

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ BİLİM DALI**

**KOMPOZİT MALZEMELİ ZİRHİN TASARIMI VE BALİSTİK DAVRANIŞI  
SİMÜLASYON ANALİZİ**

**Simay SARIKAYA**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL**



**MANİSA-2023**

**SIMAY  
SARIKAYA**

**KOMPOZIT MALZEMELI ZIRHIN TASARIMI VE BALISTIK DAVRANIŞI  
SIMÜLASYON ANALİZİ**

**2023**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Simay SARIKAYA**



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER .....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLO DİZİNİ .....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1. GİRİŞ .....	1
1.1.Literatür Araştırması.....	4
2. GENEL BİLGİLER .....	9
2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	9
2.1.1. Elemanlara Ayırma.....	9
2.1.2. Eleman Denklemi.....	9
2.1.3. İki Boyutlu Sonlu Eleman Metodu.....	9
2.2. Ansys Simülasyon Programı .....	13
2.2.1. Explicit Dynamics Modülü .....	13
2.2.2. ACP Modülü .....	13
2.3. Corecell A500 Köpük Malzeme.....	14
2.4. Kompozit Malzemeler.....	14
2.4.1. Karbon Fiber.....	15
2.4.1.1. UD T700/3234 Epoksi Karbon Fiber.....	15
2.5. Seramik Malzemeler .....	16
2.5.1. Silisyum Karbür (SiC).....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	18
3.1. Materyal.....	18
3.1.1. 5.56×45mm NATO M193 Mermisi.....	18
3.1.2. Merminin Yapısı.....	19
3.2.Yöntem.....	20
4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE YÖNTEMLER.....	21
4.1. Model Tasarımı.....	21
4.2. Modelin Mesh Yapısı .....	21
4.3. Kompozit Malzeme Yapısı.....	22
4.3.1. Katman Açılarında Durum 1.....	22
4.3.2.Katman Açılarında Durum 2.....	23
4.4. ACP Modül Sekmesi.....	23
4.5. Simülasyon Sonuçları.....	28
4.5.1. Hız Değişimleri.....	28
4.5.2. Gerilme Analizleri.....	31
4.5.3. Deformasyon Analizleri.....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	46

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>SiC</b>	Silisyum Karbür
<b>B4C</b>	Bor Karbür
<b>Al2O3</b>	Alümina
<b>APM(Armor Piercing Match)</b>	Zırh Delici Mermi
<b>Al-7017</b>	7017 Kalitede Alüminyum Alaşımı
<b>°C</b>	Celcius
<b>C</b>	Karbon
<b>N</b>	Azot
<b>O</b>	Oksijen
<b>S</b>	Kükürt

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. x,y fonksiyonu.....	10
Şekil 2.2. u(x,y) fonksiyonu .....	11
Şekil 2.3 N1, N2 ve N3 fonksiyonları .....	12
Şekil 2.3 Kompozit Malzeme.....	15
Şekil 3.1. Mermi Yapısı.....	19
Şekil 3.2. Ansys paket programında tasarlanan analiz sistemi için Proje Ağacı	20
Şekil 4.1. Model Tasarımı 1.....	21
Şekil 4.2. Model Tasarımı 2.....	21
Şekil 4.3. Mesh Yapısı.....	22
Şekil 4.4. Mesh Yapısı.....	22
Şekil 4.5. Epoksi Karbon Malzeme Kalınlığı.....	23
Şekil 4.6. Corecell Malzeme Kalınlığı.....	24
Şekil 4.7. Kompozit Malzeme Açılı Değerleri.....	24
Şekil 4.8. Katmanlı Yapının Modeli.....	25
Şekil 4.9. Mermi Hızı.....	25
Şekil 4.10. Analysing Settings Verileri.....	26
Şekil 4.11. SiC Seramik Malzeme Mesneti.....	27
Şekil 4.12. Al5083-H116 Alüminyum Alaşım Mesneti.....	27
Şekil 4.13. Kompozit Malzeme Mesneti.....	27
Şekil 4.14. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Hız Değişimi	28
Şekil 4.15. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Hız Değişimi	29
Şekil 4.16. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Hız Değişimi	29
Şekil 4.17. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Hız Analizi	30
Şekil 4.18. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Hız Analizi	30
Şekil 4.19. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizi	31
Şekil 4.20. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizi	31
Şekil 4.21. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizi	32
Şekil 4.22. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizi	32
Şekil 4.23. 5 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizi	33
Şekil 4.24. 5 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizi	33
Şekil 4.25. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizi	33
Şekil 4.26. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizi	34

Şekil 4.27. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizi	34
Şekil 4.28. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizi	34
Şekil 4.29. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Deformasyon Analizi.....	35
Şekil 4.30. 2 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Deformasyon Analizi.....	36
Şekil 4.31. 5 mm SiC-5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Deformasyon Analizi.....	36
Şekil 4.32. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Deformasyon Analizi.....	37
Şekil 4.33. 5 mm SiC-10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Deformasyon Analizi.....	38

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. Corecell A500 Malzeme Özellikleri.....	14
Tablo 2.2. UD T700/3234 Malzeme Özellikleri.....	16
Tablo 2.3. Silisyum Karbürün Tipik Özellikleri.....	17
Tablo 4.1. Katman Açılarında Durum 1.....	23
Tablo 4.2. Katman Açılarında Durum 2.....	23



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarımda tüm desteğini benden esirgemeyen sevgili danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Saim KURAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Simay SARIKAYA  
Manisa, 2023



## ÖZET

Yüksek Lisans

Simay SARIKAYA

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL

Bu çalışmada deneysel olarak üretim ve deney maliyetlerini düşürmek ve çok farklı tasarım modellerini hızlı bir şekilde analiz edebilmek için ANSYS paket programının Explicit Dynamics ve Composite Prepost modüllerinden faydalanılmıştır. Dinamik çözücü olarak Explicit Dynamics altında AUTODYN kullanılmıştır. Analizler için katmanlı kompozit malzeme tasarlanmıştır. Ayrıca bu malzemenin önüne kırılarak merminin kinetik enerjisinin harcanmasına sebep olacak seramik farklı bir katman daha kullanılmıştır. Bu katman için Silisyum Karbür (SiC) seramik malzeme seçilmiştir. Zırh için seramik katman ile kompozit katman arasında Al5083-H116 Alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Son olarak kompozit katman ise ANSYS CompositePrePost ile UD T700/3234 epoksi karbon fiber malzemesi kullanılarak katmanlı kompozit malzemedan oluşturulmuştur. Mermi olarak ise 5.56x45 mm NATO M193 seçilmiştir ve hedefe çarpma hızı 850 m/s olarak seçilmiştir.

Simülasyon programında yapılan analiz sonucunda farklı kalınlıklarda malzemelerin balistik atışlardaki etkisi gözlemlenmiştir. Pratik olarak yapılması oldukça maliyetli ve zaman alacak kombinasyonları bilgisayar ortamında çözdürülerek sonuçlar elde edilmiştir. Farklı elyaf açıları ve katman kalınlıkları için balistik performanslar incelenmiş ve sonuçlar gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Balistik, balistik atış, sonlu elemanlar yöntemi, kompozit zırh, Silisyum karbür, UD T700

2023, 57 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

**Simay SARIKAYA**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Saim KURAL**

In this study, Explicit Dynamics and Composite Prepost modules of the ANSYS package program were used to reduce experimentally production and experiment costs and to analyze very different design models quickly. AUTODYN was used under Explicit Dynamics as the dynamic solver. Layered composite material was designed for the analyses. In addition, a different ceramic layer was used in front of this material, which would cause the kinetic energy of the bullet to be spent by breaking it. Silicon Carbide (SiC) ceramic material was chosen for this layer. Al5083-H116 Aluminum alloy is used between the ceramic layer and the composite layer for the armor. Finally, the composite layer was formed from layered composite material by using UD T700/3234 epoxy carbon fiber material with ANSYS CompositePrePost. As for the bullet, 5.56x45 mm NATO M193 was chosen and the speed of hitting the target was chosen as 850 m/s.

As a result of the analysis made in the simulation program, the effect of materials of different thicknesses on ballistic shots was observed. The results were obtained by solving the combinations that would take time and cost in practice in the computer environment. Ballistic performances were investigated for different fiber angles and layer thicknesses and the results were shown.

**Keywords:** Ballistics, ballistic shooting, finite element method, composite armor, Silicon Carbide, UD T700

**2023, 57 pages**

## 1.GİRİŞ

Balistik, bir merminin silahtan çıkarak hedefe doğru hareket ederken, atışın yapıldığı ortamın etkisiyle ortaya çıkan değişken hareketlerini, hedefe ulaştıktan sonra oluşan enerji boşalması ve deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. [1]

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle silah sistemlerinde de önemli ilerlemeler var olmuştur. Bu gelişmeye karşılık olarak savunma sanayi de gelişmeye başlamıştır ve mermiye direnç gösterebilecek balistik özellikleri yüksek zırhlar ön plana çıkmıştır. [2]

İnsanlık tarihinde savunmada ilk zırhlar hayvan derilerindendi daha sonra bu zırhlara metal eklenerek takviyeli zırhlar ayrıca tam metal zırhlar ile ağır metallere yapılmış kalkanlar kullanılmıştır. Katapult ilerde de top vb icatlarıyla birlikte şehirleri kaleleri korumak için surlar geliştirilmiştir. Savaş teknolojisinin daha da gelişmesiyle bu yollar yetersiz kalmıştır. Özellikle ağır zırhlar kullanan kişinin hareket kabiliyetini oldukça sınırlamaktaydı, bu nedenle hafif fakat dayanıklı zırh tasarımı tarihten beri oldukça önemli bir hal almıştır.1970'li yıllarda yüksek dayanımlı fiberlerin ortaya çıkmasıyla yüksek dayanımlı düşük yoğunluklu kompozit zırhlar geliştirilmeye başlanmıştır. Balistik biliminin ortaya çıkmasında tüm bu gelişmeler etkili olmuştur.[3]

Zırhlar, genel anlamda, hedefteki kişilere karşı merminin etkisini saptırmak veya enerjisini sönmölemek için kullanılan koruyucu malzemelerdir. Yüksek enerji soğurma kabiliyetine sahip malzemelerle yapılan zırh sistemlerinin kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Son yıllarda, balistik zırhlarda katmanlı yapıların kullanımı literatürde yaygınlaşmıştır. [4,5,6,7,8,9]

Zırh tasarımında çeşitli faktörler ele alınmaktadır. Bilimsel çalışmalar sonucunda; farklı malzemeler, yüksek dayanım, hafiflik, hareket kabiliyeti gibi birçok parametrelere göre çalışmalar yapılmaktadır.

Zırh tasarımcıları ve kullanıcıları için ağırlığını nasıl en iyi şekilde dengeleneceği, belirli bir tehdit seviyesinde zırh paketi için kalınlık ve maliyet parametreleri önemlidir. Tek tabaka olarak üretilen bir zırh sistemi, küçük kalibreli mermilere karşı iyi bir koruma sağlayabilirken, zırh delici mermileri engellemek için çok katmanlı zırh sistemleri gereklidir. Bu sistemler, genellikle kompozit destekli sert seramik ön yüzeyli zırhlar olarak üretilir. Zırh delici mermiler, sert çekirdek malzemeleri içerir ve seramik yüzey, merminin etkisini azaltmak ve aşındırmak için tasarlanmıştır. Kompozit destek, yavaşlamış mermi kinetik enerjisini emer ve seramik ve mermi parçalarını tutarak daha fazla hasarın önlenmesine yardımcı olur. [10]

Günümüzde, balistik kompozit malzemelerin sahip olduğu dayanıklılık hafif zırhlı araçlarda tek başına da kullanılmaya yeterli iken ağır zırhlı araçlarda koruma ve şok emme özellikleri sayesinde birincil zırhların arkasında kullanılmaktadırlar. [11]

Zırhın birinci katmanı için genellikle seramik gibi yüksek sertliğe sahip malzemelerden üretilmiş plakalar kullanılır.[12] Birincil zırh malzemesi olan sert materyaller, mermi çekirdeğini mümkün olduğunca deformasyona uğratarak çekirdek uç geometrisini bozarak, çekirdeğin delme gücünü azaltmak için kullanılır.[13]

İkincil zırh olarak kullanılan balistik kompozit malzemenin amacı, mermi çekirdeğinin kütlesi ve hızıyla oluşan kinetik enerjinin mümkün olduğunca hızlı ve geniş bir alana yayılmasını sağlayarak enerjiyi emmek ve absorbe etmektir. [14] Bu nedenle, balistik kompozit malzemelerdeki elyafların özgül enerji yayılım hızı önemlidir. Merminin koruyucu yapı içinde daha fazla mesafe kat etmesi, enerjinin daha fazla yüzey alanına yayılmasına neden olur. Böylece daha yüksek bir balistik performans elde edilir. [15]

Günümüzde nanoteknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte, nanokompozit malzemelerin üretimi ve kullanım alanı artmaktadır. Nanomalzemeler, olağanüstü sertlik ve mukavemete, düşük yoğunluğa, büyük kırılma direncine ve yüksek enerji adsorpsiyonuna sahip olduğundan, balistik zırh malzemeleri olarak kullanılması ile birlikte zırh teknolojisi gelişmektedir. Karbon nanotüpler ve grafen nano partiküller, en yaygın olarak kullanılan nanomalzemelerden bazılarıdır. [29]

Zırh teknolojisinde metallerin önemi büyüktür. Metaller, uzun yıllardır üzerinde çalışıldığı ve iyi bir teknolojik veri tabanına sahip olduğu için zırh malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, metallerin tokluk, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özellikleri zırh malzemesi olarak kullanılmalarında avantaj sağlamaktadır. Ancak, metallerin yoğunlukları diğer mühendislik malzemelerine kıyasla yüksektir. Bu durum, zırhın ağır olmasına neden olmaktadır. Ağır bir zırhın taşınması ve hızlı hareket edilmesi oldukça güçtür. Benzer şekilde, yüksek ağırlıktaki bir aracın hareket kabiliyeti de oldukça düşük olacaktır. Bu nedenle, hafif zırh malzemelerinin üretimine büyük ihtiyaç vardır. [42]

Zırhlar sınıflandırıldığında iki farklı çeşide ayrılabilir. Zırh malzemeleri incelendiğinde, hafif olmaları ve yüksek balistik performansa sahip olmaları gerektiği için bütüncül malzemelerin tek başlarına bu kriterleri sağlaması oldukça zordur. Bu nedenle, kompozit zırhlar bütüncül zırhlara karşı en önemli alternatif olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak, zırh malzemeleri iki ana başlık altında ele alınabilir: bütüncül zırhlar ve kompozit zırhlardır.

Bütüncül zırhlar; Uygun malzeme seçimi, savunma uygulamalarında enerji tasarrufu ve yüksek hareket kabiliyeti sağlamak için önemlidir. En düşük alan yoğunluğundaki malzemeler, belirli bir mühimmatın tahribatını engelleyebilir. Çelik, üstün mekanik özellikleri sayesinde en önemli aday malzeme olarak kabul edilir ve ucuzdur. Ancak, çelik göreceli olarak yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle, ısıl işlem yoluyla çeliğin sertliği artırılabilir. Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları da özgül dayanımlarının yüksek olması nedeniyle zırh uygulamaları için iyi birer aday malzeme olarak kabul edilir. Titanyum alaşımları da yüksek potansiyele sahip olmalarına rağmen, maliyetleri göreceli olarak çok yüksektir ve kullanım olasılıklarını kısıtlar.

Kompozit zırhlar; Kompozit malzemelerin zırh olarak kullanılması için düşük yoğunluğa ve yüksek balistik başarıma sahip olmaları gerekmektedir. Bu nedenle, iki ana sistem üzerinde çalışılmıştır: plastik esaslı kompozit zırhlar ve seramik esaslı katmanlı kompozit zırhlar. [45]

Farklı balistik sönümlenme seviyelerine sahip kumaşlar, yüksek mukavemetli ipliklerin bir araya getirilmesiyle elde edilir. Kumaşın dokuma şekli, dokuma sıklığı, ipler arasındaki sürtünme ve dokunan iplerin özelliklerine bağlı olarak kumaşın mukavemeti oluşur. İpliklerin dokunmasıyla oluşturulan balistik kumaşın mukavemeti, kumaşı oluşturan ipliklerin toplam mukavemetinden daha yüksek hatta özgül mukavemet açısından çelikten bile daha yüksek değerlere ulaşabilir. [16]

Kompozit malzeme en az iki farklı malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan bir yapıdır. Bu malzemenin amacı; bir araya gelen malzemelerin zayıf yönlerini gidererek daha iyi malzeme elde edilmesidir. Balistik kompozit malzemeler hafif zırhlı araçlarda tek başına kullanılabilir fakat ağır zırhlı araçlarda ikincil zırh olarak kullanılır ve enerjiyi yok eder. Birincil zırh olarak seramik gibi yüksek sertliğe sahip malzeme tercih edilerek merminin uç geometrisini bozarak deformasyona uğratar. [17]

### **1.1.Literatür Araştırması**

Xu ve ark., Bor Karbür (B<sub>4</sub>C)/STF/Twaron hibrit kompozit yapının balistik performansını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Farklı katman kalınlıkları ve kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, nümerik sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. [18]

Saleem ve ark., epoksi/5074 Al alaşımı ile desteklenmiş çok katmanlı seramik/kompozit zırhların balistik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Zırh ve merminin tasarımını ANSYS Workbench kullanarak sonlu elemanlar modeliyle gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar analiini Ansys AUTODYN modülü kullanarak yapmışlar ve kinetik sönümlenen enerji miktarını, zırh deformasyon miktarını belirleyerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. [19]

Lu ve arkadaşları, farklı kombinasyonlarda Al, B4C ve UHMWPE levhalar kullanarak çok katmanlı zırhın balistik özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, B4C/UHMWPE kompozit zırhın alüminyum arka destekli zırha göre çok daha üstün balistik koruma performansı sergilediğini hem deneysel sonuçlar hem de sayısal yöntemlerle doğrulamışlardır. [20]

Iqbal ve ekibi (2016), yaklaşık 830 m/s hızında farklı sıcaklıklarda, 7,62 mm ve 12,7 mm API (zırh delici mermi) mermiler kullanarak, 8 mm ve 10 mm kalınlığındaki Armox 500T malzemeye balistik atış testleri gerçekleştirdi. Farklı ölçütler göze alınarak yapılan çalışma sonucunda Armox 500T çelik malzemesi balistik olarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarında; sıcaklık arttıkça mukavemetinin düştüğü görülmüştür. [21]

Saim Kural ve ark. tarafından yapılan çalışmada 5 ve 10 mm SiC seramik katmanın arkasında Al5083-H116, Mg AZ31B ve Ti6Al4V hafif metallerin katmanlanmasıyla balistik deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak balistik korumada SiC katmanlı hafif metal alaşımlarının %45-60 oranında benzerlik gösterdiği sonucuna varılmıştır. [22]

Iqbal ve ekibi (2012), mermi şekli ve mermi giriş açısının balistik atışlardaki etkisini gözlemek amacıyla bir çalışma yaptılar. Weldox 460 E hedefe etki edecek 20 mm kurşunu mermi ucu açısını(33,4°, 60°, 90°, 120°, 150° ve 180°) ve kurşunun numuneye giriş açısını(0°, 15°, 30°, 45°, 60°) farklı kombinasyonlarda modelleyerek, ABAQUS programında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Hedefin genel deformasyonu, merminin önemli ilk temas açısının artmasıyla azalmaktadır. [23]

Pul ve ark. tarafından SiC ve B4C takviyeli Alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve balistik performansları incelenmiştir. %40, %20 ve %10 takviyeli kompozitlerin analiz sonuçları karşılaştırıldığında; %40 oranında SiC ve B4C takviyeli malzemede matris yapıda güçlü bağlar oluşmamıştır. %40 ve %20 oranında takviyelerde balistik atış başarılı tamamlanmıştır. Bu verilerden sonuçla en uygun takviye oranı %20 olarak belirlenmiştir. [24]

Yumak ve ekibi (2014), zırh tasarımlarında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiklerini araştırdı. Araştırmanın sonuçları, zırh tasarımlarında hafiflik, düşük maliyet ve yüksek hareket kabiliyeti gibi özelliklerin arandığı, bu özelliklerin hepsinin bir arada kompozit malzemeler ile sağlanabileceği şeklindeydi. [25]

Shen ve arkadaşları, farklı yöntemlerle incelenen SiC/UHMWPE kompozit zırhın balistik özelliklerini raporlamışlardır. Zırh, ön katmanı 50 mm x 50 mm x 8 mm SiC karolardan ve arka katmanı [0°/90°/0°/90°] diziliminde ve boyutu 200 mm × 200 mm × 8 mm olan UHMWPE'den oluşmaktadır. Deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak 7.62 mm çelik çekirdekli mermilerin başlangıç hızı 776 ile 791 m/s arasında değiştirilerek zırhın balistik özellikleri test edilmiştir. Balistik test sonuçları, daha yüksek bir mermi hızı altında hedeflerin kısmi penetrasyona uğradığını, daha düşük bir mermi hızı altında ise tam penetrasyona maruz kaldığını göstermiştir. [26]

Dey ve arkadaşları (2018) Weldox 460E, Weldox 700E ve Weldox 900E yapı çeliklerinin balistik performansa etkisini, 150-350 m/s hızlarda gaz tabancası kullanarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, küt uçlu mermiler için balistik sınır hızının dayanım arttıkça azaldığı, konik ve yuvarlak uçlu mermiler için ise dayanım arttıkça arttığı tespit edilmiştir. [43] Borvik ve arkadaşları, Weldox 460E'nin balistik performansını araştırmak için sayısal ve deneysel çalışmaları birleştirmişlerdir. Daha önce yaptıkları iki çalışma ile sonuçları uyumlu olmuştur. [44]

Jena ve ark., farklı kalınlık ve ısıl işlem koşullarında tasarlanmış yüksek dayanımlı zırh çeliği ve Al-7017 alaşımını incelemişlerdir. Tasarlanan katmanlı zırhın 7.62 mm'lik mermiler karşısında balistik performansları incelemişlerdir. Analiz sonuçlarına bakıldığında merminin atış tamamlandığındaki halinden hedefin balistik durumu gözlemlenebileceği, 200°C'de menevişlenmiş çeliğin en iyi balistik sonuçlarının olduğu, yüksek dayanım, sertlik gibi özelliklerin balistik performansı iyi yönde etkilediği gözlemlenmiştir. [27]

Jena, zırh tasarımında ağırlık kavramı üzerine araştırma yapmıştır. Hafif zırhlar, enerji korunumu ve hareket kabiliyetinin artırılması için önemlidir. Bu nedenle, zırh tasarımında yüksek dayanımlı çelikler, alüminyum alaşımları ve titanyum alaşımları gibi metalik malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, iyi şekillendirme ve yüksek tokluk gibi özellikleri birleştirir ve kaynak edilebilirlik ve yüksek balistik performans sağlarlar. Ancak, monolitik metalik malzemeler genellikle ağırdır. [28]

Mutu ve ark., Çok katmanlı seramik/kompozit balistik zırhın performansı, alümina, grafen/epoksi ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilenin (UHMWPE) kombinasyonundan oluşan 20 mm kalınlığındaki zırh plakası 7.62x63 M2 zırh delici (AP) mermi etkisi altında sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, zırhın NIJ 0101.06 Level IV standartlarına uygun olduğu ve mevcut zırh plakalarından daha yüksek bir koruma seviyesi sunduğu, daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. [29]

Kolopp ve ekibi, orta hızlı delici parçalara karşı darbe direncini test etmek için alüminyum alaşımları ve sandviç yapıların kalınlığındaki farklılıkları araştırmışlardır. Araştırmada kullanılan malzemeler iki grupta incelenmiştir. İlk grup, farklı kalınlıklarda 5000 serisi alüminyum alaşımlarını içermektedir. İkinci grup ise alüminyum peteği formundaki sandviç yapıların ön ve arka destek katmanları arasına alınmasıyla oluşturulmuştur. Diğer gruplar ise ön ve arka yüzlerdeki katmanların kumaş ve alüminyum levha ile yer değiştirmesi ve ortada petek yapısının bulunmasıyla test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, ön katmanın balistik delinmeye karşı önemli olduğu ve alüminyum ve kumaş kombinasyonlu kompozit yapının en uygun aday yapı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hedefin kalınlığının darbe performansını etkilediği sonucuna varılmıştır. [30]

Zırh bileşenlerinin yüksek maliyeti ve her tasarım için uzun üretim ve test süreçleri, tasarımcıları zırh sistemlerinin doğruluğunu belirlemek için sayısal modelleri kullanmaya yönlendirmektedir. Tahmine dayalı modeller, balistik performansın tasarımı ve optimizasyonunda önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Literatürdeki birçok çalışma, yüksek hızlı etkileri simüle etmek için sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayanan sayısal modeller kullanmıştır. Feli ve Asgari (2011), LS-Dyna programını kullanarak, ön katmanı 20 mm kalınlığında alümina ve arka katmanı 20 mm kalınlığında Twaron kumaştan oluşan seramik/kompozit zırhın, silindirik tungsten merminin etkisini aksenal simetrik olarak incelemiştir. SEY simülasyonu sonuçlarına göre, tungsten mermisinin seramik ön plakaya çarpmasıyla seramik karodan parçalanmış seramik koni oluştuğu tespit edilmiştir. [41]

Bu çalışma sonucunun bize kazandıracığı; gerçek hayatta kompozit malzemeli zırhların üretimi yapılıp, incelenmesi gereken her koşulu ayrı ayrı uygulamak çok maliyetli ve süregelen işlemlerdir. Bununla birlikte incelenmek istenen bu koşulların; uygun programlar ile tasarlanıp, gerçeğe uygun şartlar kullanılarak simülasyonun yapılması güzel bir öngörü sağlar. Zırhların içeriğini, gelen mermiye karşı balistik davranışını görmek pratikte hayata geçirmek konusunda bu proje önem taşıyacaktır. Bu proje sayesinde deneysel testlerden çok daha düşük maliyet ile incelenen zırh sistemlerinin balistik performansları belirlenecektir.

## **2.GENEL BİLGİLER**

### **2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi**

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinde kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir. Geniş bir sistemde var olan problemi daha ufak denklemlere bölerek gerçekleştirilir. İlk defa 1950li yıllarda uçak tasarımlarında kullanılmaya başlanmıştır. [31] Matematik problemlerinde özellikle kısmi türevli diferansiyel denklemlerin sınır şartlarının sırasıyla sağlatılıp çözüme ulaşmasında sonlu elemanlar yöntemi etkili olur. Sonlu elemanlar yönteminin aşamalarından bahsedilecek olursa;

#### **2.1.1. Elemanlara Ayırma**

Çözümü gerçekleştirilecek problemin kısımlara ayırmak için tek boyutlu çözümde çizgisel, iki boyutlu çözümde yüzeysel veya üç boyutlu çözümde hacim elemanlarına ayrılır. Kısımlara ayrılan doğruların birleşim yerleri nod olarak adlandırılır. Doğrulara nodal doğru ve yüzeylere nodal düzlemler denir.

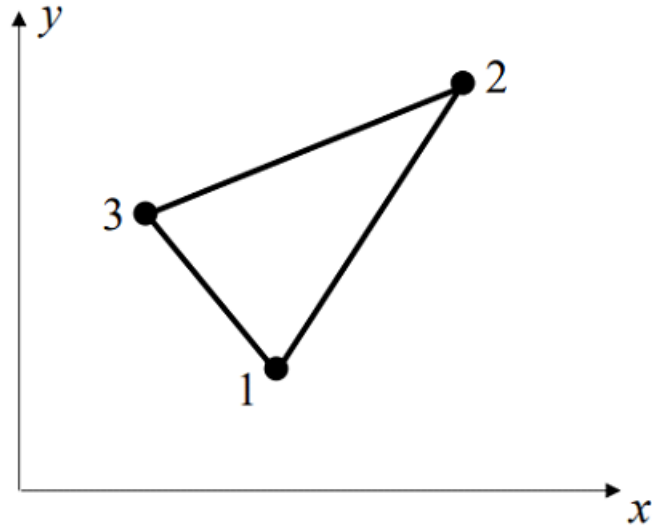
#### **2.1.2. Eleman Denklemleri**

Her bir eleman için yaklaşık çözüm fonksiyonları geliştirilir. Bu işlem şu şekilde gerçekleşir; ilk olarak yaklaşık çözümde kullanabilmek için, bilinmeyen katsayılarla sahip bir fonksiyon seçilir. Daha sonra bu seçilen fonksiyonun hata yüzdesi düşük çözümü verebilmesi için bilinmeyen katsayılar hesaplanır.

#### **2.1.3. İki Boyutlu Sonlu Eleman Metodu**

İki boyutlu sonlu eleman metodunda genellikle üçgen veya dörtgen sonlu elemanlar seçilir. Üçgen elemanlarda lineer polinom seçimi en basit yaklaşım şeklidir.

$$u(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (2.1)$$



Şekil 2.1: x,y Fonksiyonu

$$u_1(x, y) = a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 \quad (2.2)$$

$$u_2(x, y) = a_0 + a_1x_2 + a_2y_2 \quad (2.3)$$

$$u_3(x, y) = a_0 + a_1x_3 + a_2y_3 \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{cases} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{cases} = \begin{cases} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{cases} \Rightarrow \quad (2.5)$$

$$a_0 = \frac{1}{2A_e} [u_1(x_2y_3 - x_3y_2) + u_2(x_3y_1 - x_1y_3) + u_3(x_3y_2 - x_2y_1)] \quad (2.6)$$

$$a_1 = \frac{1}{2A_e} [u_1(y_2 - y_3) + u_2(y_3 - y_1) + u_3(y_1 - y_2)] \quad (2.7)$$

$$a_2 = \frac{1}{2A_e} [u_1(x_3 - x_2) + u_2(x_1 - x_3) + u_3(x_2 - x_1)] \quad (2.8)$$

Burada  $A_e$  üçgen elemanının alanıdır.

$$A_e = \frac{1}{2} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (x_3y_1 - x_1y_3) + (x_1y_2 - x_2y_1)] \quad (2.9)$$

Bu bulunan  $a_0$ ,  $a_1$  ve  $a_2$  eşitlikleri  $u(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y$  denkleminde yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} u(x,y) &= \frac{1}{2A_e} [u_1(x_2y_3 - x_3y_2) + (x_3y_1 - x_1y_3) + u_3(x_3y_2 - x_2y_1)] \\ &\quad + \frac{1}{2A_e} [u_1(y_2 - y_3) + u_2(y_3 - y_1) + u_3(y_1y_2)]x \\ &\quad + \frac{1}{2A_e} [u_1(x_3 - x_2) + u_2(x_1 - x_3) + u_3(x_2 - x_1)]y \end{aligned} \quad (2.10)$$

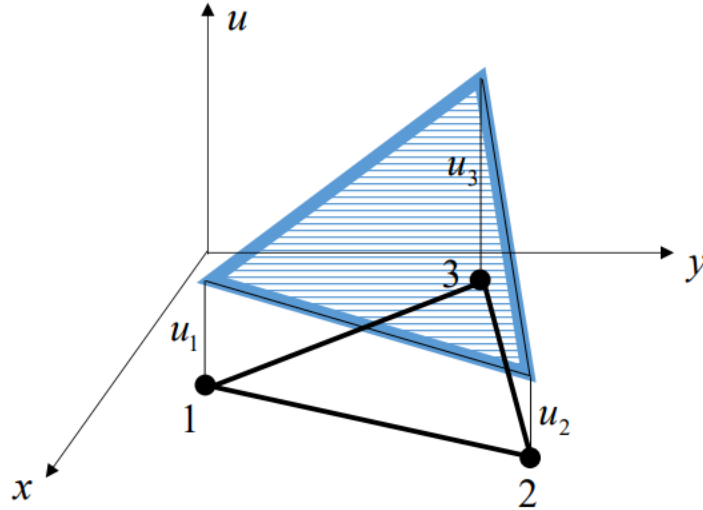
Bu eşitlik  $u(x,y) = N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3$  şeklinde düzenlenirse;

$$N_1 = \frac{1}{2A_e} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + x_3 - x_2]y \quad (2.11)$$

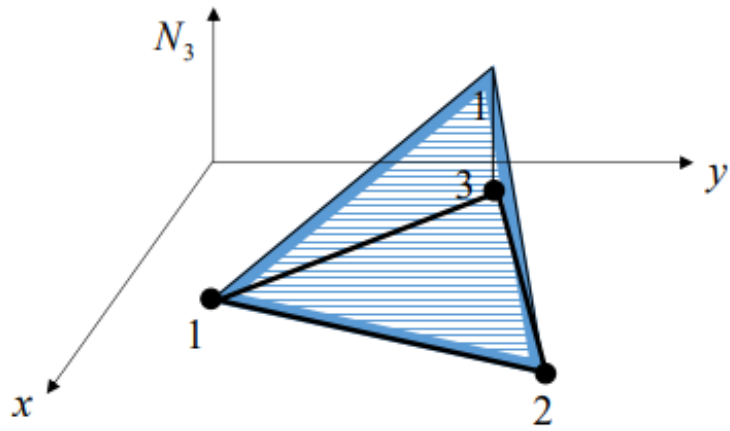
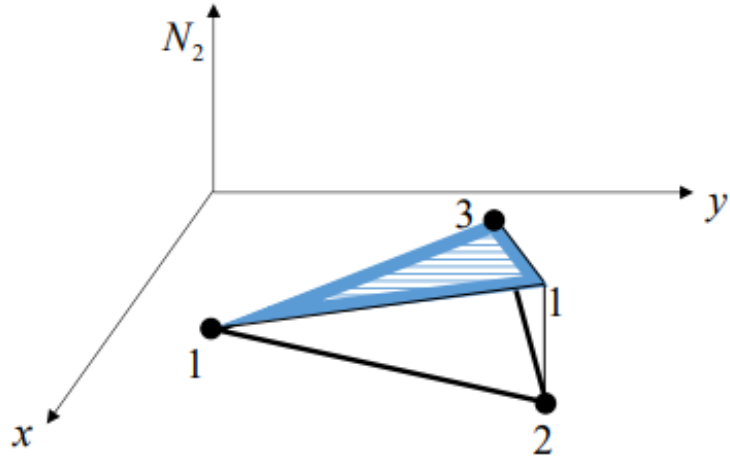
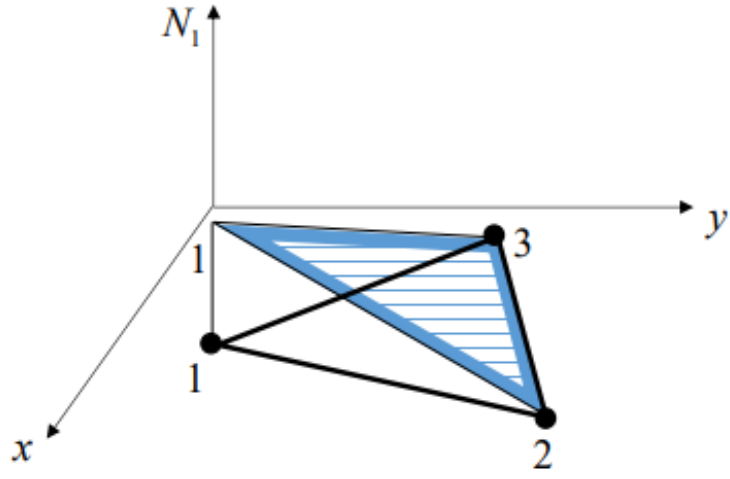
$$N_2 = \frac{1}{2A_e} [(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)]y \quad (2.12)$$

$$N_3 = \frac{1}{2A_e} [(x_1y_2 - x_2y_1) + y_1 - y_2]x + (x_2 - x_1)y \quad (2.13)$$

Şekil fonksiyonları elde edilir.



Şekil 2.2.  $u(x,y)$  fonksiyonu



Şekil 2.3  $N_1$ ,  $N_2$  ve  $N_3$  fonksiyonları

## 2.2. Ansys Simülasyon Programı

ANSYS; mühendislik çalışmalarında kullanılan simülasyonların yapıldığı bilgisayar destekli analiz programdır. Ürünlerin tasarımı yapıldıktan sonra üretime geçilmeden önce bilgisayar ortamında analiz imkanı sağlar. Parçaları titreşim, mukavemet, deformasyon gibi özelliklerini karşılaştırarak tasarımın en iyi halini ortaya koymaya yardımcı olur. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, parçayı birçok küçük elemana bölerek analizi sürdürür. [32]

### 2.2.1. Explicit Dynamics Modülü

Analizi yapılacak malzeme darbelere ve kısa süreli yüksek basınca dayanması gerekecek ise Explicit Dynamics modülü kullanılabilir. Analiz sonucunda farklı veriler elde edilebilir;

- Yarı statik.
- Yüksek hız ve hiper hız etkileri.
- Büyük malzeme deformasyonu ile sonuçlanan şiddetli yükler.
- Malzeme hatası.
- Malzeme parçalanması.
- Düşürme testi simülasyonu.
- Patlayıcı yükleme.
- Patlayıcı şekillendirme.
- Patlama-yapı etkileşimleri.

### 2.2.2. ACP Modülü

Karmaşık kompozit yapıların analizinde kullanılan bir modüldür. Analizi yapılacak kompozit malzemenin katman sayısı, katman kalınlığı ve açısı gibi birçok özelliği girerek, yük altında oluşan hasarı; deformasyon, çekme, çatlama gibi birçok çıktı oluşturmaya yardımcı olur.

### 2.3. Corecell A500 Köpük Malzeme

Corecell A yüksek sünekliğinden gelen yüksek derecede tokluk ve çatlamaya karşı direnci sayesinde katmanlı yapılarda tercih edilir. Corecell kırılmadan önce %65'e kadar uzayabilir, bu sebeple kesme kırılması neredeyse imkansız hale getirir.

Corecell malzemesinin genel özellikleri arasında; olağanüstü darbe toleransı, dinamik yüklenen yapılar için uygunluğu, PVC köpüğe göre üstün stiren ve sıcaklık direnci, ısıya ve kimyasal maruziyete karşı yüksek tolerans vardır.

**Tablo 2.1:** Corecell A500 Malzeme Özellikleri [33]

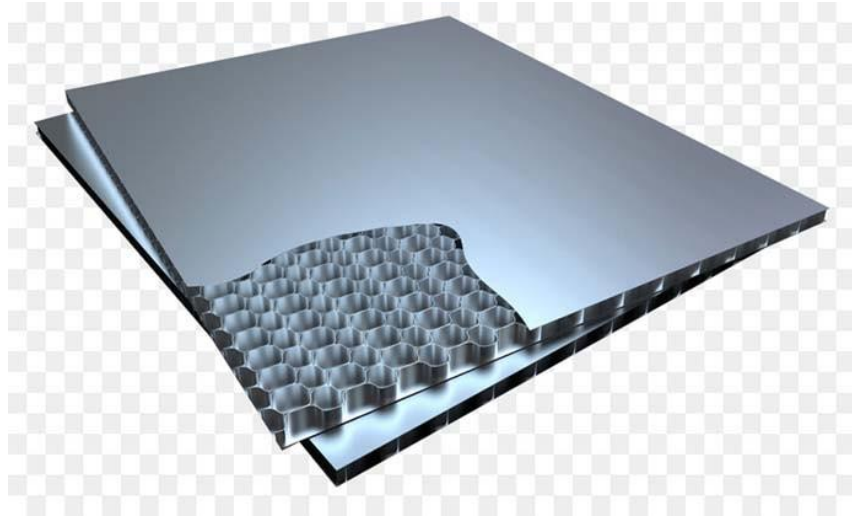
Özellik	Değer
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	100
Young Modülü(MPa)	85
Kayma Modülü (MPa)	32
Gerilme Direnci (MPa)	1,6
Basınç Dayanımı (MPa)	1,1
Kesme Kuvveti (MPa)	1,1

### 2.4. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla bileşen malzemeden üretilen bir malzemedir. Yaygın olan malzemelerden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip daha özel malzemeler oluşturmak için kompozit malzemeler üretilir. Uzay araçlarında ve uçak gövdelerinde kompozit malzemelerin dayanıklılığından dolayı sıklıkla yer verilmeye başlanmıştır. [34]

Genel olarak, malzemeler metal, seramik ve organik olarak üç ana gruba ayrılmaktadır ve her bir sınıfın kendine özgü üstün ve zayıf yönleri vardır. Teknolojik ilerlemeler sayesinde, bu malzemelerden ikisi veya daha fazlası, makro düzeyde birleştirilerek üretilen yeni malzemeler üretilebilmektedir. Bu malzemelere kompozit malzemeler denir ve her iki malzemenin üstün özellikleri tek bir malzemede toplanmış olur. [46]

Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelerin bir veya birkaç özelliğini iyileştirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu özellikler arasında mukavemet, korozyon dayanımı, termal dayanım, elektrik ve akustik iletkenlik, ağırlık, estetik görünüm ve fiyat bulunmaktadır. Kompozit malzemeler, bir matris ana fazı ve bunun içine dağılmış takviye elemanlardan oluşmaktadır. [47]



Şekil 2.4: Kompozit Malzeme

#### 2.4.1. Karbon Fiber

Karbon fiber, iplikli bir malzemedir. Ana bileşenleri, katran naylon ve orlon(karbonlaşmış akrilik elyaf)dur. Karbon fiber, çelikten 4 kat daha hafif olmasına rağmen, 4 kat daha dayanıklıdır. Naylon kadar esnek değil ve orlona göre daha dayanıklıdır.[35]

**2.4.1.1. UD T700/3234 Epoksi Karbon Fiber:** 3234 epoksi ile güçlendirilmiş T700 karbon fiberdir. Yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Otomobil ve havacılık sektörlerinde sıklıkla kullanılır. [36]

**Tablo 2.2:** UD T700/3234 Malzeme Özellikleri

<b>Özellik</b>	<b>Değer</b>
<b>Fiber Hacim Fonksiyonu (%)</b>	60.2±1.5
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1570
<b>Ortotropik Esneklik</b>	
<b>Young Modülü X (GPa)</b>	132
<b>Young Modülü Y (GPa)</b>	10.3
<b>Young Modülü Z (GPa)</b>	10.3
<b>Poisson Oranı XY (GPa)</b>	0.25
<b>Poisson Oranı YZ (GPa)</b>	0.38
<b>Poisson Oranı XZ (GPa)</b>	0.25
<b>Kayma Modülü X (MPa)</b>	6.5
<b>Kayma Modülü Y (MPa)</b>	3.91
<b>Kayma Modülü Z (MPa)</b>	6.5
<b>Ortotropik Gerilme Limitleri</b>	
<b>Çekme Gerilmesi X (MPa)</b>	2100
<b>Çekme Gerilmesi Y (MPa)</b>	24
<b>Çekme Gerilmesi Z (MPa)</b>	65
<b>Basma Gerilmesi X (MPa)</b>	1050
<b>Basma Gerilmesi Y (MPa)</b>	132
<b>Basma Gerilmesi Z (MPa)</b>	132
<b>Kesme Gerilmesi X (MPa)</b>	75
<b>Kesme Gerilmesi Y (MPa)</b>	75
<b>Kesme Gerilmesi Z (MPa)</b>	75

### 2.5. Seramik Malzemeler

Seramik malzemeler, metal ve metal dışı bileşenlerden oluşan, inorganik ve metalik olmayan malzemelerdir. Yüksek sertliğe ve basınç dayanımına sahip seramikler, çeşitli mermi tehditlerine karşı korunmak için günümüzün hafif zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Balistik çalışmalarda sıkça kullanılan seramik malzemeler arasında alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B<sub>4</sub>C) yer alır. Çok katmanlı zırh sistemlerinde kullanılan seramik malzemenin ön katman olarak kullanımı, yüksek sertliğe sahip çelik malzemelerle yapılan zırhların hedefe yüksek hızlarda giren mermileri köreltme ve parçalama işlevini desteklemektedir. [37] Seramik zırhın arkasında yer alan destekleyici kompozit katman ise merminin kalan kinetik enerjisini söndürür. [38]

Seramik malzeme özellikleri sıralanacak olursa;

- Kırılgan ve tok,
- Opak ve saydam,
- Yalıtkan-yarı iletken ve süper iletken,
- Düşük ve yüksek ergime dereceli,
- Tek veya çok kristal,
- Kristal ve camsı
- Gözenekli ve yoğundur. [48]

### 2.5.1. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür, karbür seramiklerinin alt sınıfıdır. Isıl iletkenlik, yüksek aşınma direnci ve sertliğe sahiptir. Kimyasal endüstride, havacılık ve uzay çalışmalarında tercih edilir.

**Tablo 2.3:** Silisyum Karbürün Tipik Özellikleri [39]

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Yoğunluk,gr/cm <sup>3</sup>	3.1-3.22
Silisyum karbür, %	97.8
Karbon içeriği, %	0.2-0.8
Renk	Siyah
Eğme mukavemeti, MPa: oda sıcaklığında 800 oC'de	400-140 400-410
Sertlik, kg/mm <sup>2</sup> , Vickers	3100

### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

#### 3.1. Materyal

Çalışmada Ansys paket programı kullanılmıştır. Balistik analizler için katmanlı kompozit malzeme tasarlanmıştır fakat bu malzemenin önüne kırılarak merminin ucunun şeklinin değişmesine ve kendisi de katılarak merminin kinetik enerjisinin harcanmasına sebep olacak seramik farklı bir katman daha kullanılmıştır. Bu katman için malzeme Silisyum Karbür (SiC) seçilmiştir. Bu malzemenin arkasına hem dayanıklılığı hem de süneklik özelliğinden yararlanmak için Al5083-H116 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Diğer katman için ise ANSYS CompositePrepPost ile Carbon UDT700 karbon fiber malzemesi seçilmiştir. Karbon katmanını oluştururken enerji emme görevi görecektir Corecell A550 malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemenin sünekliği sayesinde katmanlı yapıda oluşabilecek çatlaklarında önüne geçilecektir.

Katmanlı yapıya etkisini gözlemlemek amacıyla 5.56x45 mm NATO M193 mermisi seçilmiştir. Merminin zırha çarpma anındaki hızı 850 m/s olarak kabul edilmiştir. Analiz sonunda bu merminin karşısında farklı kalınlık ve malzemelerdeki katmanlı yapının balistik dayanım performansı incelenmiştir.

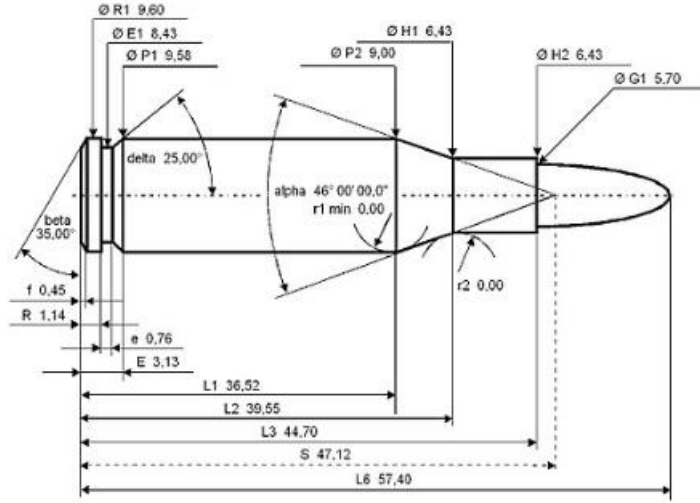
##### 3.1.1. 5.56×45mm NATO M193 Mermisi

5.56×45mm NATO, 1970'li yılların sonuna doğru Belçika'da FN Herstal tarafından geliştirilen bir tüfek mermisidir.

5.56 mm'lik mermilere geçilmesinin nedeni; 7.62×51mm NATO mm'lik mermilerin büyük olması ve atıştan sonra geri tepmesinin 5.56 mm'lik mermiye göre yüksek olmasıdır. Bir diğer kullanım sebebi ise 7.62×51mm NATO mermisine göre daha küçük olması sebebi ile taşınımını kolay olması sayesinde daha çok mermi kullanımını sağlamış olmasıdır.

Bu kalibre, bir piyade tüfeğinin genellikle tercih ettiği bir kalibre olmakla birlikte, daha uzun menzillerde daha kesin sonuçlar elde etmek ve daha etkili bir etki sağlamak için birçok keskin nişancı tüfeği 7.62x51mm NATO mühimmatı kullanmaktadır.

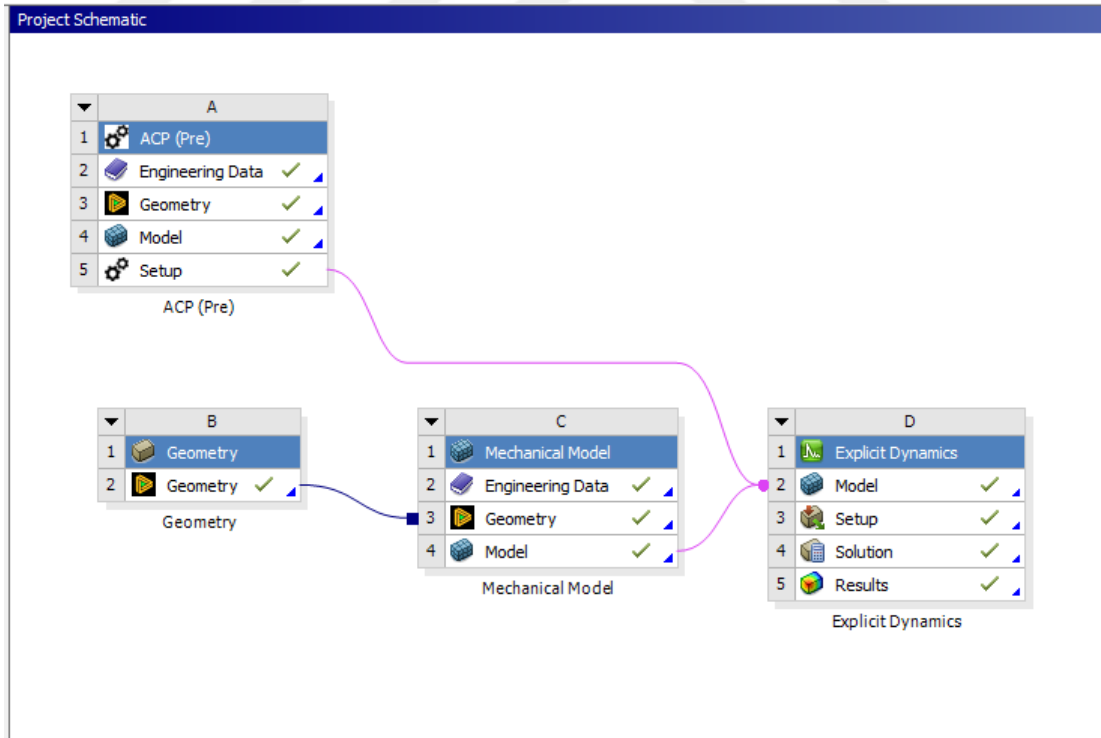
### 3.1.2. Merminin Yapısı



Şekil 3.1. Mermi Yapısı

### 3.2.YÖNTEM

Projede gerekli üç boyutlu tasarım ve çizim programları ve sonuçları değerlendirmek amacıyla sayısal analiz programları kullanılmıştır. Bu amaç ile genel analiz için ANSYS paket programından faydalanılmıştır. Kompozit katmanlar için alt modül olarak da ANSYS ACP kullanılmıştır. Bu modül sayesinde kompozit malzeme tasarımında katmanların yerleştirme açılarından katman kalınlıklarına birçok bilgi girilebilmektedir. Kullanılan mermi ve diğer katmanların tasarımı için Design Modeller kullanılmıştır. Model oluşturulduktan sonra ANSYS Explicit Dynamics modülü ile analize başlamadan önce tasarım ağ yapılarına bölünmüş (mesh işlemi), yine referans çalışmadaki fiziksel koşullar modele sınır ve başlangıç şartı olarak uygulanmıştır. (mermi hızı vs.) Gerekli analiz ayarları yapıldıktan sonra modelin çözümü yaptırılmış ve sonuçlar birbiri ile tutarlı hale gelip model için uygun mesh yapısı belirleninceye kadar mesh analizi yapılmaya devam edilmiştir. Mesh analizi yapıldıktan sonra katmanlı yapının mermiyi durdurabilecek en uygun yapı bulununcaya dek merminin balistik atış testleri yapılmıştır.

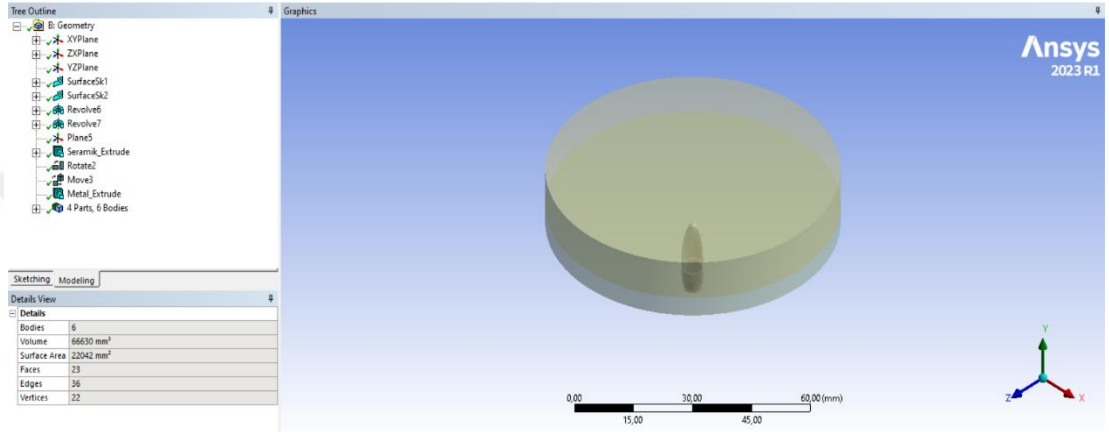


Şekil 3.2. Ansys paket programında tasarlanan analiz sistemi için Proje Ağacı

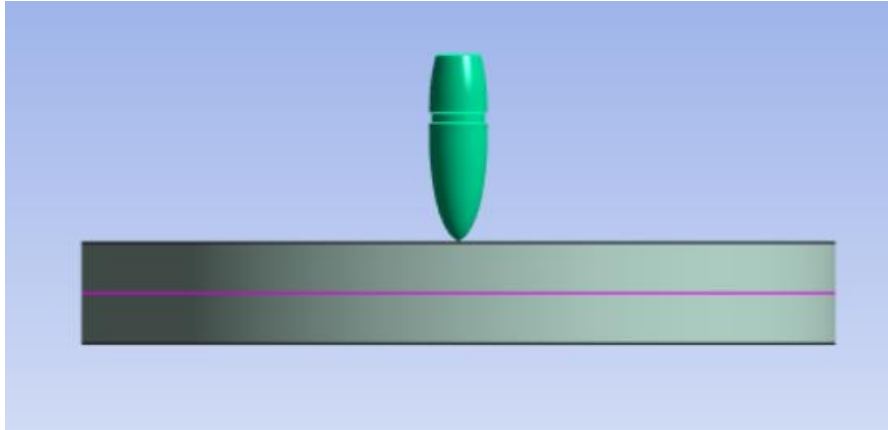
## 4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE YÖNTEMLER

### 4.1 Modelin Tasarımı

Balistik atış için merminin çekirdeğinde kurşun, dış katmanı pirinç kullanılmıştır. Katmanlı zırh yapısı için ise SiC, Al5083-H116 alüminyum alaşımı, epoksi karbon ve Corecell köpükten oluşan kompozit malzeme kullanılmıştır.



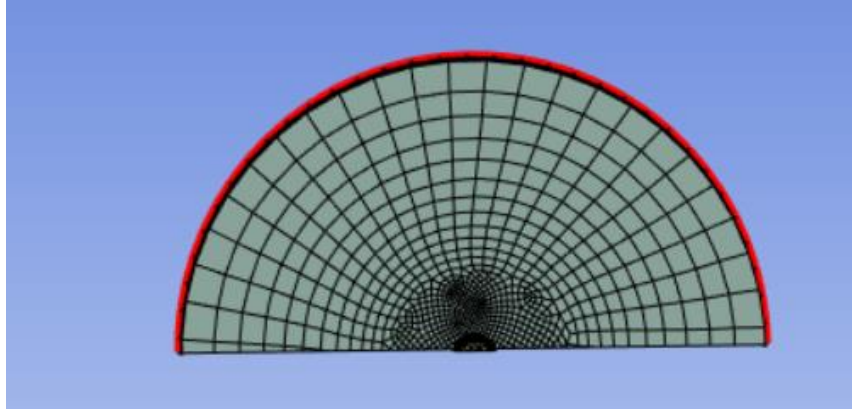
Şekil 4.1: Model Tasarımı 1



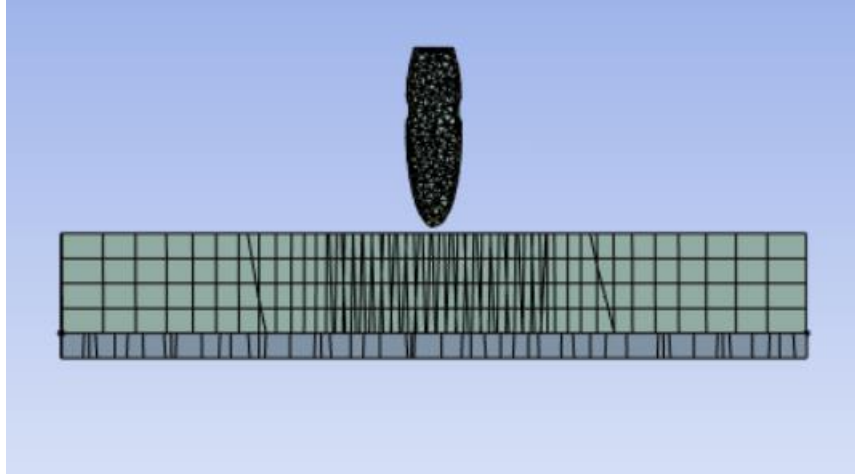
Şekil 4.2: Model Tasarımı 2

### 4.2. Modelin Mesh Yapısı

Analiz için kullanılan mesh yapısında, özellikle çarpışma bölgesindeki büyük enerji değişimlerini yakalayabilmek adına bu kısımlarda çok daha küçük elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Mesh Yapısı



Şekil 4.4. Mesh Yapısı

### 4.3. Kompozit Malzeme Yapısı

Katmanlı kompozit yapının önüne merminin durması için konulacak malzemelerin kalınlıkları için 2 farklı durum karşılaştırılmıştır. Bu durumlar; 5 mm SiC - 5 mm Al5083-H116 ve 2 mm SiC - 5 mm Al5083-H116.

#### 4.3.1. Katman Açılarında Durum 1

Katmanlı kompozit oluştururken elyaf açılarının farklı olmasının balistik performansı gözlemlemek amacı ile 2 farklı açı dizilimi yapılmıştır. Tablo 1’de durum 1 için açılar belirtilmiştir. Karbon fiberin kalınlığı her birinin 0,0834 mm ve Corecell 1 mm seçilmiştir.

**Tablo 4.1:** Katman Açılarında Durum 1

Katman Malzemesi	Katman Açısı
Carbon_UDT700	[0,90] <sub>9</sub>
Corecell	0
Carbon_UDT700	[0,90] <sub>9</sub>

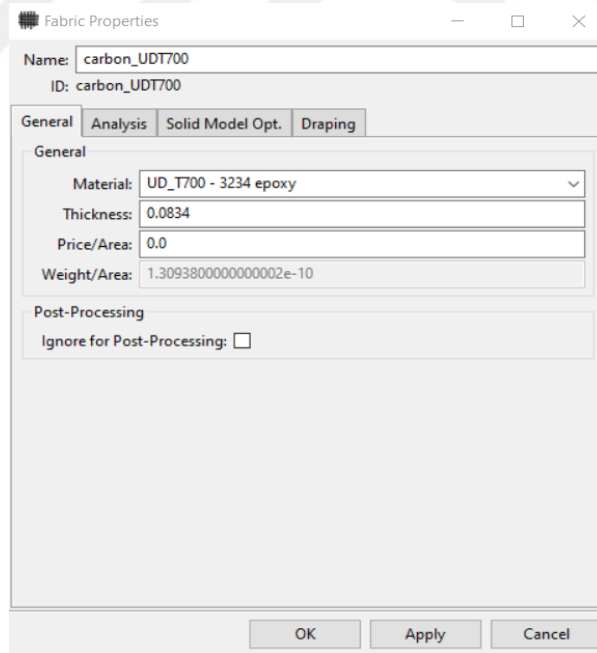
#### 4.3.2. Katman Açılarında Durum 2

**Tablo 4.2:** Katman Açılarında Durum 2

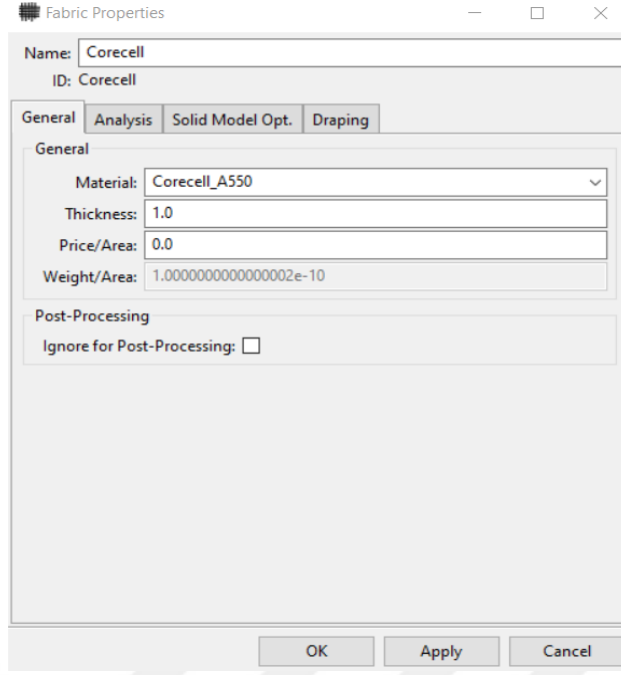
Katman Malzemesi	Katman Açısı
Carbon_UDT700	[30,90,-30,90] <sub>5</sub>
Corecell	0
Carbon_UDT700	[30,90,-30,90] <sub>4</sub>

#### 4.4. ACP Modül Sekmesi

İlk olarak malzemelerin kalınlıkları tanımlanmıştır. ACP modülü içeriğinde Fabric sekmesinden UD T700-3234 epoksi karbon 0,0834 mm, Corecell A550 köpüğü 1 mm olarak tanımlanmıştır.

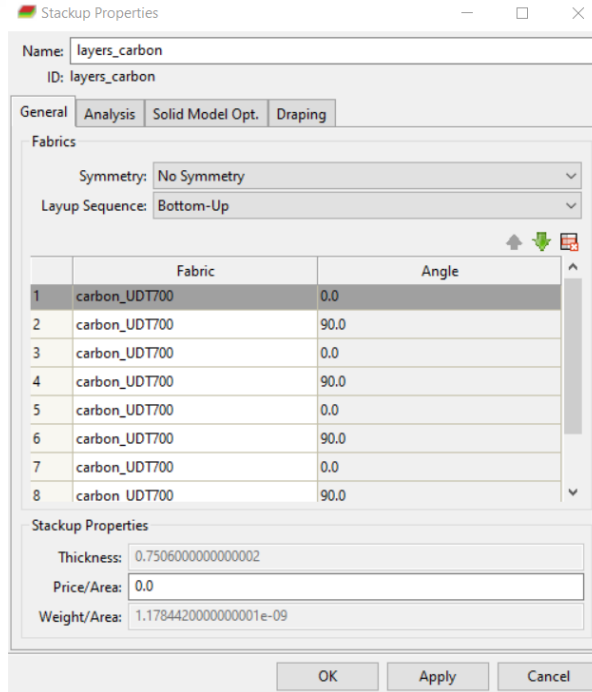


**Şekil 4.5:** Epoksi Karbon Malzeme Kalınlığı



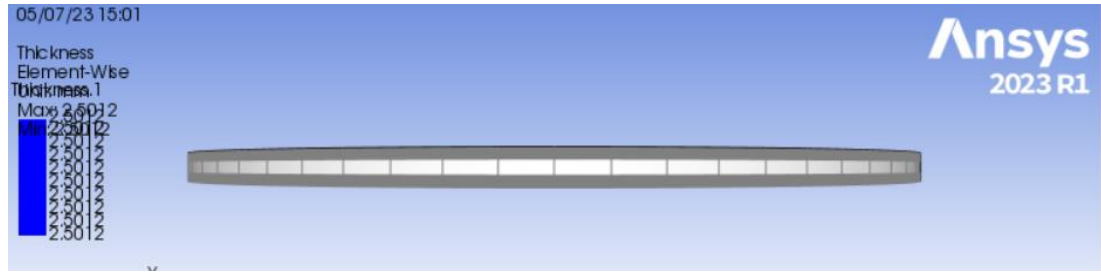
Şekil 4.6: Corecell Malzeme Kalınlığı

Daha sonra stack up sekmesinden oluşturulmak istenen katmanın açılış değerleri girilmiştir. Kompozit malzemede açılış değerleri şekildeki gibi seçilmiştir.



Şekil 4.7: Kompozit Malzeme Açılış Değerleri

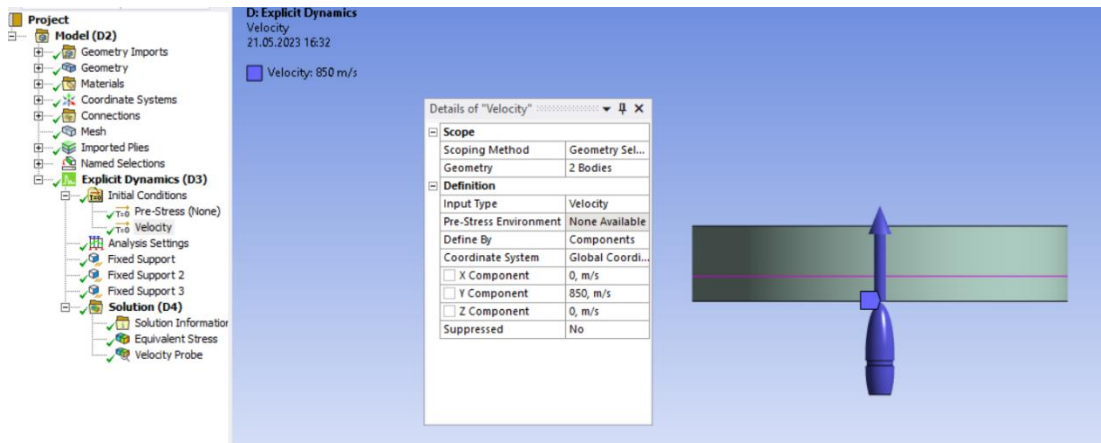
Modelin Group sekmesinden oluşturulmak istenen katmanlı yapının en son hali oluşturulmuştur. Epoksi karbonun kalınlığını toplam 1.5 mm olacak şekilde analizi yapılmıştır. Araya Corecell köpüğü konularak 3 katmanlı bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 4.8: Katmanlı Yapının Modeli

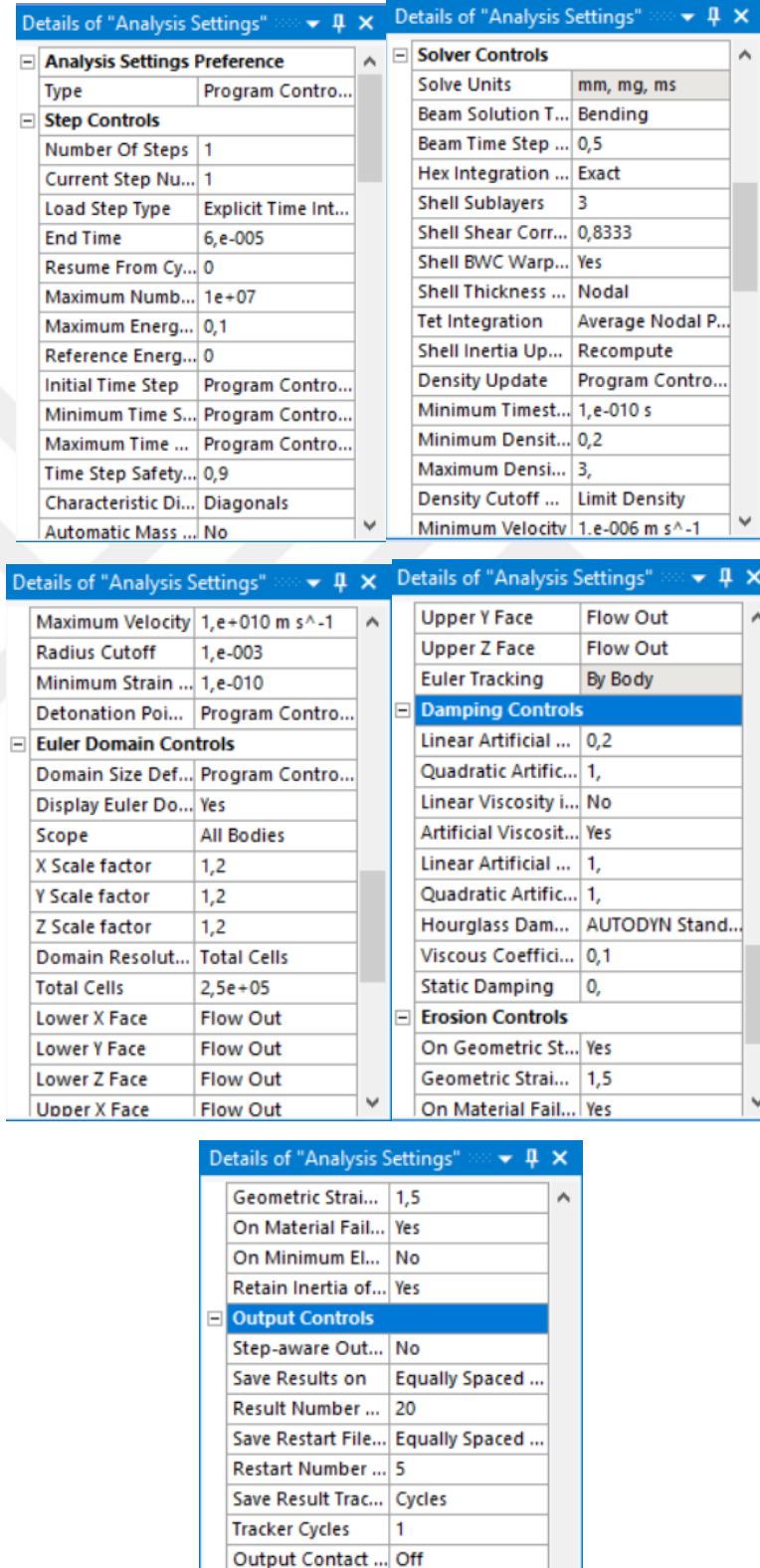
Ansys paket programında yapılacak analiz için Explicit Dynamics modülünde kompozit yapı shell, diğer katmanlar ve mermi solid model olarak yapılmıştır. Solid modeli oluşturmak için Mechanical modülü kullanılmıştır.

Explicit Dynamics modülünde mermiye 850 m/s hız verilmiştir. Şekil 4.9'da görüleceği üzere Ansys paket programına veri girişi sağlanmıştır.



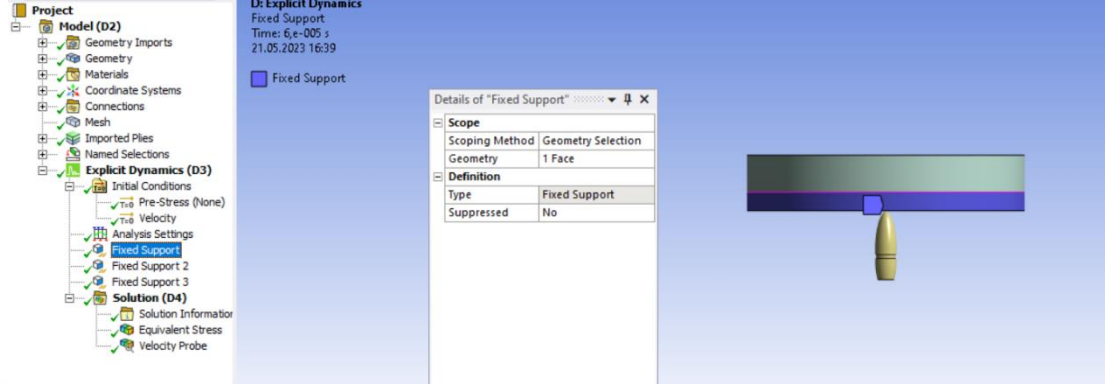
Şekil 4.9: Mermi Hızı

Analysing Settings sekmesinde analizde gerekli olacak ortam koşullarını sağlayabilmek amacı ile tüm veri girişleri aşağıdaki şekil 10'da görüleceği üzere sağlanmıştır.

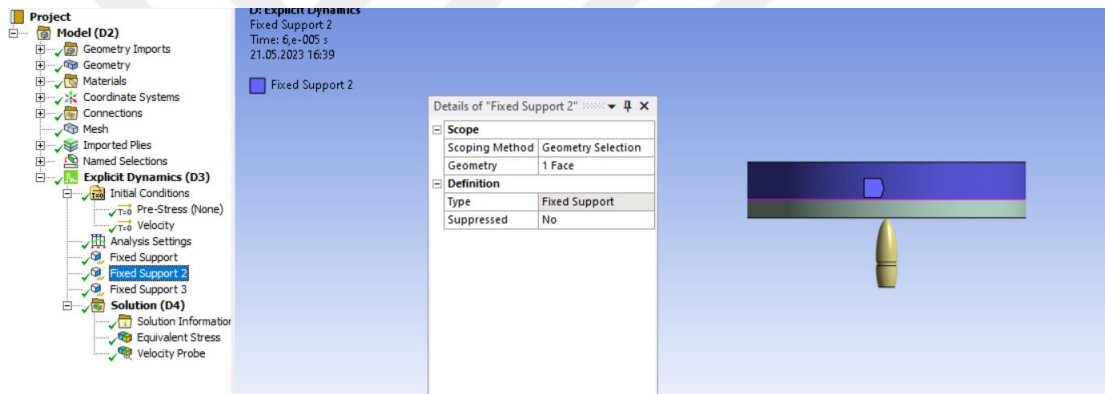


Şekil 4.10: Analysing Settings Verileri.

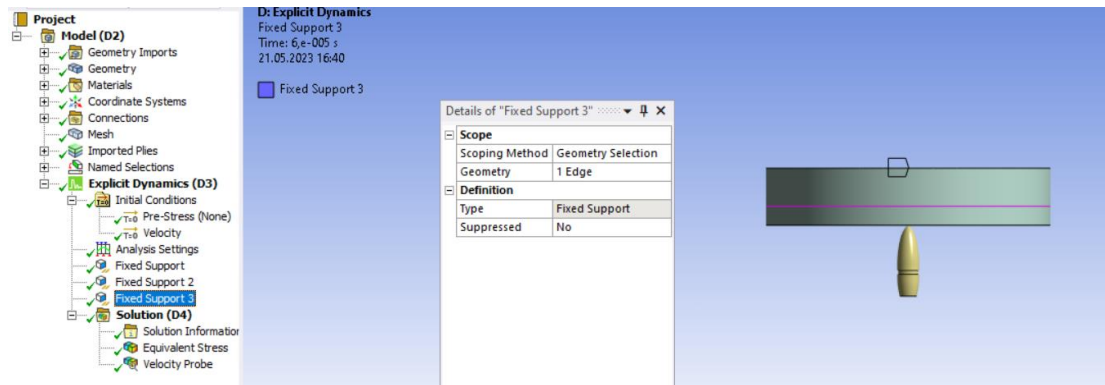
SiC seramik malzeme, Al5083-H116 Alüminyum alaşımı ve kompozit malzemeyi atış sırasında mesnetlemek amacı ile her malzeme etrafından şekil 11-12-13'te görüleceği üzere fixed support olarak sabitlenmiştir.



Şekil 4.11: SiC Seramik Malzeme Mesneti.



Şekil 4.12: Al5083-H116 Alüminyum Malzeme Mesneti.



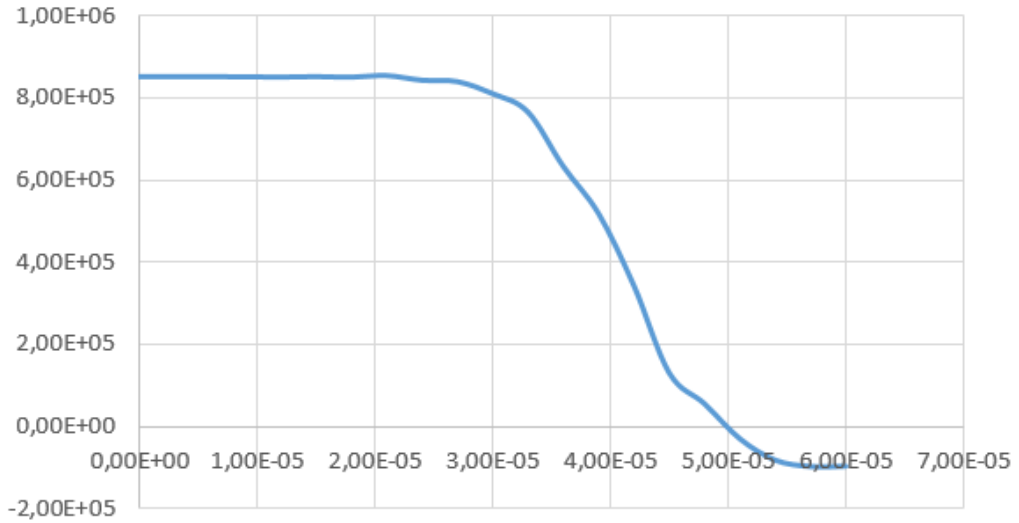
Şekil 4.13: Kompozit Malzeme Mesneti.

## 4.5. Simülasyon Sonuçları

M193 mermisi 850 m/s hız ile katmanlı yapıya balistik atış gerçekleştirilmiştir. Zırhın her katmanı için sınır şartı olarak kenarlarından sabit tutulmuş mesnet tanımlaması yapılmıştır. Merminin zırha tam çarpmadan önceki konumdayken tasarlanması sayesinde analiz sürecinden tasarruf yapılmaya çalışılmıştır. İncelenen her zırh seti için mermide meydana gelen hız değişimleri; zırhda meydana gelen gerilme ve deformasyon sonuçları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

### 4.5.1. Hız Değişimleri

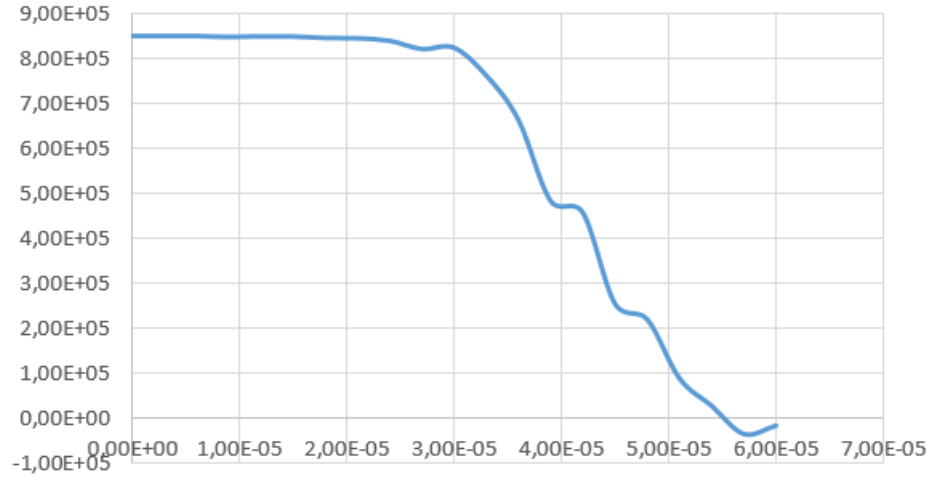
- 2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 1 Sonuçları



Şekil 4.14: 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Hız Değişimleri

Şekil 4.14'te görüleceği hız grafiği değerlendirildiğinde, mermi durmayı başarmıştır. Balistik atış olumlu sonuç vermiştir.

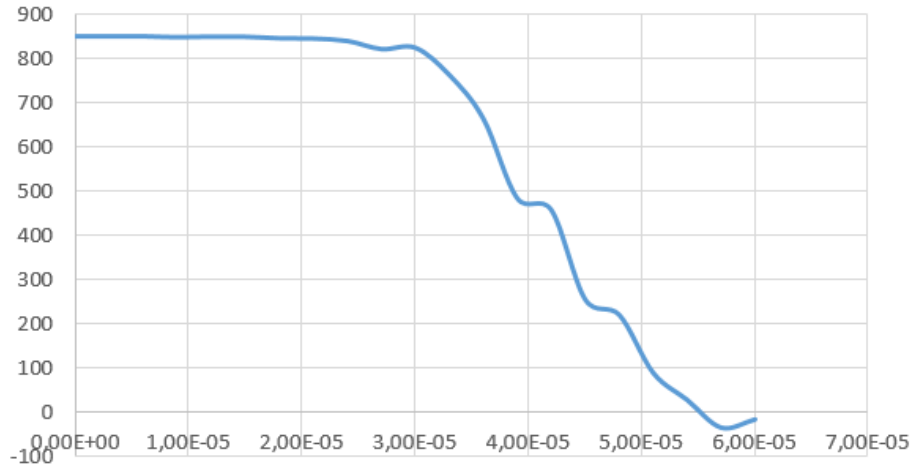
- **2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları**



**Şekil 4.15:** 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Hız Değişimleri

Şekil 4.15'te görüleceği hız grafiği değerlendirildiğinde, mermi durmayı başarmıştır. Balistik atış olumlu sonuç vermiştir. Hızın sifira düşmesi her iki durum için de benzer olmakla birlikte durum 2'de bu düşüş bir miktar kademe kademe olurken durum 1'de daha yumuşak bir geçiş görülmektedir.

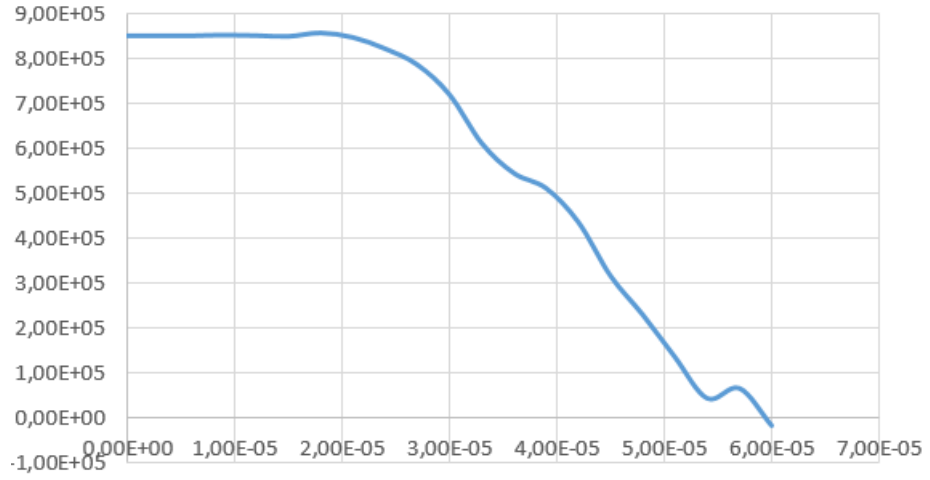
- **5 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları**



**Şekil 4.16.** 5 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Hız Değişimleri

Şekil 4.16'a baktığımızda 2. Durum olarak tasarlanan kompozit katman kullanıldığında yine mermi tüm hızını kaybederek durduğu görülmektedir.

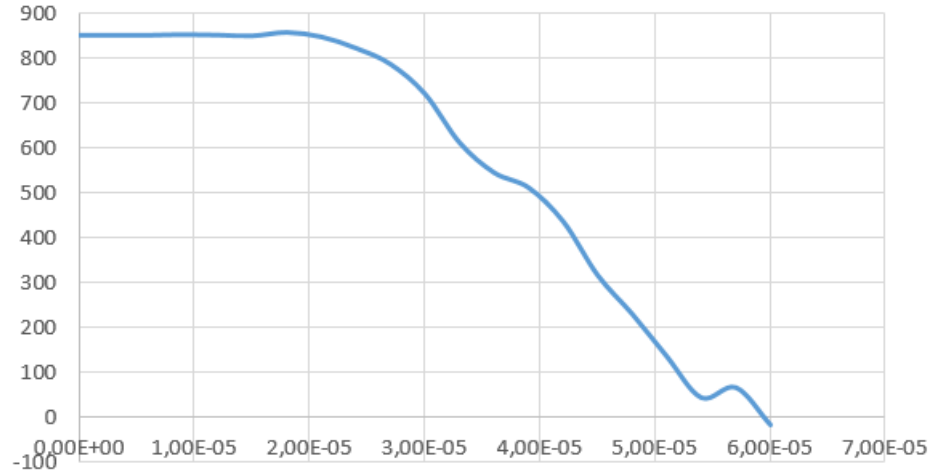
- **5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 için Durum 1 Sonuçları**



**Şekil 4.17.** 5 mm SiC – 10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Hız Değişimleri

Şekil 4.17’de görüleceği hız grafiği değerlendirildiğinde, mermi durmayı başarmıştır. Balistik atış olumlu sonuç vermiştir.

- **5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları**



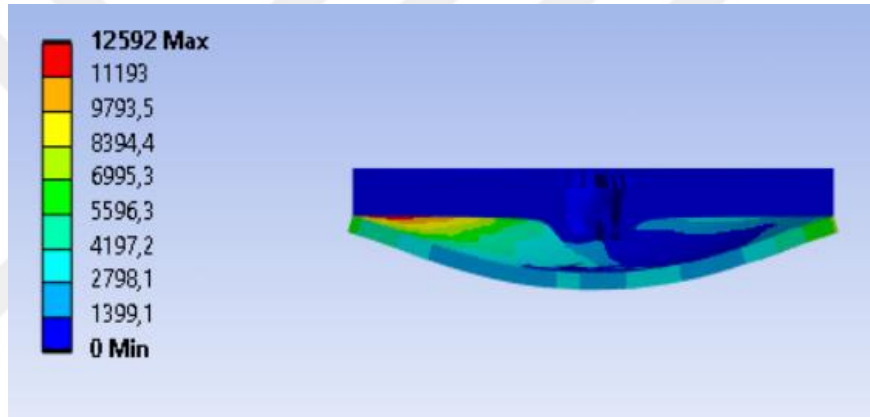
**Şekil 4.18.** 5 mm SiC – 10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Hız Değişimleri

Şekil 4.18’de görüleceği hız grafiği değerlendirildiğinde, mermi durmayı başarmıştır.

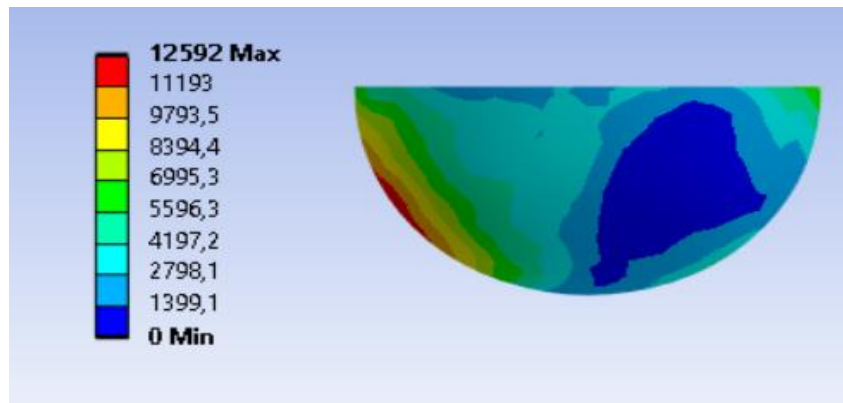
Bütün hız grafikleri değerlendirildiğinde; Alüminyum katmanının kalınlığının (5 mm ve 10 mm) ve SiC katmanının kalınlığının (2 mm ve 5 mm) değişmesi sonuçlar üzerinde büyük etki oluşturmamıştır. Literatürde sadece SiC Al5083-H116 kullanılarak oluşturulan zırh setlerinde bu tarz bir balistik tehditi oluşturmak için daha kalın bir Alüminyum tabakası gerektiği görülmektedir. Bizim tasarladığımız zırh setinde asıl balistik performansı sağlayan katmanın kompozit katman olduğu görülmektedir ve kompozit katmanın değişmediği durumlar birbirine benzer sonuçlara neden olmuştur.

#### 4.5.2. Gerilme Analizleri

- 2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 1 Sonuçları



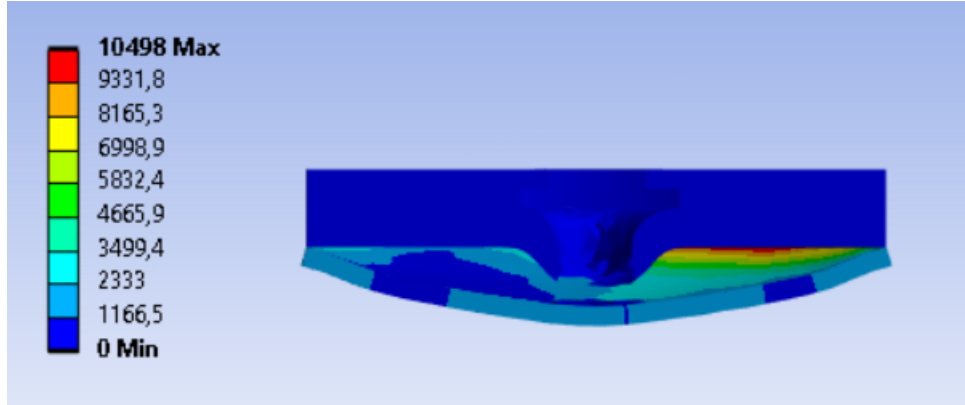
Şekil 4.19. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizleri



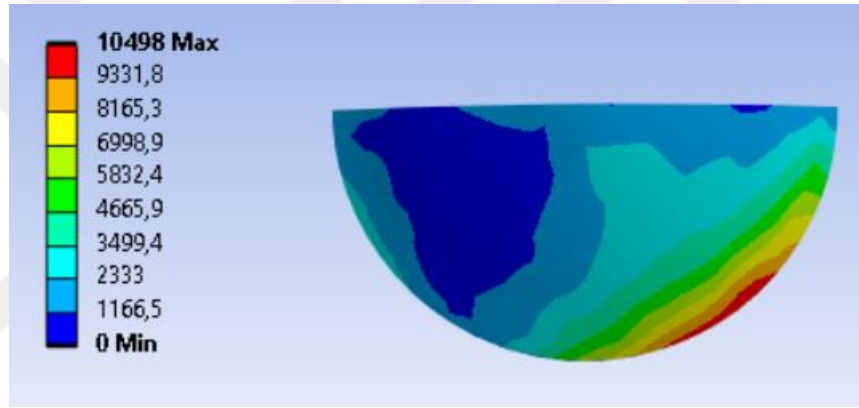
Şekil 4.20. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizleri

Şekil 4.19-20'de görüleceği üzere gerilme analiz sonucuna bakıldığında en yüksek gerilme değeri katmanın kenar kısmında 12592 MPa olarak görülmektedir.

- 2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları



Şekil 4.21. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizleri

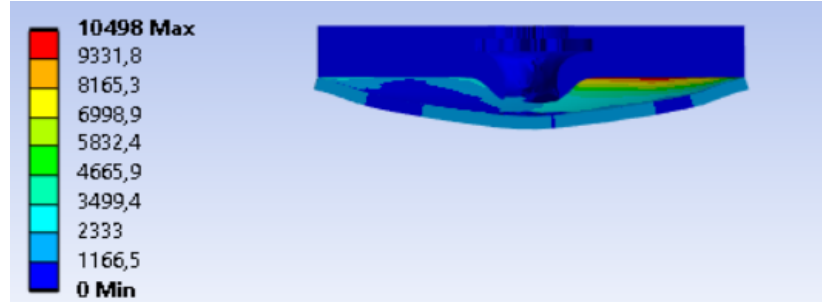


Şekil 4.22. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizleri

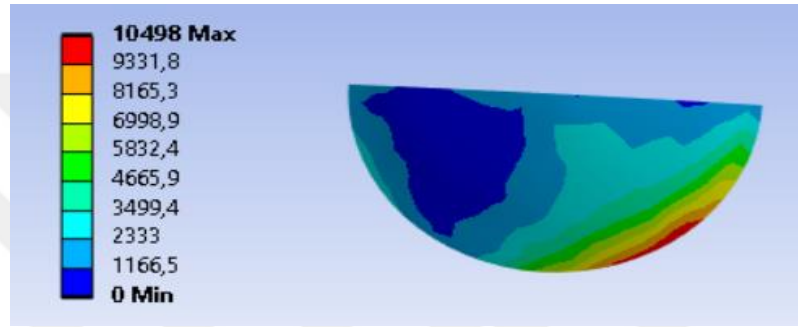
Şekil 4.21-22’de görüleceği üzere gerilme analiz sonucuna bakıldığında en yüksek gerilme değeri katmanın kenar kısmında 10498 MPa olarak görülmektedir.

Durum 1 ve durum 2 karşılaştırıldığında durum 1’de bir miktar daha gerilme görülmektedir.

- 5 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları



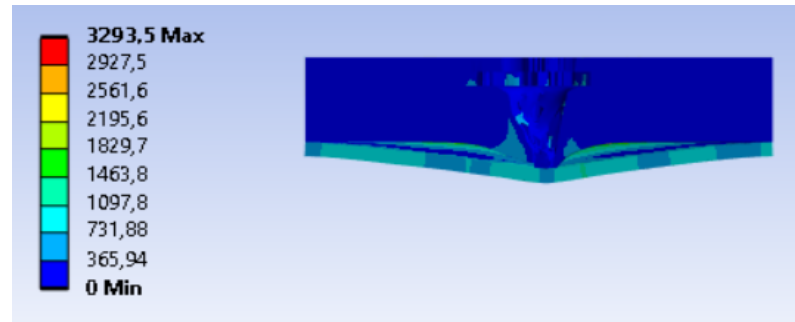
Şekil 4.23. 5 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizleri



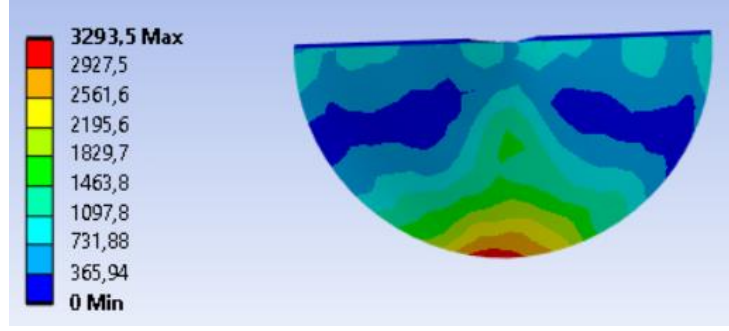
Şekil 4.24. 5 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizleri

Şekil 4.23-24'te görüleceği üzere gerilme analiz sonucuna bakıldığında en yüksek gerilme değeri katmanın kenar kısmında 10498 MPa olarak görülmektedir. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 gerilme analiziyle karşılaştırıldığında SiC katmanındaki kalınlık değişiminin gerilmeye bir etken olmadığı görülmüştür.

- 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 için Durum 1 Sonuçları



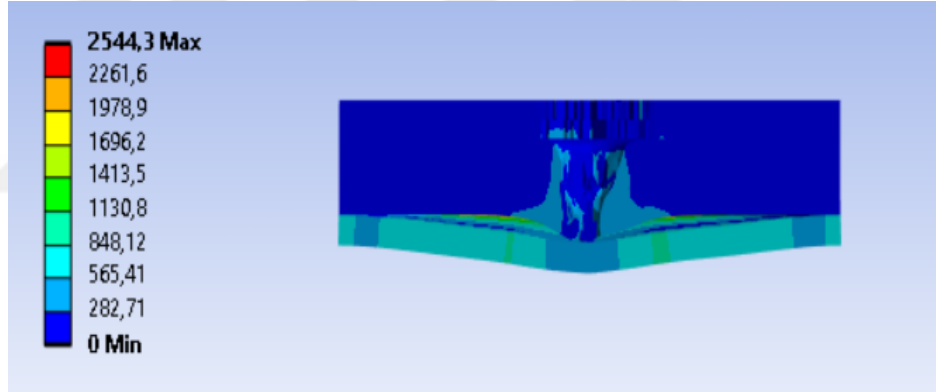
Şekil 4.25. 5 mm SiC – 10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizleri



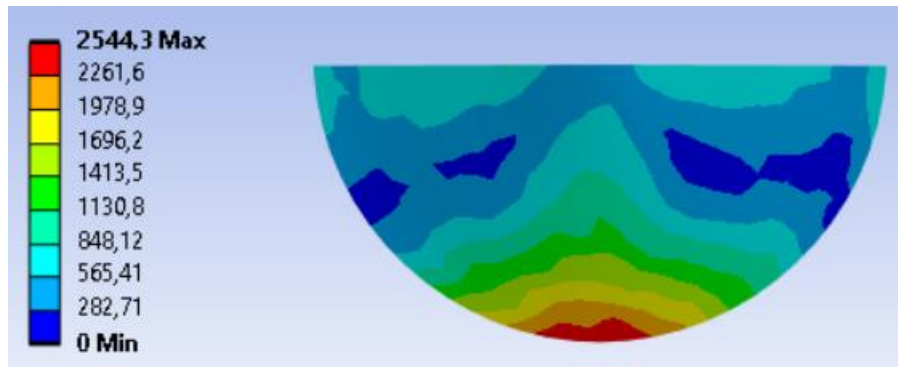
**Şekil 4.26.** 5 mm SiC – 10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Gerilme Analizleri

Şekil 4.25-26'da görüleceği üzere gerilme analiz sonucuna bakıldığında en yüksek gerilme değeri katmanın kenar kısmında 3293 MPa olarak görülmektedir.

- **5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları**



**Şekil 4.27.** 5 mm SiC – 10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizleri



**Şekil 4.28.** 5 mm SiC – 10 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Gerilme Analizleri

Şekil 27-28'e bakıldığında gerilme analiz sonucuna bakıldığında en yüksek gerilme değeri katmanın kenar kısmında 2544 MPa olarak görülmektedir. Durum 1 ve durum 2 karşılaştırıldığında durum 1'de daha fazla gerilme olduğu gözlemlenmiştir.

Mermi, toplam 10 mm olan ön yüzlerden daha kolay geçtiği için kompozit yapıya daha fazla yükte geldiği gerilme sonuçlarından anlaşılır. Çünkü toplam 15 mm olan ön katmanlarda kompozitte oluşan gerilme değerleri daha düşüktür. Fakat kompozit katmanınız süneklik özelliğinden dolayı herhangi bir kopma vs bir durum gözlemlenmemiştir.

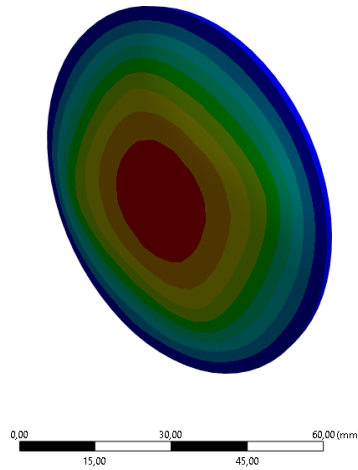
### 4.5.3. Deformasyon Analizleri

En az deformasyona uğrayan zırh setinin mermiye karşı koruyucu özelliği daha sağlam olduğundan dolayı en uygun olanı görülmesi için kompozit malzemenin y yönündeki deformasyon analizlerine bakılmıştır.

- **2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 1 Sonuçları**

D: Explicit Dynamics  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 6.e-005 s  
Cycle Number: 12356  
23.05.2023 16:01

8.3899 Max
7.4577
6.5325
5.5993
4.6611
3.7289
2.7966
1.8644
0.93221
0 Min



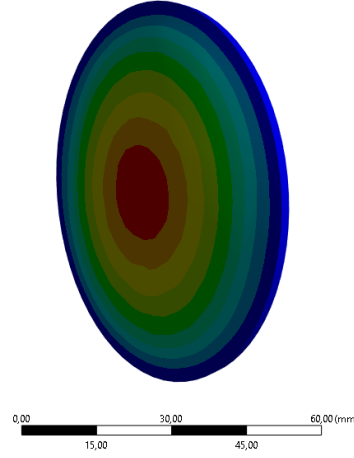
Şekil 4.29. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 1 Deformasyon Analizi

Şekil 4.29'da görüldüğü üzere katmanlı kompozit yapıda en fazla 8,39 mm deformasyon oluşmuştur.

- 2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları

D: Explicit Dynamics  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 6,0003e-005 s  
Cycle Number: 14368  
23.05.2023 15:57

7,6812 Max  
6,8277  
5,9743  
5,1208  
4,2673  
3,4139  
2,5604  
1,7069  
0,85347  
0 Min



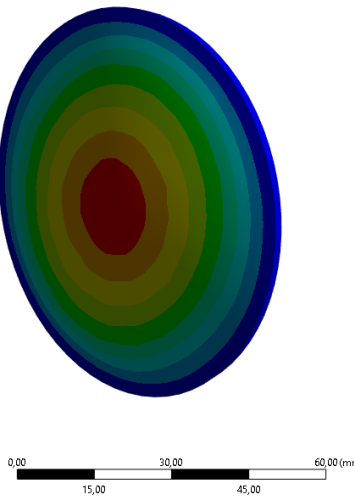
Şekil 4.30. 2 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit Durum 2 Deformasyon Analizi

Şekil 4.30’da görüldüğü üzere katmanlı kompozit yapıda en fazla 7,68 mm deformasyon oluşmuştur. Her iki durum karşılaştırıldığında durum 2’deki deformasyon miktarının daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

- 5 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları

D: Explicit Dynamics  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 6,0003e-005 s  
Cycle Number: 14368  
23.05.2023 15:50

7,6812 Max  
6,8277  
5,9743  
5,1208  
4,2673  
3,4139  
2,5604  
1,7069  
0,85347  
0 Min

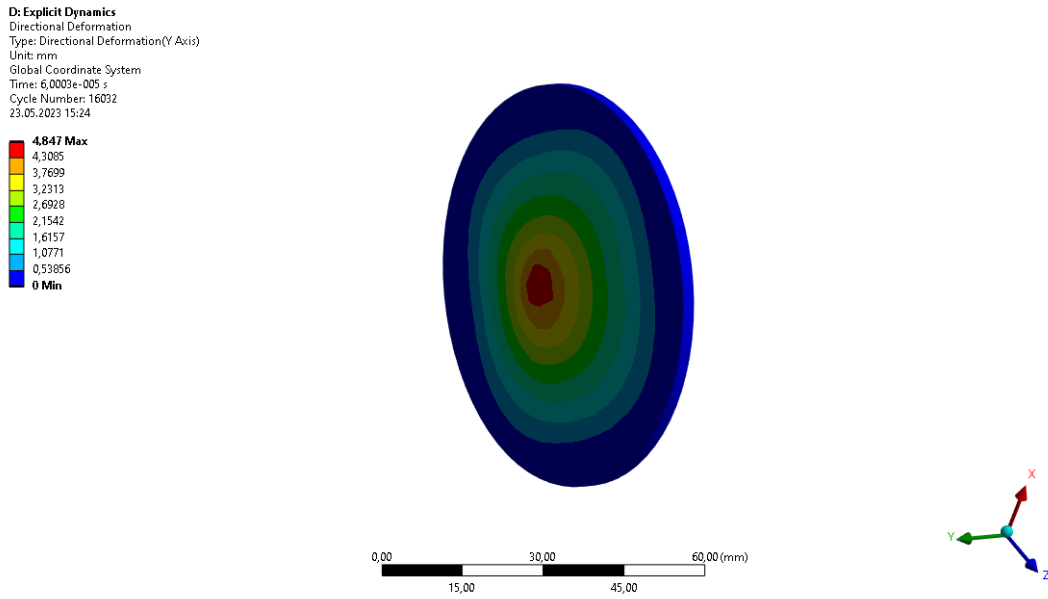


Şekil 4.31. 5 mm SiC – 5 mm Al5083-H116-Kompozit için Durum 2 Deformasyon Analizi

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere katmanlı kompozit yapıda en fazla 7,68 mm deformasyon oluşmuştur.

2 mm SiC-5 mm Al5083-H116 katmanlı yapı ile karşılaştırıldığında çok yakın sonuçlara varılmıştır. Bu yüzden SiC kalınlığının yetersiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

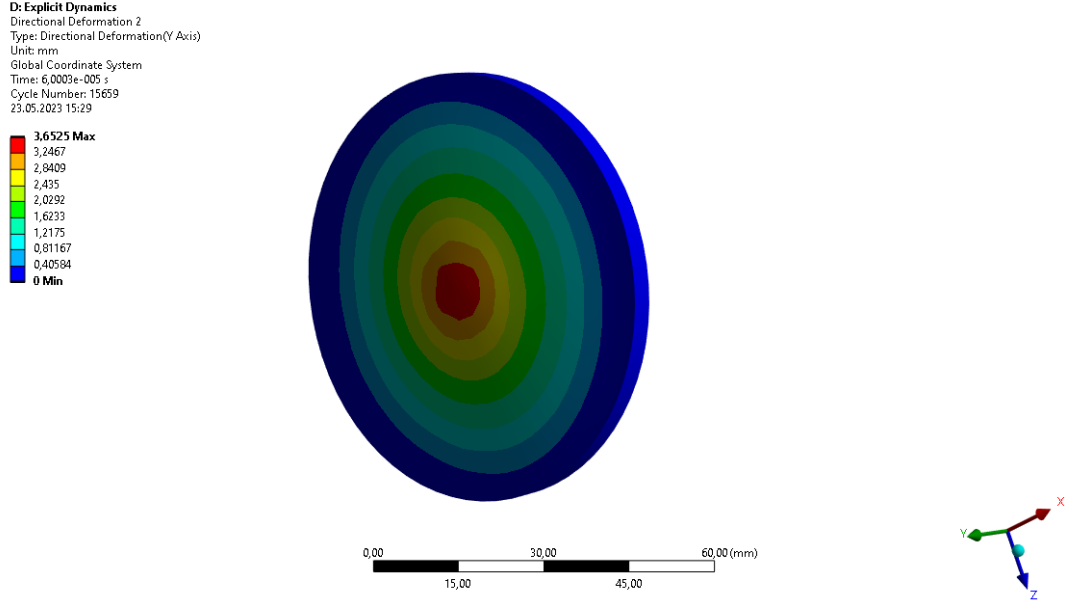
- **5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 için Durum 1 Sonuçları**



Şekil 4.32. 5 mm - 10 mm için Durum 1 Deformasyon Analizi

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere katmanlı kompozit yapıda en fazla 4,84 mm deformasyon oluşmuştur.

- 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 için Durum 2 Sonuçları



Şekil 4.33. 5 mm - 10 mm için Durum 2 Deformasyon Analizi

Şekil 4.33’da görüldüğü üzere katmanlı kompozit yapıda en fazla 3,65 mm deformasyon oluşmuştur.

Deformasyon analiz sonuçlarından anlaşılacağı üzere 5 analizdeki zırh setlerinden 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 kompozit durum 2 için zırhta meydana gelen maksimum deformasyon en az olmuştur. Bu durum zırhı kullanan kişi için daha emniyetli bir zırh oluşturulduğu anlamına gelmektedir. Sonuç olarak merminin durması önemli olmak ile birlikte bunu zırhta meydana gelecek en az deformasyonu sağlaması elzemdir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AL5083H116, SiC ve UD\_T700-3234 epoxy ile Corecell\_A550 kullanılarak elde edilen kompozit tabakalar ile modellenen zırhların 5.56x45mm NATO M193 tip mermilere karşı balistik davranışları ve güvenli minimum et kalınlıkları incelenmiştir. Yapılan çalışma ve elde edilen sonuçlar göstermiştir ki;

- Hız analizlerine bakıldığında yakın sonuçlar elde edilmiştir ve tüm zırh setleri mermiyi durdurarak balistik atış performansı olumlu sonuçlanmıştır.
- Gerilme analizlerine bakıldığında 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 katmanlı yapıda şişme daha azdır. Şişmenin fazla olması zırhın arka tarafa doğru zarar verir. Bu yüzden istenilen bir durum değildir. Bu durumda dolayı 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 katmanlı yapı tercih edilmelidir.
- 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116'de durum 1 ve durum 2 birbiri arasında kıyaslanırsa da durum 2'deki en yüksek gerilme daha az olduğu için tercih edilebilir.
- Merminin yönündeki deformasyonların sayısal verileri karşılaştırıldığında 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 daha düşüktür.
- 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 kendi arasında kıyaslama yapılır ise; durum 2 daha avantajlıdır.
- 2 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 ve 5 mm SiC- 5 mm Al5083-H116 arasında karşılaştırma yapıldığında gerilme analizi haricinde çok yakın sonuçlar elde edildiği için SiC katmanının zırh setinde etkisi olmadığı sonucuna ulaşıldı.
- Tüm analiz sonuçları karşılaştırıldığında en iyi katmanlı yapı 5 mm SiC- 10 mm Al5083-H116 durum 2'dir.

Bu çalışmanın sonrasında,

- Daha farklı kompozit malzemeler kullanılarak elde edilecek zırhların balistik performansı,
- Farklı tip zırh delici mermilere karşı tasarlanan zırhların performansı,
- Farklı çarpışma geometrisine sahip zırh tasarımlarının balistik performansları incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Sözen E., Gündüz G., İmren E. Balistik Panel ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif ve Kompozit Malzemeler. *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 2016, 18(2): 194-204.
- [2] Pul M., Baydaroğlu V., B4C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellenmesi, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 383-392, (2020).
- [3] Yumak N., Pekbey Y., Aslantaş K. Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 10, No: 4, 2013 (1-21)*.
- [4] Luz, F. S. D., Lima Junior, E. P., Louro, L. H. L., & Monteiro, S. N., 2015. Ballistic test of multilayered armor with intermediate epoxy composite reinforced with jute fabric. *Materials Research*. 18, 170-177.
- [5] Rashed, A., Yazdani, M., Babaluo, A. A., & Hajizadeh Parvin, P., 2016. Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers. *Journal of Composite Materials*, 50(25), 3561-3576.
- [6] Oliveira Braga, F., Milanezi, T. L., Monteiro, S. N., Louro, L. H. L., Gomes, A. V., Lima Jr, É. P., 2019. Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems. *Journal of materials research and technology*. 7(4), 541-549.
- [7] Pereira, A. C., de Assis, F. S., da Costa Garcia Filho, F., Oliveira, M. S., da Cruz Demosthenes, L. C., Lopera, H. A. C., Monteiro, S. N., 2019. Ballistic performance of multilayered armor with intermediate polyester composite reinforced with fique natural fabric and fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(5), 4221-4226.

- [8] Oliveira, M. S., da Costa Garcia Filho, F., Pereira, A. C., Nunes, L. F., da Luz, F. S., de Oliveira Braga, F., Monteiro, S. N., 2019. Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fique fabric composites using the Weibull analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(6), 5899-5908.
- [9] Reis, R. H. M., Nunes, L. F., da Luz, F. S., Candido, V. S., da Silva, A. C. R., Monteiro, S. N., 2021. Ballistic performance of guaruman fiber composites in multilayered armor system and as single target. *Polymers*. 13(8), 1203.
- [10] Krishnan, K., Sockalingam, S., Bansal, S., Rajan, S. D., "Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact", *Composites Part B*, 2010, 41: 583-593.
- [11] Sockalingam S., Chowdhury S.C., Gillespie J.W and Keefe M. (2017) Recent advances in modeling and experiments of Kevlar ballistic fibrils, fibers, yarns and flexible woven textile fabrics – a review. *Textile Research Journal*, 87(8), 984–1010. doi: 10.1177/0040517516646039
- [12] Braga F.O., Luz F.S., Monteiro S.N. and Lima E.P. (2018) Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 554-560. doi:10.1016/j.jmrt.2018.06.019
- [13] Silva M.V., Stainer D., Al-Qureshi H.A. and Hotza D. (2014) Ceramic armors for ballistic applications: a review, *Cerâmica* 60, 323-331. doi:10.1590/S0366-69132014000300003.
- [14] Pirvu, C. and Deleanu, L. (2018) Ballistic Testing of Armor Panels Based on Aramid. *IntechOpen Pub*.
- [15] Sabet A.R., Beheshty M.H. and Rahimi H. (2009) Experimental Study of Sharp-Tipped Projectile Perforation of GFRP Plates Containing Sand Filler Under High Velocity Impact and Quasi-Static Loadings, *Polymer Composites*, 30 (10), 1497-1509. doi: 10.1002/pc.20720.

[16] Işık, H., Değirmenci, E. ve Evcı, C. (2013) Örgülü Kumaşların Balistik Darbe Enerji Sönümleme Mekanizmalarının İncelenmesi, Savunma Bilimleri Dergisi,12 (2), 145-162.

[17] Bitlisli B. Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 2019, 89. (Yüksek Lisans Tezi)

[18] Xu, Y. J., Zhang, H., Huang, G. Y., 2022. Ballistic performance of B4C/STF/Twaron composite fabric. Composite Structures. 279, 114754.

[19] Saleem, I. A., Ahmed, P. S., Abed, M. S., 2021. Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact. Materials Today: Proceedings.

[20] Lu, Y., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, W., Long, R., 2020. High-velocity impact performance of aluminum and B4C/UHMW-PE composite plate for multi-wall shielding. Applied Sciences. 10(2), 721.

[21] Iqbal, M.A., Senthil, K., Sharma, P., & Gupta, N.K. (2016). An investigation of the constitutive behavior of ArmoX 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. International Journal of Impact Engineering, 96, 146– 164.

[22] Ayvaz M, Kural S. Numerical Simulation on Ballistic Performance of SiC/Light Metal Laminated Composite Armor against .30 APM2. Celal Bayar University Journal of Science, Yıl 2020, Cilt 16, Sayı 4, 409 - 418, 30.12.2020.

[23] Iqbal, M.A., Diwakar, A., Rajput, A., & Gupta, N.K. (2012). Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 62, 40–53.

[24] Pul M., Baydaroğlu V. B4C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi Ve Balistik Performanslarının Modellenmesi. Politeknik Dergisi, 23(2): 383-392, (2020).

[25] Yumak, N. Pekbey, Y. Aslantaş K., Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(4): 1-21, (2014).

[26] Shen, Z., Hu, D., Yang, G., Han, X., 2019. Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet. Composite Structures. 213, 209-219.

[27] Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S., Bhat, T.B., An experimental study on the ballistic behavior of some metallic armour materials against 7.62 mm deformable projectile, Materials and Design, 31: 3308-3316, (2010).

[28] JENA, P. K., “Ballistic Studies On Layered Structures”, Materials and Design, 2009, 30: 1922-1929.

[29] Mutu H. B., Özer A., Alümina, Grafen/Epoksi ve UHMWPE’ den Oluşan Çok Katmanlı Balistik Zırhın Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 2022, 11: 180-193.

[30] A.Kolopp, S. Rivallant, C.Bouvet, “ Experimental study of sandwich structures as armour against medium-velocity impacts” International Journal of Impact Engineering, vol.61, pp. 24-35, 2013.

[31] The finite element method: Its basis and fundamentals, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu\\_elemanlar\\_y%C3%B6ntemi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu_elemanlar_y%C3%B6ntemi) (erişim tarihi: 28.12.2022)

[32] Wayback Machine, <https://tr.wikipedia.org/wiki/ANSYS> (erişim tarihi: 28.12.2022).

[33] Gurit Corecell A, <https://pdf.directindustry.com/pdf/gurit/gurit-corecell-structural-core-material-v10/37817-184440.html> (erişim tarihi: 16.04.2023)

[34] Discover Composites, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit\\_Malzemeler](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit_Malzemeler) (erişim tarihi: 28.12.2022)

[35] Karbon Elyafı,  
[https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon\\_elyaf%C4%B1#:~:text=Karbon%20fiber%20ve%20karbon%20elyaf,ra%C4%9Fmen%203%20kat%20daha%20dayan%C4%B1kl%C4%B1d%C4%B1r.](https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon_elyaf%C4%B1#:~:text=Karbon%20fiber%20ve%20karbon%20elyaf,ra%C4%9Fmen%203%20kat%20daha%20dayan%C4%B1kl%C4%B1d%C4%B1r.) (erişim tarihi: 11.04.2023).

[36] Shukur A. Hassan, Carlo S., Mohd Y. B. Y., Chong L. G., Mohd N. F. B. A. B. The Potential of Biomimetics Design in the Development of Impact Resistant Material, ResearchGate, 46, 108-116 (2018).

[37] Guo, G., Alam, S., Peel, L. D., 2021. An investigation of the effect of a Kevlar-29 composite cover layer on the penetration behavior of a ceramic armor system against 7.62 mm APM2 projectiles. International Journal of Impact Engineering. 157, 104000.

[38] Feli, S., Asgari, M. R., 2011. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact. Composites Part B: Engineering. 42(4), 771-780.

[39] Oktavgil B. Farklı Şekilli Alümina Seramik Plakaların Balistik İncelenmesi. Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 2022,9. (Yüksek Lisans Tezi)

[40] 5.56×45mm NATO, [https://tr.wikipedia.org/wiki/5.56%C3%9745mm\\_NATO](https://tr.wikipedia.org/wiki/5.56%C3%9745mm_NATO) (erişim tarihi:16.04.2023)

[41] Feli, S., Asgari, M. R., 2011. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact. Composites Part B: Engineering. 42(4), 771-780.

[42] Übeyli M., Demir T., Hava araçları için seramik zırh uygulamaları., VI Havacılık sempozyumu (HASEM'06) bildirileri kitabı, 67-71, Kayseri, 2006.

[43] S. Dey, T. Borvik, O.S. Hopperstad, J.R. Leinum, M. Langseth, Int. J. of Impact Eng. 30, 1005-1038, 2004.

[44] T. Borvik, M. Langseth, O.S. Hopperstad, K.A. Malo, Int. J. of Impact Eng. 22, 855-886, 1999.

[45] Demir T., Metal Ve Katmanlı Zırh Malzemelerin 7,62 Mm'lik Zırh Delici Meriler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi. Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara,149. (Yüksek Lisans Tezi)

[46] Kaya, A.İ. (1995). Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 239. (Doktora tezi)

[47] Hahn, H. T., Tsai, S. W. (1980). Introduction to composite materials (Vol. 1): CRC Press.

[48] Seramik Malzeme Özellikleri, <https://slideplayer.biz.tr/slide/13209225/>. (erişim tarihi: 01 05 .2023)