

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATMANLI ZIRH SİSTEMLERİNİN BALİSTİK ETKİLERE
KARŞI DAVRANIŞININ SAYISAL MODELLENMESİ

EMRE ERDAL

ŞUBAT 2020

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Emre ERDAL tarafından hazırlanan KATMANLI ZIRH SİSTEMLERİNİN BALİSTİK ETKİLERE KARŞI DAVRANIŞININ SAYISAL MODELLENMESİ Adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ayşegül Ülkü METİN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin Yüksek Lisans Tezi olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Zühtü Onur PEHLİVANLI
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Recep ÇALIN _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hanifi ÇİNİCİ _____

Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Zühtü O. PEHLİVANLI _____

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

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

KATMANLI ZIRH SİSTEMLERİNİN BALİSTİK ETKİLERE KARŞI DAVRANIŞININ SAYISAL MODELLENMESİ

ERDAL, Emre

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zühtü Onur PEHLİVANLI

ŞUBAT 2020, 82 sayfa

Sunulan tez çalışması ile bir mermi tasarımının ana temellerinden birini oluşturan analiz çalışması yapılmıştır. Bu tasarımda (5,56Mm*45) NATO değerlerine sahip olan bir mermi SOLIDWORKS programında üç boyutlu olarak çizilmiş ve plakaya sabit hızlarda çarptırılmıştır. Mermi hızı, plaka ile mermi arasındaki mesafe ile plakanın boyutları sabit tutulmuştur. 910 m/s hıza sahip olan merminin plakaya olan mesafesi yaklaşık 0 mm olarak sabit tutulmuştur. Farklı kalınlıklardan ve malzemelerden oluşan üç tabakalı sandviç yapılarda da aynı işlemler yapılmıştır. Analizlerde 4340 Çelik, Ti6Al4V ve Epoksi Karbon malzemeleri kullanılmıştır. SOLIDWORKS programında çizimi yapılan üç boyutlu mermi, plaka ve sandviç yapı ANSYS programına aktarılmış ve analizler Explicit Dynamic bölümünde gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün bu analizler kendi içerisinde ve birbirleri arasında değerlendirilerek deformasyon incelenmiş ve benzeri tez çalışmaları ile de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda Ti6Al4V ve 4340 Çelik malzemesinin mermiye dayanımlı olması için gerekli olan minimum plaka kalınlıkları 24 mm ve 25 mm olarak tespit edilmiştir. Bu kalınlıklar yüksek olduğu için, kalınlığı inceltmek ve daha hafif bir yapı elde etmek amacıyla sandviç yapı analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde ise merminin plakadan geçmemesi için gerekli olan minimum plaka kalınlıkları 15 mm ve 17 mm olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermi, Kompozit, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Balistik, Zırh, Deformasyon

ABSTRACT

NUMERICAL MODELING OF LAYERED ARMOR SYSTEMS BEHAVIOR ON BALLISTIC EFFECTS

ERDAL, Emre

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defence Technologies, Master Science Thesis

Supervisor: Asistant Prof. Dr. Zühtü Onur PEHLİVANLI

February 2020, 82 pages

Within the presented thesis study, an analysis study, which is one of the main foundations of a bullet design, has been made. A projectile with (5,56Mm*45) NATO values in this design was drawn in three dimensions in the SOLIDWORKS software and crashed to the plate at constant speeds. Bullet speed, distance between the plate and the bullet and the diemnsions values of the plate were kept constant. The distance of the bullet, which has a speed of 910 m/s, to the plate was kept approximately 0 mm. The same operations were done in three layer sandwich structures consisting of different thicknesses and materials. Steel 4340, Ti6%Al4%V and Epoxy Carbon materials were used in the analysis. Three-dimensional bullet, plate and sandwich structure designed in the SOLIDWORKS were transferred to ANSYS and the analyzes were carried out in the Explicit Dynamic section. All these analyzes were evaluated among themselves and deformation was examined and compared with similar thesis studies. In the results obtained, the minimum plate thickness required for the Ti6Al4V and 4340 Steel material to be bullet resistant is determined as 24 mm and 25 mm. Since these thicknesses are high, sandwich structure analyzes were carried out to thin the thickness and obtain a lighter structure. In these analyzes, the minimum plate thicknesses required to prevent the projectile from passing through the plate were determined to be 15 mm and 17 mm.

Key words: Bullet, Composite, Finite Element Method, Ballistic, Armor, Deformation

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca bilimsel ve akademik konularda tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zühtü Onur PEHLİVANLI ve Prof. Dr. Recep ALIN hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca hiçbir desteğini esirgmeden her zaman yanımda olduklarını hissettiren değerli aileme ve sevgili eőim Duygu ERDAL'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR.....	xi
1.GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	2
3.KOMPOZİT MALZEMELER	12
3.1.Kompozit Malzemelerin Tanımı	12
3.2.Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	13
3.3.Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	15
3.4.Kompozit Malzemelerin Türleri ve Özellikleri.....	15
3.4.1.Matris Elemanlarına Göre Kompozitler	16
3.4.2.Takviye Şekillerine Göre Kompozitler	17
3.4.3.Doğal Kompozitler	19
3.4.4.Cam Elyaf.....	20
3.4.5.Reçineler (Matris Malzemeler)	21
3.4.5.1.Reçinelerin Yapışma Özellikleri	23
3.4.5.2.Reçinelerin Tokluk Özellikleri.....	23
3.4.5.3.Reçinelerin Çevresel Özellikleri	24
4.BALİSTİK	25
4.1.İç Balistik	25
4.2.Dış Balistik.....	26
4.3.Terminal Balistik.....	27
4.4.Hasar Mekanizmaları	28
4.5.Zırh Mermileri.....	29

4.5.1.Zırh Malzemelerinin Tasarımı	31
4.5.2.Zırh Çeşitleri	32
4.5.3.Zırhlarda Plastik Performans.....	32
4.5.3.1.Sıvı Zırh	33
4.5.3.2.Tank ve Hava Taşıtları İçin Zırhlar	33
4.5.3.3.Askeri Taşıma Araçlarındaki Termoplastikler.....	33
4.5.3.4.Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Yapılar.....	34
4.6.Mermi	34
4.6.1.Merminin Özellikleri ve Yapısı	34
4.6.2.Mermi Ağırlığı	35
4.6.3.Mermi İç Geometrisi	35
4.6.4.Mermi Çekirdek Sertliği	36
4.6.5.Mermi Hızı	36
4.6.6.Mermi Vuruş Açısı.....	37
4.6.6.1.Merminin Hasara Uğrama Aşaması (İlk Aşama).....	37
4.6.6.2.Mermi Enerjisinin Absorbe Edilme Aşaması (İkinci Aşama) ..	37
4.6.7.Mermi Hız Geometrisi ve Hareketine Etki Eden Faktörler.....	38
4.6.7.1.Yerçekimli ve Havasız Ortamda (Boşlukta) Mermi Hareketi	38
4.6.7.2.Boşlukta ve Yerçekiminde Mermi Hareketi.....	39
4.6.7.3.Yerçekimi ve Hava Direncinde Mermi Yörüngesi	39
4.6.8.Hava Direnci	40
4.6.8.1.Mermi Burun Direnci	41
4.6.8.2.Mermi Taban Direnci	42
4.6.8.3.Gövde (yüzey) Sürtünmesi.....	43
4.6.8.4.Fazlalık Direnci	43
4.7.Deformasyon.....	44
4.8.Sonlu Elemanlar Yöntemi	45
4.8.1.Sonlu Elemanlar Metodunda Dikkat Gerektiren Hususlar.....	48

5.MATERYAL VE METOT	49
5.1.Teknik Bilgiler	51
5.1.1.Ağırlık	51
5.1.2.Görüş	51
5.1.3.Ateşleme Karakteristiği	52
5.2.Normal Malzeme ve Teknik Özellikleri (5,56Mm*45)	52
6.SONUÇLAR VE TARTIŞMA	55
6.1.Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizler.....	55
6.1.1.Deneme 1	55
6.1.2.Deneme 2	56
6.1.3.Deneme 3	57
6.1.4.Deneme 4	58
6.1.5.Deneme 5	59
6.1.6.Deneme 6	60
6.1.7.Deneme 7	61
6.1.8.Deneme 8	62
6.1.9.Deneme 9	63
6.1.10.Deneme 10	64
6.2.Sandviç Yapı Denemeleri.....	66
6.2.1.Sandviç Yapı Deneme 1	66
6.2.2.Sandviç Yapı Deneme 2	68
6.2.3.Sandviç Yapı Deneme 3	70
6.2.4.Sandviç Yapı Deneme 4	72
6.2.5.Sandviç Yapı Deneme 5	74
7.DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki özellikleri.....	18
Şekil 3.2 Tabakalarda yönlendirme şekilleri.....	18
Şekil 3.3 Nasa tarafından imal edilen bir honeycomb kompoziti	19
Şekil 4.1 Kompozit plakada farklı geometri mermilerin oluşturduğu deformasyon	36
Şekil 4.2 Newton'un Birinci Kanununa Göre Hareket	38
Şekil 4.3 Boşlukta Fakat Yerçekimi Etkisindeki Mermi Yolu.....	39
Şekil 4.4 Yerçekimi Ve Hava Direnci Etki Ederken Gerçek Mermi Yolu Yörüngesi	40
Şekil 4.5 Hıza Göre C_d Katsayısı Değerinin Değişimi.....	40
Şekil 4.6 Ses Hızı Altı (Solda) ve Ses Hızı Üstü Bölgede (Sağda) Hava Sıkışması Sonucu Oluşan Basınç Dalgalarının Hareket Tarzları	42
Şekil 4.7 Sivri ve Küt Burunlu Mermilerde Şok Dalgası.....	42
Şekil 4.8 Mermi Taban Direnci.....	43
Şekil 4.9 Mermi Hız Düzeyine Göre Hava Direnç Çeşitlerinin Değerlendirilmesi...	44
Şekil 5.1 Analizlerde kullanılan ve çizimi yapılan mermi ölçülendirmesi	50
Şekil 5.2 Solidworks programında ölçülendirilmiş mermi çizimi	53
Şekil 5.3 Solidworks programında çizilmiş merminin görseli.....	54
Şekil 5.4 Merminin kovandan çıktıktan sonra hedefe temas eden çekirdek görseli ..	54
Şekil 5.5 Analizlerde kullanılan mermi ve plakamın şekilsel görseli.....	54
Şekil 6.1 3 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	55
Şekil 6.2 3 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	55
Şekil 6.3 10 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	56
Şekil 6.4 10 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	56
Şekil 6.5 20 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	57
Şekil 6.6 20 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	57

Şekil 6.7 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	58
Şekil 6.8 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	58
Şekil 6.9 10 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	59
Şekil 6.10 10 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	59
Şekil 6.11 20 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	60
Şekil 6.12 20 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	60
Şekil 6.13 3 mm kalınlığındaki Epoksi Karbon malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	61
Şekil 6.14 3 mm kalınlığındaki Epoksi Karbon malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	61
Şekil 6.15 1 mm kalınlığındaki Epoksi Karbon malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü	62
Şekil 6.16 4340 çelik malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atış sonucu yan görünümü	63
Şekil 6.17 4340 çelik malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü.....	63
Şekil 6.18 Ti6Al4V malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atışın yan görünümü .	64
.....	64
Şekil 6.19 Ti6Al4V malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atışın yan görünümü .	64
.....	64
Şekil 6.20 3 farklı katmandan oluşan sandviç yapının görünümü	65
Şekil 6.21 Merkezi Ti6Al4V ve 2 mm olan, toplam 6 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü.....	66
Şekil 6.22 Merkezi Ti6Al4V ve 2 mm olan, toplam 6 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif görünüşü.....	66
Şekil 6.23 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunum grafiği.....	67
Şekil 6.24 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği.....	67

Şekil 6.25 Merkezi Ti6Al4V ve 3 mm olan, toplam 9 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü.....	68
Şekil 6.26 Merkezi Ti6Al4V ve 3 mm olan, toplam 9 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif görünüşü.....	68
Şekil 6.27 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunum grafiği.....	69
Şekil 6.28 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği.....	69
Şekil 6.29 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 15 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü.....	70
Şekil 6.30 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 10 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif ve yakın görünüşü.....	70
Şekil 6.31 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunum grafiği.....	71
Şekil 6.32 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği.....	71
Şekil 6.33 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü.....	72
Şekil 6.34 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif ve yakın görünüşü.....	72
Şekil 6.35 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunum grafiği.....	73
Şekil 6.36 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği.....	73
Şekil 6.37 Merkezi 4340 çelik ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü.....	74
Şekil 6.38 Merkezi 4340 çelik ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif görünüşü.....	74
Şekil 6.39 4340 çelik alaşımlı sandviç yapının enerji korunum grafiği.....	75
Şekil 6.40 4340 çelik sandviç yapının enerji özet grafiği.....	75

SİMGELER DİZİNİ

°C	Derece
m	Kütle (kg)
V	Hız (m/s)
E	Kinetik enerji (Joule)
cm	Santimetre
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
Hz	Hertz
kNm	Kilonewton Metre
µm	Mikrometre



KISALTMALAR

Ti6Al4V	Titanyum 6 Alüminyum 4 Vanadyum
4340 Çeliği	İslah Çeliği
Ti-5553	Dökme Titanyum Alaşımı
SiC	Silisyum Karbür
TiC	Titanyum Karbür
TiB	Titanyum Bor
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
B ₄ C	Bor Karbür
Al	Alüminyum
C _d	Direnç Katsayısı

1. GİRİŞ

Günümüz sanayi ve teknolojilerinde her ülke kendi sınırlarını ve menfaatlerini korumak ve istikrarının devamı için çeşitli araştırmalara yönelmiştir. Bu araştırma ve yeniliklerin en temeli ülkelerin öncelikli olarak dışarıdan gelecek etkilere ve saldırılara karşı kendi mevcudiyetini korumak ve sürdürmektir. Maddi kaynak ve araştırmaları neticesinde öncelik olarak askeri yani savunma sanayi anlamında gelişmeler takip edilmiş, geliştirme çabası içerisine girilmiş ve büyük miktarda paralar harcanmıştır.

Bu tez çalışmasında özellikle savunma alanında oldukça sık bir şekilde kullanılan koruyucu(zırh) malzemelerin farklı değişkenler ve parametreler altında nasıl tepkiler verdiğini görmek amaçlanmıştır. Bunun için farklı özelliklere sahip olan çeşitli kompozit malzemelerin farklı etkiler altında gösterdiği tepkiler üzerine yorumlar yapılmak esas amaç olarak belirlenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda elde edilen veriler ve değerler, bireysel kullanımların yanı sıra özellikle savunma sanayi alanında kullanılan birçok ürünün imalatı ve kullanımı açısından fikir sahibi olunmasına yardımcı olacaktır. Bu tez çalışmasının ana amacı farklı malzemeler ile farklı değişkenleri kıyaslayarak özellikle savunma sanayinde kullanılan, savunma ve zırh malzemelerine alternatifler oluşturmak ve sayısal olarak incelemektir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Yapıcı tarafından yapılan ‘Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi’ başlıklı yüksek lisans çalışmasında, çeşitli hızlara sahip olan ve çapı 0.024 m, ağırlığı 17 kg, elastisite modülü 210 GPa, Poisson oranı 0.29’ olan vurucu, kompozit plakanın üzerine düşürülmüş, belirli bir hızla temas ettirilmiş. Hava direncinin yok kabul edildiği (ihmal edildiği) bu çalışmada vurucunun kompozit plakaya olan çarpma hızları 2,0 m/s, 2,5 m/s, 3 m/s, 3,5 m/s, 4,0 m/s olacak şekildeki başlangıç hızları ile temas halinde iken plaka üzerine doğru hareket ettirilmiş. Plaka 16 tabakalı, katmanlı olup ve oryantasyon açıları değiştirilerek farklılık yaratılmış. Deneysel sonuçlar incelendiğinde artan darbe hızıyla birlikte aynı anda kompozit malzeme üzerinde oluşan hasar miktarı da artmış ve vurucu olarak kullanılan merminin geri sekme hızı azalmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde uygulanan darbe hızlarında kuvvet eğrisinin parabolik olarak devamlı bir şekilde arttığı ve maksimum bir değere ulaştıktan sonra ise yine parabolik olarak devamlı bir şekilde azaldığı görülmüştür. Darbe hızının artması en büyük temas kuvvetinin de artmasına sebep olmuştur. Yer değiştirme-zaman değişimi incelendiğinde, sonlu elemanlar yönteminde uygulanan darbe hızlarında yer değiştirme eğrisinin parabolik bir görünüm yarattığı ve artan darbe hızıyla birlikte maksimum çökme miktarının da aynı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında ve sonlu elemanlar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ise durumun bu şekilde olmadığı ve 4 m/s darbe hızında artan hasarlanmadan kaynaklı, çökme miktarının azaldığı görülmüş. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlardan farklı çıkmasının sebebi olarak, kompozit malzemedeki darbe esnasında kalıcı hasar oluşumu ve buna bağlı olarak matris çatlaması, elyaf kopması ve tabaka ayrılması gösterilebileceği düşünülmüştür[1].

Aydın ve Acar tarafından yapılan ‘Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi’ başlıklı çalışmada, fonksiyonel olarak kademelendirilmiş olan plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin hacim olarak değişim sürecinin, balistik performans üzerindeki etkisi sayısal yöntemler olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, kalınlığı değişik yani farklı katman sayılarına (5, 10, 15 ve 20 katman) sahip olan

Al/SiC fonksiyonel bir şekilde kademelendirilmiş olan plakaların balistik çarpma yükü altındaki davranışları, LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla analiz edilmiş, değerlendirilmiştir. 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi 500m/s ve 750m/s gibi değişken hızlarla plakaya çarpıtılmış. Yapılan bu tezdeki analiz sonuçları göstermiş ki, kademelendirilmiş olan bölge boyunca katman sayısının artması mermi penetrasyon derinliği üzerinde oldukça dikkat çekici bir rol oynamamıştır. Üstelik katman sayısının artması ile birlikte mermi penetrasyonu ve plaka arka yüzeylerinde oluşmuş olan şişme miktarları ihmal edilebilir bir oranda azalmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada, fonksiyonel olarak kademelendirilmiş olan bu malzemeler için belirli bir pozisyonda değişen malzeme kompozisyonunun kademeli ya da sürekli olarak değişmesinin, her ne kadar termal yüklemeler bakımından önemli de olsa, balistik performans bakımından önemli olmadığını oldukça net bir şekilde belirlenmiştir. Bu sonuç fonksiyonel olarak kademelendirilmiş olan plakaların daha fazla katman sayısı ile üretilmesinin plaka dayanımına ilave herhangi bir katkı sağlamayacağı biçiminde yorumlanmıştır [2].

Onga tarafından, zırh sisteminin bünyesinde bulunan tabaka dizilişlerinin önemini incelemiştir. Birinci tabaka olarak oldukça sert katı bir tabaka, ikinci olarak olabilecek şok dalgasını yavaşlatmak adına ortotropik tabaka yerleştirmiştir. Şok dalgasının etkisini göstereceği ve kendisinde var olan enerjisini azaltmak için gözeneğe sahip üçüncü bir tabaka ve dördüncü olarak da gözenekli tabakaya destek oluşturması amacıyla başka bir tabaka tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarımı yapılan bu dört tabaka üzerine yapılan çalışma sonrası, katmanlar halinde meydana getirilen kompozit zırh, aynı derecedeki yoğunluğa sahip olan çeliğe göre oldukça üstün bir absorbe etme davranışı sergilemiştir [3].

Özer tarafından yapılan ‘Balistik Çarpma Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi’ başlıklı tez çalışmasında, balistik çarpma sonucunda oluşan etki sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Çalışmada yüksek hızlı darbeye maruz kalan malzemeler ve yapıları mevcuttur. Bu yapılar Titanyum, Çelik 4340 ve Titanyum Alaşımı (Ti6Al4V) ile yapılan farklı kalınlıklara sahip levhalara (plakalara), değişen vurucu geometrisi ile birlikte etkiye karşı dinamik tepkisi ölçülmüş. Vurucu malzeme olarak 4340 çelik malzemesinden yapılmış yarı küresel, yarı sivri ve sivri uç balistik materyalleri kullanılmış. 200 x 200 mm boyutlarındaki levhalar mermi çarpma

etkisine maruz bırakılmış ve bu etkiye maruz kalan plakaların kalınlıkları 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 mm olarak farklı kalınlıklarda seçilmiştir. Yapılan bütün bu analizler sabit olarak 350 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Analizler ANSYS/Workbench programına ait olan Autodyn modülünde, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla yapılmış. Plakalara temas ettirilecek cisim atışının yapıldığı farklı uç özelliklerindeki vurucular 350 m/s sabit hızla plakaya çarptırılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmada, sivri, yarı sivri ve yarı küresel vurucu değişkenlerinin, kalınlığı 1 ile 7 mm arasında değişen titanyum, titanyum alaşımı (Ti6Al4V) ve 4340 çelik levhalar üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Yapılan analiz ve çalışma sonuçlarına göre, 1 mm malzeme kalınlığında, bütün vurucu tiplerinde malzemelerde delinme gözlemlenmiştir. Sivri uç geometrisine sahip vurucu tipinde ise, tüm malzemelerde 2 mm kalınlık için de delinme gerçekleşmiştir. Bütün geometrik uca sahip olan vurucu tiplerinde en fazla sehim değeri titanyum alaşımı (Ti6Al4V) malzemesinde olmuş, en düşük sehim değerleri ise 4340 çelik malzemesi için elde edilmiş ve gözlenmiş, yani sönmülenen enerji değerinin en çok olduğu malzeme ise 4340 çelikte görülmüş. Titanyum ve titanyum alaşımı ise malzeme kalınlığı arttıkça buna benzer davranışlarda özellikler sergilemiştir. Malzeme kalınlığı 6 mm ve üzerinde dikkate alındığında, tüm malzemelerin birbirine yakın olan davranışlara sahip olduğu dikkat çekmiştir. Yapılan tüm bu analiz sonuçlarında sehim değerleri ve sönmülenen enerji miktarları değerlendirildiğinde, kalınlığın artmasıyla oluşan sehim değerlerinde düşüş olurken, malzemenin kendisinin sönmülediği enerji miktarında ise artış görülmüştür. Malzemenin kendisi tarafından sönmülenen enerjinin bir bölümü darbe yönünde deformasyona sebep olurken diğer bir bölümü de plaka yüzeyinde dalga oluşmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, tez çalışması kapsamında farklı uç geometrisine sahip olan vurucu tiplerine göre malzemenin davranışında da değişimler gözlemlenmiştir. Kullanılan farklı malzeme türlerinde kalınlık arttıkça mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu nedenle yapılacak olan zırh ve koruma materyallerin malzeme kalınlıklarının artmasıyla birlikte mukavemet değerlerinde de artış olacağı şüphesizdir. Fakat zırh malzemeleri üretiminde önemli bir tercih mukavemet olduğu kadar diğer bir tercih de hafifliktir. Kalınlık artışının yanı sıra kullanılan malzemenin ağırlığında da artış olacaktır. Artan malzeme kalınlığı haricinde zırh malzemelerinde maliyet de aynı şekilde yükselecektir. Bundan dolayı, imal edilecek olan zırh imalatında ve tasarımında, vurucu tipine göre kullanım alanlarının saptanması, kullanılacak olan zırh malzemesinin sahip olduğu

mukavemet değerinin yüksek olması fayda sağlayacaktır. Ayrıca imal edilirken kullanılacak olan malzemenin hafif ve maliyetinin de düşük olması tercih sebebi olacaktır [4].

Jena, alaşımlı numune ve elik zırh numune üzerinde deforme olabilen merminin etki ettiği balistik davranışlarını incelemişlerdir. Yüksek dayanıma sahip olan zırh çeliği ve alüminyum ısıl işlemden geçirilerek farklı mekanik özelliklerin balistik davranışları incelenmiştir. Daha sonra yapılan gözlem ve deneylerde farklı ısıl işleme maruz kalan aynı yapı malzemeleri aynı mermi tepkisine karşı farklı davranışlar göstermiştir. Alaşımlı numune ve zırh çeliği ısıl işleme maruz kaldıkları zaman davranışları üzerindeki değişkenlikler olduğu tespit edilmiştir [5].

Baş tarafından yapılan ‘Tetik Mekanizmasına Gelen Dinamik Kuvvetlerin Sonlu Elemanlar Metoduyla İncelenmesi’ başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında, Sonlu Elemanlar programı(ABAQUS) kullanılarak silah ve silahın içindeki sistematik mekanizmanın tasarımı ve modellenmesi yapılmış, başlangıç ve sınır Şartları uygulanarak bu modelin analiz ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Tampon modeli CATIA tasarım programı kullanılarak elde edilmiş yani modellenmiştir. CATIA tasarım programı kullanılarak elde edilen bu modele daha sonra çapı 3,6 mm olan, 108 adet elik bilye yine CATIA tasarım ortamında modellenip tampon modeli içerisine düzenli bir Şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra analiz yapmak için ABAQUS ortamına aktarılmış. ABAQUS ortamında bilyelerin malzemeye atanması istenen özeliği tanımlayıp tamamı mesh yapılmıştır. Malzeme zeliği olarak elik tozu belirlenmiştir. elik tozunun, elastisite modülünü, poisson oranını, yoğunluğunu ve yerçekimi ivmesini tanımlamıştır. elik bilyelerin tamamı rijit olarak tanımlanmış ve her bir bilye sabit olarak bir noktaya sabitlenmiştir. ABAQUS ortamında modellerken, birbirinden farklı olan iki nokta tanımlanmış ve bu iki nokta arasındaki uzunluk 190 mm olarak belirlenmiştir. Başlangıç noktasından 190 mm uzaklıktaki ikinci noktaya yay sabiti 0,325 N/mm girilen yay ile noktasal bağlantı sağlanmıştır. Bu çalışmada, otomatik silah ve içindeki mekanizmanın tasarımı CATIA programı kullanılarak yapılmıştır. Tasarım esnasında kullanılan boyutlar HK-417 ve M16 (SR-25 versiyonu) piyade tüfekleri ile yakın özellikleri taşımaktadır. Sonra bu model kullanılarak mekanizma gövdesinin çalışması sırasındaki dinamik analizi ABAQUS adlı sonlu elemanlar programı kullanılarak, başlangıç ve sınır Şartları uygulanarak

yapılmış. Yapılan tüm bu analiz sonuçlarında göre mekanizma başının hareket etmekte olan mekanizma gövdesine dahil olmasıyla beraber mekanizma gövdesinin hızında hızlı bir şekilde düşüş olmaktadır. Hızdaki bu düşüş ivmenin de ani olarak değişmesine neden olmaktadır. Mekanizma gövdesinin hemen hareketinden sonra yerine getirme görevi gören yayın sıkışmasıyla 1350 J değerinde bir potansiyel enerji depolanmaktadır. Mekanizma gövdesi hareket ediyor iken sürtünme, tampon ve yerine getirme işlevi gören yay tarafından gelen sönümleyici kuvvetlerden kaynaklanan yaklaşık 5000 J değerinde bir enerji kaybı olmuştur. Birbirleriyle temas eden ve hareket halinde olan parçaların boyutlarının ve boşluk toleranslarının, mekanizmanın genel olarak çalışması üzerindeki etkileri oldukça fazla olup ve üzerinde çalışılmaya ve araştırma yapılmaya devam edilmesi gereken konulardan birisidir. Piston kuvveti yardımıyla hareket enerjisi kazanan mekanizma ve tampon dipçiğe bağlı yerine getiren yayı geri sıkıştırarak yayın potansiyel bir enerji ile depolamasını sağlar. Maksimum sıkışma olduktan daha sonra bu enerjinin açığa çıkması neticesinde mekanizma gövdesi namluya doğru belirli hızla hareket ettiği sonuçlarına ulaşılmıştır [6].

Erdöl tarafından yapılan ‘Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Portal Vinç Tasarımı, Analizi ve Kutu Kiriş En İyilemesi’ başlıklı tez çalışmasında, portal vinç çelik yapı ağırlıklarının hemen hemen %50’sine tekabül eden kutu kiriş sistemlerinin sonlu elemanlar statik analizi ve ağırlık en iyileştirmesi incelenmiştir. Kutu kiriş sistemi için matematiksel hesaplama esasları FEM ve DIN normlarına göre değerlendirilmiş ve uygulanmıştır. Portal vinç konstrüksiyonu katı modeli Autodesk Inventor 10 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Portal vincin, belirlenen yüklemeler ve sınır şartlarında ANSYS Workbench sonlu elemanlar yönteminde lineer statik sonlu elemanlar analizleri uygulanmıştır. ANSYS programı kullanılarak, kirisin bütün yapı sistemleriyle beraber sonlu elemanlar sistemini oluşturmuştur. Kirişin ağırlığını düşürmek amacıyla izin verilen gerilme ve deformasyon değerlerini geçmeden ağırlık geliştirilmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda kiriş ağırlığı %13,2 indirgenmiştir [7].

Demir tarafından yapılan ‘Bir Gemi Yapısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi’ başlıklı tez çalışmasında, SolidWorks programı kullanılarak tasarlanan bir gemide CAD modelin oluşturulması adımı esnasında olduğu gibi sonlu elemanlara ayırma

işlemi sırasında da her bir alt montaj kendi içerisinde değerlendirilmiş, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla frekans analizi yapılmış ve analizler, doğal frekansları sırasıyla 2,3851 Hz, 3,2811 Hz, 4,7286 Hz, 5,0058 Hz, 5,0808 Hz, 5,0929 Hz, 5,4641 Hz, 6,2439 Hz, 7,0444 Hz, 7,2686 Hz değerlerinde çözümlenmiş. Çözümleme yapılan geminin özellikleri, Elastik Modülü (E) 210000 Pa, Poisson Oranı (ν) 0,3 olarak belirlenmiş. Analiz sonucunda yapılan değerlendirmelerde küresel olarak geminin tamamı üzerinde en fazla olan gerilme değeri 112 MPa civarında gözlenmiştir. Bu değer malzemenin akma gerilmesi değerinin oldukça fazla altında olarak değerlendirilmiştir. Meydana gelen maksimum gerilme değeri, malzememizin akma gerilmesi limitinin altında çıktığından dolayı yapı emniyetlidir sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen gerilme değerleri yaklaşık olarak 15 MPa ile 20 MPa arasında değişmekte. Geminin arka yani kıç yapısı da gerilme bakımından yeterli miktarda emniyetlidir sonucuna ulaşılmıştır [8].

Kundi tarafından yapılan ‘Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Dişli Kırılma ve Analizi’ başlıklı tez çalışmasında, bir dişlinin dibinde meydana getirilen çatlakların ilerlemesi ve bu esnadaki gerilme şiddet etkisinin değişik şekillerdeki geometrilere göre ve ilk baştaki çatlak açısına göre değişimi incelenmiş ve çatlak ilerleyişi gözlemlenmiştir. Gerilme şiddet faktörü kullanımı esnasında ANSYS programı içerisinde bulunan kırılma mekaniği modülü içerisinde, oluşan her çatlak adımı için kullanılan gerilme şiddet faktörü hesaplanmıştır. Sürekli yapılmış olan bu analizler yardımıyla çatlakların doğrultusu yani ilerleme yörüngesi incelenmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar yönteminde ulaşılan değerler gerilme şiddeti belirlemede kullanılan formüller ile kıyaslanmış, en fazla %3 düzeyinde değişkenlik görülmüştür. Bu sonuç da araştırmayı yapan kişiler tarafından teori ile elde edilen sonucun örtüştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Gerilme şiddet etkenleri 0, 45 ve 90 derece olarak üç farklı başlangıç çatlak açısına değerlendirilmiştir. Çatlak açısı arttıkça çatlak dibine gelen kayma ile kesme kuvvetlerinin büyüdüğü ve bundan kaynaklı olarak gerilme şiddet etkisinin de aynı oranda arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak simetrik olan diş profiline sahip dişlilerin asimetrik olan diş profiline sahip olan dişlilere nazaran eşit yüke maruz kaldıklarında diş dibi gerilmelerinin daha fazla olduğunu ve bu yük altında dişin zarar görmesine hatta kırılmasına daha meyilli olduğu tespit edilmiştir. Kısacası diş boyları üzerinde değişiklik yapmadan diş profilini asimetrik tercih etmek dişlilerinde daha fazla gerilmeler altında kullanılacağı tespit edilmiş [9].

Altunay tarafından yapılan ‘Uçak Elektronik Sistemi Soğutma Pompasının Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Mekanik Tasarımı’ başlıklı tez çalışmasında, havacılık ve elektronik gibi birçok alanda soğutma amaç için kullanılan bir pompanın tasarım ile analiz adımları belirtilmiştir. Pompanın teknik ihtiyaçları, çalışma etkenleri ve bazı teknik gereksinimler dikkate alınarak yapılmış ve bu ihtiyaçları karşılayacak biçimde pompanın tasarımı gerçekleştirilerek ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ihtiyaç duyulan yapısal analizler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi olarak belirtilen program olarak da ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Yapısal analiz modelinde gövde, alt ve üst kapaklar, motor, kama ve pompa bileşkesinden oluşmuştur. Çalışmada öncelikli olarak parçalar arasındaki gerilim seviyesi değişimleri incelenmiş, montaj ilişkileri elde edilen analitik hesaplarla kıyaslanmıştır. Analitik olarak elde edilen gerilim değerleri, statik analiz değerleri ile kıyaslandığında makul ve kabul edilebilir olarak görülmüştür. Yine aynı başlık altında yapılan başka bir çalışmada ‘Rijit Gövde Dinamiği’ analizi yapılarak parçaların dinamik davranışları takip edilmiştir. Bu sırada sisteme en fazla tork değeri verildiği anda elde edeceği ivme, motora uygulanmış ve iç dış dişli arasındaki hız iletim ilişkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar kısa zaman periyotlarına ait anlık hız değerleri olduğu için diş kontakları sırasında ve daha sonraki diş geçerken boşta olduğu zaman aralığında farklılık göstermiştir. Tüm bu değerler elde edilip kıyaslandığında ise hız artış miktarının beklenen değerlerde olduğu tespit edilmiş [10].

Özkütük tarafından yapılan ‘Ti-5553 Alaşımın Talaşlı İmalat Sürecinin ve Yüzey Bütünlüğünün Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi’ başlıklı tez çalışmasında, yeni nesil β esaslı Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalat adımlarının deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Farklı değerlerde belirlenen kesme hızları ve farklı talaş açısına sahip takım tutucular ile deneyler dik kesme kuralında gözlemlenmiş, gerçekleştirilmiştir. Soğutucu olarak sıvı azot ile kesme işlemi gerçekleştirilerek elde edilen değerler kuru kesme sonuçları ile kıyaslanmıştır. Talaş açısının artı yönde artmasıyla birlikte tüm şartlarda önemli deformasyon ve yok olmuş tane sınırı olan katmanlar görülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla değişkenlik gösteren kesme hızları, talaş açısının değişken olması ve kesmenin meydana geldiği şartlar için öngörülen sıcaklık, kesme

kuvvetleri gibi sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve oluşan yüzdesel farklılıkların makul seviyede olduğu sonucuna ulaşılmış [11].

Duman tarafından yapılan tez çalışmasında, SOLIDWORKS tarafından modellenmesi yapılan, analizin sonlu elemanlar yöntemi ANSYS kullanılarak yapıldığı dişlilerde statik gerilme analizi yapıp maruz kaldığı gerilmeler ve meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir. Uygulanan analizlerden, helis açısı, modül değeri ve diş sayısının dişliler üzerinde aynı burulma momenti altında oluşan gerilme değerlerini ve deformasyonlarını ihmal edilemeyecek şekilde etkilediği tespit edilmiş. Ulaşılan değerler kıyaslandığında helis açısının 10 dereceden 15 dereceye kadar 1kNm'lik burulma momentine maruz kaldığında gerilme değerlerinin arttığı ve 15 derecede de en fazla değere ulaştığı görülmüştür. 15 dereceden sonra 20 dereceye kadar gerilme değerinin azalıp 21 derecede minimum yani en küçük değere ulaştığı tespit edilmiştir. Genel olarak dişliler helis açısına göre değerlendirildiğinde 20-25 derece, 25-30 derece aralığındaki açıların kullanıma en uygun ve elverişli değerler olduğu sonucuna varılmıştır [12].

Sanlı tarafından yapılan 'Darbe Tesiri Altındaki Kompozit Levhanın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simülasyonu' başlıklı tez çalışmasında, çelik ve alüminyum yapılarındaki malzemelerin kullanılarak plakalar imal edilmiştir. Ve birden fazla katmandan oluşan hedefe sabit bir hızla atılan merminin plakalarda oluşturduğu etki incelenmiş ve çelik ile alüminyum plakaların diziliş sıraları değiştirilerek gösterdiği performans bakımından sistem yapıları yorumlanmış. Analiz sonlu elemanlar yöntemi olan ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiş. Çarpışma esnasında meydana gelen en büyük enerjiler değerlendirilmiş, merminin çelik plakaya temas ettiği anda ise alüminyum plakaya temas ettiği anda oluşan iç enerjiler bazında daha da az bir miktarda iç enerji oluşumuna sebep olmaktadır. Yani alüminyum, merminin plakaya temas ettiği anda merminin sahip olduğu iç enerjiyi absorbe etmektedir. Ayrıca alüminyum plakada daha az iç enerji oluşmaktadır [13].

Öztorun tarafından yapılan 'Bir Ağır Silah Namlusunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elastik-Plastik Gerilme Analizi' başlıklı tez çalışmasında, bir namlunun, içindeki merminin ateş alması sonucunda güvenli bir ateşlemenin yapıp yapılmadığını saptamak amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bu namlu üzerine etki

eden bütün yüklerin meydana getirdiği elastik gerilmelerin analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi olarak ABAQUS programından yararlanılmış Elde edilen değerler göz önüne alınarak tasarımda değişiklikler yapılmış ve yeniden analizlere tabi tutulmuş, böylece optimum en iyi ölçü değerlerine ulaşılması amaçlanmıştır. Daha sonra ulaşılan sonuçların doğruluğunu görmek amaçlı testlerden elde edilen ölçülerle karşılaştırılmış ve son olarak namlunun kesit görüntüsü alınarak yapılmış olan analizlerle namlu cidarında meydana gelen plastik ve elastik bölgelerin saptanması hedeflenmiştir. Yapılan değerlendirmeler ve analizler sonucunda ulaşılan gerilme değerleri farklı cidar kalınlığındaki namludan elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ile test sonuçları arasında hemen hemen %4,36, teorik hesaplama ve test sonucundaki değerlerle ise ortalama %11,7'lik bir değişkenliğin olduğunu göstermiştir [14].

Kahraman tarafından yapılan 'Levha Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geri Esnemesinin İncelenmesi' başlıklı tez çalışması yapmıştır. Otomotiv endüstrisinde kullanılan farklı çeşitlerdeki iç ve dış panellerin sac ya da levha gibi malzemelerin genel olarak şekillendirme ile istenilen amaç doğrultusundaki şekli kazandırmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bütün parametrelerinin gerçek değere olabildiğince yakın değerleriyle gerilerek plastik şekillendirme çözümlemesi yapılmıştır. Sacın plastik geri şekillendirme analizi de yapılmıştır. Buradaki amaç, levha ya da sac malzemesinin kalıpta şekil değiştirme esnasında ve daha sonrasında meydana gelen geri esnemenin önceden engellenmesi ve telafi edilmesi olarak belirlenmiş. Bu amaçla DYNAFORM yazılımı kullanılmıştır. Genel olarak bir değerlendirme sonucunda bu yazılımı farklı çekme simülasyon çalışmalarında sağlıklı ve olması muhtemel sonuçlar verdiği ve hedef olarak belirlenen amaca oldukça hızlı bir şekilde ulaşıldığı sonucuna varılmıştır. Yapılan tespitler ışığında sonlu elemanlar yöntemiyle pek çok çözümü zor olarak görünen teknik problemlerin çözümünün mümkün olması gibi saclara şekil verme ve geri esneme öngörüsünün de aynı yöntem ve işlemlerle çözülebileceği sonucuna varılmıştır [15].

Vural tarafından yapılan 'Kaynaklı İmalat Sonrası Oluşan Distorsiyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi' başlıklı tez çalışmasında, kaynak yapılmış bölgelerin birleştirme ardından oluşan distorsiyonların ve artık gerilmelerin parçaların amaçlarını, işlem süreci üzerindeki olumsuz etkisini, bu problemlerin

öngörülmesi ve engellenebilmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çalışma yapılmıştır. Bu problemlerle karşılaşılması ya da yok edilebilmesinin temel şartı, oluşan distorsiyonların şekil ve derecelerinin tanımlanması. Bu tezde gerek köşe gerekse alın kaynakları için değişik et kalınlıklarındaki parçaların kaynaklı imal edilmesi sonrası deforme olmuş durumları incelenmiş ve bazı lineer olmayan malzeme değerleri tercih edilerek kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinden meydana gelen distorsiyonun derecesine direkt olarak etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Oluşan distorsiyonun, fazla olan kaynak dikiş miktarı ile aynı orantılı olarak çoğaldığı sonucuna varılmıştır [16].



3.KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Belirlenmiş bir amaç doğrultusunda bu amaca ulaşmak için fiziksel ve kimyasal özellikleri birbiri ile aynı olmayan iki ya da daha fazla malzemenin belirli oranlarda ve seviyelerde (makro) birleşmesi ile birbirinde eksik olan zayıf yönlerini iyileştirerek meydana getirmiş oldukları yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Matris ve takviye malzemesi olarak kompozit malzemeler genellikle iki bileşenden oluşur. Kompozit malzemeler parçacık, süreksiz ve sürekli olmak üzere takviye türüne göre üç ana başlık altında incelenir. Parçacık takviye elemanları, mikroskobik veya makroskobik boyutlarda olabilmektedirler. Bu takviye elemanları büyük parçacık ve küçük parçacık (Örn: Al_2O_3 ve SiC seramikler) şeklinde olabilmektedirler. Süreksiz takviye elemanlarında ise, lif çapları birkaç mikrometre civarındadırlar. Bu takviye elemanları birkaç mm'den birkaç cm'ye kadar farklı değerlerde ölçülerde olabilmektedir. Sürekli elyaflar, günümüzde kompozit yapılarda en çok kullanılan ve en önemli olan takviye bileşenidir. Bu takviye elemanı kendi boyları ile paralel olarak, kompozitin mekanik özelliklerini değiştirerek iyileştirirler [17].

Eski zamanlarda kompozit malzemelerin kullanıldığı yerler genellikle kırsal inşaat yapımı ve saman çamur karışımından oluşan malzemelerdir. Günümüzde ise bu oluşumu çimento, çakıl ve demir bileşenlerinin birleştiği malzeme bütünü almıştır. Geçmişten günümüze birçok değişik kullanım alanlarına sahip olan kompozit malzemelerin genel olarak kullanım alanları;

- Ev eşyaları (kapı, masa, depo vb.),
- Savunma ve havacılık sanayi (uçak gövde kısımları, silahlar, uzay araçları vb.),
- Denizcilik sanayi (yat, gemi, denizaltı vb. araçlarda),
- Medikal alanlar (implant, çimento yapıları, tıbbi cihazlar vb.),
- Spor malzemeleri (futbol topları, beyzbol sopaları, yüzme paletleri vs.)
- Robot sanayi (robot kolları vb.),

- Kimya sanayi (kimyasal madde, kimyasal tanklar vb.),
- Elektrik-Elektroteknik (kablo üretimi, panoları, yalıtkan malzemeler vb.),
- Müzik aletleri (gitar, saksafon vb.),
- İnşaat ve Yapı Sektörü (taşınabilir durumda olan prefabrik yapılar vb.),
- Gıda ve Tarım Sektörü (sulama kanalları, gıda muhafaza tankları vb.),
- Isı Sektörü (yalıtım malzemeleri, iletken malzemeler vb.),
- Ulaşım sektörü (tren, uçak, otomobil, teleferik, helikopter vb. araçlarda) vb. alanlarda kullanılmaktadır [17].

3.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemeler üretilirken birçok özelliğin en iyi şekilde değiştirilmesi ve iyileştirilmesi amaçlanır. Kompozit malzemelerin üretimiyle bütün özelliklerin tamamı aynı anda geliştirilemez. Kompozit malzemelerin avantajları ile geliştirilmesi planlanan özellikler aşağıda verilmiştir.

- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı: Kompozit malzemeler oldukça güçlü mukavemet oranlarına sahip olarak imal edilebilirler. Genel olarak kullanılan ve bilinen malzemelere nazaran mukavemet/yoğunluk oranları olabildiğince fazla olabilirler.
- Yüksek Rijitlik/yoğunluk oranı: Rijitlik/yoğunluk derecesi oldukça yoğun kompozitler geliştirilip üretilebilirler.
- Hafiflik: Plastik esaslı kompozitler, genel olarak kullanılan malzemelere nazaran hafiflik dereceleri daha yüksektir. Buna rağmen metallerle karşılaştırıldığında daha yoğun mukavemet değerleri sunmaktadır.
- Yüksek Dielektrik Direnç: Kompozitlerin elektriği yalıtabilme kabiliyetleri çok sayıda makine ekipmanlarının üretiminde seçilen ve elektrik tehlikelerini önlemek amacıyla tercih sebebi olabilmektedir.
- Korozyon dayanımı: Kompozit malzemelerin korozyona karşı dayanımı ve çevre koşullarına karşı koyabilme yetenekleri oldukça fazladır.
- Çeşitlilik: Benzer olmayan mekanik özellikleri taşıyan ve farklı kombinasyonları bünyesinde barındıran kompozit malzemelerin üretilebilir olması mümkündür.

- Kalıplama kolaylığı: Sayıca çok parçadan oluşmuş karışık bir yapıya sahip makine elemanları, kompozitler yardımıyla yekpare bir şekilde üretilebilir. Bunun yardımıyla parça adeti gözle görülür bir şekilde azaldığından dolayı bir araya getirme detayı ve parça sayısının azalmasıyla imalat zamanı azalmaktadır. Bu durum alüminyum ya da çelik benzeri olarak kullanılan materyallerde oldukça güçtür.
- Yüzey uygulamaları: Kompozit malzemelerde yer alan polyester reçine, amaç doğrultusunda, hususi olarak kullanılan pigment yardımları ile renklendirilerek kendisinden daha belirgin renge sahip olarak imal edilebilmektedir.
- Tasarım esnekliği: Karışık bir yapıya sahip olan makine elemanları kompozit malzeme kullanılarak daha kolay bir şekilde tasarlanabilir.
- Şeffaflık özelliği: Kompozitler, bir camın sahip olduğu geçirgenlik kadar ışık geçirgenliğine sahip olabilmektedir. Şeffaf olmalarından kaynaklı olarak, difüze ışığın değer kazandığı sera ve güneş kolektörü gibi imalatlarda büyük kolaylıklar sağlarlar.
- Beton yüzeylere uygulama imkanı: Özellikle, betonun gözenekli bir yapıya sahip olmasından dolayı, kompoziti meydana getiren önemli malzemelerden biri olan polyester beton gözeneklerine reçinenin nüfuz etmesiyle birlikte oldukça iyi bir yapışma kalitesi elde edilir.
- Ahşap yüzeylere uygulama imkanı: Kompozitler ahşap yapıya sahip yüzeylere oldukça yüksek derecede yapışabilme özelliğine sahiptirler.
- Metal yüzeylere uygulama imkanı: Metal yüzeyinde zamanla oluşan pas ya da yağ artıkları gibi mümkün oldukça temizlendikten sonra kompozit yapılarla çevrelenip kaplanabilirler. Bu kaplama işlemi sayesinde ise demir ve çelik yüzeyler, kompozitlerle korozyondan korunurlar.
- Yanmazlık özelliği: Kompozitlerin aleve dayanabilme özelliği, kullanılan polyesterin özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Alev dayanımlı kompozitler tercih edilerek malzemenin yanmaya karşı gösterdiği direnç artırılabilir.
- Isıl dayanım: Özellikle termoset plastikler grubunda olan polyester reçineler kullanılarak yapılan kompozit malzemeler yumuşamazlar ve sahip oldukları

şekli değiştirmezler. Isıl dayanımı kullanılan polyester reçinenin cinsine bağlıdır.

- Tamir edilebilirlik: Hasar görmeleri durumunda tamir edilebilme özelliğine sahiptirler.
- İşlenebilirlik: Kompozitler, kolayca kesilebilir, delinebilir, zımparalanabilir. Bu amaçlar doğrultusunda yararlanılan aletlerin sert çelik ya da elmas uçlu olması alınabilecek sonuçların daha gerçekçi ve iyi olmasını sağlayabilir [17].

3.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanı sıra kompozit malzemelerin dezavantajları da bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin en yaygın olan bazı dezavantajları da aşağıda verilmiştir;

- İmalatı gerçekleştirilmiş kompozitin özellikleri her zaman istenilen seviyede kullanışlı, ideal olmayabilir.
- Tabakalı kompozitler, tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine karşı oldukça duyarlı olduğu için delaminasyon olayı gerçekleşebilir.
- Üretim metodunun kaliteli olup olmaması kompozit malzemenin kalitesini de aynı doğrultuda etkiler, standartlaşmış bir kalite kompozitler için mevcut değildir.
- Bazı kompozitler gevrek bir yapıya sahip olduklarından dolayı oldukça kolay bir şekilde zarar görebilirler, onarılmaları ise yeni problemleri beraberinde getirebilir.
- Onarımından hemen önce oldukça iyi bir biçimde artırılmaları ve dikkatli bir şekilde sıcak olarak kurutulmalıdırlar. Bu işlem ve temizleme yöntemleri bazen uzun sürebilir. Genel olarak da bu durum çok zor gerçekleşmektedir [17].

3.4 Kompozit Malzeme Türleri ve Özellikleri

Kompozit malzeme türlerini, matris elemanlarına göre ayıracak olursak polimer, metal ve seramik matrisli kompozit olmak üzere üç, takviye şekline göre ayırmak

istersek ise, fiber takviyeli, partikül takviyeli ve tabakalı kompozitler olmak üzere üçe ayrılır.

3.4.1 Matris Elemanlarına Göre Kompozitler

Polimer Bazlı Kompozitler; liflerle güçlendirilmiş polimer kompozitler sanayide oldukça çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Pekiştirici özelliğe sahip olarak karbon, cam, bor lifleri ve aramid oldukça yaygın bir biçimde kullanılır. Polyester ve epoksi malzemeleri polimer bazlı kompozitlerde en önemli bağlayıcı malzemelerdir. Malzeme içerisinde bulunan liflerin miktarı fazlalaştıkça kompozitin mukavemeti de aynı şekilde artacaktır. Polimer bazlı kompozitlerin en çok bilinen ve en dikkat çeken özellikleri özgül mukavemetinin ve özgül elastisite modülünün çok yüksek değerlere sahip olmasıdır. Bu özellikleri sayesinde diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha üstün konumda bulunmaktadırlar. Karbon liflere ait elastisite modülü alüminyumun özgül elastisite modülünden yaklaşık beş katı daha fazladır. Bu üstün özelliklerinden dolayı polimer kompozit malzemeler savunma başta olmak üzere uçak ve uzay sanayisinde birçok konstrüksiyonda, alüminyum alaşımlarında sıkça kullanılırlar [18].

Metal Matrisli (MMK) Kompozitler; metalik faza ait bir yapının birçok takviye yapıları ile eritme vakum emdirme, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı benzeri ileri teknolojili yöntemler kullanılarak oluşturulan metalik özelliğe sahip olan malzemelerdir. Metalik baza sahip malzemeler genellikle uzay ve havacılık uygulamalarında (teleskop, platform taşıyıcı parçalar, haberleşme cihazlarında bulunan destek parçaları vs. gibi birçok alanda) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Seramik Matrisli (SMK) Kompozitler; bu doğrultuda yapı ve fonksiyonel olarak çok yüksek teknolojiye sahip olan seramikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıcaları Al_2O_3 , SiC, TiC, TiB, TiN' dir. Bahsi geçen bileşikler kendilerine özgü farklı bünyelerde olmakla birlikte istenilen amaç doğrultusunda biri veya birçoğu birlikte kullanılarak oluşturulurlar. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı kullanılan malzemelerin üretimi ile birlikte uzay araçları bu tip ürünlerin en fazla ve en önemli kullanım yerleridir [18].

3.4.2 Takviye Şekline Göre Kompozitler

Fiber Takviyeli Kompozitler; elyaf takviye yapısındaki kompozit malzemeler, çoğu durumlarda önemli ölçüde artış sağlayan ve çok yüksek miktarda etkinliğe sahip liflerin eklenmesiyle elde edilen kompozitlerdir. Genel olarak mühendislik yapılarında tercih edilen malzemelerin birçoğu elyaf biçiminde üretildiği için mukavemet değerleri ve rijitlik değerleri kütle halindeki değerlerinden çok fazla düzeyde olabilmektedir. Örnek verecek olursak karbon elyaflara ait olan çekme mukavemet değeri, kütle halinde bulunan grafitten yaklaşık 50 kat, rijitlik değeri ise 3 kat daha fazladır [19].

Takviye elemanları yapı içinde buldukları konum ve özellik itibarıyla sürekli olarak uzayan elyaflar ya da uzun halde olan elyafların kesilmesi neticesinde elde edilen süreksiz elyaf şekillerinde olabilmektedir. Elyaf takviyeli olan kompozit malzemelerin mühendislik verimine etki eden birçok faktör vardır. Bunlardan en önemli faktörler, elyafların biçimi, uzunluğu, elyafların yönlendirilmesi, matrisin kendine ait olan mekanik özelliği ve elyaf-matris arasındaki ara yüzey özellikleridir.

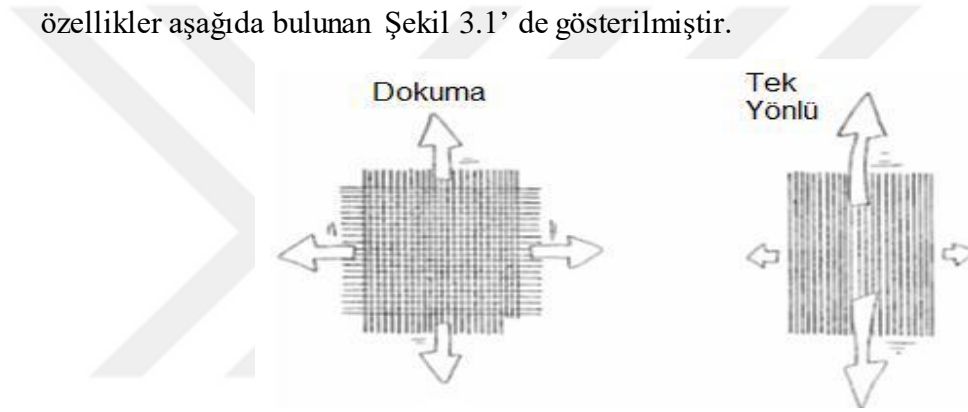
Partikül Takviyeli Kompozitler; Bir matris malzeme içerisinde, bu malzemeden farklı olan herhangi malzemenin küçük parçacıklar şeklinde yerleştirilmesi ile oluşturulurlar. Yapıları izotropiktir. Parçacıkların sertliğine bağlı olarak yapının mukavemeti değişmektedir. En yaygın ve en çok bilinen durumu plastik matris içerisinde bulunan metal parçacıklardır. Isı iletkenlik değeri ve elektrik iletkenlik değeri bu metal parçacıklar sayesinde sağlanmaktadır. Seramik matrisin metal matris içinde yer aldığı sistemlerin, sertlik ve yüksek sıcaklık dayanım değerleri çok büyüktür. Bunlar kollar, elektrik yapıları, muhafazalar vb. gibi küçük parçacıkların imalinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [19].

Tabakalı Kompozitler; Tabakalı kompozitler, liflerle donatılmış olan ve yapısal yönden taneli olan kompozit malzemelerden farklılık göstermektedirler. Çok farklı ve değişik kombinasyonlarla tabakalandırılmış kompozit malzemelerin üretimi de mümkündür. Birbirinden bağımsız özelliklere sahip minimum iki tabakanın birleştirilmiş halinden oluşurlar. Korozyon direnci zayıf olan metaller üzerine, plastiklerin ya da daha yüksek dirence sahip olan metallerin kaplanması ile

korozyona olan dayanım değerinin, yumuşak haldeki metallerin olduğa sert malzemelerle yapılandırılmasıyla sertlik değeri ve aşınmaya karşı gösterdiği direncinin, fiberlerin farklı yönlenmesine sahip tek plakaların birleştirilmesiyle farklı yönlü yük taşıma yeteneğinin artırılması ve iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir.

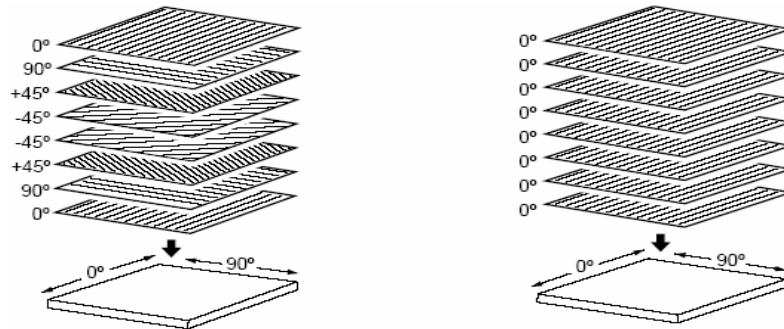
Tek yönlü özellikteki kompozit malzemeler bir yönde olduğu durumda yüksek mekanik özelliklere sahiptirler ve anizotropik (yönleri farklı olduğunda değişken özelliklerin gösterilmesi) zellik sergilerler. İzotropik (tüm yn ve bütün doğrultularda benzer hatta aynı özellikleri gösteren malzemeler) malzemeler (daha çok metaller) bütün doğrultularda aynı özellikleri gösterirler [19].

Dokuma (farklı yöndeki elyaflar) ve tek yönlü elyaflar için farklı yönlerdeki özellikler aşağıda bulunan Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki zellikleri

Tabakalarda yönlendirme Şekli olan yarı-izotropik ve tek yönlü yönlendirme biçimini sırasıyla Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Tabakalarda yönlendirme Şekilleri

Tabakalı haldeki kompozit yapılar, en ilkel ve çok yaygın olarak kullanım alanlarına sahip olan çeşididir. Değişen elyaf yönlendirmelerine sahip olan tabakaların bileşimi ve oldukça fazla olan mukavemet değerleri bulunabilir. Sıcaklığa karşı ve neme olan yapıları dayanıklıdır. Metal malzemelere kıyasla çok daha az bir ağırlığı vardır ve ayrıca yüksek mukavemet değerine sahip olmaları sebepleriyle sık olarak kullanılan malzemelerdir. Tabakalandırılmış halde bulunan fiber takviye ile desteklenmiş kompozit malzemelerin kullanım alanları; cam elyaf kullanılan gemi kaplaması, tren ve tramvay gövdeleri, tenis raketleri vb. dahası uzay ve uçak sistemlerinde sıkça kullanım alanına sahip haldeki sandviç sistemler (Şekil 3.3) de tabakalı olarak belirtilen kompozit malzeme örneklerindedir [19].



Şekil 3.3 Nasa tarafından imal edilen bir honeycomb kompoziti [20].

Birçok açıklama ve tanımlamada bahsedildiği gibi malzeme dayanımını artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet değeri elde etmek amacı doğrultusunda kompozit malzeme yapımında kullanılan elyaflar en çok cam elyaf ve karbon elyaf olarak karşımıza çıkmakta ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [21].

3.4.3 Doğal Kompozitler

Doğada bazı hayvan ve bitki türleri kendi bünyelerinde doğal kompozit yapısı bulundurabilirler. Lignin olarak adlandırılan bir kısım zayıf madde ile birliktelik sağlayan uzun selüloz elyafından yapılmış olan ahşap doğal kompozit yapısına verilebilecek ve oldukça yaygın bir şekilde doğal kompozit örneğidir. Ahşap içinde bulunan selüloz aynı zamanda pamuğun içinde de bulunur, ancak lignin olmadan bu

bağı birbirine yeteri kadar bağlamak oldukça zordur. Bahsettiğimi lignin ve selüloz iki zayıf madde olmasına rağmen birleştikleri anda oldukça güçlü bir yapı oluştururlar ve bu yapı ahşap gibi bazı bitkilerin bünyesinde bulunduğu için doğal kompozitler olarak tanımlanır [22].

3.4.4 Cam Elyaf

Cam elyaf üretiminde; çeşitli özelliklerdeki taşlar ortalama olarak 1600°C'de sıvı hale geldikleri zaman birleşerek camı oluştururlar. Bahsedilen yüksek sıcaklıktaki bu sıvı çok ince kovanlardan geçirilir. Ve daha sonra 9 µm'den 25 µm'ye kadar uzanan büyüklükteki mikron çaplarında cam elyaf ipliklerini meydana getirir. Oluşan bu iplikler de kendi aralarında çok sıkı bir halde birleştirilerek lif, eğer gevşek olarak birleştirilir ise fitilleri meydana getirir. Bunlar bir sonraki aşamalarda farklı kimyasal malzemelerle kaplandığında (birleştirilerek) ipliklerin çok önemli bir özelliği olan yapışma özellikleri oluşturulur. Kullanılan taşların çeşit ve farklılıklarına bağlı çeşitli cam elyaf tipleri oluşturulabilmektedir [21].

“E” cam elyaf; Kireç, borosilikat ve kireç başlıca malzemeleridir. Çekme değeri ve basma mukavemet değerleri ve elektrik kabiliyetleri gayet başarılıdır. Diğer elyaf çeşitlerine nazaran oldukça ucuzdur ancak dışarıdan gelebilecek bir darbeye direnci oldukça düşüktür. Bu sebepten dolayı kırılığandır.

“C” cam elyaf; Kimyasal etkilere karşı dayanımları yüksektir. Yaygın olarak kimyevi veya su borularında ya da tankların iç yüzeyinde katı biçimde kullanılmaktadır.

“R”, “S”, “T” cam elyaf; “E” camına kıyasla çok daha fazla çekme mukavemeti değer ve modülünü içerir. Islak durumda dahi olsa yüksek mukavemet değerleri sergilerler. Yaygın bir şekilde uzay sanayi ile savunma teknolojilerinde ve balistik zırhların üretiminde yaygın bir şekilde tercih edilir. “E” cama kıyasla piyasada daha yüksek fiyata sahiptir [21].

Aşağıda yazıldığı üzere cam elyaflara ait birkaç özellik sıralanmıştır;

- Güçlü çekme mukavemet değerlerine sahiptirler, mukavemeti birim ağırlık başına çeliğin mukavemet değerine göre daha fazladır.

- Isıl dirence karşı olan direnci düşüktür. Yarıcı özelliğe sahip değillerdir, ancak çok yüksek değerlerdeki sıcaklıkta yumuşarlar.
- Kimyasal malzemelere karşı direnç gösterirler.
- Nem absorbe edebilme kabiliyetleri oldukça düşük, hatta yoktur.
- Elektriği iletme yetenekleri yoktur. Elektriği iletememe özelliğinden dolayı elektriksel yalıtımın oldukça değer gördüğü yerlerde cam elyafı kompozitlerin tercih edilmesi de kullanılması da günden güne artmaktadır [23].

3.4.5 Reçineler

Kompozit malzemelerin bileşenlerini oluşturan en önemli malzemelerden birisi reçinedir. Kompozit malzemelerde reçinenin üç temel işlevi mevcuttur. Bunlardan birisi elyafları bir arada ve sıkı tutmak, diğeri uygulanan kuvveti elyaflara iletme, bir diğeri ise elyafları dışarıdan gelecek olan dış etkenlere karşı muhafaza etmektir. Uygun bir matris malzemesi ilk başta az viskoziteli bir biçimde iken sonradan elyafları sağlam ve ideal bir biçimde sarmalayıp çevreleyecek katı hale rahatlıkla dönüşebilmelidir. Kompozit yapılarda dışarıdan gelen yükü taşıyan elyafların, istenilen fonksiyonların yerine getirilmesi bakımından matrisin mekanik kabiliyetlerinin önemi oldukça fazladır. Örnek verilecek olursa, matris malzemesinden yoksun olan elyaf bir demet, kuvvet, bir ya da birden fazla elyaf malzemesi yardımıyla karşılanacak, iletilecektir. Dışarıdan etki edilen yükün bütün elyaflara denk olacak şekilde dağıtılması ise matrisin varlığı ile sağlanacaktır. Kesme yüküne maruz kalmış bir reçinenin gerilmeye olan dayanım, elyaflarla matris arasındaki kaliteli yapışma, birleşme ve matrisin önemli derecede yüksek olan kesme mukavemeti özelliklerinin olduğunu kanıtlar. Elyafın yönlenmelerine dik olarak, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile birlikte matris arasında bulunan bağın etkileri, kompozit yapının mukavemetini tespit edici olan değerli etkenlerdendir. Elyaf matrise kıyasla daha güçlü ve daha serttir, yani matris daha güçsüz ve elastiktir. Bu durum kompozit konstrüksiyonların imalatında ve dizaynında oldukça özen gösterilmesi gereken önemli bir durumdur. Matrisin kesme mukavemeti ve matrisle elyaf arasında bulunan bağ kuvveti oldukça yüksek bir derecede olursa elyaf veya

matriste oluşabilecek bir hasarın ya da bir çatlağın yönünü değiştirmeden doğrudan ilerlemesi mümkündür [24].

Böyle bir durumla karşılaşıldığında kompozit malzeme kırılğan bir malzeme davranışına yakın özellik gösterdiği için kopma yüzeyi oldukça belirgin ve net olacak şekilde temiz ve parlayan bir yapı özelliği gösterir. Ancak bağ mukavemeti bayağı düşük ise, elyaflar boşlukta bulunan bir elyaf demetiymiş gibi tepki verir ve kompozit özellikleri azalır. Fakat orta seviyedeki bir bağ mukavemetine sahip ise, elyaf ya da matristen gelen yanlamasına doğru bir çatlak elyaf ile matris arasında geri dönüp elyaf hizasında doğrudan yol alabilir. Böyle bir durumda iken kompozit malzeme sünek malzemelerin kopmasına benzer lifli bir yüzey özelliği gösterir. Görüntü net ve belirgin olmaktan çıkar [24].

Kompozit malzemelerin imalatında kullanılan matris malzeme çeşitleri fenolik, vinylester, polyester ve epoksi reçinelerdir. Özellik olarak yüksek mukavemet özelliği buldurmeyen anlarda en sık ve en yaygın kullanılan matris malzeme çeşidi ise polyester reçinesidir. Geliştirilmiş kompozit malzemelerin imalat sırasında ise yaygın olarak epoksi reçinesi tercih edilmektedir. Matris geliştirilmesi araştırmaları özel olarak sıcaklığın daha yüksek olduğu alanlarda kullanıma elverişli ve düşük nem hassasiyetine sahip olan konstrüksiyonların imal edilmesi yönündedir [24].

Epoksi reçineler iki ya da sayıca çok daha fazla epoksiler içeren bileşenlerden oluşmaktadırlar. Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara olan dayanım güçleri olabildiğince artırılabilir. Epoksinin büzülmesi %2 değerinden düşüktür [24].

Avantajları;

- Kopma mukavemet değerleri yüksektir.
- Elyaf yapılarıdaki bağ mukavemet değerleri çok yüksektir.
- Aşınmaya karşı olan dirençleri yüksektir.
- Uçucu özellikleri yoktur ve kimyasal olaylara karşı gösterdikleri direnç değerleri oldukça yüksektir.
- Sertleşebilme özellikleri fazla ya da düşük sıcaklıklarda mümkündür [24].

Dezavantajları;

- Polyestere kıyasla daha pahalıdırlar.
- Epoksiler Polyestere göre yüksek viskoziteye daha az elverişlidir [24].

Reçineler kompozit malzemelerde kullanılırken beklenen özellikler;

- Mekanik özelliklerinin iyi olması,
- Yapışabilme kabiliyetinin iyi olması,
- Tokluk özelliklerinin iyi olması,
- Çevreden gelebilecek etkilerine dirençlerinin iyi olması [25].

3.4.5.1 Reçinelerin Yapışma Özellikleri

Reçinenin bir fibere yapışabilme yeteneği kaliteli ve yüksek değerlerde olmalıdır. Reçinenin yapışabilme yeteneği artarsa, yüklerin reçineden takviyeye uygun ve yeterli derecede aktarılması da aynı derecede mümkün olabilir. Dahası, gerilmeye maruz kalan fiber ile reçine arasında ayrılmaların ya da kırılmaların da bu şekilde önüne geçilmiş olur [26].

3.4.5.2 Reçinelerin Tokluk Özellikleri

Bir malzemede oluşan çatlak, malzeme içerisinde sürekli ilerlemek isteyecektir. Her malzemenin çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği bir direnci vardır. Çatlamaya yani çatlak ilerlemesine karşı gösterilen bu dirence kırılma tokluğu denir. Kırılma tokluğu değerini ölçebilmek kompozit malzemelerde güçtür. Fakat gerilme-birim uzama eğrisi de malzemenin tokluk değerine dair bilgiler sağlar. Genel olarak herhangi reçine malzemesinin hasar büyümesi arttıkça tokluğunun da fazlaştığı yorumu yapılabilir. Aksi halde reçineler gevrek özellikler sergilerler ve kolay bir şekilde kırılmaya uğrarlar. Bu sebepten dolayı fiberlerin uzama yeteneklerine göre uyumlu reçine seçebilmek oldukça büyük önem taşımaktadır [26].

3.4.5.3 Reçinelerin Çevresel Özellikleri

Reçine malzemelerinin birçok dışarıdan gelen çevresel etmenlere (UV, kızılötesi vb.), suya ve girişken maddelere (kimyasallar) karşı gösterdikleri direnç değerlerinin oldukça fazla olması beklenir. Özellikle denizde işlevi olan kompozit malzemelere yönelik bahsedilen özellikler değer kazanmaktadır [26].



4.BALİSTİK

Aslı 'balistique' olan ve Fransızca köklü olan bu kelimenin anlamı, gökyüzüne ya da uzaya fırlatılan herhangi bir cismin, bilhassa mermilerin gerek bir silahın içerisindeki gerekse de bir silahın dışındaki hareketlerini ve temas ettiği hedef üzerindeki hareketini (etkisini) inceleyen bilim dalıdır. Başka bir deyişle, mermilerin itme kuvveti, havada kalması yani uçuşu ve deformasyon (çarpma) etkisini inceleyen bir bilimdir. Balistiğin bölümleri, iç balistik, dış balistik, terminal yani hedef balistik olmak üzere 3 ana başlığa ayrılmış ve bu 3 ana başlık altında incelenmektedir.

4.1 İç Balistik

İç balistik bir merminin ya da bir fişegin, bir mermi ya da bir fişek yatağına sürülmesiyle başlar. Ateşli silahın mekanik yapısını ve özelliklerini, çalışma mekanizmasını, bir patlamanın oluşmasını, fişek üzerindeki etkisini ve mermi merkezinin (çekirdeğinin) silahı terk etmesine kadar olan devinimlerini, hareketlerini inceler. Ateşlenen barut gerçekte bir anda ateş almaz yani yanmaz ve kademeli olarak artan bir gaz hacmi oluşturur. Artarak oluşan bu gaz hacmi basıncı artırarak merminin ileri doğru itilme görevini görür. Fakat gazların etkisi altındaki alan genişleyince, bu genişleme ile aynı oranında basınç da düşer. Bu sebepten dolayı basıncın sabit tutulması amacıyla yavaş yanan barutlar ve uzun namlular kullanılır. Bu uzun namlular gazın oluşturduğu etkiyi artırır ve namlular üzerinde fazla kuvvet oluşturmaksızın ilk yüksek hızların elde edilmesini sağlar [4].

Tetiğin ilk olarak çekilmesiyle iç balistik olarak bahsettiğimiz olay harekete geçer ve mermini çekirdeği namludan ayrılana dek süregelir. İç balistik hesap işlemleri, ateş alan merminin boyutları büyüdüğünde güvenilir bir şekilde matematiksel bakımdan tahmin edilebilir yani öngörülebilir. Ancak mermi boyutları küçüldüğünde bu öngörme işlemi oldukça zorlaşır. Eskiden balistik değerler küçük boyutlardaki mermilere göre hesaplamaktansa hız deneme ve basınç deneme yöntemleri kullanılarak ya da deneysel yöntemler kullanılarak tespit edilmekteydi. Oldukça fazla miktarda çekirdek tertip ve yerleşmesi barındıran ufak ebatlardaki mermilerin

performans değerleri atış deneyleri icra edilerek sağlanıyor ve değerlendiriliyordu. Bahsedilen deney ve testlerden oldukęa fazla sayıda veri elde edilebilmekte ve ayrıca ses balistik verileriyle beraber analiz edilerek ufak boyutlardaki mermiler hakkında mantıklı ve makul görülebilir değerler elde edilebilmekteydi. Yaygın olarak bilinen kinetik enerji denklemi ($E=1/2mV^2$) baruttan kaynaklanan gc  yani enerji değerine denkliğinde mermi hızı makul seviyede bir doğruluk ile hesaplanabilmektedir. Geręekte oluşan ve ağığa çıkan enerjinin oldukęa az bir miktarı ise merminin hareket enerjisinde kullanılır [4].

4.2 Dış Balistik

Bir fzeye ya da bir meriye etki eden atalet, yeręekimi ve havadan kaynaklı oluşan aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi halinde, yörüngelerin hesabı düşünüldüğü kadar önemli bir zorluk teşkil etmez. Fakat hava tarafından etki eden aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi ya da tahmin edilmesi olabildiğince zordur.

Bir mermi, hava direncini yok etmek, yenmek ve dengeli yani sabit bir uğuş yapmak için havada kaldığı uğuş süresi boyunca hedefe doğru ilk hareket (ıkış) pozisyon ve doğrultusunda gitmek zorundadır. Eğer merminin çıkıştan sonraki pozisyonunu değiştirirse, hatta takla atarsa, bu uğuşun en başta düşünüldüğü ve planlandığı gibi bir sonuca ulaşılamamasına ve hedefe dşememesine neden olacaktır. Uğuş dengesini ve kararlılığını sağlamak için iki yöntem vardır. Bunlardan birisi kanatçık stabilizasyonu ve diğeri spin ya da başka deyişle dönme stabilizasyonudur. Kanatçık stabilizasyonunda, mermiye monte edilmiş olan kanatçıklar merminin kendi ekseninde dönmeden, hareket etmeden dönmesine yardımcı olurlar. Bu olay kanatçıklar üzerinde meydana gelen aerodinamik etkilerin vasıtasıyla sağlanır. Spin hareketine sahip olan merminin ya da fişeğin ise bünyesinde barındırdığı dönme hareketinden kaynaklı bir şekilde sürekli ilk hedef yönü boyunca hareketi sürdürülür. Bahsedilen bu dönme davranışının ataleti, olması gereken doğru eksene zıt olacak sapmalara izin vermez [4].

4.3 Terminal (Hedef) Balistik

Mermi çekirdeği bir hedefe çarpar ve bu hedefe temas ettikten hemen sonra mermi hızının sıfır oluncaya kadarki delebilmeye enerjisi ve gücünü temas ettiği cisme nakletmesi gibi konular ile bağlantılıdır. Genel olarak terminal balistik, parçacıkların ve mermilerin, temas ettiği hedef üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve araştırılması olarak tanımlanır. Mermi ve mermi parçacıklarının hedefe temas ettiği yani hedefe vuruş yaptığı koşulları, vuruş (temas) anındaki hızı, vuruş açısı, hedef, mermi ve parçacığın değişkenliğine göre farklılıklar gösterir.

Hedef üzerindeki mermi tarafından oluşturulan etki ve deformasyonların incelendiği balistik türüne denir. Bu etkiler, zırlı hedeflerin delinmesi, hedefte parça tesiri, hedefte gösterdiği infilak etkisi, hedefte oluşan yangın tesiri, hedefin aydınlatılıp ışıktandırılması, sis, zehirli gaz ve radyoaktif etmenler, etkilerdir. Hedef balistiği olarak da isimlendirilir [4].

Genel olarak namlu sistemi olan bir silah düzeneğinin temel amaçlarından biri mermiyi olabilecek en fazla hızla hedefe temas edecek şekilde fırlatmak ve hatta hedefi yok ederek verebileceği en fazla zararı vermektir. Namlunun içinde meydana gelen basınçla orantılı olarak merminin elde edeceği maksimum hıza doğrudan etkilidir. Namlu içinde meydana gelen basınç değeri bir silahın tasarımında başlıca olarak tanımlanan balistik parametrelerden biridir. Namludaki basınç dağılımının bilinmesi ve en fazla basıncın meydana geldiği alanın belirlenmesiyle namlunun mukavemet hesabının elde edilmesine olanak sağlanmaktadır. Elde edilecek olan bu mukavemet hesaplarıyla namlu boyunca en uygun et kalınlığının hesaplanması ve namlunun en iyi şekilde ağırlıkça hafifletilmesi mümkündür. Ayrıca, basıncın dağılmasının belirlenmesi namludaki aşınmaların ve namlu ömrünün belirlenmesi, mermi üzerine etkileyen kuvvetlerin tespit edilmesiyle mermi imalatı yani tasarımı, geri tepme kuvveti ve mesafenin hesabı, barut gibi birçok parametrelerin tespit edilmesine imkan sağlamaktadır. Bilinmesi gerekli olan başka bir nokta ise namlu içerisindeki mermiye ait olan hız dağılımı ve sonucunda namludan ayrılırken görülen ilk hızıdır. Namludan çıkan merminin ilk çıkış hızının bilinmesi, menzilin belirlenmesi ve bununla birlikte atış cetvelinin elde edilmesi, havada kalma süresi, hedefe temas ettiği andaki hızın hesaplanması ile hedef üzerinde meydana getirdiği

çarpma hızının hesaplanması ile delme kuvvetinin hesaplanması, namlu ömrünün belirlenmesi, geometri tasarımı gibi birçok önemli tasarım değerlerinin belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır [27].

4.4 Hasar Mekanizmaları

Balistik çarpma genel olarak, bir kaynaktan belirli bir güçle itilen mermilerin meydana getirdiği düşük kaliteli, yüksek hızdaki çarpma olarak adlandırılır. Balistik çarpma oldukça yüksek hızda oluşmasına rağmen, hedef üzerindeki etkileri, çarpmanın olduğu noktaya oldukça yakın bir çevrede gerçekleşmektedir. Temas yani çarpma sırasında enerji geçişi, mermiden hedefe doğru hareket ederek ilerlemektedir. Hedef malzemesinin özelliklerine ve mermiye ait değerlere (parametrelere) bağlı olarak;

- Hedef mermi tarafından delinmekte ve hedefin arka yüzünden belirli bir hızda çıkmaktadır. Bu durum, merminin ilk enerjisinin, hedefin absorbe edebileceği enerjiden oldukça büyük olduğunu göstermektedir.
- Mermi temas ettiği hedefe kısmen girmektedir. Bu durum merminin en başta bulundurduğu enerjinin, hedefin absorbe edeceği enerjiden daha düşük bir değere sahip olduğunu göstermektedir. Mermi, hedefte bulunan malzemenin özelliğine bağlı olarak, ya hedefin içine kadar ilerleyip hedefin içinde kalmakta ya da sekteye uğramaktadır.
- Hedef mermi tarafından tamamen deforme edilmekte, delinmektedir. Fakat çıkış hızı sıfırdır yani yoktur. Böyle bir durumda verilen kütle için, merminin en başta sahip olduğu hız balistik limit olarak isimlendirilir. Dahası merminin ilk başta sahip olduğu enerjinin tamamı yalnızca hedef tarafından yok edilerek absorbe edilmektedir [28].

Hedef balistiği içerisinde sıkça kullanılan nüfuz etme yani penetrasyon, merminin hedef üzerindeki herhangi bir kısmına girme durumunun gelişimi olarak tanımlanmaktadır. Mermi ile hedefin teması (çarpışma) esnasında, mermi hedefe birkaç farklı durumda nüfuz edebilmektedir. Mermi tarafından hedef üzerinde meydana gelen hasarlar birçok değişkenlere bağlıdır. Bu değişkenler merminin uç

yani burun şekli, malzeme özelliği, çarpma hızı, mermi yörüngesi ve mermi ile temas ettiği hedefin değişken boyutlarıdır.

Yoğunluğu genellikle düşük ve zayıf olan hedeflerde, kırılmalar gevrek bir şekilde görülmektedir. Başlangıçtaki gerilme bu dayanım değerini aşarsa gevrek kırılmalar meydana gelmektedir. Düşük veya orta sertliğe sahip olan kalın levhalarda görülen olay ise delinme ile birlikte küçük parça kopması durumudur bu duruma da sünek delinme denir. Sünek delik değişimi, dolgu oluşumu veya taç yaprağı oluşumu sünek malzemelerde oldukça sık rastlanan hasar şekilleridir. Bununla birlikte daha farklı hasar şekilleri de bulunmaktadır [28].

4.5 Zırh Malzemeleri

İnsanlar tarih boyunca yüzlerce savaşa katılmış ve bu savaşların haricinde birçok tehlikeli durumda kendilerini zarar görmekten korumak için çeşitli özelliklerde malzemeler kullanmışlardır. Zırh, genellikle belirli bir etki ya da saldırı biçiminden korunmak amaçlı tasarlanmış ve günümüze kadar geliştirilmiş koruyucu örtü şeklinde tanımlanır. Hayvan derisi ve kemikli yapılardan başlayarak çelik, bronz, balistik giysi ve seramiklere kadar geçmişten bugüne kadar birçok şekilde zırh kullanımı olmuştur. Ateşli silahların yaygınlaşmasıyla beraber, bunların etkilerine ve darbelerine karşı durabilecek özellik ve kapasitelerde zırhlar keşfedilmiş, zırhları delip geçebilme özellikleri gösteren mermiler araştırılıp üretildiğinde ise bu mermilere gösterilen direnç ile yeni zırh düşünceleri ve isimleri geliştirilmiştir. Yalnızca metal malzemeleri kullanarak ya da seramik kompozit, polimer kompozit, tabakalı zırh kullanarak çok farklı çeşitlerde sistemler geliştirilmiştir. Ana fikir, oldukça sert bir yüzeyle ya da arkada yumuşak, sünek bir malzeme kullanmak koşuluyla geliştirilen zırh kademeleriyle merminin etkisini ya da hızını keserek enerjisini sönmek hatta yok etmektir. Burada en yüksek seviyede korunmayla birlikte hareket yeteneğinin desteklenmesi de amaçlar arasında yer almaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan çeşitli zırhlar;

- Haddelenmiş levha zırh
- Döküm zırh
- Derin çekme zırh

- Dövmeye zırh
- Çok bileşenli zırh (Tek parça)
- Saydam zırh
- Fiber takviyeli plastik zırh
- Seramik zırh
- Patlayıcı madde içeren zırhlar
- Kişisel zırh sistemleri şeklindedir [29].

Belirli bir kademeye kadar kalınlık sınırlamaları olup, çelik ve alüminyum malzemeleri ile alaşımlandırılarak hadde işlemleri görmüş levhalar zırh grubundaki malzemelerdir. Maliyetinin düşük olması, üretiminin kolay olması ve yapısal verimliliğinin iyi olması gibi sebeplerden dolayı çelik başlıca zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır [6]. Zırh çelikleri alaşımlı çelikler grubunda olup kimyasal bileşim açısından kendileri gibi östenitleştirme ve su verme aşamalarını içerisine alan, sertleştirme ve menevişleme işlemlerinden geçen ıslah çelikleri ile benzer bir bileşim özellikleri gösterirler. Fakat mermilerin oluşturacağı darbe kuvveti karşısında çatlama, kırılma ya da parçalanma gibi sonuçların olmaması için yüksek kalitede homojen bir içyapı özelliklerine sahip olmaları gerekir. Hedefe nüfuz etmesini önlemek için yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri istenen mermilerin aynı zamanda darbe etkisine ve kuvvetine direnç gösterebilmek için de yüksek tokluk değerlerine sahip olmaları gerekmektedir. Böyle bir durumda istenilen özelliklerde çelikler elde edebilmek, uygun ısıl işlem adımlarıyla meydana gelebilir. Mukavemet özelliklerinin ve sertlik değerinin artması ile tokluk değerinde meydana gelebilecek değer düşüşlerinin önüne geçmek amacıyla ikincil metalürjik işlemlerle kırılmalara sebep olan kükürt ve fosfor olabildiğince çok düşük derecelere indirilmektedir. Düşük karbon içeriği de tokluk bakımından oldukça değerli bir konudur. Düşük karbon içeriği aynı zamanda zırhlı araçlar gibi uygulamalarda istenilen kaynak edilebilirlik özelliğini de sağlamaktadır [30]. Bu bahsedilen durumdan da anlayabileceğimiz gibi zırh uygulamalarında kaynağın da önemli ve kritik bir konu olması, kaynak bölgesinin de balistik olarak incelenmesini ve değerlendirilmesini beraberinde getirmektedir. Örnek verecek olursak, daha önceki yıllarda yapılmış olan bir çalışmada, yüksek mukavemet düşük alaşım çeliklerinde bulunan kaynak

bölgesine nüfuz eden mermiler karşısında, korumalı ark kaynağı, tungsten ark kaynağına nazaran çok daha yüksek oranda başarı göstermiştir [31].

Yaygın olarak tercih edilen diğer bir zırh malzemesi de seramiklerdir. Seramiklerin yaygın kullanım nedeni ise yüksek sertlik özellikleri ve düşük yoğunluk özelliklerinin olmasıdır. Seramikler bu özellikleri bünyesinde bulundurduğundan dolayı ciddi anlamda iyi ve ideal bir zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Takviye malzemesi kullanarak da faydalanılabilir. Ancak genel olarak hem karo fayans şeklinde hem de kompozit zırhın çarpışmada temas ettiği yüzey olarak da kullanılırlar. Sert yüzeye sahip olan bir malzemeyle beraber alüminyum, çelik ya da cam elyaf takviyeli plastikler gibi sünek bir destek katmandan oluşan iki bileşenli zırh sistemlerinde seramik zırh malzemelerinin avantajlarından faydalanılmaktadır. Zırh imalatında kompozit veya metal levha ile desteklenen seramik yüzeyli zırhların, genellikle ağırlıktan tasarruf edilmesi istenilen uygulamaların ve araştırmaların yapımında kullanıldığı söylenebilir. Yüke bağlı olarak meydana gelebilecek zarar ve ihtimaller arasındaki tehditler dolayısıyla seramik malzemeler için, alüminyum nitrat (Al_2O_3), alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) veya silisyum karbür (SiC) malzeme ve içeriklerinden birisinin seçilmesi gerekmektedir. Seramikten oluşan katman mermiyi aşındırmada ve köreltmede, destek katman ise merminin ardında kalan kinetik enerjisini büyük ölçüde sönmlemede rol oynar [32].

4.5.1 Zırh Malzemelerinin Tasarımı

Zırh malzemeleri tasarımı yapılırken en dikkat edilecek önemli hususlardan bahsedelim;

Sistemin toplam sahip olduğu ağırlığı düşürmek için düşük yoğunluktaki malzeme seçimine özen gösterilmelidir. Meydana gelecek büyük deformasyonların önüne geçebilmek amaçlı yüksek kayma mukavemetine sahip olan malzemeler tercih edilmelidir. Zırhın amacına uygun olarak dayanımını sağlamak için yüksek akma mukavemetine sahip olmalıdır. Çarpma sonucunda meydana gelen gerilme dalgaları oluştuğu zaman malzemelerin kopmasını önlemek için yüksek dinamik çekme mukavemetine sahip olmalıdır. Ancak hiçbir malzeme bahsedilen bu şartları karşılayamamaktadır [33].

4.5.2 Zırh Çeşitleri

- Pasif zırhlar
 - Yumuşak zırhlar
 - Kevlar
 - Fiberglas
 - Polyester, naylon
 - Sert Zırhlar
 - Seramikler
 - Metaller
 - Kompozitler
- Aktif zırhlar
 - Patlayıcı
 - Akıllı
- Yeni konseptler
 - Nanomalzemeler
 - Biometrik malzemeler

4.5.3 Zırhlarda Plastik Performans

Merminin sahip olduğu şekil, zırh malzemesinin sahip olduğu sertlik ve tokluk değeri, kalınlığı, merminin hedefe çarpma hızı gibi fiziksel ve malzeme parametrelerine bağlıdır.

Merminin hızı 700 m/s'ye kadar olan hız düşük hız olarak tanımlanır ve yarı statik hasara yol açar. 3000 m/s üzerinde olan hız hiper hız olarak tanımlanır ve bu hızlarda gerilme dalgaları çatlak ilerlemesinden daha hızlı ilerler [33].

Savunma sanayinde kullanılan ileri kompozit malzemeler ve uygulama alanları farklılık göstermektedir

4.5.3.1 Sıvı Zırh

Genel olarak bahsedilen zırhlar katı formdadır. Ancak sıvı zırhlar normal koşullar altında sıvı formda olsalar bile vurulma anında sertleşirler. Bu zırhların normalde sıvı olması, kullanıldığı anda kişiye rahat hareket kabiliyeti sağlamak amaçlıdır. Bu sıvı malzemelere kesme gerilmesi altında sertleşen malzeme denir. Koruyucu zırh olarak tercih edilen bu sıvılar bıçak gibi keskin uca sahip malzemelerin darbelerine karşı da koruyucu bir özellik göstermektedir. Bu sıvı zırhın uygulamada kullanılmasındaki en büyük sorunu ise raf ömrü belirlemektedir. Bu olumsuzluktan dolayı kullanım ömrünü geliştirmek amaçlı araştırmalar halen devam etmektedir [34].

4.5.3.2 Tank ve Hava Taşıtları İçin Zırhlar

Birçok kompozit malzemeler askeri taşıtlarda kullanılırken ağırlığı azaltır ve kalıcılığı artırır. 30mm kalınlığa sahip bir karbon fiber kompozit yapıdan imal edilen bir uçak gövdesi, sert çelikten elde edilmiş bir uçak gövdesine göre aynı tehditlere karşı göğüs germesine rağmen ağırlığı bu gövdeye göre %10 daha da hafif olmaktadır.

4.5.3.3 Askeri Taşıma Araçlarında Takviyelendirilmiş Termoplastikler

Askeri taşıma araçları gibi zırhlı araçlarda zemin ve yer panelleri gibi birçok bileşenlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan yapılardır. Bir kamyon ağırlığının yaklaşık % 45 ini oluşturur ve bu durum kompozit yapılara olan yönelme sebebini oluşturur. Tavan, kaporta, kapılar kompozit yapıların kullanımına uygun olan diğer yerlerdir. Polimer matrisli kompozit malzemeler, askeri araçlarda yapısal özellik göstermeyen kaporta parçalarında ya da tavan kaplamalarında tercih edilir. Sade çelik yerine alternatif olarak kullanılan fiber takviyeli kompozit elemanlar toplam ağırlığı %12 azalmasına yardımcı olabilir.

4.5.3.4 Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Yapılar

1972 yılında piyasaya çıkarılan kevlar, aynı ağırlığa sahip olan bir çelikten beş kat daha sağlam olma özelliği ile tanınır. Kevlar yanmaya karşı gösterdiği dirençle beraber erime ya da akmaya uğramamaktadır. Yüksek elastisite modülü, kimyasal etkilere karşı dayanım, üst düzey ısı özellik ve boyutsal sabitlik gibi avantajları nedeniyle günümüzde oldukça yaygın bir biçimde tercih edilmektedir. Bu özellikleri ile birlikte kevlar, gemi inşası, spor ürünleri, ısı dayanım gerektiren kıyafetler, yüksek hızda kullanılmak üzere imal edilen lastikler gibi günümüzde birçok alanların yanında çelik yelek olarak da bilinen kurşun geçirmez yelek, askerlerin kullandığı kask imalatı, zırhlı araç yapımında ya da hayati koruma gerektiren stratejik donanım kalkan imali alanlarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmakta ve tercih edilmektedir [34].

4.6 Mermi

4.6.1 Merminin Özellikleri ve Yapısı

Şu an kullanılmakta olan ve birçok amaca hizmet eden farklı özelliklerdeki mermiler, günden güne ilerleyen teknolojinin de yardımıyla birlikte hız, şekil, çekirdek yapısı gibi birçok özellikleri bakımından birbirlerinden çok farklıdır. Değişik tasarımdaki silahlar, amaçlar ve tahrip etme özellikleri doğrultusunda üretilmiştir [35].

Kinetik enerji ile güçlendirilmiş bir merminin temas edeceği hedef üzerindeki delici etkisi, merminin enerjisine, kütlesine, hedefe temas ettiği açığa ve mermi ile zırh malzemenin metalürjik yapısı gibi birçok etmene bağlıdır.

İmalat ya da tasarım sırasında balistik koruyucu malzemenin kendine ait özellikleri kadar, tehlike oluşturan mühimmata ait özelliklerinin de iyi derecede bilinmesi gerekmektedir. Merminin yapısal özelliklerine, uç geometrisine, merminin hızına, kaplama özelliğine ve çekirdek malzemesine bağlı olarak merminin temas ettirilmek üzere ateşlendiği hedefe penetrasyonu ve deformasyonu belirlenir [35].

4.6.2 Mermi Ağırlığı

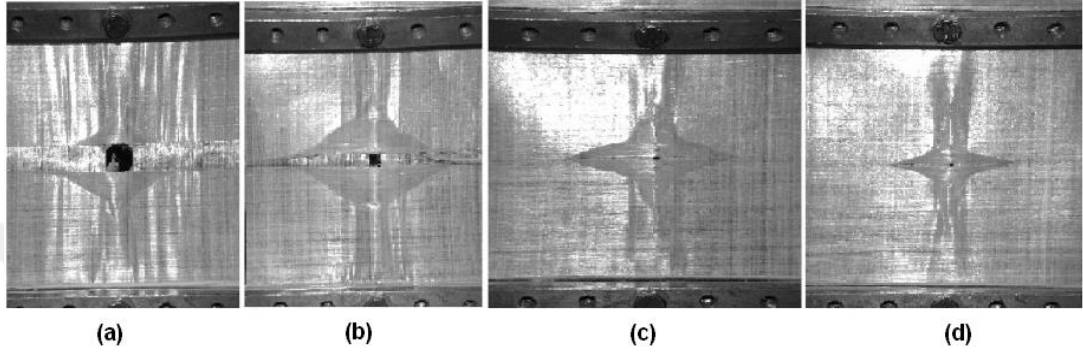
Malzeme türüyle bağlantılı ve ilişkili olarak merminin ağırlığı, çapının bir fonksiyonudur. Bir merminin ağırlığıyla doğru orantılı olarak hareket enerjisi de değişiklik göstermektedir.

4.6.3 Mermi Uç Geometrisi

Uç geometrisi yani merminin hedefe temas ederek tahrip ettiği uç tasarımı, kompozit yapının ya da plakanın delinmesinde önemli derecede etkili olan unsurların en önemlilerindedir. Yuvarlak bir uç geometrisine sahip olan merminin sivri uca sahip olan mermiler kadar seri ve hızlı bir şekilde durdurulamadığı, ayrıca kevlar kumaşların da yuvarlak uç geometrisine sahip olan mermilerin delik oluşturma yeteneğinin daha iyi olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiş ve gözlemlenmiştir. Bir merminin geometrisinin ve kütesinin özellikle yüksek derecedeki hızlarda darbe üzerine etkisi artış göstermektedir. Polimer matrisli elyaf takviyeli yapılarda keskin uca sahip (küt) bir merminin aynı balistik darbe hızlarında aynı kütleyle sahip olan ancak sivri uçlu mermilere nazaran hedefe doğru oluşan momentum transferinin yaklaşık dört katı daha büyük olduğu ve hedefe daha büyük zarar vererek daha büyük bir tahribata yol açtığı görülmüştür. Ancak sivri uca sahip olan mermilerin ise hedefi daha küçük bir çapla deldiği görülmüştür. Penetrasyon sırasında oluşan hasarın büyüklüğüne etki eden mermi geometrisinin delme enerjisine olan etkisi de büyüktür. Keskin kenara sahip olan mermiler yüksek hızlarda yapıyı esnetip uzatarak delme olasılığı beklenirken bunun yerine hedefi keserek delme eğilimindedir. Merminin çarpma hızı düşük olduğunda koruyucu yapı ya da hedef üzerindeki kaplama yapı geniş bir alana doğru buruşma yaparak gerilir. Bu olay, mermi üzerindeki enerjinin hedefte dağıtılmasına yardımcı olur. Ancak yüksek hıza sahip olan mermilerde oluşan darbeye fiberler yeterince enine doğru uzama göstermez ve delinme meydana gelir. Bu delinmenin olduğu alanda hasar bölgesi gözlenmez. Yüksek hızlarda sivri uçtan küt uca doğru merminin hızının yavaşlatılması daha kolay olmaktadır. Küt uca sahip mermiler temas yani hedefe vuruş sırasında daha çok iplik ile temas eder ve bu merminin bünyesinde barındırdığı enerjinin daha hızlı bir şekilde dağılarak yayılmasına yardımcı olur. Sivri uçlu ve konik uçlu mermiler ise daha az sayıdaki liflerle temas ederek sıyrılacağı için absorbe edilen enerjinin miktarı çok daha az

olacaktır. Kevlar ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemeler kullanılarak yapılmış olan deneylerde, yüksek hızlara sahip olan mermi çarpmasının fiberleri bıçak gibi kestiği ve yapının eridiği gözlemlenmiştir [35].

Farklı geometrilere ait mermilerin karbon elyaf takviyeli bir kompozit plakada oluşturdukları farklı deformasyonlar aşağıda verilmiştir [36].



Şekil 4.1 Kompozit plakada farklı geometrili mermilerin oluşturduğu deformasyon [36]

4.6.4 Mermi Çekirdek Sertliği

Mermi merkezleri yani çekirdekleri, çelik, bakır vb. malzemelerden kaplamasız olarak ya da pirinç gövdeli ve bu gövdenin üstüne çelik alaşımı, bakır alaşımı gibi metal kaplamalı olarak da imal edilmekte ve tercih edilerek kullanılmaktadır. Mermiler kullanılmak istenen amaçları doğrultusunda farklı alaşımlardan üretilmektedir. Polimer matrisli fiber takviyeli bir hedefe penetrasyon kabiliyeti değerlendirildiğinde ya da karşılaştırıldığında metal kaplamaya sahip olan mermi kabiliyeti kaplamasız bir mermi çekirdeğinden daha yüksek, ancak hedefin arkasında oluşturduğu çökme miktarı ise daha düşüktür [35].

4.6.5 Mermi Hızı

Merminin oluşturabileceği tehditin büyüklüğünü etkileyen en önemli parametrelerden birisi de merminin hızıdır. Merminin sahip olduğu hızın karesi ile doğru aynı oranda hareket enerjisi yani balistik koruyucu yapının mermiyi durdurup, merminin hızını sıfırlayabilmesi için soğurması gereken enerji miktarı artar. Ayrıca

merminin ağırlığı yani kütlesiyle doğru orantılı bir şekilde kütle arttıkça kinetik enerji artacak, bunun neticesinde absorbe edebileceği enerji miktarı da artacaktır [35].

4.6.6 Mermi Vuruş Açısı

Vuruş açısı namlu ile hedef arasındaki nişan hattı ile hedef normali arasındaki açı olarak tanımlanır. Elyaf dokuma yapıların 60°'lik mermi vuruş açısındaki göstermiş olduğu balistik direnci 90°'de gösterdiği balistik direncinden daha az iken, yüksek moleküler yoğunluğa sahip olan polietilen yapılarda daha yüksektir [35].

Mermiler ateş olarak gönderildikleri plakalara ya da hedeflere temas ettikleri andan duruncaya kadar bir erozyona ve deformasyona uğrarlar. Mermilerin hasara uğrama aşamaları genel hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

4.6.6.1 Merminin Hasara Uğrama Aşaması (İlk Aşama)

Kinetik enerjiye sahip olan bir mermi başlangıç aşamasında, kompozit plaka ya da katmanda penetrasyon oluşmadan merminin uç kısmı hasara uğrar ve kompozit plakada konik şekline benzer bir şekilde kırık bir yapı oluşur. Bu aşamada merminin darbe enerjisinden kaynaklı olarak şok dalgaları meydana gelir ve bu şok dalgaları plaka kalınlığı boyunca hareket eder. Bu şok dalgalar kompozit malzemenin arka kısmından çekme gerilmesi olarak yansır ve konik şekilde kırılmanın oluşmasına sebep olur. Kompozit plakada oluşan bu konik açılı mermi ve kompozit malzemenin elastik özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir [37].

4.6.6.2 Mermi Enerjisinin Absorbe Edilme Aşaması (İkinci Aşama)

Mermi enerjisinin absorbe edilme aşaması sırasında, mermi ile kompozit malzeme arasındaki etkileşim sonucunda meydana gelen basınç iki malzemenin de akma mukavemetinden daha yüksektir. Bu sebepten dolayı merminin dinamik akma ve kompozit penetrasyona karşı direncini gösteren iki sabit değeri düzenleyip değiştirerek hidrodinamik teoriyi geliştirmiştir. Eğer darbe basıncı merminin akma noktasını geçecek olursa mermi solid katı şeklinde hareket eder ve hidrodinamik

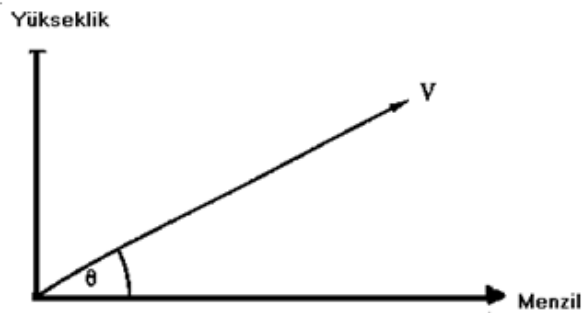
kurallara göre akışkan biçiminde tepki göstererek davranacaktır. Aynı şekilde hedef malzemede bulunan kompozit penetrasyon direnç değerine ulaşınca aynı kurallar yine geçerli olacaktır [37].

4.6.7 Mermi Hız Geometrisi ve Hareketine Etki Eden Faktörler

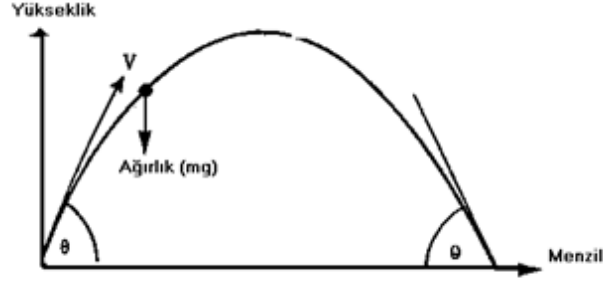
Bir mermi üretiminde dikkat edilecek diğer bir konu ise merminin hareketi boyunca etkili bir şekilde dengelenmesidir. Hedefe kadar düzenli bir şekilde uçuş için merminin dengede olması, dönme kazandırılarak ve mermiye kuyruk takılarak gerçekleştirilmektedir [38].

4.6.7.1 Yerçekimli Ve Havasız Ortamda (Boşlukta) Mermi Hareketi

Başlangıç hızı V ve θ açısına sahip bir şekilde fırlatılan mermi Newton'un birinci kanununa göre dışarıdan herhangi bir kuvvet etkisinde olmaz ise başlangıç hızını ve yönünü koruyarak hareketine devam edecektir (Şekil 4.2). Ancak yerçekimi kuvveti neticesinde mermiyi dünyanın merkezine doğru çeken bir etki kuvveti vardır (Şekil 4.3). Etki eden yer çekiminin etki değeri yükseklik ile bağlantılı olarak farklılık göstermektedir. Ancak yükseklik kazanamayan silahlar, kısa menzilli silahlar ya da tank topu mühimmatları gibi atışlar için yerçekimi ivmesini sabit olarak kaldığı ($g=9,81\text{m/s}^2$) kabul edilmektedir.



Şekil 4.2 Newton'un Birinci Kanununa Göre Hareket



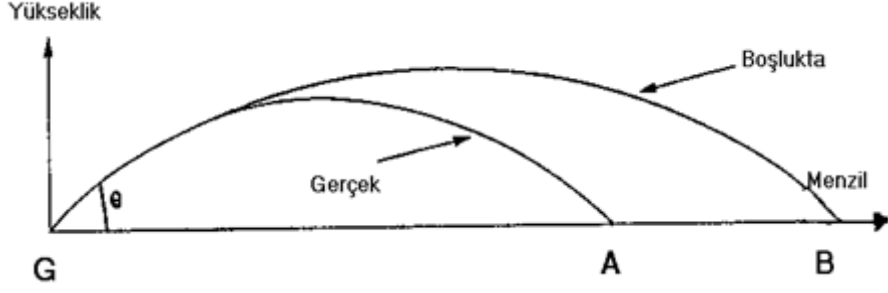
Şekil 4.3 Boşlukta Fakat Yerçekimi Etkisindeki Mermi Yolu

4.6.7.2 Boşlukta Ancak Yerçekimi Kuvveti Altındaki Merminin Hareketi

Merminin erişebileceği nokta, merminin ilk hızına bağlıdır ve yükseliş açısı 45 dereceye yaklaştıkça artmaktadır. Vuruş açısı yükseliş açısına, vuruş yapıldığı andaki ilk hıza eşittir. Tepe noktasındaki hız değeri dikey bileşeni olmadığı yani sıfır olduğundan dolayı minimum değerindedir. Sabit hıza sahip olan mermilerle yapılan atışlar sonucunda en fazla menzile 45°lik bir açıyla yapılan atışta ulaşılmaktadır. Yörünge merminin yapısına ve şekline bağlı değildir çünkü uçuş boyunca hava direnci sıfırdır. 45°lik açının üzerinde bir açıyla mermi atılırsa menzil mesafesi azalmakta ve 90° için menzil mesafesi sıfır olmakta ancak maksimum yükseklik ve maksimum uçuş süresi bu açıda elde edilmektedir. Bu uçuş modeli, çok yüksek irtifada kullanılan mermiler için olduğu gibi düşük hıza sahip olan ve ağır kütleli mermiler için de doğruya oldukça yakın sonuçlar verebilmektedir. Yerçekimi kuvveti altında boşlukta olan mermilerin hareketi oldukça basit görünmesine rağmen, gerçekte uçuş yörüngesine etki eden birçok kuvvet vardır [38].

4.6.7.3 Yerçekimi Ve Hava Direncine Maruz Kalan Merminin Yörüngesi

Uçuş yörüngesi simetrik değildir, tepe noktası vuruş noktasına çok daha yakındır. Tepe noktasının yükseklik değeri boşluktakine kıyasla çok daha düşüktür. Vuruş açısının başlangıçtaki yükseklik açısının değerinden daha yüksektir. Namlunun ağzından çıkan hız vuruş hızından daha yüksek değerdedir. Merminin tepe noktasından aşağı yönde plan düşüş süresi, buraya kadar geçen yükseliş zamanından çok daha fazladır.



Şekil 4.4 Yerçekimi Ve Hava Direnci Etki Ederken Gerçek Mermi Yolu Yörüngesi

4.6.8 Hava Direnci

Mermi menziline hava direnci tarafından kısıtlandığı Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Bir merminin balistik performansını anlatmanın yolu o mermiye ait olan bir hava direnç katsayısı tanımlamaktır. Hava direnci birçok değişik parametreye ayrılabilir. Fakat toplam hava direnci aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [38].

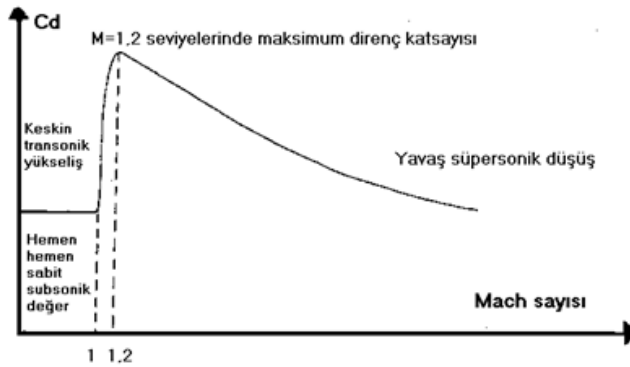
Hava Direnç Kuvveti: $\rho V^2 A C_d / 2$

ρ : Hava yoğunluğu

V : Mermi hızı

A : Mermi kesit alanı

C_d : Direnç katsayısı



Şekil 4.5 Hıza Göre C_d Katsayısı Değerinin Değişimi

C_d katsayısı 0 ile 2 arasında değişmektedir. Klasik mermi şekline sahip mermilerde bu değer genellikle 0,3'lük bir C_d katsayısı değeri kabul edilmesine karşın, eğitim topu gibi küt burun şekline sahip olan mermiler için C_d değeri 0,8 olarak tanımlanmaktadır. C_d katsayısı değeri azaldıkça ilk başlangıçtaki hız değerinde ve menzildeki azalma miktarı da orantılı bir şekilde düşecektir. 300 m/s altında ve 1500 m/s üstündeki hızlarda C_d değeri değişmez sabittir (Şekil 4.5'de görüldüğü gibi) ve hava direnç kuvvet değeri mermi hızının karesi ile doğru orantılıdır. Merminin havada yol alması, havanın yer değiştirmesi sonucunu doğuracaktır. Havanın yer değiştirmesi için gerekli olan enerji merminin sahip olduğu kinetik enerjinin azalmasına sebep olacaktır. Sürekli olan bu enerji kaybı hava direnci olarak tanımlanır ve bu hava direnci mermi hızının da sürekli olarak düşmesine neden olmaktadır. Mermide meydana gelen hava direnci dört etken olarak aşağıda açıklanmıştır [38].

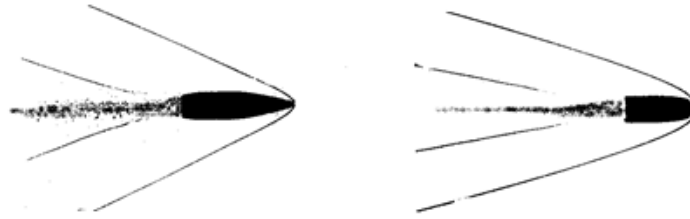
4.6.8.1 Mermi Burun Direnci

Merminin ilerlemesi sırasında merminin hemen önünde hava sıkışacaktır ve bu meydana gelen hava sıkışması çevreye bir basınç dalgası olarak iletilmektedir. İletilen bu basınç dalgası ses hızında ilerleyen bir karışıklığa sebep olmaktadır. Merminin hemen önünde sıkışmadan kaynaklı oluşan bu karışıklıklar beraberinde burun direncini meydana getirmektedir. Mermi doğrultusunda ilerlerken ses hızının (normal koşullarda 340 m/s) altındaki bir hıza sahip ise bu karışıklık mermiden daha hızlı hareket ederek mermiyi terk edecektir ancak sesten hız bir mermi ise ses hızında hareket eden bu karışıklıkların hiçbiri mermiden ayrılamayacak yani kaçamayacaktır. Bahsedilen bu karışıklıklar birleşerek ve merminin önünde şok dalgası oluşturacaktır (Şekil 4.6). Sıkışmış olan bu dalgaların şok cephesi şeklinde oluşması, merminin daha yoğun bir burun direnciyle karşılaşmasına neden olmaktadır. Ses hızının üzerindeki bölgede burun direnci oldukça fazla öneme sahiptir.



Şekil 4.6 Ses Hızı Altı (Solda) ve Ses Hızı Üstü Bölgede (Sağda) Hava Sıkışması Sonucu Oluşan Basınç Dalgalarının Hareket Tarzları

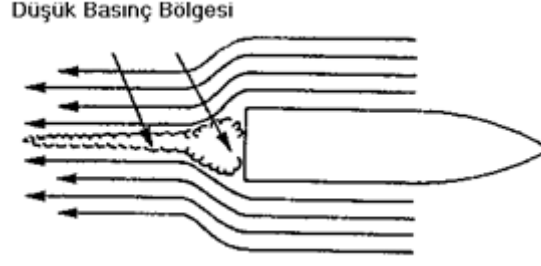
Keskin uç geometrisine sahip olan mermilerde çok dalgası merminin hemen ucunda meydana gelmekte ve bu şok dalgası mermiye bağlanmaktadır. Küt burunlu uç geometrisine sahip olan mermilerde ise şok dalgası mermi burnunun biraz ilerisinde ve mermiden ayrı olarak meydana gelmektedir (Şekil 4.7). Mermi ucunun kütlük derecesi arttıkça hava direnci de doğru orantılı olarak artmakta ve menzil mesafesi kısalmaktadır [38].



Şekil 4.7 Sivri ve Küt Burunlu Mermilerde Şok Dalgası

4.6.8.2 Mermi Taban Direnci

Uçuş sırasında merminin taban kısmında önemli büyüklük ve derecelerde türbülans oluşmaktadır. Merminin hızlı hareket etmesinden kaynaklı hava, merminin alt yani taban kısmını tamamen dolduramayabilir. Bundan kaynaklı mermi tabanında harekete zıt olarak yansıyan bir vakum etkisi yani direnç oluşmaktadır. Bu emme etkisi mermi üzerinde geriye doğru çekme etkisi oluşturmaktadır yani mermi hızını azaltarak mermiyi yavaşlatmaktadır. Bu olay mermi taban direnci olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 4.8 Mermi Taban Direnci

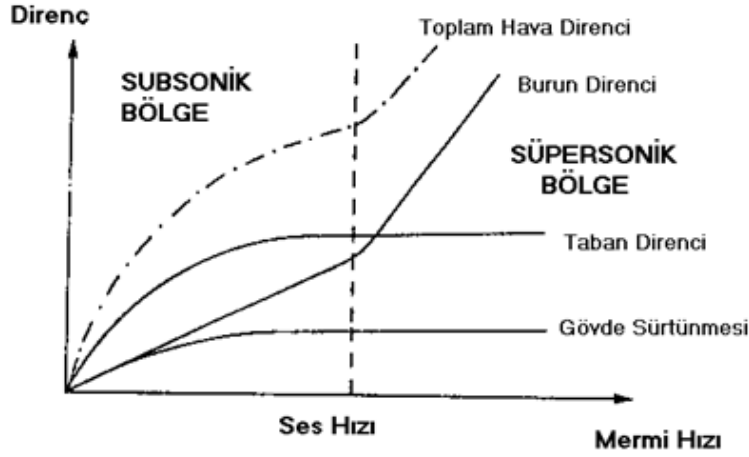
4.6.8.3 Gövde (Yüzey) Sürtünmesi

Merminin hareketine ek olarak başka bir direnç de mermi yüzeyini kavrayan havanın meydana getirdiği yüzey sürtünmesidir. Merminin yüzeyiyle sürekli temas halinde olan hava, mermi ile aynı hızda ilerlemeye gayret eder. Ona yakın olan dış tabaka daha az hızda, onun da daha dışındaki hava tabakası ise biraz daha düşük bir hızla sahip hızla yol almaktadır. Bu şekilde meydana gelen sürtünme direnci genel olarak birçok mermi için olabildiğince düşüktür fakat büyük çaplı uzun roket mermileri için mutlaka değerlendirilmeye alınmalıdır. Düzgün ve parlak yapıdaki bir dış yüzey, bu tür havaların meydana getireceği direnci önemli derecede indirgeyecektir [38].

4.6.8.4 Fazlalık Direnci

Fazlalık direnci olarak belirtilen kavram merminin çıkıntılı bölümlerinden oluşan ve bu çıkıntıların kaldırılmasıyla minimum düzeye indirilebilen bir hava direnci çeşididir. Bir merminin bünyesinde barındırdığı uçuş hızı düzeyine göre bahsedilen bu hava direnci şekilleri aşağıdaki Şekil 4.9'da incelemeye alınmıştır. Bahsedilen bu şekilde de görüldüğü gibi merminin sahip olduğu hız arttıkça burun direnci de aynı oranda artmaktadır. Ses üstü bölgede ise hızlı bir yükseliş söz konusu olmaktadır. Fazla orandaki bu artış miktarı bir süre devam etmekte ve hız artışı devam ettikçe burun direnci olarak tanımlanan değerde bir artış azalmaya meyil etmektedir. Hız arttıkça taban direnci de aynı doğrultuda ses üstü bölgesine kadar artmaktadır. Ancak bu seviyeden itibaren değişmemekte yani sabit kalmaktadır. Bunun nedeni mermi

hızı ses hızına yaklaştıkça merminin tabanında oluşan direnç hemen hemen sıfır olmaktadır, sıfıra yaklaşmaktadır. Toplam direnç üzerinde gövde sürtünmesinin etkisi oldukça azdır. Gövde sürtünmesinden kaynaklı hava direnci ses hızına kadar bir artış gösterir ancak daha sonra sabit bir değerde kalmaktadır [38].



Şekil 4.9 Mermi Hız Düzeyine Göre Hava Direnç Çeşitlerinin Değerlendirilmesi

Ses altı hız bölgesinden ses üstü hız bölgesine doğru olan geçiş aşamasına transonik bölge denir ve bu bölge hava direnci açısından oldukça önemlidir. Ses hızı civarında hava direnci çok hızlı bir şekilde değişiklik gösterdiği için merminin hareketi yeteri kadar sağlıklı bir şekilde öngörülememektedir. Özellikle burun direnci bakımından bu bölgede gerçekleşen mermi hızındaki küçük değişiklikler, dirençte büyük değişiklik ile sonuçlanacaktır. Bu gibi sebeplerden dolayı mermi bu bölgeye girerken dengede olması gerekmektedir [38].

4.7 Deformasyon

Makine sistemlerinde, yeryüzünde, köprü, baraj, stadyum gibi mühendislik yapılarında kalıcı ve geçici şekilde farklılık gösteren şekil değişimlerine deformasyon denir. Deformasyonların durumunun belirlenmesi amacıyla yapılan araştırma ve ölçümlere deformasyon ölçmeleri denir. Değerlendirme sonucunda elde edilen bu ölçüm sonuçlarının yorumlanmasına ise deformasyon analizi denir [39].

Fiziksel değişimlere sebep olmaları bakımından deformasyon analizlerini iki gruba ayırmak mümkündür.

Cisme etki eden kuvvet ya da kuvvetlerin ortadan kalkması ile şekil değişiminin de ortadan kalktığı eğilme, burulma gibi esnek deformasyonlar gibi diğer bir değişle ile cisme etkiyen kuvvet kaldırıldığında cisim kuvvet uygulanmadan önceki halini alıyorsa bu şekilde oluşan deformasyonlara elastik deformasyon denir.

Cisme etkiyen kuvvet ya da birden fazla kuvvetin ortadan kalması neticesinde, nesnenin önceki konumuna dönemediği çökme, yükselme, öteleme, dönme, açılma, kapanma, genişleme, daralma gibi, oluşan deformasyonlar kalıcı yani plastik deformasyondur. Yani plastik deformasyonda kuvvet cisim üzerinden kaldırıldığında cisim eski şeklini almayacaktır [39].

4.8 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık geometriye sahip olan fiziksel sistemlerin tamamını bir sistem gibi ele almaktansa bu sistemi ele alması daha basit olan elemanlara bölüştürerek ele almak doğrultusunda tercih edilen bir metottur incelenmesi daha kolay olan bu elemanlar sonlu elemanlar olarak tanımlanır. Mühendislik çözümlenmeleri ve uygulamalarında karşılaşılan çoğu problemler birçok zaman doğrudan ve net bir şekilde çözüme ulaştırılamayabilir. Çözüme basit bir şekilde ulaşılamayan bu problemler, çözümünün daha kolay ve pratik olan alt kısımlara bölüştürerek daha kolay bir hale getirilerek çözülmeye çalışılır. İndirgenerek ele alınacak olan bu alt problemler çözülür ve daha sonra birleştirilerek ana problemin çözümüne ulaşılabilir. Karşılaşılan sorunun tam anlamıyla çözümü yerine makul görülebilir bir seviyede yakın sonucu kabul görülür. Bazı problemlerle karşılaşılır ki, bu problemlerin çözümünde yaklaşık olarak elde edilecek olan çözüm tek yol olarak kabul edilir. Örnek olarak, gerilme analizine yönelik araştırmalar yapıp çalışan mühendisler gerilme problemini geometrisi belli, basit ve bilinen küre, silindir gibi yakın cisimlerle sınırlandırılır ve kabul ederler. Bu çözümler çoğu kez gerçek ya da problemlerin yaklaşık olarak çözümü olarak kabul edilir [40].

Sonlu Elemanlar Metodu; nümerik bir uygulama olup, daha çok titreşim, katı mekaniği, ısı transferi ve akışkanlar mekaniği gibi karşılaşılan sorunların bilgisayar sistemi kullanılarak çözümünde sıkça tercih edilen oldukça ilerlemiş bir tekniktir. İngilizcesi "Finite Elements Method" yani FEM olan Sonlu Elemanlar Metodunda sistem ya da mekanizmalar sonsuz değil, sonlu sayıda elemanlara parçalanır. Bölünmüş olan bu sonlu sayıdan oluşan elemanlar belirli noktalardan birbirleriyle temas ettirilerek bağlantı kurulur. Kurulan bu bağlantılara düğüm denir. Katı modellerde meydana gelen bütün elemanlarda oluşan yer değiştirmeler doğrudan doğruya düğüm noktalarında meydana gelen yer değiştirmelerle doğrudan ilişkilidir. Düğüm noktalarında meydana gelen yer değiştirmeler ise elementlerin gerilmeleriyle alakalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ile bahsi geçen düğümlerde oluşan yer değiştirmeleri çözmek amacıyla çalışır ve kullanılır. Bu şekilde gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit olarak bulunur ve değerlendirilir [40].

Sonlu elemanlar metodunun ve bilgisayar kullanımlarının sanayide kullanılmasıyla, bugünlere kadar sadece yüksek maliyete sahip olan deneysel yöntemler kullanılarak incelenebilen ve araştırılabilen birçok makine elemanının yapısal analizini çok daha kısa bir sürede gerçekleştirip, en uygun imalat dizaynını gerçekleştirmek mümkün hale gelebilmektedir [41].

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak 1950'li yılların başlarında, uçakların kanadında meydana gelen gerilmenin analizini gerçekleştirmek için havacılık endüstrisinde kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda ise bu metodun matematiksel temellerin oluşturulma temelleri atılmış ve çeşitli mühendislik alanlarında avantajları olmasıyla her geçen gün hızlı bir şekilde artarak tercih edilmeye ve yaygınlaşmaya başlamıştır. Sonlu elemanların ilk terimi (Finite Element) 1960 yılında kullanılmıştır. 1960 yılında bilim adamı olan Clough tarafından kullanılmıştır. 1970 yıllarının başlarında bu sistem özel bilgisayarlarda uygulama fırsatı ve olanağı bulmuştur. Yaklaşık on yıl sonrasına yaklaşırken mikro boyuttaki sistemlerin geliştirilmesi ve kullanımıyla bu metodun kullanılması daha da yaygınlaşmıştır. 1990'lı yılların başlarında ise büyük ölçekli sistemlerin çözümlere ulaşabilme ve değerlendirilme şansı imkânlar içinde olmuştur.

Sonlu elemanlar metodu şuan kullanılan bilgisayar destekli tasarım sistemleri ile uyumlu hale getirilerek gerilme, ısı ve sıcaklık değişimi, manyetik, biyomedikal,

tarım araçlarının kullanılması gibi birçok alanda kendine sıkça uygulama ve değerlendirilme alanları bulmaktadır [41].

Sonlu elemanlar metodunun kullanıldığı alanlar;

- Yapı mühendisliğinde: Plak, levha, çubuk ve kabuk sistemlerinin analizinde,
- Zemin mekaniğinde: Yer sistemlerinin gerilme analizlerinde, köprülerde, dağlar arası açılan tünellerde ve enerji elde etmek amaçlı kullanılan barajlarda,
- Hidrolik sistemlerde: Viskoz akımda, sürtünmeye sahip olan maddelerinin iletilmesinde,
- Isı transfer sisteminde: Isı ya da sıcaklık iletiminde, ısı akımının iletilmesinde,
- Nükleer enerji sisteminde: Bir reaktörün dinamik analizinde, ısı akışında,
- Elektrik mühendisliği alanlarında: Devre sistemlerinde, manyetik potansiyel enerjinin ayrımında kullanılabilir [41].

Analitik metotlara göre;

- İncelenmekte olan yapıya ait çok daha fazla bilgi verebiliyor olması,
- Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan sistemlerin göreceli, kolay bir şekilde çözümüne imkan vermesi,
- Bilgisayar destekli tasarım sistemleriyle birliktelik içinde uyumlu çalışarak henüz tasarım ve araştırma sırasında iken bile yapının değerlendirme, irdeleme ve optimizasyonuna olanak sağlaması,
- Oldukça karmaşık yapıya sahip olan sistemlerde hesaplama süresinin kısaltılması, gibi avantajları nedeni ile metot günümüzde oldukça sık bir şekilde kullanılmaktadır [41].

ANSYS Workbench ortamı model dizayn ile kullanılan sezgisel bir ön sonlu eleman analiz aracıdır. ANSYS Workbench, termal, yapısal elektromanyetik vb. gibi bünyesinde bulundurduğu birçok analizi yapmak için kullanılan bir yazılım ortamıdır. Optimizasyon, geometri oluşturma, program dışarısında bulunan mevcut geometriyi ekleme, sonlu elemanlar modelini (yöntemini ve metodunu) ayarlama, çözmek için çalışır ve nihayetinde ulaştığı sonuçları incelemeye odaklanır [42].

4.8.1 Sonlu Elemanlar Metodunda Önem Gösterilmesi Gerekli Hususlar

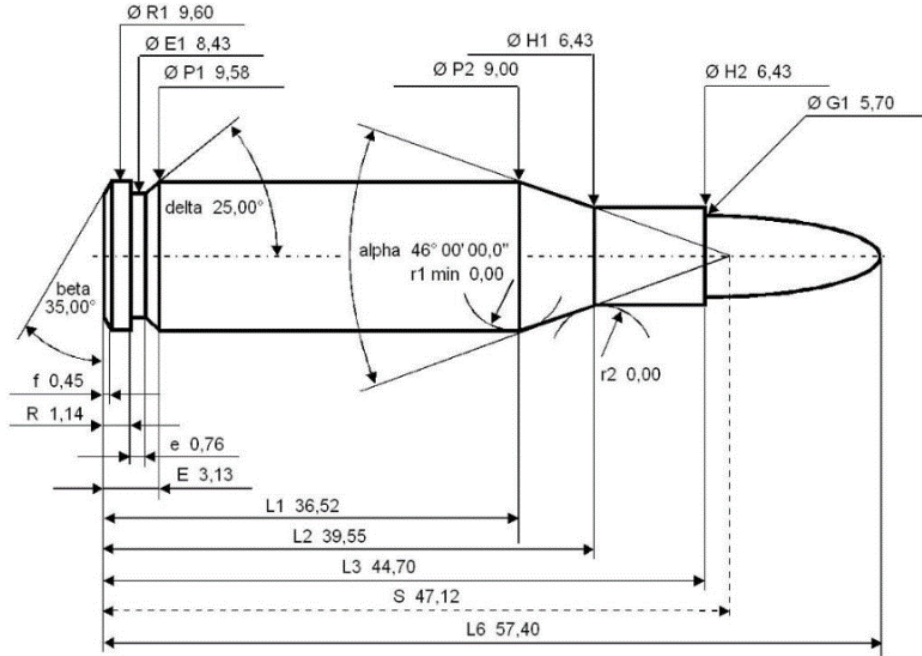
- Sonlu elemanlar metodunda sistemin fiziki yapısına göre oldukça farklı şekiller tercih edilebilir (silindir, beşgen, piramit vb.). Problemin çözümüne bağlı olarak eleman tipi oldukça önem kazanmaktadır. Çünkü eleman tipi, yapılabilecek hata miktarının derecesinde büyük etki göstermektedir.
- Üçgen elemanlardan meydana gelmiş bir sistemde meydana gelebilecek dörtgen elemanda küpüyle doğru orantıya sahip iken, üçgen elemanın sahip olduğu boyutun karesiyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Kısacası üçgen eleman şekline sahip olan sistemdeki hata, dörtgen elemandaki hatadan daha fazladır.
- Seçilen elemanın tipinde belirlenen düğüm sayısı büyük önem taşımaktadır. Örnek olarak, lineer bir kübik üçgen elemanda yapılabilecek bir hata, üçgen elemanda yapılabilecek bir hatadan çok daha azdır. Bu da sistemin ya da elemandaki düğüm sayısının önemini net bir şekilde ortaya koymaktadır.
- Sistemdeki eleman sayısı arttıkça çözüme yaklaşım oldukça artış göstermektedir. Bu sebepten dolayı ortamın eleman sayısı olabildiğince fazla olmalıdır.
- Elemanların sıklığı da oldukça önem arz etmektedir. Örneğin malzemenin bir bölgesinin analizi çok daha önemli olabilir. Böyle bir durumda o bölgedeki elemanlar daha sıkı tutulup, diğer kısımlarda eleman sıklığı seyrekleştirilebilir [43].

5. MATERYAL VE METOT

Bu tezde farklı kalınlıklara sahip ve farklı plakalara, sabit hızla (914 m/s) atışlar yapılmıştır ve plakaların sabit hız altındaki deformasyonları sayısal olarak incelenmiştir. Merminin, silahın ağzından ilk çıkış hızı olan 914 m/s hızla plakalara gönderilmesi için mermi ile plaka arasındaki mesafe oldukça minimal seviyede tutulmuştur. Yapılan değerlendirmelerde mermi ile plaka arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0 mm olarak belirlenmiştir. Plakaların kalınlıkları 3 mm, 10mm ve 20 mm olarak değişkenlik göstermiş olup, sabit hız altındaki mukavemetleri yani mermiye dayanımları irdelenmiş, malzemelerin mermiye olan dayanımları için kritik kalınlıklar belirlenmiştir. Plaka boyutu yapılan her deneme için 80mm x 80mm ölçülerinde sabit tutulmuştur. Plakalarda farklı özelliklere sahip olan 4340 Çelik, Ti6Al4V ve Epoksi Karbon malzemeleri kullanılmıştır. Bu malzemeler normal özelliklerine sahip bir şekilde analizlerde kullanılmış olup ısıl işlem gibi herhangi bir işleme maruz bırakılmamıştır. Plakaların kritik kalınlıkları belirlendikten sonra ise dayanımının, kalınlığının ve kullanımının en iyi optimal özelliklere sahip olması için yine farklı kalınlıklara ait olan sandviç yapılar kullanılmıştır. Sandviç yapının kullanılmasının en önemli nedeni, plakaların mermiyi geçirmemesi için gerekli olan kalınlıklarının yüksek olmasıdır. Bu da kullanılan yerlerde ağırlık oluşturarak ergonomiden uzak bir yapıya neden olacaktır. Ağırlığın önüne geçmek ve kullanım açısından daha ergonomik bir malzeme için sandviç yapı analizleri yapılmıştır. Belirtilen bu analizleri yaparken mermi, plaka ve sandviç yapıların üç boyutlu çizimleri Solidworks programında yapılırken, analiz ve değerlendirme aşamaları için ANSYS programı kullanılmıştır. Yapılan her deneme numaralandırılarak kendi içerisinde ve birbiriyle değerlendirilmiştir.

Mermi analizlerinde 5.56 mm NATO standartlarında mermi kullanılmıştır. Ölçü ve özellik değerleri de bu doğrultuda dikkate alınmıştır. Sandviç yapı imalatında her plaka arasına yapıştırıcı kullanılırken burada yapmış olduğumuz analizde her plaka arasına 0,001 mm değerinde bir boşluk bırakılmıştır. İmalat sırasında kullanılan yapıştırıcının mermi analizinde deformasyona karşı gösterdiği direnç ihmal edilerek sistemlerin analizi gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde kullanılan Ti6Al4V malzemesinin yoğunluğu $4,41\text{g/cm}^3$, 4340 çelik malzemesinin yoğunluğu $7,83\text{ g/cm}^3$ ve Epoksi Karbon malzemesinin yoğunluğu ise $1,48\text{ g/cm}^3$ 'dür. Epoksi Karbon, roket sistemlerinde, uydularda, uçak imalatı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanıldığı için analizlerde tercih edilen bir malzeme olmuştur. 4340 çeliği otomobil ve motor yapımında, krank mili gibi dayanımın oldukça yüksek olmasının amaçlandığı alanlarda kullanıldığı için analizlerde tercih edilen bir diğer malzeme olmuştur. Ti6Al4V malzemesi ise sembollerinden anlaşıldığı üzere %6 Alüminyum ve %4 Vanadyum içeren, çekme dayanımı 900-1100 MPa, akma dayanımı 830 MPa ve Rockwell sertlik derecesi 36 olan dayanımı yüksek ve zırh malzemesi için kullanılabilir bir malzeme olduğu için analizlerde kullanılan üçüncü malzeme olmuştur.



Şekil 5.1 Analizlerde kullanılan ve çizimi yapılan mermi ölçülendirmesi

5.1 Teknik Bilgiler

Kalibre	5,56 mm x 45 NATO
Uzunluk	920 mm
Uzunluk (geri çekilebilir stok ile)	740 mm
Namlu Uzunluğu (Flaş baskılayıcısı hariç)	390 mm
Yiv Sayısı	6
Şarjör Kapasitesi	30 mermi

5.1.1 Ağırlık

Silah Ağırlığı (Şarjör hariç)	3,90 kg
Stoklu Silah Ağırlığı (Şarjör hariç)	4 kg
Çelik Şarjör Ağırlığı (30 mermi, boş)	0,27 kg

5.1.2 Görüş

Görüş	Ayarlanır Görüş Mesafesi 200,300, 400
Görüş Yarıçapı	480 mm

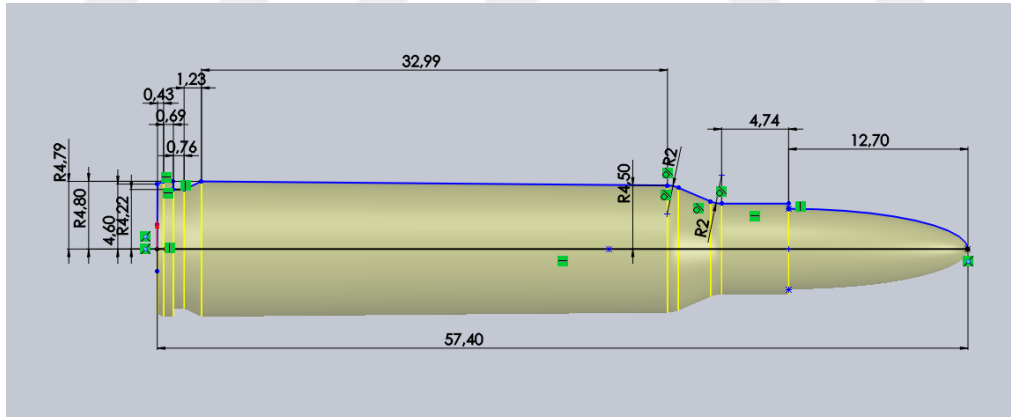
5.1.3 Ateşleme Karakteristiği

Namlu Çıkış Hızı	885 m/sn
Namlu Enerjisi	1580 J
Ateşleme Türü	Yarı otomatik ve tam otomatik güvenlik / yarı otomatik / 3. patlama / tam otomatik
Ateşleme Hızı	750 mermi / dakika
Maksimum Mesafe	3800 m
Etkili Menzil	600 m (teleskopik görüş ile)

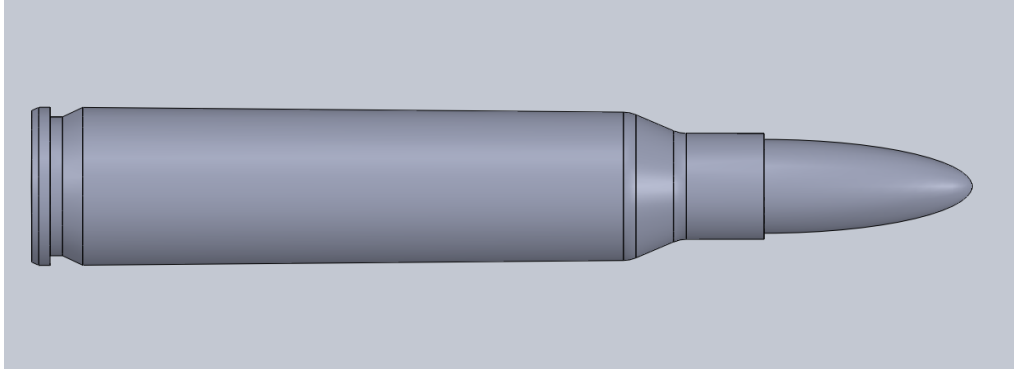
5.2 Fişegin Malzeme ve Teknik Özellikleri (5,56 Mmx45 (Ss109/M855))

Şartname	STANAG 4172, AEP-97 EDITION A
Fişek Boyu	57,4 mm
Fişek Ağırlığı	~12,5 g
Hız (23,7 M)	914,4 ±12,2 m/s
Mermi İrtibat Kuvveti	Min 20,4 kgf
Kovan Model Numarası	5,56 mm x 45 KOVAN
Kovan Malzemesi	PIRİNÇ (CuZn28 veya CuZn30)
Mermi Malzemesi	TOMBAK, ÇELİK ÇEKİRDEK VE KURŞUN ÇEKİRDEK (KURŞUN-ANTİMON ALAŞIMI)
Kapsül	5,56 mm KAPSÜL, BOXER
Barut	KÜRESEL BARUT
Kullandığı Silah	M 16A2, HK 33 E, MINIMI vs.
Ambalaj	30 FİŞEK BİR MUKAVVA KUTUDA, 15 MUKAVVA KUTU BİR PVC POŞETTE, 5 PVC BOŞET 1 TAHTA SANDIKTA VE 30 TAHTA SANDIK 1 PALETTE (TOPLAM 67500 ADET FİŞEK)

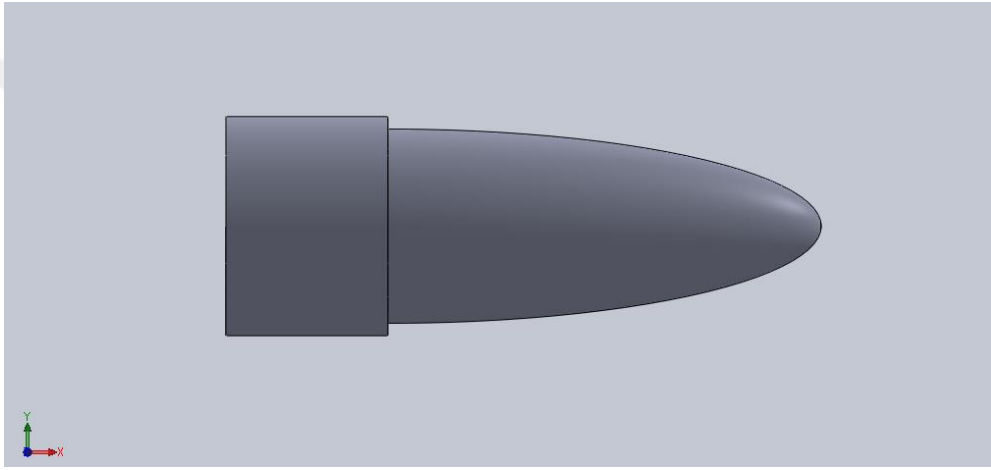
Nato Stok Numarası	1305 27 017 9197 (Mukavva Kutulu)
Dağılım (100 M)	Sx ve Sy max. 2,2 cm
Mayon Tipi	M27 MAYON
Aksiyon Zamanı	Max 3 ms
Mermi Ağırlığı	4 g
Zırh Delme	Mermilerin en az %90'ı 570 metre mesafedeki 3,5 mm kalınlığındaki çelik plakayı (SAE 1010 veya 1020) tamamen delmektedir.
Ortalama Namlu Basıncı	Min 1030 bar (Port – 3s)
Ortalama Kovan Ağız Basıncı	Max 4450 bar (P + 3s)
Balistik Katsayı	0,35 (G1)
Nato Tasarım Numarası	AC/225 – 141 A



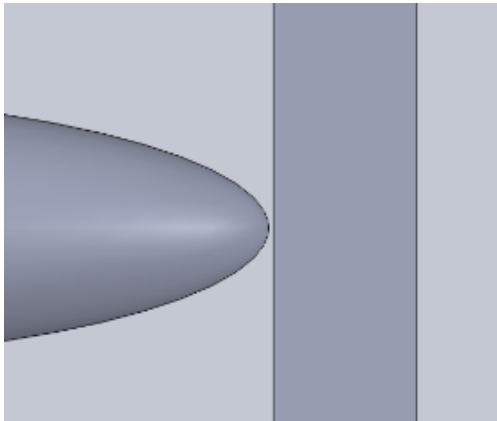
Şekil 5.2 Solidworks programında ölçülendirilmiş mermi çizimi



Şekil 5.3 Solidworks programında çizilmiş merminin görseli



Şekil 5.4 Merminin kovandan çıktıktan sonra hedefe temas eden çekirdek görseli



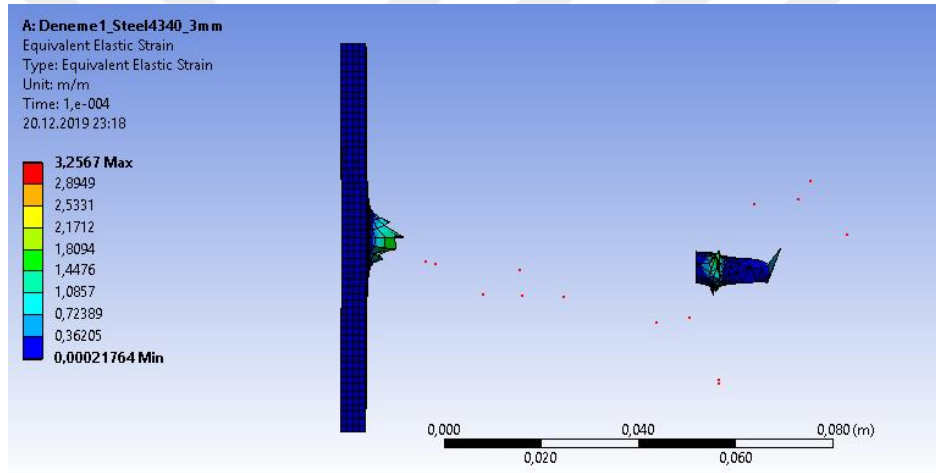
Şekil 5.5 Analizlerde kullanılan mermi ve plakanın şekilsel görseli

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

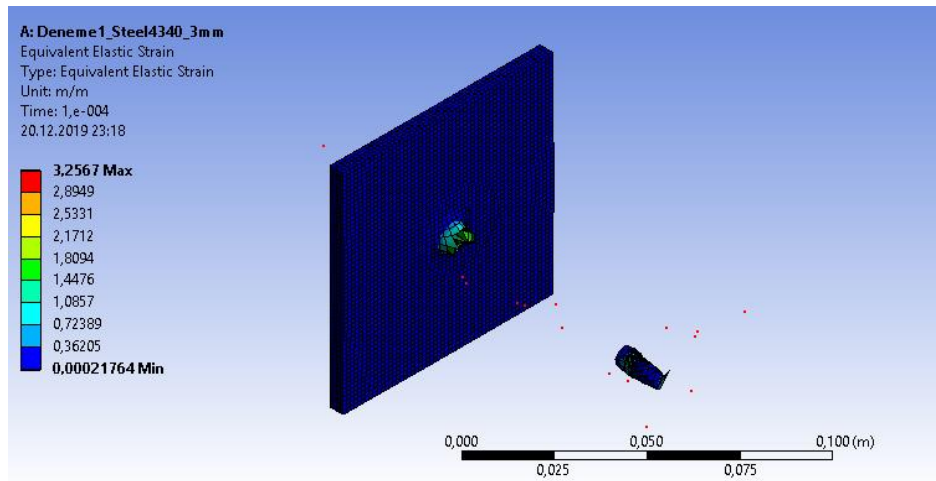
6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapılan Analizler

6.1.1 Deneme 1

Deneme 1 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 3 mm olarak belirlenmiş düzende plaka malzemesi olarak 4340 çelik kullanılmıştır. ANSYS ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 3 mm kalınlığa sahip olan plakayı kolaylıkla geçmiştir. Mermi plakadan rahatlıkla geçerken çok fazla bir deformasyona uğramamış ve hızının çok az bir kısmını kaybederek yoluna devam etmiştir.



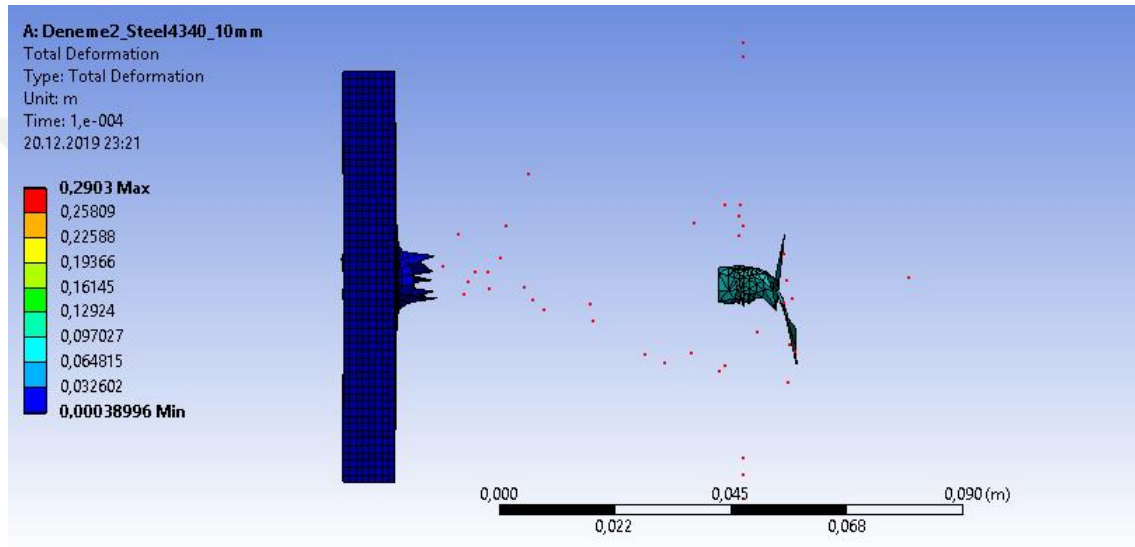
Şekil 6.1 3 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



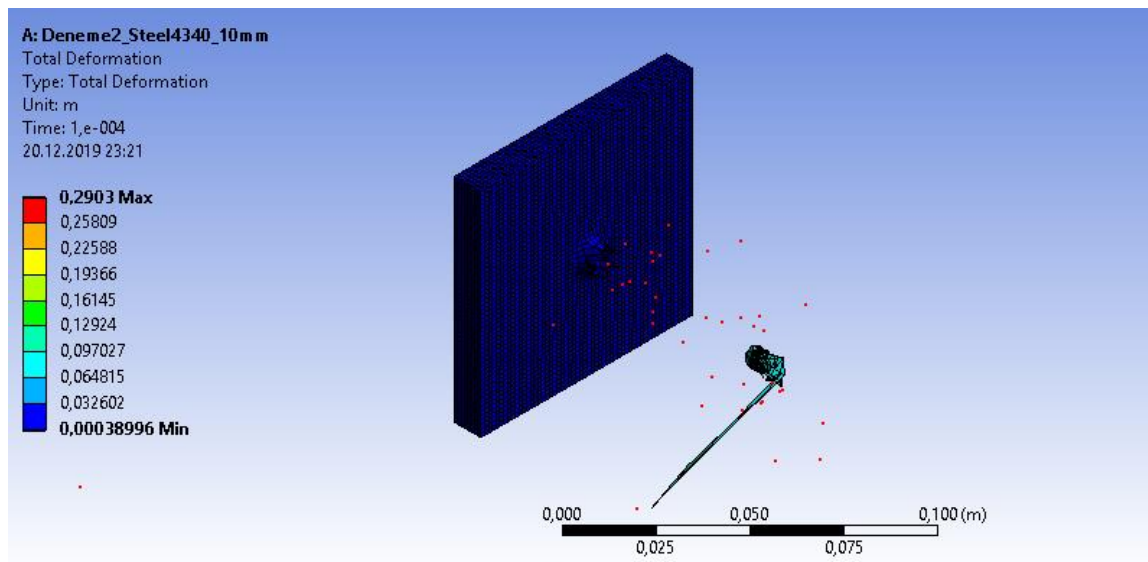
Şekil 6.2 3 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

6.1.2 Deneme 2

Deneme 2 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 10 mm olarak belirlenmiş düzenekte plaka malzemesi olarak 4340 çeliği kullanılmıştır. Ansys ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 10 mm kalınlığa sahip olan plakayı da kolaylıkla geçmiştir. Bu aşamada mermi 3 mm kalınlıktaki gibi durumunu çok fazla muhafaza edememiş ve uç kısmında deformasyona uğramıştır. Hızının bir kısmını plakaya bırakan mermi, plakayı terk ettikten sonra yoluna devam etmiştir.



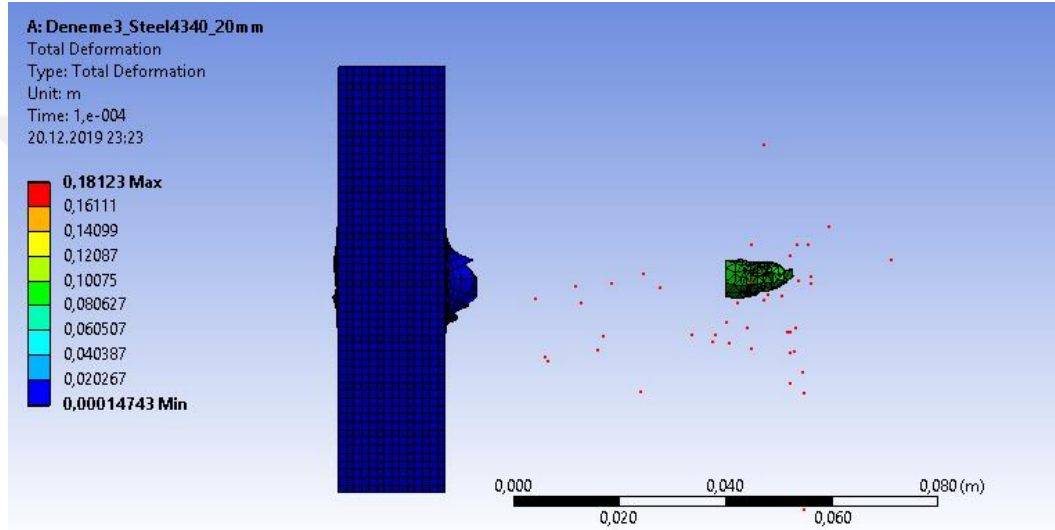
Şekil 6.3 10 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



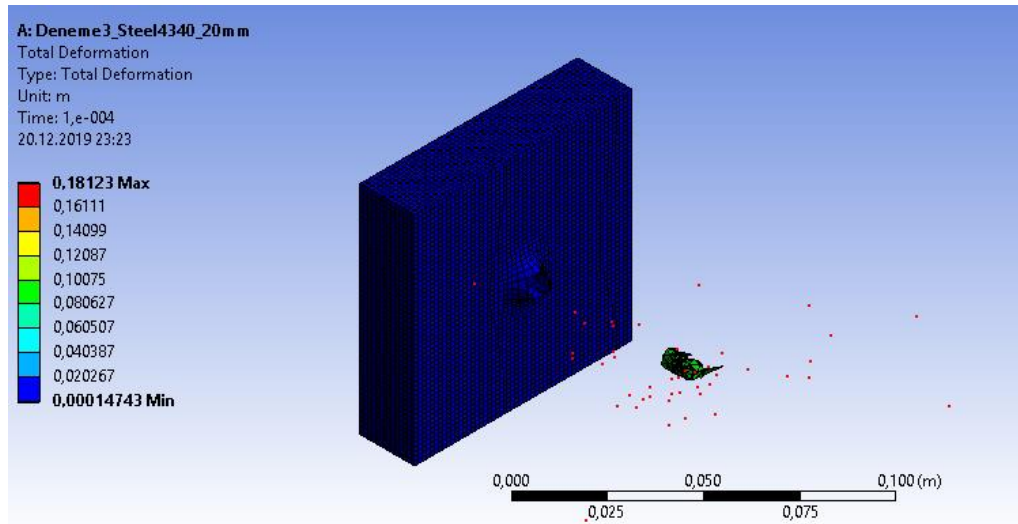
Şekil 6.4 10 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

6.1.3 Deneme 3

Deneme 3 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 20 mm olarak belirlenmiş düzenekte plaka malzemesi olarak 4340 çeliği kullanılmıştır. Ansys ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 20 mm kalınlığa sahip olan plakayı da geçmiştir. Ancak mermide oldukça fazla deformasyon meydana gelmiştir ve bir önceki denemelere nazaran hızından daha fazla bir kısmını plakada kaybederek yoluna devam etmiştir.



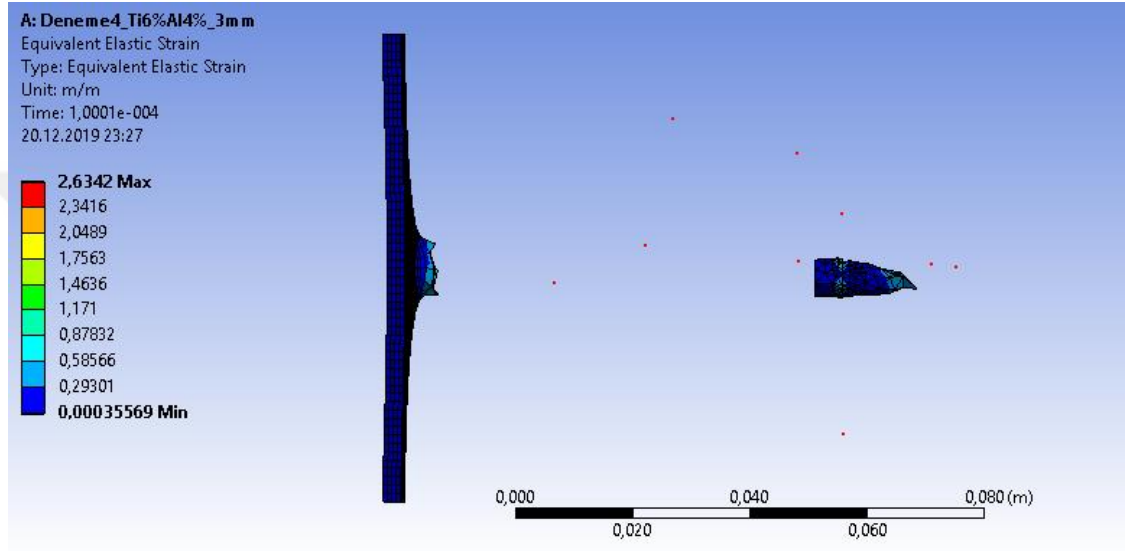
Şekil 6.5 20 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



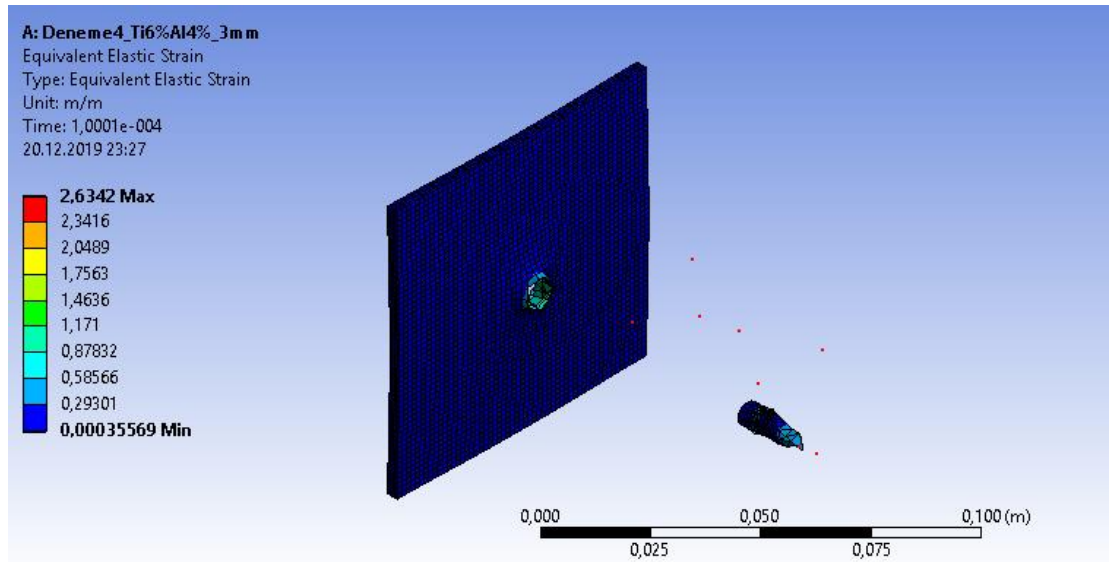
Şekil 6.6 20 mm kalınlığındaki 4340 çelik malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

6.1.4 Deneme 4

Deneme 4 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 3 mm olarak belirlenmiş düzende plaka malzemesi olarak Ti6Al4V kullanılmıştır. Ansys ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 3 mm kalınlığa sahip olan plakayı rahatlıkla geçmiştir. Mermide oldukça az bir deformasyon meydana gelmiş ve mermi plakadan sonra yoluna devam etmiştir.



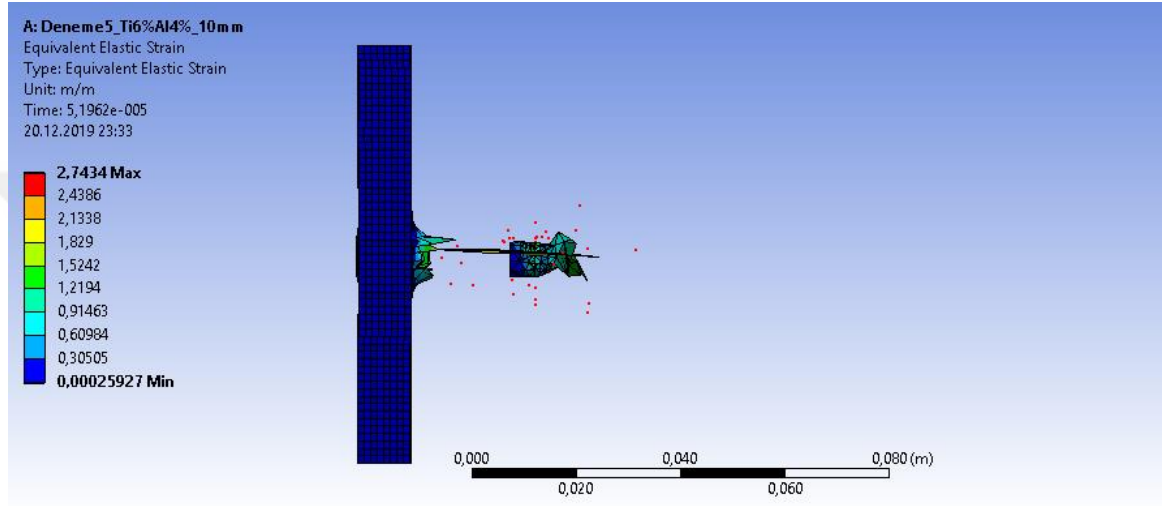
Şekil 6.7 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



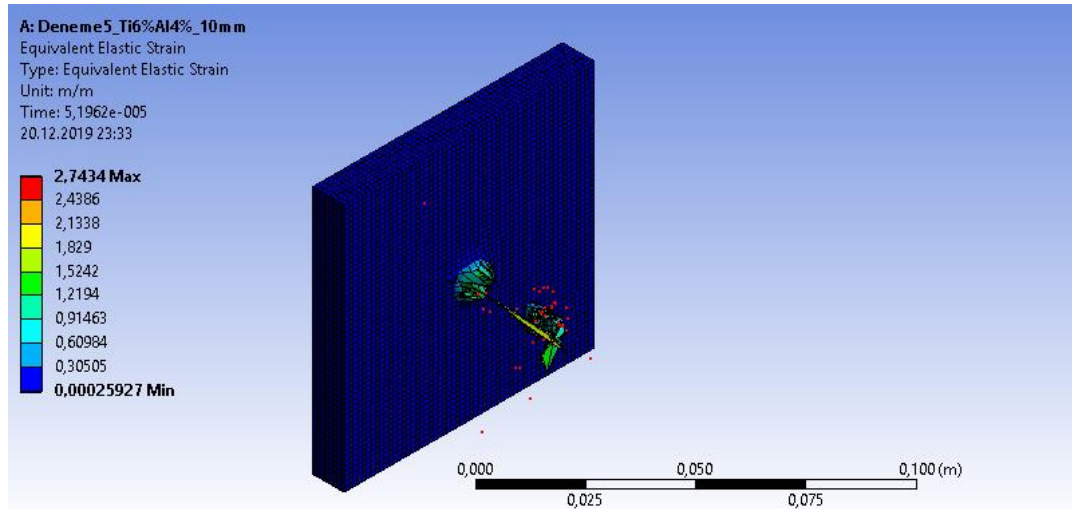
Şekil 6.8 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu perspektif görünüşü

6.1.5 Deneme 5

Deneme 5 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 10 mm olarak belirlenmiş düzenekte plaka malzemesi olarak Ti6Al4V kullanılmıştır. Ansys ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 10 mm kalınlığa sahip olan plakayı geçmiştir. Ancak mermide meydana gelen deformasyon oldukça büyük olmuş ve mermiden parçacıklar koparmıştır.



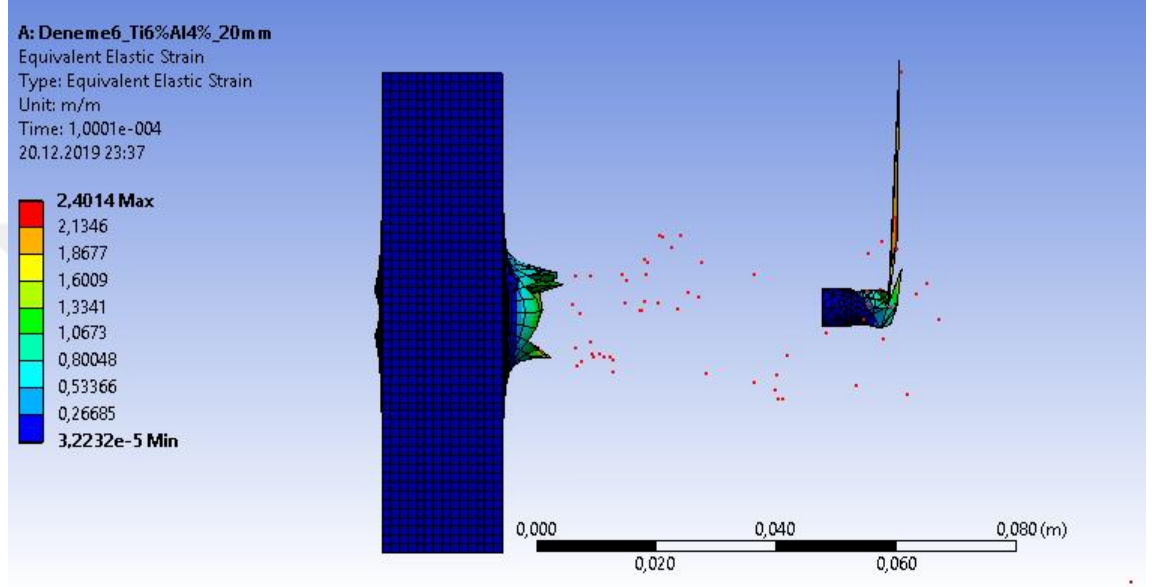
Şekil 6.9 10 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



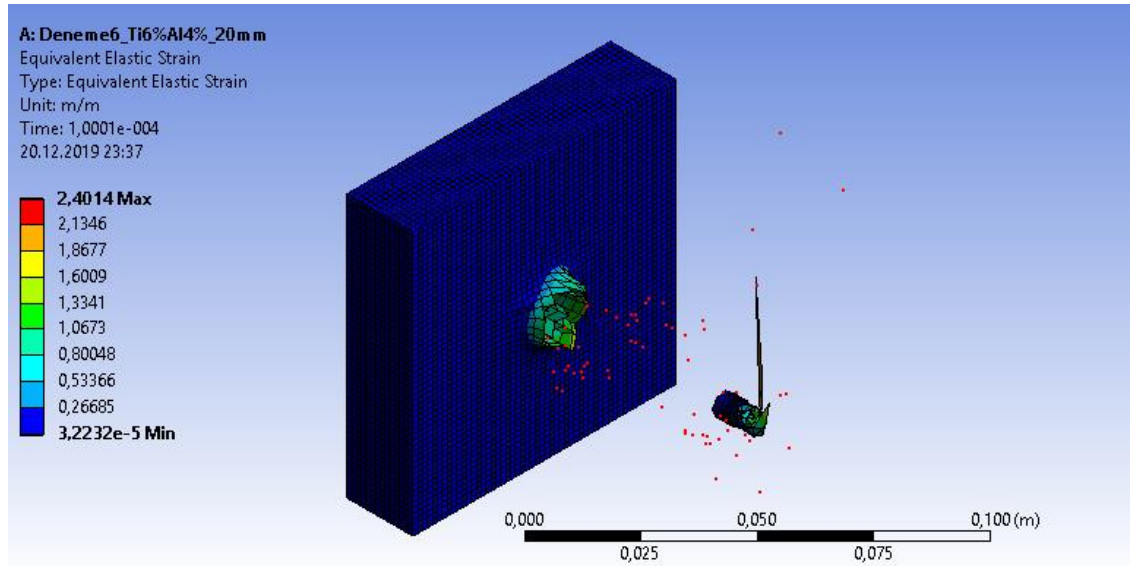
Şekil 6.10 10 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

6.1.6 Deneme 6

Deneme 6 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 20 mm olarak belirlenmiş düzenekte plaka malzemesi olarak Ti6Al4V kullanılmıştır. Ansys ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 20 mm kalınlığa sahip olan plakayı da geçmiştir. Ancak mermide gözle görülebilir bir deformasyon meydana gelmiştir.



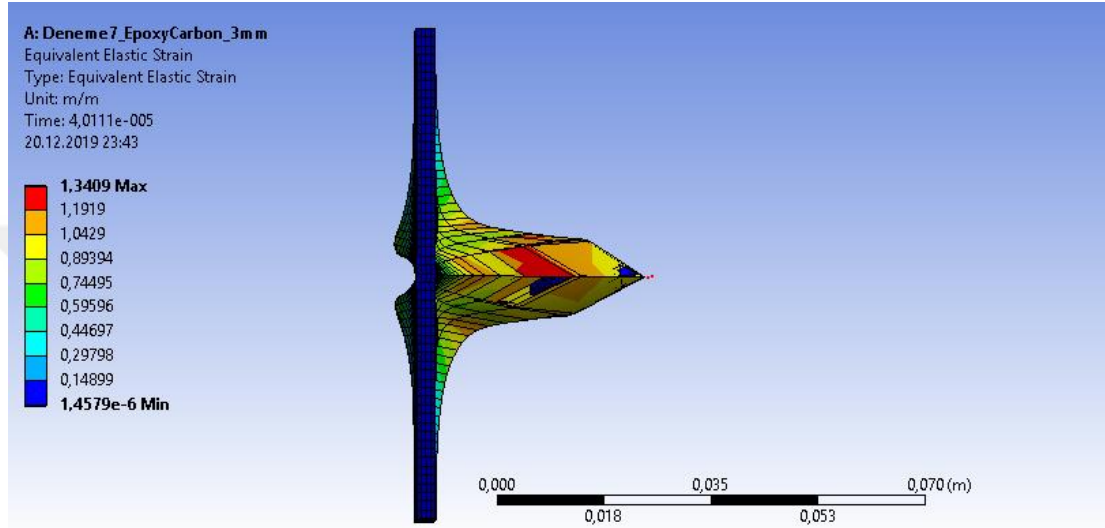
Şekil 6.11 20 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



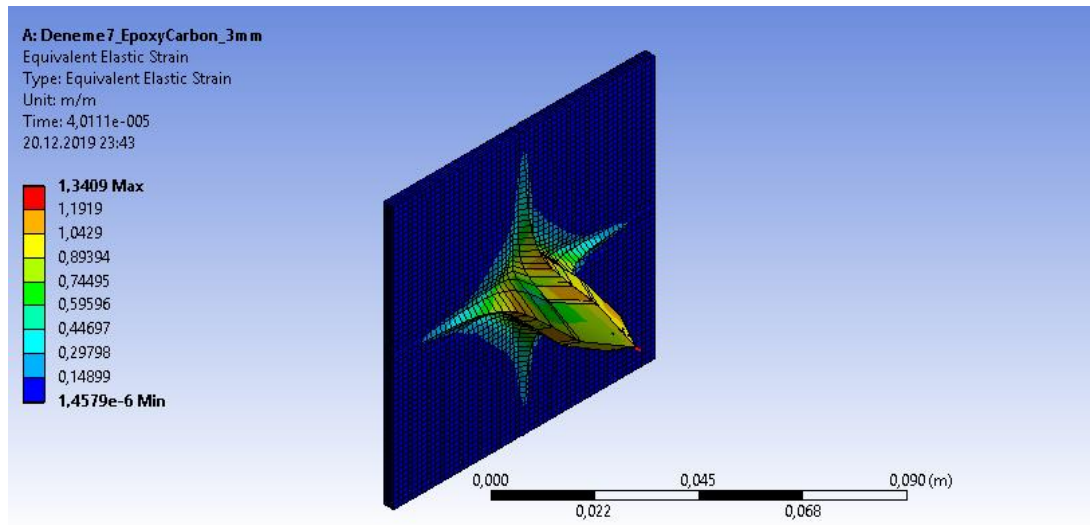
Şekil 6.12 20 mm kalınlığındaki Ti6Al4V malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

6.1.7 Deneme 7

Deneme 7 olarak yapılan çizimde plaka kalınlığı 3 mm olarak belirlenmiş düzenekte plaka malzemesi olarak Epoksi Karbon kullanılmıştır. Ansys ile elde edilen sonuç ise aşağıda gösterilmiştir. Mermi, 3 mm kalınlığa sahip olan plakada kaldı ve plakada gözle görülebilir bir sünmeye sebep olmuştur. Bu sünme Epoksi Karbon kompozitinin bünyesinde barındırdığı liflerden meydana gelmektedir.



Şekil 6.13 3 mm kalınlığındaki Epoksi Karbon malzemesine yapılan atış sonucu yan görünümü



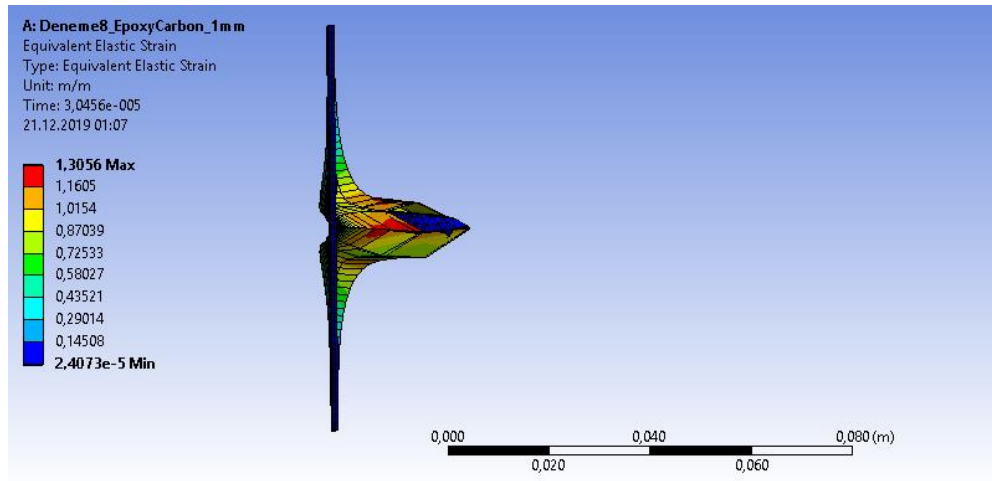
Şekil 6.14 3 mm kalınlığındaki Epoksi Karbon malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

4340 Çeliği, Ti6Al4V ve Epoksi Karbon malzemelerinden elde edilmiş analizlerde görüşmüştür ki mermi, 3mm, 10mm ve 20 mm kalınlıkları 4340 çeliği ile Ti6Al4V malzemesinden yapılmış olan plakaları rahatlıkla delmiştir. Epoksi Karbon malzemesinde ise 3 mm kalınlığa sahip olan plakayı delemeyen mermi için 10 mm ile 20 mm kalınlığındaki plakalarda analiz gerek görülmemiştir.

Bu durumda plaka malzemesi olarak kullanılan üç malzemenin minimum hangi kalınlıklarda mermiye dayanıklı olduğunu öğrenmek için farklı kalınlıklara dair analizler yapılmıştır. 4340 Çeliği, Ti6Al4V ve Epoksi Karbon malzemelerinin mermiye dayanıklı olan minimum kalınlıkları için yapılan deneme sonuçları ve elde edilen değerler aşağıda verilmiştir.

6.1.8 Deneme 8

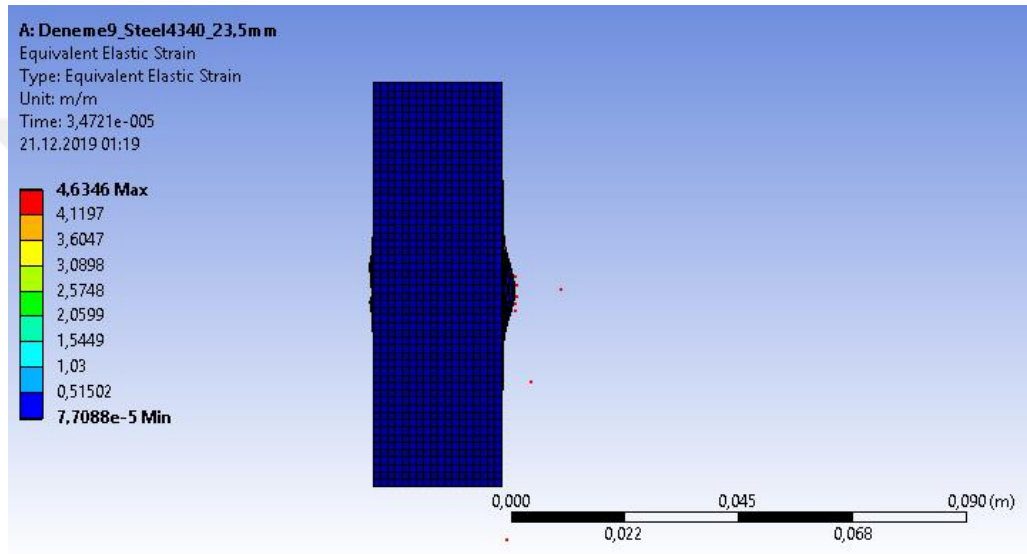
Bu analizde Epoksi Karbon üzerinde yapılan denemeler sonucunda merminin geçmemesi için gerekli olan plaka kalınlığı minimum 1 mm olarak tespit edilmiştir. Mermi burada plakanın arka tarafına geçememiştir ancak plakada oldukça büyük bir sünme meydana getirmiştir. Bu sünme ise Epoksi Karbon içerisinde bulunan liflerden kaynaklanmaktadır. Özetle Epoksi Karbon malzemesinin mermiyi plakanın diğer tarafına geçirmemesi için sahip olması gereken minimum plaka kalınlığı 1 mm olarak tespit edilmiştir.



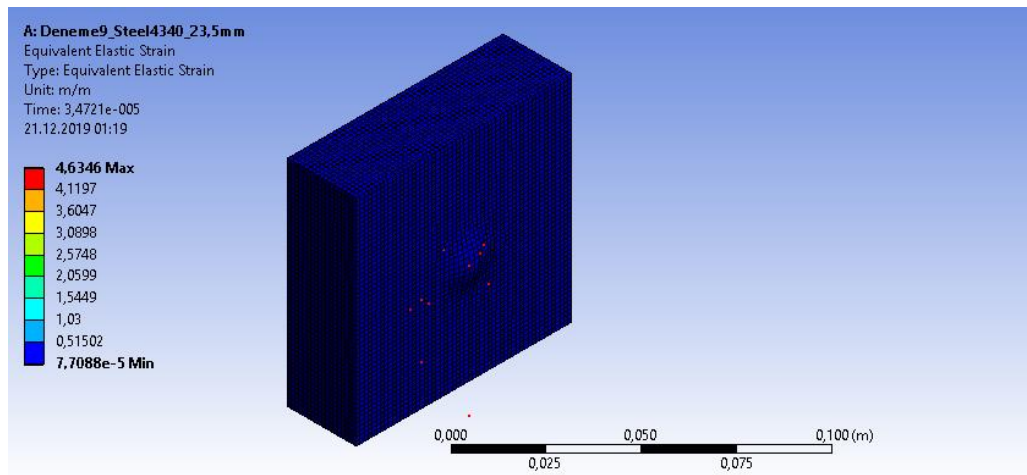
Şekil 6.15 1 mm kalınlığındaki Epoksi Karbon malzemesine yapılan atış sonucunun perspektif görünüşü

6.1.9 Deneme 9

Bu analizde 4340 Çeliği üzerinde yapılan denemeler sonucunda merminin geçmemesi için gerekli olan plaka kalınlığı minimum 23,5 mm olarak tespit edilmiştir. Mermi burada plakanın arka tarafına geçememiştir ancak merminin sahip olduğu hızdan kaynaklı olarak plakada oldukça küçük bir şişme meydana getirmiştir. Epoksi Karbon malzemesinin mermiyi plakanın diğer tarafına geçirmemesi ve hatta tamamen bünyesinde absorbe etmesi için sahip olması gereken minimum plaka kalınlığı 23,5 mm olarak tespit edilmiştir.



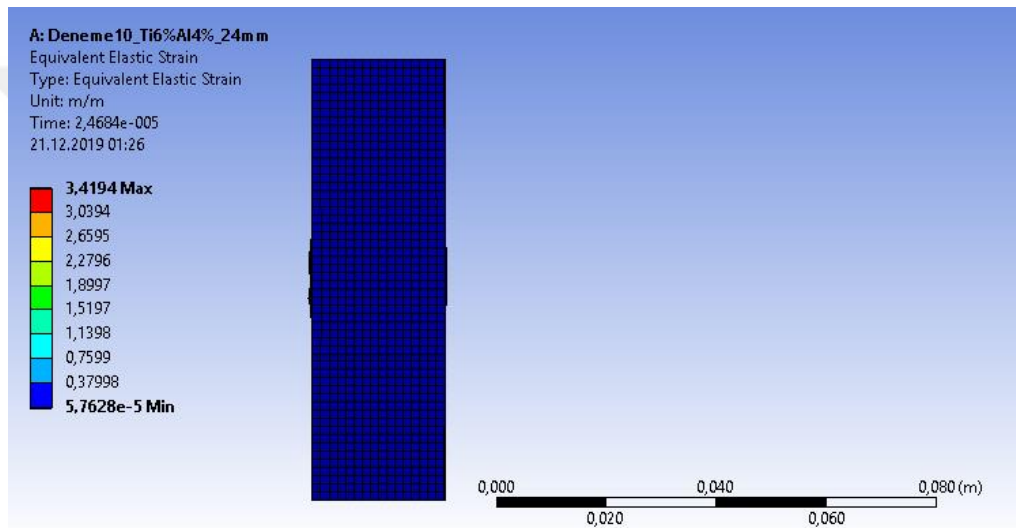
Şekil 6.16 4340 Çelik malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atış sonucu yan görünümü



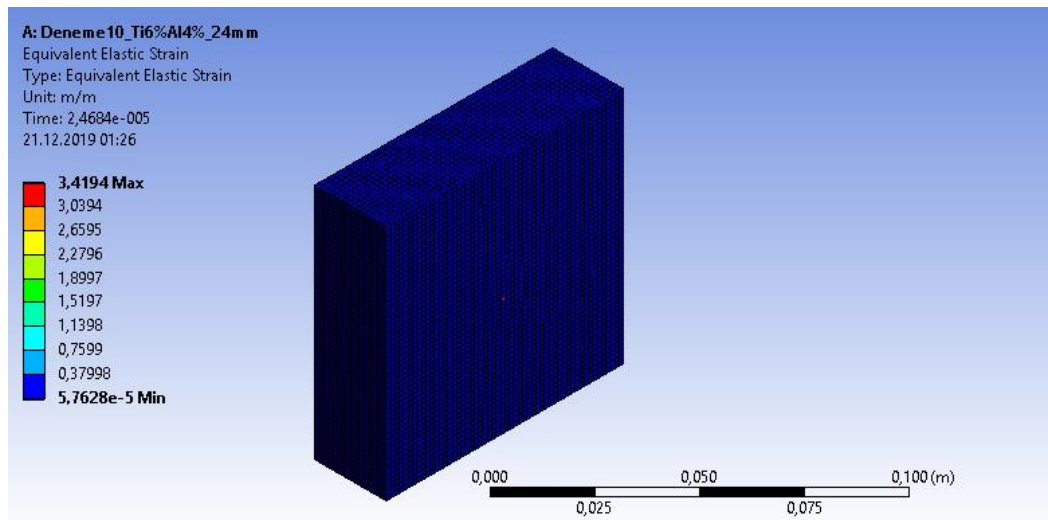
Şekil 6.17 4340 Çelik malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atışı sonucunun perspektif görünüşü

6.1.10 Deneme 10

Bu analizde Ti6Al4V üzerinde yapılan denemeler sonucunda merminin geçmemesi için gerekli olan plaka kalınlığı minimum 24mm olarak tespit edilmiştir. Mermi burada plakanın arka tarafına geçememiştir üstelik merminin sahip olduğu hızdan kaynaklı olarak plakada hiçbir şişme meydana getirememiştir. Epoksi Karbon malzemesinin mermiyi plakanın diğer tarafına geçirmemesi ve hatta tamamen bünyesinde absorbe etmesi için sahip olması gereken minimum plaka kalınlığı 23,5 mm olarak tespit edilmiştir.



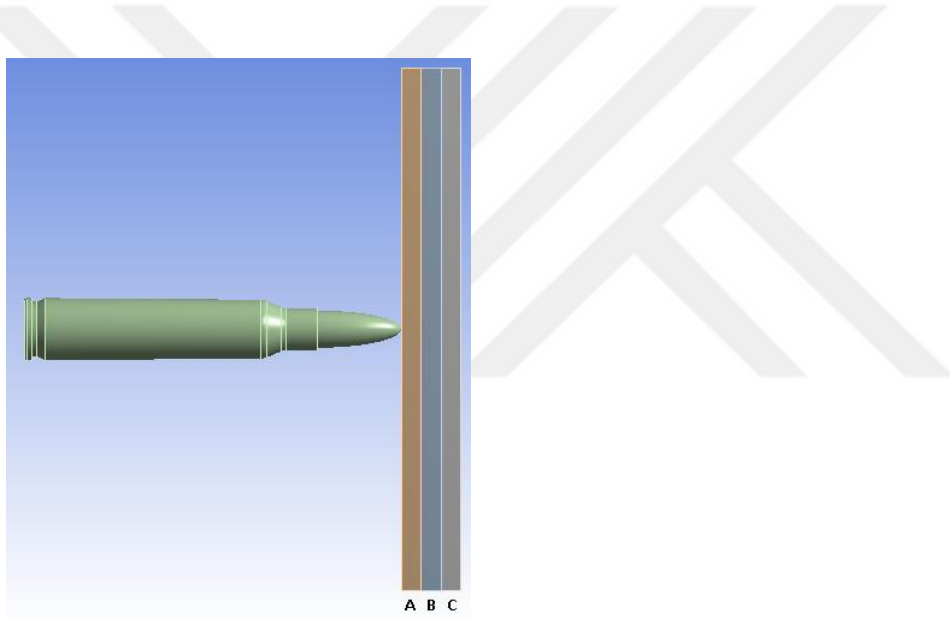
Şekil 6.18 Ti6Al4V malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atışın yan görünümü



Şekil 6.19 Ti6Al4V malzemesine 23,5 mm kalınlıktaki yapılan atışın perspektif görünüşü

Hem maliyet hem de ağırlık açısından daha uygun bir malzeme kullanmak adına elde edilen değerler bize farklı kalınlık ve farklı malzemeler kullanarak sandviç bir yapı üzerinde analiz yapma konusunda aydınlatmış, fikir sahibi olmamıza yardımcı olmuştur.

Daha sonraki aşamalarda aynı mermi, yine aynı mesafeden sandviç bir yapıya aynı hızla temas ettirilmiş, vurulmuştur. Sandviç yapı, farklı kalınlıklardaki 3 adet katmandan oluşturulmuştur. Katmanda merminin ilk ve son temas ettiği plakalar aynı malzemeden yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bir ve üç numaralı katman Epoksi Karbon malzemesi seçilmiştir. Deneme aşamalarında ortada bulunan katman malzemesi 4340 Çeliği ve Ti6Al4V olarak değişkenlik göstermiştir.



Şekil 6.20 3 farklı katmandan oluşan sandviç yapının görünümü

Burada her bir katman kalınlığı A, B ve C harfleri ile gösterilmiştir. Her deneme için A, B ve C kalınlıkları değişiklik göstermiştir. Deneme 1 de A, B ve C kalınlıkları 3 mm olarak belirlenmiş ve analizi yapıldı, ancak başka bir denemede A, B ve C kalınlıkları 1 mm olarak belirlenmiştir. Her deneme için A, B ve C kalınlıkları not edilmiştir. Mermi diğer deneme işlemlerinde olduğu gibi silahtan ilk çıkış hızı olan 914 m/s hız olarak seçilmiş ve mermi ile önündeki ilk plaka arasındaki mesafe yine yaklaşık sıfır (0,50) mm olarak belirlenmiştir.

Sayısal olarak yapılan analizlerin aşamaları ve elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

6.2 Sandviç Yapı Denemeleri

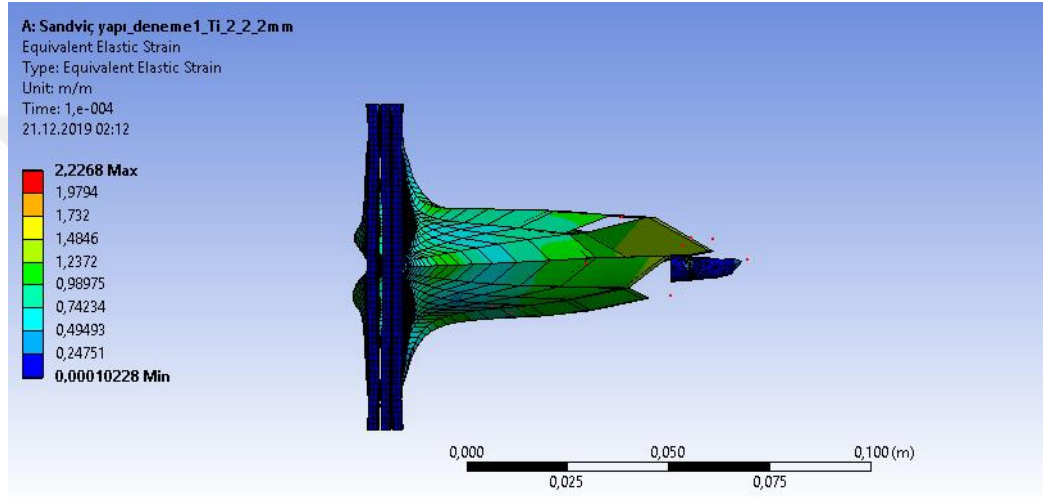
6.2.1 Sandviç Yapı Deneme 1

1 numaralı sandviç yapıya ait olan analiz işleminde kullanılan veriler şu şekildedir.

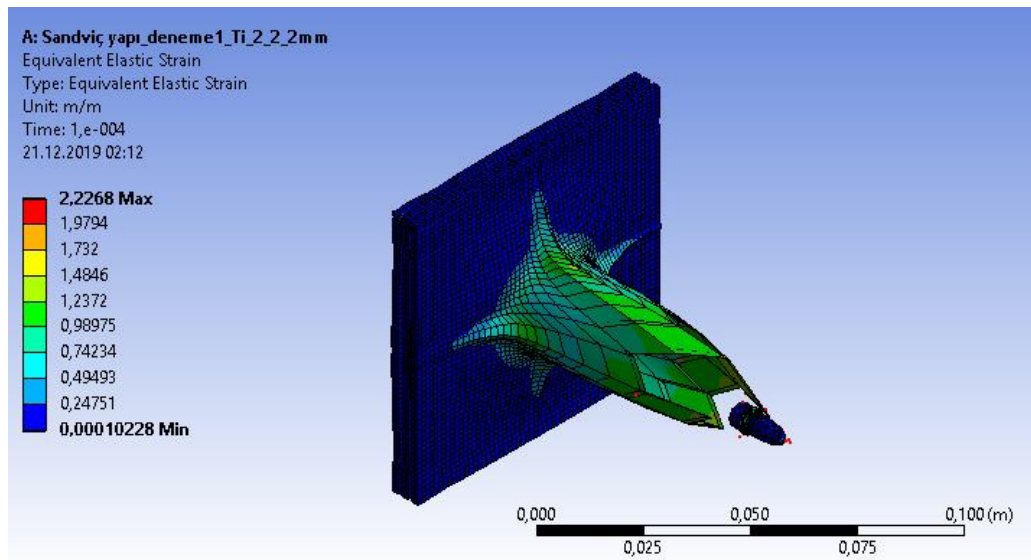
A = 2 mm (Epoksi Karbon)

B = 2 mm (Ti6Al4V)

C = 2 mm (Epoksi Karbon)

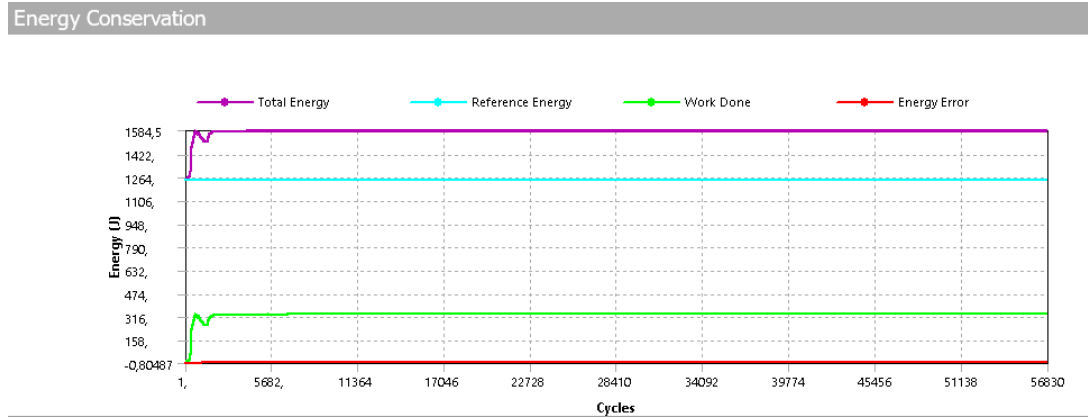


Şekil 6.21 Merkezi Ti6Al4V ve 2 mm olan, toplam 6 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü

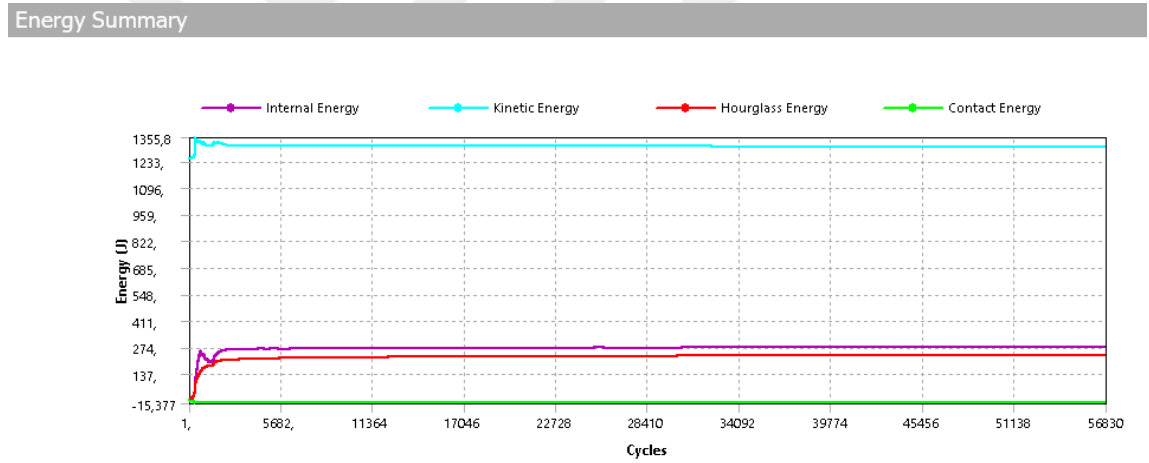


Şekil 6.22 Merkezi Ti6Al4V ve 2 mm olan, toplam 6 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif görünüşü

Elde edilen analiz sonucu şekilde gösterilmiştir. Bu aşamada mermi plakadan geçmiş ve oldukça büyük bir deformasyon ve tabakada sünme meydana getirmiştir.



Şekil 6.23 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunumu grafiği



Şekil 6.24 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği

Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’de görüldüğü üzere Titanyum alaşımına sahip olan sandviç yapıya çarptırılan mermi, plakada fazla bir dirençle karşılaşmamış ve kinetik, iç enerji değerlerinde ufak değişimler sonunda sabitlenmiştir. Bu sabit değerlerin sebebi ise plaka kalınlığının mermi hızını kesecek yeterli bir dayanıma sahip olamayışı ve merminin sahip olduğu değerleri etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, merminin kinetik enerji değeri, mermi hareket halinden itibaren sandviç yapıya temas edene kadar olan süreçte artış göstermiştir. Ancak daha sonra bu enerji plakada bir miktar kayba uğramış ve kalan enerjisi ile yoluna devam etmiştir.

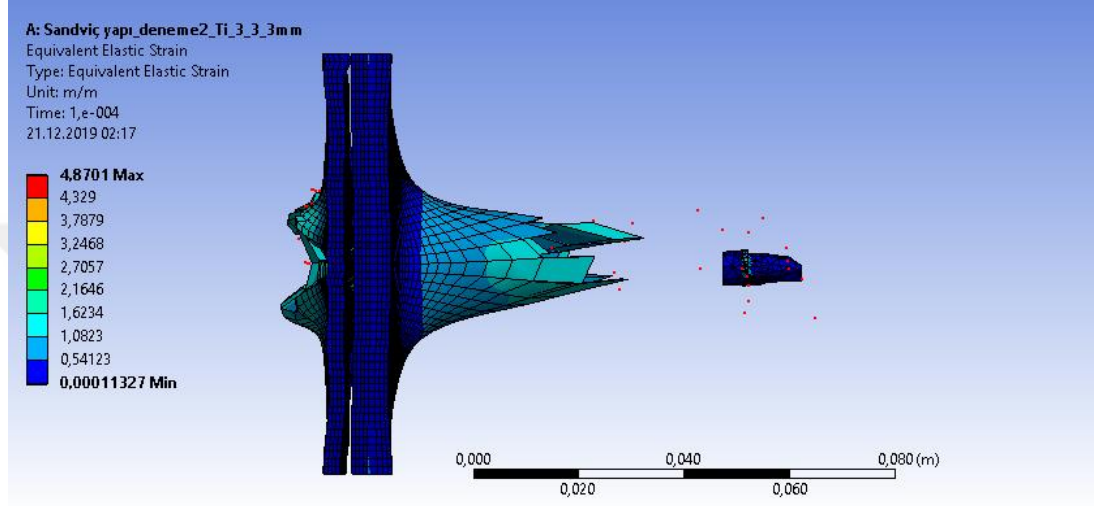
6.2.2 Sandviç Yapı Deneme 2

2 numaralı sandviç yapıya ait olan analiz işleminde kullanılan veriler şu şekildedir.

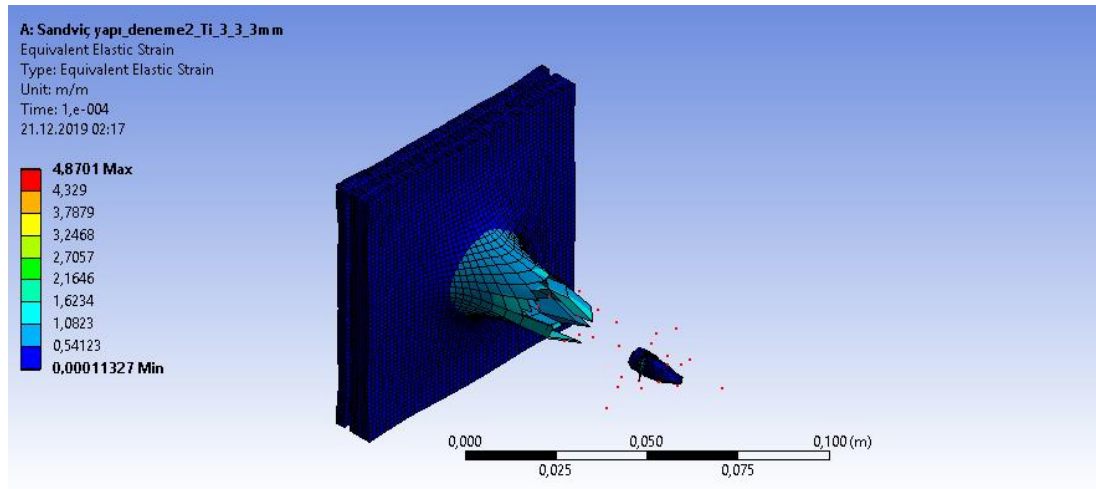
A = 3 mm (Epoksi Karbon)

B = 3 mm (Ti6Al4V)

C = 3 mm (Epoksi Karbon)

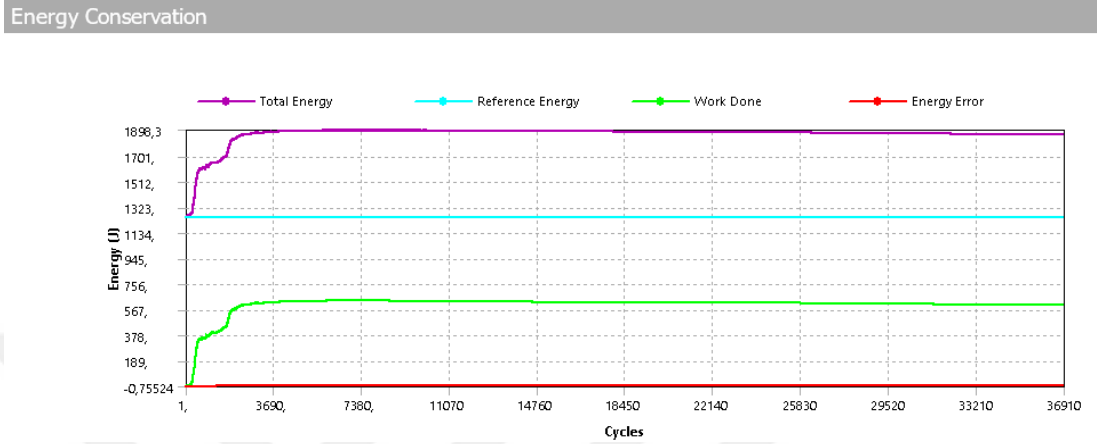


Şekil 6.25 Merkezi Ti6Al4V ve 3 mm olan, toplam 9 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü

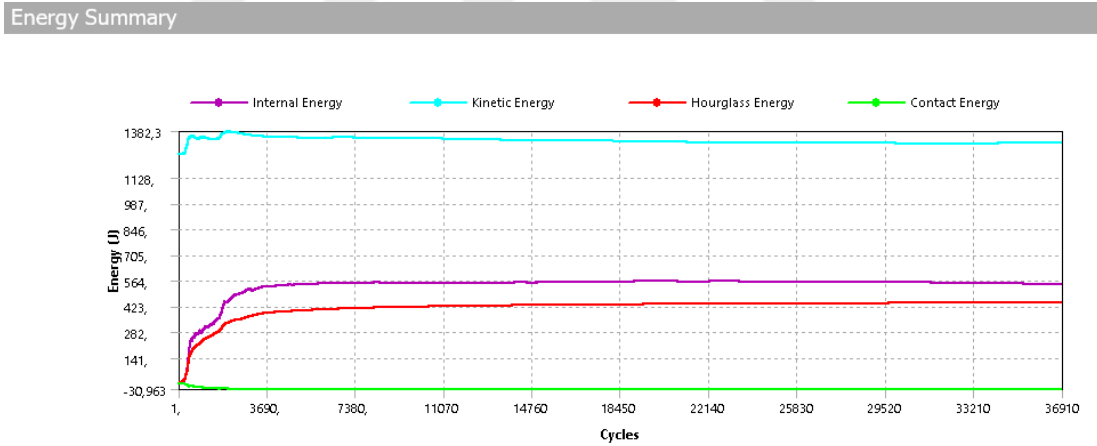


Şekil 6.26 Merkezi Ti6Al4V ve 3 mm olan, toplam 9 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif görünüşü

Bu aşamada da mermi plakadan rahatlıkla geçmiş ancak oldukça büyük bir deformasyon ve tabakada sünme meydana getirmiştir. Meydana getirdiği bu sünme 2 mm kalınlıktaki sandviç yapının meydana getirdiği sünmeye yakın bir sünme olarak tespit gözlemlenmiştir.



Şekil 6.27 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunumu grafiği



Şekil 6.28 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği

Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de görüldüğü gibi mermi bu denemede de sandviç yapıyı aşamamış ve yine enerji değerleri plakayı terk ettikten sonra sabit kalmıştır. Mermi ile plaka arasındaki mesafede meydana gelen değişmeden, merminin, plakayı terk edene kadar olan süreçte iç enerjinin artışı, ardından sabit oluşu ile kinetik enerjinin çok yüksek derecede değişime uğramaması net bir şekilde gözlemlenmiştir.

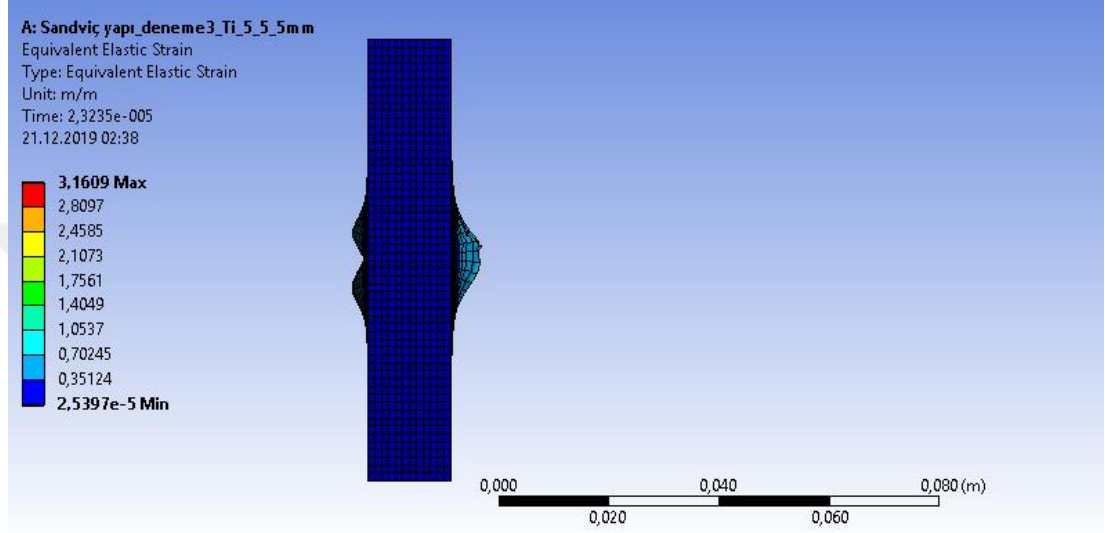
6.2.3 Sandviç Yapı Deneme 3

3 numaralı sandviç yapıya ait olan analiz işleminde kullanılan veriler şu şekildedir.

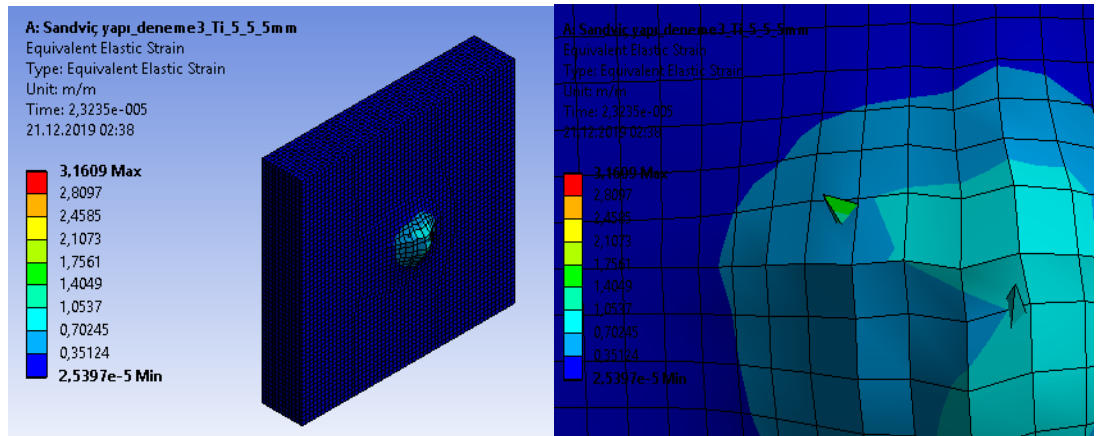
A = 5 mm (Epoksi Karbon)

B = 5 mm (Ti6Al4V)

C = 5 mm (Epoksi Karbon)



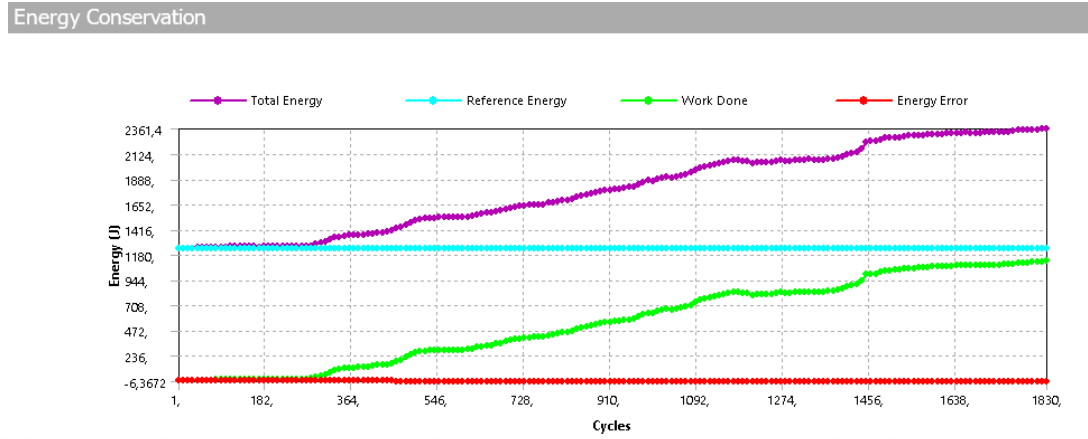
Şekil 6.29 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 15 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü



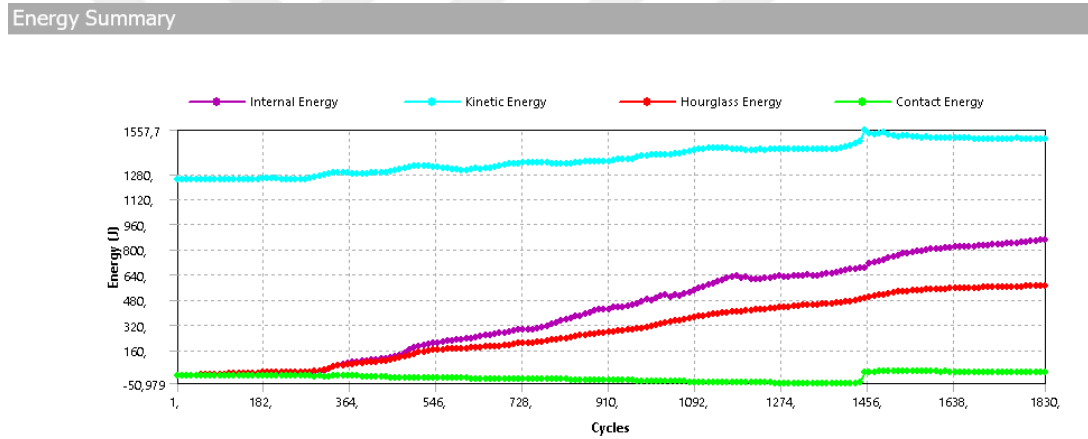
Şekil 6.30 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 10 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif ve yakın görünüşü

Bu aşamada mermi plakadan geçememiş ve dahası oldukça büyük bir deformasyon ve tabakada sünme meydana getirmemiştir. Meydana getirdiği bu sünme yok

denecek kadar azdır. Mermi plakaya gömülmüş, sadece plakanın arka kısmında merminin olabildiğince küçük bir bölümünün geçtiği görülmüştür.



Şekil 6.31 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunumu grafiği



Şekil 6.32 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği

Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’de görüldüğü üzere sandviç yapıya ait olan kalınlık arttığı için enerji korunumu artışı gözle görünür derecede fark edilmiştir. Bu analizde mermi plakanın diğer kısmına geçememiş sadece merminin çok küçük bir bölümü plakanın diğer tarafına geçebilmiştir. Önceki denemelerde grafiklerde meydana gelen değer artış ya da azalışları yalnızca merminin plakaya temas ettiği mesafede olurken, bu analizde mermi ile plakanın temasından daha sonra da meydana gelmesi dikkat çekmiştir. Bunun sebebi ise mermi plakada kaldığı için enerji transferinin yüksek olmasıdır. Kinetik enerji, iç enerji değerleri, plakanın mermiye temas etmesinden itibaren değerlerini artırarak sürdürmüşlerdir.

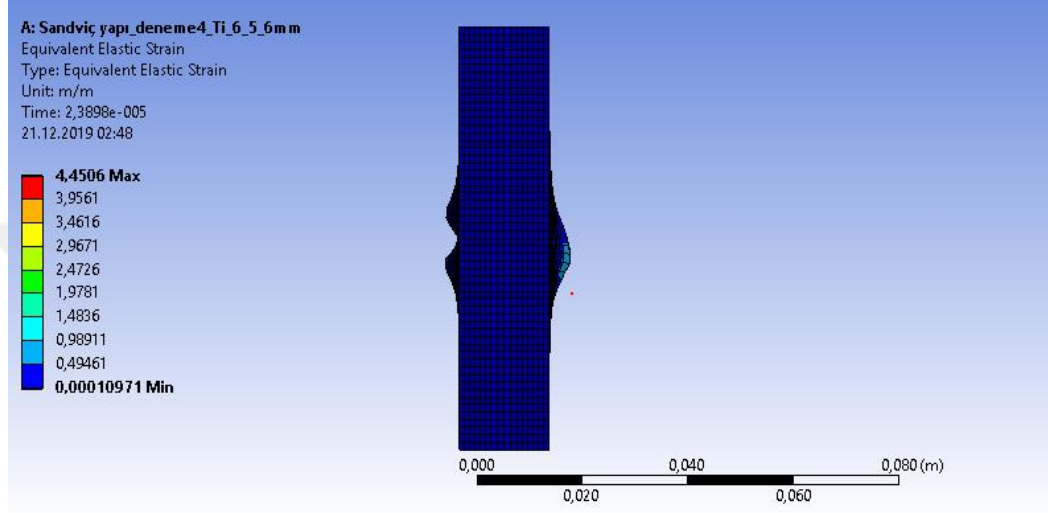
6.2.4 Sandviç Yapı Deneme 4

4 numaralı sandviç yapıya ait olan analiz işleminde kullanılan veriler şu şekildedir.

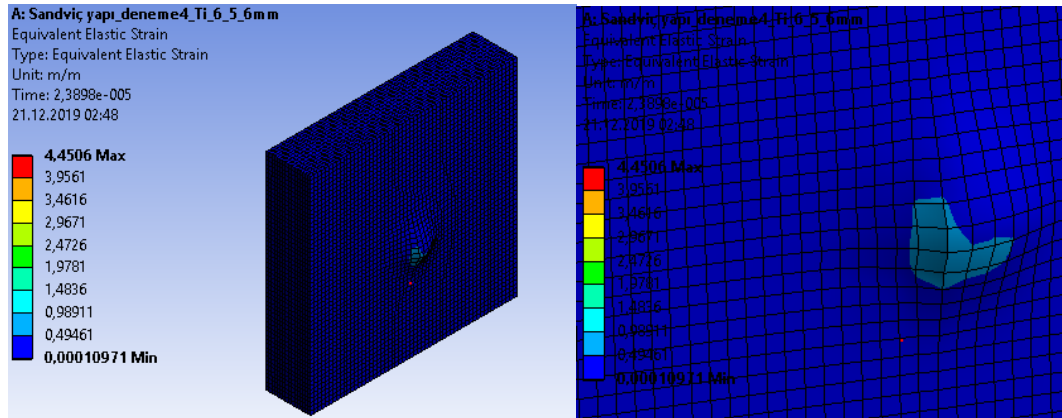
A = 6 mm (Epoksi Karbon)

B = 5 mm (Ti6Al4V)

C = 6 mm (Epoksi Karbon)



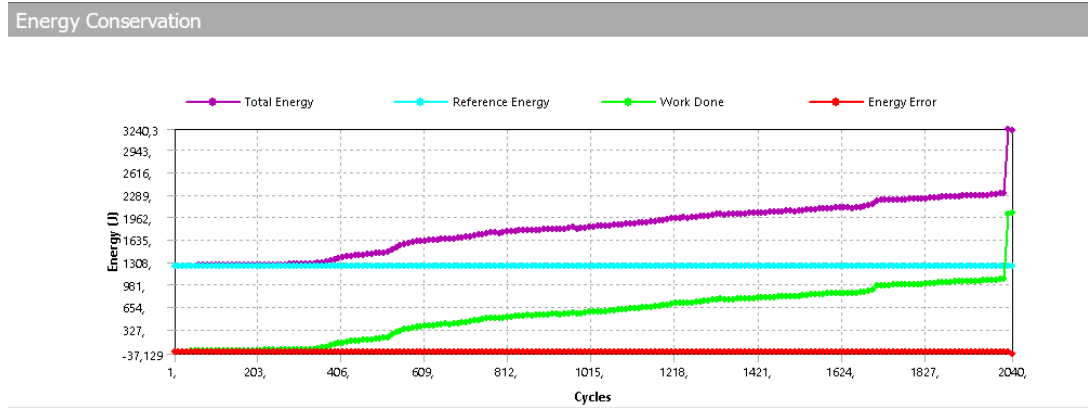
Şekil 6.33 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü



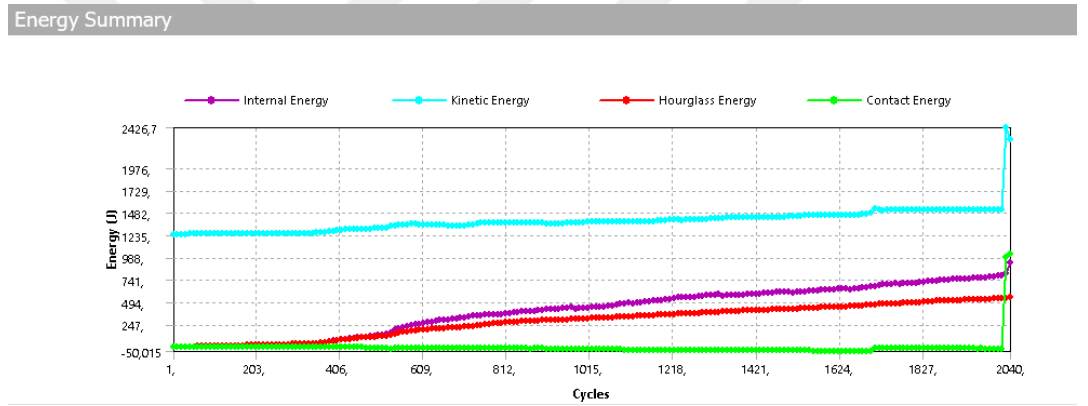
Şekil 6.34 Merkezi Ti6Al4V ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif ve yakın görünüşü

Bu aşamada mermi plakadan hiçbir şekilde geçememiş ve sandviç yapıda 2, 3 mm kalınlıklardaki gibi bir sünme oluşturamamıştır. Mermi bu sandviç yapıda herhangi bir boyutta bile olsa plakanın diğer tarafına geçememiştir. Dolayısı ile 6, 5, 6 mm

kalınlık, merminin plakaya tamamen gömülmesi için gerekli olan en düşük kalınlık olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.35 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji korunumu grafiği



Şekil 6.36 Titanyum alaşımlı sandviç yapının enerji özet grafiği

Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da görüldüğü üzere merminin ilk olarak silahtan çıktığı enerjisi zamanla daha da artmış ve oldukça büyük bir değere ulaşmıştır. Mermi ilk olarak namlu ucundan ayrıldığından plakaya temas edene kadar olan süreçte sabit bir değer göstermiştir. Bu değer yaklaşık olarak 1 ile 400 Cycles değerleri arasında sabitlik göstermiştir. Ancak Plakaya olan teması başladıktan sonra (400 Çevrim) Kinetik Enerji, İç Enerji gözle görülür şekilde artmaya devam etmiştir. Ancak bir süre sonra (yaklaşık 3000 Çevrim) mermi plakayı terk edecek yeterli güce ve enerjiye sahip olamadığından dolayı iç enerji, kinetik enerji ve toplam enerji değerlerinde bir ani yükseliş meydana gelmiştir.

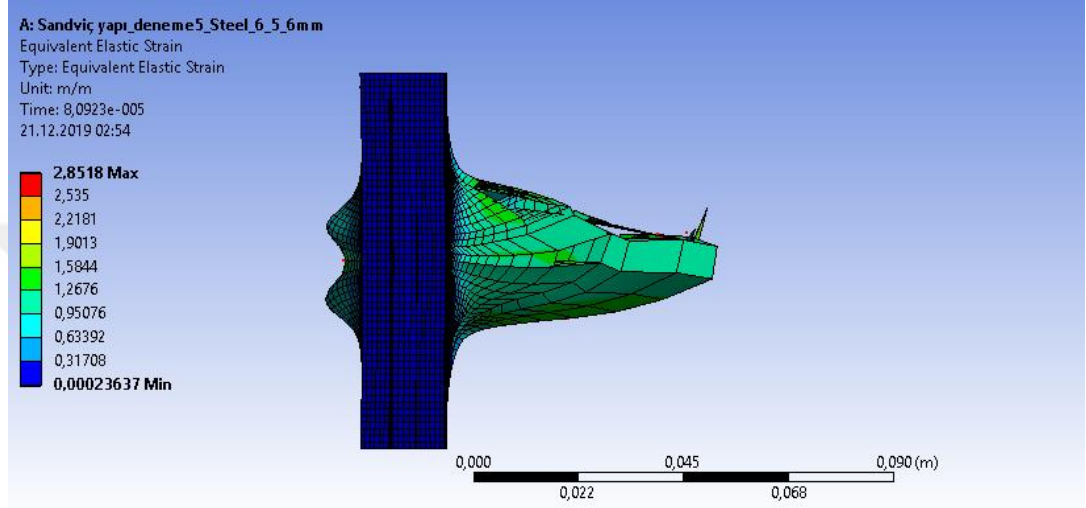
6.2.5 Sandviç Yapı Deneme 5

4 numaralı sandviç yapıya ait olan analiz işleminde kullanılan veriler şu şekildedir.

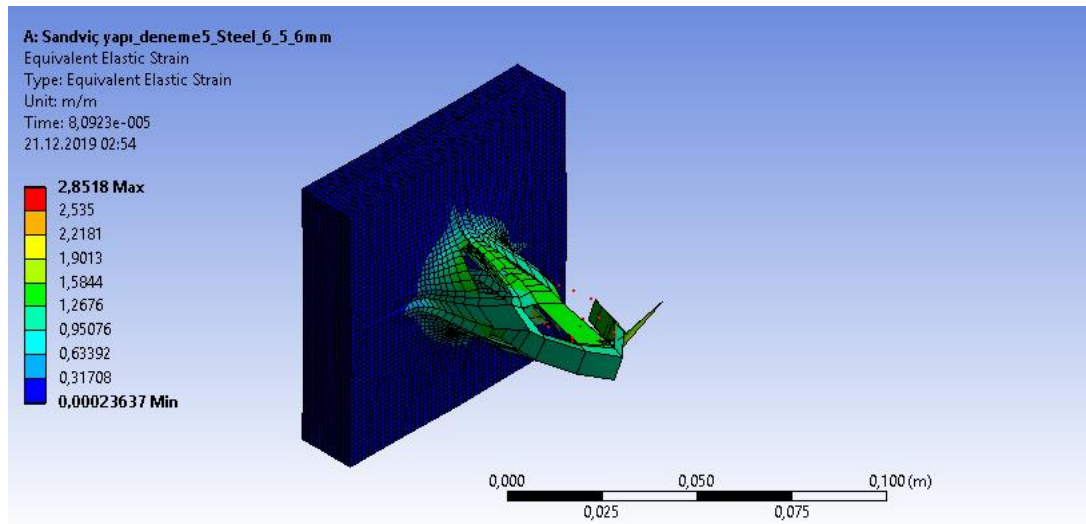
A = 6 mm (Epoksi Karbon)

B = 5 mm (4340 Çeliği)

C = 6 mm (Epoksi Karbon)

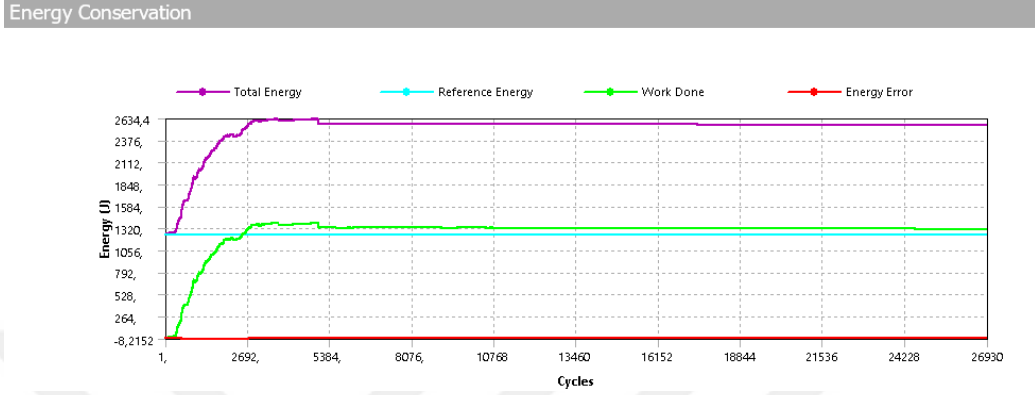


Şekil 6.37 Merkezi 4340 çelik ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı yan görünümü

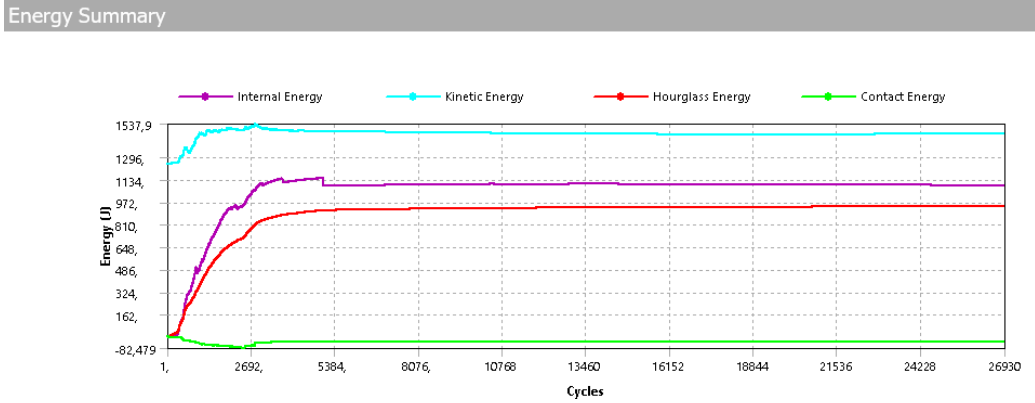


Şekil 6.38 Merkezi 4340 çelik ve 5 mm olan, toplam 17 mm kalınlıktaki sandviç yapı perspektif görünüşü

Ti6Al4V malzemesinden yapılmış plakanın mermiyi geçiremediği yine aynı kalınlıklardaki 4340 çelik için de analiz yapılmıştır. Ancak gözle de görülmüştür ki Ti6Al4V malzemesinin sağladığı dayanımı aynı kalınlıklarda 4340 çeliği gösterememiştir.



Şekil 6.39 4340 çelik alaşımlı sandviç yapının enerji korunumu grafiği



Şekil 6.40 4340 çelik sandviç yapının enerji özet grafiği

Şekil 6.39 ve Şekil 6.40'da görüldüğü üzere mermimin ilk olarak silahtan çıktığı enerjisi zamanla artmış ve yine büyük bir değere ulaşmıştır. Mermi namludan çıkınca Titanyum grafiğinde olduğu gibi plakaya temas edene kadar yine bir süre sabit değerler elde edilmiştir. Mermi plakaya temas ettikten kısa bir süre sonra Kinetik enerji ve iç enerji miktarlarında gözle görülür bir artış meydana gelmiştir. Ancak, bu artış bir süre sonra sabit bir hal almış ve bu değerde kalmıştır. Bunun sebebi ise 4340 çelik malzemesinin kullanıldığı bu sandviç yapıda mermi plakayı geçene kadar olan süreçte enerji miktarlarının artışına neden olmuş ve plakamın diğer tarafına geçtikten sonra ise mermi belirli bir hızla yoluna devam etmiştir.

Titanyum alaşımında elde edilen değerler 4340 çelik yapısına sahip olan sandviç yapının elde ettiği değerlerden oldukça büyüktür. Bunun başlıca nedeni ise mermi plakayı geçemediği için bütün iç enerjisinin plakaya iletmış ve bu enerjiler de grafiklerde oldukça belirli bir şekilde yansımıştır. 4340 çelikte ise mermi sahip olduğu ilk enerji ile plakayı delebilmış ve yoluna devam edebildiği için ise enerjisinin bir miktarını plakaya iletmış kalan enerjisi ile yola devam etmiştir. Mermilerin ilk hızları iki denemede de sabit ancak çıkış hızları ve plakaya ilettikleri enerjiler farklı olduğu için elde ettiğimiz sonuçlar da değişkenlik göstermiştir.

Tarafımızca yapılan çalışmaya benzer bir çalışmada, Özen, Atahan ve Yapıcı çalışmış oldukları analizde Titanyum, Ti6Al4V ve 4340 çelik malzemelerine mermi atışları yapılmış. Sonuç olarak 4340 çelik malzemesinin mermiye dayanan minimum kalınlığı 3 mm, Titanyum malzemesi için 3 mm ve Ti6AL4V malzemesi için de gerekli olan minimum plaka kalınlığı yine 3 mm olarak tespit edilmiş. Burada yapılan analiz ile bizim yaptığımız analiz değerlerinin farklı olmasının en temel sebebi, merminin plakaya gönderilme hızının 350 m/s olarak belirlenmişken bu değer bizim yapmış olduğumuz analizde 914 m/s olarak belirlenmesidir.

Aydın ve Acar bir çalışmada katman sayılarının 5, 10, 15, 20 katman olduğu Al/SiC kademelendirilmiş plakaların balistik yükü altındaki davranışları incelenmiş ve mermi hızları 500 m/s ve 750 m/s olarak raporlanmış. Bu denemede her plaka kalınlığı 15 mm olarak değerlendirmeye alınmış. Bu denemelerde farklı kalınlıklara gönderilen mermiler katmanları delememiştir. Burada yapılan analiz ile bizi yaptığımız analiz değerlerinin farklı olmasının en temel sebeplerinden birisi mermi hızlarının ve kullanılan mermi uç geometrisinin farklı oluşudur.

Sanlı yaptığı bir çalışmada 4340 çeliği ve Al 6000 serisinin hedef olarak kullanıldığı 4 mm kalınlığa sahip olan plakalara atışlar yapılmıştır. Plakaya dik olarak atış yapılan merminin hızı 500 m/s olarak değerlendirilmiş ve plakalardan mermi geçmeyi başarmıştır. Yapılan bu çalışmada ise farklı sonuç elde edilmesinin sebebi, mermi hızı ve plaka kalınlığıdır.

7.DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu tezde 4340 Çeliği, Ti6Al4V ve Epoksi Karbon malzemelerinden yapılmış olan 80x80 mm boyutlarına sahip ve 3 mm, 10 mm, 20 mm kalınlığa sahip olan ve 2 mm, 3 mm, 5 mm ile 6-5-6 mm kalınlıklara sahip olan sandviç yapıların, 914 m/s hıza sahip olan mermiye karşı olan dayanımları incelenmiştir.

Farklı özelliklere sahip olan bu malzemelerin mermiye olan dayanımı için gerektirdiği kalınlık farklılık göstermiştir. Özellikle 4340 çelik ve Ti6Al4V malzemesinin, mermiyi geçirmemesi için gerekli olan kalınlık değeri oldukça büyük olduğundan dolayı, kullanımı mühendislik mantığıyla bir nebze de olsa ters düşmektedir. Bu sebepten dolayı daha ergonomik ve daha mantıklı olması beklenen sandviç yapıya düşünülmüş ve bunun için gerekli analizler yapılmıştır.

Sandviç yapı analizlerinde merminin plakadan geçmemesi için gerekli olan plaka kalınlığı 6-5-6 mm olarak belirlenmiştir. Bu sandviç yapıda ise 6 mm kalınlığa sahip 2 Epoksi Karbon plaka arasında yine 5 mm kalınlığa sahip olan Ti6Al4V yerleştirilmiştir.

Yine aynı malzemelerin kullanıldığı bu sandviç yapının kalınlığı 5 mm olduğunda ise mermi daha ince plaka kalınlıklarında olduğu gibi rahatça plakayı geçemediği gibi plakaya saplanmıştır. Küçük bir mermi ucu plakanın diğer tarafına geçtiği gözlenmesine rağmen merminin plakaya takıldığı tespit edilmiştir.

Analizi yapılan bu malzeme yapıları ve kalınlıkları bize malzemelerin kullanım yerleri konusunda da fikirler vermiştir. Savunma sanayi alanında birçok ürün aktif olarak kullanılmaktadır. Bu ürünler hareketli olarak kullanılan ya da sabit olarak kullanılan araç gereçlerde tercih edilmektedir.

Bizim yaptığımız deneyler ve elde ettiğimiz veriler sonucunda 5 mm kalınlığa sahip olan sandviç yapılar mermi, bilinmeyen ancak zararlı maddelerden korumak amaçlı imal edilen (kurşun geçirmez) araçlarda kullanılabilirler. Hem hafiflik sağlayacak hem de 914 m/s hız değerine kadar hıza sahip olan, dahası bu kadar yüksek hızda olup sivri uca sahip olabilecek maddelerin verebileceği zararı bile absorbe edeceği

için hareketli olarak kullanılan ürünlerde her biri 5 mm kalınlığa sahip olan sandviç yapı kullanılabilir. Hava aracı, kara aracı, kirpi, tank gibi malzemelerin gövdelerinde kullanımında uygulanabilir.

Kalınlığın 6-5-6 mm olan üçlü sandviç yapıda ise mermi hiçbir şekilde plakanın diğer tarafına geçemediği gibi sandviç yapının içerisine tamamiyle gömülmüştür. Daha emniyetli ve sağlam olan bu yapı ise daha fazla ağırlığa sebep olacağı için sabit olarak kullanılan savunma sanayi ürünlerinde tercih edilebilir. Dolayısı ile asker ve polislerin nöbet kulübelilerinde, özel odaların korunması gibi ağırlığın sorun teşkil etmeyeceği alanlarda kullanılabilir.

Yapılan bu çalışmada katmanlı zırh sistemlerinin balistik etkilere karşı davranışının sayısal modellenmesi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın yanı sıra farklı kompozit yapılar değerlendirilebilir veya plakada meydana gelen ısıl değerler hesaplanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] İ. Yapıcı, “E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi,” Mustafa Kemal Üniversitesi, 2012.
- [2] E. Acar, “Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi,” Erciyes Üniversitesi, 2017.
- [3] C. W. Ong, C. W. Boey, R. S. Hixson, And J. O. Sinibaldi, “Advanced Layered Personnel Armor,” *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 38, No. 5, Pp. 369–383, May 2011, Doi: 10.1016/J.İjimpeng.2010.12.003.
- [4] İ. Özer, “Balistik Çarpma Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi,” Mustafa Kemal Üniversitesi, 2015.
- [5] P. K. Jena, B. Mishra, K. Siva Kumar, And T. B. Bhat, “An Experimental Study On The Ballistic Impact Behavior Of Some Metallic Armour Materials Against 7.62mm Deformable Projectile,” *Mater. Des.*, Vol. 31, No. 7, Pp. 3308–3316, Aug. 2010, Doi: 10.1016/J.Matdes.2010.02.005.
- [6] A. Abaş, “Tetik Mekanizmasında Gelen Dinamik Kuvvetlerin Sonlu Elemanlar Metoduyla İncelenmesi,” Kırıkkale Üniversitesi, 2011.
- [7] T. Erdöl, “Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Portal Vinç Tasarımı,” Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2007.
- [8] Ö. Demir, “Bir Gemi Yapısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi,” Yıldız Teknik Üniversitesi, 2008.
- [9] A. Kundi, “Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Dişli Kırılma Analizi,” Uludağ Üniversitesi, 2018.
- [10] Y. Altunay, “Uçak Elektronik Sistemi Soğutma Pompasının Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Mekanik Tasarımı,” Hacettepe Üniversitesi, 2018.
- [11] M. Özkütük, “Talaşlı İmalat Sürecinin Ve Yüzey Bütünlüğünün Deneysel Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi,” Marmara Üniversitesi, 2018.
- [12] A. Duman, “Silindirik Helisel Dişli Çarklarda Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi,” Hitit Üniversitesi, 2015.
- [13] F. Sanlı, “Darbe Teseri Altındaki Kompozit Levhanın Sonlu Elemanlı Yöntemi İle Simülasyonu,” Marmara Üniversitesi, 2008.

- [14] D. Öztörün, “Bır Ağır Sılah Namlusunun Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Elastik-Plastik Gerilme Analızı,” Gazi Üniversitesi, 2013.
- [15] M. Kahraman, “Levha Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geri Esnemesinin İncelenmesi,” Marmara Üniversitesi, 2008.
- [16] U. Vural, “Kaynaklı İmalat Sonrası Oluşan Distorsiyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009.
- [17] S. Karadayı, “Düşük Hızlı Darbe Yüğü Altında Tabakalı Kompozit Malzemenin Mekanik Davranışı,” Atatürk Üniversitesi, 2012.
- [18] A. B. Baba, “Delaminasyonlu Tabakalı Kompozit Plakaların Burkulma Analizi,” Batman Üniversitesi, 2013.
- [19] Y. Daban, “Kompozit Plakalarda Farklı Tabaka Sayısı, Farklı Yapı Ve İstifleme Sırasına Bağlı Optimum Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi,” Balıkesir Üniversitesi, 2016.
- [20] J. Williams, “The Science And Technology Of Composite Materials,” 2015. [Online]. Available: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials>. [Accessed: 12-Nov-2019].
- [21] Ç. Genç, “Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması,” Kocaeli Üniversitesi, 2006.
- [22] Rsc, “Composite Materials,” 2017. [Online]. Available: <https://www.rsc.org/>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [23] A. Haşimi, “Cam Elyaf Takviyeli Plastik (Cetp) Kompozitlerin Delinmesinde İşleme Kalitesi Üzerine Soğutma Şartlarının Etkisinin Araştırılması,” Batman Üniversitesi, 2018.
- [24] M. O. K. Baylak, “Reçinelerin Kayma Değerlerinin Araştırılması,” Türk Hava Kurumu Üniversitesi, 2016.
- [25] K. K. Autar, *Mechanics Of Composite Materials*, 2nd Ed. Taylor & Francis, 2006.
- [26] I.-J. Chin, T. Thurn-Albrecht, H.-C. Kim, T. P. Russell, And J. Wang, “On Exfoliation Of Montmorillonite İn Epoxy,” *Polymer (Guildf)*, Vol. 42, No. 13, Pp. 5947–5952, Jun. 2001, Doi: 10.1016/S0032-3861(00)00898-3.
- [27] H. Işık, “Namlu İçerisindeki Balistik Parametrelerin Modellenmesi,” *J. Def. Sci.*, Vol. 15, No. 2, Pp. 157–177, 2016.
- [28] Sefa Emin Özgültekin, “Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi,” Sakarya Üniversitesi, 2012.

- [29] M. A. Meyers, *Dynamic Behavior Of Materials*. Hoboken, Nj, Usa: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [30] Ş. Karagöz And H. Atapek, “Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı,” İn 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, 2007, Pp. 187–190.
- [31] G. Madhusudhan Reddy, T. Mohandas, And K. . Papukutty, “Effect Of Welding Process On The Ballistic Performance Of High-Strength Low-Alloy Steel Weldments,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 74, No. 1–3, Pp. 27–35, Feb. 1998, Doi: 10.1016/S0924-0136(97)00245-8.
- [32] E. Ünaler, “Development And Characterization Of Light-Weight Armor Materials,” İzmir Institute Of Technology, 2005.0
- [33] Msen, “Mbm432 Balistik Malzemeler,” 2017. [Online]. Available: <https://docplayer.biz.tr/1820596-Mbm432-Balistik-Malzemeler.html>.
- [34] E. Eryıldız And A. Akdoğan Eker, “Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler Ve Uygulama Alanları,” *Uluslararası Muhendis. Arastirma Ve Gelistirme Derg.*, Pp. 8–12, Nov. 2015, Doi: 10.29137/Umagd.379785.
- [35] C. Yanen And M. Y. Solmaz, “Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi,” *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Derg.*, Vol. 3, No. 2, May 2016, Doi: 10.31202/Ecjse.264200.
- [36] T. Demir, “Metal Ve Katmanlı Zırh Malzemelerin 7,62 Mm’lik Zırh Delici Meriler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi,” *Tobb Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi*, 2018.
- [37] H. E. Demirtaş, “Mermi-Zırh Etkileşiminin Analizi,” *İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2015.
- [38] E. Schoolnet, “European Schoolnet,” 2011. [Online]. Available: http://blog.eun.org/nanoyou/upload/dış_balistik.doc.
- [39] A. F. Yıldırım, “Mühendislik Yapılarının Deformasyon Analizinde Gps Ölçülerinin Kullanılabilirliği,” *Selçuk Üniversitesi*, 2007.
- [40] E. Akbulut, “Investigating The Effects Of The Scanning Strategy And Layer Thickness For Electron Beam Melting By Using Finite Element Method,” *İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2019.
- [41] F. Ertuğ, “Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapısal Analiz Ve Optimizasyon,” *Yıldız Teknik Üniversitesi*, 2011.

- [42] Ansys, “Introduction To Ansys Mechanical Apdl,” Introduction To Ansys Mechanical Apdl. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/services/training-center/structures/introduction-to-ansys-mechanical-apdl>. [Accessed: 10-May-2019].
- [43] Ö. Esen, “Kompozit Yaprak Yayların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yorulma Analizinin Yapılması,” Balıkesir Üniversitesi, 2009.

