

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARÇACIK BENZETİMLİ MERMİ TEHDİDİNE UYGUN
ZIRH YAPISININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ANALİZİ

Mustafa Esat KÖSE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği

Danışman

Doç. Dr. Özgür DEMİR

Mayıs, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PARÇACIK BENZETİMLİ MERMİ TEHDİDİNE UYGUN ZIRH
YAPISININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

Mustafa Esat KÖSE tarafından hazırlanan tez çalışması 24.05.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Özgür DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Özgür DEMİR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İsmail BAYER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Aytaç ARIKOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Özgür DEMİR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Parçacık Benzetimli Mermi Tehdidine Uygun Zırh Yapısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa Esat KÖSE

İmza



Beni Her Zaman Destekleyen Aileme

TEŐEKKÜR

Destekleri ile kendimi gerçekleŐtirmemi sağlayan sevgili aileme ve birlikte çalıŐmaktan keyif ve onur duyduğum meslek büyüklerime teŐekkür ederim. Değerli danışman hocam Doç. Dr. Özgür DEMİR'e akademik kariyerim boyunca katkılarından dolayı teŐekkür ederim.

Mustafa Esat KÖSE



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Zırh Yapılarının Tarihi.....	1
1.2 Literatür Özeti.....	3
1.3 Tezin Amacı.....	8
1.4 Hipotez.....	9
2 ZIRH YAPISI	10
2.1 Seramik Zırh Malzemeleri.....	10
2.2 Kompozit Malzemeler.....	12
2.3 Tehdit Tipleri.....	17
2.4 Çarpışma Mekanığı.....	19
3 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	23
3.1 Genel Bakış.....	23
3.2 Analizlerde Kullanılan Matematik Modelleri.....	24
3.3 Analizlerde Kullanılan Mermilerin Modellenmesi.....	29
4 SERAMİK YAPININ DOĞRULANMASI	31
4.1 Penetrasyon Derinliği Testleri.....	31
4.2 Metalik Malzemelerin Doğrulanması.....	32
4.3 Seramik Malzemenin Doğrulanması.....	34
5 KOMPOZİT YAPININ DOĞRULANMASI	38
5.1 Çeki Testi Analizleri.....	38
5.2 Çarpışma Analizleri.....	45
6 FSP MERMİSİYLE PARAMETRİK ANALİZLER	50
6.1 Seramik Kalınlık Etkilerinin İncelenmesi.....	50
6.2 Kompozit Kalınlık Etkilerinin İncelenmesi.....	51
6.3 Hibrit Konfigürasyonların İncelenmesi.....	52
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	58

KAYNAKÇA

60

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

64



SİMGE LİSTESİ

A	Akma Gerilmesi
V_{50}	Balistik Limit Hız
E	Elastisite Modülü
V_f	Fiber Hacim Oranı
E_f	Fiber Yapı Elastisite Modülü
G_f	Fiber Yapı Kesme Modülü
ν_f	Fiber Yapı Poisson Oranı
σ	Gerilme
B,n	Gerinim Sertleşmesi Katsayısı
G	Kesme Modülü
D_1/D_5	Malzeme Bozulma Katsayıları
T	Maksimum Çekme Gerilmesi [JH-2 Modeli]
V_m	Matris Hacim Oranı
E_m	Matris Yapı Elastisite Modülü
G_m	Matris Yapı Kesme Modülü
ν_m	Matris Yapı Poisson Oranı
C_0/C_6	Mie-Gruniesen Katsayıları
ε^*	Normalize Edilmiş Plastik Şekil Değişimi
TR	Oda Sıcaklığı
CP	Özgül Isı
ε	Plastik Şekil Değişimi
PR	Poisson Oranı
M	Sertlik Sabiti
C	Termal Yumuşama Katsayısı
Ro	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AP	Zırh Delici (Armor Piercing)
API	Zırh Delici Yakıcı (Armor Piercing Incendinary)
APDS-T	Zırh Delici İzli Sabot Mermi (Armor Piercing Discharging Sabot with Tracer)
BZ	Taban Fünyeli (Base Fuzed)
DOP	Penetrasyon Derinliği (Depth of Penetration)
E11C	Boyuna Yönde Basma Dayanımına Karşılık Gelen Gerinim
E11T	Boyuna Yönde Çekme Dayanımına Karşılık Gelen Gerinim
E22C	Enine Yönde Basma Dayanımına Karşılık Gelen Gerinim
E22T	Enine Yönde Çekme Dayanımına Karşılık Gelen Gerinim
EA	Boyuna Yönde Elastisite Modülü
EB	Enine Yönde Elastisite Modülü
EPSO	Efektif Plastik Şekil Değiştirme Oranı
FS	Bozulma Kriteri
FSP	Parçacık Benzetimli Mermi (Fragment Simulated Projectile)
GAB	Boyuna Yönde Kesme Modülü
GBC	Enine Yönde Kesme Modülü
HEL	Hugonoit Elastik Limit
İN	İntegrasyon Noktası
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NATO	Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (North Atlantic Treaty Organization)
NBE	Normalleştirilmiş Balistik Verimlilik (Normalised Ballistic Efficiency)
NFLS	Yapışkan Malzeme Azami Gerilme Değeri
PBO	Poli-p-fenilen Benzobisoksazol (Poly-p-phenylene Benzobisoxazole)
PHEL	Hugonoit Elastik Limit Basınç Sabiti
RPD	Referans Penetrasyon Derinliği (Reference Penetration Depth)
SC	Kesme Dayanımına Karşılık Gelen Gerinim
SFLS	Yapışkan Malzeme Azami Kesme Gerilme Değeri
SFMAX	Maksimum Normalleştirilmiş Kırılma Dayanımı
SLIMx	Gerilim Sınırlama Parametresi
STANAG	Standardizasyon Anlaşması (Standardization Agreement)

TM	Erime Sıcaklığı
UHMWPE	Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Poli Etilen (Ultra High Molecular Weight Polyethylene)
XC	Boyuna Yönde Basma Dayanımı
XT	Boyuna Yönde Çekme Dayanımı
YC	Enine Yönde Basma Dayanımı
YT	Enine Yönde Çekme Dayanımı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Gemi hasarı ve balistik koruma etkisi [3]	2
Şekil 1.2 Seramiklerin geometrik yapısı [11]	5
Şekil 2.1 Goodyear patentleri	10
Şekil 2.2 Seramik özelliklerinin karşılaştırılması [24]	12
Şekil 2.3 Kompozit yapıların sınıflandırılması [25]	13
Şekil 2.4 Tek yönlü (uni directional), dokuma tipi (bidirectional) ve rastgele yönlendirilmiş fiber kompozitler.....	13
Şekil 2.5 Tek yönlü (uni directional), dokuma tipi (bidirectional) ve rastgele yönlendirilmiş fiberler kompozitler	13
Şekil 2.6 Tek yönlü karbon fiber takviyeli laminantın dayanımlarının fiber yönelim açılarıyla ilişkisi [27].....	15
Şekil 2.7 20 mm FSP mermisi teknik detayları	19
Şekil 2.8 7.62x39 mm mermi kesiti [30]	19
Şekil 2.9 Seramik yapının delinme aşamaları [33].....	21
Şekil 2.10 Analizlerde seramik malzeme bozulma durumu	21
Şekil 2.11 Hasar mekanizmalarının deneysel gözlemi [34]	22
Şekil 2.12 Analizlerde kompozit yapının bozulma durumu	22
Şekil 3.1 Gerilme sınırlandırmasının etkisi	28
Şekil 3.2 Mermilerin sonlu elemanlar ile modellenmesi	30
Şekil 4.1 Penetrasyon derinliği testi şematığı.....	31
Şekil 4.2 Alüminyum eleman boyutlarının belirlenmesi	33
Şekil 4.3 Referans penetrasyon derinliği analiz sonucu	33
Şekil 4.4 Alüminyum sonlu elemanlar ile modellenmesi.....	34
Şekil 4.5 Sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları	34
Şekil 4.6 Deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması	34
Şekil 4.7 Çarpışma sonunda mermi ve seramiğin görünümü	35
Şekil 4.8 Üç farklı hız durumu ve iki farklı fs değeri için penetrasyonlar	36
Şekil 4.9 7.62 AP merminin X yönündeki hız-zaman grafiği	37
Şekil 5.1 Çekme testi sonlu elemanlar modeli	40
Şekil 5.2 0^0 ile yönlendirilmiş tek katman test sonuçları [12].....	41
Şekil 5.3 0^0 ile yönlendirilmiş tek katman analiz sonuçları	41
Şekil 5.4 45^0 ile yönlendirilmiş tek katman test sonuçları [12].....	42
Şekil 5.5 45^0 ile yönlendirilmiş tek katman analiz sonuçları	42

Şekil 5.6 0^0 ile yönlendirilmiş beş katman test sonuçları [12]	43
Şekil 5.7 0^0 ile yönlendirilmiş beş katman analiz sonuçları	43
Şekil 5.8 45^0 ile yönlendirilmiş beş katman test sonuçları [12]	44
Şekil 5.9 45^0 ile yönlendirilmiş beş katman analiz sonuçları	44
Şekil 5.10 Çekme dayanımı sonuçları	45
Şekil 5.11 Kompozit yapısı eleman boyutunun belirlenmesi	46
Şekil 5.12 Model sınır koşulları	47
Şekil 5.13 7mm (yapı-2) kompozit yapı sonlu elemanlar modeli	47
Şekil 5.14 Mermiye ait hız değişim grafikleri ve test sonuçları	48
Şekil 5.15 Yapı-1 analiz sonucu	49
Şekil 5.16 Yapı-2 analiz sonucu	49
Şekil 6.1 8mm seramik çarpışma sonu durumu	50
Şekil 6.2 Sınır koşulları	51
Şekil 6.3 Seramik kalınlığı-mermi hızı değişimi	51
Şekil 6.4 Kompozit kalınlığı-mermi hızı değişimi	52
Şekil 6.5 12.5 mm/5mm kalınlıkta V_{50} balistik limit hız analizleri	52
Şekil 6.6 Konfigürasyon 1-4 hız-zaman değişimi	53
Şekil 6.7 Konfigürasyon 1-4 kinetik enerji-zaman değişimi	54
Şekil 6.8 Konfigürasyon-1 analiz sonucu	54
Şekil 6.9 Konfigürasyon-3 analiz sonucu	54
Şekil 6.10 Konfigürasyon-3 analiz sonucu	55
Şekil 6.11 Konfigürasyon-4 analiz sonucu	55
Şekil 6.12 Konfigürasyon 5-7 hız-zaman değişimi	56
Şekil 6.13 Konfigürasyon 5-7 kinetik enerji-zaman değişimi	56
Şekil 6.14 Konfigürasyon-7 analiz sonucu	56
Şekil 6.15 Konfigürasyon 8-9 hız-zaman değişimi	57
Şekil 6.16 Konfigürasyon 8-9 kinetik enerji-zaman değişimi	57
Şekil 6.17 Konfigürasyon-8 analiz sonucu	57

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Seramiklerin mekanik özellikleri.....	11
Tablo 2.2 Fiberlerin teorik balistik performansı [28].....	16
Tablo 2.3 Fiberlerin mekanik özellikleri.....	17
Tablo 2.4 STANAG tehdit seviyeleri [4].....	18
Tablo 2.5 20 mm FSP ölçüleri [4].....	18
Tablo 3.1 Johnson Cook malzeme modeli parametreleri.....	25
Tablo 3.2 Simplified Johnson Cook malzeme modeli parametreleri.....	26
Tablo 3.3 Johnson Holmsquit-2 alümina parametreleri [42].....	27
Tablo 3.4 Laminated Composite Fabric parametreleri.....	29
Tablo 4.1 Referans penetrasyon derinliği sonuçları [12].....	32
Tablo 4.2 Deney sonuçları [12].....	32
Tablo 5.1 Fiber lif numunelerine ait test sonuçları [12].....	38
Tablo 5.2 0 ⁰ ile yönlendirilmiş kompozit yapı [12].....	39
Tablo 5.3 45 ⁰ ile yönlendirilmiş kompozit yapı [12].....	40
Tablo 5.4 Katman koordinatları ve ağırlık oranları [12].....	46
Tablo 6.1 Konfigürasyonların belirlenmesi.....	46

Parçacık Benzetimli Mermi Tehdidine Uygun Zırh Yapısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi

Mustafa Esat KÖSE

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Özgür DEMİR

Askeri unsurlar olası bir savaş durumunda birçok tehdiye maruz kalırlar. Bu tehditlerin arasında patlayıcıların oluşturdukları şarapneller ve yüksek kalibreli top mermilerinin infilak etmesi sonucunda ortaya çıkan yüksek kinetik enerjili parçacıklar bulunmaktadır. NATO'nun tehdit sınıflandırmalarında tanımlanmış olan parçacık benzetimli mermi (FSP), ateşli silahlara ait mermilerle kıyaslandığında küt yapısına rağmen yüksek kalibresinden kaynaklanan kinetik enerjisiyle askeri araçlara ciddi hasar oluşturmaktadır. Kinetik enerjili tehdit unsurlarını durdurmak veya enerjilerini sönmölemek için zırh teknolojileri ve malzeme biliminde birçok gelişim meydana gelmiştir. Bir balistik zırh tasarımı yaparken potansiyel tehditlere en uygun olan zırh konfigürasyonun belirlenmesinin yanında askeri araçların hareket kabiliyeti, stabilitesi, zırh yapısının yenilenebilirliği gibi birçok unsurun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Malzeme maliyetleri ve çarpışma testlerinin kontrollü olarak yerine getirilmesinin zorlukları göz önünde bulundurulduğunda deneylerin sonlu elemanlar yöntemi ile düşük hata oranlarında simüle edilmesi optimum zırh tasarımını meydana getirmek için iyi bir alternatif yaratmıştır. Bu çalışmada koruma sağlamak için kullanılan malzemelerin balistik yeterliliklerinin hangi yollarla gözlemlenebileceği ve

malzeme değişkenlerinin balistik kompozisyona yaratacağı etkiler incelenirken, 520 m/s hıza sahip 20 mm FSP mermiyi sönümleyecek uygun balistik kompozisyonun sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenebilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik çarpışma, zırh tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi, seramik, kompozit.



Finite Element Analysis of Armor Structure Suitable for Fragment Simulated Projectile Threat

Mustafa Esat KÖSE

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Master Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özgür DEMİR

Military forces face numerous threats in the event of a possible war, including the high kinetic energy particles produced by the detonation of explosives and high-caliber artillery shells. Among these threats is the fragment simulating projectile (FSP), which can cause serious damage to military vehicles due to its high caliber kinetic energy, as defined in NATO threat classifications. Advances in armor technology and material science have been made to stop or dissipate kinetic energy threats. When designing a ballistic armor, it is important to consider various factors such as the mobility, stability, and renewability of the armor structure in addition to determining the most suitable armor configuration for potential threats. Due to the challenges posed by material costs and controlled impact tests, simulations using finite element method with low error rates have created a good alternative for developing an optimum armor design. This study examines not only how the ballistic suitability of materials used for protection can be observed and the effects of material variables on ballistic configuration, but also examines how to determine the suitable ballistic configuration to dissipate a 20 mm FSP projectile with a velocity of 520 m/s using finite element method.

Keywords: Ballistic impact, armor design, finite element method, ceramics, composite.



YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1.1 Zırh Yapılarının Tarihi

İnsanlık tarihi boyunca yaşamış her topluluk, bir amaç uğruna birbirleriyle ya da diğer türlerle mücadele içinde olmuşlardır. Yıllar içinde değişen tehdit tanımları insanların, araçların ya da yapıların korunmasını elzem hale getirmiştir. İlkel dönemlerde hayvan derileri ve kemikleri ile oluşturulan savunma mekanizmalarının yerini sert metaller almış ve uzun süre varlığını korumuştur.

Ateşli silahların keşfi insanlık tarihi açısından yeni bir dönem anlamına gelmiştir. 17. Yüzyılda Avrupa'da kullanılmaya başlayan bu silahlara karşı, gelenekselleşmiş koruyucu zırhlar önemini yitirmeye başlamıştır. O dönemde ateşli silahlara karşı mevcut tek koruma, hedef olmayacak bir yerin ardında kalmaktan ibarettir. 1850'li yıllarda Ned Kelly adındaki bir suçlu, çetesi için "Bushranger" adlı kurşun geçirmez zırhı geliştirmiş ve bu zırh ateşli silahlara karşı koyan ilk kişisel koruyucu zırh olmuştur [1].

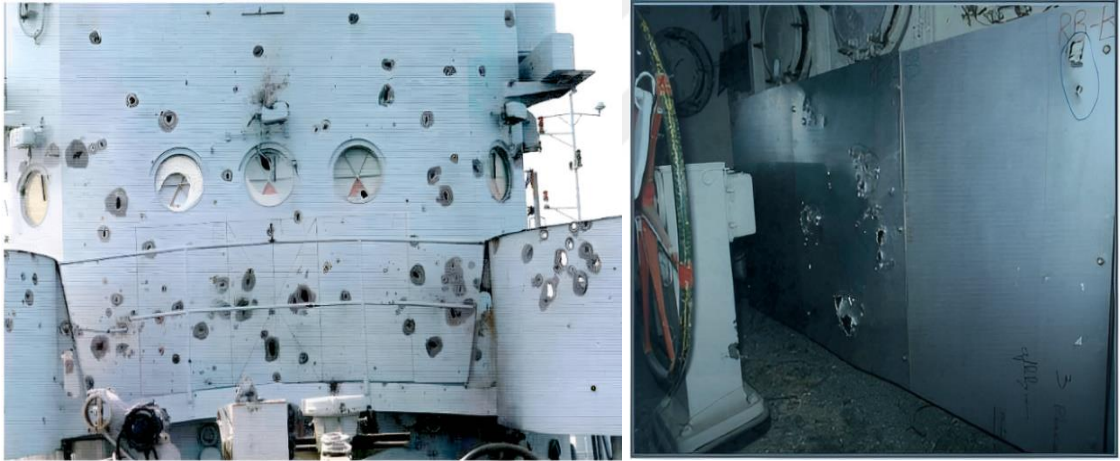
Tarihler 20. Yüzyılı gösterdiğinde ise iki büyük dünya savaşı öncesi ve sonrasında birçok ülke askeri unsurlarını korumak için güçlü ve hafif malzeme arayışına girmiştir. 1950'li yıllarda Kore Savaşı öncesinde birçok yeni malzeme, zırh teknolojilerinde denenmeye başlanmıştır. Güney Kore 1950'de sentetik naylon liflerden oluşan zırhları (T-52-1) geliştirerek ordusunda kullanmaya başlamıştır. 1965 yılında Dupont şirketinin polimer araştırmalar grubu Kevlar 16 adını verdikleri aramid fiberleri geliştirmişlerdir.

1960'lı yıllarda ABD Savunma Bakanlığı destekleriyle yapılan araştırmalarda seramikler, balistik koruma amaçlı kullanıma uygun hale getirilmiştir. İlk çalışmalarda kullanılan alüminyum oksit (Al_2O_3) olumlu yanıtlar verirken bor karbür (B_4C) çok iyi mekanik özellikleri yanında yüksek maliyetli üretime sahip olduğu görülmüştür [1].

Konvansiyonel metaller, ateşli silahların etkilerini sönmölemek için kullanılabilir olsalar da yüksek özgül ağırlıkları nedeniyle mobilizasyonu zayıflattığı bilinen bir gerçektir. Yıllar içinde oldukça gelişen malzeme bilimi ve zırh teknolojileri, üstün enerji absorbe edebilme yetenekleri ve hafiflikleriyle kullanılacak hibrit yapıları meydana

getirmiştir. Seramik malzemeler düşük özgül ağırlıkları ve yüksek sertlik değerleri ile zırh tasarımlarının vazgeçilmez etmenlerinden biri haline gelmiştir. Seramik yapıların yüksek çarpışma hızlarındaki genel işlevi, sert yüzeyiyle merminin delici kısmını körleştirerek merminin temas yüzeyini arttırmak ve penetrasyonu sınırlamaktır. Ancak seramik malzemeler arkalarında destekleyici, sünekliği yüksek bir malzeme olmadığında ise tüm bu olumlu etkilerinin işlevsizleştiği görülmüştür [2].

Fiber yapıları kompozitler sunabildiği yüksek mekanik özellikleri, yüksek darbe dayanımı gibi avantajlarının yanında ağırlık tasarrufu, yakıt verimliliği gibi birçok avantajları bulunduğu için askeri uygulamalarda büyük ilgi çekmiştir. Ancak kompozit yapıların yüksek mekanik özelliklerini etkileyen birçok unsur bulunmaktadır. Balistik kompozitlerin nihai işlevi yüksek hızlı merminin malzemeyi delmesini önlemektir. Tüm bu işlemleri yerine getirirken enerji sönmeme mekanizmalarının anlaşılması hayati önem taşımaktadır.



Şekil 1.1 Gemi hasarı ve balistik koruma etkisi [3]

Askeri yapı ve araçlara yapılan bombalı saldırıların yarattığı infilak etkisinden kaynaklanan şarapnelerin ya da gelişen uzun menzilli top atışlarında topun parçalanması ile saçılan yüksek enerjili parçacıkların yarattığı hasarlara karşı araçları ve araçların sevk ve idaresinden sorumlu personeli korumak kritiktir. NATO, parçacık benzetimli mermilerin, yüksek bir tehdit unsuru olduğunu göz önünde bulundurarak tehdit seviyeleri içine almıştır.

1.2 Literatür Özeti

NATO'ya bağılı ülkelerin silahlı kuvvetleri yıllar içerisinde birçok askeri operasyonda karşılaştıkları tehditleri gözlemlemiş ve oluşturdukları çalışma grupları ile bu tehdit seviyelerini bir standart haline getirmek için bir standardizasyon anlaşması (STANAG) yapmışlardır. 2004 yılında yayımladıkları çalışmalarında kinetik enerji etkili tehditlerle ilgili detaylara yer vermişlerdir. Bu çalışmalarda altı adet tehdit seviyesi belirlenirken, her senaryoda tehdit seviyesine uygun penetrator (mermi/parçacık) cinsi, merminin çıkış hızı, çarpma açısı gibi birçok tanımlama yapılmıştır. Son yıllarda oldukça gelişen uzun menzilli top atışları ve modern dönemde sıklıkla gerçekleşen, asimetrik çatışmalarda kullanılan el yapımı patlayıcıların yaygın kullanımı, infilak etkisiyle küçük parçacıkların oluşmasına ve ciddi hasar ve yaralanmalara yol açtığı görülmüştür. Bu dokümanda patlama ya da çarpma etkisiyle dağılan parçacık benzetimli mermiler (fragment simulated projectile) de sınıflandırma dahiline girmiştir [4].

Malzemelerin balistik performanslarını yaygın olarak gerçekleştirilen testlerin ilki V_{50} balistik limit hız testidir. Amerikan Savunma Bakanlığı V_{50} balistik limit hız testi ile ilgili standartları 1997 yılında yayımlamıştır. V_{50} balistik hız testi genel olarak belirli bir hız aralığı içinde oluşan en yüksek kısmi penetrasyon hızları ile en düşük tam penetrasyon hızlarının ortalaması olarak tanımlanabilir. Balistik performansı gözlemlenen levhaya atışlanan penetratorün hızı düzenli olarak artırılır. Atış sonuçlarının %50'sinin penetre etmediği, diğer %50'sinin penetre ettiği bir hız değeri elde edilir. Bu değer kullanılan balistik levhanın V_{50} hız limit değeridir[5].

Balistik performansların gözlemlendiği bir diğer test tekniği ise penetrasyon derinliği (DoP) testidir. ABD Ordusu Malzeme Teknolojisi Laboratuvarı tarafından 1989 yılında seramik malzemelerin balistik performanslarını gözlemlemek için geliştirilen bu test yöntemi ile atışlanan penetratörün seramikten geçerek seramik arkasında bulunan bir destek metal eleman içerisinde bıraktığı penetrasyon izi gözlemlenmektedir. Bu yöntem ile farklı seramik malzemelerin birbiri arasındaki farklılıkları, kalınlık farklarının etkileri gibi malzemenin balistik performansına ait faktörler incelenebilmektedir [6].

Yukarıda belirtilen iki test yönteminin uygulandığı çalışmalar ile bu çalışmaların sonlu elemanlar yöntemi ile uygulamalarının ortaya konduğu bazı literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Savio ve Madhu makalelerinde bor karbür, alümina ve zirkonyum takviyeli alümina seramik malzemelerinin balistik etkinlikleri DoP testi ile gözlemlenmiştir. Deneyler, seramik kalınlıkları ve destek levhaları değiştirilerek tekrarlanmıştır. Çalışmada 7.62 mm çapında sert çelikten imal edilmiş mermi kullanılmıştır. Seramiklerin balistik verimliliğini üç farklı yöntem kullanarak hesaplamışlar ve her yöntemin kendisine göre avantajları ve dezavantajları olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda balistik verimliliği gözlemlenmenin en iyi yönteminin normalleştirilmiş balistik verimlilik (NBE) sayısal değerini hesaplayarak olacağını belirtmişlerdir. Kalınlık artışının NBE değeri üzerindeki etkileri gözlemlendiğinde alümina seramikte kalınlık artışı ile birlikte balistik verimlilikte kısmi bir artış olduğu gözlemlenmiş ancak bor karbürde bu durumun tam tersi olduğu görülmüştür [7].

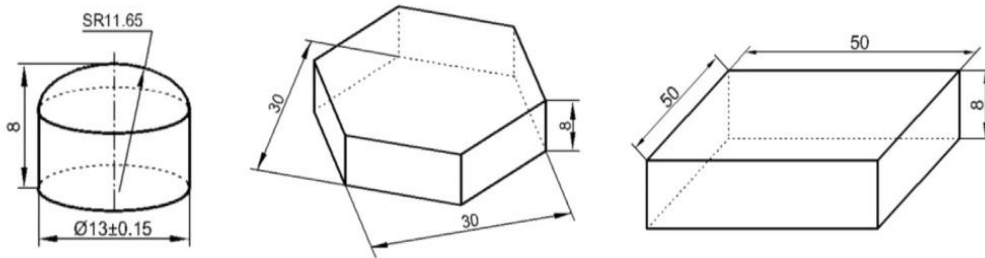
Jinzhu ve diğerleri makalelerinde tungsten alaşımli çubuk penetratörlerin zırh çeliğiyle desteklenmiş alümina seramik ile oluşturulan yapıyla olan çarpışmaları deneysel ve numerik olarak incelenmiştir. Penetrasyon derinliğinin seramik kalınlığıyla ters orantılı ve lineer olarak azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma sırasında seramiklerin sınır bölgelerinde herhangi bir desteğe sahip olmadıklarında daha fazla bozulmaya uğradığı görülmüştür. Bu bozulmanın, gerilim dalgalarının sınır bölgelerinde yansıtamadığı çekme gerilmeleri nedeniyle olduğu bildirilmiştir [8].

Wu ve diğerleri makalelerinde silisyum karbür (SiC) seramiği ile Dyneema fiberiyle oluşturdukları hibrit bir plakanın balistik direncini araştırmışlardır. ABD Ulusal Adalet Enstitüsü'ne ait balistik standartının dördüncü seviye şartlarına uygun optimum alansal yoğunluk değerine sahip bir balistik plaka dizaynı için çalışmışlardır. Çalışmalarını deneylerde elde ettikleri verileri LS-Dyna sonlu elemanlar paket programı üzerinde numerik olarak gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan hibrit yapının kalınlığı ile balistik direnci arasındaki ilişkiyi gösteren bir denklem geliştirmişlerdir. Çalışmaları sonunda 8.2 mm seramik ve 7mm kompozit malzemenin optimal kalınlık kombinasyonuna sahip

olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçları ile numerik sonuçları karşılaştırıldığında uyumlu olduğu belirtilmiştir [9].

Çelikbaş ve Acar makalelerinde benzer kalınlıklarda ancak farklı yarıçap değerlerine ve küresel geometriye sahip seramiklerin geometrik farklılıkların balistik performansları olan etkilerini Ls-Dyna sonlu elemanlar paket programında katı parçacık hidrodinamiğini (SPH) metoduyla incelemiştir. Çalışma sonunda 4.5 mm yarıçapa sahip küresel geometrinin balistik verimliliğinin en yüksek olduğu görülmüştür [10].

Hu ve diğerleri çalışmalarında hibrit bir kompozit levhada kullanılan seramiklerin geometrik özellikleri değiştiğinde levhanın balistik özelliklerinin hangi ölçüde etkilendiğini incelemiştir. 7.62x51 mm zırh delici mermi kullanarak yaptıkları atış testlerinde SiC seramik plakalar ile ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) hedef plakalar kullanılmıştır. Seramik malzemelerin yapısı Şekil 1.2’de gösterildiği gibi silindirik, hegzagonal ve kübik yapılar tercih edilmiştir. Deneysel sonuçta merminin seramik içinde geçirdiği süre arttıkça penetrasyon kabiliyetini kaybettiği görülmüştür. Ayrıca seramik yapının boyutları büyüdükçe bu sürenin arttığı da görülmüştür. Sonuç olarak kübik yapıyla oluşturulan bir seramik yapının balistik kabiliyetleri en yüksek yapı olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda arkada bulunan UHMWPE kompozit levhada oluşan şişme etkisi (bulging) en fazla kübik yapıyla oluşturulan yapıda meydana gelmiştir [11].



Şekil 1.2 Seramiklerin geometrik yapısı [11]

Signetti ve diğerleri makalelerinde karbon, aramid ve cam elyaf fiberlerle üretilmiş kompozit plakaların balistik performanslarını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulamaya çalışmıştır. Çalışmaya her bir fiberin ipliklerini çekme testlerine sokarak mekanik özelliklerini çıkarmakla başlamışlardır. Oluşturulacak tek katmanlı

malzemenin fiber/matris oranını hesaplayarak elde ettiği çekme testi sonuçlarını numerik olarak doğrulama yoluna gitmişlerdir. Tek bir liften laminanta kadar her katmanda doğrulama yapılarak atış testleri yapılmış ve tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. Çalışma sonunda laminant kompozitlerin balistik performansını değerlendirmede kullanılan Cunniff ölçeklendirmesi kullanarak üç kompozit malzemeyi birbirleriyle karşılaştırmışlardır[12].

Pêchoucek ve diğerleri makalelerinde 20 mm çapındaki FSP mermisini kullanarak 8 farklı hedefe atışlar yapmışlar ve NATO'ya ait 1-5 arası tehdit seviyelerindeki yeterliliklerini ölçmüşlerdir. Tehdit seviyesi-3 için 4 farklı kompozisyonda çalışmışlardır. S4 hedefi 9.2 mm alümina seramiğin dahil olduğu toplamda 20.12 mm kalınlığa ulaşan kompozit yapı ile aralarında 50 mm boşluğun olduğu 6 mm'lik ARMOX 500 çelikten oluşmaktadır. Toplamda 5 atış yapmış ve S4 hedefi 841 m/s hıza kadar mermiyi durdurabildiği raporlanmıştır. Yapılan numerik analizler neticesinde S4 hedefinin balistik limit hızı 860 m/s ölçülmüştür [13].

Nguyen ve diğerleri makalelerinde UHMWPE fiberlerinin 12.7 ve 20 mm kalibredeki FSP mermilerine olan etkilerini deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. Farklı hız konfigürasyonlarında yaptıkları çalışmalar sonucunda malzemeye ait nonlinear ortotropik malzeme modelini çıkarmışlardır. Oluşturdukları malzeme modelinin delinme derinliği, balistik limit hız gibi birçok açıdan deneysel verilerle uyum sağlayabildiği görülmüştür. Yazarlar fiberlerin bozulma mekanizmalarının daha doğru hesaba katılabildiği yeni bir erozyon modeli önermişlerdir. 102 mm'ye kadar olan tüm hedefler için tahminler %3 hata payı ile uyuşmuştur [14].

Cunniff yayınladığı makalede zırh sistemlerinde kullanılacak kompozit plakaların balistik yeterliliğini sınamak için boyut analizi gerçekleştirmiştir. Mermi ve kompozit plakaya ait parametrelerle oluşturulan bir dizi katsayı ile merminin V_{50} balistik limit hız değeri ya da belirli hızdaki mermiyi durduracak alansal yoğunluk değeri hakkında tahmin yapabilme imkanı sağlamaktadır [15].

Wu ve diğerleri çalışmalarında delikli titanyum panellerle birlikte kullandığı SiC seramik hedeflerin balistik yeterliliklerini araştırmışlardır. Araştırmalarında delik çapı, merminin delikli panele temas yüzeyinin değişkenliği birçok farklı durumun balistik

performansı etkilediği gözlemlenmiş ve çalışmalar numerik analizlerle desteklenmiştir. Merminin asimetrik temas durumunda hareket açısında ve momentumunda hızlı değişimlere sebep olabildiği ve bazı durumlarda merminin kırılabilirdiği gözlemlenmiştir. Seramiğin doğrultuları bozulan mermileri çok daha kolay aşındırabilirdiği çalışmalarda belirtilmiştir. Hazırlanan zırh tasarımının %10'luk bir performans katkısı sağlayabilirdiği tespit edilmiştir [16].

Peng ve diğerleri yayınladıkları makalede oluşturdıkları 19 hibrit ve 6 tek malzemeli panel olmak üzere 14 farklı türdeki hedefleri 7.62 mm çapındaki mermilerle yüksek hızda çarpışma testlerine tabi tutmuşlar ve elde ettikleri sonuçları raporlamışlardır. Bor Karbür seramik levha ile birlikte kullanılan Dyneema fiberlerinin en yüksek balistik performansa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca test sonuçlarını belirli bir kolerasyon oluşturarak analitik olarak da doğrulamışlardır [17].

Silcock ve diğerleri değişen emisyon regüstasyonları nedeniyle araçların ağırlıklarında hafifletme sağlayacak ve çarpışma durumlarında metallere nazaran daha iyi bir etki gösterecek olan kompozit yapıların araçlarda kullanımına uygun olduklarını göstermek maksadıyla kompozit yapılara ezilme testleri yapmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle testleri doğrulamıştır. Araştırmacılar Ls-Dyna'nın kompozit yapılarını modelleme için kütüphanesinde bulundurduğu MAT 54, MAT 58 ve MAT 59 malzeme modelleri arasında deneysel davranışlara en çok benzerlik sergileyen malzeme modelinin MAT 58 (Laminated Composite Fabrics) malzeme modeli olduğunu ortaya koymuşlardır [18].

Tepedüzü ve Karkuzu çalışmalarda seramik kalınlığının zırh yapısına etkisi ile destek plaka olarak görev yapan sabit kalınlıktaki farklı kompozit yapıların balistik performanslarını numerik olarak incelemişlerdir. Seramik kalınlığı artışı ile seramiğin konik kırılmaya meyilli olduğu, merminin yüksek çarpma hızlarında kompozit seramik arasındaki bağlantının daha güçlü olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma neticesinde aramidle oluşturulan kompozit yapının en iyi balistik performansı sergilediği görülmüştür [19].

Jackson ve diğerleri NASA Langley Araştırma Merkezi ile hazırladığı raporunda ABD ordusuna ait Black Hawk tipi helikopterlerin gövdelerinde bulunan kompozit yapıların

dayanıklılığını LS-Dyna paket programı ile incelemişlerdir. Oluşturulan 3 farklı temsili kırıe çarpma testleri yaparak elde ettikleri verileri LS-Dyna paket programında mevcut matematiksel modellerden Mat 54 ve Mat 58'i karşılaştırmışlardır. Mat 54 ile hazırlanan simülasyonlar çarpışma tepkilerini simüle etmede başarısız olurken kinetik enerjiyi sönümleme başarımının zayıf olduğu görülmüştür. Mat-58, Mat-54'ün aksine malzemenin plastik davranışlarını simüle edebilme imkanı sağlayan parametreler içerdiğinden üç kırış yapıya ait test sonuçları ile iyi bir uyum sergilediği tespit edilmiştir [20].

Krishnan ve diğeri seramik ve kompozitlerin kullanıldığı hibrit bir koruma sisteminin balistik yeterliliklerini sınamak adına geliştirdiği numerik metodu çalışmalarında paylaşmışlardır. Boron silikon karbit seramiklerin JH-2 malzeme model parametrelerini oluşturmak için DoP testleri yapılmış ve numerik çözümler doğrulanmıştır. Kompozit malzeme yapısının sönümlediği enerji değerleri analizlerle doğrulanmıştır [21].

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, NATO Tehdit Seviyesi-1 şartları sağlanarak ateşlenen 20 mm çapındaki parçacık benzetimli mermi (FSP) enerjisini sönümleyecek hibrit balistik zırh yapısının sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturmak, zırh yapısını oluşturan seramik ve kompozit bileşenlerin bozulma davranışlarını ve mekanik özelliklerini belirleyerek zırh tasarımı yapmak için uygun numerik metodolojiyi sunmak ve seçilen farklı hibrit kompozisyonlar arasında mermiyi durduracak en düşük alansal yoğunluğa sahip yapıyı belirlemektir.

1.4 Hipotez

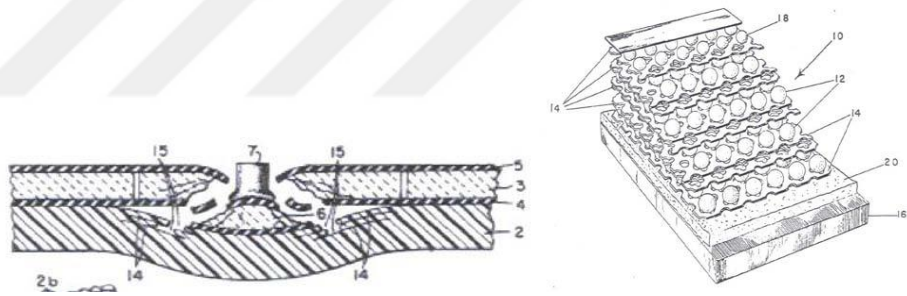
20 mm FSP mermisi, yüksek kinetik enerjisi ve küt yapısı sebebiyle konvansiyonel ateşli silahlara ait mermilerle kıyaslandığında farklı hasar davranışları sergilemektedir. Bir askeri unsurun korunması sırasında 20 mm FSP mermisi etkilerinin incelenmesi ve tehdit unsurunu durduracak zırh tasarımının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun yanında zırh yapısının minimum alansal yoğunluğa sahip olması askeri unsurun hareket kabiliyeti için elzemdir. Ayrıca her bir malzeme yapısı için kullanılacak malzemelerin

hazırlanması ve kontrollü bir deneye tabi tutmak oldukça zor ve maliyetlidir. Bu kapsamda NATO tehdit seviyesi-1'e uygun olarak 20 mm FSP mermi enerjisini sönümleyecek düşük alansal yoğunluğa sahip zırh yapısı sonlu elemanlar yöntemi ile nasıl belirlenir? Zırh yapısını meydana getiren bileşenlerin anizotropik davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile nasıl modellenir? Balistik zırh tasarımı için uygun analiz metodolojisi nedir? Seramiklerin DoP testlerinde sergilediği tutarsızlıklar sonlu elemanlar yöntemi ile nasıl optimize edilir? Kompozit yapının modellenebilmesi için gerekli parametreleri elde edecek yöntem nedir?



2.1 Seramik Zırh Malzemeleri

Seramikler kırılğan yapısıyla zırh kullanımı için uygun bir malzeme olarak görülme de zırh delici mermilerin geliştirilmesiyle birlikte araştırmacılar gelişen tehditleri yenmek için yeni ve hafif malzeme arayışlarına gitmiştir. Birinci Dünya Savaşı sırasında seramik kaplamalı metallerin mermi direncini arttırdığı görülmüştür. İkinci Dünya Savaşı sonrasında malzeme bilimi üzerindeki gelişmeler sonucunda seramiklerle ilgili ilk patenti Goodyear Uzay Araştırmaları Şirketi almıştır. Düşük saflıkta alüminyum oksitlerinin geliştirilmesi bu ilk potansiyel zırh uygulamalarını başlatmıştır. Seramik zırhlar ilk kez Vietnam Savaşı'nda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. 1960'lı yılların sonlarında Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı yeni seramik malzeme arayışlarına girerek bor karbürü (B_4C), berilyum oksit (BeO) ve silikon karbür (SiC) ile ilgili çalışmaları ortaya koymuşlardır [22].



Şekil 2.1 Goodyear patentleri [22]

Bir seramik malzemenin balistik performansı birçok özelliğine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yoğunluk, sertlik, kırılma dayanımı, elastik limitleri ve mikro yapısı gibi birçok malzeme özelliği seramik malzemenin davranışında rol oynar. Zırh sistemlerinde sıklıkla kullanılan bazı seramikler; alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), bor karbür (B_4C), titanyum diborür (TiB_2), alüminyum nitrür (AlN), zirkonya (ZrO_2) seramikleridir. Oksitsiz üretilmiş seramiklerin mermi dayanımlarının daha yüksek olduğu bilinmektedir. Zırh sistemlerinde kullanılan seramiklerin bazı mekanik özelliklerine ait değerler Tablo 2.1'deki gibidir.

Tablo 2.1 Seramiklerin mekanik özellikleri

Özellik	Al ₂ O ₃ (%85)	Al ₂ O ₃ (%99)	SiC	B ₄ C	TiB ₂	AlN
Yoğunluk [g/mm ³]	3,40~3,70	3,80~3,95	3,09~3,24	2,13~2,52	4,36~4,52	3,20~3,27
Bası Dayanımı [GPa]	1,93~2,17	1,30~4,00	2,50~5,20	1,30~5,90	3,00~5,7	1,45~4,00
Young Modülü [GPa]	211~234	330~398	378~459	288~468	414~552	310~322
Hugonit Elastic Limit [GPa]	4,80~7,00	5,13~14,00	8,00~15,70	9,60~19,70	9,00~17,00	8,50~9,4
Ufalanma Dayanımı [GPa]	~0,30	0,43~0,46	0,35~1,07	0,45~0,77	0,30~0,53	0,50~0,60

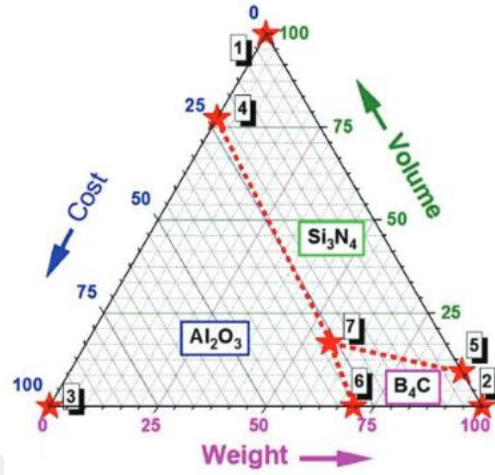
Seramikler çeliklerle karşılaştırıldıklarında oldukça düşük özgül ağırlıklara sahip oldukları ve çarpma enerjisinin emilimi konusunda daha başarılı oldukları görülmüştür. Metalik malzemelerin enerji emilim etkisi plastik deformasyona dayanırken bu durum seramiğin sahip olduğu yüksek sertliğin beraberinde getirdiği kırılma direncine dayanır. Seramiklerin bu sahip oldukları özellik, lokal gerilimlerin büyüklüğünü azaltan ve yükü bir alana yayan önemli bir deformasyon davranışdır [23].

Alümina geliştirilen ilk ileri seramiklerdendir. Düşük maliyeti, kolay erişilebilirliği ve üretimi, iyi mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sayesinde en çok kullanılan ve üzerinde en çok çalışma gerçekleştirilen seramik malzemedir. Alümina mekanik özellikleri sinterleme sıcaklığı ve basıncı, tane boyutu gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Çok katmanlı zırh tasarımlarında en maliyet etkin performansa sahiptir.

Silisyum karbür birçok endüstride kullanılan oksitlenme olmadan üretimi gerçekleştirilen oldukça sert bir seramiktir. Alümina ile karşılaştırıldığında çok daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen gerek hammadesi gerekse yüksek işleme sıcaklıkları ve zahmetli sinterlenme aşamalarından ötürü maliyetlidir.

Bor karbür düşük yoğunluğa ve yüksek elastisite modülüne sahip, balistik uygulamalarda en iyi sonuçları veren seramik türüdür. Yüksek üretim maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda seramikler arasında en pahalı üründür. Yüksek çarpışma

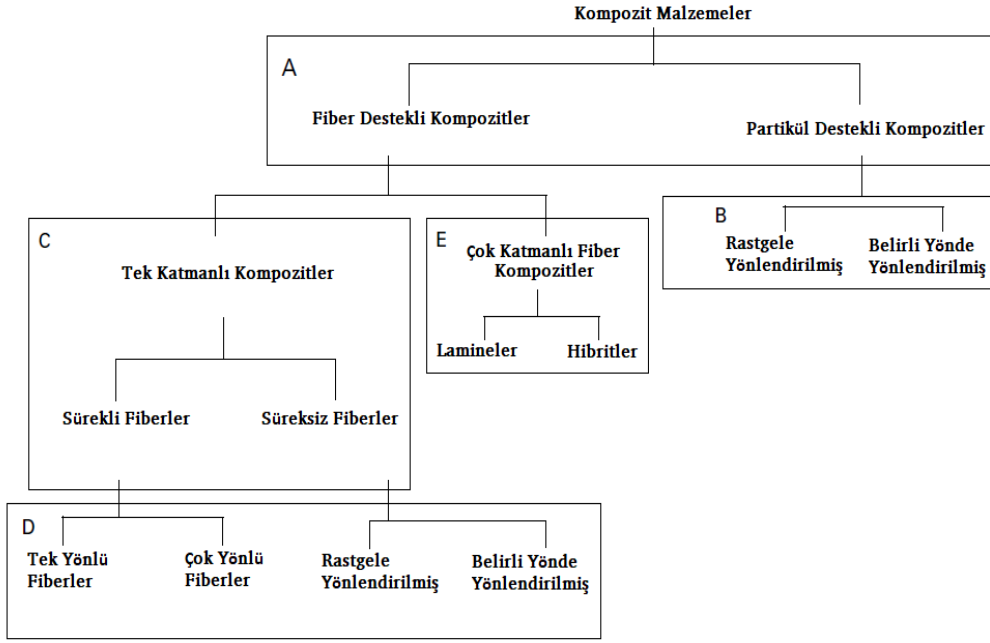
etkilerine karşı oldukça uygun bir seramik olsa da bazı araştırmacılar tarafından 20 GPa üstündeki çarpışma basınçlarında seramik mukavemetinde ani düşüşler gözlemlendiği bildirilmiştir [24]. Şekil 2.2’de farklı seramiklerin hacim, ağırlık ve maliyet gibi faktörlere göre karşılaştırma çalışması verilmiştir.



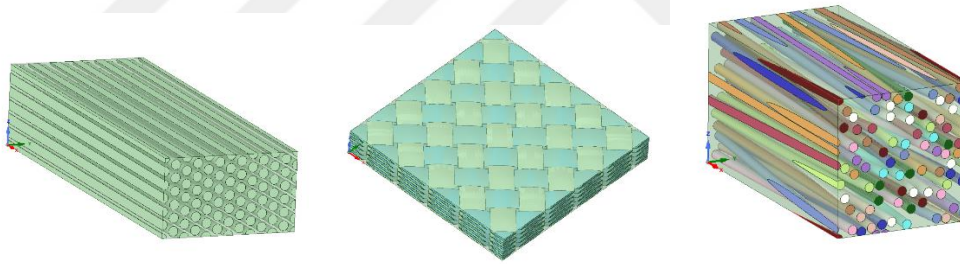
Şekil 2.2 Seramik özelliklerinin karşılaştırılması [25]

2.2 Kompozit Malzemeler

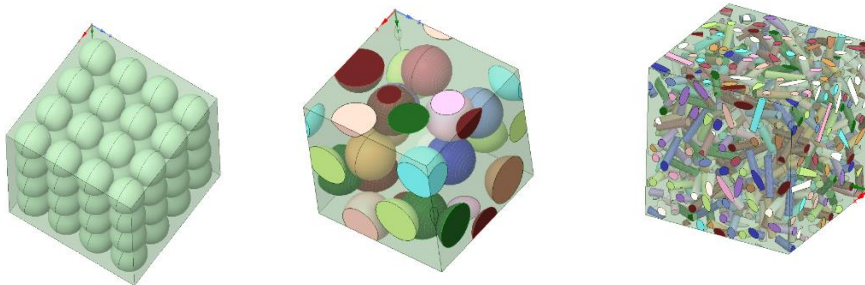
Kompozit malzemeler en az iki farklı malzemenin kendilerinden daha yüksek mekanik özellikler göstermek amacıyla bir araya getirilerek oluşturulan malzemelerdir. Bu malzemeler yüksek dayanıklılık, hafiflik gibi kullanışlı özellikleri nedeniyle zırh teknolojilerinde kullanılır. Kompozit yapılar genel olarak mukavemet unsuru olan bileşenin yönlendirilmesine göre iki ana gruba ayrılır. Fiber destekli kompozitler bir matris malzemesi içinde düzenli olarak yönlendirilmiş fiber takviyeleri içeren kompozit türü iken parçacık destekli kompozitler, matris malzemesi içinde parçacık takviyesi olarak ilave edilmiş seramik, metal veya polimer malzemelerin eklenmesiyle meydana gelir. Şekil 2.3’de kompozit yapıların sınıflandırılması, Şekil 2.4 ile Şekil 2.5’de farklı tipteki kompozit yapıların kesit görünüşleri verilmiştir.



Şekil 2.3 Kompozit yapıların sınıflandırılması [26]



Şekil 2.4 Tek yönlü (uni directional), dokuma tipi (bidirectional) ve rastgele yönlendirilmiş fiberler kompozitler



Şekil 2.5 Parçacık etkili belirli yönde ve rastgele konumlandırılmış kompozitler

Yüksek hızda gelişen çarpışma olaylarında yüksek basma gerilmelerine maruz kalan zırh yapılarında genellikle belirli bir yönde düzenli olarak dizilmiş çok katmanlı fiber destekli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bir fiber kompozit yapının mekanik özelliklerini yapıyı oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri kadar fiber yönü, sarım açısı, fiber hacim oranı, fiber matris emilim kalitesi gibi birçok unsur önemli rol oynamaktadır. Tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerin fiber/matris hacim oranlarının mekanik özelliklerine etkisi aşağıdaki gibidir [27].

Fiber yönündeki elastisite modülü:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.1)$$

Enine elastisite modülü:

$$E_{12} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (3.2)$$

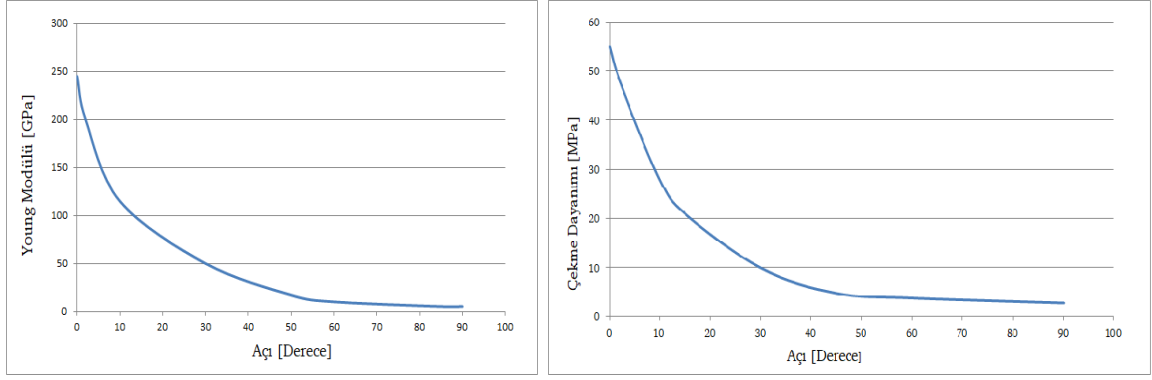
Poisson oranı:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (3.3)$$

Kesme Modülü:

$$G_{12} = G_{21} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \quad (3.4)$$

Fiber takviyeli kompozitlerde fiber doğrultusunda malzeme davranışları oldukça iyi etkiler gösterirken fiber yönüne dik açılarda kompozit yapı malzeme kabiliyetlerinde zaafiyetler gözlenmektedir. Fiber takviyeli kompozit yapının farklı oryantasyonlarda oluşturulduğunda mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Tek yönlü karbon fiber takviyeli laminantın dayanımlarının fiber yönelim açılarıyla ilişkisi [28]

Balistik zırh tasarımında kullanılan kompozitlerde genellikle tercih edilen fiberler karbon, cam, aramid, PBO ve yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberlerdir.

Cam fiberler üretim ve maliyet açısından kolay ulaşılabilir olduklarından birçok sektörde aktif olarak kullanılmaktadır. 1930'lu yıllarda ısı direngenliği yüksek olduğu için elektrik kondüktörlerinde kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllarda silika, alümina gibi seramiklerin kompozit yapısına eklenmesiyle oluşturulan S-Cam fiberleri savunma sanayinde aktif olarak kullanılmaktadır. S2 cam fiberleri E-Cam fiberlerine kıyasla %40'a varan yüksek dayanıma sahiptir ve çevresel faktörlere karşı dayanıklıdır. Düşük maliyetli ve hafif olması sebebiyle balistik zırh uygulamaları için kullanışlı gibi görünse de artan tehditlere karşı kolay yorulabilen bir malzeme olduğu için elverişli değildir.

Karbon fiberler ile ilgili ilk çalışmalar 1879 yılında Thomas Edison tarafından ampüllerde kullanılmak üzere yapılmıştır. 20. Yüzyılın ilk yarısı biterken karbon fiberin yüksek gerilme dayanımına sahip olduğu konusunda çok fazla bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Artan uzay ve havacılık çalışmalarında çelikten daha mukavim ve hafif, uzun ömürlü bir malzeme ihtiyacı duyulması karbon fiberlerle ilgili çalışmaların artmasını sağlamıştır. Karbon fiberler, yüksek mekanik özellikleri sayesinde birçok endüstride faal olarak kullanılmaktadır.

Para-aramid fiberler ilk olarak 1960'lı yıllarda Dupont firması tarafından üretilen Kevlar 29 markasıyla ortaya çıkmıştır. Keşfedildiği dönem için olağanüstü mekanik

özelliklere sahip olan aramid fiberleri ortaya çıkışından itibaren maliyetli bir ürün olmasına rağmen savunma sanayinde o dönemde kullanılan naylon fiberlerin yerini almıştır. Aramid fiberler cam fiberlere kıyaslandığında neredeyse yarı yarıya hafif olduğu görülmüştür. Başlıca aramid ürünleri ise Kevlar, Twaron ve Technora'dır.

PBO fiberler 1998 yılında Toyobo şirketinin ürettiği ve Zylon markasıyla piyasaya sürdüğü yeni olarak adlandırılabilir bir fiber türüdür. Aynı alansal yoğunluk değerindeki Kevlar ve Spectra'nın neredeyse iki katı enerji sönümleyebildiği ancak Kevlar ve Spectra'ya göre maliyetinin oldukça fazla olduğu belirtilmiştir.

Ultra yüksek molekül ağırlıklı fiberler balistik zırh panelleri ve kişisel koruyucu donanımların imalatında sıklıkla kullanılan fiberlerin başında gelmektedir. Yüksek malzeme performansı ile birlikte esneklik kapasitesi oldukça yüksek olan UHMWPE fiberlerinin yüksek çarpışma etkilerini absorbe etme yetenekleri oldukça fazladır. Üretici firmanın beyanına göre UHMPWE fiberleri aynı ağırlıktaki aramid fiberlerine göre %40, aynı ağırlıktaki bir çeliğe göre 15 kat daha yüksek dayanıma sahiptir. Piyasadaki başlıca UHMPWE fiber ürünleri Spectra ve Dyneema'dır. Fiber katkılı kompozit yapıların mekanik özellikleri ile Cunniff balistik hız katsayısı Tablo 2.2 ile Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Fiberlerin teorik balistik performansı [29]

Fiber Elyaf Türü	$(U^*)^{1/3}$ [m/s]
PBO	813
Spectra	801
600 Denye Kevlar KM2	682
850 Denye Kevlar KM2	681
840 Denye Kevlar 129	672
1500 Denye Kevlar 29	625
200 Denye Kevlar 29	624
1000 Denye Kevlar 29	621
1140 Denye Kevlar 49	612
Karbon Fiber	593
E-Cam Fiber	559
Naylon	482

Tablo 2.3 Fiberlerin mekanik özellikleri

		S-Glass	Kevlar	Karbon	UHMWPE	Çelik
Yoğunluk	g/cm ³	2.46	1.45	1.80	0.97	7.80
Çekme Modülü	GPa	87	124	338	87	207
Çekme Dayanımı	MPa	4600	3600	2480	2650	620
Çekme Modülü/ Yoğunluk Oranı	GPa/g/cm ³	35	85	188	90	27
Çekme Dayanımı/ Yoğunluk Oranı	MPa/g/cm ³	1870	2480	1380	2730	80
Kopma Uzaması	%	5,4	2.0	0,5	3,5	23

2.3 Tehdit Tipleri

NATO, birlikte çalıştığı ülkelerle yaptığı standardizasyon anlaşmasıyla (STANAG) askeri araçlara yönelik tehdit unsurlarını ve alınacak tedbirlere dair çalışmalarını yayınlamışlardır. AEP-55 ilk cildinde kinetik enerjili tehditler, ikinci cildinde mayın tehditleri, üçüncü cildinde el yapımı patlayıcılara ait tehditleri ve alınabilecek önlemlere ait standartlar yayınlamıştır. Yayınlayacakları dördüncü ciltte ise kimyasal tehditler ve alınabilecek önlemlere ait bir çalışma yapmaktadırlar [4].

Kinetik enerjili tehditler genel olarak iki sınıfta incelenirler. Bunların ilki konvansiyonel ateşli silah mermileri ile yüksek kalibreli mermiler iken diğer tarafta tehdit türüne göre değişkenlik gösteren parçaçık benzetimli mermiler bulunur. Cilt-1’de yapılan sınıflandırmada mermilerin türü, hedefe isabet açısı, ne kadar uzaktan ateşlendiği ve yapılacak testlerin prosedürleri gibi birçok detay verilmiştir. Tehdit seviyelerine göre kullanılması gereken mermiler ve mermilere ait hız değerleri Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4 STANAG tehdit seviyeleri [4]

Tehdit Seviyesi	Mermi Tipi	Mermi Materyali	Mermi Ağırlığı (g)	İspat Hızı (m/s)	20 mm FSP İspat Hızı (m/s)
5	25 mm x 137 APDS-T,	Tungsten Çekirdek	121.50	1258	960
4	14,5 mm x 114 API/B32	Çelik Çekirdek	64.00	911	960
3	7,62 mm x 51 AP	Tungsten Çekirdek	8.40	930	770
	7,62 mm x 54R B32 API	Çelik Çekirdek	10.40	854	

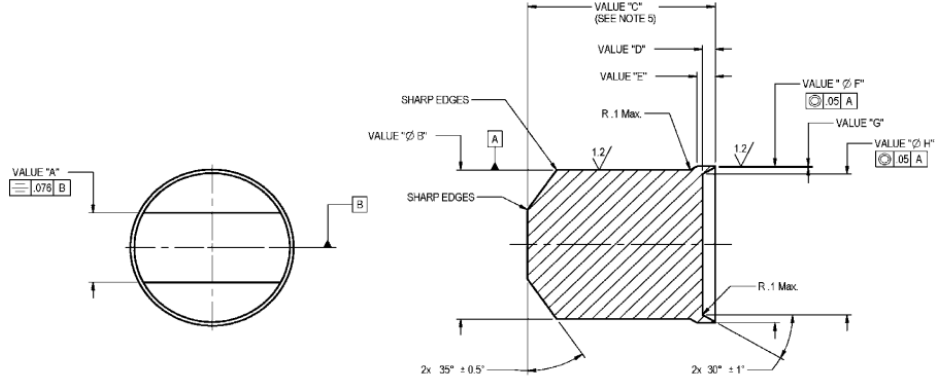
Tablo 2.4 STANAG tehdit seviyeleri [4] (devamı)

Tehdit Seviyesi	Mermi Tipi	Mermi Materyali	Mermi Ağırlığı (g)	İspat Hızı (m/s)	20 mm FSP İspat Hızı (m/s)
2	7,62 mm x 39 API BZ	Kurşun Çekirdek Bakır Ceket	7.77	695	630
1	7,62 mm x 51 NATO ball	Kurşun-Çelik Çekirdek Bakır Ceket	9.50	833	520
	5,56 mm x 45 NATO SS109	Kurşun-Çelik Çekirdek Bakır Ceket	4.00	900	
	5,56 mm x 45 M193	Kurşun-Çelik Çekirdek Bakır Ceket	3.56	937	

Konvansiyel ateşli silahlara ait mermiler genellikle çekirdek çapları ile tanımlanır. Mermi yapılarında ateşleme için gerekli barutu ve mermiyi bir arada tutan yapıya kovan denir. Barutun tutuşması için gerekli enerji tetiğe basılmasıyla birlikte kapsülde oluşur. Mermi çekirdekler kurşun, çelik ya da tungsten gibi materyallerle meydana gelebilmektedir. Bunun yanında mermi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte mermiler bir takım kimyasal ve mekanik etkileri de bünyelerinde bulundurabilmektedir. Yeni nesil mermilerin, zırh delici (AP), zırh delici-yakıcı (API), zırh delici fin stabilize (APFS), sabot ayrılabilen zırh delici fin stabilize (APFSDS) gibi özel yetenekleri de bulunmaktadır. NATO tarafından tanımlanan 20 mm FSP mermisinin teknik çizimleri ve boyutları Tablo 2.5 ile Şekil 2.7’de verilmiştir.

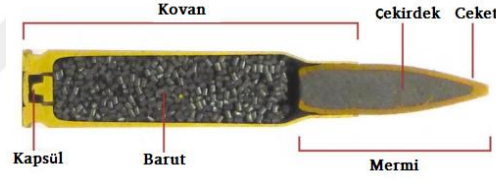
Tablo 2.5 20 mm FSP ölçüleri [4]

Parçacık Çapı (mm)	Ağırlık (g)	A(mm)	ØB (mm)	C (mm)	D (mm)
20	54	9.27-0.4	19.89±0.05	24	1.62±0.05
		E(mm)	ØF (mm)	G (mm)	ØH (mm)
		2.31±0.05	20.83±0.08	0.2	18.80±0.12



Şekil 2.7 20 mm FSP mermisi teknik detayları [4]

Çarpışma mekaniğini etkileyen en önemli unsurlardan biri mermiye ait özelliklerdir. Mermi boyutu, hızı, delme kabiliyeti, kovan ölçüleri (barut miktarı) gibi birçok unsur penetrasyon kabiliyetini değiştirebilmektedir. Hedef kalınlığının artırılması durumunda mermilerin penetrasyon kabiliyetindeki değişim gözlemlendiğinde küt uçlu mermiler penetrasyon kabiliyetini sivri uçlu mermilere göre daha fazla kaybettiği görülmüştür [30]. 7.62x39 mm mermi kesit görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 7.62x39 mm mermi kesiti [31]

2.4 Çarpışma Mekaniği

Çarpışma davranışları genellikle malzeme davranışları ve fiziksel etkileri neticesiyle dört ayrı grupta incelenmektedir. İlki 30 m/s’den düşük hızlarda genellikle bir nesnenin düşürülmesi gibi etkilerin gözlemlendiği düşük hızlı çarpışma çalışmalarıdır. İkincisi kuş sürülerinin uçağa çarpması ya da düşük kalibreli yorgun mermi etkilerinin gözlemlendiği 30-200 m/s hız aralığındaki çarpışmalar, yüksek hızda çarpışma olarak adlandırılmaktadır. Balistik çarpışma çalışmaları, 200-1500 m/s hız aralığında ateşli silahlar ya da patlayıcı etkisiyle yüksek kinetik enerji penetratörlerin çarpıtığı yüzeylerle olan ilişkisini inceleyen çalışmalarıdır. Dünya yörüngesinde bulunan birçok uydunun

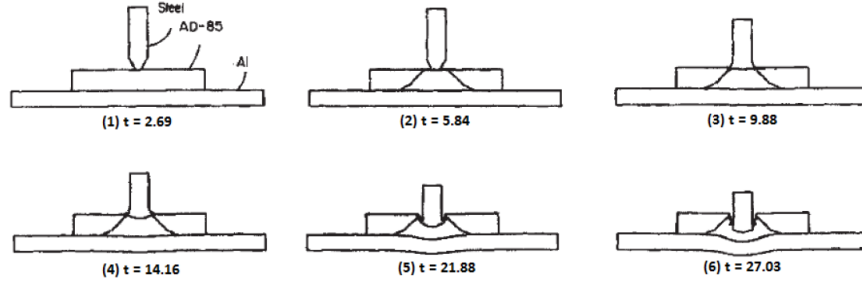
zarar görmesiyle oluşan ve uzay çözü olarak adlandırılan metalik parçaların 15000 m/s ve üzerindeki hızlarda çarpışmasıyla ortaya çıkan etkilerin incelendiği çarpışmalar ise hiper hızlı çarpışmalar olarak adlandırılır [32].

Çarpışma durumlarında penetrasyon üç başlık altında toplanabilir:

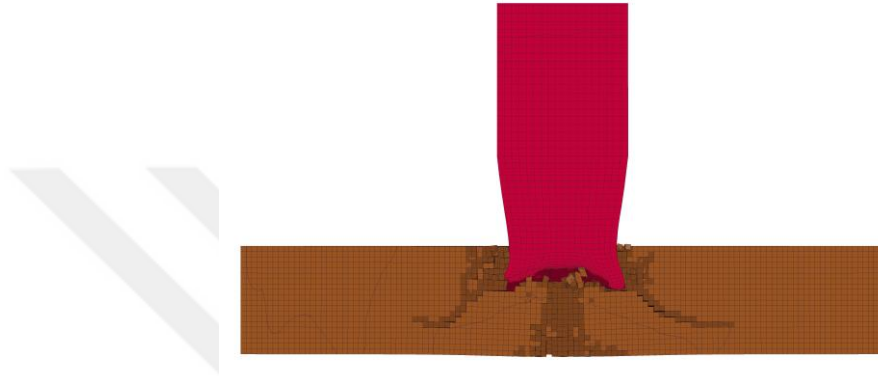
- *Perforasyon*: Tehdidin hedefi delerek yoluna kinetik enerji etkisiyle devam etmesidir. Hedefin ilgili tehdidi durdurmakta yeterli olmadığı durumdur.
- *Tam Penetrasyon*: Tehdidin balistik sınır hızda hedefe isabet etmesi durumudur.
- *Kısmi Penetrasyon*: Hedefin bir kısmının delinerek tehdidin hedef içinde penetre vaziyette sıkışması ya da delinmeksizin geri tepmesi durumudur.

2.4.1 Seramiklerin Balistik Çarpışma Davranışları

Seramik malzemeler sert ve gevrek yapılarıyla balistik çarpışma hızlarında konvansiyonel metallere aksine sünek olmayan deformasyon davranışı gösterirler. Merminin ilk teması esnasında seramik yapı yüksek kayma ve bası gerilmelerine maruz kalır. Ortaya çıkan gerilme dalgaları yapı boyunca hareket ederek yapı sınırlarından yansır. Yansıyan gerilme dalgaları, radyal mikro çatlak oluşumları ve temas doğrultusunda konik kırılma etkileri meydana getirir. Meydana gelen gevrek deformasyon, gerilme dalgalarını daha geniş bir alana yayarak lokal gerilmelerin büyüklüğünü azaltır. Bu sebeple temas noktası ile seramik yapı sınırları arasındaki uzaklık arttıkça yapının penetrasyon direncinde artış olduğu görülmüştür [11]. Mermi seramik içinde ilerledikçe seramik yapı, mermi doğrultusunda kırılmaya ve parçacık saçılmasına uğrar ve Mescall bölgesi adı verilen bölgeye giriş yapar [33]. Bu kısımda meydana gelen deformasyon oluşumlarının merminin yapı içinde geçirdiği süreyi doğrudan etkilediğinden malzeme penetrasyonuna etkisi de fazladır. Yapılan deneysel çalışmalarda, merminin seramiğe ilk teması ve sonrasında mermi temas noktasından başlayarak deformasyona uğradığı ve mermi temas yüzeyinin artmasıyla penetrasyon kabiliyetinin sınırlandırıldığı görülmüştür. Bu bozulma davranışları merminin tipi ve seramik yapının kalınlığına göre değişkenlik göstermektedir. Seramik yapıların delinme aşamaları Şekil 2.9'da, analizlerde gerçekleşen bozulma durumu Şekil 2.10'da verilmiştir.



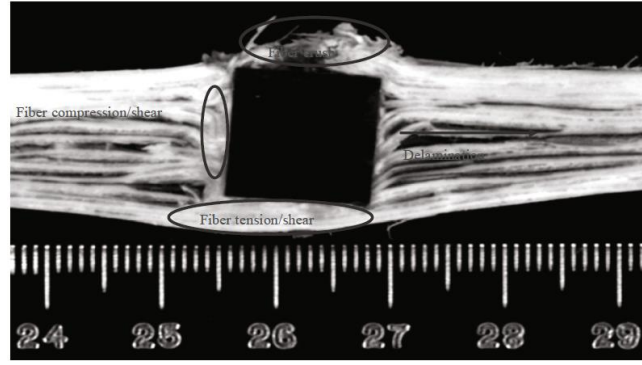
Şekil 2.9 Seramik yapının delinme aşamaları [34]



Şekil 2.10 Analizlerde seramik malzeme bozulma durumu

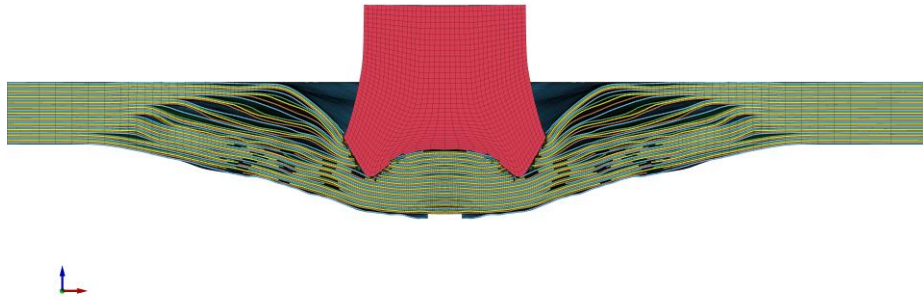
2.4.2 Kompozit Malzemelerin Balistik Çarpışma Davranışları

Laminant yapı haline getirilmiş kompozit malzemelerin balistik çarpışma durumlarında oluşan hasar durumu ve enerji absorbe etme yetileri temas eden mermi ve kompozit yapıya ait değişkenlere göre çeşitlilikler göstermektedir. Kompozit yapılar elastik deformasyon sonrasında, matris yapısındaki çatlama ile başlayarak laminant yapısındaki makro bozunmalara kadar belirli hasar mekanizmaları gerçekleştirmektedir. Genel olarak çarpışma olayı üç aşamada incelenebilir.



Şekil 2.11 Hasar mekanizmalarının deneysel gözlemi [35]

Penetrasyonun ilk aşamasında temas noktasında kompozit yapı sıkışmaya başlar. Sıkışma ilerledikçe malzeme kalınlık yönü boyunca akmaya uğrar, fiber kırılmaları meydana gelir ve penetrasyon oluşumu başlar. Çarpma etkisiyle ilk temas noktasında tersine bir şişme etkisi (reverse bulging) gözlenir. İkinci aşamada mermi yan cidarları fiberler üzerinde kayma ve bası gerilmeleri oluşturur ve radyal yönde gerilmeler oluşur. Laminantı oluşturan katmanlar sıkışmaya devam ettikçe birbirlerine basınç oluştururlar ve bu durum kalınlık doğrultusu boyunca şişme (bulging) oluşmasına sebep olur. Bu aşamada laminantı meydana getiren katmanların kısmi olarak birbirinden ayrılma olayı (delaminasyon) meydana gelir. Mermi hareket doğrultusu boyunca kopardığı kompozit parçaların sıkışmasıyla mermi ön yüzeyinde birikme (plugging) oluşur. Bu aşamada hedef ile mermi arasında sürtünme etkileri ile ısınma meydana gelebilmektedir [36]. Şekil 2.11’de kompozit yapıya ait çarpışma testi sonuçları, Şekil 2.12’de çarpışma sonrasında kompozit yapıda oluşan bozulma davranışları görülmektedir.



Şekil 2.12 Analizlerde kompozit yapının bozulma durumu

3.1 Genel Bakış

Sonlu elemanlar yöntemi birçok fiziksel olayın etkilerinin gözlemlenebilmesi için sıklıkla kullanılan bir araçtır. 19. Yüzyılın sonlarına doğru William Rayleigh tarafından temelleri atılan yöntem ile basit yapıların frekanslarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. 1950'li yıllara gelindiğinde Boeing firması, uçak kanatlarındaki gerilmelerin hesaplanması çalışmalarını bilgisayar kullanarak yapmıştır. 1960'lı yıllara gelindiğinde "sonlu elemanlar" terimi ilk kez Dr. Ray Clough tarafından ortaya atılmıştır [37]. NASA, sonlu elemanlar yöntemi ile hızlı ve güvenli çözümler elde etmek için bilgisayar kodları yazmış ve NASTRAN adındaki ilk paket programı geliştirmiştir. Günümüzde bu yöntem birçok farklı disiplinde çözümler elde etmek için kullanılır. Yöntemdeki temel mantık çözüm yapılan bölgeyi küçük parçalara bölerek onları düğüm noktaları ile birbirine bağlamak üzerine kuruludur.

Sonlu elemanlar yönteminde yapı ve davranışı karakterize etmek için bir boyutlu, iki boyutlu ya da üç boyutlu elemanlar kullanılır. Bir boyutlu çizgi elemanlar kesit alanı tanımlanmış bir çubuk ya da kiriş öğelerini ifade etmek için kullanılır ve iki düğüm noktasından oluşur. İki boyutlu elemanlar genellikle 4 düğüm noktalı bir düzlemi ifade etmek için kullanılan elemanlardır. Üç boyutlu hacim elemanları üç eksenli gerilme veya şekil değiştirme problemleri için kullanışlı eleman tipidir [37].

Yüksek enerjili dinamik çarpışma simülasyonlarında örtük (implicit) ve açık (explicit) teknikler tercih edilmektedir. Örtük ve açık çözümler temelde teknik olarak aynı sonuçları vermektedir. İki teknik arasındaki en önemli ayrım çözüm aranan olayın zaman aralığıdır. Örtük çözüm tekniğinde görece büyük zaman adımları kullanılır ve doğrusal olmayan davranışların yakınsaması için çoklu iterasyonlara ihtiyaç vardır. Her iterasyonda çözümde kullanılan matrisin tersinin hesaplanması gerektiğinden analiz süresine olumsuz etki eder. Açık çözümlerde her bir zaman adımındaki sonuçların yakınsama ihtiyacı çok küçük zaman adımları ile son bulur. Örtük yöntemde her iterasyonda hesaplanan matrisin tersinin hesaplanması gereksinimi açık yöntemde

yoktur. Bu sayede çözüm süresi kısılırken, küçük zaman adımı kullanılması olayın belirli bir süre içinde sınırlandırılmasına neden olur. Bu yüzden dinamik çarpışma analizlerinde açık yöntem kullanımının daha elverişli olduğu görülmüştür.

LS-Dyna paket programı (ilk adıyla DYNA3D) 1976 yılında Dr. John Hallquist tarafından Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar paket programıdır. LS-Dyna doğrusal olmayan dinamik problemleri incelemek için açık zaman integrasyonu yöntemiyle analizler gerçekleştirmek için geliştirilmiş bir programdır. 1978 yılında kaynak kodları Fransa'dan gelen bir talep üzerine herhangi bir kısıtlama olmaksızın kamuya açık hale getirilmiştir [38].

3.2 Analizlerde Kullanılan Matematik Modelleri

3.2.1 Johnson Cook Malzeme Modeli

Çelik, alüminyum, kurşun gibi metalik yapılar, çarpışma durumlarında yapısal dayanımı doğrusallıktan uzaklaşır. Dinamik etkilerle akma/kopma dayanımları yükselir ve malzeme sertleşir. Johnson Cook malzeme modeli genellikle metallerin yüksek hızlı deformasyonları sırasında gösterdikleri davranışları incelemek için ortaya atılmış bir matematik modelidir. Analizlerde kullanılan sert çelik ve AL6063-T6 alüminyum levhalarının modellenmesi aşamasında MAT 15 Johnson Cook matematik modeli, kurşun metali için MAT 98 Simplified Johnson Cook matematik modeli kullanılmıştır. Matematiksel modele ait genel denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (3.1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{EPSO} \quad (3.2)$$

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon^f = \max([D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*], EFMIN) \quad (3.4)$$

(3.1)'de verilen denklemde A parametresi akma gerilimini, B ve n gerinim sertleşmesini, C parametresi termal yumuşama etkisini ifade ederken, ε plastik şekil

değişimini ε normalize edilmiş birim şekil değişimini ifade etmektedir. Kırılma anındaki gerinimi ifade etmek için kullanılan denklem takımı (3.4)'tür. Bu ifadedeki D1-D5 katsayıları malzeme bozulma katsayılarıdır [39].

Tablo 3.1. Johnson Cook malzeme modeli parametreleri.

Sembol	Birim	Al6063-T6[40]	Sert Çelik [41]
Ro	kg/m ³	2700	7860
G	GPa	26.9	82
E	GPa	70	205
PR		0.30	0.30
A	GPa	0.111	0.792
B	GPa	0.241	0.51
C		0.012	0.26
M		1.003	0.014
N		0.415	1.03
TM	K	893	1790
TR	K	300	300
EPSO	ms-1	0.001	0.001
CP		910	477
PC	Pa	-1.5	-
D1		0.0261	0.05
D2		0.263	3.44
D3		-0.349	-2.12
D4		0.247	0.002
D5		16.8	0.061

Ls-Dyna, Johnson Cook denklemleriyle modellenen bir malzeme için durum denklemi parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Durum denklemleri bir malzemenin sıcaklık, basınç, hacim, iç enerji veya özgül ısı gibi durum fonksiyonları arasındaki ilişkidir. Bu denklemler malzemenin hacim, yoğunluk gibi değerlerinin sıcaklık ve basınca göre nasıl değiştiğini gösteren denklemlerdir. Yaygın olarak kullanılan durum denklemlerinden biri Mie-Gruniesen durum denklemi (3.4) bir diğeri ise lineer polinom (3.5) durum denklemidir. Sert çelik için kullanılan Mie-Gruniesen katsayıları $C=4569$, $S1=1,49$ $GAMAO=1.93$ şeklindedir. AL6063-T6 malzemesinde lineer polinom durum denklemi kullanılmış olup $C_1=58.3$ alınmıştır.

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (3.5)$$

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (3.6)$$

Doğrulama çalışmalarında kullanılan kurşun metali için ise Johnson Cook Simplified malzeme modeli kullanılmıştır. Kurşun metali için kullanılan parametreler Tablo 3.2'deki gibidir.

Tablo 3.2 Simplified Johnson Cook malzeme modeli parametreleri

Sembol	Birim	Kurşun [42]
Ro	kg/m ³	10660
E	GPa	12
PR		0.44
A	GPa	0.001
B	GPa	0.061
C		0.41
N		0.163

3.2.2 Johnson-Holmquist-2 Malzeme Modeli

Seramik gibi sertliği yüksek malzemelerin matematiksel olarak modellenebilmesi için 1992 yılında Johnson-Holmquist-1 modeli Johnson ve Holmquist tarafından oluşturulmuştur [43]. İlerleyen yıllarda penetrasyon derinliği analizlerinde kullanılan seramiklerin davranışlarını simüle edecek JH-2 matematiksel modeli ortaya atılmıştır. Matematiksel modelin genel formülasyonu (3.7) numaralı denklemde verilmiştir. Denklemde seramiğe uygulanan eşdeğer gerilme değeri hesaplanmaktadır. Malzemenin hasar görmediği durumdaki gerilme değerini (3.8), kırılma durumundaki gerilme değerini (3.9) denklemi vermektedir. (3.10) ve (3.11) denklemleri ile gerilme ve gerinim, Hugonit elastik sınırındaki basınç ile normalleştirilir. Bu denklemde verilen “a” parametresi seramiğe ait dayanım değeri iken “c” parametresi şekil değiştirme oranı için kullanılan ifadedir. (3.11)’de verilen denklem hesaplama döngüsü başına plastik gerinime dayalı birikmiş hasarı temsil eder. (3.12) numaralı denklem ile hidrostatik basınç hesabı yapılır.

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (3.7)$$

$$\sigma_i^* = a(p^* + t^*)^n(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3.8)$$

$$\sigma_f^* = b(p^*)^m(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \leq \text{SFMAX} \quad (3.9)$$

$$t^* = \frac{T}{\text{PHEL}} \quad (3.10)$$

$$p^* = \frac{P}{\text{PHEL}} \quad (3.11)$$

$$\epsilon_f^p = d_1(p^* + t^*)^{d_2} \quad (3.12)$$

$$P = k_1\mu + k_2\mu^2 + k_3\mu^3 \quad (3.13)$$

Tablo 3.3 Johnson Holmsquit-2 alümina parametreleri [44]

Sembol	RO	G	A	B	C	M	N	EPSI	T
Birim	kg/m ³	GPa	GPa	GPa					
	3700	90.16	0.93	0.31	0	0,6	0,6	1	0.2
Sembol	SFMAX	HEL	PHEL	BETA	D1	D2	K1	K2	K3
Birim		GPa	GPa						
	0,2	19	1,46	1	0,005	1	130,95	0	0

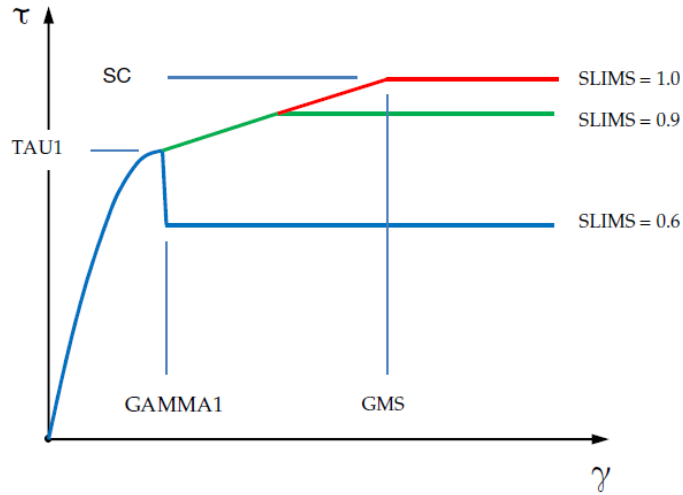
3.2.3 Laminated Composite Fabric Malzeme Modeli

Enerji emilimi için tasarlanan kompozit yapılar genellikle ince cidarlı olup aksel yönde darbe enerjisini absorbe etmeleri beklenir. Ezilme morfolojisi, fiber tipi ve yönlendirmelerine bağlı olarak değişirken bu değişimi sayısal olarak modellenmesi için LS-Dyna sonlu elemanlar paket programında yaygın olarak kullanılan modeller Mat 54 Laminated Composite Damage ile Mat 58 Laminated Composite Fabric malzeme modelleridir. Mat 54 malzeme modeli bozulma davranışını simüle edebilmesi için bünyesinde Chang-Chang ve Tsai-Wu bozulma parametreleri barındırırken bu parametreler laboratuvarında ölçülemeyen parametrelerdir. TFAIL, SOFT, ALPH,

YCFAC, FBRT, BETA ve EFS gibi parametreler analitik kalibrasyon yöntemi ile veya deneme yanılma yoluyla belirlenebilir [20].

Laminated Composite Fabric malzeme modeli tek yönlü fiber kompozitleri, dokuma tipi fiber kompozitleri ve bunlarla oluşan laminant yapıları modellemek için kullanılabilen malzeme modellerinden biridir. Bu model Hashin'in hasar mekaniği modeline dayanır ve Matzenmiller ve arkadaşlarına ait teoriyi uygular. A ve B olarak belirlenen iki ana yönde elastik modül ile poisson oranı ile gerilme değerlerine karşılık gelen azami çekme, basma ve kayma dayanımları belirlenir. Gerilme EA ile belirtilen değere kadar lineer elastik olarak etkir. Gerilme değeri XT maksimum dayanım değerine ulaşınca kadar artar. Gerilme değeri XT maksimum dayanım değerine ulaştığında gerilim sınırlandırma parametresi olan SLIMT1 parametresi baz alınarak gerilme sınırlandırılır. ERODS parametresi ile belirtilen gerinim değerine ulaşan elemanlar silinerek çözümden çıkarılır. Doğru bozunma kriterleri belirlendiğinde malzemeye ait plastik davranışları ve bozunma durumları gerçeğe yakın şekilde modellenebilmektedir. [45]. Şekil 3.1'de analizlerde kullanılan sınırlandırma faktörlerinin malzeme davranışına olan etkisi görülmektedir.

$$\sigma_{min} = SLIM_{XX} * \sigma \quad (3.13)$$



Şekil 3.1 Gerilme sınırlandırmasının etkisi

Literatür çalışmaları incelendiğinde balistik çarpışma testlerini simüle ederken kullanılacak en uygun malzeme modelinin “Laminated Composite Fabric” malzeme modeli olduğu birçok çalışma ile ortaya konmuştur [20] [46].

Tablo 3.4 Laminated Composite Fabric parametreleri [12]

Sembol	Birim	Epoksi Matris	Aramid Fiber Elyaf
Ro	kg/m ³	1140	1450
EA	GPa	3,78	72,94
EB	GPa	3,78	72,94
EC	GPa	3,78	72,94
PRBA		0,3	0,27
GAB	GPa	1,45	1,57
GBC	GPa	1,45	1,45
GCA	GPa	1,45	1,45
SLIMT1		0,5	0,029
SLIMC1		0,5	0,029
SLIMT2		0,5	0,029
SLIMC2		0,5	0,029
SLIMS		0,5	0,1
XC	GPa	0,09	2,52
XT	GPa	0,09	2,52
YC	GPa	0,09	2,52
YT	GPa	0,09	2,52
SC	GPa	0,05	1,26

3.3 Analizlerde Kullanılan Mermilerin Modellenmesi

Yapılan iki doğrulama çalışmasında sırasıyla 7.62 mm AP mermisi ve 9mm kurşun çekirdeğe sahip mermi kullanılmıştır. Literatür çalışmalarında mermi çekirdekleri çevresinde bulunan bakır ceket yapının analiz sonuçlarına etkisinin minimal seviyelerde olduğu görülmüş ve analiz süreleri göz önüne alınarak ceket yapıları modellenmemiştir. 7.62 mm kalibre merminin ceket yapısı çıkarıldığında mermi çapı 6.1 mm, mermi boyu ise 28.4 mm ebatlara sahiptir. Mermi ağırlığı 5.1 gramdır. 9mm merminin ceket yapısı çıkarıldığında çekirdek çapı 8.6 mm, çekirdek boyu 14 mm'dir. Çekirdek ağırlığı 7 gramdır. 20 mm FSP mermisi Tablo 2.4'de verilen detaylara uygun olarak modellenmiştir. Mermi çapı 20 mm, mermi boyu 28 mm ebatlara sahiptir. Mermi

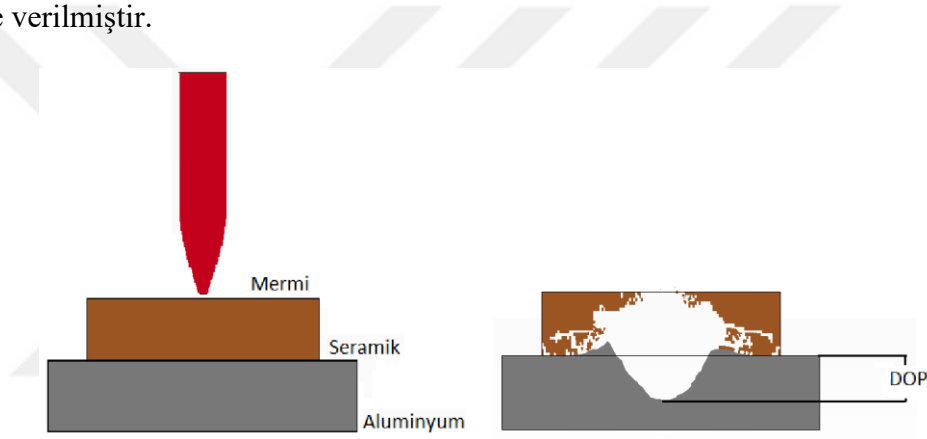
ağırlığı 54 gramdır. Mermilerde çarpışma sırasındaki bozunmaları gözlemleyebilmek için 0.25 ile 0.50 mm arasında katı elemanlar kullanılmıştır. 20 mm FSP mermide 8670 adet, 7.62 mm mermi için 17340 adet, 9 mm mermi için 24486 adet katı eleman kullanılmıştır. Şekil 3.2’de analizlerde kullanılan mermi modelleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Mermilerin sonlu elemanlar ile modellenmesi

4.1 Penetrasyon Derinliği Testleri

Penetrasyon derinliği (DoP) testi balistik incelemelerde kullanılan malzemelerin performanslarını gözlemlemek adına yapılan çalışmalardan biridir. Test edilecek malzeme bir destek plaka önüne yerleştirilerek kontrollü bir penetrasyon sağlanır. Elde edilen penetrasyon derinliği ile malzemelerin penetrasyon davranışları belirlenir. Destek malzemeyi sabit tutarak farklı malzemelerin penetrasyon davranışlarını karşılaştırabilmek bu test ile mümkündür. Penetrasyon derinliği test şematiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Penetrasyon derinliği testi şematiği

Savio ve Madhu yaptıkları testlerde alümina seramik malzeme kullanarak bir destek plakadaki penetrasyon derinliklerini merminin farklı hız değerleri için ölçmüşlerdir. Her hız değeri için altı atış yapılmış olup atışlar arasındaki tutarsızlıklar da deney çalışmasında göz önünde bulundurulmuştur. Deneyde sert çelikten üretilmiş 7.62 mm çapında, çekirdek çapı 6.1 mm ve uzunluğu 28.4 mm olan zırh delici mermi kullanılmıştır. Destek plakası olarak Al6063-T6 alüminyum blok kullanılmıştır. Mermi ve destek plaka seramik malzeme olmaksızın atış testlerine tabi tutularak referans penetrasyon derinliği belirlenmiştir. Referans penetrasyon derinlikleri Tablo 4.1’deki gibidir.

Tablo 4.1 Referans penetrasyon derinliği sonuçları [12]

Ortalama Hız Değeri [m/s]	600	700	800
Referans Penetrasyon Derinliği [mm]	32	42	54

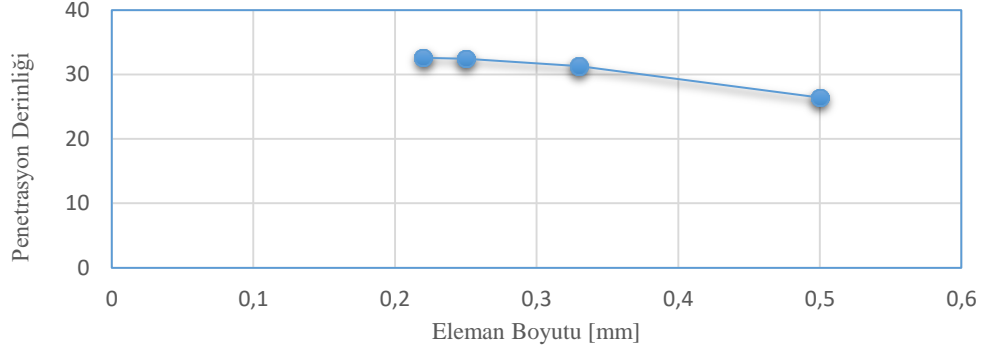
Tüm atış testlerinde 5mm alümina seramik malzeme kalınlığı sabit tutulurken mermi hızları her hız kategorisi için ± 8 m/s eşik değerleri arasında tutulmuştur. Test sonuçları Tablo 4.2'deki gibidir.

Tablo 4.2 Deney sonuçları [12]

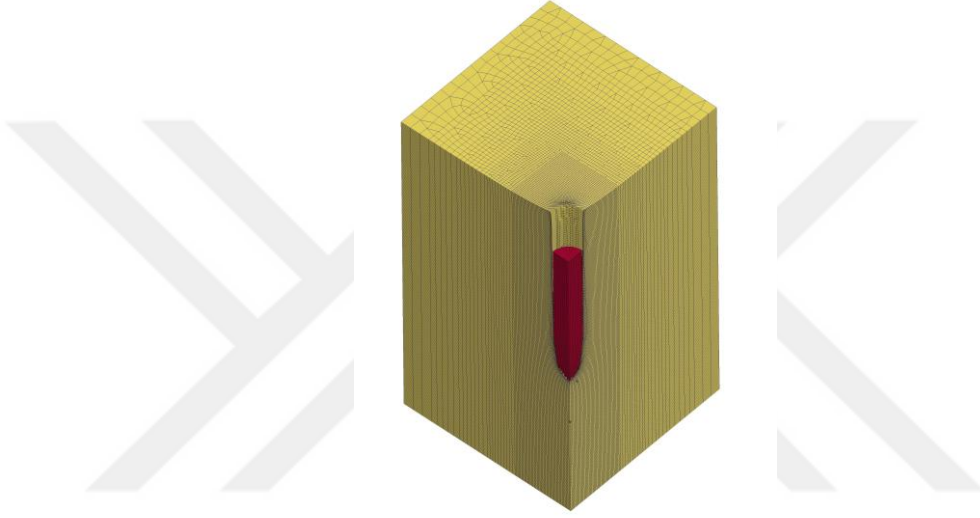
Deney Numarası		1	2	3	4	5	6
Mermi Çıkış Hızı	[m/s]	596	605	597	608	600	602
Penetrasyon Derinliği	[mm]	0,5	6,5	1	0,5	5	1
Deney Numarası		1	2	3	4	5	6
Mermi Çıkış Hızı	[m/s]	707	708	705	703	697	704
Penetrasyon Derinliği	[mm]	5	9,5	3	10	11,5	3,5
Deney Numarası		1	2	3	4	5	6
Mermi Çıkış Hızı	[m/s]	808	823	816	811	828	810
Penetrasyon Derinliği	[mm]	20,5	11	6	10	16,5	21

4.2 Metalik Malzemelerin Doğrulanması

DoP testlerinde yalnızca mermi ve destek plaka kullanılarak elde edilen derinlik değerine referans penetrasyon derinliği (RPD) denir. Tablo 4.1'de 600 m/s hız değerleri için yapılmış RPD test sonuçları analizlerle doğrulanarak sayısal ağ eleman boyutu belirlenmiştir. AL6063-T6 malzemesi için 0.25 mm eleman boyutu analiz süreleri ve analiz sonuçları bakımından en uygun sonucu verdiği görölmüştür. Numerik çözüm değerleri ile test sonuçları arasındaki negatif sapma %1.4 olup referans penetrasyon derinliği 32.45 mm hesaplanmıştır. Her iki malzeme de isotroptik davranış sergilediğinden çalışma çeyrek model ile gerçekleştirilmiştir. Penetrasyon derinliği ile eleman boyutu arasındaki değişim Şekil 4.2'de, analiz sonucu Şekil 4.3'de verilmiştir.

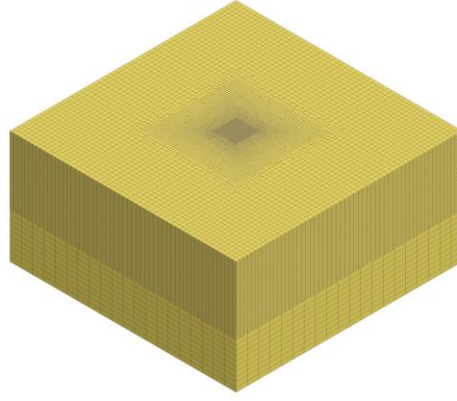


Şekil 4.2 Alüminyum eleman boyutlarının belirlenmesi



Şekil 4.3 Referans penetrasyon derinliği analiz sonucu.

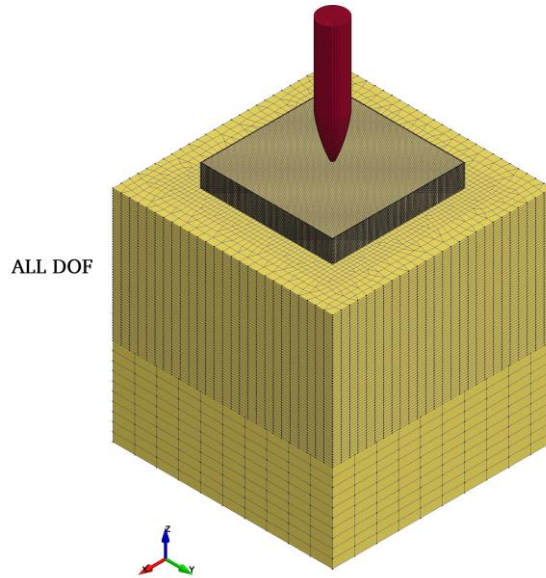
DoP testlerini simüle ederken kullanılan alüminyum blokların genişlikleri mermi çapının minimum 5 katı olacak şekilde modellenerek sınır koşullarının yaratacağı negatif etkilerden kaçınılması amaçlanmıştır. 7.62 mm merminin kullanıldığı analizlerde 50x50x50 mm ebatlarında alüminyum blok kullanılmıştır. DoP testlerinde ortaya çıkan maksimum penetrasyonun 30mm altında kaldığı görüldüğü için bloğun ilk 30 mm'lik kısmına yoğun elemanlar, altta kalan 20 mm kısmına ise kaba elemanlar kullanılarak kontak ile bağlanmıştır. Şekil 4.4'de alüminyum yapının sonlu elemanlar modeli verilmiştir.



Şekil 4.4 Alüminyumun sonlu elemanlar ile modellenmesi

4.3 Seramik Malzemenin Doğrulanması

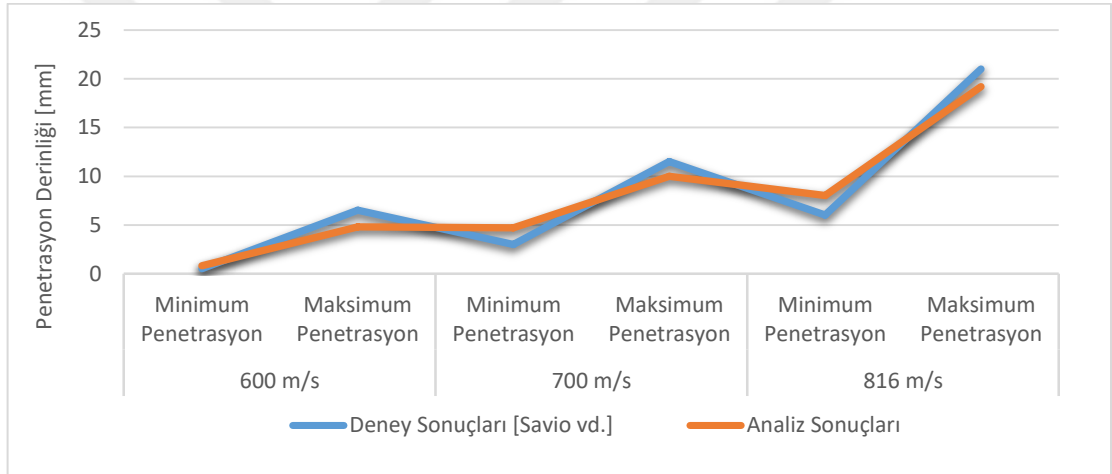
Seramiklerle ilgili yapılan çalışmalarda seramik yapısına ait geometriler (hekzagonal, karo ve prizmatik) karşılaştırılmış olup özellikle 20 mm FSP gibi büyük kalibreli mermiler için hekzagonal yapının daha uygun olduğu görülmüştür [11]. Seramik yapıda 0.25x0.25x0.25 mm eleman boyutu kullanılmıştır. Hedef yapısı kenar bölgelerden tüm hareket derecelerinde sınırlandırılacak şekilde sınır koşulu ataması yapılmıştır. Analizler için oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile sınır koşulları Şekil 4.5’de verilmiştir.



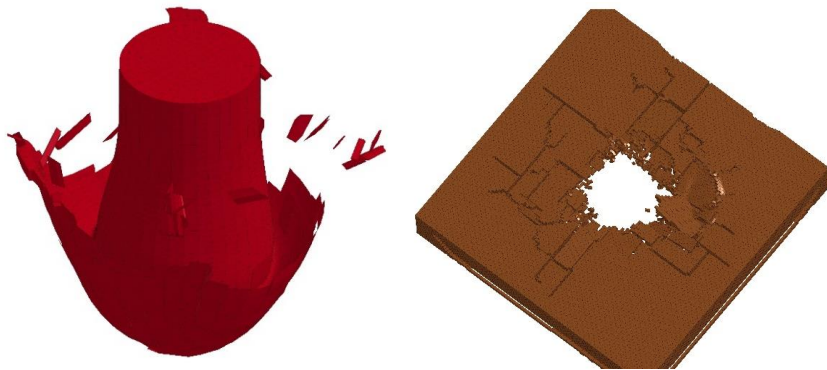
Şekil 4.5 Sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları

Yapılan deney çalışmasında 5 mm alümina seramik yapı sabit tutularak 600 ± 8 , 700 ± 8 ve 816 ± 12 m/s hız değerleri ile penetrasyon değerleri elde edilmiştir. Belirli bir skala içerisinde yapılmış atışlarda farklı penetrasyon derinlik değerlerinin olması seramik yapının sabit bir yapısal bozulma gerçekleştirmediğini göstermiştir.

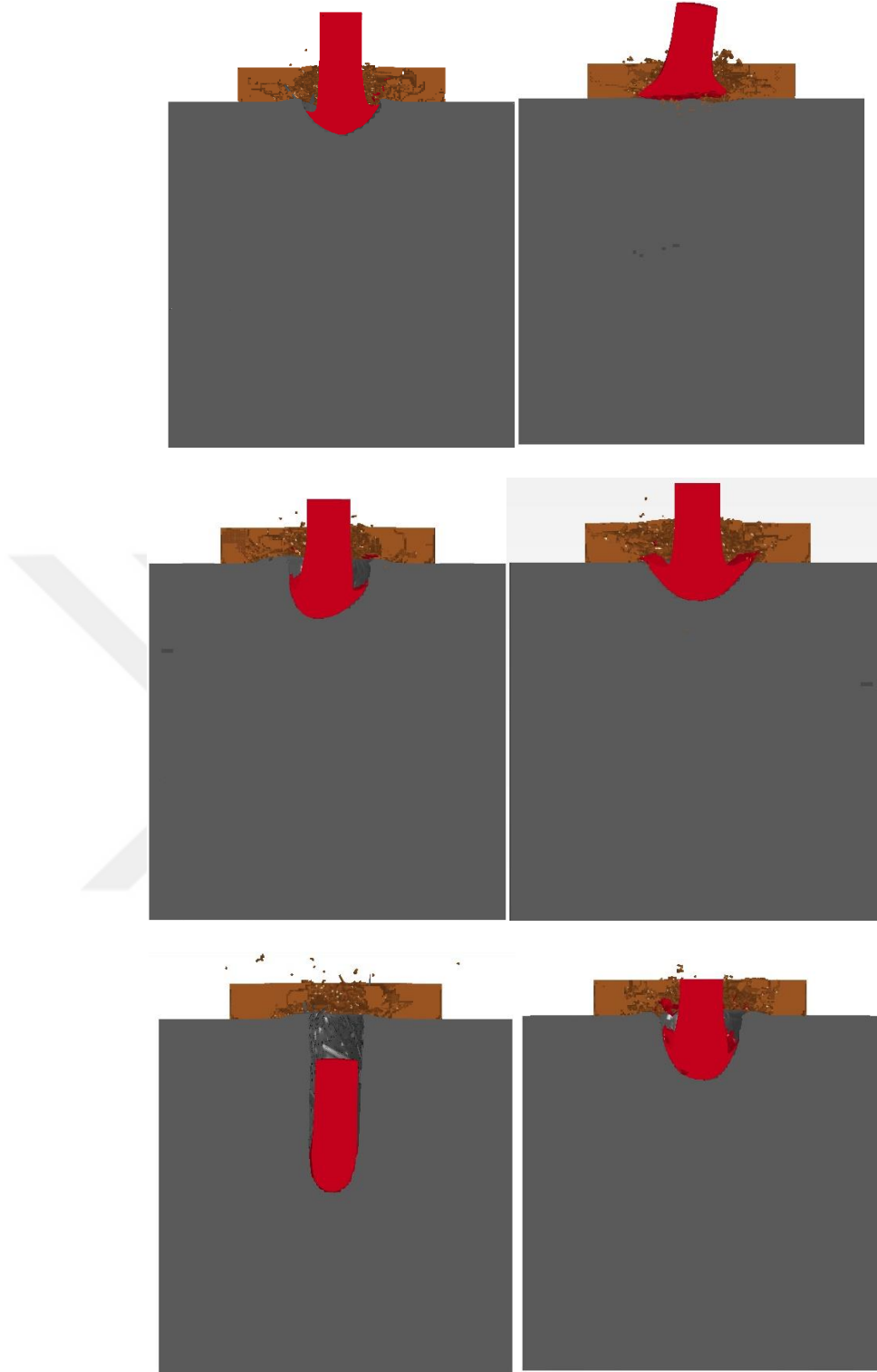
Johnson-Holmquist-2 matematik modelinde seramiğin sayısal ağ yapısındaki elemanların silinmesi için bozulma kriterinin (FS) belirlenmesi gerekmektedir. Matematiksel modelde $FS > 0$ için efektif plastik gerinim değerinin üstüne çıkan elemanlar silinecektir. FS değişkeni $0.015 < FS < 0.021$ eşik aralığında 600, 700 ve 816 m/s hız değerlerine ait maksimum ve minimum penetrasyon derinliklerini yakınsadığı görülmüştür. Şekil 4.6'da deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması, Şekil 4.7'de analiz sonucunda seramik yapı ile merminin son durumları, Şekil 4.8'de ise farklı hız ve bozulma kriterlerinde penetrasyon analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.6 Deney sonuçları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması

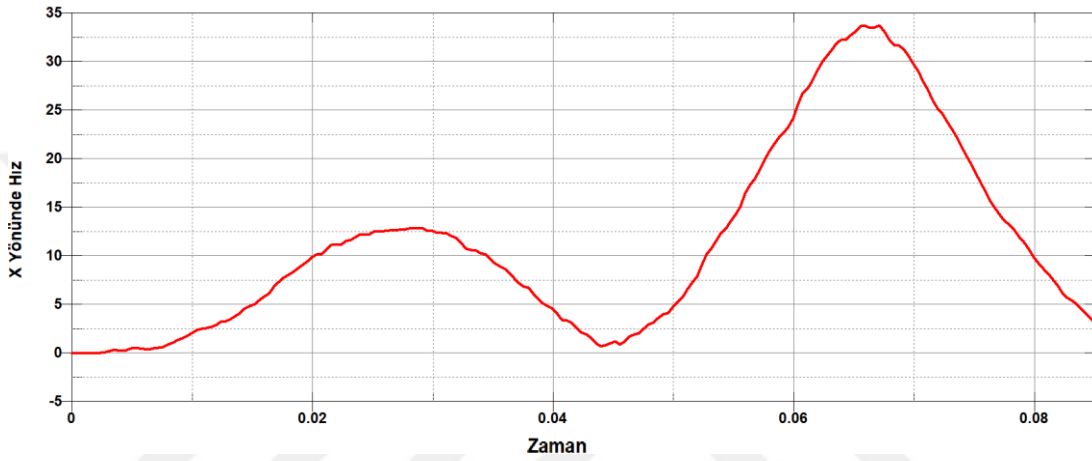


Şekil 4.7 Çarpışma sonunda mermi ve seramiğin görünümü



Şekil 4.8. Üç farklı hız durumu ve iki farklı fs değeri için penetrasyonlar
(Yukarıdan aşağıya 600 m/s, 700 m/s, 816 m/s, soldan sağa FS=0.015, FS=0.021)

Gerçekleştirilen analizlerde seramiklerin çarpışma sırasında farklı yönlerde asimetrik bozulmalar gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu asimetrik bozulmanın penetre olan merminin temas yüzeylerinde bölgesel değişken deformasyonlara uğramasına sebep olduğu, sonucunda ise merminin ilerleme yönünün ufak açılarla sapmasına ve yalpalanma ivmesi oluşturmaya sebep olduğu saptanmıştır. Şekil 4.8’de merminin hız yönüne göre dikey aksel hız kazandığı, bu hızın merminin yalpalama hareketi yapmasına sebep olduğu görülmüştür. Şekil 4.9’da penetrasyon sırasında mermi yönüne dik eksende zamana göre oluşan hız değişimi verilmiştir.



Şekil 4.9 7.62 AP merminin -x yönündeki hız-zaman grafiği

Yapılan analizler neticesinde alümina seramiğe ait bozulma kriteri saptanmış ve bozulma kriterlerinin belirli bir aralıkta farklı hız durumları için deneyleri yakınsadığı görülmüştür.

KOMPOZİT YAPININ DOĞRULANMASI

Kompozit yapılar, mikroskobik fiberlerden laminant yapılara kadar özgün karakteristik davranış farklılıklarına sahip olmasından ötürü iyi bir öngörülebilir çalışma yapabilmek için en küçük yapısından başlayarak her aşamada doğrulama yapılması gerekliliğini beraberinde getirir. Yapılacak deneylerle elde edilen veriler ışığında ortaya konulacak olan parametreler, davranış durumlarını numerik yöntemler ile birlikte daha güvenilir sonuçlar vermesini sağlayacaktır. Bu bağlamda hazırlanan tasarımlarla ilgili doğru yorumlar yapabilmek için öncelikle malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde karakterize edilmesi gereklidir.

Signetti ve arkadaşları, çalışmalarıyla kompozit yapıların numerik simülasyonları için güvenilir çok ölçekli bir protokol oluşturmuşlardır. İlk olarak çalışmalarında kullandıkları aramid fiberleri lifler haline getirerek tek eksenli nano ölçekli gerilmeler uygulayarak çekme testi icra etmişler ve liflere ait elastisite modülü, kırılma dayanımı ve gerinim oranları gibi mekanik davranış özelliklerini türetmişlerdir. Sonrasında 0^0 ve 45^0 yönlendirilmiş, tek katmanlı ve 5 katmanlı kompozit çeki testi numuneleri oluşturarak testlerini yapmış ve fiber liflerinden elde ettikleri veriler doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Fiber lifleri ile yapılan test sonuçlarında elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'deki gibidir.

Tablo 5.1 Fiber lif numunelerine ait test sonuçları [12]

		Numune-1	Numune-2	Numune-3	Numune-4	Numune-5
Young Modülü	[GPa]	70.22	72.28	71.83	80.16	70.22
Çekme Dayanımı	[GPa]	2,48	2,62	2,39	2,54	2,38
Maksimum Gerinim		0.031	0.031	0.031	0.030	0.031

5.1 Çeki Testi Analizleri

Çeki testlerinde kullanılan numunelerdeki fiber ve epoksi matris hacim oranları ile malzeme katmanlarının merkeze olan uzaklık koordinatları sırasıyla 0^0 ve 45^0 açılar için Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir. Merkezden dışarıya doğru 6 integrasyon noktası

fiber elemanlara ait iken kalan 8 integrasyon noktası epoksi matrise ait integrasyon noktaları belirlenmiştir. Laminated Composite Fabric matematik modeli iki boyutlu kabuk elemanlar ya da kalın kabuk (tshell) elemanlar ile çalışma imkanı sunması ve artacak katman sayılarında sayısal ağ yapısının analiz sürelerini oldukça arttıracığı öngörüsüyle kompozit yapı iki boyutlu kabuk elemanlar ile modellenmiştir.

Tablo 5.2 0^0 ile yönlendirilmiş kompozit yapı [12]

0^0				
1 KATMAN			5 KATMAN	
İN	y [mm]	Hacim Oranı	y [mm]	Hacim Oranı
1	0.11060	0.05833	0.09584	0.04392
2	0.09748	0.05833	0.08772	0.04392
3	0.08435	0.05833	0.07959	0.04392
4	0.07123	0.05833	0.07147	0.04392
5	0.05467	0.08889	0.05741	0.10811
6	0.03000	0.08889	0.03000	0.10811
7	0.01000	0.08889	0.01000	0.10811
8	-0.01000	0.08889	-0.01000	0.10811
9	-0.03000	0.08889	-0.03000	0.10811
10	-0.05467	0.08889	-0.05741	0.10811
11	-0.07123	0.05833	-0.07147	0.04392
12	-0.08435	0.05833	-0.07959	0.04392
13	-0.09748	0.05833	-0.08772	0.04392
14	-0.11060	0.05833	-0.09584	0.04392

Tablo 5.3 45^0 ile yönlendirilmiş kompozit yapı [12]

45^0				
1 KATMAN			5 KATMAN	
İN		Hacim Oranı	y [mm]	Hacim Oranı
1	0.13858	0.07500	0.09338	0.03929
2	0.11608	0.07500	0.08650	0.03929
3	0.09358	0.07500	0.07963	0.03929
4	0.07108	0.07500	0.07275	0.03929
5	0.04983	0.06667	0.05931	0.11429
6	0.03000	0.06667	0.03000	0.11429
7	0.01000	0.06667	0.01000	0.11429
8	-0.01000	0.06667	-0.01000	0.11429

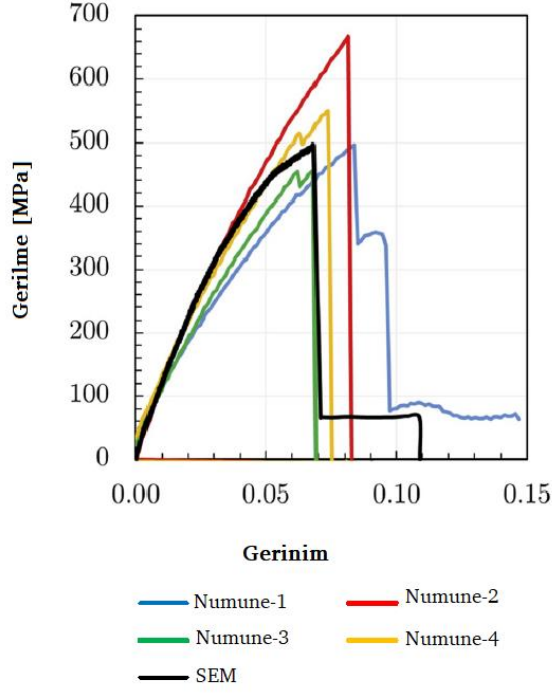
Tablo 5.3 45⁰ ile yönlendirilmiş kompozit yapı [12] (devamı)

İN	45 ⁰			
	1 KATMAN		5 KATMAN	
		Hacim Oranı	y [mm]	Hacim Oranı
9	-0.03000	0.06667	-0.03000	0.11429
10	-0.04983	0.06667	-0.05931	0.11429
11	-0.07108	0.07500	-0.07275	0.03929
12	-0.09358	0.07500	-0.07963	0.03929
13	-0.11608	0.07500	-0.08650	0.03929
14	-0.13858	0.07500	-0.09338	0.03929

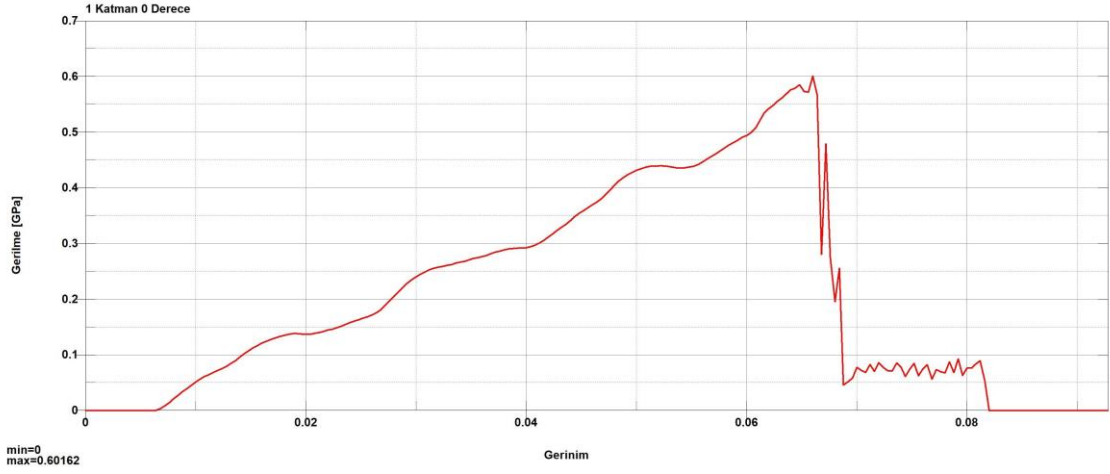
Bahse konu çalışmada Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'e uygun olarak hazırlanan 4 adet numuneye çekme testleri uygulanmış ve gerilim-gerinim grafikleri ortaya konmuştur. Bir ve beş katmanlı para aramid fiber katkılı kompozit yapılar için elde edilen grafikler 0⁰ ve 45⁰ açılara sahip sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanmıştır. Şekil 5.1'de tek katmanlı yapıya ait çekme testi analiz modeli, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de 0⁰ açı ile yönlendirilmiş tek katmanlı yapı deney sonuçları ile analiz sonuçları, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de 45⁰ açı ile yönlendirilmiş tek katmanlı yapı deney sonuçları ile analiz sonuçları, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de 0⁰ açı ile yönlendirilmiş beş katmanlı yapı deney sonuçları ile analiz sonuçları, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'de 45⁰ açı ile yönlendirilmiş tek katmanlı yapı deney sonuçları ile analiz sonuçları verilmiştir.



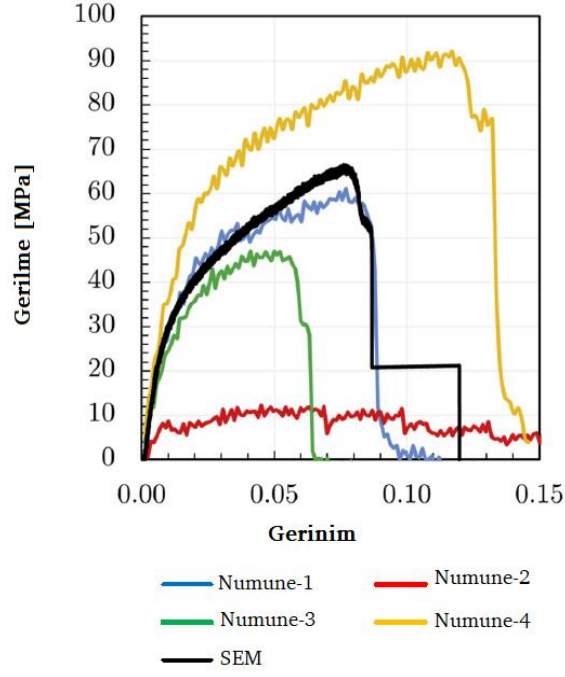
Şekil 5.1 Çekme testi sonlu elemanlar modeli



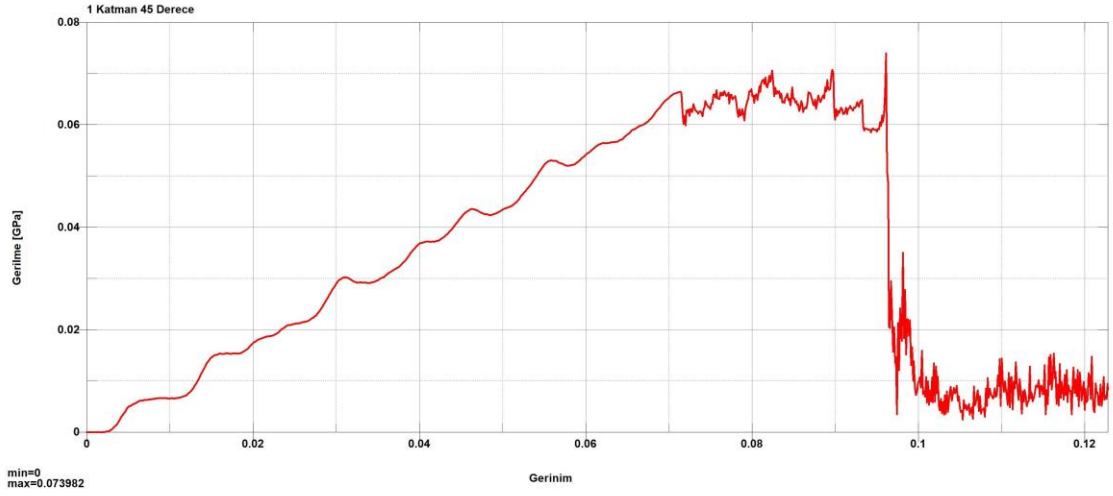
Şekil 5.2 0^0 ile yönlendirilmiş tek katman test sonuçları [12]



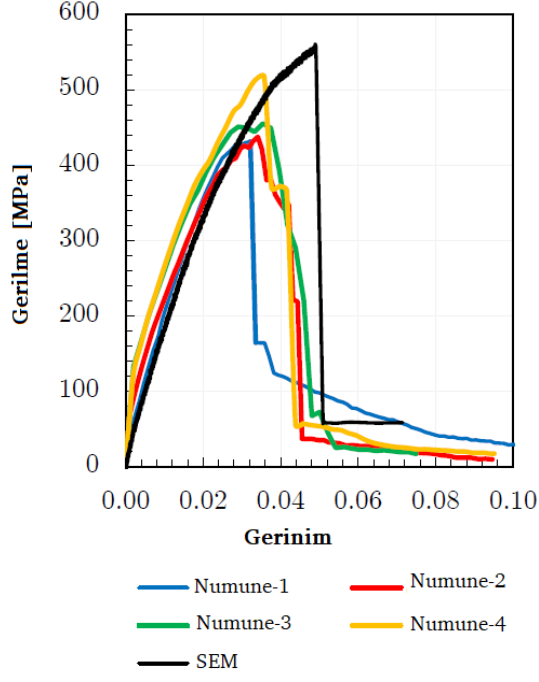
Şekil 5.3 0^0 ile yönlendirilmiş tek katman analiz sonuçları



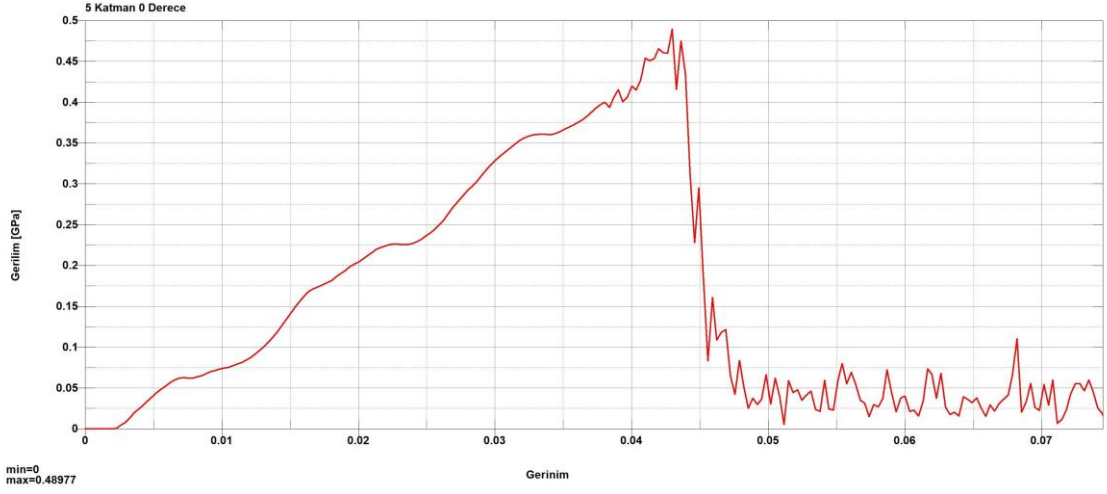
Şekil 5.4 45⁰ ile yönlendirilmiş tek katman test sonuçları [12]



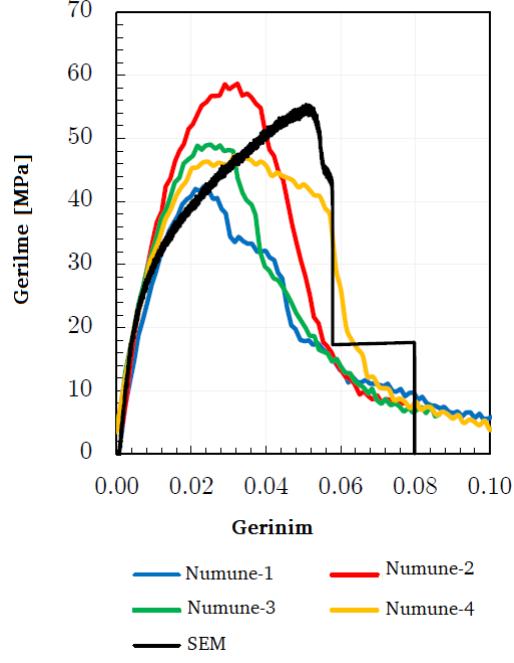
Şekil 5.5 45⁰ ile yönlendirilmiş tek katman analiz sonuçları



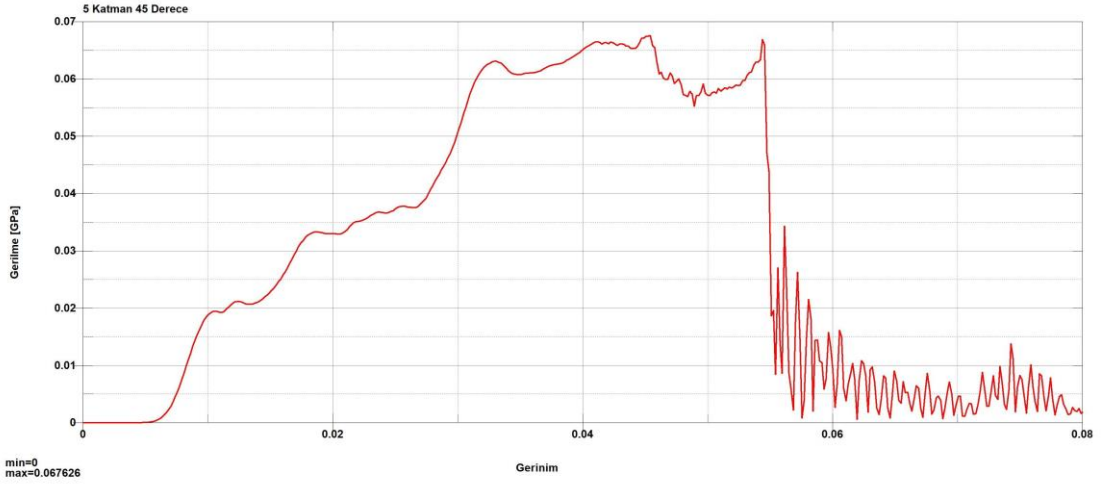
Şekil 5.6 0^0 ile yönlendirilmiş beş katman test sonuçları [12]



Şekil 5.7 0^0 ile yönlendirilmiş beş katman analiz sonuçları

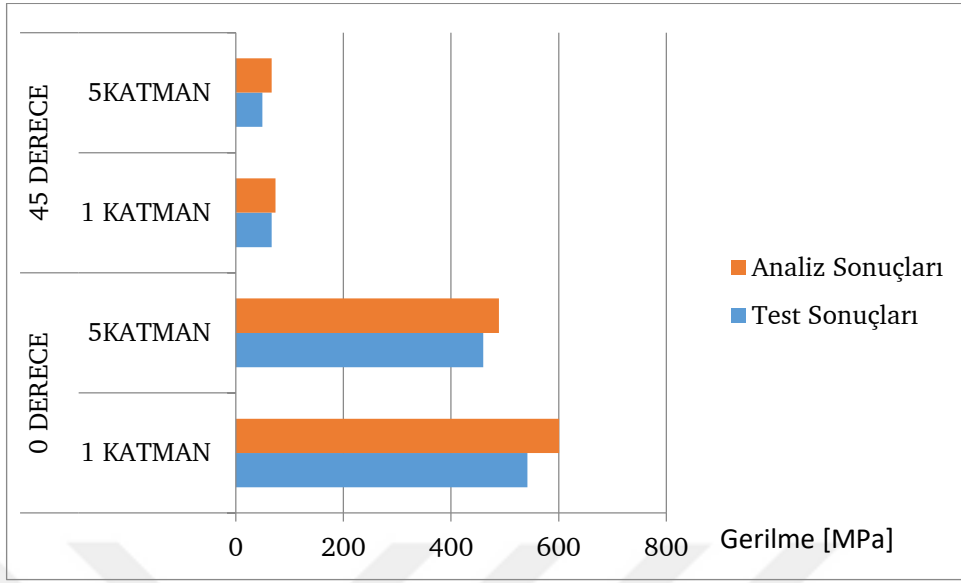


Şekil 5.8 45⁰ ile yönlendirilmiş beş katman test sonuçları [12]



Şekil 5.9 45⁰ ile yönlendirilmiş beş katman analiz sonuçları

Yapılan tek ve çok katmanlı kompozit yapıların çekme testi simülasyonları ile kompozit yapı için kullanılan malzeme formülasyonu ve parametrelerin doğruluğu sınanmış, deneysel sonuçları yakınsadığı görülmüştür. Şekil 5.10'da testleri yapılan numunelerin ortalama çekme dayanımı sonuçları ile sonlu elemanlar modeli ile bulunan sonuçlar karşılaştırılmalı olarak ortaya konmuştur.



Şekil 5.10 Çekme dayanımı sonuçları

5.2 Çarpışma Analizleri

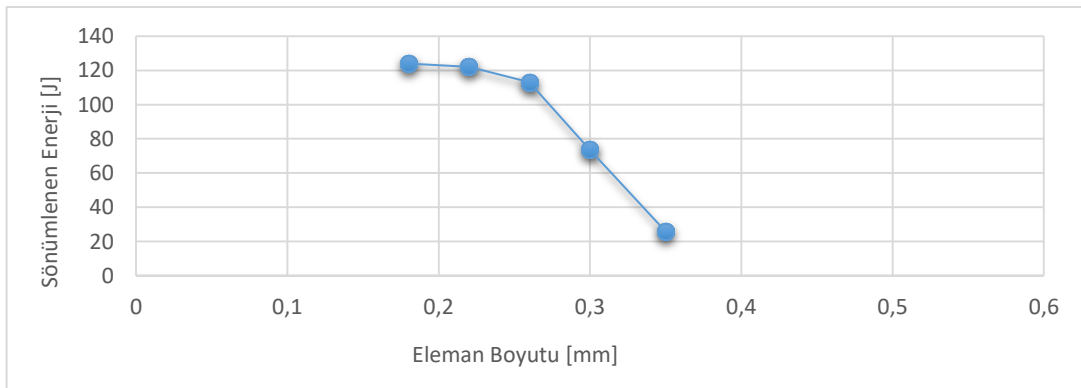
Signetti ve arkadaşları 30 katmandan oluşan 0.599 ve 0.429 hacim oranlarına sahip 5mm ve 7mm kalınlığındaki aramid fiberlerden oluşan kompozit yapılara balistik çarpışma testleri uygulamış ve 5mm kalınlığındaki yapının 360 m/s hızındaki 9 mm mermiyi durdururken, 7mm kalınlığındaki yapının mermiyi durduramadığı, yaklaşık 35 m/s'lik artık bir hıza sahip merminin perforasyon sonucu yoluna devam ettiği belirtilmiştir.

Çeki testlerinin numerik doğrulaması ile balistik analizlerin icrası için gerekli veriler elde edilmiştir. Oluşturulacak laminantın modellenmesi aşamasında fiber ve matris dağılımını simüle edebilmek adına çekme testleriyle benzer şekilde toplamda 14 integrasyon katmanı kullanarak fiber/matris hacim oranı ve fiber yönelimleri belirlenmiştir. İlk ve son 4 katmana epoksi, arada kalan katmanlara ise fiber malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Oluşturulan laminantta her bir katmanda fiber yönelimleri $0^0/45^0/90^0/-45^0$ olacak şekilde fiber yönlendirmesi yapılmıştır. Katmanları oluşturan integrasyon noktaları Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4 Katman koordinatları ve ağırlık oranları [12]

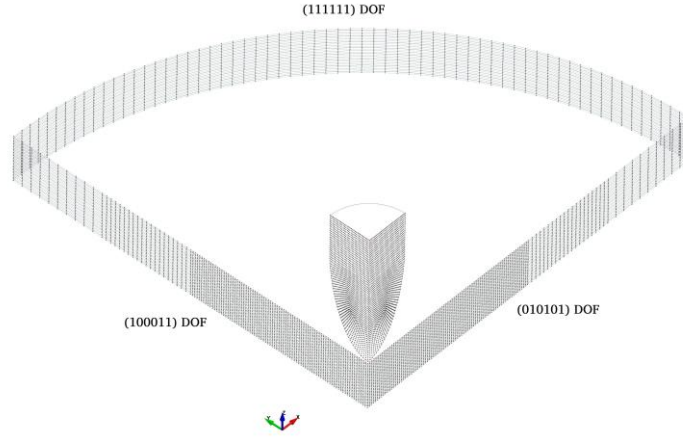
İN	Yapı-1		Yapı-2	
	5mm 30 Katman		7mm 30 Katman	
	Koodinat (mm)	Hacim Oranı	Koodinat (mm)	Hacim Oranı
1	0,07931	0,05015	0,10833	0,07143
2	0,07094	0,05015	0,09167	0,07143
3	0,06256	0,05015	0,07500	0,07143
4	0,05419	0,05015	0,05833	0,07143
5	0,04167	0,09980	0,04167	0,07143
6	0,02500	0,09980	0,02500	0,07143
7	0,00833	0,09980	0,00833	0,07143
8	-0,00833	0,09980	-0,00833	0,07143
9	-0,02500	0,09980	-0,02500	0,07143
10	0,04167	0,09980	-0,04100	0,07143
11	-0,05419	0,05015	-0,05833	0,07143
12	-0,06256	0,05015	-0,07500	0,07143
13	-0,07094	0,05015	-0,09167	0,07143
14	-0,07931	0,05015	-0,10833	0,07143

Analizlerde sınır koşullarının yaratacağı etkilerden uzaklaşmak için 80 mm çapında dairesel bir kompozit yapı modellenmiştir. Eleman boyutu Yapı-2'ye ait çarpışma testleri ile belirlenmiştir. Çeyrek modelle gerçekleştirilen hızlarda 9mm mermiye ait hız değeri 360 m/s'dir. Eleman boyutu ile sönmülenen mermi enerjisi arasındaki değişim Şekil 5.11'de verilmiştir.

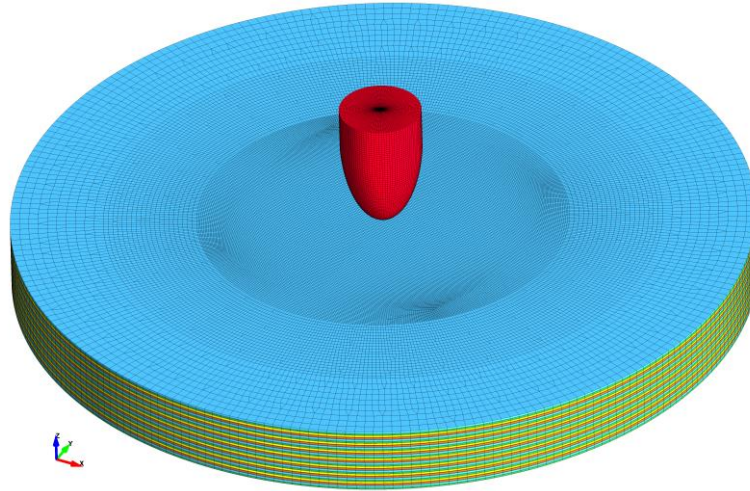


Şekil 5.11 Kompozit yapısı eleman boyutunun belirlenmesi

Çeyrek model ile gerçekleştirilen analizlerde yapıya ait sınır koşulları Şekil 5.12'deki gibidir. Malzemelerin kesilen kısımları boyunca devam eden ekseninde hareketler sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.12 Model sınır koşulları



Şekil 5.13 7mm (Yapı-2) kompozit yapı sonlu elemanlar modeli(yansıtılmış)

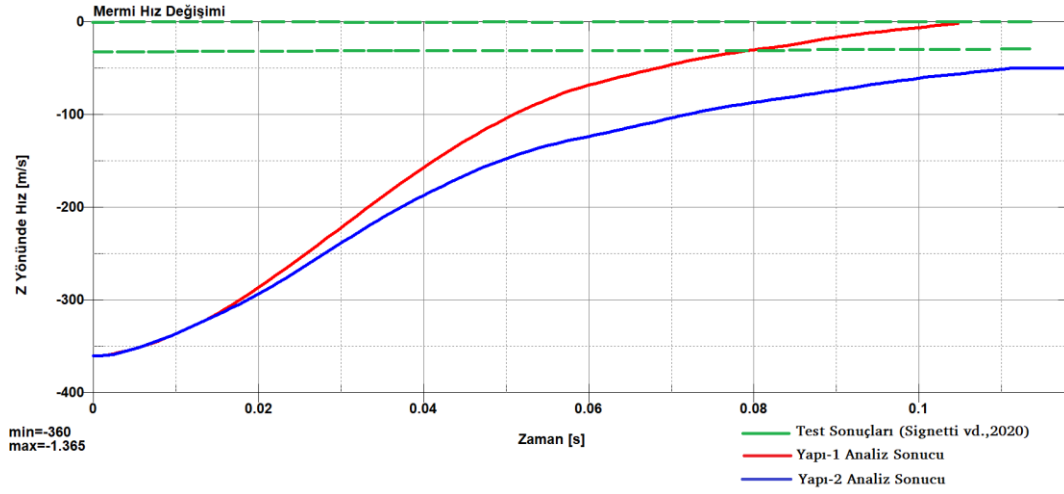
Balistik çarpışma analizlerini gerçekleştirirken malzemelerin birbirleriyle olan etkileşimlerini tanımlamak için kullanılan kontaklar şöyledir:

- Eroding Surface to Surface: Mermi ile kompozit katmanlar arasında ve kompozit katmanların birbiri arasındaki çarpışma etkilerini yansıtmak için kullanılan temas algoritmasıdır.

- Automatic One Way to Surface Tiebreak: İki kompozit katmanın birbiri arasındaki yapışkan ara katman etkilerinin tanımlandığı temas algoritmasıdır. Bu temas algoritması ile katmanların delaminasyonunun incelenmesi mümkündür.

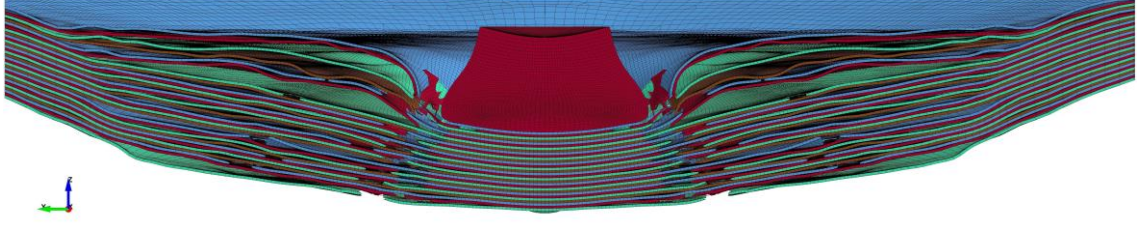
$$\left(\frac{|\sigma_n|}{\text{NFLS}}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{\text{SFLS}}\right)^2 \geq 1 \quad (5.1)$$

NFLS parametresi adhezif yapının taşıyacağı azami gerilme değerini ifade ederken SFLS ise azami kesme gerilmesi değerini ifade etmektedir. Analizlerde NFLS 350 MPa, SLFS 100 MPa alınmıştır.



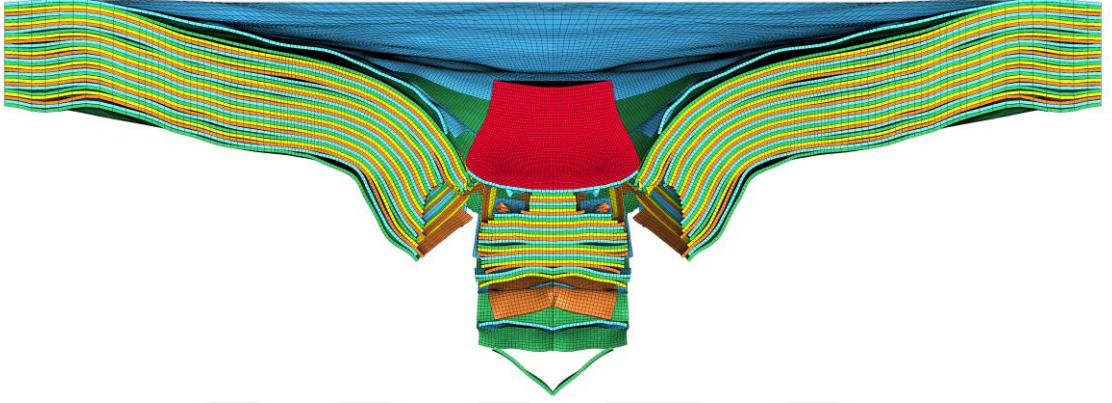
Şekil 5.14 Mermiye ait hız değişim grafikleri ve test sonuçları

Yapılan analizler neticesinde iki ayrı konfigürasyona ait mermi son hızlarının test sonuçlarını yakınsadığı görülmüştür. Bununla birlikte analiz şeması içindeki malzeme davranışlarının, mermi-katman ile katmanlar arası etkileşimlerin gerçeğe yakın modellendiği görülmüştür. Artan fiber hacim oranının yapı mukavemetinin artırdığı ve enerji sönmüleme kabiliyetine olumlu etki gösterdiği görülmüştür. Şekil 5.14'de çarpışma testleri sonucunda mermi son hız değerleri ile analiz sonucunda zamana göre mermiye ait hız değişimi verilmiştir. Yapı-1 analiz sonucu Şekil 5.15'de, yapı-2 analiz sonucu Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.15 Yapı-1 analiz sonucu

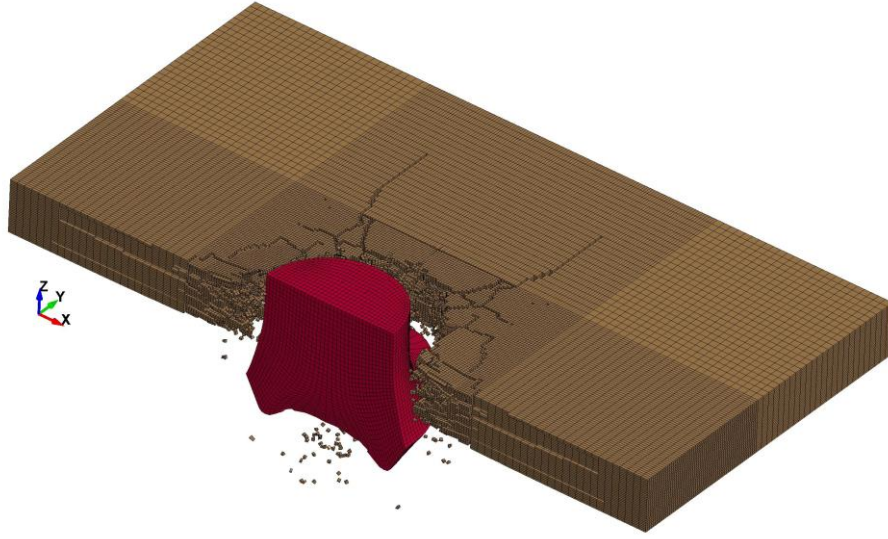
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.1096



Şekil 5.16 Yapı-2 analiz sonucu

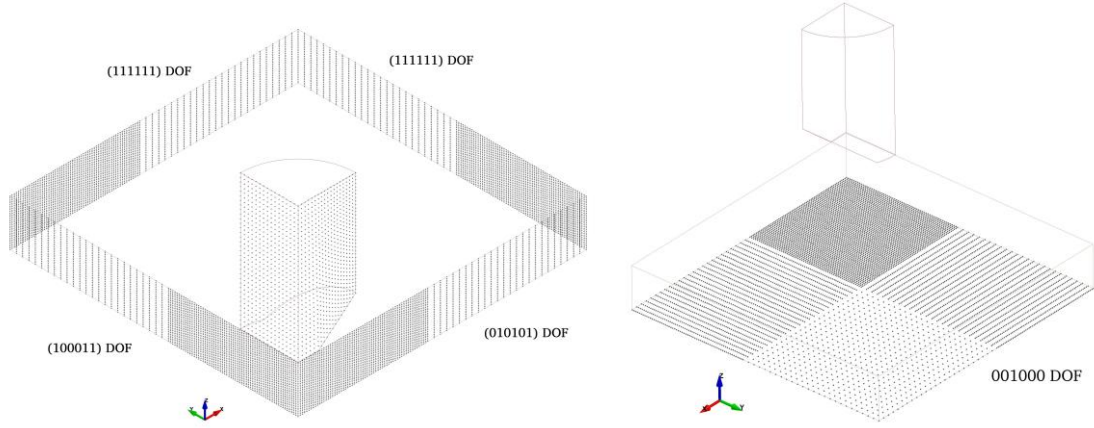
6.1 Seramik Kalınlık Etkilerinin İncelenmesi

4.bölümde belirli konfigürasyonlarda gerçekleştirilmiş DoP analizlerinde alümina seramik yapının farklı penetrasyon derinliği değerlerine sahip olduğu görülmüş, bu değişkenliğin analizlerde uygun efektif plastik gerinim değeri eşik aralığı (FS) ile yakınsaması sağlanmıştır. 20 mm FSP mermisi ile yapılan analizlerde belirlenmiş eşik aralığının ortalaması alınmış ve tüm çalışmalarda belirlenmiş optimum efektif plastik gerinim değeri sabit tutulmuştur. Analizler çeyrek modellerle gerçekleştirilmiş olup tam modellerle karşılaştırıldığında benzer çıkış hızlarına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 6.1’de 8mm seramiğe ait çarpışma analizi sonucu verilmiştir.



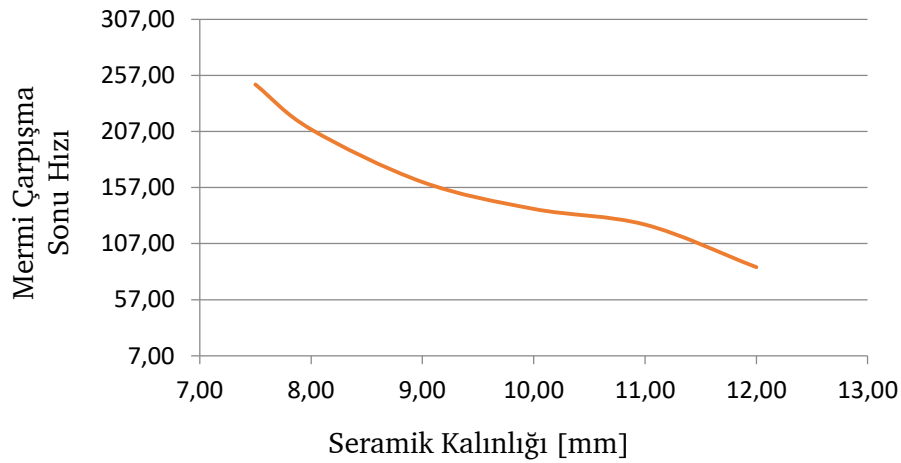
Şekil 6.1 8mm seramik çarpışma sonu durumu (yansıtılmış)

Seramik yapının kesilen kısımları boyunca devam eden ekseninde hareketler sınırlandırılmıştır. Ayrıca seramik yapı arkasında bir destek unsuru olmadan görevini yapamadığı görülmüş olup yapının en altındaki düğüm noktaları mermi hareket yönünde sınırlandırılarak sanal bir destek oluşturulmuştur. Sınır koşulları Şekil 6.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.2 Sınır koşulları

Analiz şeması; NATO tehdit seviyesi-1’de belirtildiği şekilde 520 m/s hız ile ateşlenen 20 mm FSP mermisi ve 7.5mm ile 12mm arasında farklı kalınlıklara sahip alümina seramik yapı seçilmesiyle oluşturulmuştur. Böylelikle seramik yapıdaki kalınlık değişiminin merminin hızında yaratacağı etki gözlemlenerek merminin kalan enerjisini absorbe edecek kompozit yapı kalınlığı hakkında öngörü yapma imkanı oluşacaktır. Mermi çıkış hızının seramik kalınlığına göre değişimi Şekil 6.3’de verilmiştir.

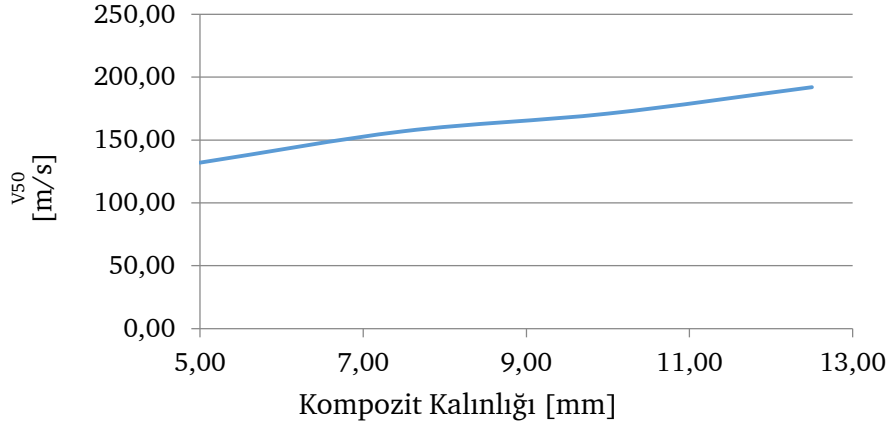


Şekil 6.3 Seramik kalınlığı-mermi hızı değişimi

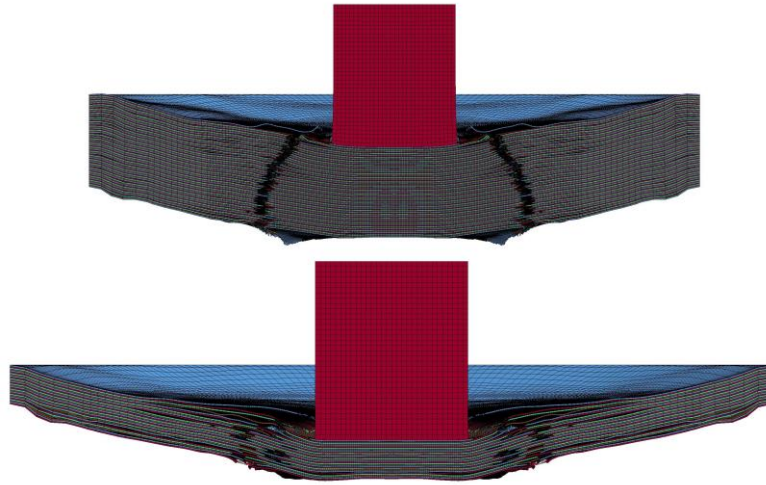
6.2 Kompozit Kalınlık Etkilerinin İncelenmesi

4. bölümde parametreleri ve çarpışma etkileşimleri belirlenen 5 mm’lik aramid kompozit malzeme yapısı (yapı-1), seramik yapının arkasında kullanılacak destek plaka olarak belirlenmiştir. Kalınlığı 5 ile 12 mm arasında değişen kompozit yapıların 20 mm FSP mermisi kullanılarak balistik limit hızları analizlerle saptanmıştır. Katman sayısının

artışı malzeme dayanımına belirli bir fayda sağlasa da devam eden kalınlık artışının malzeme süneklik yeteneğine zarar verdiği ve 20 mm FSP mermisi özelinde balistik limit hız değişiminde marjinal bir fayda sağlamadığı görülmüştür. Şekil 6.4’de kalınlık değişimi ile kompozit yapının durdurabildiği hız değeri arasındaki ilişki verilmiştir. İki farklı kalınlıktaki kompozit yapıya ait analiz sonuçları Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.4 Kompozit kalınlığı-mermi hızı değişimi



Şekil 6.5 12.5mm/5mm kalınlıkta V₅₀ balistik limit hız analizleri

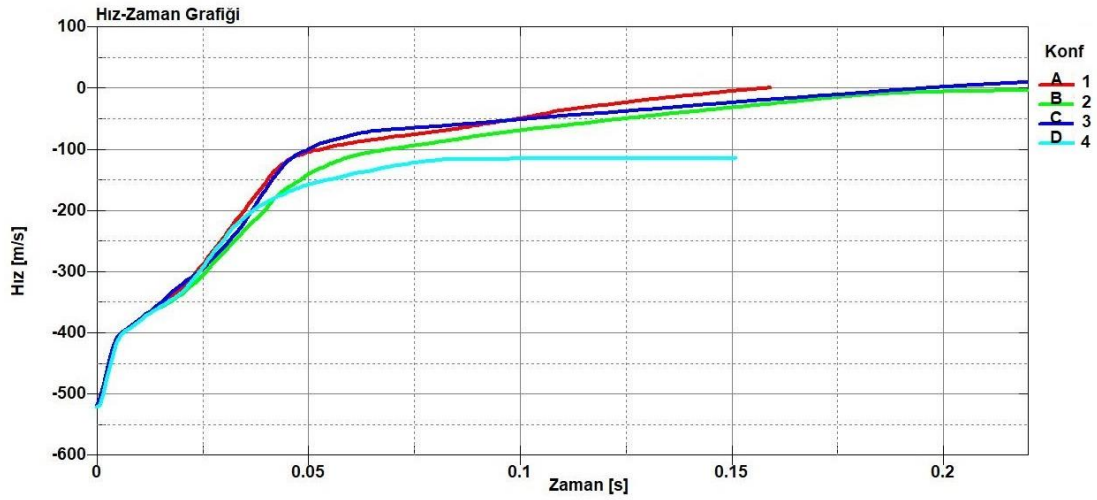
6.3 Hibrit Konfigürasyonların İncelenmesi

Seramik ve kompozit yapıların balistik limit hızlarının tespit edilmesiyle 20 mm FSP mermisinin tehdit seviyesi-1 şartlarına uygun koruma sağlayacak 9 farklı kalınlık kombinasyonu ile oluşturulmuş hibrit koruma panellerine ait bilgiler Tablo 6.1’deki gibidir.

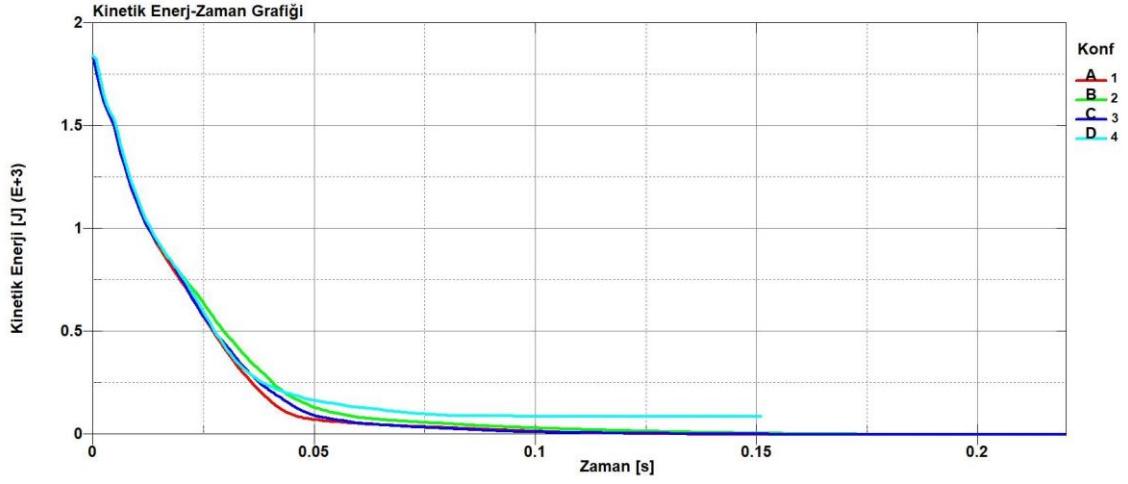
Tablo 6.1 Konfigürasyonların belirlenmesi

Konfigürasyon Nu.	Seramik Kalınlığı [mm]	Kompozit Kalınlığı [mm]	Alansal Yoğunluk [kg/m ²]
1	9,00	10,03	46,54
2	9,00	7,65	43,40
3	9,00	6,63	42,05
4	9,00	5,10	40,03
5	8,50	10,03	44,69
6	8,50	7,65	41,55
7	8,50	8,40	42,54
8	8,00	8,40	40,69
9	8,00	10,03	42,84

Analizlerde 3 farklı seramik yapı kalınlığı seçilerek mermi enerjisini seramik yapı ile birlikte sönmüleyecek kompozit yapı kalınlığının bulunması amaçlanmıştır. 9mm seramik kalınlığı sabit tutularak belirlenen 1,2,3 ve 4 numaralı konfigürasyonların mermi üzerindeki etkileri Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de görülmektedir.

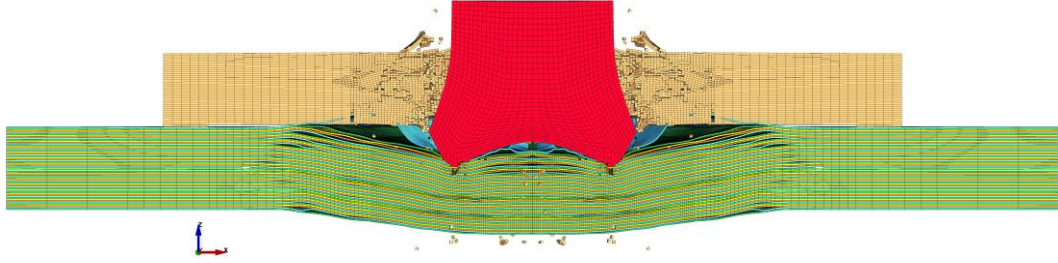


Şekil 6.6 Konfigürasyon 1-4 hız-zaman değişimi

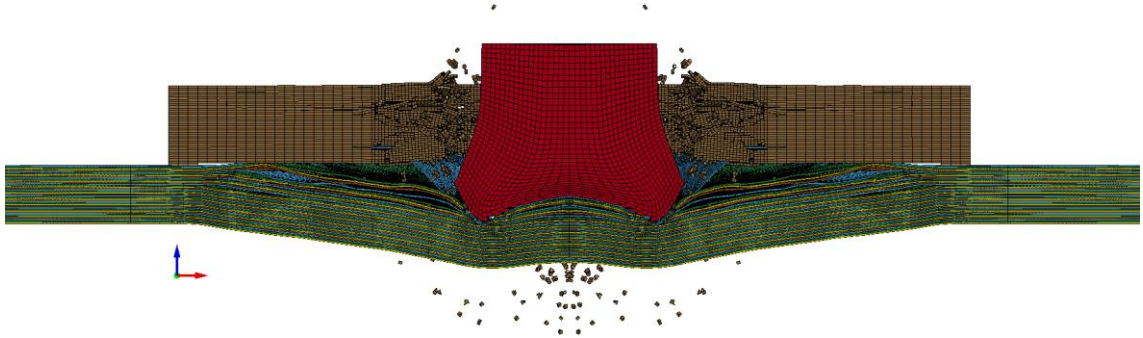


Şekil 6.7 Konfigürasyon 1-4 kinetik enerji-zaman Değişimi

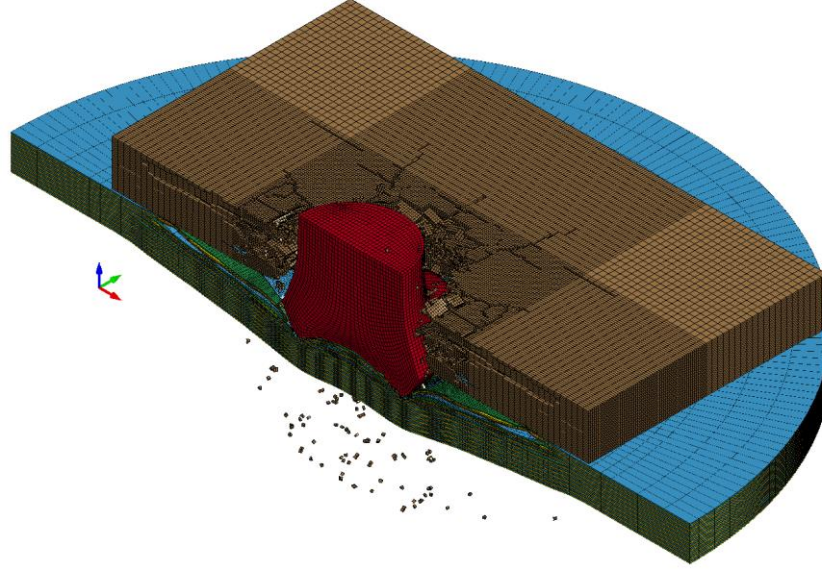
Analizler neticesinde 1,2 ve 3 numaralı konfigürasyonların mermiyi durdurabildiği 4 numaralı konfigürasyonun ise mermiyi durdurmakta başarısız olduğu görülmüştür. 3 numaralı konfigürasyonun mermiyi durduran konfigürasyonlar arasında en düşük alansal yoğunluk değerine sahip olduğu görülmüştür. 1 numaralı konfigürasyona ait analiz sonucu Şekil 6.8’de, 3 numaralı konfigürasyona ait görseller Şekil 6.9 ile Şekil 6.10’de, 4 numaralı konfigürasyona ait görseller Şekil 6.11’de verilmiştir.



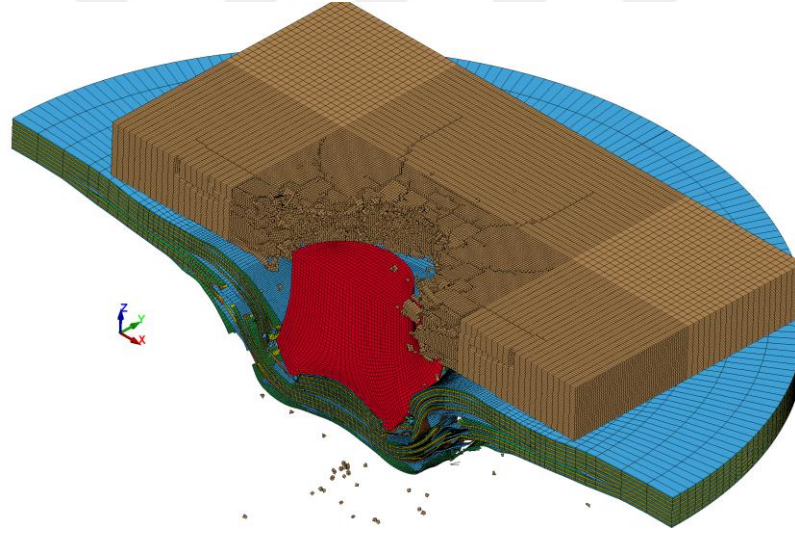
Şekil 6.8 Konfigürasyon-1 analiz sonucu



Şekil 6.9 Konfigürasyon-3 analiz sonucu

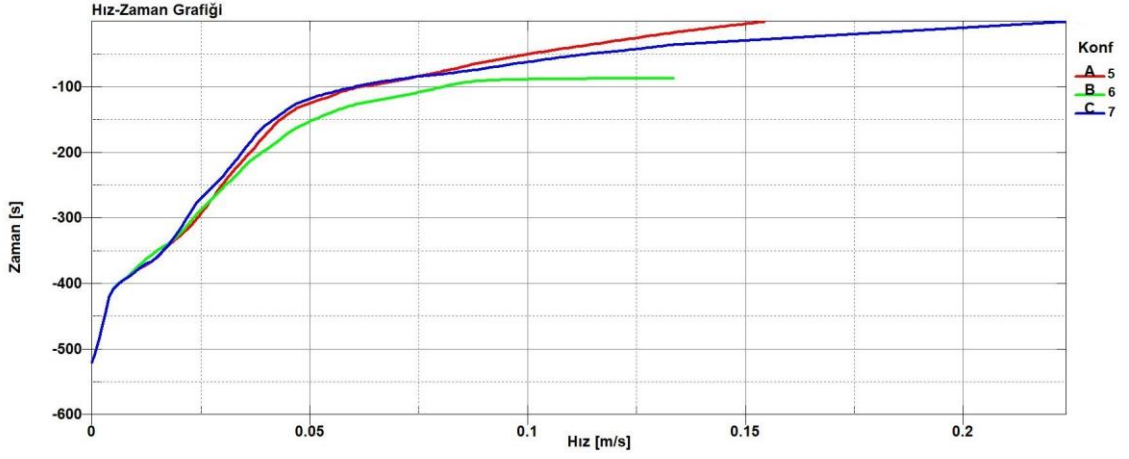


Şekil 6.10 Konfigürasyon-3 analiz sonucu

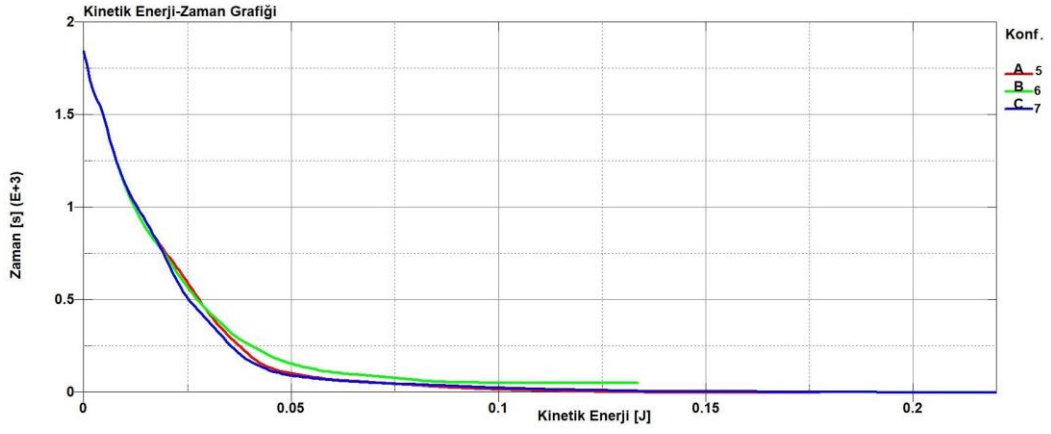


Şekil 6.11 Konfigürasyon-4 analiz sonucu

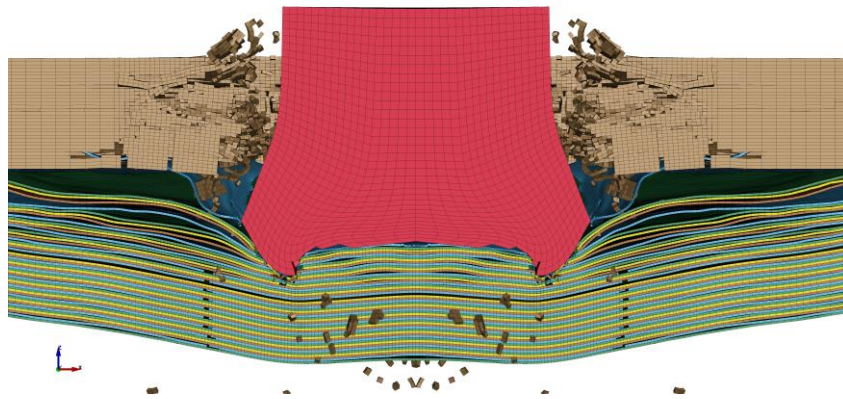
8.5 mm seramik yapı kalınlığı sabit tutularak yapılan analizler neticesinde 5,6,7 numaralı konfigürasyonlarla yapılan analizlerde 5 ve 7 numaralı konfigürasyonun mermiyi durdurabildiği 6 numaralı konfigürasyonun mermiyi durdurabilmekte başarısız olduğu görülmüştür. Mermiyi durdurmada başarılı olan konfigürasyonlar arasında 7 numaralı konfigürasyonun en düşük alansal yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. 5,6 ve 7 numaralı konfigürasyonların mermi üzerindeki etkileri Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’de görülmektedir. 7 numaralı konfigürasyona ait analiz sonucu Şekil 6.14’de görülmektedir.



Şekil 6.12 Konfigürasyon 5-7 hız-zaman değişimi



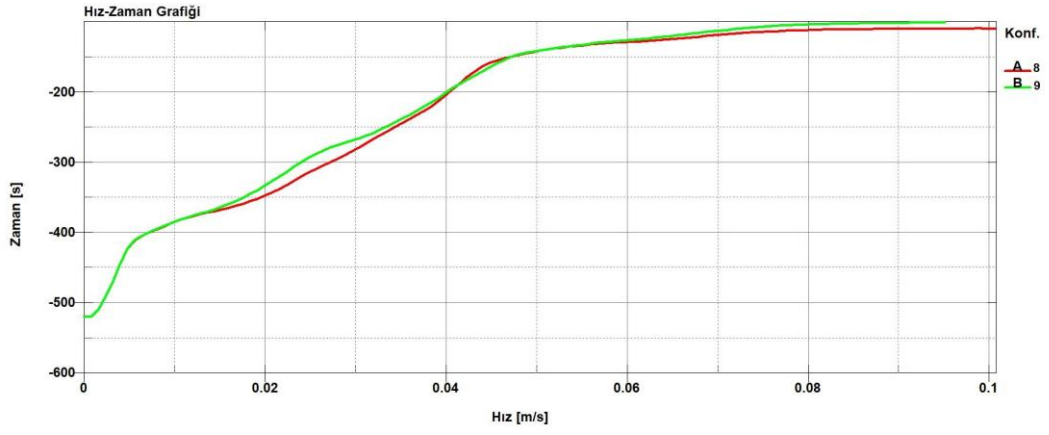
Şekil 6.13 Konfigürasyon 5-7 kinetik enerji-zaman değişimi



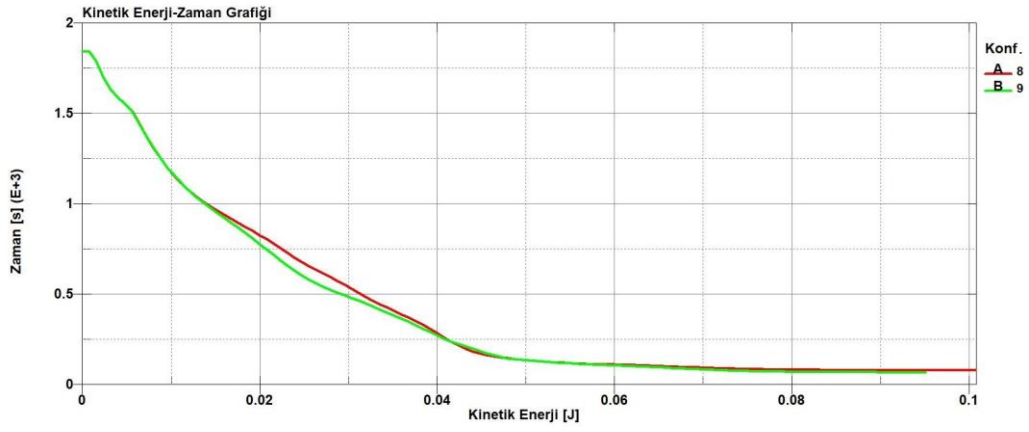
Şekil 6.14 Konfigürasyon-7 analiz sonucu

8 mm seramik kalınlığı sabit tutularak gerçekleştirilen analizlerde 8 ve 9 numaralı konfigürasyonların her ikisinin de mermiyi durdurmakta başarısız olduğu görülmüştür. 8 ve 9 numaralı konfigürasyonların mermi üzerindeki etkileri Şekil 6.15 ve Şekil

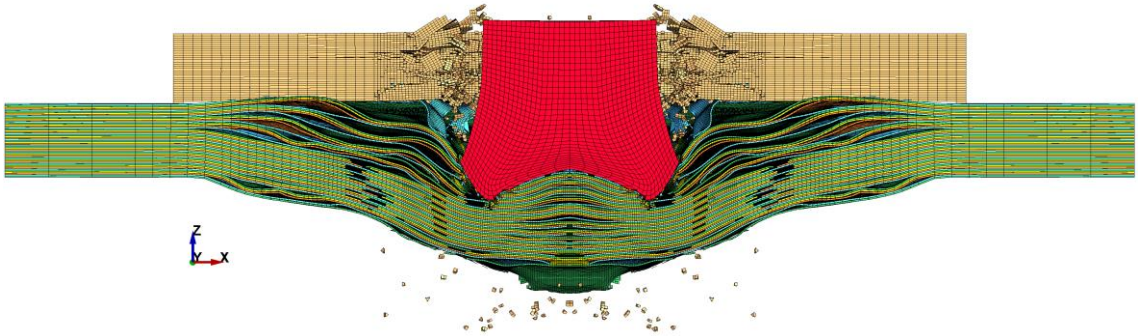
6.16'de görülmektedir. 8 numaralı konfigürasyona ait analiz sonucu Şekil 6.17'de görülmektedir.



Şekil 6.15 Konfigürasyon 8-9 hız-zaman değişimi



Şekil 6.16 Konfigürasyon 8-9 kinetik enerji-zaman değişimi



Bu çalışmada zırh teknolojilerinde sıklıkla kullanılan alümina seramik malzeme ile fiber katkılı kevlar kompozit malzemenin balistik çarpışma analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve belirlenmiş bir tehdit seviyesini durduracak uygun konfigürasyon belirlenmiştir.

Sonuçlar ve öneriler açısından aşağıdaki açıklamalara yer verilmiştir.

- 1) Seramik yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analiz çalışmalarında deney sonuçlarının yakınsanabilmesi için öncelikle uygun bozulma kriterinin belirlenmesi esastır. Bu amaçla kullanılacak seramik yapının penetrasyon derinliği (DOP) testleri yapılmış olması ve penetrasyon derinliği sonuçlarının uygun bozulma kriterleri ile yakınsaması gerekmektedir.
- 2) Yapılan analizlerde 20 mm FSP gibi yüksek kalibreli parçacıklar ile seramiklerin çarpışmaları göz önünde bulundurulduğunda; seramiğin görevini yerine getirebilmesi için seramik boyutlarının çekirdek çapının asgari 5 katı olması gerektiği görülmüştür.
- 3) Kompozit yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenebilmesi için “Laminated Composite Fabric” malzeme modelinin uygun matematiksel model olduğu değerlendirilmektedir. İlgili malzeme modeline ait parametrelerin deney ve gözlemler ile belirlenebildiği, doğru ve güvenilir sonuçlar verebildiği görülmüştür. Parametrelerin saptanabilmesi için fiber liflerinden çok katmanlı lamine yapılara kadar çekme testi verilerine ihtiyaç olacaktır. Kevlar kompozit malzemesinin 20mm FSP mermisi gibi yüksek kinetik enerjilere sahip tehditler için uygun bir kompozit malzeme olmadığı, Spectra gibi ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen yapıların daha iyi bir koruma sağlayabileceği değerlendirilmektedir.
- 4) Yapılan analizler neticesinde 20mm FSP mermisine ait enerjinin %65 ila %72 arası seramik yapı tarafından, kalan enerjinin ise kompozit yapı tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Merminin seramik yapı içinde geçirdiği süre ile enerjinin absorbe edilme oranı arasında doğru orantı olduğu görülmüştür.
- 5) Analizlerde kompozit yapılara ait fiber hacim oranında gerçekleşen artışın yapının balistik dayanımına olumlu katkı yaptığı görülmüştür.

6) Kevlar kompozit yapısının 12mm ve üstündeki kalınlık değerlerinde artan katman sayısı nedeniyle Şekil değiştirme yetisinde zayıflamaya uğradığı görülmüştür. Bu durum kompozit yapının enerji sönümleme yetisini olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

7) Koruma sağlanacak hibrit yapıya ait kalınlıkların belirlenmesinde yapıların balistik limit hız değerlerinin saptanarak uygun konfigürasyon ngrleri yapmak mümkündür. Seçilen 9 farklı konfigürasyon arasında en düşük alansal yoğunluğa sahip olan yapı 3 numaralı konfigürasyondur. 7 numaralı konfigürasyon ise 3 numaralı konfigürasyonun ardından iyi bir alternatif olacağı değerlendirilmektedir.

8) Herhangi bir tehdide karşı en uygun alansal yoğunluk değerine sahip hibrit konfigürasyonun sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmesi, deneysel yöntemlere kıyasla oldukça maliyet etkindir. Ancak zırh teknolojilerinde kullanılan malzemelerin sıklıkla anizotropik davranıŐlar sergilediği bilindiğinden elde edilen sonuçların deneysel verilerle doğrulanmasının gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

- [1] R. C. Laible and E. Barron, "History of Armor," 1980, pp. 9–40.
- [2] S. M. Walley, "Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour," *Adv. Appl. Ceram.*, vol. 109, no. 8, pp. 446–466, Nov. 2010, doi: 10.1179/174367609X422180.
- [3] TNO, "Ballistic protection for maritime platforms." [Online]. Available: www.tno.nl.
- [4] "Standardization Agreement Subject: Procedures For Evaluating The Protection Levels Of Logistic And Light Armoured Vehicles For Ke And Artillery Threats Nato/Pfp Unclassified (ii)," 2004.
- [5] "MIL-STD-662F, Department Of Defense Test Method Standard, V50 Ballistic Test For Armor."
- [6] P. Woolsey and D. Kokidko, "Alternative Test Methodology For Ballistic Performance O Ranking Of Armor Ceramics."
- [7] S. G. Savio and V. Madhu, "Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 113, pp. 161–167, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.020.
- [8] L. Jinzhu, Z. Liansheng, and H. Fenglei, "Experiments and simulations of tungsten alloy rods penetrating into alumina ceramic/603 armor steel composite targets," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 101, pp. 1–8, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.09.009.
- [9] Kai-Kuang Wu, Yu-Liang Chen, Jau-Nan Yeh, Wei-Lun Chen, Chia-Shih Lin, "Ballistic Impact Performance of SiC Ceramic-Dyneema Fiber Composite Materials", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID 9457489, 9 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9457489>
- [10] D. Çelikbas and E. Acar, "Effect of sphere radius and bullet hitting location on the ballistic performance of alumina ceramic tile," in *Procedia Structural Integrity*, 2021, vol. 35, no. C, pp. 269–278, doi: 10.1016/j.prostr.2022.01.012.
- [11] D. Hu, Y. Zhang, Z. Shen, and Q. Cai, "Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 13, pp. 10368–10376, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.071.
- [12] S. Signetti, F. Bosia, S. Ryu, and N. M. Pugno, "A combined experimental/numerical study on the scaling of impact strength and toughness in composite laminates for ballistic applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 195, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108090.
- [13] P. Pechouček, S. Rolc, and J. Buchar, "Fragment Simulating Projectile Penetration Into Layered Targets," 2011. [Online]. Available:
- [14] Long H. Nguyen, Torsten R. Lässig, Shannon Ryan, Werner Riedel, Adrian P. Mouritz, Adrian C. Orifici, "A Methodology for Hydrocode Analysis of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composite Under Ballistic Impact," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 84, pp. 224–235,

- 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.01.014>.
- [15] P. M. Cunniff, "Dimensionless Parameters for Optimization of Textile Based Body Armor Systems Dimensionless Parameters for Optimization of Textile-Based Body Armor Systems," 1999. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/256816090>.
- [16] S. Wu, Z. Xu, C. Hu, X. Zou, and X. He, "Numerical simulation study of ballistic performance of Al₂O₃/aramid-carbon hybrid FRP laminate composite structures subject to impact loading," *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 5, pp. 6423–6435, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.186.
- [17] L. Peng, M. T. Tan, X. Zhang, G Han, W. Xiong, M. Teneiji, and Z. Guan, "Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures," *Compos. Struct.*, vol. 282, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.115019.
- [18] M. Silcock, W. Hall, B. Fox, and N. Warrior, "Finite element modelling of metallic tubular crash structures with an explicit code," *Int. J. Veh. Saf.*, vol. 1, no. 4, pp. 292–303, 2006, doi: 10.1504/IJVS.2006.011231.
- [19] B. Tepeduzu and R. Karakuzu, "Ballistic performance of ceramic/composite structures," *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 2, pp. 1651–1660, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.10.042.
- [20] K. E. Jackson, J. D. Littell, and E. L. Fasanella, "Simulating the Impact Response of Composite Airframe Components."
- [21] 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, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.10.001.
- [22] W. A. Gooch, "2011 Overview of the Development of Ceramic Armor Technology: Past, Present and the Future," 2011, pp. 193–213.
- [23] LaSalvia J.C, Campbell J., J. . Swab, and McCauley J.W., "Beyond Hardness: Ceramics and Ceramic Based Composites for Protection," *Mater. Crashworthiness Def.*, 2010.
- [24] N. D. Andraskar, G. Tiwari, and M. D. Goel, "Impact response of ceramic structures - A review," *Ceramics International*, vol. 48, no. 19, Elsevier Ltd, pp. 27262–27279, Oct. 01, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.06.313.
- [25] Y. Palaci and M. M. Arikan, "Layer thickness optimization of ceramic composite for body armor by considering volume, weight, and cost," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, no. 23, pp. 7152–7160, Dec. 2021, doi: 10.1177/09544062211015791.
- [26] F. L. Matthews, *Finite element modelling of composite materials and structures*. CRC Press, 2000.
- [27] P. Mallick, "Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design," 2006.
- [28] C. C. Chamis and J. H. Sinclair, "NASA Technical Paper 1082 Mechanical Behavior and Fracture Characteristics of Composites II-Theory and Comparisons," 1978.
- [29] Avcı H., Hassanin A., Hamouda T., and Kılıç A., "High Performance Fibers: A

- Review on Current State of Art and Future Challenges,” Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimar. Fakültesi Derg., vol. 27, no. 2, pp. 85–92, Aug. 2019, doi: 10.31796/ogummf.558453.
- [30] N. K. Gupta, M. A. Iqbal, and G. S. Sekhon, “Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 10, pp. 3411–3439, May 2007, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.09.034.
- [31] N. R. Jenzen-Jones and N. Fitch, *Cased Telescoped Ammunition A technical & historical overview A Armament Research Services RES*. 2019.
- [32] T. M. Loganathan, M. T. H. Sultan, M. K. Gobalakrishnan, and G. Muthaiyah, “Ballistic impact response of laminated hybrid composite materials,” in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2018, pp. 171–191.
- [33] A. Healey and Adam, “Understanding the ballistic event: Methodology and observations relevant to ceramic armour,” *ProQuest Diss. Theses; Thesis (Ph.D.)-University Surrey (United Kingdom)*, 2017.; Publ. Number AAT 10624911; Source Diss. Abstr. Int. Vol. 75-01C.; 140 p., 2017, [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017PhDT.....80H>.
- [34] M. L. Wilkins, “Mechanics Of Penetration And Perforation”
- [35] K. Pandya, “Impact Damage Behaviour of Lightweight Materials,” no. December, 2017.
- [36] N. K. Naik and A. V. Doshi, “Ballistic impact behavior of thick composites: Analytical formulation,” *AIAA J.*, vol. 43, no. 7, pp. 1525–1536, 2005, doi: 10.2514/1.11993.
- [37] Reddy J.N, “Introduction-to-the-Finite-Element-Method,” 1993.
- [38] D. J. Benson, “The History of LS-DYNA®.”
- [39] G. R. Johnson and W. H. Cook, “A Constitutive Model And Data For Metals Subjected To Large Strains, High Strain Rates And High Temperatures.”
- [40] L. Kruszka, Anaszewicz, J. Janiszewski, and M. Grązka, “Experimental and numerical analysis of Al6063 duralumin using Taylor impact test,” in *EPJ Web of Conferences*, 2012, vol. 26, doi: 10.1051/epjconf/20122601062.
- [41] A. Rashed, M. Yazdani, A. A. Babaluo, and P. Hajizadeh Parvin, “Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers,” *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 25, pp. 3561–3576, Oct. 2016, doi: 10.1177/0021998315622982.
- [42] L. Peroni, M. Scapin, C. Fichera, A. Manes, and M. Giglio, “Mechanical properties at high strain-rate of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet,” in *EPJ Web of Conferences*, 2012, vol. 26, doi: 10.1051/epjconf/20122601060.
- [43] D. S. Cronin, K. Bui, C. Kaufmann, G. McIntosh, T. Berstad, and D. Cronin, “Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna.”
- [44] 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, Jun.

2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.024.

- [45] A. Matzenmiller, J. Lubliner, and R. L. Taylor, “A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites,” 1995.
- [46] X. Xiao, “Modeling energy absorption with a damage mechanics based composite material model,” *J. Compos. Mater.*, vol. 43, no. 5, pp. 427–444, Mar. 2009, doi: 10.1177/0021998308097686.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Köse E. M., Demir, Ö. (2023). “Alümina Seramik Yapılarının Dayanımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi ve Farklı Mermi Tiplerinin Davranışlarının Gözlenmesi”. *9. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye.

