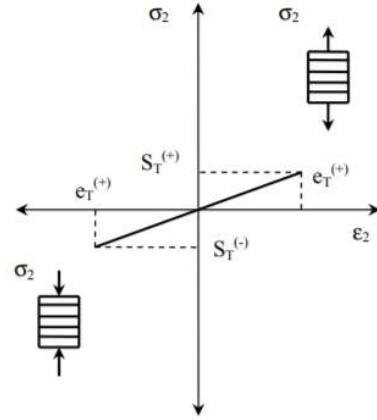
2.4.2.Kompozit Malzeme Modeli

Kompozit malzemelerde hasar analizi yapmak için kompozit malzemenin her bir tabakasındaki elyaf yönünde veya elyaf yönüne dik yöndeki gerilmelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu gerilmeler de kompozit malzemeler için geliştirilmiş teoriler yardımıyla bulunabilir. Şekil 2.10.’da gösterilen $S_L^{(-)}$ ve $S_L^{(+)}$ kompozit malzemenin elyaf sarımı doğrultusundaki basma ve çekme gerilme değerlerini, $S_T^{(-)}$ ve $S_T^{(+)}$ kompozit malzemenin elyaf sarımına dik doğrultudaki basma ve çekme gerilme değerlerini, S_{LT} ise kompozit plakanın kayma mukavemet değerini ifade etmektedir. Aynı şekil üzerinde $e_L^{(-)}$ ve $e_L^{(+)}$ kompozit malzemenin elyaf sarımı doğrultusundaki basma ve çekme gerilme değerlerindeki birim şekil değiştirmeleri, $e_T^{(-)}$ ve $e_T^{(+)}$ kompozit malzemenin elyaf sarımına dik doğrultudaki basma ve çekme gerilme değerlerindeki birim şekil değiştirmelerini, e_{LT} ise kompozit plakanın kayma gerilmesi değerindeki birim kayma şekil değiştirmesini ifade etmektedir [77]. Şekil 2.10. incelendiğinde kompozit malzemenin doğrusal bir malzeme davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır.

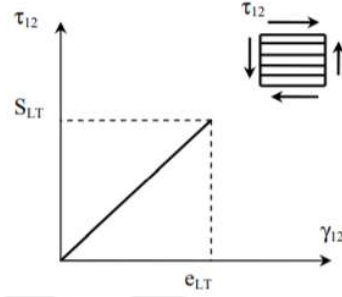
Elyaf yönünde uygulanan kuvvet



Elyafa dik yönde uygulanan kuvvet



Kesme kuvveti



Şekil 2.10. Kompozite gelen eksenel ve kesme kuvvetleri neticesinde plakada oluşan maksimum gerilme ve maksimum gerilme eğrileri [21]

Yine kompozit malzemelerde E_{11} plakanın elyaf doğrultusundaki elastite modülü, E_{22} plakanın elyafa dik doğrultudaki elastisite modülü, ν_{12} plakanın 1-2 düzlemindeki poisson oranı, G_{12} plakanın 1-2 düzlemindeki kayma modülünü ifade etmektedir. Bununla beraber kompozit malzemenlerde, S_{1T} elyaf doğrultusunda çekme yükü altındaki dayanımını, S_{1C} elyaf doğrultusunda basma yükü altındaki dayanımını, S_{2T} elyaf doğrultusuna dik yöndeki çekme yükü altındaki dayanımını, S_{2C} elyaf doğrultusuna dik yöndeki basma yükü altındaki dayanımını, S_{12} kayma dayanımını ifade etmektedir. Zırh sisteminin sayısal analizlerinde kullanılan kompozit malzemeye ait mekanik malzeme özellikleri Çizelge 2.4.' te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Karbon/epoksi kompozit malzemenin mekanik malzeme özellikleri [16]

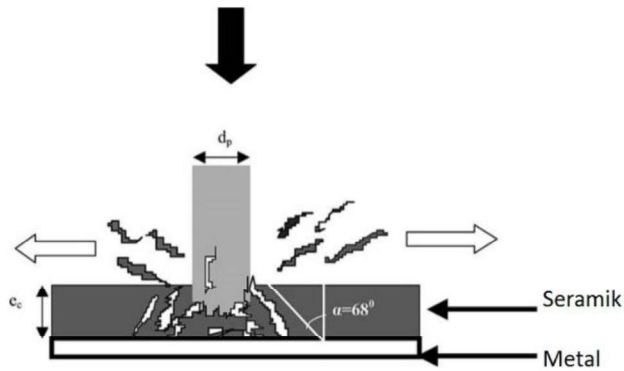
E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	S_{1T} (MPa)
138	9	1	0.3	1448
S_{1C} (MPa)	S_{2T} (MPa)	S_{2C} (MPa)	S_{12} (MPa)	
1172	48.3	248	62.1	

2.5. Çelik Plakada Oluşan Deformasyonun Analitik Çözümü

Seramik ön yüzlü çelik zırhların balistik olarak incelenmesinde merminin etkisinin üç aşamada çelik plakaya aktarıldığı tespit edilmiştir [78]. İncelenen modelde, mermi kütlesinin ve hızının zamanla kaybına bağlı olarak, arka kısımda yer alan çeliğin deformasyon eğrisi bulunmaktadır.

2.5.1. Hasarın İlk Oluşma Aşaması

Hasarın ilk oluşumu Şekil 2.11.' de görüldüğü üzere merminin seramik malzemeye uç kısmının girmesiyle başlamaktadır. Bu aşamada merminin etkisi şok dalgaları gibi seramik malzeme kalınlığı boyunca etki etmektedir.



Şekil 2.11. Seramik plakaya ilk penetrasyon aşaması [78]

Newton' un 2. Yasası olarak bilinen dinamiğin temel prensibi; bir cisme etkiyen kuvvetlerin bileşkesi sıfır değilse, cisim bu kuvvetin doğrultusu ve yönünde ivme

kazanır şeklindedir. Kuvvetin, cisme kazandırdığı ivmeye oranı sabit olup, bu sabit değer cismin kütlelerine eşittir ve $F=m \times a$ denklem olarak ifade edilir.

Lineer momentum, mekanik olarak bir cismin kütlesi ile hızının çarpımına denir ve “p” harfiyle gösterilir. Momentumun zamana bağlı olarak değişimi ise 2.14 numaralı eşitlikte bileşke kuvveti verdiği görülmektedir. Bunun yanı sıra kütlenin zamana bağlı değişimi olacağından, çarpma anından sonra kütle azalacağından kütle akış hızını, kütlenin zamana bağlı türevini, yani kütledeki değişimi incelemek için 2.16 numaralı eşitlikten faydalanırız.

$$p = m * V \quad (2.13)$$

$$\sum F = \frac{dp}{dt} = m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt} \quad (2.14)$$

$$\dot{m} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} \quad (2.15)$$

$$\dot{m} = p * V_p * A_p \quad (2.16)$$

Çarpma anında malzemenin mermiye göstereceği tepki kuvveti olarak, merminin dinamik akma değeri olan değer, ampirik çalışmalar sonucu, elastik doğrusal bölgede yaklaşık olarak $Y_p \approx 2.9 \sigma$ olarak bulunmuştur [79]. Bu değer balistik hasara uğrayan malzeme tepki verdiği için ve rijit biçimde çevresel olarak sabitlendiğinden 2.17 numaralı denklemle ifade edilebilir [80]. İlk olarak hızın zamana bağlı türevi alınarak, Y_p : dinamik akma, A_p : merminin etkili temas alanı, M_p : merminin ağırlığı, V_p : merminin hızı olarak ele alınırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$M_p \frac{dV_p}{dt} = -Y_p A_p \quad (2.17)$$

Konik formun oluşma süresi, seramik malzemenin kalınlığına bağlı olarak doğrusal olarak basıncın ve hasarın iletimini, ses iletimini de katarak [81], e_c : seramik kalınlığı, c : ses hızı, E : elastisite modülü, ρ : yoğunluk, μ : poisson oranı, G : rijidlik modülü, K : yığılma modülü, e_c : malzeme kalınlığı, C_b ve C_{sh} ses hızını bulmak için sabitler olmak üzere, 2.21 numaralı denklemde sürenin nasıl hesaplandığı gösterilmiştir.

$$p * C_b^2 = K \quad (2.18)$$

$$p * C_{sh}^2 = G \quad (2.19)$$

$$C_{long}^2 = C_b^2 + \frac{4}{3} C_{sh}^2 \quad (2.20)$$

$$t = \frac{6 * e_c}{c_{long}} \quad (2.21)$$

Ultrasonik olarak seramik malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarla $c_{long} \approx 10$ km/sn olarak [82,83] alındığında da konik formun oluşma süresi yaklaşık olarak 6 μ s olarak çıkmaktadır. Bunun yanı sıra 2.21 numaralı denklemden elde edilen değerde bu değeri doğrulamaktadır.

2.5.2. Mermi Erozyon Aşaması ve Sabit Kütleyle Penetrasyon

Malzemelerin belirli bir Y_p basınç değerinden sonra hidrodinamik olarak davrandığı ve bu da Bernoulli denklemiyle gösterilebilmektedir. V bernoulli denkleminde yer alan hacim olmak üzere, V_i mermi ön tarafının hızı, V_p merminin arka tarafının hızı, ρ_p merminin yoğunluğu, ρ_c seramiğin yoğunluğunu ifade etmekle beraber 2.22 numaralı denklemle hız farkına bağlı olarak denklemin nasıl oluştuğu görülmektedir. Sınır koşul olan Y_p son kısımda toplanarak gösterilmiştir [84–86]. Bunun yanı sıra Bernoulli denkleminde olan potansiyel enerji farkları burada olmadığı için denkleme dahil edilmemiştir.

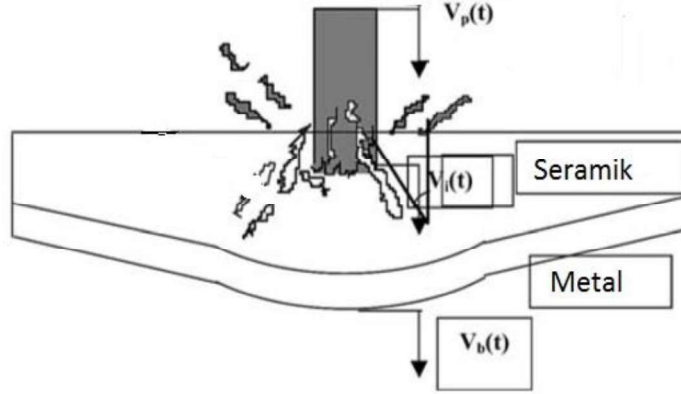
$$(P_1 - P_2)V = \frac{1}{2}mV_p^2 - \frac{1}{2}mV_i^2 \quad (2.22)$$

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}\rho V_p^2 - \frac{1}{2}\rho V_i^2 \quad (2.23)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho_p^2(V_p - V_i)^2 + Y_p \quad (2.24)$$

Y_p ve R_c (seramiğin gösterdiği direnç) her ikisi de sabit olmak üzere; merminin darbesi yani şiddeti arttıkça mermi katı bir cisim gibi özellik göstermeyi bırakarak hidrodinamik yasalara uyan bir akışkan gibi davranacaktır. Aynı durum hedef malzemesinde de geçerli olup R_c değerine ulaştıktan sonra seramikte benzer davranış gösterecektir. Şekil 2.12.’

de görülen $V_p(t)$ ve $V_i(t)$ arasındaki fark merminin erozyonu sırasında kullanılmış ve aşınmaya gitmiştir ve 2.25 numaralı denklemle açıklanmıştır. $V_p(t)$ ve $V_i(t)$ arasındaki fark ise, kırılmış seramiğin absorbe ettiği penetrasyon enerjisini vermektedir.



Şekil 2.12. İkinci aşamadaki merminin penetrasyonu ve metalin elastik deformasyonu [78]

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (V_p - V_i)^2 = R_c + \frac{1}{2} p_c V_i^2 \quad (2. 25)$$

Merminin ön tarafında ve arka tarafında oluşan hız farkına bağlı olarak oluşan gerilme farkını yaklaşık olarak bernoulli eşitliğini kullanarak yaklaşık olarak 2.25 numaralı denklemle gösterilebilir [85]. Süreklilik koşullarını sağlayacak şekilde merminin kütlesi bu aşamanın herhangi bir anında eşit olduğu kabul edilerek 2.26 numaralı denklemle V_p ve V_i arasındaki fark elde edilir.

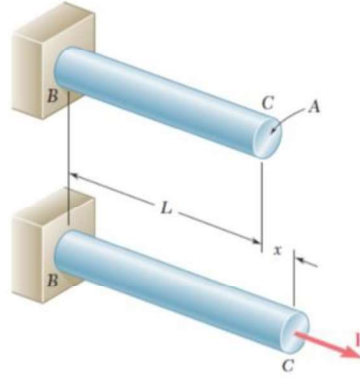
$$\frac{dM_p}{dt} = -\rho_p A_p (V_p - V_i) \quad (2. 26)$$

Merminin ön kısmı aşınmış ve yavaşlamış olmasına karşın arka kısmı aşınmamış olan ve devam eden V_p hızıyla sabit kütleye sahip bir kısım bulunmaktadır. Bu aşamada hidrodinamik benzerliği geçersiz olmaktadır çünkü mermi ve ara yüzey beraber aynı hızda hareket etmektedir. Bununla beraber merminin bozulmamış M_{pr} ağırlığına sahip olan kısmı kırık seramik parçalarına nüfuz ederek ilerlemektedir. Toz haline gelen seramik tarafından etkiyen kuvvet ise 2.27 numaralı denklemle ifade edilmektedir [87].

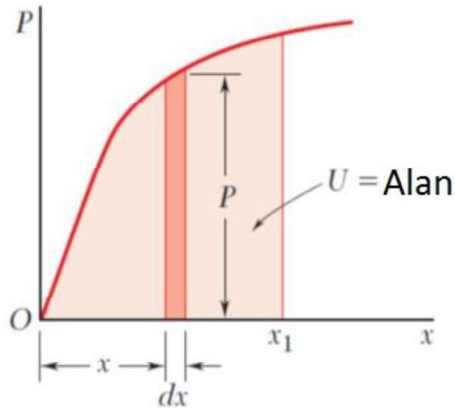
$$M_{pr} \frac{dv_p}{dt} = -R_c A_p \quad (2.27)$$

2.5.3.Şekil Değiştirme Enerjisi

Şekil 2.13.' de görülen “P” kuvvetinden dolayı oluşan şekil değiştirme “x” ekseninde gösterilerek Şekil 2.14.' te bulunan kuvvet-şekil değiştirme grafiği elde edilir.



Şekil 2.13. Kuvvetin çubuk üzerine uygulanması [88]



Şekil 2.14. Kuvvet-deformasyon grafiği [88]

Şekil 2.13.' te görülen çubuk küçük bir dx miktarı kadar uzarken, P yükü tarafından yapılan dU işi, yükün P büyüklüğü ve küçük dx uzamasının çarpına eşittir ve $dU = P dx$ olarak ifade edilir. P yükü yavaşça uygulanırken, bu kuvvet tarafından uygulanan iş, çubuğun şekil değiştirmesine bağlı olarak enerji artışı ortaya çıkmaktadır. Bu enerji, kuvvet ve uzunluğun çarpılmasıyla bulunur ve çubuğun şekil değiştirme enerjisi olarak

adlandırılır [89]. Şekil değiştirme enerjisi “U” ile gösterilir, Şekil 2.14.’ te gösterilen alan olarak, aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$U = \int_0^{x_1} P dx \quad (2. 28)$$

Şekil değiştirme enerjisi çubuğun boyutlarına yani kesit alanına ve boyuna da bağlı olacaktır. Boyut etkisini yok etmek ve önemli olan malzeme özelliklerine yönelmek için, birim hacme düşen şekil değiştirme bulunmalıdır. “U” şekil değiştirme enerjisini çubuğun $V=AL$ hacmine bölünürse aşağıdaki eşitlikler elde edilir. U/V birim hacim başına şekil değiştirme enerjisi, şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu olarak tanımlanır ve “u” harfiyle gösterilir.

$$\frac{U}{V} = \int_0^{x_1} \frac{P}{A} \frac{dx}{L} \quad (2. 29)$$

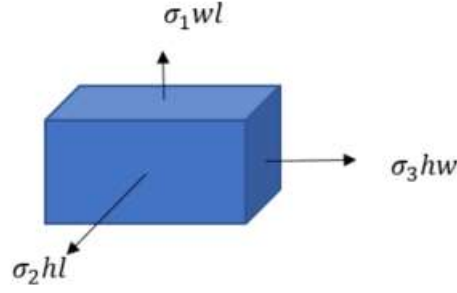
$$u = \frac{U}{V} = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_x d\varepsilon_x \quad (2. 30)$$

Mühendislik birim şekil değiştirmesi ve mühendislik birim şekil değiştirme hızı denklem 2.31 ile, gerçek birim şekil değiştirme ve gerçek birim şekil değiştirme hızı ise 2.32 numaralı denklemle ifade edilir.

$$\varepsilon_{müh} = \frac{L-L_0}{L_0} ; \dot{\varepsilon}_{müh} = \frac{d\left(\frac{L-L_0}{L_0}\right)}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (2. 31)$$

$$\varepsilon_{ger} = \ln \frac{L}{L_0} ; \dot{\varepsilon}_{ger} = \frac{d\left(\ln \frac{L}{L_0}\right)}{dt} = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dt}\right) = \frac{V}{L} \quad (2. 32)$$

Şekil 2.15.’ te görülen birim elemanı “w” genişliğinde, “h” yüksekliğinde, “l” boyunda kabul edersek, x, y, z eksenlerinde oluşan gerçek birim şekil değiştirme ve gerçek birim şekil değiştirme hızı aşağıdaki gibi oluşmaktadır.



Şekil 2.15. Birim eleman gösterimi

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{h}{h_0}, \dot{\varepsilon}_1 = \frac{V_h}{h} \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{w}{w_0}, \dot{\varepsilon}_2 = \frac{V_w}{w} \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{l}{l_0}, \dot{\varepsilon}_3 = \frac{V_l}{l} \quad (2.35)$$

Güç formülü, kuvvet ve hızın çarpına eşittir. Bu sebeple kuvveti, gerilme ve kesit alanın çarpımı olarak tanımlanıp; yukarıdaki denklemlerde elde edilen hızda, birim şekil değiştirme hızı olarak tanımlanırsa aşağıdaki denklemlerle gösterilebilir.

$$P = \sigma_1 w l V_h + \sigma_2 h l V_w + \sigma_3 w h V_l = \sigma_1 w l h \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 w l h \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 w l h \dot{\varepsilon}_3 \quad (2.36)$$

$$P = (\sigma_1 \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\varepsilon}_3) V \quad (2.37)$$

Deformasyon enerjisi $P = dw/dt$ olacağından dolayı aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$E = V \int_{t_0}^{t_1} (\sigma_1 \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\varepsilon}_3) dt ; \dot{\varepsilon} dt = d\varepsilon \quad (2.38)$$

$$E = V \left(\int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \right) \quad (2.39)$$

$$dW = (\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3) V \quad (2.40)$$

$$\frac{dW}{V} = (\sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3) \quad (2.41)$$

Birim zamana bölünürse deformasyon enerjisi elde edilir ve aşağıdaki denklemlerle tanımlanır. Eşitlikler sadeleştirilirken, birim şekil değiştirme hızının üç ekseninde toplamının sıfıra eşit olmasından ve hidrostatik gerilmeden de faydalanılmaktadır.

$$P = \frac{dW}{dt} = (\sigma_1 \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\varepsilon}_3) V \quad (2.42)$$

$$dW = \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} V \quad (2.43)$$

$$P = \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} V \rightarrow \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = \frac{P}{V} \quad (2.44)$$

$$\bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = \sigma_1 \dot{\epsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\epsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\epsilon}_3 \quad (2.45)$$

$$\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3 = 0 \text{ ve } \sigma_m(\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3) = 0 \quad (2.46)$$

$$\bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} = \dot{\epsilon}_1(\sigma_1 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_2(\sigma_2 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_3(\sigma_3 - \sigma_m) \quad (2.47)$$

2.47 numaralı elde edilen denklemde, efektif gerilme durumunda von-Mises' den gelen denklem yerine yazılırsa 2.48 numaralı birim şekil değiştirme denklemi elde edilir. Bu denklemi; 2.49, 2.50 ve 2.51 numaralı plastisite denklemleri diye ifade edilen denklemlerle sadeleştirildiğinde 2.52 numaralı denklem elde edilir.

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{\dot{\epsilon}_1(\sigma_1 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_2(\sigma_2 - \sigma_m) + \dot{\epsilon}_3(\sigma_3 - \sigma_m)}{\frac{3}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.48)$$

$$\dot{\epsilon}_1 = \lambda(\sigma_1 - \sigma_m) \quad (2.49)$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \lambda(\sigma_2 - \sigma_m) \quad (2.50)$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \lambda(\sigma_3 - \sigma_m) \quad (2.51)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}\{\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \dot{\epsilon}_3^2\}} \quad (2.52)$$

$$\bar{\epsilon} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{\bar{\epsilon}} dt \quad (2.53)$$

Düzlem gerilme durumunda, iş ve hacim arasındaki ilişki tanımlanırsa 2.54 numaralı ifade elde edilir ve düzlem gerilme durumu için 2.55 numaralı eşitlik yazılır.

$$\frac{dw}{hacim} = f_1(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) df_2(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) \quad (2.54)$$

$$f_1(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2}) \quad (2.55)$$

İzotropik malzemelerde ortalama gerilme değeri aşağıdaki denklemle ifade edilir ve z ekseninde herhangi bir gerilme olmadığı durumda, yani düzlem gerilmesi durumunda aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \quad (2.56)$$

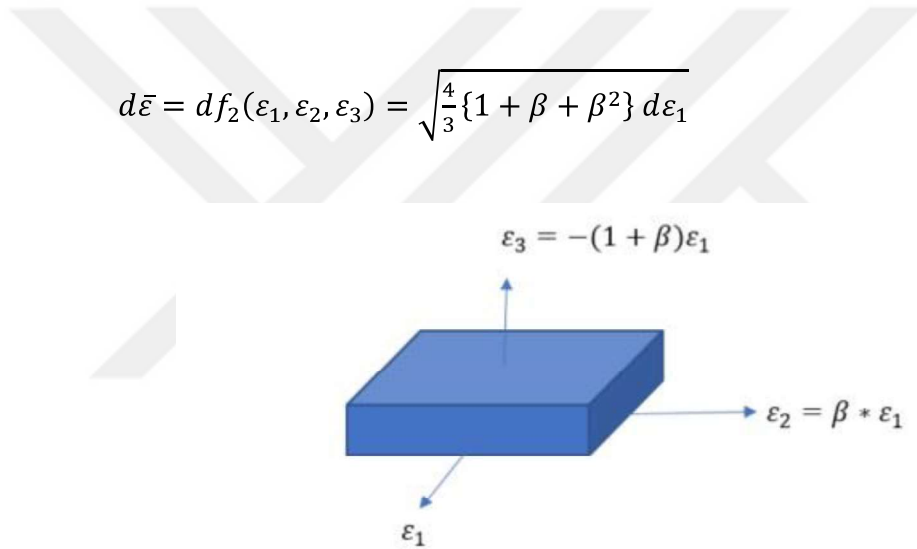
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2} \quad (2.57)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}(2\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2^2)} \quad (2.58)$$

Düzlem gerilmesi olarak sadeleştirilirse 2.59 numaralı denklem elde edilir. Düzlem gerilmesi durumunda efektif şekil değişimini ise 2.60 numaralı eşitlikle ifade edilir.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} = (\sqrt{1 - \alpha + \alpha^2})\sigma_1 \quad (2.59)$$

$$d\bar{\epsilon} = df_2(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = \sqrt{\frac{4}{3}\{1 + \beta + \beta^2\}} d\epsilon_1 \quad (2.60)$$



Şekil 2.16. Düzlem gerilme durumunda birim şekil değiştirmelerin tanımı

Plastik şekil değişiminde hacim sabitliği kuralına göre, toplam şekil değişimi sıfıra eşit olacağından dolayı ve düzlem gerilmesi durumunda, eksenlerde meydana gelen şekil değişimlerini Şekil 2.16.' da görüldüğü üzere tanımladıktan sonra aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir.

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (2.61)$$

$$d\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\{d\epsilon_1^2 + d\epsilon_2^2 + d\epsilon_3^2\}} \quad (2.62)$$

2.62 numaralı elde edilen denklemde, eksenlerde oluşan birim şekil değiştirmeler katsayılarla ifade edilerek tanımlandığında ve sadeleştirildiğinde efektif birim şekil değişimi 2.70 numaralı denklem olarak elde edilir.

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9}\{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2\}} \quad (2.63)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{9}\{(\varepsilon_1 - \beta\varepsilon_1)^2 + (\beta\varepsilon_1 + (1 + \beta)\varepsilon_1)^2 + (-(1 + \beta)\varepsilon_1 - \varepsilon_1)^2\}} \quad (2.64)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{9}\{\varepsilon^2 - 2\varepsilon^2\beta + \beta^2\varepsilon^2 + 4\varepsilon^2\beta^2 + \varepsilon^2 + 4\varepsilon^2\beta + 4\varepsilon^2 + \beta^2\varepsilon^2 + 4\varepsilon^2\beta\}} \quad (2.65)$$

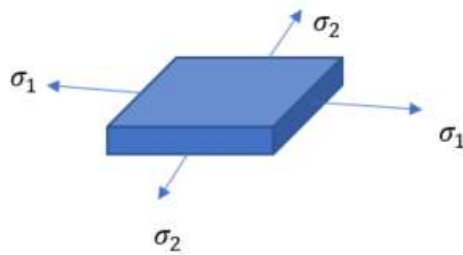
$$= \sqrt{\frac{2}{9}(6\varepsilon^2\beta + 6\varepsilon^2\beta^2 + 6\varepsilon^2)} \quad (2.66)$$

$$= \sqrt{\frac{4}{3}\varepsilon^2\beta + \varepsilon^2\beta^2 + \varepsilon^2} \quad (2.67)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{4}{3}\{1 + \beta + \beta^2\}} \varepsilon_1 \quad (2.68)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}\{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2\}} \quad (2.69)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{9}\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2\}} \quad (2.70)$$



Şekil 2.17. Birim elemanın gösterimi

Şekil 2.17.' de gösterilen birim elemenda ilk kalınlığı t_0 , son kalınlığı t_d olarak tanımlandığında şekil değişimi iki ekseninde de aynı olmalı ve üçüncü ekseninde tam tersi yani eksi olarak iki eksenin toplamı kadar aşağıdaki eşitliklerle gösterilmektedir. Denklemlerin elde edilmesi aşağıda gösterilmektedir. Bu durum aynı zamanda küresel

ince cidarlı kaplarda, basınç durumunda cidarda oluşan gerilme durumuna benzemektedir.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad \sigma_3 = 0 \quad (2.71)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \quad (2.72)$$

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{2 \cdot t_d} \quad (2.73)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.74)$$

Birim şekil değişiminin birinci ve ikinci eksenlerde eşit olması ve 2.74 numaralı denkleme göre, 2.76 numaralı denklemde görülen tek eksen oluşan birim şekil değişiminin iki katı olması durumunu ortaya çıkarmaktadır.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon \quad (2.75)$$

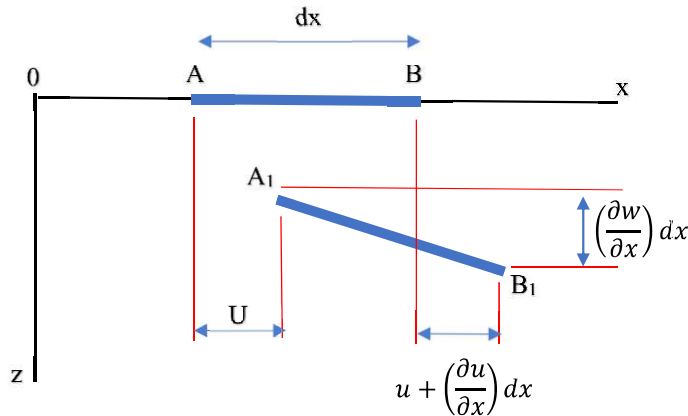
$$\varepsilon_3 = -2\varepsilon \quad (2.76)$$

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t_d}{t_0}\right) = -\ln\left(\frac{t_0}{t_d}\right) \quad (2.77)$$

2.75 ve 2.76 numaralı denklemde elde edilen eşitlikler, 2.70 numaralı eşitlikte yerine yazıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9}\{(\varepsilon - \varepsilon)^2 + (\varepsilon + 2\varepsilon)^2 + (-2\varepsilon - \varepsilon)^2\}} \quad (2.78)$$

$$= 2\varepsilon = -\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t_0}{t_d}\right) \quad (2.79)$$



Şekil 2.18. Membrane teorisinin gösterimi

Şekil 2.18.' de görülen şekilde membran teorisinden gelen, AB uzunluğunda alınan bir çubuk için birim şekil değişimi eşitlikler yardımıyla aşağıdaki şekilde ifade edilir ve 2.85 numaralı denklem elde edilir.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{A^1 B^1 - AB}{AB} = \frac{A^1 B^1 - dx}{dx} \quad (2.80)$$

$$A^1 B^1 = dx + dx \varepsilon_x \quad (2.81)$$

$$(A^1 B^1)^2 = (dx(1 + \varepsilon_x))^2 = \left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} dx\right)^2 \quad (2.82)$$

$$2\varepsilon_x = 2\frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \quad (2.83)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \quad (2.84)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_r = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial r}\right)^2 \quad (2.85)$$

Silindir parçanın şekil değişimi için aşağıdaki eşitlikler yazılır ve ardından r değişken, h değişken olduğu durum için 2.88 numaralı denklem, küçük küresel hacim için h sabit için $\pi r^2 \partial h = 0$ olur ve 2.89 numaralı denklem elde edilmiş olur.

$$V = \pi r^2 h \quad (2.86)$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r h \quad (2.87)$$

$$dV = 2\pi r h dr + \pi r^2 dh \quad (2.88)$$

$$dV = 2\pi r h dr \quad (2.89)$$

2.90 numaralı denklemde görülen gerilme şekil değiştirme denklemi olan Holloman eşitliği, 2.30 numaralı elde edilen denklemde yerine yazıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\bar{\sigma} = A(\bar{\varepsilon})^n \quad (2.90)$$

$$E_p = \int \left(\int_0^{\bar{\varepsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} \right) dV \quad (2.91)$$

$$E_p = \frac{A}{n+1} \int (\bar{\varepsilon})^{n+1} dV \quad (2.92)$$

Bu şekil değiştirme $\bar{\varepsilon} = 2\varepsilon_r$ şeklinde ifade edilir ve küçük şekil değiştirme durumlarında 2.94 numaralı denklemle ifade edilir.

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \quad (2.93)$$

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \quad (2.94)$$

Girintinin yarıçapına bağlı olarak küçük silindirin hacmini $dV = 2\pi r h dr$ olarak alındıktan sonra, plaka kalınlığı “h” olduğunda 2.89 ve 2.92 numaralı denklemlerden 2.96 numaralı denklem elde edilir.

$$E_p = \frac{A}{n+1} \int \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^{2(n+1)} 2\pi h r dr \quad (2.95)$$

$$E_p = \frac{2\pi h A}{n+1} \int_0^\infty \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^{2(n+1)} r dr \quad (2.96)$$

Bunun yanı sıra 2.96 numaralı denklemin çözümü için metal plaka da gerçekleşen şekil değişiminin mermiye bağlı profilinin bilinmesi gerekmektedir. Bu şekil değişim formunun eksponansiyel olarak yaklaşımını 2.97 numaralı denklemde; “w₀” merminin etkisi bittiği anda kubbede oluşan maksimum yer değiştirme (merminin uç kısmınının çarptığı noktada oluşan yarıçap), deneysel olarak bulunan “k” şekil değiştirme profili sabiti olmak üzere 2.96 ve 2.97 numaralı denklemlerden 2.112 numaralı denklemi elde edilir. Bu aşamada hızın zamana bağlı azalması 2.113 numaralı denklemde gösterilmektedir.

$$w = w_0 \exp \left[-\frac{kr}{D} \right] \quad (2.97)$$

$$\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{-w_0 \exp(-kr/D) k}{D} \quad (2.98)$$

$$E_p = \frac{2\pi h A}{n+1} \int \left(\frac{k w_0 e^{-\frac{kr}{D}}}{D} \right)^{2(n+1)} r dr \quad (2.99)$$

$$E_p = \frac{2\pi hA}{n+1} x \left(\frac{kw_0}{D} \right)^{2(n+1)} \int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{2kr(n+1)}{D} \right\} r \partial r \quad (2.100)$$

$$\int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{2kr(n+1)}{D} \right\} r \partial r \quad (2.101)$$

$$= \frac{-Dre^{\frac{-2k(n+1)r}{D}}}{2k(n+1)} + \int \frac{D}{2k(n+1)} e^{\frac{-2k(n+1)r}{D}} dr \quad (2.102)$$

$$= \frac{-Dre^{\frac{-2k(n+1)r}{D}}}{2k(n+1)} + \frac{D}{2k(n+1)} \int e^{\frac{-2k(n+1)r}{D}} dr \quad (2.103)$$

$$= \frac{-Dre^{\frac{-2k(n+1)r}{D}}}{2k(n+1)} + \left[\left(\frac{D}{2k(n+1)} \right) \left(\frac{-D}{2k(n+1)} \right) e^{\frac{-2k(n+1)r}{D}} \right] \quad (2.104)$$

$$= \frac{-Dr}{2k(n+1)} e^{\frac{-2k(n+1)r}{D}} - \frac{D^2}{4k^2(n+1)^2} e^{\frac{-2k(n+1)r}{D}} \quad (2.105)$$

$$= e^{\frac{-2k(n+1)r}{D}} \left[\frac{-Dr}{2k(n+1)} - \frac{D^2}{4k^2(n+1)^2} \right] \quad (2.106)$$

$$= \frac{D^2}{4k^2(n+1)^2} \quad (2.107)$$

$$E_p = \frac{2\pi hA}{n+1} \left(\frac{kw_0}{D} \right)^{2(n+1)} \frac{D^2}{4k^2(n+1)^2} \quad (2.108)$$

$$= \frac{\pi hA}{(n+1)^3 \cdot 2k^2} \left(\frac{kw_0}{D} \right)^{2(n+1)} D^2 \quad (2.109)$$

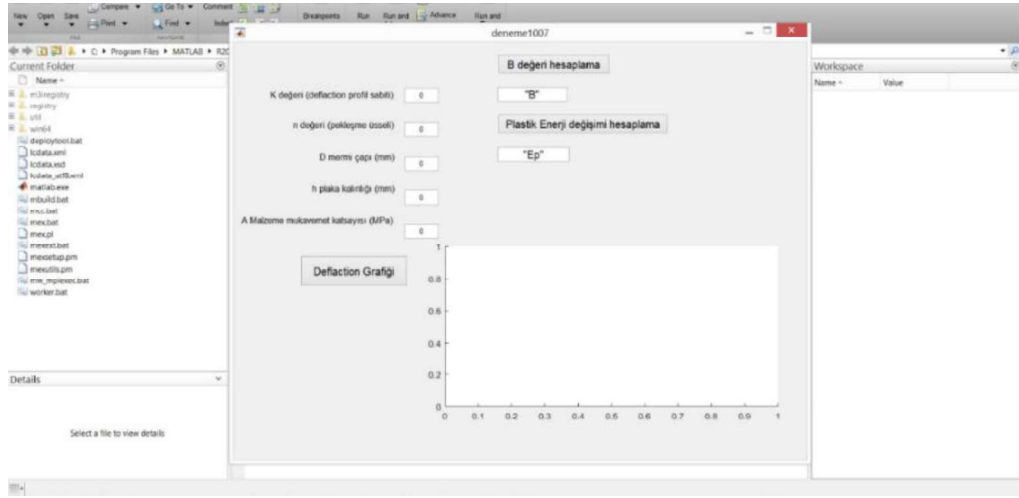
$$= \frac{\pi hA}{2(n+1)^3} \frac{k^{2n} w_0^{2n+2}}{D^{2n}} \quad (2.110)$$

$$B = \frac{\pi hA}{2(n+1)^3} \left(\frac{k}{D} \right)^{2n} \quad (2.111)$$

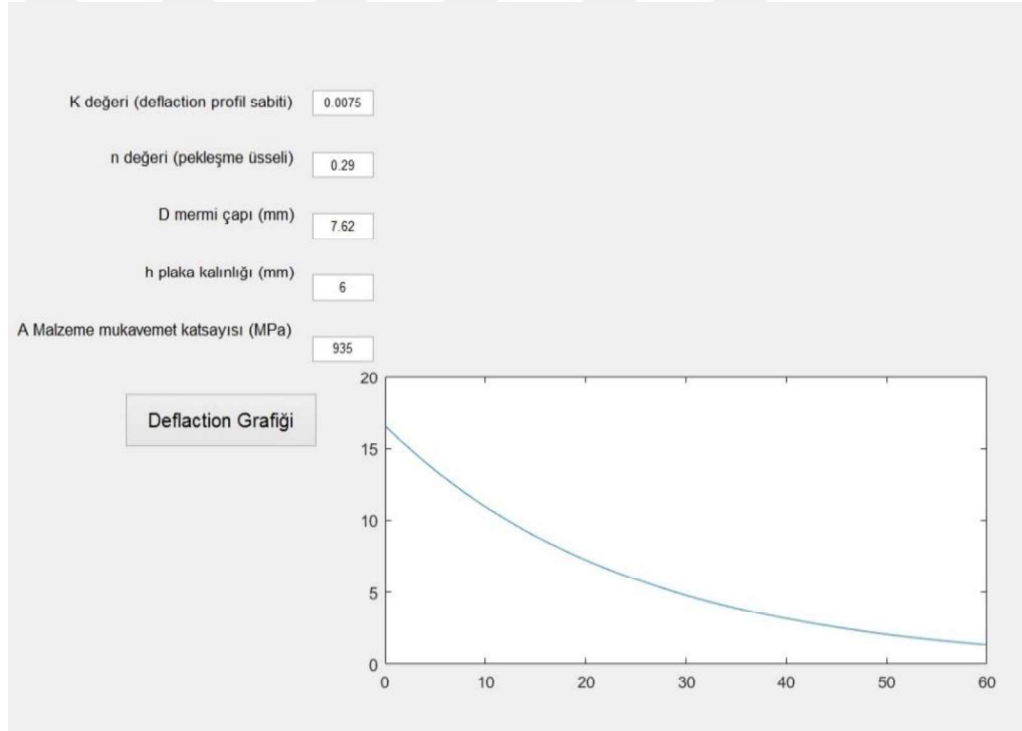
$$E_p = B \left(w_0^{2(n+1)} \right) \quad (2.112)$$

$$M_p \frac{dV_p}{dt} = -Y_p A_p \quad (2.113)$$

Analitik çalışmalar kapsamında mermi darbesi sonucu çelik plakada oluşan deformasyon eğrisinin bulunması için Matlab' da bir program yazılmıştır. Bu program sayesinde mermi çapına ve plaka kalınlığına bağlı olarak oluşacak olan deformasyon profilinin çıkarılması amaçlanmıştır. Deformasyon profili için kullanılan ilgili denklemlerin elde edilmesi yukarıda verilmiş olup, çelik plakada oluşan deformasyon eğrileri bir sonraki bölümde irdelenmiştir. Matlab' da yazılan programın ara yüzünün görüntüsü Şekil 2.19.' da görülmekte, verilerin girişi yapıldıktan sonra elde edilen çelik plakadaki örnek deformasyon eğrisi Şekil 2.20.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Matlab program ara yüzü ekran görüntüsü



Şekil 2.20. Matlab programında plakanın yarıçapı boyunca deformasyon eğrisinin elde edilmesi

2.6. Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhların Sonlu Eleman Analizi

Bu bölümde çevresi farklı kalınlıklarda kompozit sargılı ve kompozit sargısız altıgen seramik ön yüze sahip çelik zırhların 7,62 mm kalibreli mermilere karşı göstermiş olduğu balistik davranışların *Ansys Explicit/Dynamic* sonlu eleman programında gerçekleştirilen sayısal analizleri hakkında bilgiler verilmiştir. Analiz çalışmaları tek seramikli basit modellerle başlamış ve tez konusunun temelini teşkil eden ön yüzü çevresi kompozit malzemeyle sarılı seramiklere ve arka yüzü çelik plakalara sahip kompleks modeller ile son bulmuştur.

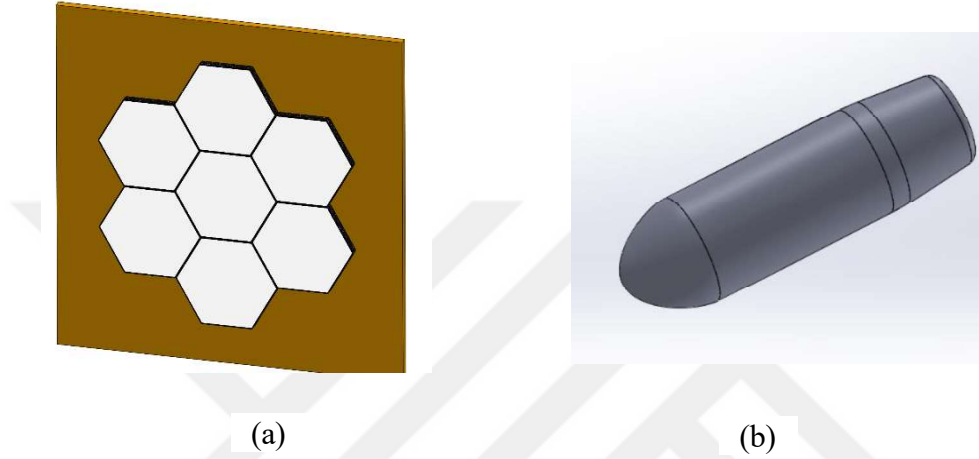
Kompozit sargının zırhın balistik performansına etkisi incelenirken kompozit sargılı numunelerde kompozit sargı kalınlığı 0,75 mm / 1 mm / 1,5 mm olarak alınmıştır. Kompozit sargılı zırhların balistik performansları sonlu eleman analizlerinde kendi aralarında karşılaştırıldığı gibi kompozit sargısız zırhlarla yapılan analiz sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Ayrıca analizlerde seramiklerin çevresine yapılan kompozit sargının zırhın arka kısmındaki çelik plakanın plastik deformasyonuna olan etkisi de incelenmiştir.

2.6.1. Seramik Ön Yüzlü Çelik Zırhların Modellenmesi

Yüksek hızlarda zırh sistemlerinin balistik davranışlarının sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi ve sonrasında analizlerinin yapılması oldukça zor ve karmaşık olup çözüm süresi bakımından uzun bir süreç gerektirmektedir. Bu çalışmada modellenmesi düşünülen ön yüzündeki her seramiği karbon/epoksi kompozitle sarılmış arka yüzünde çelik plaka bulunan zırh sisteminin birçok farklı malzeme tipini içinde barındırıyor olması analiz çalışmalarının basit modellerden karmaşık modellere adım adım yapılmasını gerektirmiştir. Analizleri yapılan modeller sırasıyla; kompozit sargısız tek seramik, kompozit sargılı tek seramik, kompozit sargısız çok seramikli, kompozit sargılı çok seramikli, ön yüzü kompozit sargısız çok seramikli arka yüzü çelik plakalı ve ön yüzü kompozit sargılı çok seramikli arka yüzü çelik plakalı olarak belirlenmiştir.

Zırh sisteminin modellenmesinde altıgen seramikler 10 mm kalınlığında alınmış ve mermi darbesine maruz kalan seramiğin çevresi altı adet seramikle çevrelenmiş şekilde

tasarlanmıştır. Zırh sisteminde çelik plaka kalınlığı 6 mm alınmış ve ön yüzünde çevresi kompozit sargılı seramik bulunan arka yüzü çelik plakalı zırh sistemi Şekil 2.21. a' da gösterilmiştir. Şekil 2.21. b' de gösterilen 7,62 mm kalibreli ve 25 mm boyundaki mermi, analizlerde ilk mermi darbesine maruz kalan seramiğin tam ortasına noktasal temas şeklinde modellenmiş ve çarpma anındaki çarpışma hızı yaklaşık 840 m/sn olarak programa girilmiştir.

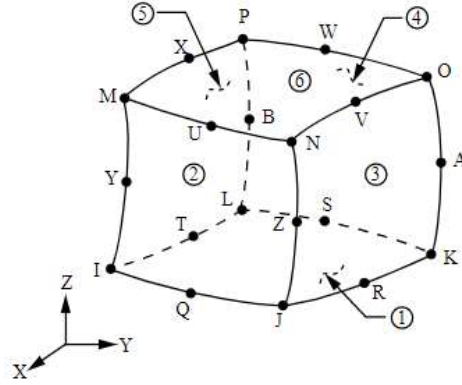


Şekil 2.21. a) Çelik üzerinde alümina seramiklerin görünümü b) Mermi görünümü

Sonraki aşamada zırh sistemindeki her bir malzemenin önceki bölümde detaylı olarak bahsedilmiş olan malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Seramik malzeme için Johnson-Holmquist malzeme modeli, çelik plaka ve mermi malzemesi için yüksek hızlarda plastik şekil değişimine izin veren JC malzeme modeli ve karbon fiber/epoksi kompozit malzeme için lineer elastik ortotropik malzeme modeli seçilmiştir. Kompozit malzeme için 0,75 mm / 1 mm / 1,5 mm kalınlıklarda tek yönlü elyaf açılışına sahip 3 farklı sarım modeli uygulanmıştır.

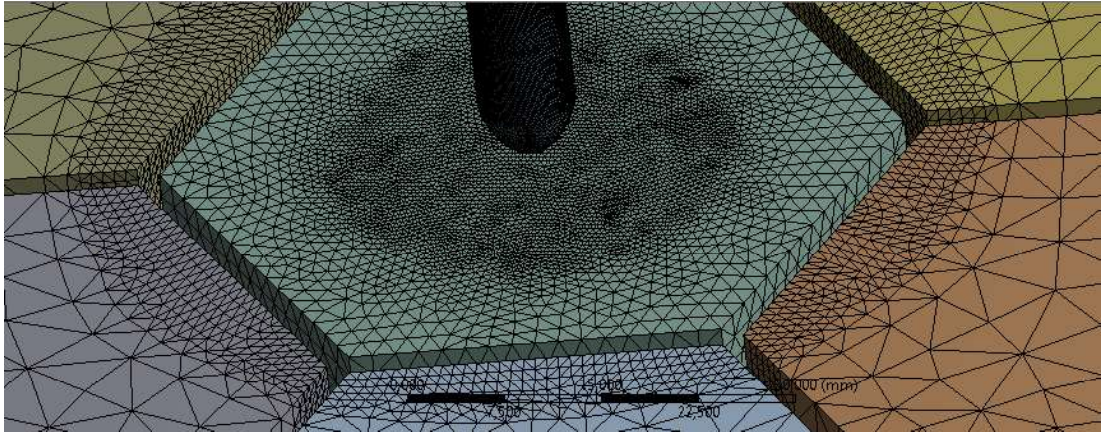
Yapılan analizde modelde 280.548 düğüm noktası ve 216.423 ağ elemanı kullanılmıştır. Alümina seramikler tetragonal ve hegzagonal olarak, çelik kısım ve kompozit kısımlar düzgün dikdörtgen ağ yapısı ile sağlanmıştır. Model oluşturulurken geometrisi Şekil 2.22.' de gösterilen 3 boyutlu 20 düğümlü termal ve yapı analizi özellikli Solid 186 eleman tipi seçilmiştir. Solid 186 elemanın her bir düğüm noktası x, y ve z yönlerinde olmak üzere 3 serbestlik derecesine sahiptir.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta ilk mermi darbesine maruz altıgen seramiğin ve etrafındaki seramiklerin çarpışma sonrası darbe alması muhtemel bölgelerinin yoğun şekilde mesh yapılmış olmasıdır.



Şekil 2.22. SOLID186 SEM elemanı [90]

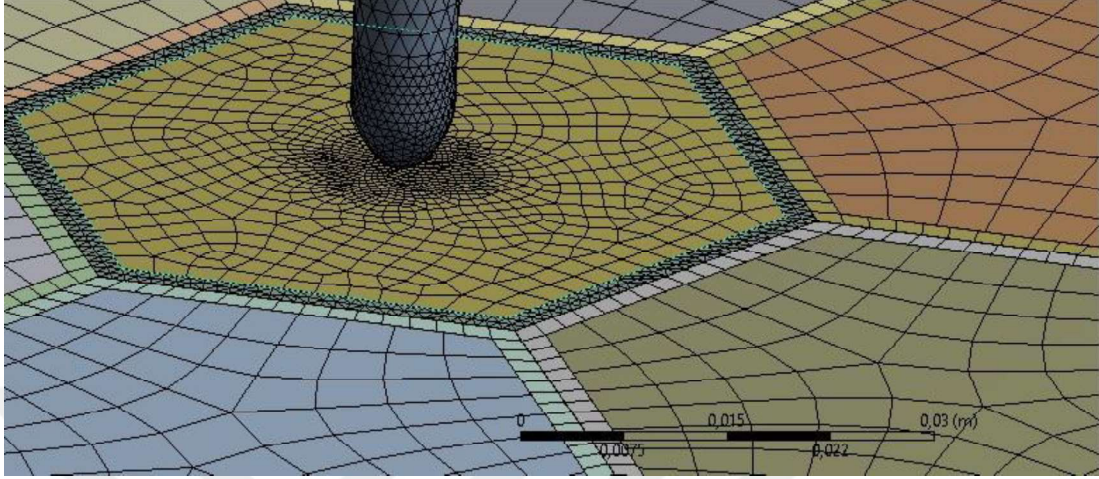
Şekil 2.23.' de mermi uç noktası detaylandırmanın yanında, merminin çarptığı alümina seramiklerin çevresindeki seramiklerinde ilk kontak yüzeyleri detaylandırılmıştır. Şekil 2.24.' te ise karbon elyaf sarımı yapılmış alümina seramiklerin meshlenmiş hali görülmektedir.



Şekil 2.23. Merminin ilk temas ettiği noktanın ve çevresindeki diğer alümina seramiklerin temas kısımlarının daha fazla detaylandırılmış hali

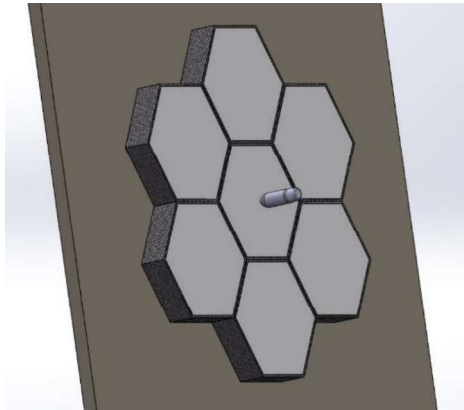
Zırh sisteminin analizdeki sınır şartları ile analize başlama anı olan merminin seramiğe çarpma anı Şekil 2.25.' te gösterilmiştir. Sınır şartları olarak zırh sistemindeki seramikler

kendi aralarında serbest temaslı, arka taraftaki çelik plaka ile yapışık temaslı olarak seçilmiş olup çelik plaka ise kenar yüzeylerinden sabitlenmiştir. Modelde mermi merkez seramiğin ortasından noktasal temas ile dik açıda zırh sistemine konumlandırılmıştır.



Şekil 2.24. Kompozit sarıli seramiklerde kompozit kısmının detaylandırılmış hali

Programda zırha çarpacak merminin çarpışma anındaki doğrusal hız değeri girilmiştir. Analiz sonuçlandığında çarpışmadan dolayı seramiklerde meydana gelen hasar durumu seramiklerin parçalanması şeklinde gerçekleşmektedir. Arka taraftaki çelik plakada oluşan plastik deformasyon ve gerilme değerleri von Mises hasar kriteri yardımıyla incelenmiştir.



Şekil 2.25. Çevresi kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırh sisteminin sayısal analiz modeli

Analizlere ait sonuçlar ve karşılaştırmalar bir sonraki bölümde detaylı olarak verilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Balistik Atış Deneyleri

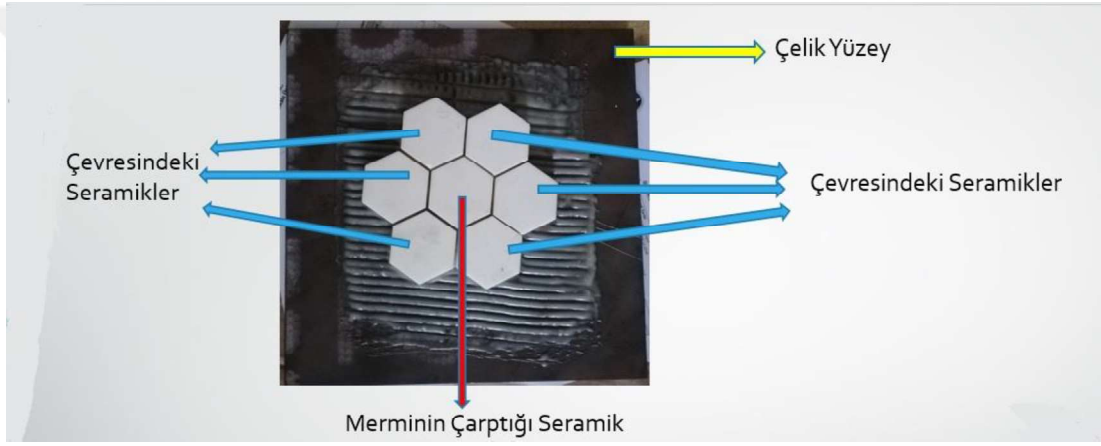
Balistik deneyler için alümina seramikleri, karbon elyaf sarımlı olanlarla eşit koşullarda kıyaslayabilmek amacıyla sarım kalınlığı kadar araları boşluklu olacak şekilde düzenlenerek çelik malzemeye yapıştırılmışlardır. Yapıştırma işleminde 404 marka özel katalizörlü plastik-çelik yapıştırıcısı kullanılmış olup karıştırıldıktan sonra uygulanan ve kuru yapılan bir ara malzemedir.

Alümina seramiklerin karbon liflerle sarım işlemi filament sarım metoduyla yapılmıştır. Yöntem basit olarak alümina malzemeye karbon lifin tutturulması ve peşinden alüminanın çevrilmesiyle tamamlanmaktadır. Torna tezgahına bağlanan alümina malzemenin sarımı Şekil 3.1.' de gösterilmektedir. Geride duran iki farklı karbon lif kaynağından gelen fiber, epoksi tankının içinden geçirilerek epoksiyi emmesi sağlanır, peşinden fazla epoksinin akması için ince bir yuvarlak delikten geçer ve alümina seramiğe sarılarak işlem tamamlanır.

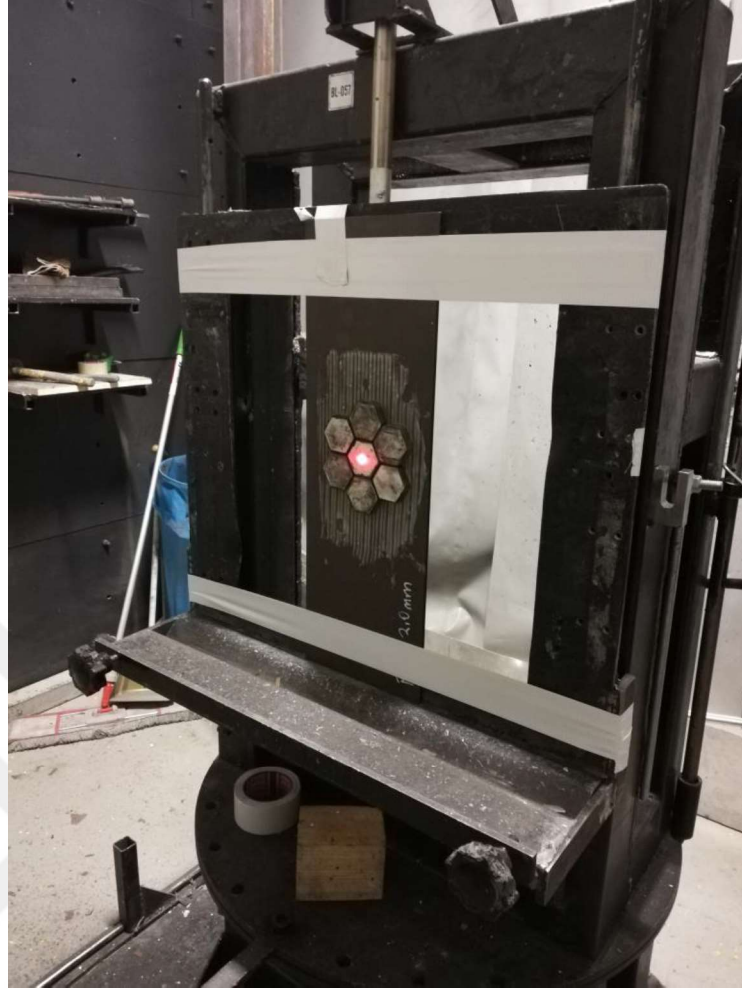


Şekil 3.1. Karbon liflerle sarımı yapılan alümina seramik

Şekil 3.2.' de seramiklerin çelik yüzey üzerinde dizilimleri ve adlandırılmaları görülmektedir. Test Şekil 3.3.' te görüldüğü üzere seramiklerin orta noktasına lazerle işaretlenmiş sabit namlu tarafından yapılır. Çoklu atışlarda (Multihit), önyüzü mozaik yapılı seramiklerle güçlendirilmiş çelik zırhların, ilk atış sonrasında da devamlılığını sürdürmesi önemlidir. İlk atıştan sonra atışı alan seramiğin çevresindeki seramiklerin hasarsız kalması önemlidir, hasar durumunda gelen ikinci mermiye karşı bütünlüğü bozulduğundan (kırılma, çatlama) dolayı (merminin enerjisini sönümleyemeyecek) karşı koyacak direnci gösteremeyecektir ve hasara uğrayacaktır. Hedef olan seramiğin çevresindeki seramiklerin hasara uğramaması ayrıca yanına gelecek mermiye karşı göstereceği direnç için de önemlidir.



Şekil 3.2. Balistik deneyler için üretimi gerçekleştirilen zırh sistemine ait deney numunesi



Şekil 3.3. Seramik ön yüzlü çelik zırha ait deney numunesinin balistik test için hazırlanan düzeneğe yerleştirilmesi

3.1.1. Kompozit Sargısız ve Arası Boşluklu Numuneler için Balistik Atış Deneyleri

Deney numunelerinin kıyaslamasını eşit şartlara getirebilmek amacıyla karbon elyaf sarım kalınlığı kadar alüminaların araları boş olarak bırakılmıştır. Şekil 3.4.' te hardox çelik malzeme üzerine yapıştırılmış arası boşluklu numune gösterilmektedir. Mermi atışları sonrası ortadaki alümina tamamen dağılmış olup, hasar kenardaki seramiklere de ulaşmıştır. Şekil 3.5.' te gösterilen örnekte kompozit sargısız, arası 1,5 mm boşluklu alüminaların 4 tanesi, Şekil 3.6.' da kompozit sargısız, arası 1 mm boşluklu seramiklerin altı tanesi, Şekil 3.7.' de ise kompozit sargısız, arası 0,75 mm boşluklu seramiklerin altı tanesi hasar görmüş ve hasarlar örnekler olarak gösterilmiştir. Hasar miktarları sayısal bulgulara ve değerlendirmeler kısmında detaylı olarak ölçülüp, irdelenmiştir.



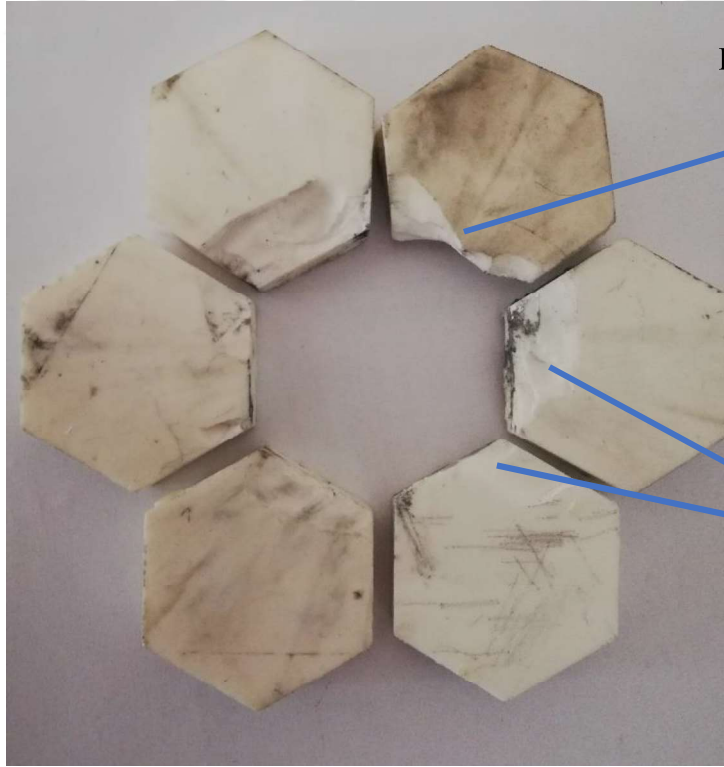
Şekil 3.4. Çevresi kompozit sargısız arası boşluklu ve hardox çelik saca yapıştırılmış deney numunesi



Şekil 3.5. Arası 1,5 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu



Şekil 3.6. Arası 1 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu



Şekil 3.7. Arası 0,75 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu

3.1.2. Kompozit Sarımlı Numuneler için Balistik Atış Deneyleri

Yanal hasarı minimuma indirmek amacıyla karbon liflerle, alümina seramikler belirli kalınlıklarda çevresel olarak sarılmışlardır. Sarım kalınlığı için, arası boşluklu numunelerle aynı miktarlar belirlenmiştir. Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.' de kullanılan karbon fiber ve alümina seramiklerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Karbon elyaf / epoksi kompozitin mekanik özellikleri

Karbon Elyaf/Epoksi	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü	Şekil Değiştirme Oranı	Yoğunluk
A-49	4900 MPa	250 GPa	% 2	1790 kg/m ³

Çizelge 3.2. Alümina seramiklerin mekanik özellikleri

Nurol	HV (GPa)	Elastisite Modülü	Yoğunluk
Alümina 99	15.7	360 GPa	3900 kg/m ³

Şekil 3.8.' de çevresi filaman sarım yöntemiyle karbon/epoksi kompozit malzeme ile sarılmış alümina seramik numunesi görülmektedir. Seramik numunelerin filaman sarımı yapıldıktan sonra numuneler kurluşma amacıyla 100 °C sıcaklıkta 2-3 saat fırınlanmıştır. Karbon elyaf malzemesi eksi termal genleşme katsayısına sahip olması sebebi ile sıcaklık altında büzülmetedir. Karbon elyafın bu özelliği sayesinde alümina seramikler kompozit malzeme ile sarıldıktan sonra kurluşma safhasında kompozit malzeme tarafından daha sıkı bir şekilde sarılmışlardır. Şekil 3.9.' da sarımı yapılan ve kurlenen alümina seramiklerin, 404 komponentli yapıştırıcı ile çelik levhaya yapıştırılmış hali görülmektedir.



Şekil 3.8. Flaman sarım metoduyla hazırlanan çevresi kompozit sargılı alümina seramik

Şekil 3.10.' da arası 1 mm boşluklu çevresi kompozit sargısız seramik ön yüze sahip deney numunesinin mermi darbesine maruz seramiğin çevresindeki alümina seramiklerde oluşan hasar gösterilmiştir. Buna karşın çevresi 1 mm kompozit sargılı seramik ön yüze sahip deney numunesinde mermi darbesine maruz seramiğin çevresindeki alümina seramiklerde herhangi bir hasarın oluşmadığı Şekil 3.11.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Çevresi kompozit sargılı alümina seramik ön yüze sahipve arka yüzü hardox çelik sac olan zırh sistemine ait deney numunesi



Şekil 3.10. 1 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu

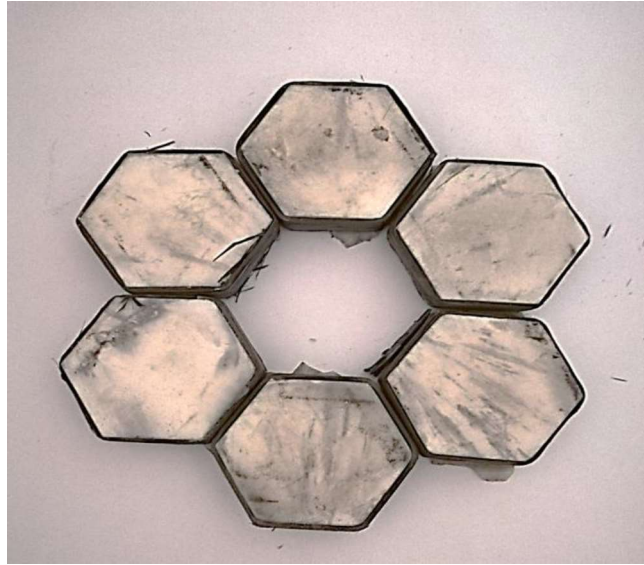


Şekil 3.11. 1 mm sarımlı hazırlanan numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerinde oluşan hasar durumu

Şekil 3.12.' de Filaman sarım yöntemi ile çevresi 1,5 mm karbon/epoksi kompozit malzem ile sarılan seramik ön yüze sahip çelik zırh sistemine ait deney numunelerinin balistik analiz sonuçları görülmektedir. Yapılan deney sonuçlarından mermi darbesine maruz seramiğin çevresindeki alümina seramiklerde herhangi bir hasarın oluşmadığı ve Şekil 3.13.' te görülmemektedir.

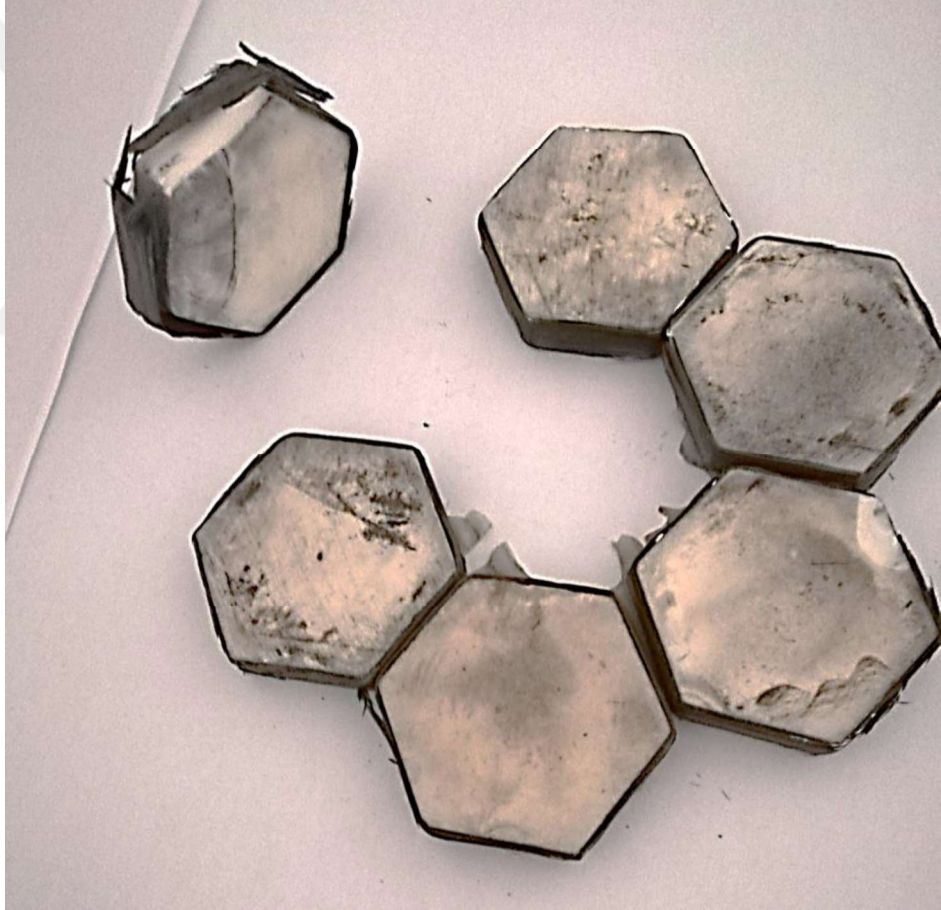


Şekil 3.12. 1,5 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerin görünümü - 1



Şekil 3.13. 1,5 mm boşluklu numunenin mermi çarpması sonucu, çevre seramiklerin görünümü - 2

7,62 mm kalibreli mermilerle yapılan atışlar sonucunda, 1 mm kalınlığında kompozit sargılı seramiklere sahip toplam 6 deney numunesinin 3 adedinde, Şekil 3.14.' te görüldüğü üzere mermi darbesine maruz seramiğin çevresindeki sadece 1 adet seramikte hasar görülmüştür. 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramiklere sahip deney numunelerinde ise yapılan altı deneyin tamamında mermi darbesine maruz seramiğin çevresindeki alümina seramiklerin hiçbirinde herhangi bir hasarın oluşmadığı gözlemlenmiş ve Şekil 3.12. ve Şekil 3.13. deney sonrası hasarsız numuneler gösterilmiştir. Şekil 3.14.' te çevresi 1 mm kalınlıkta kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesinde balistik deney sonrası çevre seramiklerinden sadece bir tanesinde hasarın oluştuğu görülmektedir.

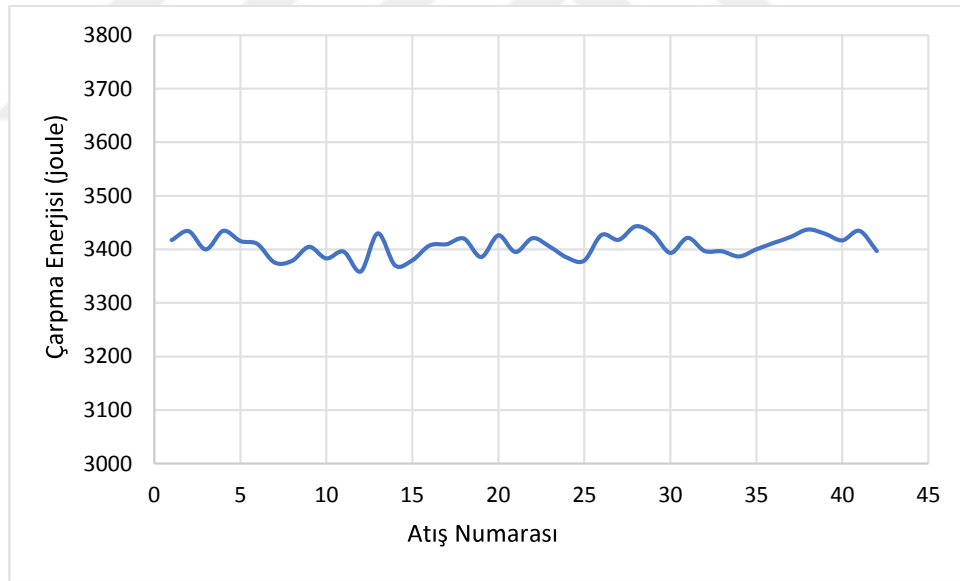


Şekil 3.14. Karbon liflerle 1 mm sarılmış numunenin deney sonucu

3.1.3.Mermi Hızlarının Tespiti

Mermi atışları kalibrasyonlu laboratuvar ortamında yapılmış olup merminin aynı noktadan geçerken hedefe üç metre kala iki farklı hız ölçüm cihazından ölçümü yapılmış olup ölçüm cihazlarından kaynaklı hatayı minimuma indirmek amacıyla iki ölçümün ortalaması referans değer olarak alınmış ve Çizelge 3.3.' te gösterilmiştir. Aynı zamanda Şekil 3.15.' te bu grafik çarpma enerjilerinin karbon/epoksi kompozit malzeme sargılı ve kompozit sargısız boşluklu numunelerde eşit şekilde dağılımını gösterebilmek için kullanılmıştır.

42 atışın ortalaması 3406 Joule olarak belirlenmiş olup, en hızlı ölçülen atış için 42 Joule, en yavaş ölçülen atış için 38 Joule olan sapma ölçülmüştür. Bunu ortalamayla kıyasladığında ise % +1.3 ve % -1.1' lik ufak ve ihmal edilebilir bir sapma olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.15. Mermilerin çarpma hızlarına bağlı numunelere uygulanan çarpma enerjileri (Joule)

Çizelge 3.3. Farklı ölçüm cihazından alınan ölçümler ve ortalama çarpma enerjileri

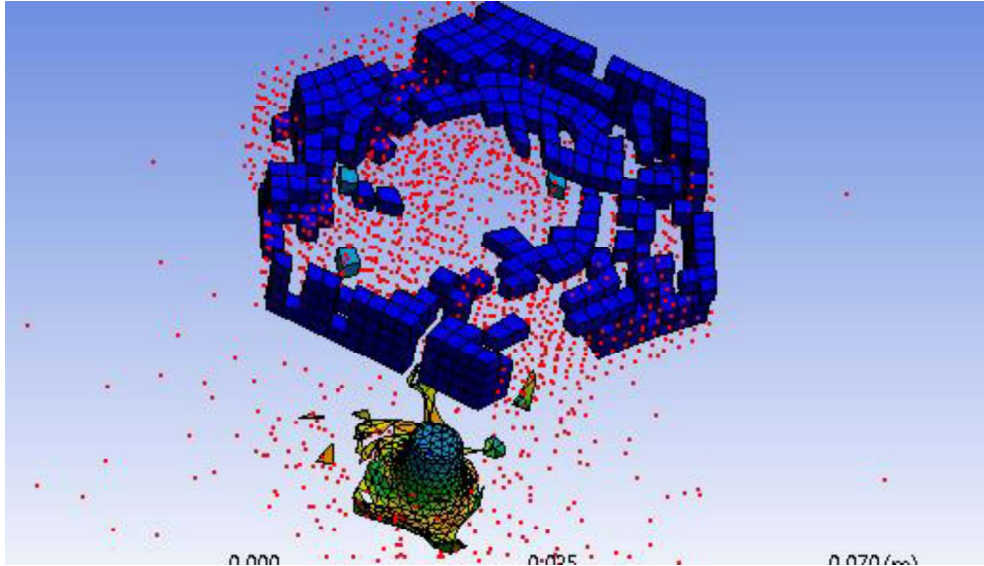
Atış Numarası	1. Ölçüm Cihazı	2. Ölçüm Cihazı	Ortalama Hız (m/sn)	Çarpma Enerjisi (joule)
1	843,45	839,73	841,59	3417,42
2	844,27	842,93	843,60	3433,76
3	841,45	837,37	839,41	3399,74
4	843,84	843,55	843,70	3434,54
5	840,78	841,94	841,36	3415,55
6	842,14	839,18	840,66	3409,87
7	836,18	836,57	836,38	3375,20
8	836,39	837,17	836,78	3378,47
9	840,08	839,95	840,02	3404,64
10	837,20	837,49	837,35	3383,03
11	838,80	839,09	838,95	3395,97
12	834,38	834,31	834,35	3358,83
13	843,14	843,07	843,11	3429,74
14	835,45	835,98	835,72	3369,87
15	836,47	837,37	836,92	3379,60
16	840,37	840,30	840,34	3407,24
17	840,53	840,72	840,63	3409,59
18	841,22	842,60	841,91	3420,02
19	837,55	837,84	837,70	3385,86
20	842,87	842,44	842,66	3426,08
21	838,47	839,15	838,81	3394,88
22	842,24	841,85	842,05	3421,12
23	839,95	840,10	840,03	3404,72
24	837,48	837,55	837,52	3384,41
25	836,74	836,94	836,84	3378,95
26	842,96	842,58	842,77	3427,01
27	841,82	841,40	841,61	3417,58
28	844,86	844,64	844,75	3443,13
29	842,85	843,12	842,99	3428,76
30	838,64	838,55	838,60	3393,14
31	842,67	841,50	842,09	3421,44
32	839,18	839,00	839,09	3397,15
33	838,75	839,25	839,00	3396,42
34	837,85	837,76	837,81	3386,75
35	839,48	839,41	839,45	3400,02
36	840,51	841,26	840,89	3411,70
37	842,21	842,43	842,32	3423,35
38	844,15	843,86	844,01	3437,06
39	842,84	843,19	843,02	3429,00
40	841,64	841,42	841,53	3416,93
41	843,75	843,64	843,70	3434,54
42	839,25	838,86	839,06	3396,86

4. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde kompozit desteği ile geliştirilmiş çevresi kompozit sargılı alümina seramik ön yüze sahip çelik zırhlar ile çevresi kompozit sargısız alümina seramikler ön yüze sahip çelik zırhların balistik davranışına ait analitik ve sayısal analiz sonuçları ile balistik deney sonuçları sunulmuştur. İlk olarak seramiklere ait hasar durumu için analiz ve deneysel sonuçlar verilmiş, daha sonra zırhın arka yüzeyindeki çelik plakaya ait analitik, sayısal ve deneysel sonuçlar sunulmuştur.

4.1. Tek Parça Kompozit Sargısız Seramiğin Sayısal Analiz Sonucu

Analizleri karmaşık hale getirmeden önce seramiklerin yekpare olarak tepkilerini görebilmek ve çözüme kolay olarak başlayabilmek için tek parça seramik analizleri yapılmıştır. Şekil 4.1.' de tek parça altıgen seramik altı kenar yüzeyinden sabitlenerek mermi çarptırılmıştır. Merminin genel literatürde var olan ve yaygın olarak deneysel sonuçlarından da elde edilen uç kısmının mantarlaşma oluşumu, analizde gözlemlenmiştir.



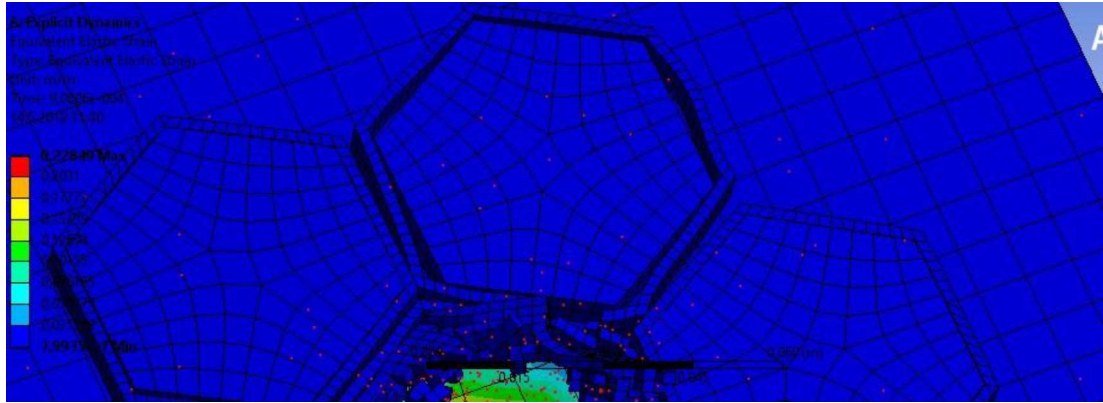
Şekil 4.1. Tek parça kompozit sargısız seramiğin sayısal analiz sonucu

değerleri Çizelge 4.1.' de verilmiştir. Kompozit sargıda oluşan gerilme durumları irdelendiğinde analiz sonucunda 1mm kalınlığındaki kompozit sargıda oluşan 1450 MPa lık maksimum normal gerilme değerinin kompozit sargının maksimum çekme dayanımı değeri olan 1400 MPa değerini geçtiği, benzer olarak 1,5 mm kalınlığındaki kompozit sargıda oluşan 968 MPa lık maksimum normal gerilme değerinin kompozit sargının maksimum çekme dayanımı değeri olan 1400 MPa değerininin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1. Kompozit Sargı Kalınlığına Bağlı Kompozite Gelen Gerilme Değerleri

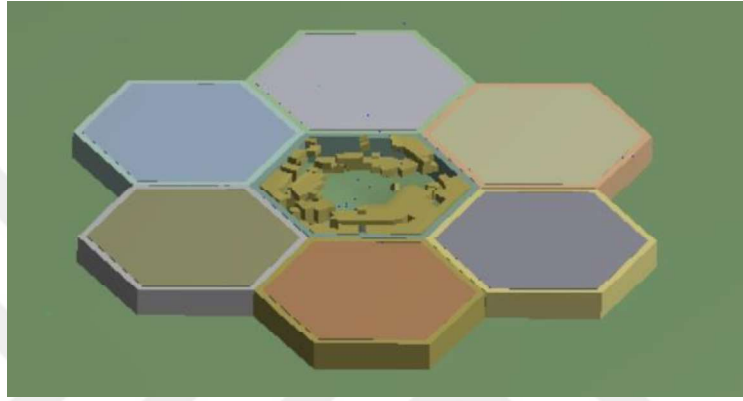
0,75 mm Kompozit Sargı	1 mm Kompozit Sargı	1,5 mm Kompozit Sargı
1930 (MPa)	1450 (MPa)	968 (MPa)

Şekil 4.3.' te 1 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın sayısal olarak yapılmış balistik analiz sonucu verilmiştir. Analizde zırh sisteminin merkezindeki seramiğe gelen mermi darbesi sonucu merkezdeki seramiğin tamamen parçalandığı, parçalanan seramiğin etkisi ile altı adet çevre seramiklerden sadece birinde kompozit sargının koptuğu ve aynı seramikte kırılma hasarının oluştuğu görülmektedir.

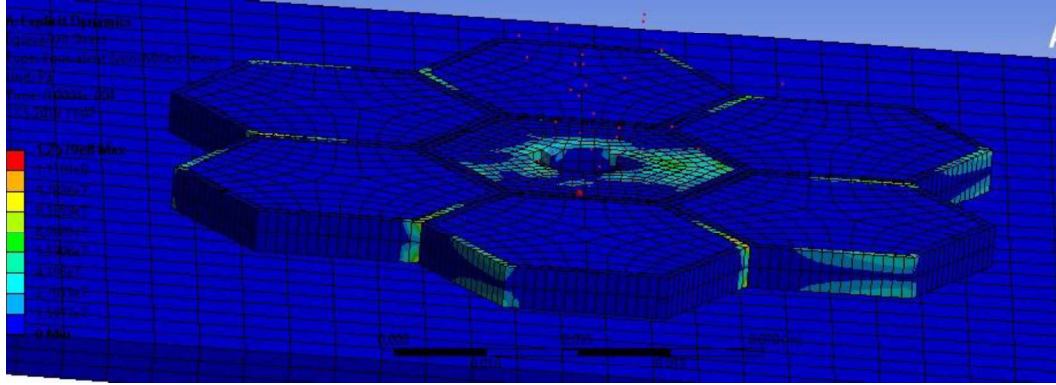


Şekil 4.3. 1 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analiz sonucu

Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.' te 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analiz sonucu verilmiştir. Analizde 1 mm sargılı analize benzer olarak zırh sisteminin merkezindeki seramiğe gelen mermi darbesi sonucu merkezdeki seramiğin tamamen parçalandığı, parçalanmış seramiğin etkisi ile 1 mm sargılı analizden farklı olarak altı adet çevre seramiklerden hiçbirinde kompozit sargının kopmadığı ve yine herhangi bir çevre seramiğinde kırılma hasarının oluşmadığı görülmektedir.

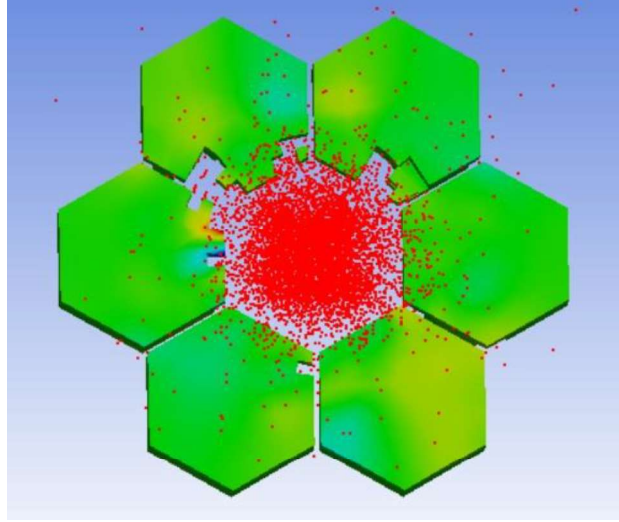


Şekil 4.4. 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analiz sonucu

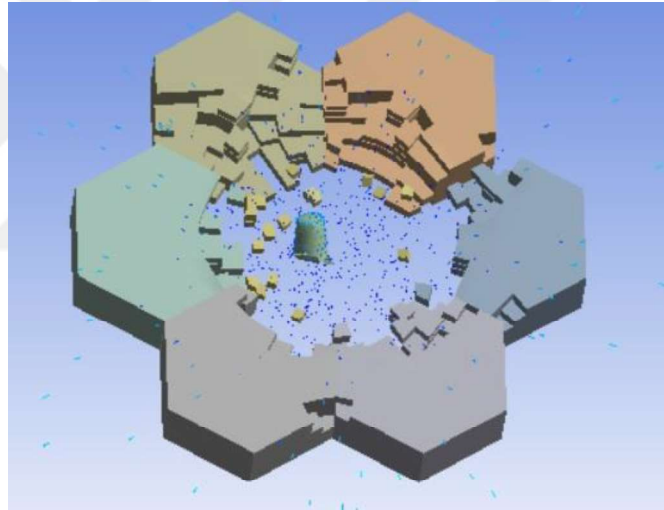


Şekil 4.5. 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhın balistik analizinde karbon kompozit üzerinde dağılan gerilmeler

Benzer olarak Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.' de sırasıyla kompozit sargısız araları 1 mm boşluklu ve boşluksuz seramik ön yüze sahip çelik zırhların sayısal analiz sonuçları verilmiştir. Analizlerde mermi darbesi sonucu çevre seramiklerin nerdeyse tamamının hasara uğradığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Kompozit sargısız araları 1 mm boşluklu seramik ön yüze sahip çelik zırhların sayısal analiz sonuçları



Şekil 4.7. Kompozit sargısız araları boşluksuz seramik ön yüze sahip çelik zırhların sayısal analiz sonuçları

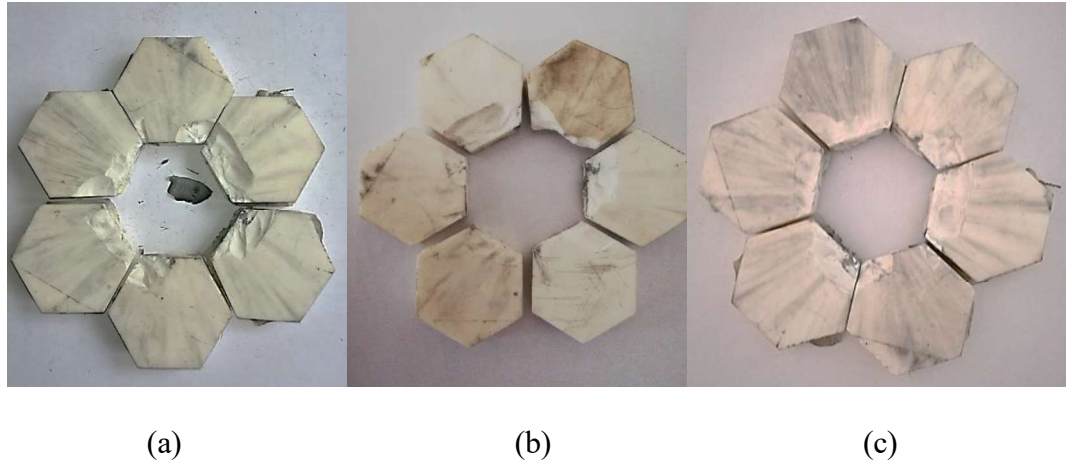
4.4. Seramik Hasarına Ait Balistik Deney Sonuçları

Sayısal analizlerden elde edilen tasarım parametreleri ışığında ön yüzünde çevresi kompozit sargılı ve kompozit sargısız seramikleri olan çelik zırhlara ait balistik deney numuneleri aşağıdaki Çizelge 4.2.' de verilen konfigürasyonlarda üretilmiş ve balistik deneylere tabi tutulmuştur. Deneylere yedi farklı tasarım konfigürasyonu test edilmiştir. Her bir konfigürasyon için 6 adet deney numunesi hazırlanmış ve toplam 42 adet atış testi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Seramik ön yüze sahip çelik zırh sisteminin farklı tasarım konfigürasyonları

Seramik Ön Yüze Sahip Çelik Zırhların Farklı Tasarım Konfigürasyonları	Üretilen Numune Sayısı
Çevresi kompozit sargısız, arası boşluksuz seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6
Çevresi kompozit sargısız, arası 0,75 mm boşluklu seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6
Çevresi kompozit sargısız, arası 1mm boşluklu seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6
Çevresi kompozit sargısız, arası 1,5 mm boşluklu seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6
Çevresi 0,75 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6
Çevresi 1 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6
Çevresi 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırha ait deney numunesi	6

Çevresi kompozit sargısız arası 0,75 mm, 1 mm, 1,5 mm boşluklu ve arası boşluksuz seramik ön yüze sahip çelik zırhların balistik deney sonrası hasar durumları sırasıyla Şekil 4.8.' de a), b), c) ve Şekil 4.9.'de verilmiştir. Hasar durumları irdelendiğinde her bir deney numunesinde bulunan tüm çevre seramiklerde kırılma hasarının olduğu görülmektedir.

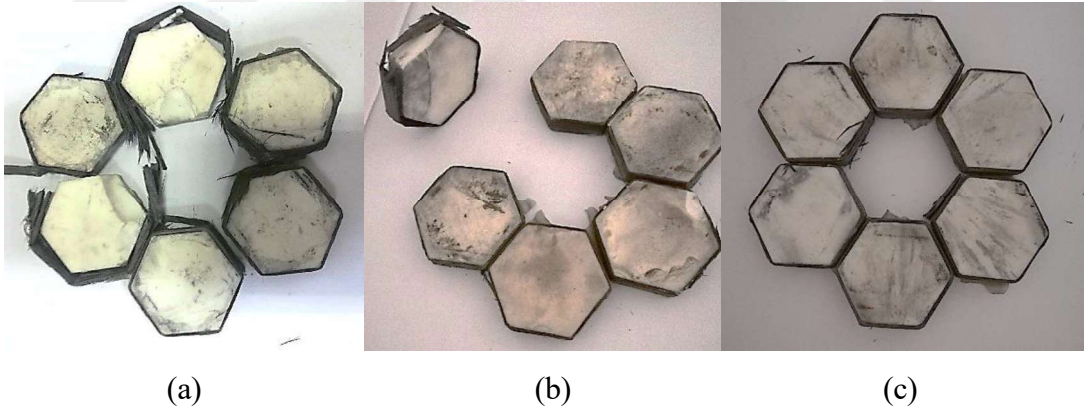


Şekil 4.8. Çevresi kompozit sargısız arası a) 0,75 mm, b) 1 mm ve c) 1,5 mm boşluklu seramik ön yüzü çelik zırhlarda çevre seramiklerin hasar durumu



Şekil 4.9. Çevresi kompozit sargısız arası boşluksuz seramik ön yüzlü çelik zırhta çevre seramiklerin hasar durumu

Arası boşluklu numunelere benzer olarak çevresi 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm kalınlıklarında kompozit sargılı seramik ön yüze sahip çelik zırhların balistik deney sonrası hasar durumları sırasıyla Şekil 4.10.' da a, b ve c de verilmiştir.



Şekil 4.10. Çevresi a) 0,75 mm, b) 1 mm ve c) 1,5 mm kalınlıklarında kompozit sargılı seramik ön yüzlü çelik zırhlarda çevre seramiklerin hasar durumu

Zırh sisteminin farklı tasarım konfigürasyonları için yapılan balistik deneyler sonrasında zırhın çevre seramiklerdeki hasar durumu detaylı olarak Çizelge 4.3.' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Balistik deney sonrası çevre seramiklerdeki hasar durumu

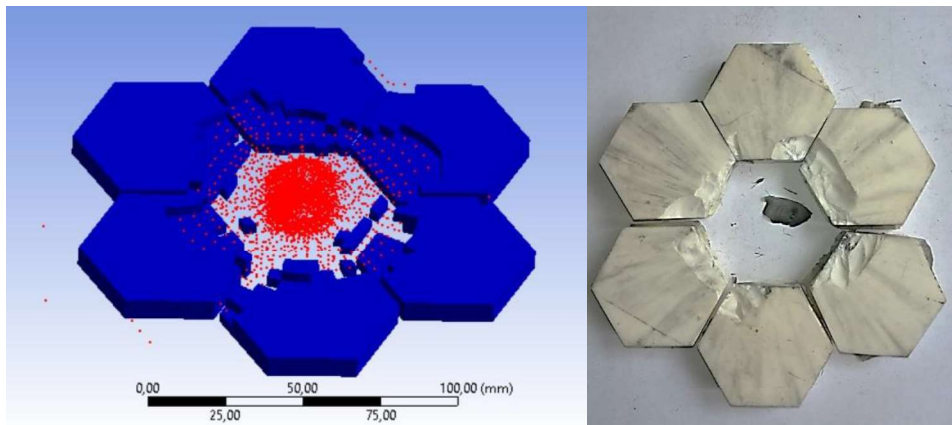
Çevresi Kompozit Sargılı ve Sargsız Altıgen Seramikler İçin Tek Atış Balistik Test Sonuçları							
Seramiklerin Sargı Durumu	Ortadaki Altıgen Seramiğe Komşu Çevre Seramiklerde Hasar Durumu						Ortalama Kırılan Seramik Sayısı
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	
Çevresi Kompozit Sargsız Altıgen Seramikler - Boşluksuz	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6
Çevresi Kompozit Sargsız Altıgen Seramikler - 0,75 mm Boşluklu	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6
Çevresi Kompozit Sargsız Altıgen Seramikler - 1 mm Boşluklu	5 Seramik Hasarlı	5 Seramik Hasarlı	5 Seramik Hasarlı	4 Seramik Hasarlı	5 Seramik Hasarlı	5 Seramik Hasarlı	4,83
Çevresi Kompozit Sargsız Altıgen Seramikler - 1,5 mm Boşluklu	4 Seramik Hasarlı	4 Seramik Hasarlı	4 Seramik Hasarlı	4 Seramik Hasarlı	3 Seramik Hasarlı	4 Seramik Hasarlı	3,83
Çevresi 0,75 mm Kalınlığında Kompozit Sargılı Seramikler	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6 Seramik Hasarlı	6
Çevresi 1 mm Kalınlığında Kompozit Sargılı Seramikler	1 Seramik Hasarlı	Hasar Yok	1 Seramik Hasarlı	Hasar Yok	1 Seramik Hasarlı	Hasar Yok	0,5
Çevresi 1,5 mm Kalınlığında Kompozit Sargılı Seramikler	Hasar Yok	Hasar Yok	Hasar Yok	Hasar Yok	Hasar Yok	Hasar Yok	0

Yapılan testler sonucu çevresi kompozit sargısız seramiklere sahip zırh sistemleri için tüm deneylerde çevre seramiklerin çoğunun hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sargısız numunelerde boşluk mesafesinin artması hasara uğrayan çevre seramiklerin sayısının azalmasına sebep olmaktadır. Arası boşluksuz ve arası 0,75 mm boşluklu kompozit sargısız numunelerin çevre seramiklerinde oluşan seramik hasarı sayısı ortalama altı adet iken, yine arası 1,5 mm boşluklu kompozit sargısız numunelerin çevre seramiklerinde oluşan seramik hasarı sayısı ortalama 3,83' e düşmektedir.

Çevresi kompozit sargılı seramiklere sahip zırh sistemlerinin balistik deney sonuçları incelendiğinde ise 0,75 mm kalınlığındaki kompozit sargılı numunelerin tümünde ve çevre seramiklerin tamamında kompozit sargıların koptuğu ve kırılma hasarının olduğu görülmektedir. 1 mm kompozit katman kalınlığına sahip numunelerde test numunelerinin sadece üçünde hasarın olduğu hasara uğrayan numunelerin çevre seramiklerden sadece birinde kompozit sargının koptuğu ve aynı çevre seramiğin hasara uğradığı gözlemlenmiştir. 1,5 mm kompozit katman kalınlığına sahip numunelerde çevre seramiklerde herhangi bir kompozit sargı kopmasının ve hasarın oluşmadığı tespit edilmiştir.

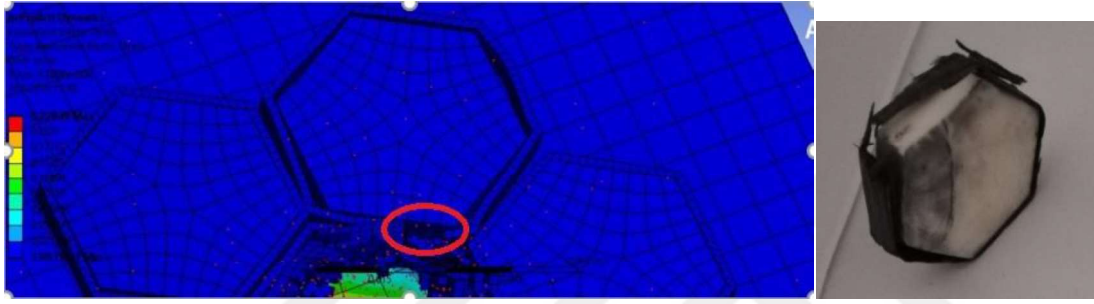
4.5. DeneySEL Sonuçları ile Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deney ve sayısal analiz sonuçları irdelendiğinde kompozit sargısız seramiklerde oluşan hasar durumunun sayısal analiz sonuçları ile uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.11.' de hem sayısal hem de deneySEL hasar durumunun benzerliği gösterilmiştir.

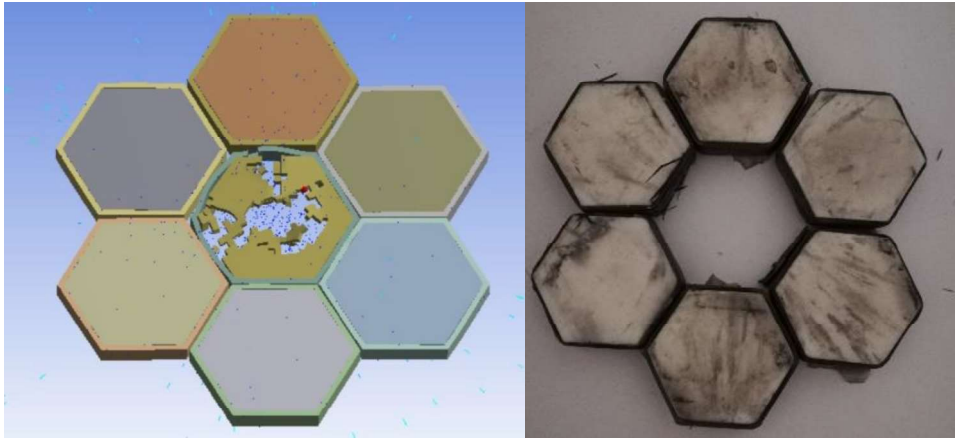


Şekil 4.11. Çevre seramiklerde oluşan hem sayısal hem de deneySEL hasar durumu

Benzer olarak kompozit sargılı numuneler için deney sonuçları ve sayısal analiz sonuçları irdelendiğinde; deneysel olarak elde edilen 1 mm kalınlıkta kompozit sargılı seramikler için çevre seramiklerin bir tanesinde oluşan kompozit sargı kopması ve aynı seramikteki kırılma hasar durumunun sayısal analiz sonuçları ile uyum içinde olduğu Şekil 4.12.' de gösterilmiştir. Benzer olarak yine elde edilen 1,5 mm kalınlıkta kompozit sargılı seramikler için çevre seramiklerin hiçbirinde herhangi bir kompozit sargı kopması ve kırılma hasarının oluşmaması durumunun sayısal analiz sonuçları ile uyum içinde olduğu Şekil 4.13.' te gösterilmiştir.



Şekil 4.12. 1 mm kompozit sargılı numunelerin çevre seramiklerde oluşan hem sayısal hem de deneysel hasar durumu



Şekil 4.13. 1,5 mm kompozit sargılı numunelerin çevre seramiklerde oluşan hem sayısal hem de deneysel hasar durumu

Deney ve sayısal analiz sonuçları irdelendiğinde kompozit sargılı seramiklerde oluşan hasar durumunun sayısal analiz sonuçları ile uyum gösterdiği anlaşılmaktadır.

4.6. Seramik Hasarının Nicelik Olarak İrdelenmesi

Balistik atışlarda; numuneler kompozit sargısız varsa KSZ olarak kodlanmış ve yanına aradaki boşluk miktarı (mm) ve atış numarası olarak numaralandırılmıştır. Kompozit sargılı numuneler ise KS olarak kodlanmış, yanına sarım kalınlığı ve atış numarası gelecek şekilde düzenlenmiştir.

Çizelge 4.4.' te arası boşluksuz ve boşluklu bırakılan numunelerin, atış sonrası, atış yapılan seramiğin çevresinden tahrip olan, eksilen kütle miktarları ve hasar gören seramik sayıları gösterilmektedir. Karbon fiber sarımlı numuneler için ölçülen değerler ise Çizelge 4.5.' te gösterilmiştir. Her bir seramik 68 gr olup, merminin çarpıp tahrip ettiği ortadaki alümina seramik hariç, hasar görme ihtimali olan çevredeki altı seramik için toplam 408 gr ağırlık mevcuttur.

Çizelge 4.4. Arası boş bırakılan numunelerde gerçekleşen malzeme kaybı

Atış Numarası	Boşluk Mesafesi (mm)	Test Numarası	Seramikten Eksilen Kütle Miktarı (gr)	Kırılan Seramik Sayısı
1	KSZ 0 (0 mm)	1	158,54	6/6
2		2	161,84	6/6
3		3	159,8	6/6
4		4	162,48	6/6
5		5	152,68	6/6
6		6	156,15	6/6
7	KSZ 0,75 (0,75 mm)	1	75,33	6/6
8		2	78,16	6/6
9		3	71,01	6/6
10		4	74,81	6/6
11		5	65,12	6/6
12		6	72,48	6/6
13	KSZ 1 (1 mm)	1	14,37	4/6
14		2	16,67	5/6
15		3	18,53	5/6
16		4	14,72	5/6
17		5	16,22	5/6
18		6	18,09	5/6
19	KSZ 1,5 (1,5 mm)	1	9,47	4/6
20		2	10,03	4/6
21		3	9,59	4/6
22		4	12,45	4/6
23		5	9,89	4/6
24		6	9,15	3/6

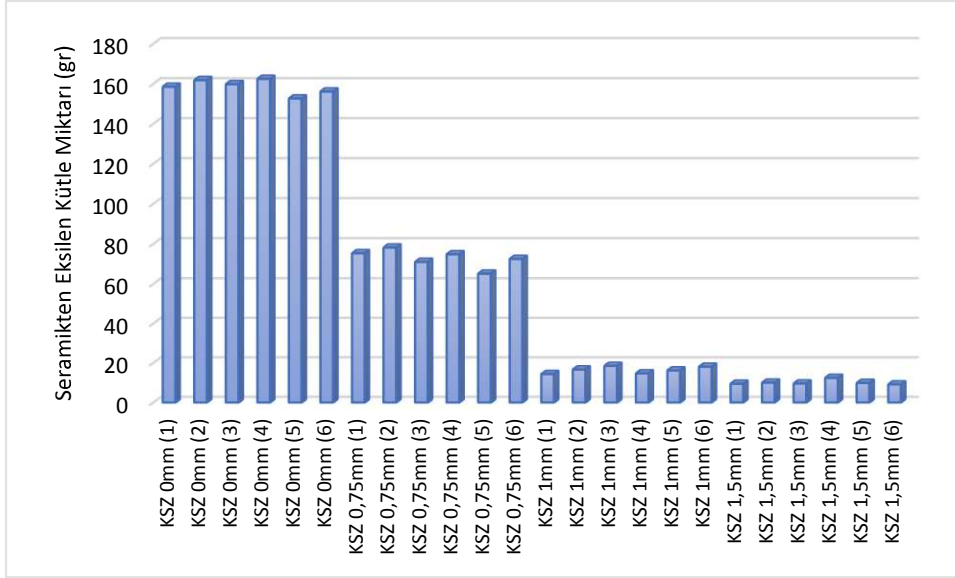
Boşluklu olarak hazırlanan numunelerde aradaki boşluk arttıkça parçalanen kütle kaybı azalırken aynı zamanda 1,5 mm' den itibaren hasar gören seramik sayısında da azalma olduğu görülmektedir.

Karbon fiber sarımlı numuneleri kendi içinde değerlendirildiğinde 0,75 mm sarıldığında herhangi bir etki görülmemesine karşın 1 mm kalınlığa çıkıldığında bariz olarak iyileşme görüldüğü tespit edilmiştir.

Çizelge 4.5. Karbon fiber sarımlı numunelerde gerçekleşen malzeme kaybı

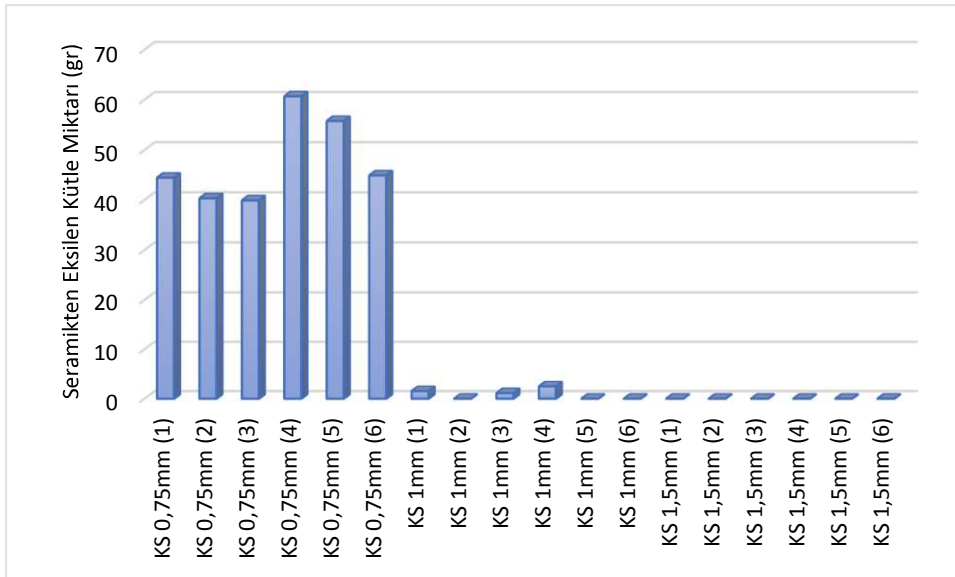
Atış Numarası	Boşluk Mesafesi (mm)	Test Numarası	Seramikten Eksilen Kütle Miktarı (gr)	Kırılan Seramik Sayısı
25	KS 0,75 (0,75 mm)	1	44,46	6/6
26		2	40,35	6/6
27		3	39,94	6/6
28		4	60,72	6/6
29		5	55,78	6/6
30		6	44,92	6/6
31	KS 1 (1 mm)	1	1,55	1/6
32		2	0	0/6
33		3	1,15	1/6
34		4	2,5	1/6
35		5	0	0/6
36		6	0	0/6
37	KS 1,5 (1,5 mm)	1	0	0/6
38		2	0	0/6
39		3	0	0/6
40		4	0	0/6
41		5	0	0/6
42		6	0	0/6

Boşluklu ve sarımlı numunelerden tahrip olan kütle miktarları grafik üzerinden daha iyi incelenmesi amacıyla Şekil 4.14. ve Şekil 4.15. hazırlanmıştır. Şekil 4.14.' te sarımsız olan numunelerin arasındaki mesafe açıldıkça, tahrip olan miktarın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.14. Kompozit sargısız numunelerin çevre seramiklerde oluşan kütle kaybı

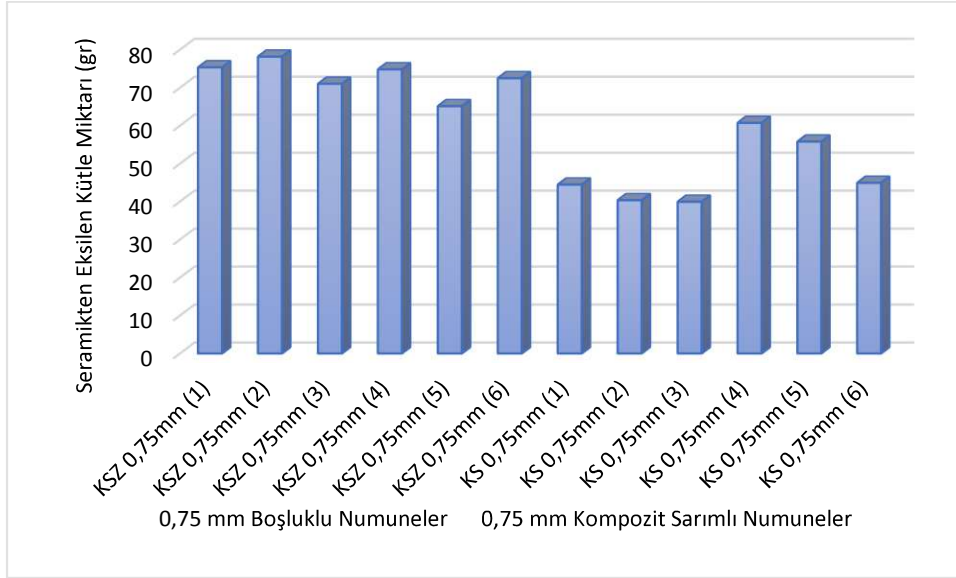
Çizelge 4.4.' te karbon fiber sarımlı numunelerin balistik sonuçları incelendiğinde 1 mm sarımda bile 6 adet atış için, sadece üç adedinde, birer adet seramiğin hasar gördüğünü görülmektedir. Çevresel seramiklerin hasara uğrayacağı kritik karbon fiber sarımı için bu ölçü bu şartlar altında kabul edilebilir bir değerdir. 1,5 mm sarım kalınlığına çıkıldığında numunelerin tamamen hasarsız kaldığı görülmektedir.



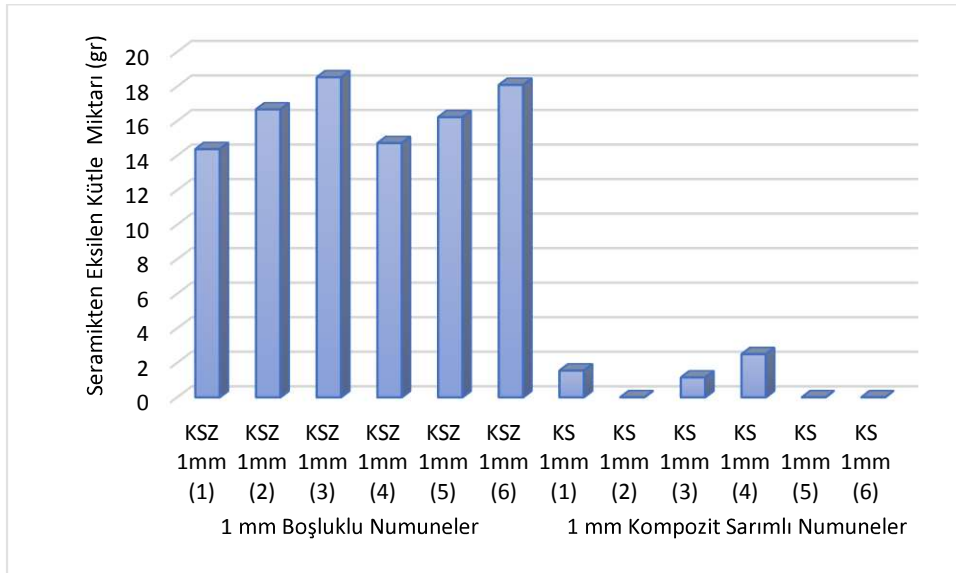
Şekil 4.15. Kompozit sarımlı numunelerin çevre seramiklerde oluşan kütle kaybı

Aynı şekilde boşluk ve sarım miktarları aynı olan numunelerin sonuçlarını kıyaslamak için; 0,75 mm için Şekil 4.16., 1 mm için Şekil 4.17., 1,5 mm için Şekil 4.18.

incelenebilir. Şekil 4.16. incelendiğinde boşluklu numunelerde ortalama kütle kaybının 72,8 gr olduğu, sarımlı numunelerde ise 47,7 grama düştüğü yani % 35 kütle kaybında iyileşme görülmesine rağmen çevresindeki seramiklerin tamamının bir miktar hasara uğradığı tespit edilmiştir.



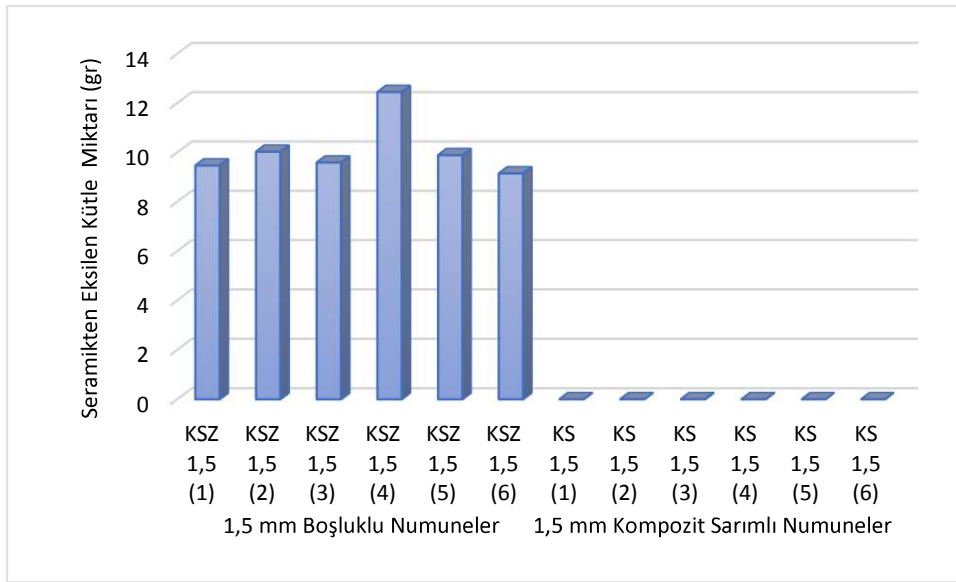
Şekil 4.16. 0,75 mm boşluklu ve kompozit sarımlı numunelerde oluşan hasar karşılaştırılması



Şekil 4.17. 1 mm boşluklu ve kompozit sarımlı numunelerde oluşan hasar karşılaştırılması

Şekil 4.17.' de görüldüğü üzere 1 mm boşluklu ve sarımlı numuneler kıyaslandığında 1 mm boşluklu numunelerin ortalama kaybının 16,4 gr, sarımlı numunelerin ise 0,9 gr olduğu ve sadece 6 numunenin üç adedinde, birer adet seramiğinde hasar olduğu tespit edilmiş ve güvenli olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Şekil 4.18.' de görüldüğü üzere boşluk ve sarım miktarı 1,5 mm' ye çıkarıldığında; boşluklu seramiklerde ortalama 3,83 adet ve ortalama kütle kaybı 10,1 gram olarak ölçülürken, sarımlı numunelerde kırılma görülmemiş ve tamamen güvenli olduğu gözlemlenmiştir.



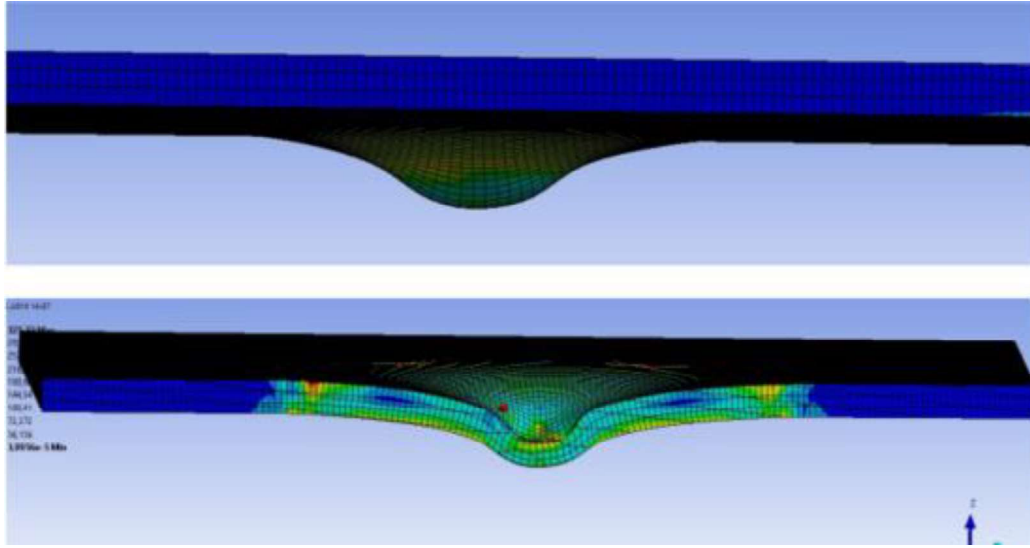
Şekil 4.18. 1,5 mm boşluklu ve kompozit sarımlı numunelerde oluşan hasar karşılaştırılması

4.7. Zırh Sistemine Gelen Mermi Darbesi Sonucu Çelik Plakada Oluşan Deformasyon Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde seramik ön yüzlü çelik zırh sistemine gelen mermi darbesi sonrası zırhın arka kısmında yer alan çelik plakanın plastik deformasyonu analitik ve sayısal analizler yardımıyla hesaplanmış daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte seramiklere yapılan kompozit sargının zırh sistemine ait çelik plakada mermi darbesi sonrası oluşan plastik deformasyona herhangi bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında plastik deformasyonun gözlemlenebilmesi için çelik plaka malzemesi olarak çalışmanın daha

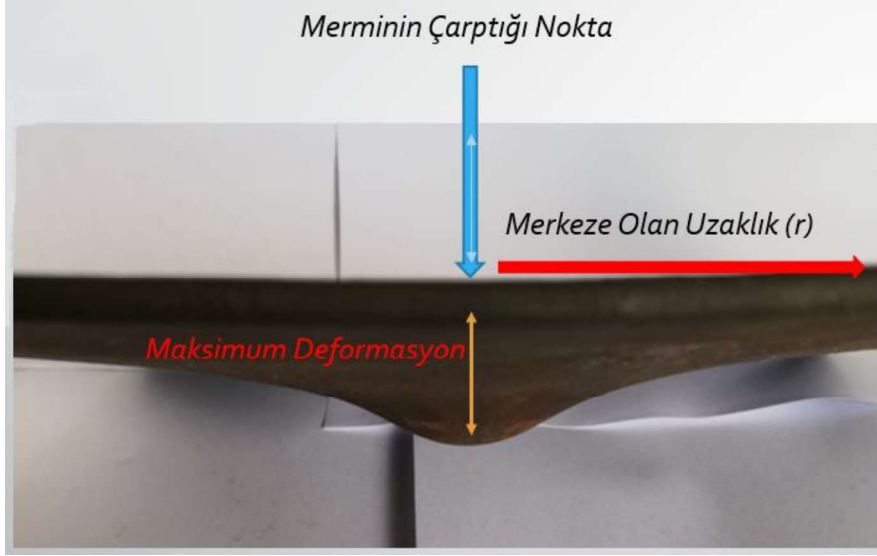
önceki analiz ve balistik deneylerinde kullanılan hardox çeliği yerine daha sünek bir çelik olan S235 çeliği tercih edilmiş, analizler ve deneyler bu zırh tasarımında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan sayısal analizlerden zırh sistemine gelen mermi darbesi sonrası S235 çelik plakada oluşan plastik deformasyon Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Analiz sonucunda çelik plakada maksimum 11,57 mm'lik bir yer değiştirmenin meydana geldiği tespit edilmiştir.



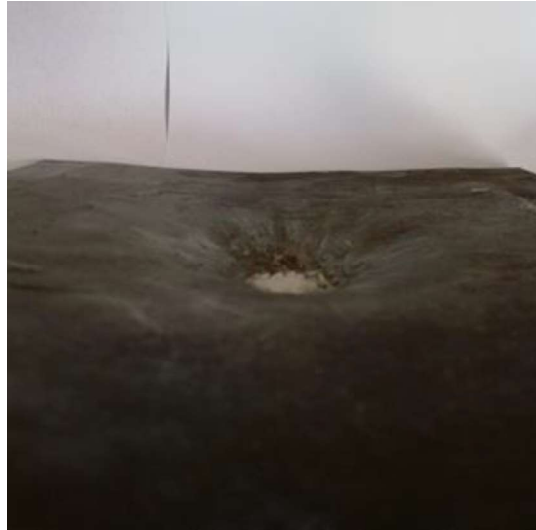
Şekil 4.19. Çelik plakanın plastik deformasyon sonrası kesit görünüşü

Sonrasında yapılan balistik deneyler sonucu çelik plakada meydana gelen plastik deformasyon durumu Şekil 4.20.' de verilmiştir. Yapılan deneylerden zırh sistemine ait çelik plakada maksimum yer değiştirmenin 14,87 mm olduğu ölçülmüştür.



Şekil 4.20. Zırh sistemine ait deney numunesi üzerinde yapılan balistik deney sonrası çelik plakada meydana gelen plastik deformasyon

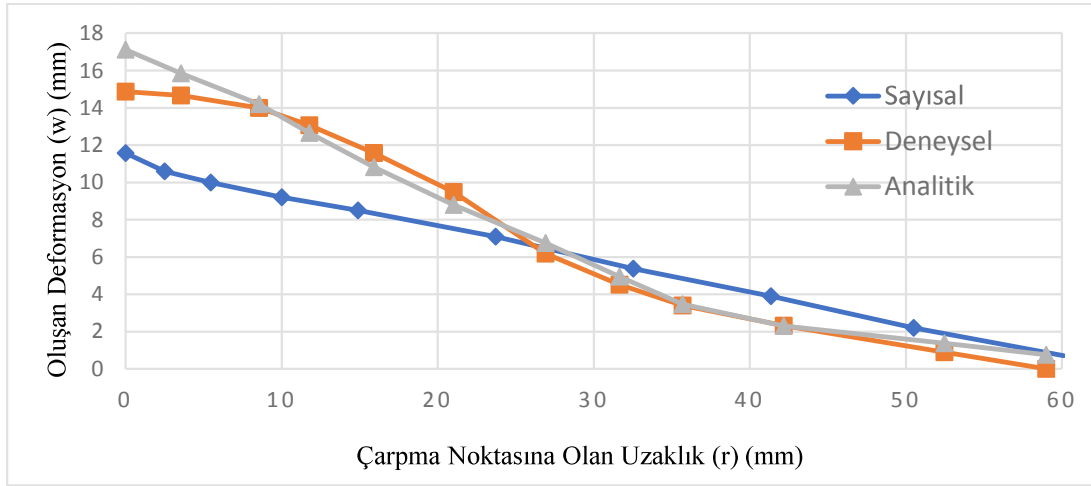
Seramiklerde meydana gelen konik kırılma sonucu oluşan kırıklar çelik yüzeye etki etmektedir. Balistik deney sonrası çevresel seramikler kaldırıldıktan sonra çeliğe nüfus etmiş olan, parçalanma sonucu oluşan kırık alümina seramik parçalar Şekil 4.21.' de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. Seramiklerin çelik yüzeye kırıklar halinde yapışmış görüntüsü

Yapılan balistik deneyler sonucu arka yüzeydeki çelik plakada oluşan deformasyona ait sehim eğrisi hem sayısal analiz çözümü hem de analitik çözümle karşılaştırılmıştır.

Çelik plakaya ait sehim eğrisi için analitik çözüm *Hill 'in Membran teorisinden* elde edilen şekil değiştirme denklemleri kullanılarak *Matlab' da* yazılan bir program yardımıyla elde edilmiştir. Analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle bulunmuş çelik plakanın plastik deformasyonuna ait sehim eğrileri Şekil 4.22.' de gösterilmiştir. Sehim eğrilerindeki maksimum yer değiştirmeler incelendiğinde; deneysel sonucun 14,87 mm, analitik sonucun 16,51 mm ve sayısal analizden elde edilen sonucun 11,57 mm olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre analitik sonuçların % 11 ve sayısal sonuçların ise % 22 farkla deneysel sonuçlara yakınsadığı belirlenmiş olup çıkan sonuçların oldukça gerçekçi olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.22. Sayısal, deneysel ve analitik deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması

Tez çalışmasında çelik plakada oluşan plastik deformasyonun analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle irdelenmesinden sonra seramiklere yapılan kompozit sargının çelik plakada oluşan plastik deformasyona etkisinin incelenmesine geçilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında 1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı ve kompozit sargısız 1,5 mm arası boşluklu deney numunelerinden üçer adet üretilmiş ve toplam altı adet atış testi gerçekleştirilmiştir. Numunelere yapılan atış testleri sonucunda elde edilen maksimum plastik deformasyon değerleri Çizelge 4.6.' da verilmiştir.

1,5 mm kalınlığında kompozit sargılı ve 1,5 mm arası boşluklu kompozit sargısız test numunelerine 7,62 mm kalibreli mermi ile yapılan atış testleri sonucunda numunelerin arka yüzündeki çelik plakada oluşan maksimum deformasyonlar incelendiğinde deney

ortalamalarının farkının % 1' den az olduğu görülmüştür. Çıkan % 1' den küçük farkın kompozit sargının zırhın arka yüzeyindeki çelik plakanın plastik deformasyonuna etkisinin ihmal edilebilir seviyelerde olduğu tespit edilmiştir..

Çizelge 4.6. Çelik yüzeyde oluşan maksimum deformasyonlar

	1. Deney (mm)	2. Deney (mm)	3. Deney (mm)
1,5 mm Karbon Fiber Sargılı	14,98	14,92	14,88
1,5 mm Boşluklu	14,86	14,91	14,95

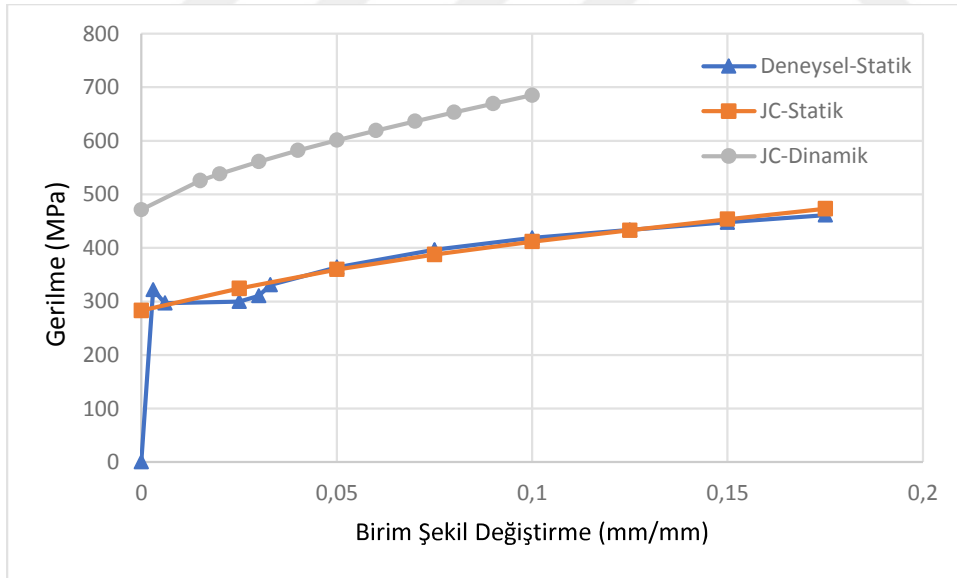
4.8. Zırh Sistemine Gelen Mermi Darbesi Sonucu Çelik Plakada Oluşan Gerilme Durumu

Tez çalışmanın bu kısmında zırh sistemine gelen mermi darbesi sonucu S235 çelik plakada oluşan von Mises efektif plastik gerilme durumu incelenmiştir. Öncelikle sayısal analiz yardımıyla zırhın çelik plakasında mermi darbesi sonucu oluşan maksimum von Mises plastik gerilmesi bulunmuş ve Şekil 4.23 te gösterilmiştir. Daha sonra sayısal analiz yardımıyla bulunan gerilmenin balistik deney boyunca çelik plakanın maruz kaldığı birim şekil değiştirme hızında S235 çeliğine ait akma ve çekme dayanımı değerleri ile karşılaştırması yapılmıştır. Çelik plakanın mermi darbesi esnasında maruz kaldığı birim şekil değiştirme hızının tayini için sayısal analizden analizin gerçekleşme süresi ve plakanın bu süre esnasında toplam deformasyonu sırasıyla 0,001 sn ve 10 mm olarak elde edilmiştir. Bulunan değerler yardımıyla çelik plakanın birim şekil değiştirme hızı formülünden ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$) 15000 s^{-1} olarak bulunmuştur.

JC malzeme modeli yüksek hızlarda malzemelerin plastik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini veren bir malzeme modelidir. Bu özelliği ile S235 çeliğinin, plakanın maruz kaldığı 15.000 s^{-1} birim şekil değiştirme hızında dinamik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi yine S235 çeliğinin pekleşme parametreleri kullanılarak JC malzeme modeli yardımıyla Şekil 4.23.' de çizilmiştir. Aynı grafikte P. Verleysen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmadan [70] alınmış olan S235 çeliğinin deneysel olarak statik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi ve JC malzeme modeli kullanılarak

statik gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi de gösterilmiştir. Bahsi geçen referansta S235 çelik malzemesine Split-Hopkinson testiyle birbirinden farklı yüksek hızlarda yapılan deneyler sonucunda S235 çeliğinin 0,1 mm/mm birim şekil değiştirme değerinde maksimum çekme dayanımına ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca referans çalışmada S235 çelik malzemesine ait maksimum çekme dayanımının, baz alınan birbirinden farklı yüksek şekil değiştirme hızlarında 0,1 mm/mm birim şekil değiştirme değerinde meydana geldiği ve şekil değiştirme hızının artmasıyla maksimum gerilme noktasındaki şekil değiştirme değerinin değişmediği gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle S235 çeliğinin 15.000 s^{-1} şekil değiştirme hızında maksimum çekme mukavemeti değerine 0,1 mm/mm şekil değiştirmesinde ulaşacağı kabul edilmiştir.

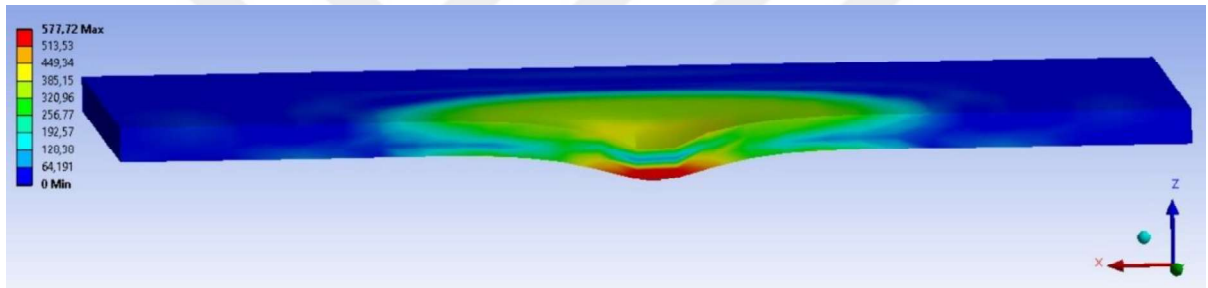
Şekil 4.23.' ten de görüleceği üzere S235 çelik malzemesinin 15.000 s^{-1} şekil değiştirme hızında JC malzeme modeli yardımıyla çizdirilen plastik gerilme-şekil değiştirme grafiğinde malzemenin akma dayanımının 471 MPa ve çekme dayanımının 685 MPa olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.23. JC malzeme modelinin gerilme-gerinim grafiği

Zırh sisteminin balistik sayısal analizinde çelik plakada mermi darbesi sonucu maksimum 578 MPa von Mises efektif plastik gerilmesinin oluştuğu, bu gerilme

değerinde plakada herhangi bir delinme ve yırtılmanın oluşmadığı tespit edilmiş ve Şekil 4.24.' te gösterilmiştir. Bununla beraber sayısal analiz sonucunda plakada oluşan 578 MPa von Mises efektif plastik gerilme değerinin yukarıda analitik olarak bulunan S235 malzemesinin 15.000 s^{-1} gerinim hızında sahip olduğu akma ve çekme dayanımı değerlerinin arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Çelik plakada oluşan gerilme değerinin analitik olarak hesaplanmış malzemeye ait çekme mukavemetinin altında kalması, plakada sadece plastik deformasyonun oluşacağı ve herhangi bir delinme ve yırtılmanın oluşmayacağı anlamına gelmekte olup, bu durumun ayrıca sayısal analiz sonucu ile de uyum sağladığı tespit edilmiştir. Son olarak sayısal analizden ve malzemenin dayanım değerleri ile yapılan karşılaştırmadan elde edilen plakada ki herhangi bir hasarın olmadığı plastik deformasyon durumu balistik deney sonucu ile de doğrulanmıştır.



Şekil 4.24. Çelik plakada oluşan von Mises efektif gerilme dağılımı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında günümüz savunma sistemlerinde önemli bir yere sahip olan ve ülkemizde üretilen altıgen seramik ön yüze sahip çelik zırhlarda ilk mermi darbesine maruz kalan altıgen seramiğin çarpışma anında hasara uğrayıp kırılması ile çevresinde bulunan diğer altıgen seramiklere verdiği zararı en aza indirmek için kompozit malzeme desteği ile yeni bir tasarımın yapılması amaçlanmıştır.

Yapılan tasarımın ilk aşamasında, ön yüzündeki altıgen seramiklerin çevresi farklı kalınlıklarda kompozit malzeme ile sarılmış çelik plakalı zırh sistemine gelen 7,62 mm kalibreli mermi darbesinin sayısal analizleri *Ansys Explicit/Dynamic* sonlu eleman programında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kompozit sargılı zırh sisteminin kompozit sargısız zırh sistemine göre daha iyi balistik performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Daha sonra sayısal analizlerden elde edilen tasarım parametreleri ışığında kompozit sargılı ve sargısız zırh sistemlerinin üretimleri gerçekleştirilip balistik atış testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan analizler ve balistik deneyler neticesinde seramik ön yüzü çelik zırhlarda çevre seramiklerin ilk mermi darbesi sonrası maruz kaldığı hasarı en aza indirecek optimum kompozit sargı kalınlığı ile arka yüzeyde bulunan çelik plakanın plastik deformasyonuna ait uygun analiz çözümleri elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Seramikleri kompozit sargısız ve arası boşluklu olarak hazırlanan zırh sistemine ait deney numunelerinde mermi darbesi sonrası çevre seramiklerin çoğunda hasarın olduğu yapılan tüm deneyler sonrasında gözlemlenmiştir. Kompozit sargısız ve arası boşluklu deney numunelerinin çevre seramiklerdeki hasar durumu 0,75 mm boşluk için ortalama altı adet, 1 mm boşluk için ortalama 4,83 adet ve 1,5 mm boşluk için ortalama 3,67 adet olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar seramik arası boşluk mesafesinin artmasının seramikteki hasar oranını azalttığını göstermektedir.

Seramikleri kompozit sargılı olarak hazırlanan deney numunelerinde mermi darbesi sonrası çevre seramiklerin hasar durumu incelendiğinde özellikle 1 mm ve 1,5 mm

kalınlıktaki kompozit sargılı numuneler için neredeyse kırılma hasarının hiç oluşmadığı gözlemlenmiştir. Kompozit sargılı deney numunelerinde yapılan testlerde her bir deneydeki hasar durumu; 0,75 mm kompozit kalınlık için ortalama 6 adet, 1 mm kompozit kalınlık için ortalama 0,5 adet ve 1,5 mm kompozit kalınlık için hasar oluşmadığı görülmüştür.

Yapılan deneyler sonrası 1,5 mm kompozit sargılı numunelerin çevre seramiklerinin hiçbirinde hasar meydana gelmemiştir. Bundan dolayı 1,5 mm kompozit sargılı seramiklerin, çoklu mermi atışlarında çevresindeki seramikler için % 99,99 güvenilir olduğu söylenebilir. Yine 1 mm kompozit sargılı numuneler için yapılan altı adet deneyin üç tanesinde sadece birer adet çevre seramikte hasar oluştuğu gözlemlenmiştir.

Yapılan atış testleri sonucu çevre seramiklerde oluşan kırılma hasarlarının sonlu eleman yöntemi ile yapılan sayısal analizi sonuçları ile benzer sonuçlar göstermiş olması sayısal analizlerde simüle edilmeye çalışılan zırh sistemine ait malzeme, sınır şartları ve yükleme modellerinin uygun olarak seçildiğini göstermiştir.

7,62 mm kalibreli mermi darbesi sonrası zırhın çelik plakasında oluşan plastik deformasyona ait maksimum yer değiştirme değeri; deneysel olarak 14,87 mm, analitik olarak; 16,51 mm ve sonlu elemanlar analizinde 11,57 mm olarak tespit edilmiştir. Analitik kısmın % 11, sonlu elemanlar analizinin % 22 olarak sapmayla deneysel sonuçları yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca çelik plakaya ait sehim eğrisinin yine deneysel, sayısal ve analitik olarak birbirine benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçların birbiri ile uyumluluk göstermesi özellikle analitik ve sayısal analizlerin güvenilirliği noktasında önemli bir doğrulama olarak düşünülmektedir.

Son olarak Zırh sisteminin balistik sayısal analizinde çelik plakada mermi darbesi sonucu maksimum 578 MPa von Mises efektif plastik gerilmesinin oluştuğu, bu gerilme değerinde plakada herhangi bir delinme ve yırtılmanın oluşmadığı tespit edilmiştir. Plakada meydana gelen 578 MPa von Mises efektif plastik gerilme değerinin analitik olarak bulunan S235 malzemesinin 15.000 s^{-1} gerinim hızında sahip olduğu akma ve çekme dayanımı değerlerinin arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Çelik plakada oluşan gerilme değerinin analitik olarak hesaplanmış malzemeye ait çekme mukavemetinin

altında kalması, plakada sadece plastik deformasyonun oluşacağı ve herhangi bir delinme ve yırtılmanın oluşmayacağı anlamına gelmekte olup, bu durumun ayrıca sayısal analiz sonucu ve deney sonuçları ile de uyum sağladığı tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması ile oldukça karmaşık bir malzeme yapısına sahip zırh sisteminin balistik davranışının sonlu eleman yöntemiyle modellenebileceği gösterilmiştir. Balistik deneylerin hem özel imkânlar gerektirmesi hem de maliyetinin yüksek olduğu düşünüldüğünde araştırmacılar için sonlu eleman yönteminin balistik analizlerde önemli bir alternatif çözüm yöntemi olabileceği söylenebilir.

İleriki çalışmalarda, çevresi kompozit sargılı seramik ön yüzlü çelik zırhlar için farklı mermi tipleri ve mermi giriş açıları için balistik atış analizleri ve deneyleri tekrarlanabilir. Seramiklerin çevresini kompozitle sarmak yerine tüm yüzeyi SMC (Sheet Moulding Composite) denilen yöntemle kalıpta kompozit kaplayarak balistik atış analizleri ve deneyleri yapılabilir. İnsan üzerinde etkin olarak kullanılan balistik yeleklerde, tek parça konulan seramiğin, çok parçalı ve kompozit sargılı olarak tasarlanması ile çoklu atış testleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. L. Wilkins, "Mechanics of penetration and perforation," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 11, pp. 793–807, 1978.
- [2] D. A. Shockey, A. H. Marchand, S. R. Skaggs, G. E. Cort, M. W. Burkett, and R. Parker, "Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 263–275, 1990.
- [3] J. G. Hetherington, "The optimization of two component composite armours," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 409–414, 1992.
- [4] S. Sadanandan and J. G. Hetherington, "Characterisation of ceramic/steel and ceramic/aluminium armours subjected to oblique impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 19, no. 9–10, pp. 811–819, 1997.
- [5] T. J. Holmquist and G. R. Johnson, "Modeling prestressed ceramic and its effect on ballistic performance," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 113–127, 2005.
- [6] Z. Fawaz, W. Zheng, and K. Behdinan, "Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours," *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 3–4, pp. 387–395, 2004.
- [7] N. Teknoloji, "Balistik Standartlar Tablosu."
- [8] W. A. Glease, "Friction and Wear of Ceramics," in *ASM Handbook*, 1995, p. 812815.
- [9] M. E. Backman and W. Goldsmith, "The mechanics of penetration of projectiles into targets," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–99, 1978.
- [10] G. G. Corbett, S. R. Reid, and W. Johnson, "Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 141–

230, 1996.

- [11] J. A. Zukas, *High velocity impact dynamics*. Wiley-Interscience, 1990.
- [12] S. J. Mangenello and K. H. Abbott, “Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets,” *J MATER*, vol. 7, no. 2, pp. 231–239, 1972.
- [13] SSAB, “Armox Mechanical Properties,” 2017.
- [14] <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-500>, “SSAB. Hardox 500 Properties,” 2019. [Online]. <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-500>.
- [15] D. V Rosato, “Designing with reinforced plastics,” *Hanser/Gardner, Cincinnati, Ohio*, 1997.
- [16] R. F. Gibson, *Principles of composite material mechanics*. CRC press, 2016.
- [17] Y. Şahin, *Kompozit malzemelere giriş*. Gazi kitabevi, 2000.
- [18] N. L. Hancox and R. M. Mayer, *Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designers*. Chapman and Hall, 1994.
- [19] M. E. Tuttle, *Structural analysis of polymeric composite materials*. Chapman and Hall/CRC, 2012.
- [20] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press, 2007.
- [21] B. Kalaycıoğlu, “Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Basınç Tankı Tasarımı,” Kırıkkale Üniversitesi, 2010.
- [22] Misag, “Flaman Sargı Tekniği ile Kompozit Malzeme Kullanılarak Yüksek

Basınca Dayanıklı Optimum Boru Tasarımı,” *Tübitak*, 2001.

- [23] I. H. Chen *et al.*, “Armadillo armor: Mechanical testing and micro-structural evaluation,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 4, no. 5, pp. 713–722, 2011.
- [24] C. Candan, “Kompozit zırh imalat parametrelerinin terminal balistik özellikler üzerine etkileri,” Selçuk Üniversitesi, 2005.
- [25] U. Army, *Interior Ballistics of Guns. Engineering Design Handbook: Ballistics Series, United States Army Materiel Command*. 1965.
- [26] The Editors of Encyclopædia Britannica, *T.E.o.E.* 2017.
- [27] J. W. Zack Gable, Jim Hurley, Thomas Chojnicki, “Physics 001,” *Sci. Ballist.*, 2007.
- [28] J. A. Zook, K. Frank, and G. F. Silsby, “Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch,” Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground, 1992.
- [29] O. Gündüzer, “Namlu cidarı boyutlandırılmasında iç balistik davranışın etkisi,” Gazi Üniversitesi, 2011.
- [30] M. A. Iqbal, K. Senthil, P. Sharma, and N. K. Gupta, “An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 96, pp. 146–164, 2016.
- [31] J. Jiusti *et al.*, “Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials,” *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 2, pp. 2697–2704, 2017.
- [32] Q. Wang, Z. Chen, and Z. Chen, “Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 634–639, 2013.

- [33] D. E. Tria and R. Trębiński, “Methodology for experimental verification of steel armour impact modelling,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 100, pp. 102–116, 2017.
- [34] Y. Sun, Z. Yu, Z. Wang, and X. Liu, “Novel protective covering to enhance concrete resistance against projectile impact,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 484–490, 2015.
- [35] M. A. Iqbal, A. Diwakar, A. Rajput, and N. K. Gupta, “Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 62, pp. 40–53, 2012.
- [36] A. Serjouei, R. Chi, I. Sridhar, and G. E. B. Tan, “An empirical model for the ballistic limit of bi-layer ceramic/metal armour,” *Procedia Eng.*, vol. 75, pp. 14–18, 2014.
- [37] T. Børvik, S. Dey, and A. H. Clausen, “Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 7, pp. 948–964, 2009.
- [38] R. Chi, A. Serjouei, I. Sridhar, and G. E. B. Tan, “Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 52, pp. 37–46, 2013.
- [39] A. Serjouei, G. Gour, X. Zhang, S. Idapalapati, and G. E. B. Tan, “On improving ballistic limit of bi-layer ceramic–metal armor,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 105, pp. 54–67, 2017.
- [40] E. A. Gamble, B. G. Compton, and F. W. Zok, “Impact response of layered steel–alumina targets,” *Mech. Mater.*, vol. 60, pp. 80–92, 2013.
- [41] C. C. Holland, E. A. Gamble, F. W. Zok, V. S. Deshpande, and R. M. McMeeking, “Effect of design on the performance of steel–alumina bilayers and trilayers subject to ballistic impact,” *Mech. Mater.*, vol. 91, pp. 241–251, 2015.

- [42] I. Mohagheghian, G. J. McShane, and W. J. Stronge, "Impact perforation of polymer–metal laminates: Projectile nose shape sensitivity," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 88, pp. 337–353, 2016.
- [43] Y. N. Guo, Q. Sun, and L. Wu, "Study of Dynamic Impact Behaviors and Ballistic Properties of Ceramic/UHMWPE Composite Armor," in *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 121, pp. 397–400.
- [44] I. S. C. Benloulou and V. Sanchez-Galvez, "A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 21, no. 6, pp. 461–471, 1998.
- [45] S. Feli, M. H. Yas, and M. R. Asgari, "An analytical model for perforation of ceramic/multi-layered planar woven fabric targets by blunt projectiles," *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 2, pp. 548–556, 2011.
- [46] S. Feli and M. R. Asgari, "Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 771–780, 2011.
- [47] D. B. Rahbek, J. W. Simons, B. B. Johnsen, T. Kobayashi, and D. A. Shockey, "Effect of composite covering on ballistic fracture damage development in ceramic plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 99, pp. 58–68, 2017.
- [48] T. Børvik, M. Langseth, O. S. Hopperstad, and K. A. Malo, "Ballistic penetration of steel plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 22, no. 9–10, pp. 855–886, 1999.
- [49] W. Liu *et al.*, "Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor," *Mater. Des.*, vol. 87, pp. 421–427, 2015.
- [50] C. T. Lim, V. P. W. Shim, and Y. H. Ng, "Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 13–31, 2003.

- [51] V. B. C. Tan and T. W. Ching, "Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 11, pp. 1737–1751, 2006.
- [52] M. V Zhikharev and S. B. Sapozhnikov, "Two-scale modeling of high-velocity fragment GFRP penetration for assessment of ballistic limit," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 101, pp. 42–48, 2017.
- [53] R. Barauskas and A. Abraitienė, "Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 34, no. 7, pp. 1286–1305, 2007.
- [54] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, and T. Kanit, "Experimental and numerical investigation of a 3D woven fabric subjected to a ballistic impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 88, pp. 91–101, 2016.
- [55] G. S. Kim, C.-Y. Son, S.-B. Lee, S.-K. Lee, Y. B. Song, and S. Lee, "Ballistic impact properties of Zr-based amorphous alloy composites reinforced with woven continuous fibers," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 43, no. 3, pp. 870–881, 2012.
- [56] C. Ha-Minh, T. Kanit, F. Boussu, and A. Imad, "Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 7, pp. 2172–2184, 2011.
- [57] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, 1985.
- [58] G. R. Johnson, "A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures," *Proc. 7th Int. Sympo. Ballist.*, pp. 541–547, 1983.

- [59] V. S. Deshpande, E. A. N. Gamble, B. G. Compton, R. M. McMeeking, A. G. Evans, and F. W. Zok, “A constitutive description of the inelastic response of ceramics,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 94, pp. s204–s214, 2011.
- [60] V. S. Deshpande and A. G. Evans, “Inelastic deformation and energy dissipation in ceramics: a mechanism-based constitutive model,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 56, no. 10, pp. 3077–3100, 2008.
- [61] I. Crouch, *The science of armour materials*. Woodhead Publishing, 2016.
- [62] N. A. Fellows and P. C. Barton, “Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 22, no. 8, pp. 793–811, 1999.
- [63] D. Sherman, “Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 313–328, 2000.
- [64] C. Kocer, “Using the Hertzian fracture system to measure crack growth data: A review,” *Int. J. Fract.*, vol. 121, no. 3–4, pp. 111–132, 2003.
- [65] E. P. Carton, J. Weerheijm, C. Ditzhuijzen, and I. Tuinman, “Fragment and particle size distribution of impacted ceramic tiles,” in *28th International Symposium on Ballistics, Atlanta, Georgia, USA, 22-26 September 2014*, 1254-1265, 2014.
- [66] M. A. Meyers, “Dynamic Behavior of Materials John Wiley & Sons,” *Inc., New York*, pp. 31–40, 1994.
- [67] I. G. Crouch, “Effects of cladding ceramic and its influence on ballistic performance,” in *International Symposium on Ballistics, Atlanta, GA, USA*, 2014.
- [68] N. Kılıç, “Development of Multi-Layer Ballistic Armor Panel with Simulation

and Ballistic Tests,” Marmara University, 2014.

- [69] A. Dorogoy and D. Rittel, “Determination of the Johnson–Cook material parameters using the SCS specimen,” *Exp. Mech.*, vol. 49, no. 6, p. 881, 2009.
- [70] P. Verleysen, J. Peirs, J. Van Slycken, K. Faes, and L. Duchene, “Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 8, pp. 1457–1464, 2011.
- [71] A. Lamberts, M. G. D. Geers, J. A. W. van Dommelen, H. C. de Lange, A. Huizinga, and P. D. E. A. BV, “Numerical simulation of ballistic impacts on ceramic material,” *Eindhoven Univ. Technol.*, 2007.
- [72] T. J. Holmquist, D. W. Templeton, and K. D. Bishnoi, “Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 211–231, 2001.
- [73] Y.-F. Wang and Z.-G. Yang, “Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials,” *Wear*, vol. 265, no. 5–6, pp. 871–878, 2008.
- [74] A. Tasdemirci and I. W. Hall, “Numerical and experimental studies of damage generation in multi-layer composite materials at high strain rates,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 189–204, 2007.
- [75] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan, “Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 8, pp. 583–593, 2010.
- [76] D. Bürger, A. R. De Faria, S. F. M. De Almeida, F. C. L. De Melo, and M. V. Donadon, “Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 43, pp. 63–77, 2012.

- [77] L. Westerling and T. Lundberg, "The influence of confinement on the protective capability of ceramic armour at two different velocities," in *15th Int. Symp. on Ballistics*, 1995, pp. 283–290.
- [78] D. P. Goncalves, F. C. L. De Melo, A. N. Klein, and H. A. Al-Qureshi, "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 2–3, pp. 307–316, 2004.
- [79] D. Tabor, *The hardness of metals*. Oxford university press, 2000.
- [80] W. F. Hosford, *Solid mechanics*. Cambridge University Press, 2010.
- [81] V. A. Skripnyak, E. G. Skripnyak, and T. V Zhukova, "Dependence of the longitudinal velocity of sound in constructional ceramic materials on pressure and damage rate," *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 37, no. 5, pp. 600–606, 2001.
- [82] N. H. Murray, N. K. Bourne, and Z. Rosenberg, "Precursor decay in several aluminas," in *AIP Conference Proceedings*, 1996, vol. 370, no. 1, pp. 491–494.
- [83] D. Grady, "Shock-wave properties of high-strength ceramics," in *Shock Compression of Condensed Matter–1991*, Elsevier, 1992, pp. 455–458.
- [84] A. Tate, "A theory for the deceleration of long rods after impact," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 15, no. 6, pp. 387–399, 1967.
- [85] A. Tate, "Further results in the theory of long rod penetration*," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 17, no. 3, pp. 141–150, 1969.
- [86] A. Tate, "Long rod penetration models—Part I. A flow field model for high speed long rod penetration," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 28, no. 8, pp. 535–548, 1986.
- [87] L. Neckel, D. Hotza, D. Stainer, R. Janssen, and H. A. Al-Qureshi, "Modelling of ballistic impact over a ceramic-metal protection system," *Adv. Mater. Sci.*

Eng., vol. 2013, 2013.

- [88] F. P. Beer, E. Johnston, and J. DeWolf, “Mechanics of materials, 2002,” *McGraw-Hill, New York*, 2002.
- [89] F. P. Beer, R. Johnston, J. Dewolf, and D. Mazurek, “Mechanics of Materials, McGraw-Hill,” *New York*, pp. 150–233, 1981.
- [90] Ansys, “Solid186 Element Description,” 2018. [Online].
http://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alemdar ONGUN

Doğum Tarihi : 10.11.1985

Eğitim

2019	<i>Doktora, Kırıkkale Üniversitesi - Makine Mühendisliği</i>
2015	<i>Yüksek Lisans, Kırıkkale Üniversitesi - Makine Mühendisliği</i>
2009	<i>Odtü - Kaynak Mühendisliği</i>
2008	<i>Lisans, Kırıkkale Üniversitesi - Makine Mühendisliği</i>
2004	<i>Hacı Ömer Tarman Anadolu Lisesi</i>
1999	<i>Rauf Orbay İlköğretim Okulu</i>

İş Tecrübesi

2013 -	<i>Araştırma Görevlisi, Kırıkkale Üniversitesi</i>
2013	<i>İmalat Mühendisi, Işık Mühendislik</i>
2009	<i>Kaynak Mühendisi, Taşcı Makine</i>
2009	<i>Makine Mühendisi, Atılan Mühendislik</i>

Ödül ve Sertifikalar

2011	<i>Çalışan Sağlığını Koruyan Solunum Koruyucular Sertifikası</i> <i>İş Yeri Açma ve Çalışma Ruhsatı, Çevre İzin ve Mevzuatı Eğitimi</i>
2010	<i>Belgesi</i>
2010	<i>İş Yerlerinde Risk Değerlendirmesi Sertifikası</i>
2009	<i>Penetrantla Muayene Belgesi</i>
2009	<i>Manyetik Parçacık Muayene Belgesi</i>
2008	<i>En İyi Lisans Bitirme Projesi</i>

Araştırma Alanları; Mekanik, Balistik, Kaynaklı İmalat, Kompozit Malzemeler, Sonlu Elemanlar Analizi, Makine Tasarımı ve Analizleri