

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZIRHLI ARAÇLARDA PARÇALANMA (SPALL)  
ETKİSİNİ ÖNLEYECEK KOMPOZİT YAPININ  
TASARIMI VE ÜRETİMİ**

**Volkan ARIKAN**

**Haziran, 2014**

**İZMİR**

**ZIRHLI ARAÇLARDA PARÇALANMA (SPALL)  
ETKİSİNİ ÖNLEYECEK KOMPOZİT YAPININ  
TASARIMI VE ÜRETİMİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

**Volkan ARIKAN**

**Haziran, 2014  
İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**VOLKAN ARIKAN**, tarafından **PROF. DR. ONUR SAYMAN** yönetiminde hazırlanan “**ZIRHLI ARAÇLARDA PARÇALANMA (SPALL) ETKİSİNİ ÖNLEYECEK KOMPOZİT YAPININ TASARIMI VE ÜRETİMİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Onur SAYMAN

Yönetici

Doç.Dr. Cesim ATAŞ

Jüri Üyesi

Yrd.Doç.Dr Mehmet SARIKANAT

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ayşe OKUR  
Müdür  
Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Öğrencisi olduğum günden bugüne kadar engin bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, teşvik eden, imkan veren ve maddi manevi desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Onur SAYMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmama katkılarından dolayı Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU, Doç. Dr. Cesim ATAŞ, Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN, Yrd. Doç. Dr. Aytaç GÖREN, Doç. Dr. Yusuf ARMAN, Dr. Ahmet Kaan TOKSOY, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÖZEN, Dr. Tolga DOĞAN ve değerli çalışma arkadaşım Araş. Gör. Akar DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmayı 01421.STZ.2012-1 kodlu San-Tez projesi kapsamında destekleyen Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve ROKETSAN ROKET SAN. VE TİC. A.Ş.'ne ve ayrıca Yüksek Öğretim Kurumuna, ÖYP kapsamında sağladıkları imkan ve desteklerden ötürü teşekkürü borç bilirim.

Son olarak iyi kötü tüm zamanlarımda varlığıyla bana destek olan biricik eşim Hatice SAĞLIK ARIKAN'a ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

Volkan ARIKAN

# ZIRHLI ARAÇLARDA PARÇALANMA (SPALL) ETKİSİNİ ÖNLEYECEK KOMPOZİT YAPININ TASARIMI VE ÜRETİMİ

## ÖZ

Bu çalışmada, zırhlı araçlarda balistik saldırı sonucunda meydana gelen saçılma etkisini durdurmak veya saçılma etkisini azaltmaya yönelik kompozit yapı tasarımı ve üretimi deneysel ve nümerik çalışmalarla araştırılmıştır.

Çalışmalarda öncelikle kimyasal enerjili mühimmat testleri ile saçılma özellikleri belirlenmiş daha sonra kimyasal enerjili mühimmat testleri sonlu elemanlar programlarıyla analiz edilmiş ve deneysel ve sayısal sonuçlar değerlendirilerek kompozit darbe test koşulları belirlenmiştir. Belirlenen koşullara karşı dirençli kompozit yapının tasarımı için ilk olarak farklı elyaf ve reçine tiplerinden üretilmiş kompozit malzemeler üzerinde çeşitli testler gerçekleştirilmiş ve hibrid kompozit yapılar tasarlanıp üretilmiştir. Son olarak üretilen kompozit malzemelere balistik testler uygulanarak balistik performansları araştırılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma reçine, fiber ve bağlantı tipinin kompozitin balistik performansına önemli etkisinin olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte bu çalışmada çeşitli malzemelerin farklı avantajları ön plana çıkarılarak üretilecek hibrid kompozitlerin balistik performans yönünden daha başarılı sonuçlar vereceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Balistik darbe, kompozit, sonlu elemanlar metodu

# **DESIGN AND PRODUCTION OF COMPOSITE STRUCTURE TO PREVENT THE EFFECT OF SPALL IN ARMORED VEHICLES**

## **ABSTRACT**

In this work, design and production of composite structure to prevent or reduce the effect of spall in armored vehicles caused by ballistic attack investigated experimentally and numerically.

At first the spall properties of the armor found with high explosive ammunition tests. After that high explosive ammunition tests simulated with finite element method and according to numerical and experimental results composite impact testing conditions specified. Making a design of a composite resistant to these specified conditions, first of all, composite plates with different fibers and resins produced and subjected to various tests and the hybrid composite plates designed and produced. Lastly the ballistic tests performed and ballistic performance of these composites investigated.

Finally this work showed that the resin, fiber and joint type has an important effect on composite ballistic performance. In addition, this work showed that hybrid composites which produced with taking different advantages of various materials have better ballistic performance.

**Keywords:** Ballistic impact, composite, finite element method

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ – MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>8</b>
2.1 Yöntem .....	8
2.2 Kimyasal Enerjili Mühimmat Testleri.....	10
2.2.1 HEAT Mühimmatları.....	11
2.2.2 Zırh Malzemeleri .....	13
2.2.2.1 Alüminyum 5083 .....	13
2.2.2.2 RHA (Rolled Homogenous Armor)–Haddelenmiş Homojen Zırh..	14
2.2.3 Şahit Plakalar .....	15
2.3 Kompozit Yapı Üretimi .....	16
2.4 Düşük Hızlı Darbe Testleri .....	21
2.5 Balistik Limit Hızın Deneysel Olarak Elde Edilmesi .....	22
2.5.1 Sabit Delme Kuvveti Yaklaşımı .....	23
2.5.2 Saçılan Parçacıklar Tarafından Absorbe Edilen Enerji Yaklaşımı.....	24
2.5.3 Tabaka Kalınlığı ve Mermi Çapının Balistik Limit Hızına Etkisi.....	25
2.5.4 Mermi Çekirdeği Tipi ve Yoğunluğunun Balistik Limit Hızına Etkisi...	26
2.6 Balistik Testler .....	26

<b>BÖLÜM ÜÇ - SONUÇLAR VE TASARIM.....</b>	<b>31</b>
3.1 Kimyasal Enerjili Mühimmat ile Yapılan Test Sonuçları .....	31
3.1.1 RHA Test Sonuçları.....	31
3.1.2 AL5083 Sonuçları.....	32
3.2 Nümerik Analiz Sonuçları.....	33
3.2.1 HEAT Mühimmatı Nümerik Analizi .....	33
3.2.2 RHA Testi Nümerik Analizi .....	35
3.2.3 AL5083 Testi Nümerik Analizi .....	38
3.3 Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları .....	41
3.3.1 110 Joule Darbe Testi Sonuçları .....	41
3.3.2 50 Joule Tekrarlı Darbe Testi Sonuçları .....	44
3.4 Hibrid Kompozit Tasarımı .....	49
3.5 Balistik Test Sonuçları .....	53
3.5.1 E-cam Takviyeli Termoset Kompozit Balistik Test Sonucu.....	53
3.5.2 E-cam Takviyeli Termoplastik Kompozit Balistik Test Sonucu .....	54
3.5.3 S-cam Takviyeli Termoset Kompozit Balistik Test Sonucu.....	55
3.5.4 Birinci Tip Hibrid Kompozit Balistik Test Sonucu .....	56
3.5.5 İkinci Tip Hibrid Kompozit Balistik Test Sonucu .....	57
3.6 Değerlendirme .....	59
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>61</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Test düzeneği .....	10
Şekil 2.2 HEAT mühimmatı. ....	11
Şekil 2.3 Şahit plaka dizilimi şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.4 Termoplastik reçineli E-cam prepreg kumaş. ....	18
Şekil 2.5 Sıcak pres .....	18
Şekil 2.6 Termoplastik reçineli E-cam takviyeli kompozit .....	18
Şekil 2.7 Vakum infüzyon yöntemi ile üretim. ....	19
Şekil 2.8 Termoset reçineli E-cam takviyeli kompozit.....	20
Şekil 2.9 S-cam kompozit. ....	20
Şekil 2.10 Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı. ....	21
Şekil 2.11 Safir T-14 yivsiz av tüfeği. ....	27
Şekil 2.12 Testlerde kullanılan kronograf. ....	27
Şekil 2.13 Darbe sonucu görülen bazı hasar tiplerine örnekler. ....	29
Şekil 2.14 Hedef plaka ve kronograf yerleşimi.....	30
Şekil 3.1 RHA plakada meydana gelen deformasyon.....	31
Şekil 3.2 RHA testi darbe sonrası saçılma etkisi. ....	32
Şekil 3.3 Alüminyum plaka ön ve arka yüzeylerindeki deformasyon. ....	32
Şekil 3.4 AL5083 testi darbe sonrası saçılma etkisi. ....	33
Şekil 3.5 HEAT mühimmatı euler modeli. ....	34
Şekil 3.6 Analiz sonucu malzeme deformasyonu. ....	34
Şekil 3.7 Analiz sonucu hız dağılımı. ....	35
Şekil 3.8 RHA testi SPH modeli. ....	36
Şekil 3.9 RHA analizi - saçılan parçacıkların vektörel dağılımı.....	36
Şekil 3.10 RHA analizi - elde edilen maksimum saçılma çapı .....	37
Şekil 3.11 RHA plakasında meydana gelen deformasyon. ....	37
Şekil 3.12 RHA analizi - saçılan parçacıklara ilişkin hız zaman grafikleri .....	38
Şekil 3.13 Al5083 analizi - saçılan parçacıkların vektörel dağılımı. ....	39
Şekil 3.14 Al5083 analizi - elde edilen maksimum saçılma çapı. ....	39
Şekil 3.15 Al5083 plakada meydana gelen deformasyon. ....	40
Şekil 3.16 AL5083 analizi - saçılan parçacıklara ilişkin hız zaman grafikleri. ....	40

Şekil 3.17 Termoset reçineli E-cam kompozit 110 J. darbe sonucu temas kuvveti deformasyon grafiği. ....	42
Şekil 3.18 Termoplastik reçineli E-cam kompozit 110 J. darbe sonucu temas kuvveti deformasyon grafiği. ....	42
Şekil 3.19 Termoplastik reçineli E-cam kompozit temas kuvveti deformasyon eğrileri. ....	43
Şekil 3.20 110 J. darbe sonrası numunelerde meydana gelen deformasyonlar.....	44
Şekil 3.21 Termoset reçineli kompozit 50 J. tekrarlı darbe testi sonucu oluşan temas kuvveti deformasyon eğrileri . ....	45
Şekil 3.22 Termoplastik reçineli kompozit 50 J. tekrarlı darbe testi sonucu oluşan temas kuvveti deformasyon eğrileri . ....	46
Şekil 3.23 Darbe tekrarı boyunca oluşan maksimum temas kuvveti değerleri.....	47
Şekil 3.24 Darbe tekrarı boyunca absorbe edilen enerji miktarları.....	47
Şekil 3.25 Darbe tekrarı boyunca oluşan maksimum enerji miktarları.....	48
Şekil 3.26 Termoplastik ve termoset kompozitlerin tekrarlı darbe sonrası kesit görünüşü.....	49
Şekil 3.27 Birinci tip hibrid kompozit. ....	51
Şekil 3.28 İkinci tip hibrid kompozit tabakaları.....	51
Şekil 3.29 İkinci tip hibrid kompozit. ....	52
Şekil 3.30 E-cam termoset kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda meydana gelen deformasyon.....	53
Şekil 3.31 E-cam termoplastik kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda meydana gelen deformasyon.....	54
Şekil 3.32 S-cam termoset kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda meydana gelen deformasyon.....	55
Şekil 3.33 Birinci tip hibrid kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda meydana gelen deformasyon.....	56
Şekil 3.34 İkinci tip hibrid kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda meydana gelen deformasyon.....	57
Şekil 3.35 İkinci tip hibrid kompozit plakada 12 kalibre testi sonrası ön ve arka kısımlarda meydana gelen deformasyon.....	58
Şekil 3.36 Test edilen kompozit plakalar ve yapılan testlere ilişkin genel veriler.....	58

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1 Malzemelerin farklı hızda darbelere karşı gösterdikleri tepkiler.....	9
Tablo 2.2 AL2024 T-351 alaşımını bazı özellikleri.....	12
Tablo 2.3 Cu-OFHC bazı özellikleri.....	12
Tablo 2.4 Octol patlayıcı bazı özellikleri.....	13
Tablo 2.5 AL5083 mekanik özellikleri.....	14
Tablo 2.6 RHA zırh çeliği mekanik özellikleri.....	15
Tablo 2.7 Üretilen kompozit malzemeler.....	17
Tablo 2.8 Düşük hızlı darbe deneylerinde kullanılan kompozit malzemeler.....	22
Tablo 2.9 Namlu çıkış hızları.....	28
Tablo 3.1 Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması.....	41
Tablo 3.2 Hibrid kompozit yapıları.....	53

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Yüksek hızlı bir parçanın ilerleme doğrultusundaki tabakaya verdiği parçalanma sadece çarpma bölgesinde oluşan darbeden dolayı oluşan parçalanmadan ibaret değildir. Bazen, tabaka delinmemiş olsa da çarptığı tabakanın arka yüzeyinde de bir parçalanma meydana gelebilir. Bu parçalanma, parçalanmış tabakanın personel koruyucu bir zırh, parçacığın ise mühimmat olması durumunda oldukça ciddi bir tehdit oluşturur. Bu nedenle, hızlı gelen parçacığın çarptığı tabakanın arkasına parçalanmayı ya da dağılmayı önleyici veya parçalanmanın saçılma açısını dar bir değerde tutabilen farklı özellikte bir tabakaya ihtiyaç vardır. Bu tehditin ortadan kaldırılması veya etkisinin en aza indirilmesi üzerine yapılacak bir çalışmada öncelikli hedef saçılan parçaların özelliklerinin belirlenmesi olmaktadır. Bu saçılmayı ve parçacıkların hareketini izlemek oldukça maliyetli çalışmalar olduğundan bu aşamada bilgisayar destekli modelleme ve analiz büyük öneme sahiptir. Nümerik analizler ile böyle bir çalışmayı yapmak için farklı yöntemler kullanılabilir. Modellemeyi ağırlı yöntemler olan Lagrange, Euler, Ale veya ağsız yöntem yaklaşımlarıyla çözmek mümkündür. Başaran (2013), yaptığı çalışmada kuş çarpması analizleri üzerinden kıyasla bu analizlerde kullanılan ağsız SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) nümerik metodunun Lagrange, Euler ve Ale (Arbitrary Lagrangian Eulerian) gibi farklı metodlarla, modelleme, çözüm süresi ve hassasiyet yönünden karşılaştırmalarını yapmış ve SPH metodunun diğer yöntemlere göre daha kısa çözüm süreleri sağlaması, yüksek deformasyon oluşan problemlerde deformasyon sonu malzeme sınırlarını yüksek hassasiyetle vermesi, parçalanma, malzeme kopması gibi durumları ve karmaşık geometrileri daha kolay modelleme imkanı sunması yönünden SPH modelinin başarılı olduğunu göstermiştir. Huang ve ark. (2013), yüksek hızlı darbe sonucu meydana gelen enkaz bulutu modellenmesi için yeni bir mühendislik metodu üzerinde çalışmış bunun için ağsız SPH modelini temel alarak birçok nümerik analiz gerçekleştirmişlerdir. Buldukları veriler test sonuçlarıyla büyük oranda örtüşmüştür ancak saçılan SPH elemanlarının hangi parçacığa ait olduğunu belirlemek için ayrıca DebrisID adında bir yazılım geliştirmişler ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Loft, Price, Cole ve Burchell

(2013) AL6061 plakalar üzerinde hızları 1-8,5 km/s aralığında değişen darbe testleri sonuçlarını nümerik olarak incelemişler ve çalışmalarında SPH metodunu kullanmışlardır. Çalışmaları sonunda %10 hata payı ile yaklaşık değerlere ulaşmışlardır. Hayhurst ve Clegg (1997), SPH yöntemi üzerine yaptıkları çalışmada 6,7 km/s hızında darbe sonucu oluşan enkaz bulutunu ve parçacık hızlarını test sonuçlarıyla uyumlu bir şekilde elde etmişlerdir. Lee (2003) yaptığı çalışmada, belirli açıda düzenlenmiş seramik/metal kompozitlerin yüksek hızlı (2,2 ve 2,6 km/s) darbe etkisi altında davranışlarını nümerik olarak incelemiş, penetrasyon derinliği ve balistik limit hızlarını ağırsız yöntemlerle araştırmıştır. Bununla birlikte zırh delici mühimmatın parçalanma (spall) etkisini önleyici araştırmalar önemli yer tutmaktadır, bunların büyük bir kısmı darbeye karşı farklı kompozit yapıların gösterdiği koruma seviyelerinin testi ve bu korumanın en az ağırlık – hacimde nasıl yapılabilirliği konusunda yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalar neticesinde, geçmişte kullanılan malzemelerden oldukça üstün karaktere sahip malzemeler (CFCC, S-2Fiber, Kevlar, 5059-H131 ve 5059-H136 Alüminyum alaşımları gibi), yapılar ve neticesinde ticari ürünler ortaya çıkmıştır (S-2 Glass® Phenolic HJ1, Tensylon® High Performance Materials, AMAP-L C1 – High Temperature Liner, Dyneema® BT10, AGY LHD Ship – “HJ1”Composite Armor System, 636 S-2 Glass® Yarn, Tencate Armourtex, Rosist). Bu ürünler kompozit tabakalardan oluşabilmekte ya da kaplama olarak uygulanabilmektedir (Paxcon PX-2100 gibi). Zırh delici ürünler ve korumalar bir birinin gelişimine bağlı olarak devamlı gelişmektedir. Zırh delici mühimmatın zırhın arkasında oluşturduğu etkilerin tespiti birçok testle sınıflandırılmaya ve standartlaştırılmaya çalışılmıştır (STANAG 4190, MIL-DTL-12560J, MIL-DTL-62474D, MIL-DTL-64154B v.s.). Bu yöntemlerde, zırh delici mühimmatın zırhın arka tarafında yarattığı etkiler (örn. 0.30, 0.50 cal veya 20 mm FSP ile) ve parçacıkların saçılma açılarının belirlenmesinde ya da zırhın korumasının tespitinde (MIL-STD-662F standardındaki gibi) çeşitli özellikte tabakalar kullanılmaktadır. Zırhın arkasına yerleştirilen ve görevi, darbe etkisiyle parçacıkların dağılımına engel olmak olan tabakaların darbe karşısında etkilerinin incelenmesi bu alanda yapılan çalışmaların temelini oluşturmaktadır Gama, Yarlagadda ve Kubota (2006), Erbil, Ekşi ve Bircan (2011). Öne çıkan araştırmaların genel amacı, daha hafif, daha az hacim kaplayan ama dayanımı daha fazla malzeme veya yapı geliştirilmesi Risby,

Wong, Hamouda, Khairul ve Elsadig (2008) yanında, zırh arkasında meydana gelebilecek parçacık saçılışının koni açısını küçültmeye yönelik özellik geliştirme yönünde Karpenko ve Pfister (2007) bir kısmı ise benzetim yöntemlerinin deneysel model ya da çalışma ile karşılaştırılmasıdır Arnold ve Rottenkolber (2003); Verolme, Szymczak ve Broos (1999). Ancak, gerek balistik testler ve standartların tespiti gerekse de parçacıkların dağılımını sınırlayıcı (spall liner) özellikte tabakalar üretmek maliyetli araştırmalardır. Bu nedenle bu konuda gerçekleştirilen araştırmaların bir kısmı daha ekonomik yapı üretimi üzerine yoğunlaşmıştır Fink ve Jr. Gillespie (2000).

Literatür incelendiğinde mühimmatın meydana getirdiği parçalanma (spall) etkisini önleyen yapılarla ilgili pek fazla çalışmanın olmadığı görülmektedir. Buna rağmen balistik darbe ile ilgili literatürde karşılaşılan pek çok çalışma yukarıda bahsedilen etkinin azaltılmasına yönelik çalışmalara ışık tutabilecek niteliktedir. Bu çalışmalarda çok değişik yapılarla karşılaşılmakta olup amaç temelde yapının balistik darbelere karşı performansının artırılmasıdır. Söz konusu çalışmalar deneysel, nümerik ve analitik çalışmalar olup aşağıda, kullanılan malzeme türlerine göre, bazı örnekleri verilmektedir.

Park ve Jang (1998), Kevlar (aramid) / polietilen hibrit kompozitlerin balistik darbelere karşı mekanik performansları üzerine hibrit yapının etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında kevlar fiber içeriğinin ve yükleme doğrultusunun bir fonksiyonu olarak hibrit malzemelerin eğilme özelliklerini, tabakalar arası kayma mukavemeti değerlerini ve darbe davranışlarını incelenmişlerdir. İki farklı tabaka sıralanışını ( $[0/0]_4$ ,  $[0/90]_4$ ) ve dört farklı kevlar fiber hacimsel yüzde içeriğini (%0, 50, 75 ve 100) dikkate almışlardır. Kevlar hacimsel yüzdesinin artmasıyla, eğilme mukavemetinin ve eğilme modülünün arttığını gözlemlemişlerdir. Yükleme Kevlar doğrultusunda uygulandığında en yüksek eğilme mukavemeti değerlerini elde etmişlerdir. Kevlar 29 ile takviye edilmiş ince kompozit plaklar üzerine uygulanan balistik darbe problemlerinin deneysel ve nümerik simülasyonu Silva, Cismasiu ve Chiorean (2005), tarafından incelenmiştir. Balistik deneylerde farklı kalınlıklara sahip plaklar üzerine STANAG-2920 standardına uygun olarak dizayn edilmiş ve

simülasyonu daha önceden yapılmış parçacıklar kullanmışlardır. Nümerik çalışmalarda sonlu farklar yöntemine dayalı ticari bir program kullanmışlardır. Elde edilen değerleri, benzetim performansını belirlemek için, deneysel verilerle karşılaştırmışlar ve hesaplamalı benzetim ve deneysel sonuçlar arasında, hem deformasyon hem de tabakaların hasarı açısından, iyi bir uyum olduğunu tespit etmişlerdir. Zhang, Batra ve Zheng (2008), 10 tabakalı woven Kevlar zırhın zamana bağlı 3 boyutlu deformasyonlarını LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı tespit etmeye çalışmışlardır. Numuneler kare çelik bir çerçeve ile tutturulmuş ve 9 mm FMJ 124 grain mermi tarafından darbeye maruz bırakılmıştır. Kevlar 29 fiber kullanılarak hazırlanmış bir tabaka ile hibritleştirilmiş E-glass fiber takviyeli kompozitin darbe davranışı deneysel ve analitik olarak Muhi, Najim ve de Moura (2009), tarafından incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda Kevlar tabakasının 4 farklı yerleşim pozisyonunun darbe davranışı üzerine etkileri dikkate alınmış ve 3 farklı vurucu geometrisi (düz, yarı küre ve konik) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar hibritleştirilmenin, nüfuz etmeye karşı tabakaların performansını artırdığını göstermiştir. Ayrıca tabakaların darbeye karşı olan cevaplarının vurucu geometrisine karşı yüksek derecede hassas olduğu da gözlemlenmiştir. Abu Talib, Abbud, Ali ve Mustapha (2012), yüksek hızlı darbeye maruz woven Kevlar-29 fiber- $Al_2O_3$  toz ve epoksi reçine kullanılarak hazırlanmış olan bir hibrit kompozit malzemenin darbeye karşı olan performansını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerji teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir.

Gillespie, Monib ve Carlsson (2003), balistik darbe yüklerine maruz ince S2 cam elyaf takviyeli polyester, vinilester ve epoksi matrisli kompozit panellerin hasar dayanımlarını incelemişlerdir. Hasar şekillerini ve büyüklüklerini ultrasonik yöntem kullanılarak belirlemişlerdir. El yatırma yöntemiyle hazırlanan cam lifi polyester kompozit paneller üzerinde daha geniş bir hasar gözlemlenmiştir. Cam lifi vinilester ve cam lifi epoksi paneller SCRIMP yöntemi kullanılarak üretilmiş ve daha küçük bir hasar gözlemlenmiştir. Kalınlık boyunca dikilen cam lifi vinilester ve cam lifi epoksi panellerin darbe sonucu meydana gelen hasar boyutlarında azalma tespit etmişlerdir. Dikilmiş S2-Cam fiber / SC-15 Epoxy kompozitlerin düşük hızlı ve

balistik darbe yüklerine karşı verdikleri cevabı Hosur, Karim ve Jeelani (2004), deneysel olarak incelemişlerdir. Kompozit plakalar vakum destekli reçine infüzyon sistemi (VARIM) kullanılarak üretilmiştir. Dikilmemiş ve dikilmiş tabakalar dikkate alınmış ve dikim işlemi için 3-cord Kevlar iplik kullanılmıştır. 25,4 mm ve 12,7 mm boyutlu kare hücreler şeklinde kalınlık boyunca dikim işlemi yapılmıştır. Balistik darbe deneyleri için 300x300 mm boyutlarında tabakalar ve bir gaz tabancası (gas-gun) sistemi kullanmışlar ve dikim işleminin hasar direncini önemli derecede artırdığı sonucunu elde etmişlerdir. Sevkat, Liaw, Delale ve Raju (2009a), yüksek hızlı bir gas-gun kullanarak balistik darbeye maruz bırakılan S2 cam fiber kompozit kırımlarda meydana gelen hasarı incelemek için deneysel yöntem ve 3 boyutlu dinamik sonlu elemanlar yaklaşımını beraberce uygulamışlardır. Deneysel sonuçları simüle etmek için LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımını tercih etmişlerdir. Dinamik strain ve hasar şekilleri karşılaştırıldığında deneysel sonuçlar ve sonlu eleman çözümleri arasında güzel bir uyum yakalamışlardır. Yine Sevkat, Liaw, Delale ve Raju (2009b), 4 farklı hızda ağırlık düşürerek darbeye maruz bırakılan hibrit woven kompozit panellerin hasar davranışlarını deneysel yöntem ve 3 boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımını beraberce kullanılarak incelemişlerdir. Testlerde 177° de kütleme işlemi yapılan S2 cam fiber - IM7 grafit fiber / Epoxy reçine hibrit kompozit malzemeler kullanmışlardır. Hasarlı numuneler üzerinde C-Scan ile ultrasonik yöntemle hasar analizi yapmışlardır. Xiao, Gama ve Gillespie (2007), deneysel ve nümerik olarak, S-2 cam fiber / SC15 epoksi reçine kompozit tabakalar üzerinde, dairesel zımbalı quasi-statik zımba kayma testleri yapmışlardır. Nümerik çalışmalarda LS-DYNA 970 sonlu elemanlar programı ve nümerik model olarak, yine LS-DYNA tarafından geliştirilmiş olan MAT 162 kompozit hasar modelini kullanmışlardır. Bu model hasarın ilerlemesini verecek şekilde hasar mekaniği prensiplerini kullanmaktadır. İnce kesitli kompozitlerin balistik hasar ve nüfuz etme mekaniği Gama ve Gillespie (2008), tarafından ele alınmıştır. Balistik penetrasyon ile quasi-statik penetrasyon arasında ilişki kurabilmek için aynı sınır şartlarına sahip deneyler yapmışlardır. Quasi-statik zımba kayma testlerine bağlı olarak, balistik penetrasyona ait, bir quasi-statik penetrasyon modeli geliştirmişlerdir. Balistik deneylerde S-2 cam fiber / SC15 epoksi reçine ile üretilmiş olan kompozitler kullanmışlardır. Manzella, Gama ve Gillespie (2011), S-2 cam fiber / SC15 epoksi



reçine kullanarak ürettikleri kompozitlerde hasar başlangıcı ve nüfuziyet süresince hasarın ilerleme metodunu karakterize edebilmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Hasar başlangıcını tahmin edebilmek için nümerik gerilme dağılımlarını kullanarak değişik hasar kriterleri dikkate almışlardır.

Naik ve Shirao (2004), plain örgü tipi E-cam/epoksi ve twill örgü T300 karbon/epoksi kompozitlerin balistik darbe davranışları analitik olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda balistik darbe süresince meydana gelen farklı hasar ve enerji absorbe etme mekanizmaları tanımlamışlardır (Hedefin arka yüzeyinde koni oluşumu, birincil ipliklerin çeki hasarı, ikincil ipliklerin deformasyonu, delaminasyon, matris kırılması, penetrasyon boyunca kayma ve sürtünme). 30 tabakalı cam fiber / epoksi kompozitler kullanılan kurşungeçirmez tabakaların balistik davranışları Nunes, Paciornik ve d'Almeida (2004), tarafından incelenmiştir. Bu amaçla tabakaların bileşenlerinin özelliklerini ve / veya tabakaların sıralanışını değiştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar sayesinde balistik performansı ölçmek için sadece delaminasyon alanının yeterli olmadığını, aynı zamanda balistik cevabın izotropisinin de önemli olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Da Silva, Paciornik ve d'Almeida (2004) balistik darbe uygulanmış cam lifi takviyeli bir kompozit malzemenin mekanik performansı üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında mermi / tabaka temasını maksimize etmesi ve büyük hasar alanı üretebilmesi için delip geçen atış türlerini tercih etmişlerdir. Her bir atışın meydana getirdiği hasar alanını dijital görüntü analizi ile ölçmüş ve delaminasyon alanının kompozitin darbe mukavemeti üzerine ve elastik direngenliğine etkisini hesaplamışlardır. Yüksek mukavemetli tek yönlü karbon fiber ve epoksi reçineden oluşan (Texipreg® HS160 REM) quasi-isotropic bir kompozitin dinamik bası mukavemeti Guedes, de Moura ve Ferreira (2008), deneysel ve nümerik olarak benzetilerek incelenmiştir. Elde ettikleri sonuçlar statik değerlerle karşılaştırıldığında, quasi-isotropic tabakaların dinamik mukavemet değerlerinin önemli bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışmalarında ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı ve 8 düğümlü 3 boyutlu katı elemanlar (C3D8I) kullanarak nümerik analizler yapmışlardır. Walter, Subhash, Sankar ve Yen (2009), 3 boyutlu cam lifi takviyeli kompozit malzeme üzerine uygulanan balistik darbenin meydana getirmiş olduğu hasar durumunu incelemişlerdir. Çalışmalarında gözlemlenen hasar

modlarına bağılı olarak mikro yapısal özellikleri tartışmışlardır. Hibrit çok eksenli çözümlü örme kumaş kompozit malzemelerin darbe özellikleri Sugie, Nakai ve Hamada (2009), tarafından incelenmiştir. Burada karbon ve cam fiber olmak üzere iki tür fiber ve matris malzemesi olarak da iki tür reçine, polyester ve epoksi, kullanmışlardır. Darbe testlerinden sonra kesit alanlarını gözlemleyerek hasar mekanizmaları ile enerji absorbe etme kabiliyetleri arasındaki ilişkileri belirlemişlerdir.

Goncalves, de Melo, Klein ve Al-Qureshi (2004), seramik / metal bir zırha karşı vurucu parçanın darbe etkisini incelemişlerdir. Kullanmış oldukları model vurucunun kaybolan kütleini ve hızını hesaplamaya izin vermekte ve aynı zamanda destek malzemesinin deplasmanını da vermektedir. Çalışmalarında ayrıca balistik performans üzerine seramik malzemenin tane boyutunun etkisini de incelemişlerdir. Bu amaçla aynı kimyasal kompozisyona ve malzeme özelliklerine sahip ancak farklı tane boyutlu iki formülasyon üzerinde çalışmışlardır. Balistik performansları maksimum hızları ölçerek karşılaştırmışlardır. Seramik bazlı hafif bir zırhın balistik darbeye karşı en uygun dizaynı Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin (2005), tarafından Florence modeli kullanılarak incelenmişlerdir.

Bunların dışında literatürde yukarıda bahsi geçen malzemeler ile farklı koşullarda yüklemeler yapılarak çalışmalar gerçekleştirilmiş bunlardan özellikle düşük hızlarda darbe olarak yapılmış ve balistik darbe deneylerine de ışık tutacak özellikte çeşitli çalışmalarla karşılaşmak mümkündür Baucom, Zikry ve Rajendran (2006); Wang ve ark. (2008); Belingardi, Cavatorta ve Paolino (2008); Dehkordi, Nosraty, Shokrieh, Minak ve Ghelli (2010); Gama ve Gillespie (2011).

## **BÖLÜM İKİ**

### **MATERYAL VE METOD**

#### **2.1 Yöntem**

Yüksek hızla gelen parçacık veya mermi çekirdeğini durdurmak, bu tehdidi ortadan kaldırmak veya etkisini azaltmak birçok malzemeyle mümkün olabilmektedir. Burada tasarımı yapılacak malzemedeki temel amaç üretilen malzemenin balistik performans, fiyat, boyut gibi bazı önemli kriterleri sağlamasıdır. Çalışmada temel amaç yüksek hızlı parçacığın durdurulması, etkisinin azaltılması olmakla beraber hedef tasarımın bir zırhlı araç içerisinde kullanılacak olması bu tasarımın farklı özellikler taşıması gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Balistik direncine ek olarak bu koruyucu plaka motorize bir araç içinde kullanılacağı için kullanılacak malzemenin hafif olması, araç içindeki hareket alanını kısıtlamayacak kalınlıkta olması ve mümkün ölçüde düşük maliyetli olması gerekmektedir.

Konu herhangi bir saldırı durumunda zırhlı araç içerisinde meydana gelebilecek saçılma etkisinin bertaraf edilmesi olduğundan öncelikle bu saçılma durumunun irdelenmesi saçılan parçacıkların boyut ve hızlarının belirlenmesi gerekmektedir. Diğer yandan kullanılması düşünülen kompozit malzemelerin karakteristikleri irdelenmeli ve tasarımda kullanılacak kompozit malzemeler belirlenmelidir. Balistik limit hızına etkiyen faktörler, kompozit malzeme özellikleri, parçacık hızı ve formu birlikte değerlendirilerek tasarım yapılmalıdır.

Balistik bilimi merminin veya yüksek hızlı parçacığın hareketinin oluşumundan hareketi son bulana kadar tüm evreleri içine almaktadır. Zaman içerisinde birçok alanda olduğu gibi balistik bilimi de alt kollara ayrılmış ve bu yolculuğun farklı evrelerine yoğunlaşmışlardır. Bu alt dalları şu şekilde sıralayabiliriz

- İç balistik
- Dış balistik
- Hedef balistiği

İç balistik mermiyi harekete geçiren mekanizma ve merminin namlu içerisindeki hareketini incelemektedir. Dış balistik ise mermi namluyu terk ettiği andan itibaren hareketi boyunca davranışını incelemektedir. Hedef balistiği ise bunlardan ayrı olarak merminin sebep olduğu darbe sonucu hedefte meydana gelen deformasyonlar üzerine yoğunlaşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında bu konuların tamamı ele alınacaktır. İlk olarak kimyasal enerjili mühimmatın mekanizması üzerinde çalışılacak test ve analizleri yapılacak (iç balistik), daha sonrasında ise zırhtan kopan parçacıklar ve bu parçacıkların hareketi üzerinde çalışmalar devam edecek (hedef balistiği ve dış balistik) ve son olarak ürettiğimiz kompozit plaka üzerinde meydana gelen deformasyonlar irdelenecektir (hedef balistiği). Çalışma kapsamı düşük hızlı darbeden hiper hızlı darbelere kadar geniş bir aralıkta olduğundan her plakanın tasarımı ve değerlendirilmesi ayrı kıstaslara göre yapılacaktır. Tablo 2.1 de malzemelerin farklı hızlarda darbelere karşı gösterdiği tepkiler gösterilmiştir. Bu tepkiler göz önüne alınarak nümerik analizlerde Lagrange, Euler, SPH gibi farklı çözümleme yöntemleri kullanılacaktır.

Tablo 2.1 Malzemelerin farklı hızlarda darbelere karşı gösterdiği tepkiler

Hız (m/sn)	Malzeme Üzerindeki Etki	Yükleme Metodu
< 50	Büyük ölçüde elastik, bazı lokal plastisiteler	Mekanik aletler, basınçlı hava tabancası
50-500	Büyük ölçüde plastik durumdadır	Mekanik aletler, basınçlı hava tabancası
500-1000	Viskoz hale gelir, malzeme mukavemeti hala önemlidir.	Ateşli silahlar
1000-3000	Sıvı davranışı görülür, basınç değeri malzeme mukavemet sınırını aşmıştır. Yoğunluk en baskın parametredir	Ateşli silahlar ve gaz tabancaları
3000-12000	Hidrodinamik durum, malzeme sıkıştırılabilirliği ihmal edilemez	Patlayıcı ile ivmelendirme
>12000	Malzeme buharlaşır	Patlayıcı ile ivmelendirme

## 2.2 Kimyasal Enerjili Mühimmat Testleri

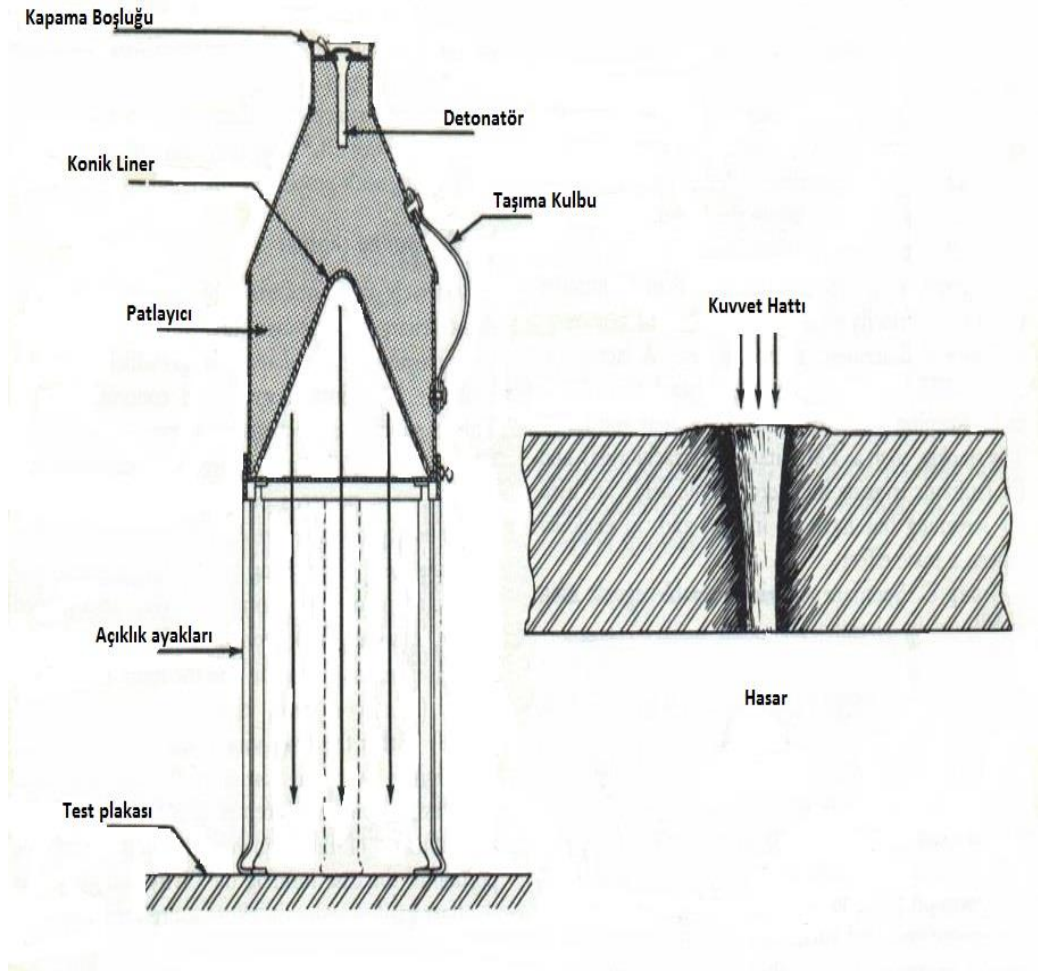
Günümüzde zırhlı araçları muharebe ortamında etkisiz hale getirmek ve böylelikle düşman vuruş kabiliyetini en aza indirmek için birçok silah geliştirilmiştir. Bu silahların en önemli ve etkili kısmını ise kimyasal enerjili mühimmatlar oluşturmaktadır. Askeri tabiri ile HEAT ( High Explosive Anti-Tank), yüksek patlayıcı anti tank mühimmatları bu silahlar arasında en etkili ve yaygın kullanılan silahlar olarak bilinmektedir. Bu sebeple zırh sistemlerinde meydana gelen delinmeyi ve delinme sonucu oluşacak saçılma etkisini elde edebilmek için yapılan testlerde HEAT mühimmatlarıyla testler gerçekleştirilmiştir. Yapılacak testler ITOP'da (International Test Operations Procedure) belirlenmiş standartlara göre hazırlanmış test aparatları, harp başlığı ve şahit plaka dizilimi ile gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği Şekil 2.1 de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Kimyasal enerjili mühimmat test düzeneği

### 2.2.1 HEAT Mühimmatları

HEAT mühimmatları (Şekil 2.2) için en önemli nokta Shape Charge kullanımı olarak öne çıkmaktadır. Shape Charge konik şekilde yumuşak bir metaldan (çoğunlukla bakır) üretilmektedir. Bu konik metalin dış yüzeyi patlayıcı ile tamamen sarılır ve genellikle alüminyum alaşımından yapılan bir kılıf ile kapatılır. Patlayıcının mühimmatın arka kısmından aktive edilmesiyle birlikte patlama gerçekleşmekte ve bu yumuşak metali plastisize edecek ve şekil değiştirip yüksek hız kazanmasını sağlayacak 12 km/s hızında bir basınç dalgası ve yüksek sıcaklık oluşmaktadır. Böylelikle şekil değiştirmiş metal yüksek hızla zırha çarpmakta ve zırhı delerek içeri girmektedir.



Şekil 2.2 HEAT mühimmatı

Bu tip saldırılarda oluşan hasar sadece çarpma bölgesindeki delinmeden ibaret değildir. Patlama sonucu oluşan yüksek hızlı ve sıcak gazlarda delinen bölgeden girerek ikincil etkiyi oluşturacaktır. Hedefin bir tank olduğu ve iç kısımda başka patlayıcılar da bulunduğu düşünüldüğünde mühimmatın etkisi daha iyi anlaşılmaktadır.

HEAT mühimmatı dış kılıfı AL2024, yüksek enerjili patlayıcı Octol ve konik liner yumuşak bir metal malzeme olarak bakır olacak şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemelere ilişkin nümerik analizlerde kullanılacak bazı özellikler aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Nümerik analizlerde kullanılacak bu özellikler Ansys Autodyn malzeme verilerinden alınmıştır.

Tablo 2.2 AL2024 T-351 alaşımı bazı özellikleri

Yoğunluk	2,785 g/cm <sup>3</sup>
Elastisite Modülü	72 GPa
Kayma Modülü	27.6 GPa
Akma Gerilmesi	265 MPa
Poisson Oranı	0,3

Tablo 2.3 CU- OFHC bazı özellikleri

Yoğunluk	8,93 g/cm <sup>3</sup>
Elastisite Modülü	124 GPa
Kayma Modülü	47,7 GPa
Akma Gerilmesi	120 MPa
Poisson Oranı	0,3

Tablo 2.4 Octol patlayıcı bazı özellikleri

Yoğunluk	1,821 g/cm <sup>3</sup>
C/J Detonasyon Hızı	8480 m/s
C/J Birim Enerji	5,272 MJ/kg
C/J Basıç	34,2 MPa

\* C/J ifadesi Chapman–Jouguet yaklaşımını ifade eder. Bu yaklaşım yüksek dereceli patlayıcı analizlerinde dalga hızlarını yaklaşık olarak verebilmektedir.

### **2.2.2 Zırh Malzemeleri**

Kimyasal enerjili mühimmatlar ile yapılan testlerde iki tip zırh malzemesi kullanılmıştır. Bunlar Al5083 alüminyum alaşımı ve RHA zırh çeliğidir. Bu zırh malzemeleri günümüzde zırhlı muharip ve personel taşıyıcı araçlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Farklı malzemeler ile yapılan bu ön testin amacı test sonunda oluşan parçalanmayı gözlemlemek (saçılan parçacıkların boyutu, ortalama hızları ve dağılımının tespiti) ve en yüksek tehdidi oluşturan malzeme üzerinden çalışmalarını devam ettirmektir.

Test sonunda elde edilmek istenen verileri aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

- Plakada meydana gelen deformasyon
- Saçılan parçacıkların boyutları
- Saçılan parçacıkların ortalama hızları
- Saçılma çapı

#### **2.2.2.1 Alüminyum 5083**

Alüminyum 5083 yüksek mukavemeti ve korozyon direnci sayesinde günümüzde deniz taşıtlarında yapı ve askeri araçlarda zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu



alaşım bünyesinde belirli oranlarda mangan ve magnezyum ihtiva eder. Magnezyum alaşımın mukavemetini arttırırken mangan takviyesi ise tanecik yapısını, tanecik sınırlarını ve mikro yapı içerisindeki dağılımlarını düzenler. Böylelikle zırh yapılarında kullanılmasına imkan veren dinamik çekme ve parçalanma hasarına karşı direnci arttırılmaktadır. AL 5083 zırh alaşımını ile ilgili bazı mekanik özellikler Tablo 2.5 de verilmiştir.

Tablo 2.5 AL5083 mekanik özellikleri

Yoğunluk	2,66 g/cm <sup>3</sup>
Elastisite Modülü	71 GPa
Kayma Modülü	27 GPa
Akma Gerilmesi	228 MPa
Çekme Gerilmesi	317 MPa
Kopma Uzaması	16%
Poisson Oranı	0,33

#### 2.2.2.2 RHA (Rolled Homogeneous Armor) – Haddelenmiş Homojen Zırh

Bu zırh çeliği dökme çelik kalıpların sıcak haddeleme yoluyla istenilen boyutlara getirilmesi ile oluşturulur. Yapılan bu işlem çeliğin tanecik yapısını homojenize eder ve kusurlarından arındırır. Böylelikle yüksek hızlı metalleri durduracak mukavemet değerleri sağlarlar. İlk tank üretiminde zırh yapısında bu çelikler kullanılmıştır. Tankların kullanılmaya başlanması ile birlikte anti-tank silahları da üretilmeye, geliştirilmeye başlandı ve bu silahların zırh delme kabiliyetleri debildikleri RHA kalınlığına göre sınıflandırıldı. Bu sınıflandırma bugün de kullanılmaktadır. Ancak HEAT mühimmatları ve shape charge kullanımı ile birlikte RHA zırhının bu tip silahlara karşı koruma sağlayamaması sebebiyle yeni nesil tanklarda bu zırh kullanılmamaktadır. Çalışma kapsamında zırhta meydana gelecek parçalanma ve

saçılma inceleneceği ve bunun azaltılması yönünde çalışılacağı için yüksek hızlarda ve yoğun parçalanma, saçılma gösteren RHA zırh çeliğinin kullanılması düşünülmüştür. Yapılacak testler aynı zamanda sonlu elemanlar paket programlarıyla modellenip analizler yapılacağından RHA zırh çeliğiyle ilgili mekanik özellikler Tablo 2.6 de verilmiştir. Bu özellikler Ansys Autodyn malzeme kütüphanesinden alınmıştır.

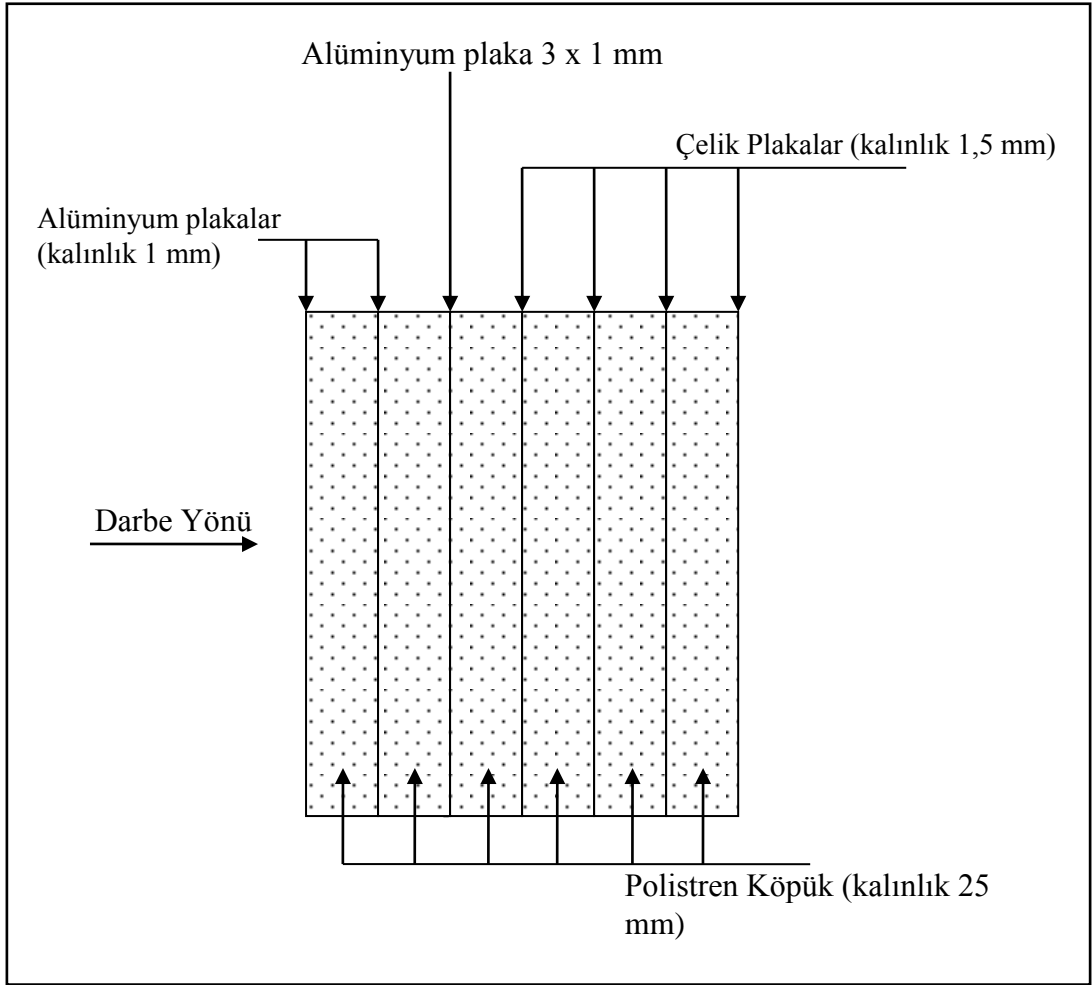
Tablo 2.6 RHA zırh çeliği mekanik özellikleri

Yoğunluk	7,86 g/cm <sup>3</sup>
Elastisite Modülü	167 GPa
Kayma Modülü	64 GPa
Akma Gerilmesi	1303 MPa
Çekme Gerilmesi	1655 MPa
Kopma Uzaması	14,4%
Poisson Oranı	0,3

### 2.2.3 Şahit Plakalar

Şahit plakalar test sonunda parçalanma etkisini ve dağılımını görebilmek için zırh arkasına yerleştirilmiş alüminyum ve çelik plakalardan oluşmaktadır. Kimyasal enerjili mühimmatın patlatılması ve jetin geçişiyle birlikte zırh üzerinden kopan parçalar zırhtan 60 cm uzaklıkta bulunan şahit plaka dizisine çarpar ve her bir parça sahip olduğu enerji seviyesine göre şahit plaka setinin farklı bir katmanında durur. Böylelikle plakalar üzerindeki hasarlar incelenerek dağılım çapı ve parçacıkların ilerledikleri katmana göre bu dağılım çapı boyunca bir hız profili çıkarılabilir. Bu hız

değerleri kompozit yapı üzerinde yapılacak balistik testlerde test hızının belirlenmesinde referans olacaktır. Şahit plaka dizilimi Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3 Şahit plaka dizilimi şematik gösterimi

### 2.3 Kompozit Yapı Üretimi

Kompozit malzemeyi birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesi ile oluşan ve bu malzemelerden daha üstün özelliklere sahip malzeme olarak tanımlayabiliriz. Kompozit malzemeler üstün özellikleri sayesinde havacılık, uzay, otomotiv, savunma sanayi, denizcilik gibi sektörlerde yoğun olmakla birlikte birçok endüstriyel alanda kendisine yer bulmaktadır. Bu kadar geniş bir kullanım alanı bulan kompozit malzemeler, yapısındaki bileşenler ve üretim yöntemleri gibi bazı temel değişkenler sayesinde farklı şekilsel ve yapısal özelliklere sahip olurlar. Bu

bölümde sadece çalışmada kullandığım bileşenler ve üretim yönteminden bahsedilecektir.

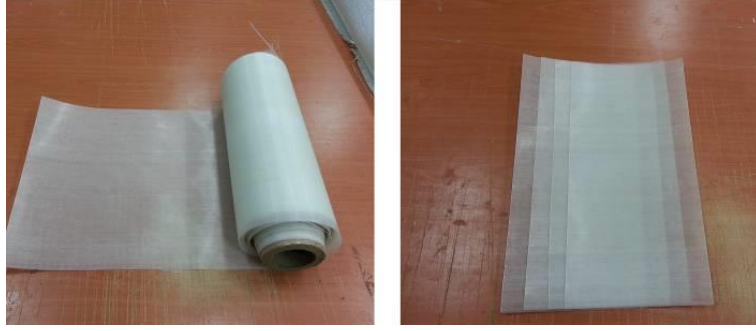
Çalışmanın bu bölümünde kompozit yapı üretiminde farklı özelliklere sahip cam fiber çeşitleri E-cam ve S-cam kumaşlardan farklı yöntemler ile üç farklı kompozit plaka üretilmiştir. Üretilen kompozitlerle ilgili bilgiler Tablo 2.7 de verilmiştir.

Tablo 2.7 Üretilen kompozit malzemeler

Numune Tipi	Takviye Malzemesi	Üretim Yöntemi	Dizilim
1	E-cam (Termoset)	Vakum İnfüzyon	$[(0/90)_{10}]_s$
2	E-cam (Termoplastik)	Sıcak Pres	$[(0/90)_{10}]_s$
3	S-cam	Sıcak Pres	$(0/90)_{32}^w$
4	E-cam / S-cam	Sıcak Pres	$[(0/90)_{4w}^{Sc} / (0/90)_8^{Ec}]_s$
5	S-cam / E-cam / Kevlar	Sıcak Pres	$(0/90)_{12w}^{Sc} / ((0/90)_2)_s / (0/90)_2^K / ((0/90)_2)_s$

Kullanılan kumaş tiplerinden E-cam piyasada en çok kullanılan elyaf türüdür. Maliyet bakımından da diğer elyaflara göre daha kullanışlıdır, iyi yalıtım sağlar balistik olarak performansı çok başarılı olmamasına karşın bu elyaftan termoplastik ve termoset reçine sistemleriyle üretilmiş iki farklı kompozit üzerinde test yapılarak kullanılan reçine sisteminin balistik performansa etkisi değerlendirilecektir. Termoplastik polipropilen reçine emdirilmiş (prepreg) elyaflar rulolardan kesilerek 0/90 derece oryantasyon olacak şekilde simetrik olarak dizilmiştir. Daha sonra üzeri teflon malzeme ile kapatılarak sıcak pres ile 200<sup>0</sup> C sıcaklık ve 0,1 MPa basınç altında kürlenerek üretilmiştir. Bu malzemenin üretilmesinde dikkat edilecek en önemli husus uygulanacak basınç değeridir. İşlemin yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleşmesi ve reçine malzemesinin bu sıcaklık değerlerinde yumuşak halde

bulunması sebebiyle yüksek basınç değerlerine çıkılması kompozitin yapısının bozulmasına sebep olacaktır.



Şekil 2.4 Termoplastik reçineli e-cam prepreg kumaş

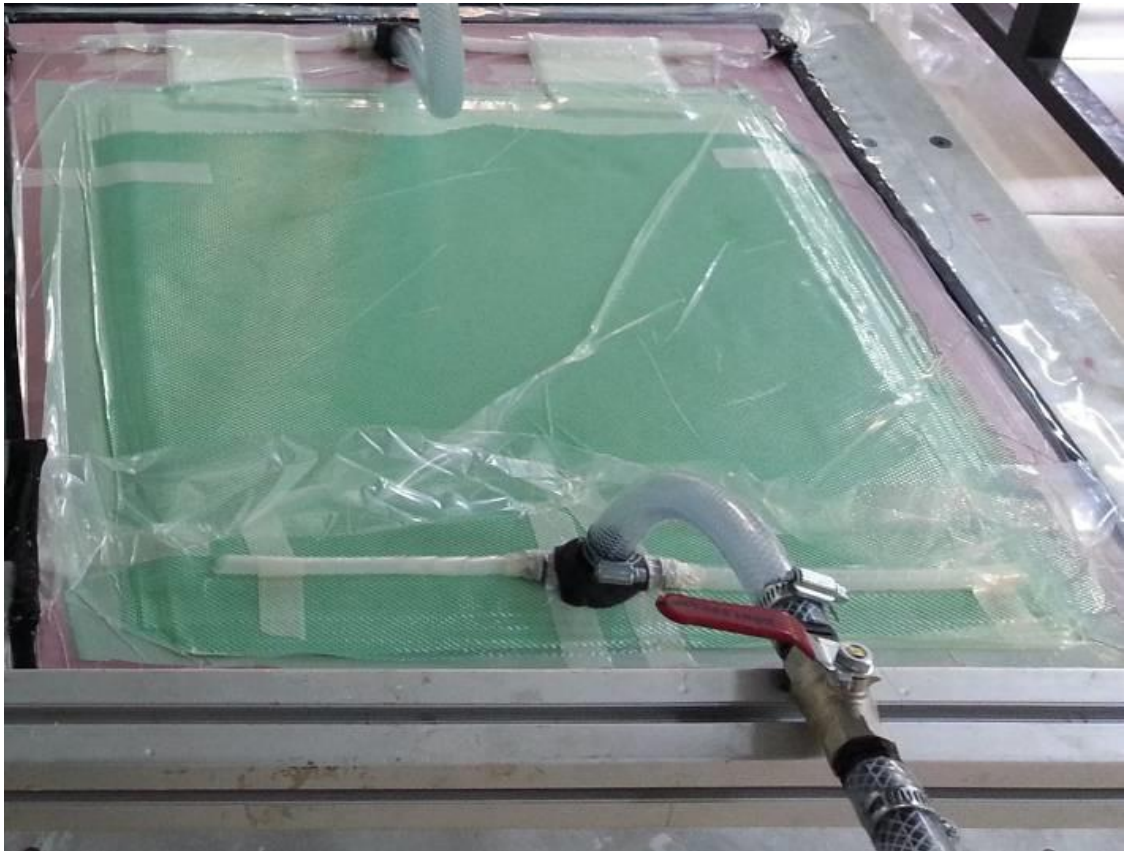


Şekil 2.5 Sıcak pres

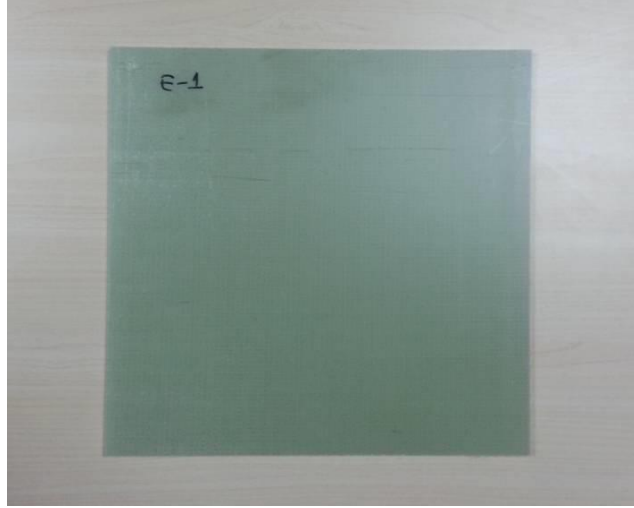


Şekil 2.6 Termoplastik reçineli e-cam takviyeli kompozit

Termoset reçine kullanılarak üretilecek e-cam elyaf takviyeli kompozit plakalar ise vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir, Şekil 2.7. Bu yöntemde önce kompozit üretim masası üzerine yapışmayı engellemek üzere teflon malzeme serilmiş daha sonra E-cam kumaşlar kesilip sıcak pres üretiminde olduğu gibi 0/90<sup>0</sup> oryantasyona sahip olacak şekilde 10 kat simetrik olarak dizilmiştir. Kumaşların zerine aynı boyutta soyma kumaşı ve onunda üzerine reçinenin homojen bir şekilde dağılması için reçine dağıtıcı kumaş konulur ve vakum poşeti ile hava almayacak şekilde kapatılır. Daha sonra üretim sistemine 1 barlık vakum oluşturularak sisteme reçine verilir ve elyaflar reçine emdirildikten belirli sıcaklık ve srelerde kürlenir. Bu çalışmada ürettiğimiz kompozitler kullanılan reçine tipine bağlı olarak 90<sup>0</sup>C sıcaklıkta 2 saat süre ile bekletilerek kürlenmiştir. Bu tip üretim avantajı büyük boyutlu parçaların rahatlıkla retilbilmesi ve sızdırmazlık iyi sağlandığı taktirde homojen yapılar oluşması olarak sıralanabilir. Diğer yandan fiber hacimsel oranının düşük kalması ve çok fazla yardımcı donanım kullanılması ve bu malzemelerin tekrardan kullanılmaması üretim maliyetini arttırmaktadır.



Şekil 2.7 Vakum infüzyon yöntemi ile retim



Şekil 2.8 Termoset reçineli e-cam takviyeli kompozit

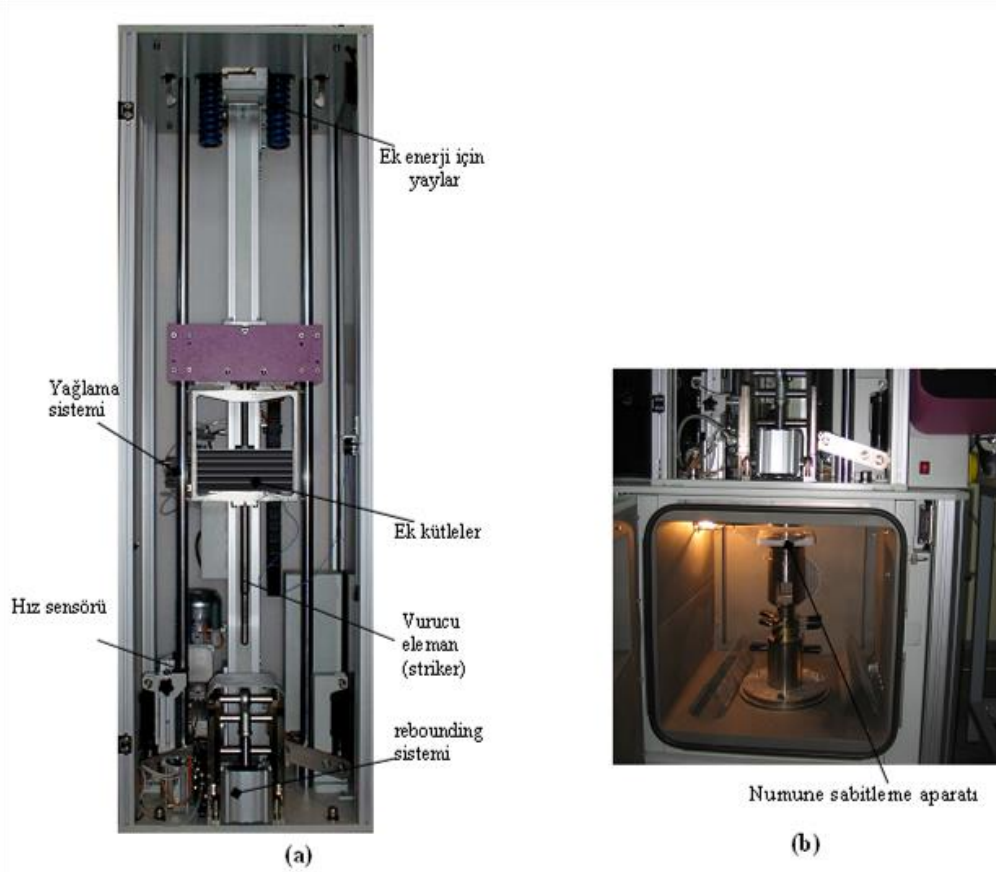
S-cam elyaflar diğer cam elyaf tiplerine göre daha yüksek performanslıdır, elyaf içerisinde bulunan lifler diğer cam elyaf tiplerine kıyasla daha düşük çapa sahip olduğundan (yaklaşık yarısı kadar) daha iyi yapışma ve birleşme meydana gelir. Bu özellik bu elyaftan üretilmiş kompozitlerin daha rijit olmasını sağlar. Ancak bu artı özellikleri maliyetini de oldukça yükseltmektedir. Bu çalışmada yapılacak testlerle S-cam ve E-cam elyaflardan üretilmiş kompozit plakaların balistik performansı karşılaştırılacaktır. Üretimde S-cam takviyeli kompozitlerde prepreg kumaşlar kullanıldı ve sıcak pres yöntemiyle 125<sup>0</sup>C sıcaklıkta 20 dakika süre ile kürlenerek üretildi.



Şekil 2.9 S-cam kompozit

## 2.4 Düşük Hızlı Darbe Testleri

Üretilen kompozitlerin darbeye karşı verdikleri cevaplar yapılacak tasarımlar için önemli yer tutmaktadır. Bu darbe testleri neticesinde çarpışma anında meydana gelen kontak kuvveti, malzemede oluşan deformasyon ve malzemenin sönmülediği enerji miktarı gibi verilere ulaşılabilir. Bu testler kapsamında termoplastik ve termoset reçineli olarak iki farklı reçine tipiyle ürettiğimiz kompozit plakalara düşük hızlı darbe uygulanmış ve absorbe ettikleri maksimum enerji miktarları ölçülmüştür. Daha sonra ise yüklenebildikleri maksimum enerji seviyesi belirlenerek bu enerjide tekrarlı darbeler yapılmak kaydıyla hasar ilerlemesinin bu iki tip kompozitte nasıl farklılıklar göstereceği incelenmiştir.



Şekil 2.10 Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı

Darbe deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazında yapılmıştır,



şekil 2.10. Bu cihaz 24 m/s' ye kadar darbe hızına ve 1800 Joule darbe enerjisine kadar çıkılabilmektedir. Yüksek enerjilere ulaşabilmek için ek enerji yayları ve ek kütleler kullanılmaktadır. Kütlelerin bağlandığı ek kütle hücresinin altına bağlanan vurucu eleman, değiştirilebilir darbe ucu, yük hücresi ve bağlantı elemanlarından oluşmuştur. Yük hücresi sayesinde vurucu eleman ve hedef plaka arasındaki temas kuvveti zamana bağlı olarak alınabilmektedir. Bilgisayara bağlı olan bir veri alma ünitesi yardımı ile yük hücresinin aldığı veriler düzenlenmekte ve yazılım sayesinde grafiklere dönüştürülebilmektedir.

Düşük hızlı darbe deneyi kapsamında E-glass fiberler ile takviye edilmiş iki farklı tip reçine ile üretilmiş (Termoset ve Termoplastik) kompozit malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ilk testler 110 joule darbe enerjisi ile gerçekleştirilmiş daha sonraki aşamada ise 50 joule darbe enerjisi ile tekrarlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Test gerçekleştirilen numuneler Tablo 2.8 de gösterilmektedir.

Tablo 2.8 Düşük hızlı darbe deneyinde kullanılan kompozitler

Numune Tipi	Takviye Malzemesi	Üretim Yöntemi	Alansal Yoğunluk (gr/m <sup>2</sup> )	Dizilim
1	E-cam (Termoset)	Vakum İnfüzyon	300	$[(0/90)_{10}]_s$
2	E-cam (Termoplastik)	Sıcak Pres	300	$[(0/90)_{10}]_s$

## 2.5 Balistik Limit Hızın Deneysel Olarak Elde Edilmesi

Balistik limit hız malzeme üzerinde tam bir delinme meydana getirecek en düşük hız ve kısmi nüfuziyet oluşturacak en yüksek hızın ortalaması alınarak elde edilen bir değer olarak tanımlanmaktadır. Abrate (2007), yaptığı çalışmada, deneysel olarak balistik limit hızın hesaplanmasında kabul edilen bazı yaklaşımları bu konu ile ilgili

olarak yapılmış farklı çalışmalar ışığında ele almış ve değerlendirmelerde bulunmuştur.

### 2.5.1 Sabit Delme Kuvveti Yaklaşımı

Birçok araştırmacı balistik limit hızın tespitinde hedef plakanın delinmesi için sabit bir delme kuvveti gerektiğini ve plaka tarafından absorbe edilen enerjinin plakanın kalınlığıyla doğru orantılı olarak değiştiğini kabul ederek çalışmalar yapmışlardır. Bu yaklaşımda,

$M$  : Mermi kütlesi

$V_i$  : Mermi giriş hızı

$V_b$  : Balistik limit hızı

$V_r$  : Çıkış hızı

$$U_r = \frac{1}{2} M V_r^2 \quad (\text{Artık kinetik enerji}) \quad (2.1)$$

$$U_i = \frac{1}{2} M V_i^2 \quad (\text{Başlangıç durumu kinetik enerjisi}) \quad (2.2)$$

$$U_b = \frac{1}{2} M V_b^2 \quad (\text{Delme kinetik enerjisi}) \quad (2.3)$$

$$U_r = U_i - U_p \quad (2.4)$$

Robins (1742) ve Euler (1745) delinmeye karşı malzemenin gösterdiği direncin merminin kesitiyle orantılı olduğunu varsaymışlardır.

$$F = c_0 \quad (\text{sabit}) \quad (\text{Delinme direnci})$$

Merminin rijit olduğu varsayılır ve bir  $F$  direnç kuvvetine maruz bırakılırsa, Newton'un hareket yasalarından hareketle,

$$F = M v \frac{dv}{dx} \quad (2.5)$$

$$F dx = M v dv$$

$$\int F dx = \int M v dv$$

$$F x = \frac{1}{2} M V^2 \quad \longrightarrow \quad U_p = c_0 h \quad (2.6)$$

h: tabaka kalınlığı

2.4 numaralı denklemlerle ilgili problem şu ki, bu denklemler çıkarılırken delinme direnci ve statik delinme enerjisi birbirine eşit kabul edildi ancak önemli sayıda araştırmacı,

$$U_{abs} = U_i - U_r \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilen absorbe edilen enerjinin başlangıç enerjisi ile doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Hatta bazı sonuçlar balistik testlerde ölçülen absorbe edilen enerji miktarının, serbest düşme testlerinde ölçülenlerin yaklaşık iki katı kadar olduğunu göstermiştir.

### 2.5.2 Saçılan Parçalar Tarafından Absorbe Edilen Enerji Yaklaşımı

Bu yaklaşımda denklem 2.1'de görülen yetersizlikleri açıklamak için delinme sonunda mermiye ek olarak saçılan parçalarında kütleleri hesaba katılmış ve hızları mermi çıkış hızına eşit olarak alınmıştır.

Burada,

**m**: saçılan parçıkların kütlesi

$$\frac{1}{2}(M + m)V_r^2 = \frac{1}{2}M V_i^2 - U_p \quad (2.8)$$

Mermi giriş hızı balistik limit hızına eşit olduğunda çıkış hızı sifira eşit olacaktır. O halde,

$$U_p = \frac{1}{2}M V_b^2 \quad (2.9)$$

Böylelikle 4 numaralı denklem şu şekilde yazılabilir.

$$U_r = (U_i - U_p) / \left(1 + \frac{m}{M}\right) \quad (2.10)$$

Artık enerji ve başlangıç enerjisi ile bir grafik çizildiğinde eğimin 1 veya daha az olduğu görülecektir. Buna delinme esnasında kopan parçaların kinetik enerjilerinin sebep olduğu anlaşılmaktadır. 2.10 numaralı denklem şu şekilde yazılabilir,

$$V_r = \alpha \left( V_i^p - V_b^p \right)^{1/p} \quad \text{Lambert-Jonas denklemi} \quad (2.11)$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m}{M}}} \quad (2.12)$$

P parametresi merminin rijit kabul edildiği durumda genellikle 2 olarak alınır.

### **2.5.3 Tabaka Kalınlığı ve Mermi Çapının Balistik Limit Hızına Etkisi**

Delinme direnci sabit kabul edildiğinde, (F = sabit) delinme enerjisi bunun sonucu olarak tabaka kalınlığıyla orantılı olacaktır. Gupta ve Davids (1966), cam lifle takviye edilmiş termoplastik numunelere düşük kalibrede mermilerle gerçekleştirdikleri testlerde, absorbe edilen enerji miktarının alansal yoğunluk ve tabaka kalınlığı ile doğrusal olarak arttığını göstermişlerdir.

Iremonger ve Went (1996), yaptıkları çalışmada kompozit numuneler üzerine FSP (Fragment Simulating Projectile) mermileri ile yaptıkları çalışmada balistik limit hızın tabaka kalınlığının karekökü ile orantılı olarak değiştiğini göstermişlerdir.

Bartus ve Vaidya (2005), yaptıkları çalışmada düz ve konik burunlu silindirik mermiler kullanmışlar, delinme enerjisinin alansal yoğunluk ve tabaka kalınlığıyla orantılı olarak arttığını göstermişler ve ek olarak konik tip mermi kullanılan testlerde düz mermi kullanılanlara göre %27 daha az delme enerjisi gerektiğini göstermişlerdir.

Fatt, Lin, Revilock ve Hopkins (2003), Lin ve Fatt (2006), yaptıkları çalışmada kalınlık veya kalınlığa denk kabul edilebilecek alansal yoğunluğun fonksiyonu olarak bir formülasyon bulmuşlar ve sonuçlarını deneysel verilerle uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

$$V_b^2 = 273,1w + 8898 \quad (2.13)$$

#### 2.5.4 Mermi Çekirdeği Yoğunluğunun Balistik Limit Hızına Etkisi

Czarnecki (1994), Czarnecki (1998) karbon epoksi kompozit tabakalara bir dizi darbe testleri uygulamış ve bu testlerde alüminyum, çelik ve tungsten malzemelerden imal edilmiş küreler kullanmıştır. 12,7 mm çapındaki küreler için balistik limit hızları sırasıyla 625, 371,3 ve 281,9 ft/s olarak bulmuşlardır. Buradan hareketle eğer delinme enerjisi  $U_p$  sabit ise (1 numaralı denklemde kabul edildiği gibi) balistik limit hızı mermi yoğunluğunun karekökü ile ters orantılı olmalıdır şeklinde düşünmüş ve deneylerden elde ettikleri sonuçlarla bunu göstermiştir.

$$V_{50} = 1550,4 / \sqrt{\rho} \quad (2.14)$$

#### 2.6 Balistik Testler

Çalışmanın son bölümünde kompozit plakalara balistik testler uygulanacak ve balistik darbe karşısında performansları tespit edilecektir. Balistik testler iç balistik, dış balistik ve hedef balistiği gibi farklı kategorilere ayrılmaktadırlar. İç balistik merminin silah içinde ateşlenmesinden namluyu terk edene kadar geçen aşamalar, dış balistik hedefe varana kadar geçen aşama, hedef balistiği ise hedefte meydana gelen hasar üzerinde yoğunlaşır. Çalışmanın önceki bölümlerinde HEAT mühimmatı ile ilgili kısımlarda iç balistik, zırhtan kopan parçacıkların değerlendirilmesi kısmında hem dış balistik hem de hedef balistiği çalışmanın bu bölümünde ise sadece hedef balistiği üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Balistik testlerde Safir T-14 yivsiz av tüfeği ve mühimmat olarak tek kurşun av fişeği kullanılmıştır. Av tüfeği ve bazı özellikleri Şekil 2.11 de gösterilmektedir. Kullanılan fişekteki mermi 36 kalibre ve ağırlığı 7,5 gramdır. Testler açık arazide bulunan bir poligonda güvenlik tedbirleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Atış noktası ve hedef arası mesafe merminin en yüksek hıza ulaşmasına yeterli olacak şekilde 10 metre olarak belirlenmiştir.

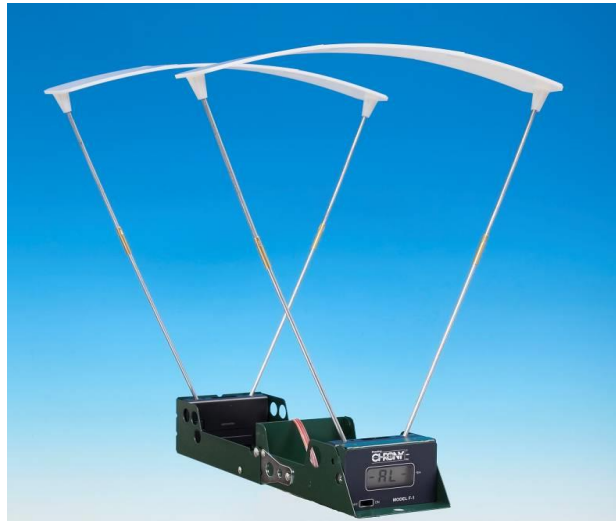
Balistik testlerde en genel haliyle belirlenmek istenen verileri sıralayacak olursak,

- Çarpışma öncesi mermi hızı ve yörüngesi
- Çarpışma sonucu hedefte meydana gelen deformasyon
- Çarpışma sonucu mermide meydana gelen deformasyon
- Kütle değişimi
- Çarpışma sonrası mermi hızı
- Meydana gelen saçılma



Şekil 2.11 Safir T-14 yivsiz av tüfeği

Çarpışma öncesi ve sonrası mermi hızına ilişkin veriler ise osiloskop veya farklı hız ölçüm cihazları vasıtasıyla elde edilebilmektedir. Bu çalışmada hız ölçümleri Shooting Chrony marka kronograf yardımıyla yapılmıştır, Şekil 2.12 Kronograf 9 m/s ile 2135 m/s hızları aralığında tüm değerleri % 95,5 hassasiyetle ölçebilmektedir.



Şekil 2.12 Testlerde kullanılan kronograf

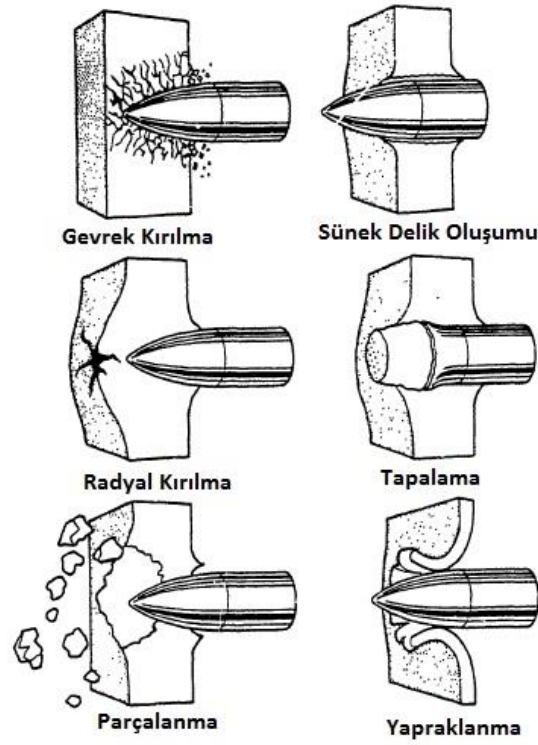
Atışlarda kullanılan tüfeğin fabrika çıkışı belirtilen özellikleri her zaman için yapılan atışlarla bir olmamaktadır. Gerek tüfeğin yapısındaki kusurlar, gerekse kullanılan fişegin barut hakkı burada belirleyici rol oynayabilir. Nitekim Safir T-14 için yapılan testler bizim kullanacağımız fişekten farklı bir fişek kullanılarak yapıldığından namlu çıkış hızları tekrar ölçülmüştür. Namlu çıkış hızı ölçümlerinde testler 3 farklı mesafeden 4 tekrar yapılarak ölçülmüştür. Yapılan atışlar neticesinde elde edilen hız değerleri Tablo 2.9’da gösterilmektedir.

Tablo 2.9 Namlu çıkış hızları

Atış No.	Mermi Çıkış Hızı (m/s)		
	Namlu Ağız	5 m	10 m
1	440,741	442,265	419,405
2	418,490	424,891	449,275
3	436,778	422,758	414,833
4	424,282	444,094	444,398
<b>Ortalama</b>	<b>430</b>	<b>434</b>	<b>432</b>

Mermi yörüngesi incelenmesi birkaç yolla mümkün olabilmektedir. Bunlar yüksek hızlı kamera, radyografi veya “yaw card” analizi yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada gerçekleştireceğimiz testlerde mermi atış bölgesi ve hedef arasındaki mesafe kısa olduğundan mermi yörüngesi tespiti çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Darbeye maruz malzemelerde birçok çeşit hasar meydana gelebilir. Bu çeşitliliği meydana getiren temel etkenlerden en önemlileri malzeme özellikleri, darbe hızı, merminin şekli, hedefin sabitlenme şekli ve hedef ve merminin ölçüleri olarak sıralanabilir. Şekil 2.13 de ince ve orta kalınlıkta plakalarda sık rastlanan hasar tiplerinden örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Darbe sonucu görülen bazı hasar tiplerinde örnekler (Fink ve Gillespie, 2000)

Parçalanma hasarı basınç dalgasının hedef plakanın arka kısmında çeki hasarına sebep olmasıyla oluşur. Genellikle blast etkisi yaratan patlayıcıların kullanıldığı darbe tiplerinde ve hedef plakanın çeki dayanımının bası dayanımına göre daha zayıf olduğu gevrek malzemelerde görülür. Radyal kırılma hasarı ise aynı şekilde seramik gibi çeki dayanımının basıya göre düşük olduğu gevrek malzemelerde görülmektedir.

Tapalama tipi hasar daha çok merminin yarı küre uçlu ya da mermi ucunun köreltilmiş olduğu durumlarda ve balistik limit hızına yakın hız değerlerinde yapılan testlerde görülen bir hasar türüdür.

Yapraklanma hasarı darbe sonucu meydana gelen gerilme dalgasının kalınlık boyunca ilerleyişi sırasında oluşan çevresel çeki gerilmeleri neticesinde oluşur. En yüksek gerilme bölgeleri merminin uç kısmı yakınlarında oluşur. Mermi tarafından aldığı darbeye plakanın ileri doğru hareketi eğilme momenti oluşturur ve bu da yapraklanma deformasyonu oluşmasına yol açar. Genel olarak ince hedef plakalarda ve konik tipte mermilerin balistik limit hızlara yakın değerlerde kullanıldığı durumlarda görülen hasar tipidir.



Hedef plakadaki kütleli değişim balistik limit hızı hesaplamada kullanılan önemli bir veridir. Hedef plakadan saçılan parçaların absorbe ettiği enerji yaklaşımında bahsettiğimiz üzere bu parçacıklar mermi çıkış hızı ile aynı hızda hareket ettikleri kabul edilerek balistik hız hesaplamasında kullanılmaktadır. Saçılan parçacıkların kütlelerini hesaplamak için plakanın test öncesi ve test sonrası ağırlıklarının ölçülmesi yeterli olacaktır.

Hedef plakayı sabitlemek için alüminyum profil kullanılarak test fikstürü üretilmiş hedef plaka bu fikstür üzerinde sabitlenmiştir. Çarpışma sonrası hız ölçümü için kronograf hedefin arkasında uygun mesafede yerleştirilmiş mermi çıkış hızları bu şekilde ölçülmüştür.



Şekil 2.14 Hedef plaka ve kronograf yerleşimi

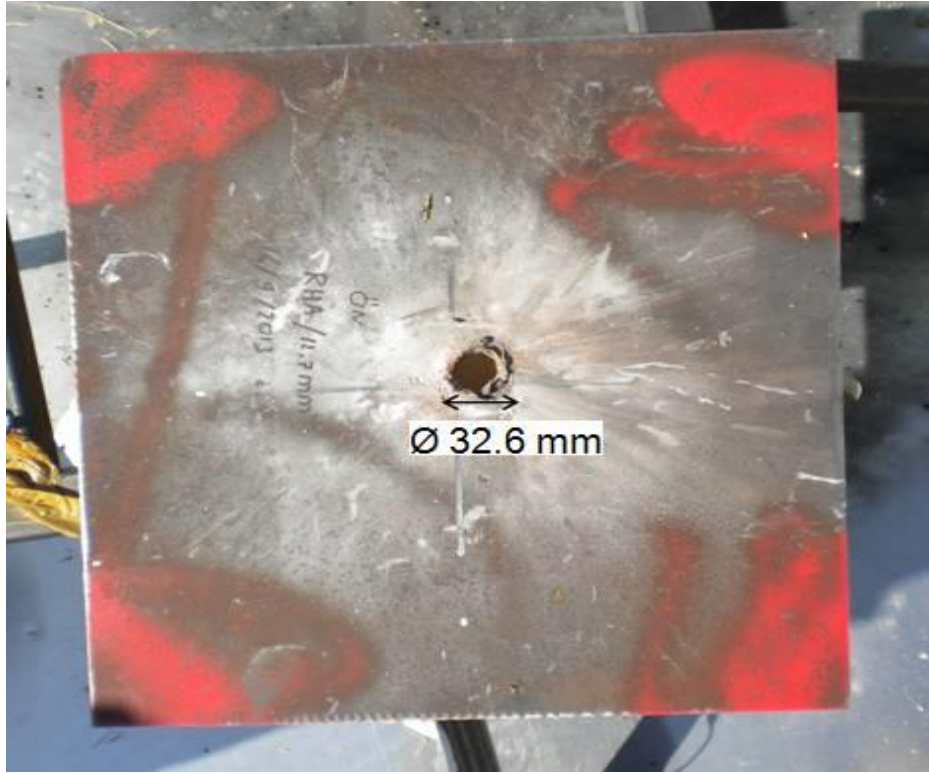
## BÖLÜM ÜÇ

### SONUÇLAR VE TASARIM

#### 3.1 Kimyasal Enerjili Mühimmat ile Yapılan Test Sonuçları

##### 3.1.1 RHA Test Sonuçları

RHA Zırh Çeliği için kullanılan ölçüler 400 mm \* 400 mm \* 12,7 mm olarak belirlenmiştir. Test sonrasında plakada meydana gelen deformasyon Şekil 3.1 de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 RHA plakada meydana gelen deformasyon

Zırh üzerinde 32,6 mm çapında bir delinme meydana gelmiştir. Patlama sonrasında şahit plakalarda görülen dağılım ölçülmüş ve parçacık saçılma çapı 1000 mm olarak belirlenmiştir. Balistik darbe sonrası oluşan saçılma etkisi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 RHA Testi - Darbe sonrası saçılma etkisi

### 3.1.2 AL5083 Test Sonuçları

AL5083 için kullanılan ölçüler 400 mm \* 400 mm \* 38 mm olarak belirlenmiştir. Darbe sonrası plaka üzerinde büyük ölçüde deformasyon görülmüştür. Plakada ön ve arka yüzeylerinde meydana gelen deformasyon Şekil 3.3 de görülmektedir.

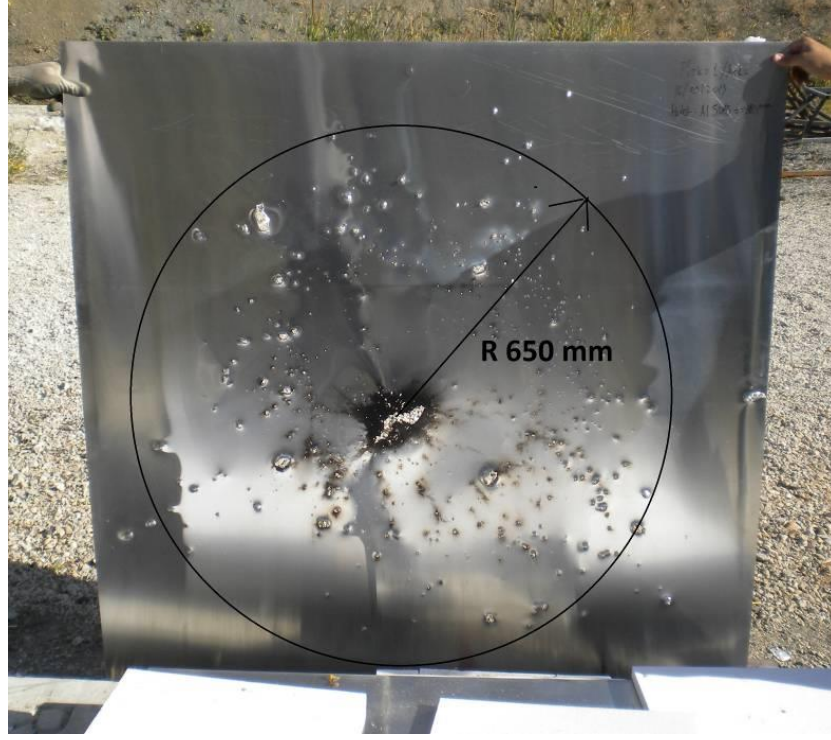


Şekil 3.3 Alüminyum plaka ön ve arka yüzeylerindeki deformasyon.

Patlama sonrasında AL5083 plaka ön yüzünde 58 mm arka yüzünde ise 99 mm çapında delik oluşmuştur. Şahit plakalarda görülen dağılım ayrıca ölçülmüş ve parçacık saçılma çapı 1300 mm olarak belirlenmiştir. RHA testi ile kıyaslandığında



saçılma çapı ve saçılan parçacık boyutu önemli oranda artmıştır. Balistik darbe sonrası oluşan saçılma etkisi Şekil 3.4 de gösterilmektedir.

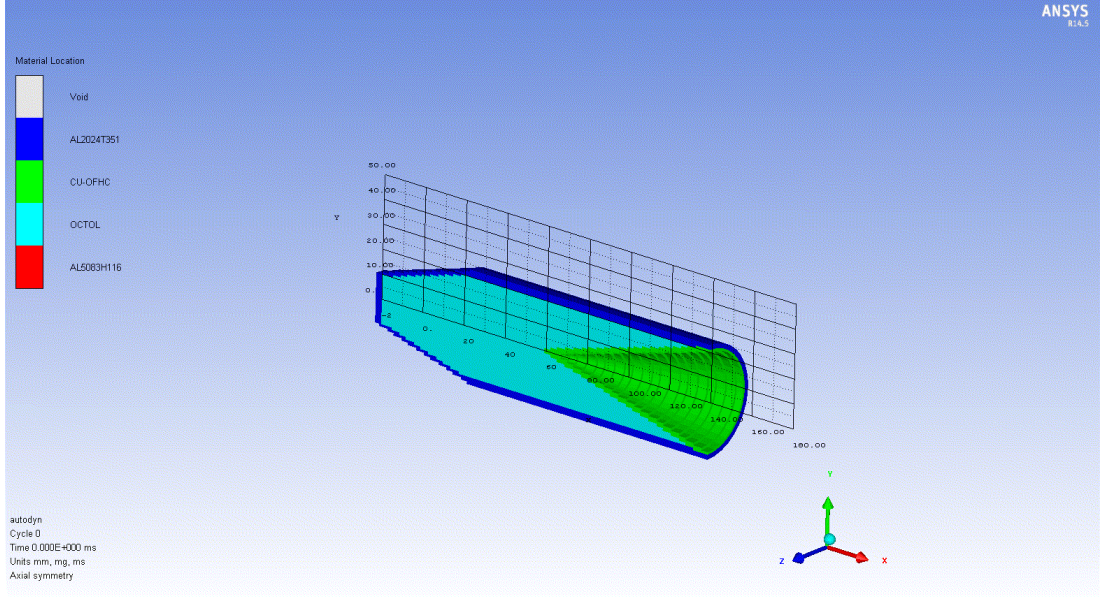


Şekil 3.4 AL5083 Testi - Darbe sonrası saçılma etkisi

## 3.2 Nümerik Analiz Sonuçları

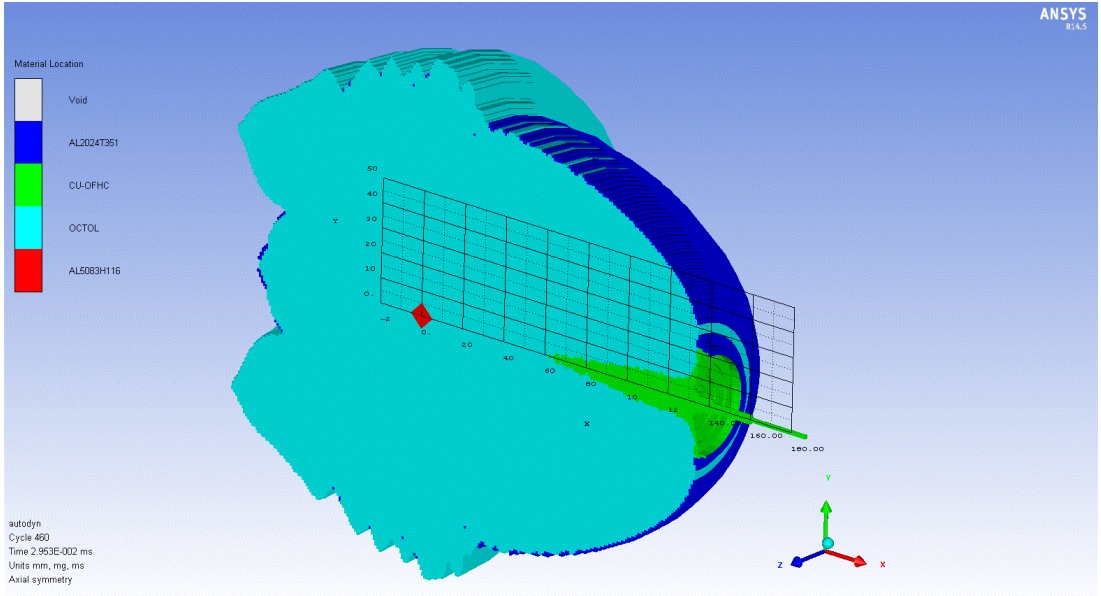
### 3.2.1 HEAT Mühimmatı Nümerik Analizi

HEAT mühimmatı nümerik analizinde alüminyum alaşım (AL2024 T351), Octol patlayıcı ve Bakır (Cu-OFHC) malzemeler kullanılmıştır. Patlama sonucunda yüksek hızlar oluşacağı ve bu hızlarda malzemeler akıcı hale geleceğinden dolayı böyle bir modellemenin euler ortamında yapılması daha uygun olacaktır. Bu sebeple modelleme Euler yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Serbest uzayda sabit bir ağ yapısı oluşturulmuş ve malzemeler bu ağ yapısı içerisinde tanımlanarak parçalar oluşturulmuştur. Analiz sürelerini kısaltmak problemi daha küçük ağ boyutlarında çözebilmek için test sistemi iki boyutlu olarak modellenmiş ve aksi-simetrik olarak çözdürülmüştür. Analiz modeli Şekil 3.5 de görülmektedir.



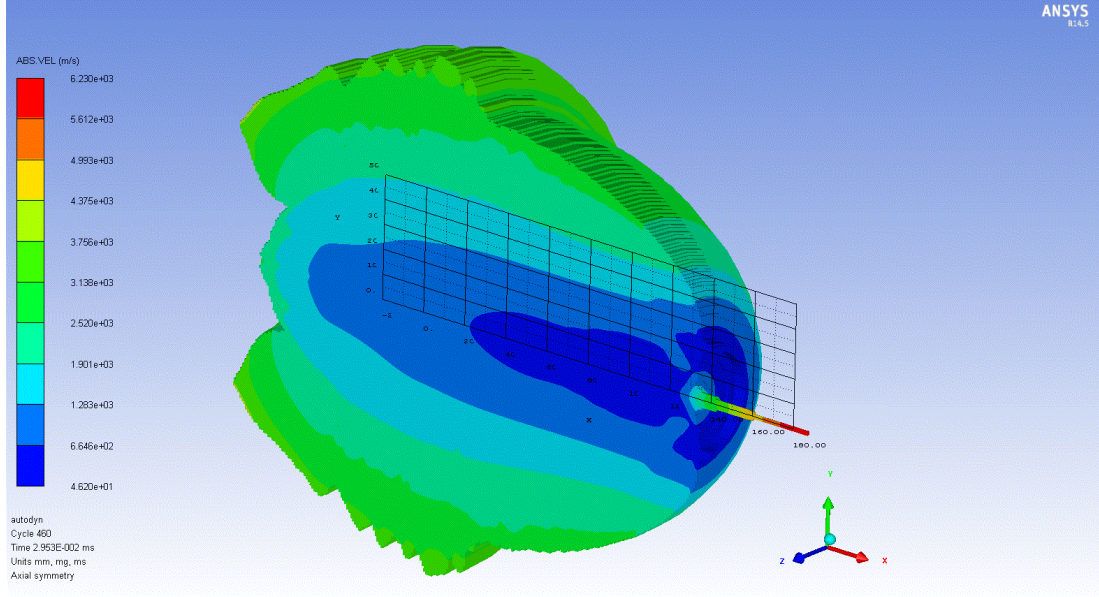
Şekil 3.5 Heat mühimmatı euler modeli

Mühimmat modeli oluşturulduktan sonra detonasyon noktası belirlenip analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan çözümlemede oluşan basınç etkisiyle şekil değiştiren bakırın 6350 m/s hıza ulaştığı belirlenmiştir. Bu modellemede elde edilen hız verisi bir sonraki aşama analizlerde kullanılacak ve zırhta meydana gelen saçılma oluşumu tespit edilecektir. Analiz sonuçları Şekil 3.6 ve 3.7 de görülmektedir.



Şekil 3.6 Analiz sonucu malzeme deformasyonu

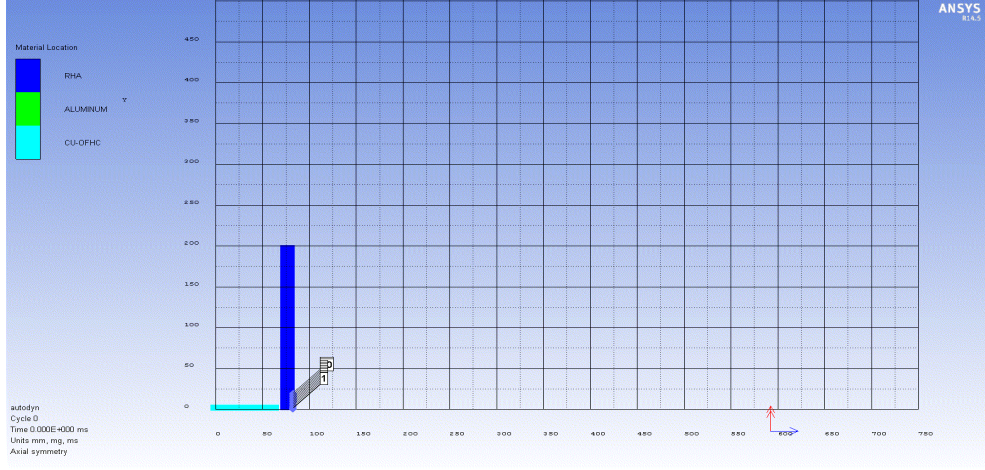




Şekil 3.7 Analiz sonucu hız dağılımı

### 3.2.2 RHA Testi Nümerik Analizi

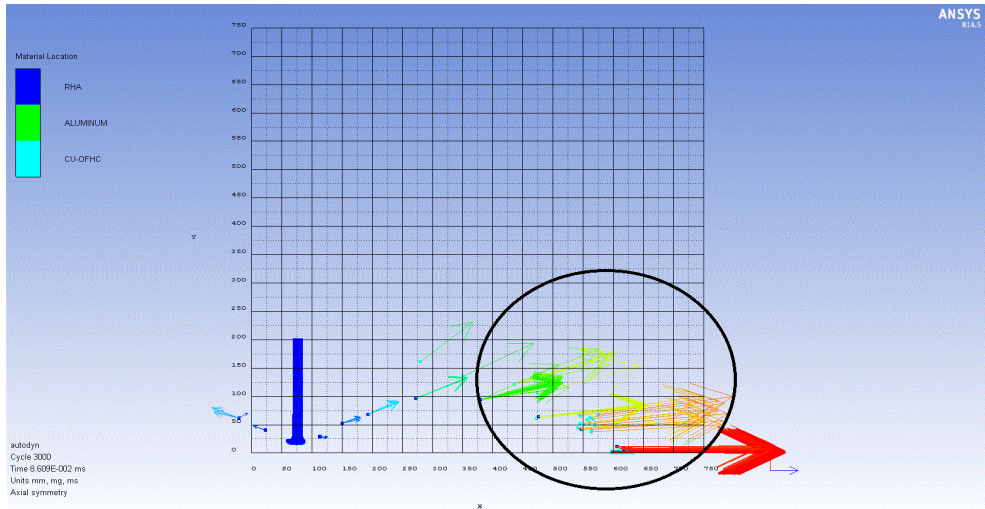
RHA plakasının HEAT mühimmatına karşı gösterdiği performansı, plakada meydana gelen parçalanmayı ve bu parçalanma sonucunda saçılan parçacıkların hız profilini elde etmek için yeni bir model oluşturulmuştur. Bu modellemede parçalanma ve büyük deformasyonları çok iyi benzetebilmesi sebebiyle SPH (Smooth Particule Hydrodynamics) yöntemi kullanılmıştır. HEAT mühimmatı nümerik analizinde elde edilen sonuçlar bu nümerik analizlere doğrudan veri girişi sağlamış ve bu analizlerde bakır parçacığa böylelikle 6350 m/s hız verilmiştir. SPH modellemesinde belirlenmesi gereken en önemli parametre ise SPH elemanının boyutunun doğru belirlenmesidir. Parçacık boyutu hem hedef plaka hemde vurucu parça için doğru belirlemek gerekmektedir. Bu analizde parçacık boyutları testlerde şahit plakalarda ölçülen en küçük delinme çapları dikkate alınarak seçilmesi uygun olacaktır. Bu bilgiler ışığında SPH elemanı parçacık boyutu testlerde elde edilen verilere göre 0.5 mm çap olarak belirlendi. Bu eleman boyutunda daha efektif ve hızlı çalışmak adına bu modellemede iki boyutlu ortamda aksi-simetrik olarak gerçekleştirilmiştir. RHA plakasının testini simüle etmek için yapılan model Şekil 3.8’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.8 RHA testi SPH modeli

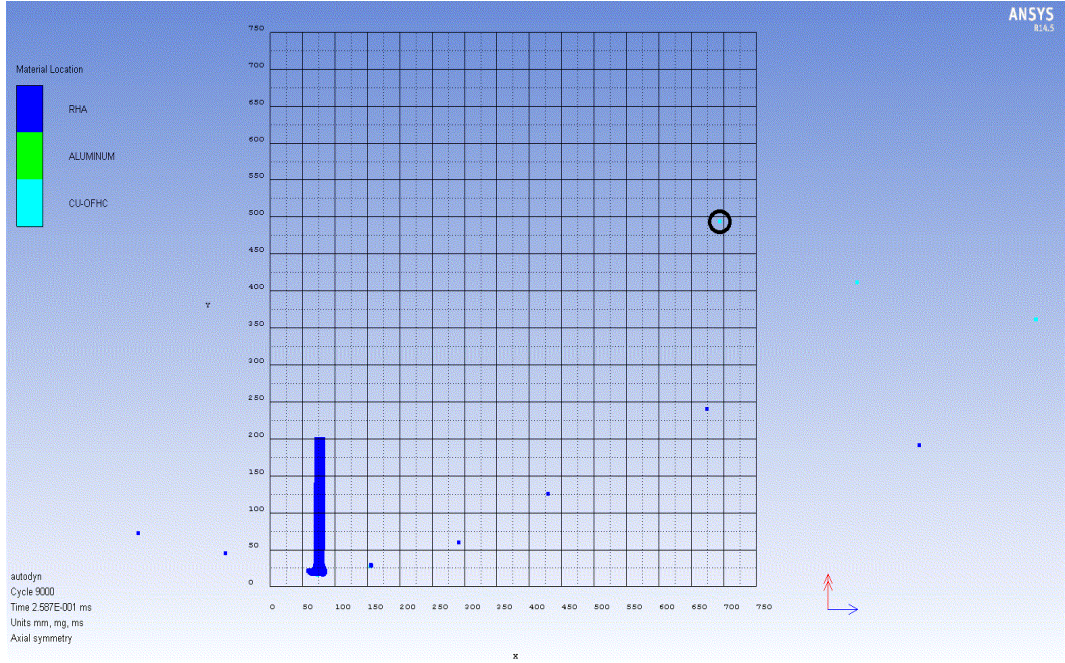
Modellemede hareketli ölçüm cihazları kullanılmış ve darbe sonrası saçılan parçalara ait verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Böylelikle saçılan parçaların hızları elde edilerek üretilecek plakalara uygulanacak testlerde kullanılacak hız belirlenmiş olacaktır.

Yapılan analiz sonucunda RHA plakasında 3,2 cm çapında delinme meydana gelmiş ve saçılma çapı 100 cm olarak ölçülmüştür. Dağılımın büyük yoğunluğu 75 cm çapında bir alanda oluşmuştur. Elde edilen bu değerler testlerde elde edilen değerlerle büyük uyum içerisindedir. Modelleme sonucu saçılma dağılımı ve RHA plakasında meydana gelen deformasyon Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11’de gösterilmektedir.

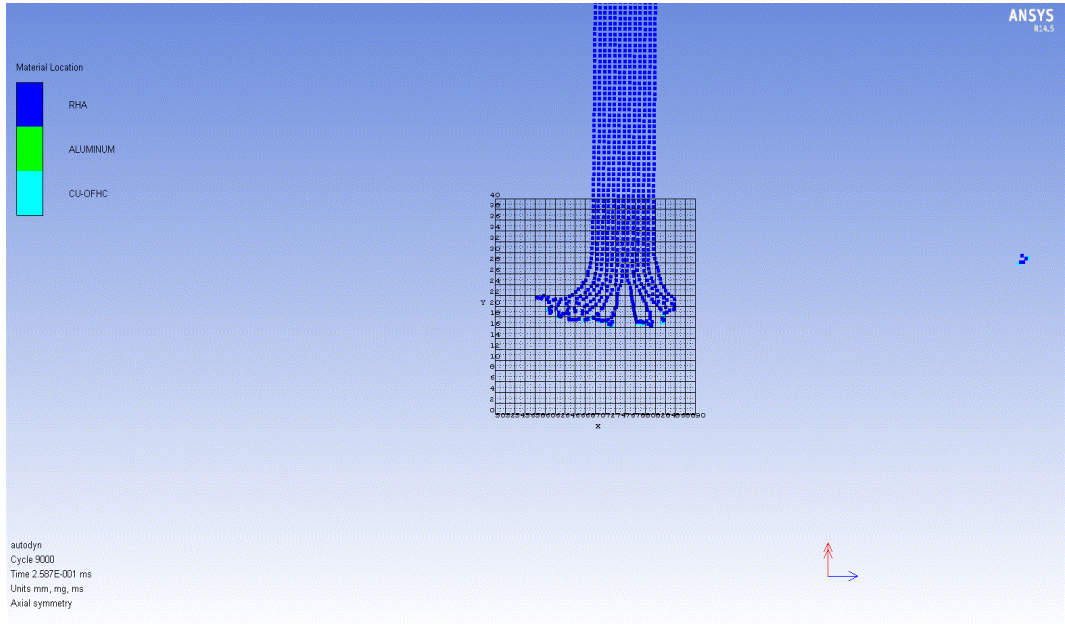


Şekil 3.9 RHA analizi- saçılan parçacıkların vektörel dağılımı





Şekil 3.10 RHA analizi - elde edilen maksimum saçılma çapı

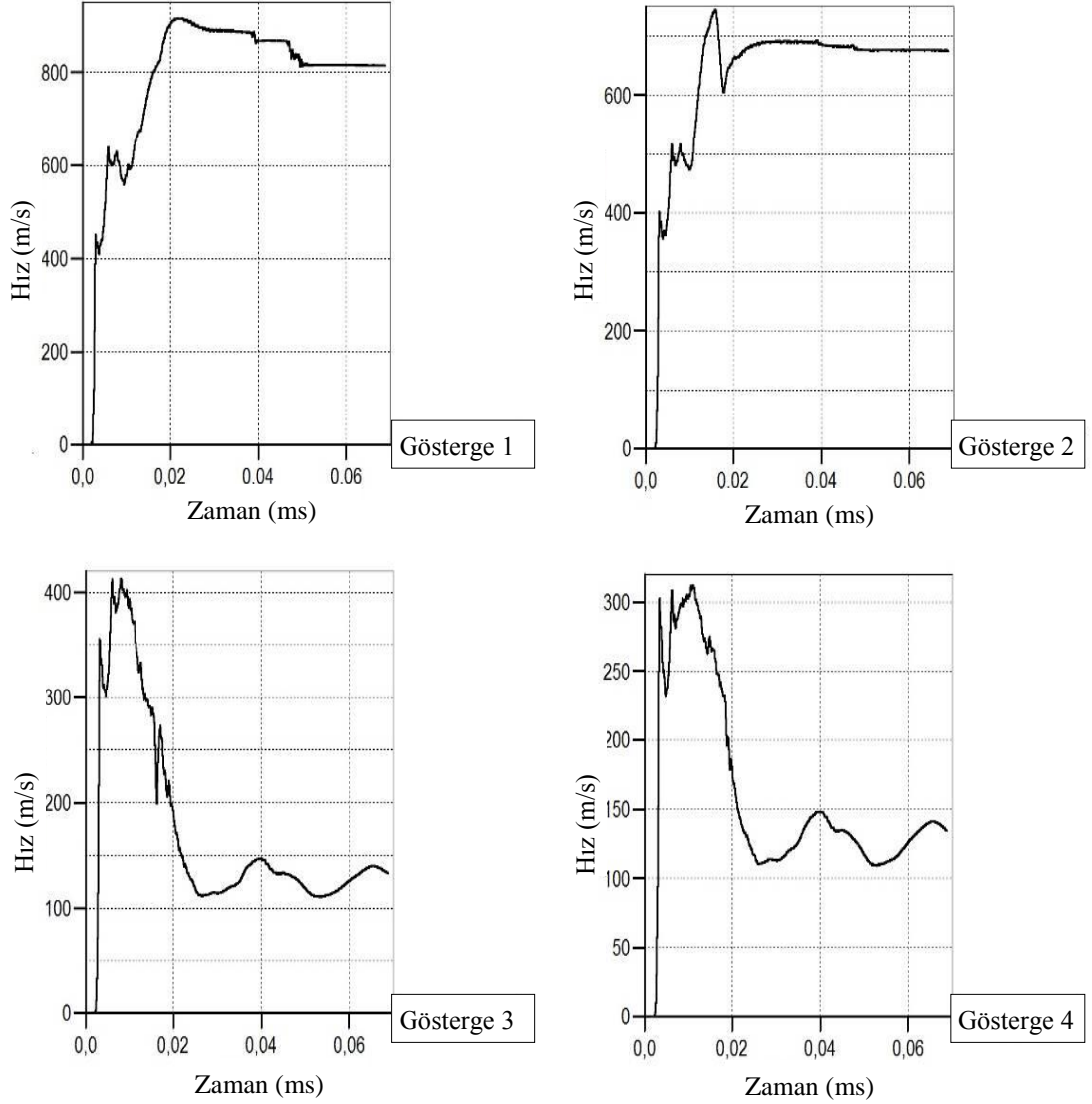


Şekil 3.11 RHA plakasında meydana gelen deformasyon

Darbe merkezinden itibaren saçılma çapı boyunca parçacık hızları birbirlerinden farklılık göstermektedir, kompozitlere uygulanacak balistik testlerde bu hızlar



üzerinden gerçekleştirilecektir. Bu hızlara ilişkin bazı örnekler Şekil 3.12’de gösterilmektedir.

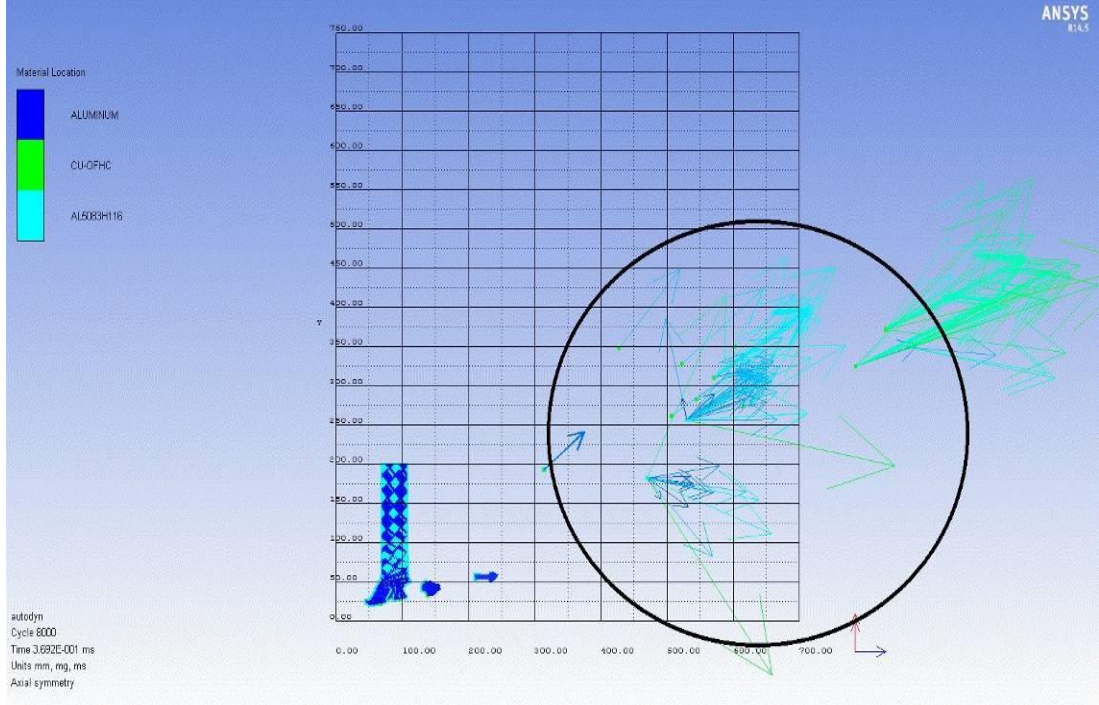


Şekil 3.12 RHA analizi - Saçılan parçacıklara ilişkin hız/zaman grafikleri

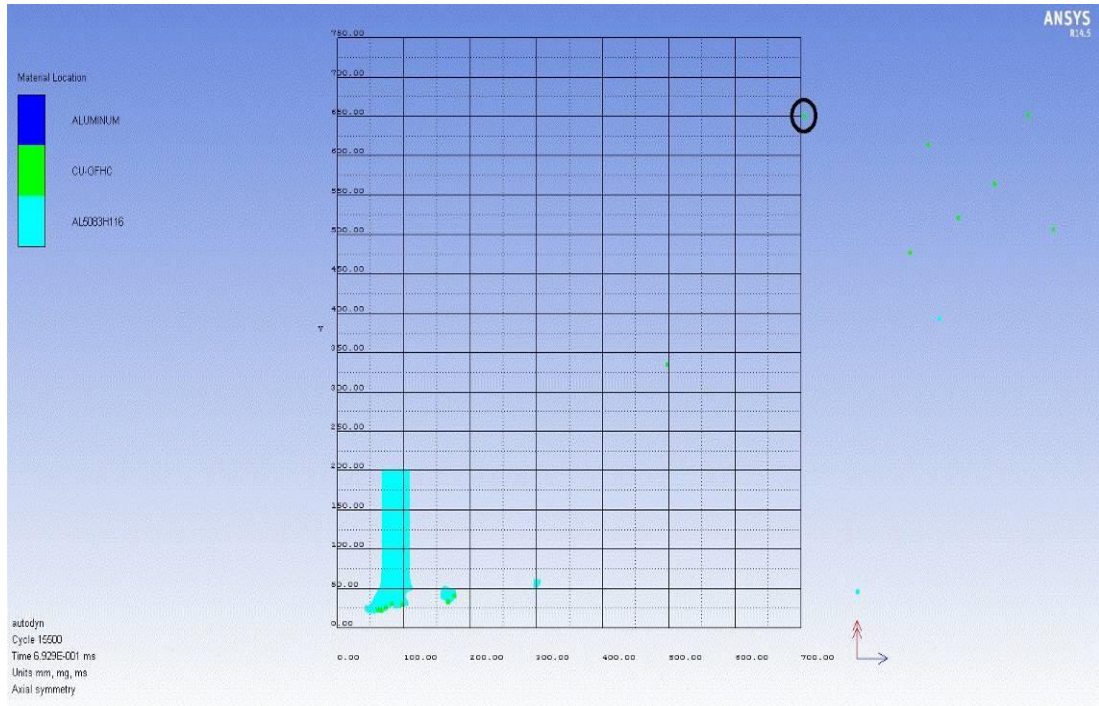
### 3.2.3 AL5083 Testi Nümerik Analizi

Aynı koşullar kullanılarak Al5083 için gerçekleştirilen analize ilişkin deformasyon ve saçılma dağılımı Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15’de görüldüğü gibidir. Meydana gelen saçılma çapı 130 cm olarak ölçülmüş saçılma yoğunluğu ise 100 cm

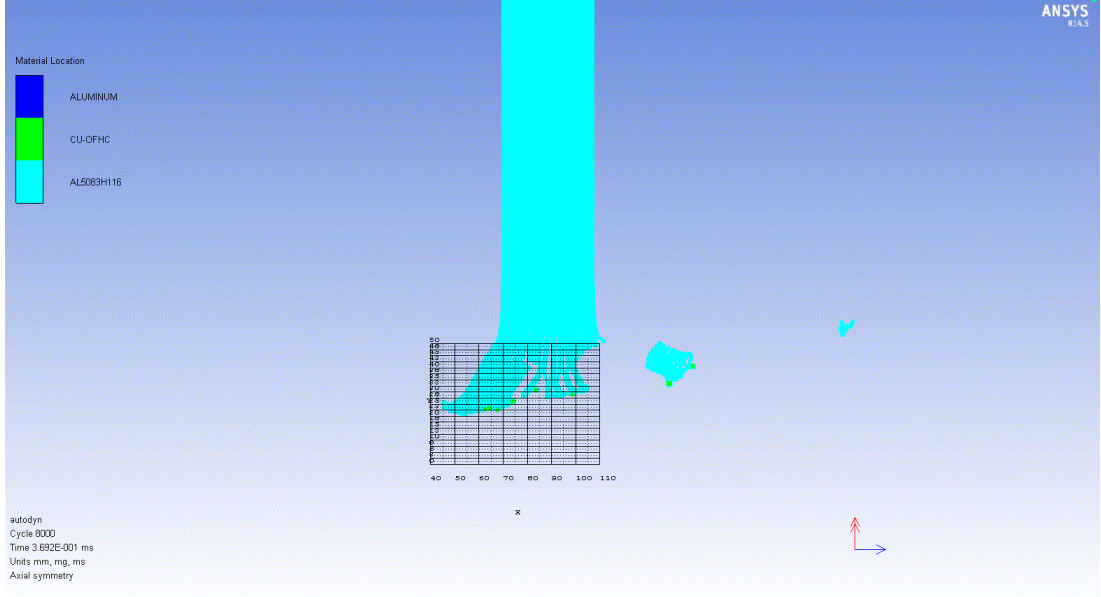
çap olarak belirlenmiştir. Plakada meydana gelen deformasyon ön yüz ve arka yüzü için yaklaşık 56 ve 96 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.13 AL5083 analizi - saçılan parçacıkların vektörel dağılımı

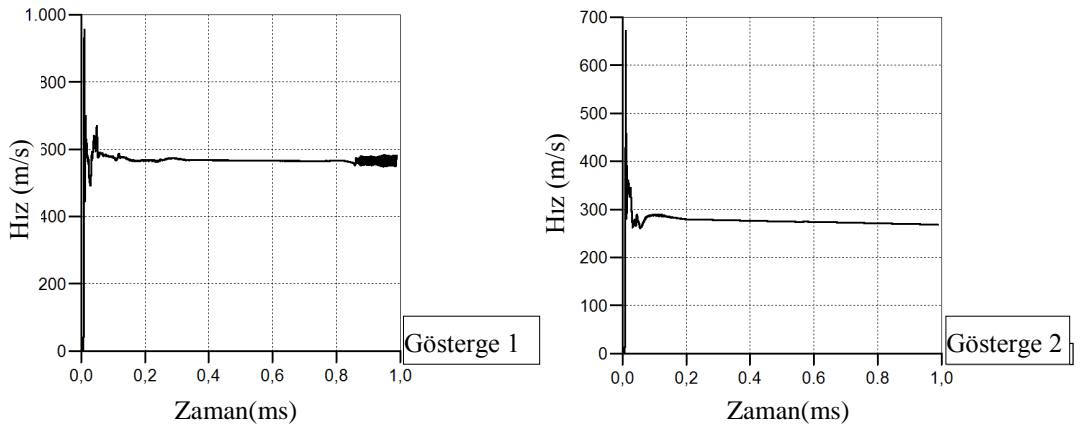


Şekil 3.14 AL5083 analizi - Elde edilen maksimum saçılma çapı



Şekil 3.15 AL5083 plakasında meydana gelen deformasyon

Analiz sonuçlarından elde edilen veriler test sonuçlarıyla kıyaslandığında bulunan saçılma dağılımının testlerde tespit edilen değerlerle büyük uyum içinde olduğu görülmüştür. Yine aynı şekilde AL5083 plakada meydana gelen deformasyon incelendiğinde bulunan değerler test verileriyle uyum içinde bulunmuştur. Saçılan parçacıklara ilişkin hız verileri ise yine hareketli göstergeler ile ölçülmüş ve saçılma çapı içerisinde parçacık hız verileri elde edilmiştir. Parçacık hızlarına ait grafikler Şekil 3.16’da gösterilmektedir.



Şekil 3.16 AL5083 analizi - Saçılan parçacıklara ilişkin hız/zaman grafikleri

Tablo 3.1 Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması

	RHA		AL5083			
	Deneysel	Nümerik	Deneysel		Nümerik	
Maksimum Saçılma Çapı (mm)	1000	1000	1300		1300	
Saçılma Yoğunluğu (%95) (mm)	850	700	1100		900	
Plaka Delinme Çapı (mm)	32,6	32	Ön	Arka	Ön	Arka
			58	99	56	96

Kimyasal enerjili mühimmat kullanılarak gerçekleştirilen testlerde yüksek miktarda enerji açığa çıkması, ortam sıcaklığının ve blast etkisinin ölçümleri olumsuz etkilemesi sebebiyle parçacık hızlarının ölçülmesi gibi bazı veriler hassas bir şekilde elde edilememiştir. Bu yüzden patlama sonrası zırh plakaları ve şahit plakalarda görülen deformasyonlar elde edilen en önemli veriler olmuşlardır. Bu testler sonlu elemanlar programlarıyla modellenip çözümlendikten sonra elde edilecek verilerin testlerde elde edilen verilerle kabul edilebilir sınırlar içerisinde uyumlu olması, testlerde elde edilemeyen bazı verilerin bu sonlu eleman programı sonuçlarından alınabilmesi anlamına gelmekte ve büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde deneysel ve nümerik çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar büyük oranda yakınlık göstermişlerdir. Böylelikle testlerde elde edilemeyen parçacık hızlarının sonlu eleman programından elde edilen verilere dayanılarak kabulü ve bu hız verilerine göre kompozit plakalara gerçekleştirilecek balistik testlerin uygulanması mümkün olmuştur. Nümerik analiz sonuçları incelendiğinde saçılan parçacıkları ortalama hızları 400-500 m/s aralığında tespit edilmiştir. Böylelikle tasarımı yapılacak kompozit plakaların bu hızlar üzerinden test edilmesi uygun görülmüştür.

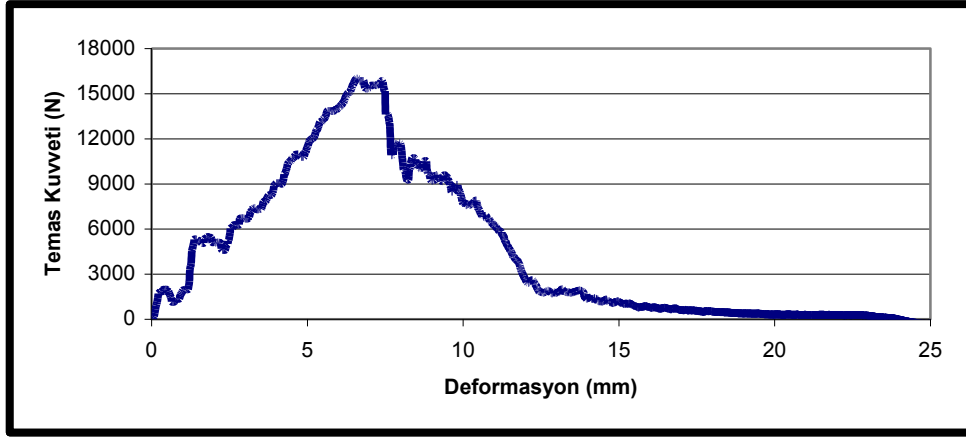
### 3.3 Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları

#### 3.3.1 110 Joule Darbe Testi Sonuçları

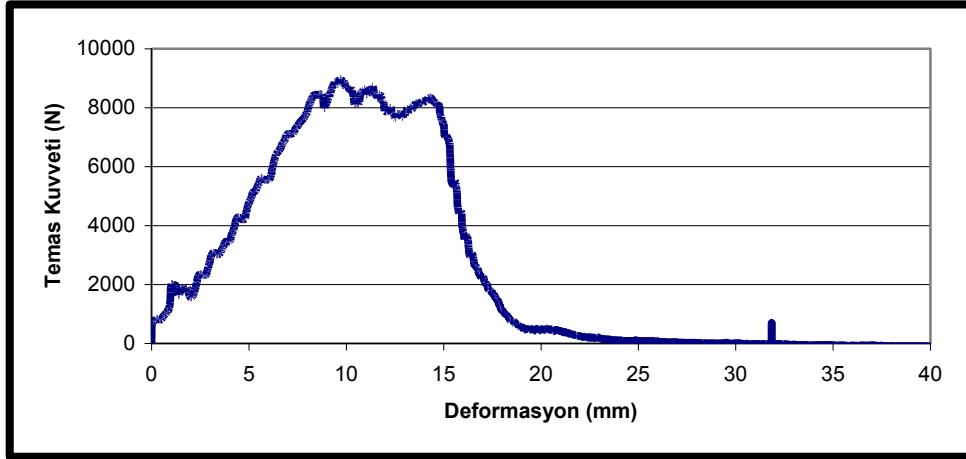
20, 50 ve 80 joule darbe enerjilerinde yapılan testlerin tamamında her iki tip numunede geri sekme gözlemlenmiştir. Deformasyon miktarı termoplastik reçine



kullanılarak üretilen kompozit plakada daha yüksek miktarda oluşmuş buna bağlı olarak temas kuvveti termoset reçine kullanılarak üretilen numuneye göre daha düşük seviyelerde meydana gelmiştir. Darbe enerjisi 110 joule seviyesine çıkartıldığında ise her iki numunede delinme gözlemlenmiştir. 110 joule darbe testine ilişkin temas kuvveti-deformasyon grafikleri aşağıda gösterilmektedir, Şekil 3.17-18.



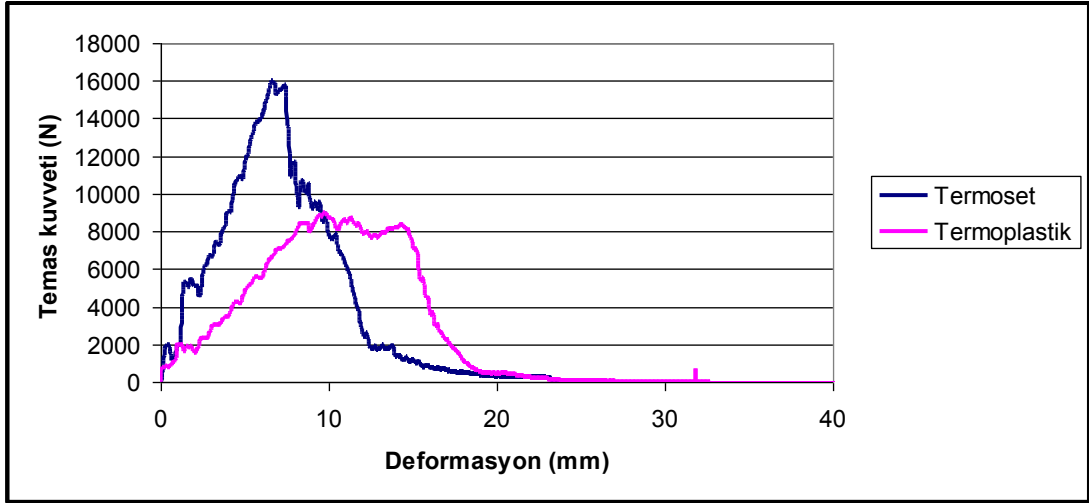
Şekil 3.17 Termoset reçineli E-cam kompozit 110 J darbe sonucu temas kuvveti - deformasyon grafiği



Şekil 3.18 Termoplastik reçineli E-cam kompozit 110 J darbe sonucu temas kuvveti - deformasyon grafiği

Bu grafiklerde eğrinin altında kalan alan bize absorbe edilen enerji miktarını vermektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde termoset kompozit numuneye uygulanan 110 joule darbe enerjisi sonucunda maksimum temas kuvveti değeri 16 kN, absorbe edilen enerji miktarı 109 joule olarak belirlenmiştir. Bu numunede ilk hasar görülene kadar ulaşılabilen yani temas kuvvetinin maksimum olduğu noktada

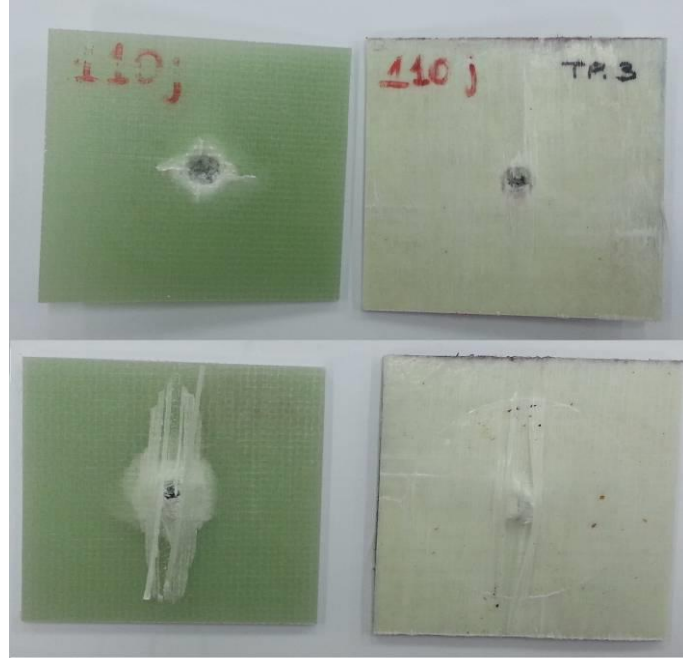
ulaşılan enerji miktarı ise 51,2 joule olarak tespit edilmiştir. Termoplastik numuneye yapılan test sonucunda ise maksimum temas kuvveti 8,97 kN, absorbe edilen enerji miktarı ise 102 joule olarak ölçölmüştür. Termoplastik numune için temas kuvvetinin maksimum olduğu noktada ulaşılan enerji seviyesi ise 45,6 joule olarak ölçölmüştür. Her iki numune tipi de bu test sonucunda delinmiş ve absorbe ettikleri maksimum enerji değerleri elde edilmiştir. Bu değerler incelendiğinde temas kuvvetleri arasında hemen hemen iki kata yakın bir fark varken absorbe edilen enerji miktarı ise birbirine çok yakın değerler olduğu gözlenmiştir. Termoplastik reçine kullanılarak üretilen kompozitin, düşük temas kuvveti - yüksek deformasyon - yüksek absorbe edilen enerji sağlaması termoset reçine kullanılarak üretilen kompozite göre darbe halinde daha avantajlı olacağı sonucunu getirmektedir.



Şekil 3.19 Termoset ve termoplastik reçineli kompozit temas kuvveti-deformasyon eğrileri

Her iki grafik birlikte incelendiğinde daha net görölüyor ki termoset reçineli kompozit maksimum temas kuvveti değerine ulaştığında bu temas kuvveti seviyesinde ancak 1,5 mm kadar deformasyona devam edebiliyor daha sonrasında ise temas kuvveti keskin bir şekilde düşüyor. Bunun meydana gelmesindeki en büyük sebep ise gevrek ve rijit bir yapı sonucunda oluşan yüksek temas kuvvetidir. Yüksek temas kuvveti elbette absorbe edilen enerji miktarını bir yere kadar arttırmaktadır, ancak diğer taraftan matrise ve fibere ciddi hasarlar vermektedir. Aynı zamanda termoset matris kristal yapısı sebebiyle hasara uğradıktan sonra fiberler üzerinde daha çok hasar oluşurmaktadır. Bu yüzden deformasyon eşiği ve buna bağlı olarak absorbe ettiği enerji miktarı (elde edilen maksimum temas kuvvetine oranla) düşük

değerlerde kalmaktadır. Termoplastik reçineli kompozitin davranışını incelediğimizde ise temas kuvveti maksimum değere ulaşana kadar malzeme termoset kompozite göre 3 mm kadar daha fazla deforme oluyor ve sonra bu seviyede yaklaşık olarak 7 mm daha deformasyona devam ediyor ve daha sonra temas kuvveti azalıyor. Buna sebep ise matrisin fiberlere hasar verecek yapıda olmaması ve deformasyon kabiliyeti. Böyle bir davranış göstermesi absorbe edilen enerji miktarının artmasını sağlıyor. Bu kompozitte matris malzemenin deformasyona izin verebilen yapısıyla temas kuvvetini düşük seviyelerde tutması meydana gelecek hasarların maksimum gerilme değerlerinden çok maksimum birim uzama değerlerine bağlı olarak meydana gelmesini sağlıyor.

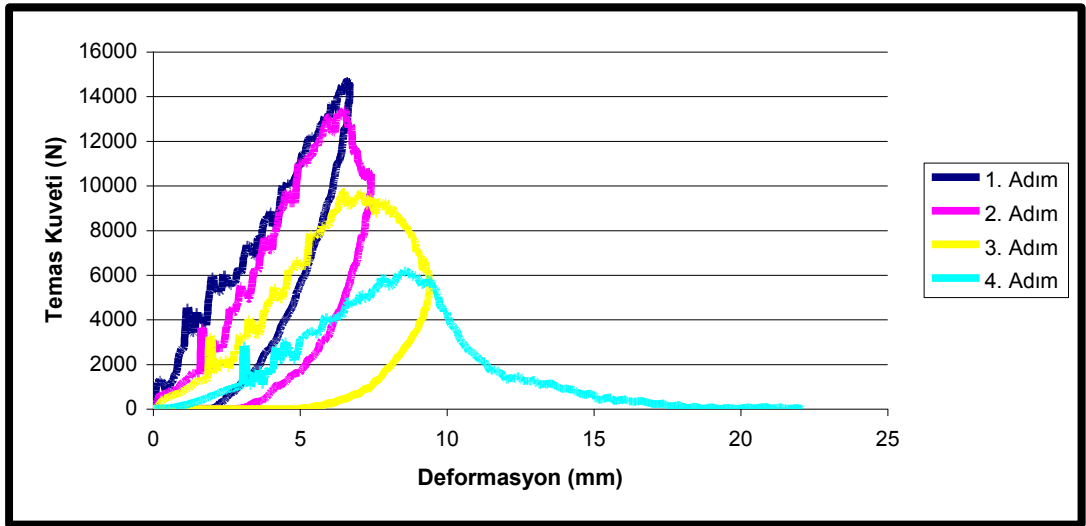


Şekil 3.20 110 J darbe sonrası numunelerde meydana gelen deformasyon

### **3.3.2 50 Joule Tekrarlı Darbe Testi Sonuçları**

Tekrarlı darbe testleri bu iki numune için yapılan tekil darbe testlerinde elde edilen maksimum temas kuvvetine karşılık gelen enerji seviyesi baz alınarak yapılmış ve her iki numune için 50 Joule değeri seçilmiştir. Bu enerji değerinde ne kadar tekrarlı darbeye cevap verecekleri absorbe ettikleri enerji miktarları buradan hareketle bu iki tip kompozit malzemedeki hasarın nasıl oluştuğu gözlemlenmiştir.

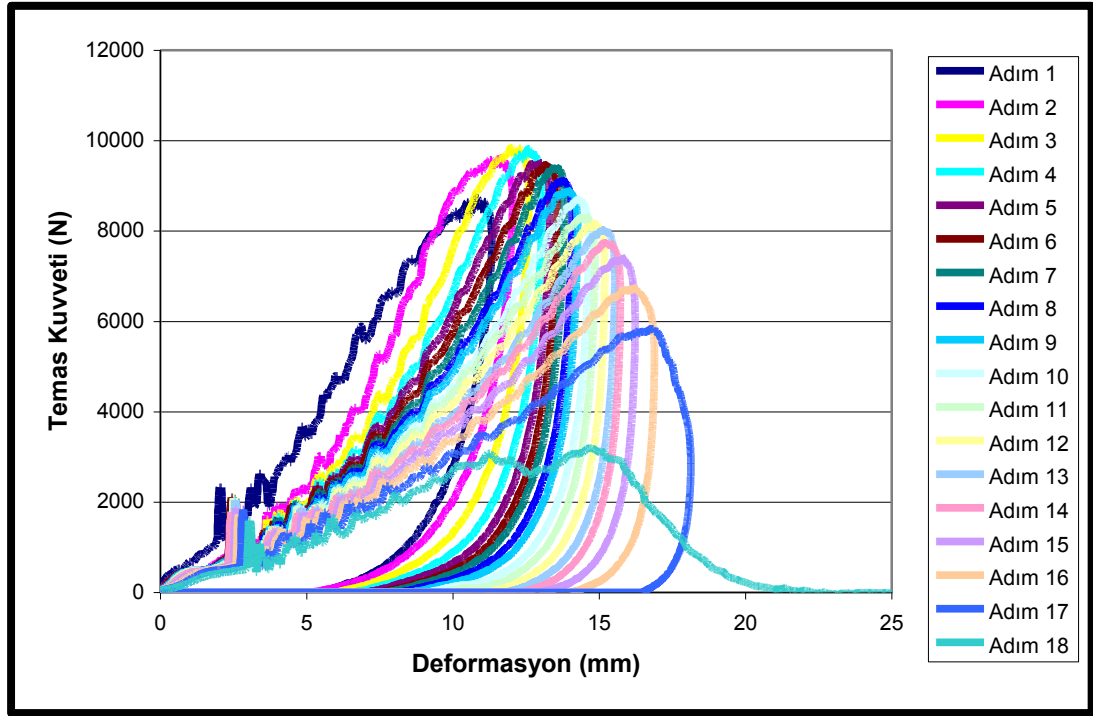
Termoset reçineli kompozit malzeme 50 J tekrarlı darbe testler 4 adımda tamamlanmış, ilk 3 adımda geri sekme gözlemlenmiş 4. adımda ise delinme gerçekleşmiştir. Termoplastik reçineli kompozitte ise testler 18 adım devam etmiş ilk 17 tekrarda geri sekme gözlemlenmiş 18. adımda ise delinme gerçekleşmiştir. Termoset kompozitte her adımda temas kuvveti düşüş göstermiş, deformasyon miktarı artmış ve absorbe edilen enerji miktarı son adıma kadar artış göstermiştir. Bunun sebebi her darbe sonrasında kompozitte delaminasyon oluşması ve darbe tekrarıyla birlikte bunun artması gösterilebilir. Böylece kompozitin rijit yapısı bozulmuş ve daha fazla deforme edilebilir, enerji absorbe edebilir hale gelmiştir. Termoset numuneye ait temas kuvveti deformasyon eğrileri Şekil 3.21 de gösterilmektedir.



Şekil 3.21 Termoset reçineli kompozit 50 J tekrarlı darbe testi sonucu temas kuvveti-deformasyon eğrileri

Termoplastik reçineli kompozitte tekrarlı darbeler başlangıçta bir miktar yükselmiş daha sonrasında ise devam eden darbeler ile birlikte düşüş göstererek 18. adımda delinme gerçekleşmiştir. Absorbe edilen enerji miktarı ise 40 joule değerinden başlamış ve 17. darbe adımında 49 joule seviyesine kadar yükselmiştir. Termoplastik numuneye ait temas kuvveti deformasyon eğrileri Şekil 3.22 de gösterilmektedir.

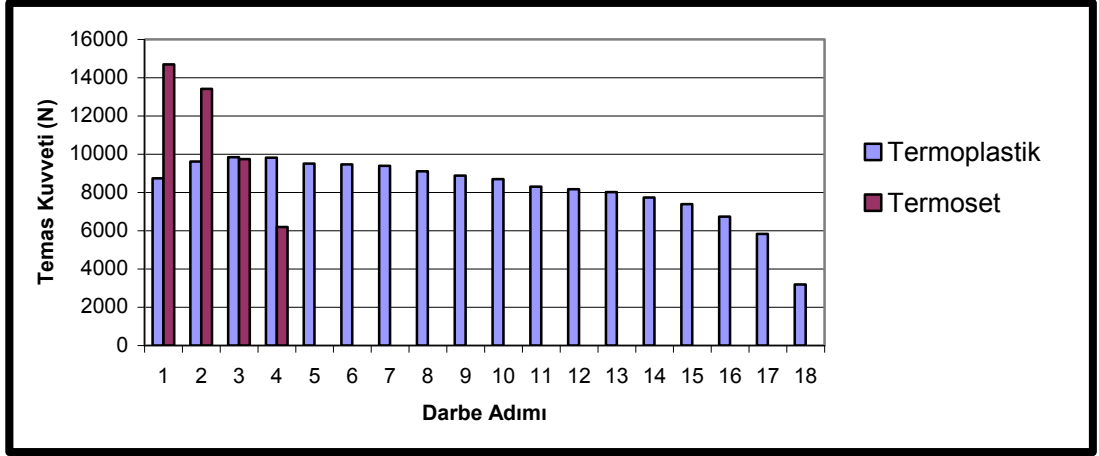




Şekil 3.22 Termoplastik reçineli kompozit 50 J tekrarlı darbe testi sonucu temas kuvveti-deformasyon eğrileri

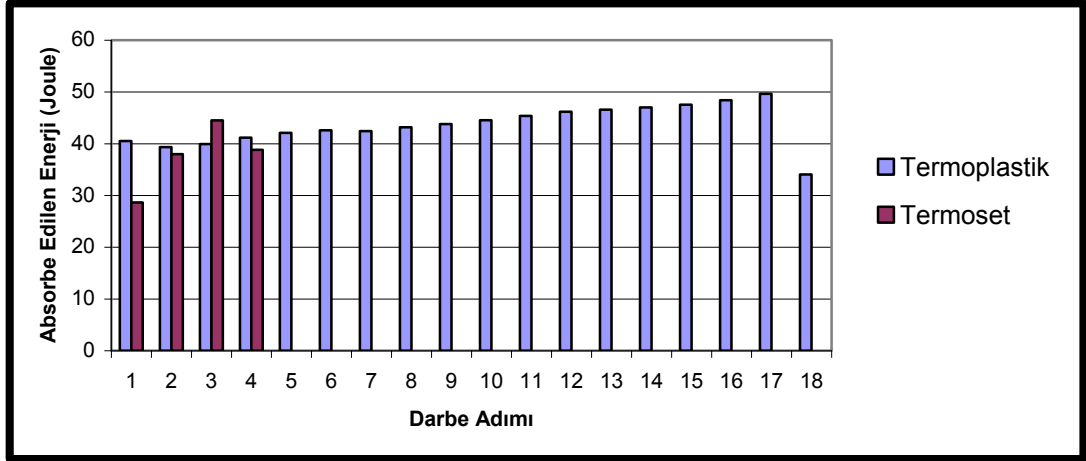
Bu iki numunenin darbeye karşı verdikleri tepkileri incelediğimizde 110 joule tekil darbeli yüklemde her iki kompozit malzeme de delinmekte ve birbirlerine yakın değerlerde enerji absorbe etmektedirler. Tekrarlı yüklemde ise termoplastik kompozit malzeme hem absorbe ettiği enerji bakımından hemde cevap verebildiği darbe sayısı bakımından termoset reçineli kompozite göre büyük avantaj sağlamaktadır.

Darbe sonucu meydana gelen temas kuvvetine baktığımızda beklendiği gibi termoset reçineli kompozitte ilk adımda oldukça yüksek değere ulaşılmıştır. Ancak bu değer neticesinde meydana gelen hasarlar özellikle 3. darbe adımı temas kuvvetinin keskin bir şekilde düşmesine sebep olmuş ve 4. tekrarda numune delinmiştir, Şekil 3.23 Termoplastik reçineli kompozitte ise ilk darbeden sonra numune üzerinde meydana gelen artık gerilmeler numunenin mukavemetini arttırmış ve bundan sonraki iki darbe boyunca temas kuvveti artmaya devam etmiştir. Bunun termoset kompozitte meydana gelmemesinin sebebi ise, darbe sonucu oluşan gerilmeyi matrisin taşıyamaması ve hasara uğrayarak üzerindeki gerilmeyi boşaltması gösterilebilir.



Şekil 3.23 Darbe tekrarı boyunca oluşan maksimum temas kuvvetleri

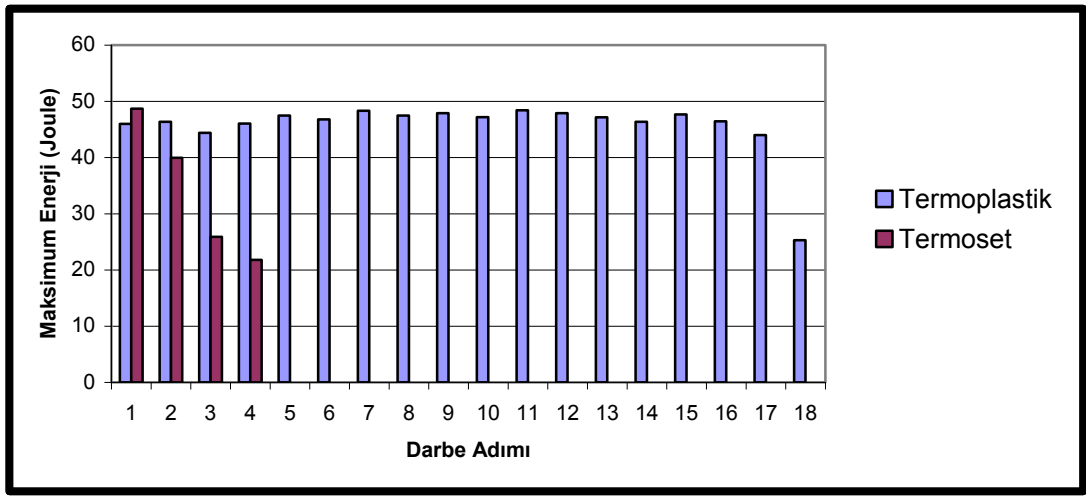
Absorbe edilen enerji miktarlarına baktığımızda ise 50 joule darbelerde termoplastik reçineli kompozit malzemenin daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir. Absorbe edilen enerji miktarı darbe tekrarı boyunca her iki tip kompozit için artmaktadır ancak dikkat çeken en önemli husus termoplastik reçineli kompozitin ilk 10 darbeye %80' in sonraki 7 darbeye ise % 90'ın üzerinde enerji absorbe ettiği görülmektedir. Şekil 3.24'de darbe tekrarı boyunca absorbe edilen enerji miktarları gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Darbe tekrarı boyunca absorbe edilen enerji miktarları

Maksimum enerjileri karşılaştırdığımız zaman ise termoplastik reçineli kompozitin en önemli avantajını görmekteyiz "deformasyon". Her iki kompozite uygulanan darbe sonucunda maksimum temas kuvvetleri arasında büyük bir fark varken, bu

temas kuvveti seviyesine gelene kadar meydana gelen enerji değerleri arasında tam tersi bir durum söz konusu. Bunun sebebi termoset numunede deformasyon daha az miktarda gerçekleşmekte ve hasarla sonuçlanmakta. Termoplastik numunede ise deformasyonla enerji sönümlenmekte ve darbe sonrası numune tekrar ilk formuna dönmeye çalışmaktadır. Bu sebeple aşağıdaki grafikte de görüleceği üzere maksimum enerji seviyesi termoset kompozitte tekrarlanan darbeler boyunca sert düşüşler gösterirken termoplastik numunede ise ortalama olarak aynı değer seviyesinde kalmıştır.



Şekil 3.25 Darbe tekrarı boyunca oluşan maksimum enerji miktarı

Tekrarlı darbeler sonucunda numunelerde meydana gelen deformasyonlar incelendiğinde, termoset reçineli kompozitte darbenin meydana geldiği bölgede lokal hasarlar meydana gelmiş ve bu hasarlar düzlem boyunca ilerlememiş darbe doğrultusunda ilerlemiş ve numunenin daha erken delinmesine sebebiyet vermiştir. Termoplastik numunede ise her darbe sonucunda hasar düzlem boyunca yayılmış ve darbe doğrultusunda hasar oluşumunu azaltmıştır. Termoset reçineli kompozite göre çok daha fazla tekrarlı darbeye cevap verebilmesinin bir sebebi de bu özelliğinden kaynaklanmaktadır. Numune darbe sonrası kesit görünüşleri Şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.26 Termoplastik ve termoset reçineli kompozitlerin tekrarlı darbe sonrası kesit görünüşleri

### 3.4 Hibrid Kompozit Tasarımı

Elde edilen sonuçlar ve balistik limit hızına etkiyen faktörler göz önüne alındığında tabaka kalınlığının veya kullanılacak elyafların alansal yoğunluğunun artırılması balistik limit hızı arttıracakları aşıkardır ancak bu yaklaşımı uygulamak üretilecek kompozit plakanın ağırlığını da aynı oranda arttıracaktır. Bunun yerine prepreg kumaşlar kullanılarak sıcak pres ile üretim yöntemi uygulanması daha düşük kalınlık değerlerinde yüksek fiber hacimsel yoğunluğunu yakalamak için uygun bir yaklaşım olacaktır.

Yaşanacak herhangi bir saldırı sonrasında zırhlı araç içerisinde meydana gelecek saçılmada hangi boyutta ve şekilde parçaların oluşacağı ve bu parçaların hangi açılarda saçılacağı hiç bir zaman aynı olmamakta birlikte kendi arasında da hem hız hem boyut hem de geometri olarak farklılık göstermektedir. Bu sebeple en kötü senaryo düşünülerek tasarımların yapılması gerekmektedir. Delme kabiliyetinin daha

fazla olduğu bilinen konik tip mermiler düşünöldüğünde hibrid kompozit tasarlarken bu özelliikte bir merminin öncelikle bu etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir.

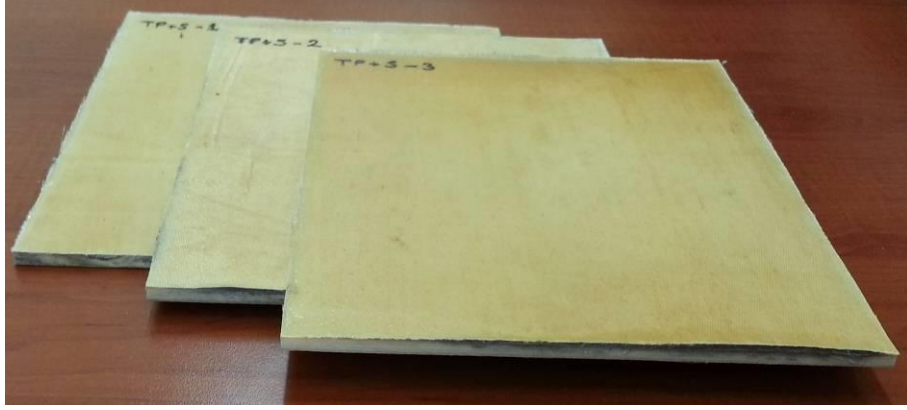
S-cam elyafların diğer cam elyaf tiplerine göre daha ince lifli bir yapıya sahip olması onu diğer elyaf tiplerine göre tabakaların birbirine yapışması ve daha rijit bir yapı oluşturması yönünden avantajlı hale getirmektedir. Üretim yöntemi olarak yine prepreg kumaşlar kullanılarak sıcak pres yöntemi tercih edilirse fiber yoğunluğu da artırılmış ve daha mukavemetli bir kompozit üretilmiş olacaktır. Bu plaka tasarlanacak hibrid kompozitin ilk katmanlarında mermiyi şekil değişimine zorlayacak ve delme gücünü azaltacak unsur olarak kullanılacaktır.

Şekil değişimine zorlanan, delme kabiliyeti ve kinetik enerjisi azalmış mermiyi durdurmak için düşük hızlı darbe testlerinde iyi performans gösteren e-cam termoplastik prepreg kumaştan üretilmiş plakalar yüksek deformasyonları sayesinde başarı gösterebilirler. Aynı zamanda bu plakalar düşük yoğunluk ve fiyatlarıyla avantaj sağlayacaklardır. Bu malzemelere ek olarak balistik kevlar kumaş hibrid kompozite tutucu tabaka olarak dahil edilerek balistik performansı daha güçlü bir yapı elde edilebilir.

Düşük hızlı darbe testinde ulaşılan sonuçları incelediğimizde tabakalar arası ayrılmalar meydana geldikten sonra malzeme daha fazla deforme olabilmekte böylelikle absorbe edilen enerji miktarı artmaktaydı. Bu bulgudan hareketle yapılacak tasarımlarda birbirlerinden daha bağımsız ayrı ayrı tabakalar kullanılmasının absorbe edilen enerji miktarını ve dolayısıyla balistik performansı arttıracığı düşünölmüştür.

Genel olarak ele alırsak bu tasarımlarda temel alınan ilk nokta merminin hızının düşürölmesi ve şekil değiştirerek yüzey alanının genişletilmesi daha sonraki katmanlarda ise balistik performansı yüksek plakalarla merminin durdurulması hedeflenmiştir. Bu anlamda ürettiğimiz birinci tip kompozit plaka termoplastik reçineli e-cam ve termoset reçineli s-cam kompozitlerinin birleşiminden

oluşmaktadır, Şekil 3.27 Kompozitin ön ve arka yüzeylerinde s-cam elyafli plakalar bu plakalar arasında ise termoplastik reçineli e-cam kompozit bulunmaktadır.



Şekil 3.27 Birinci tip hibrid kompozit

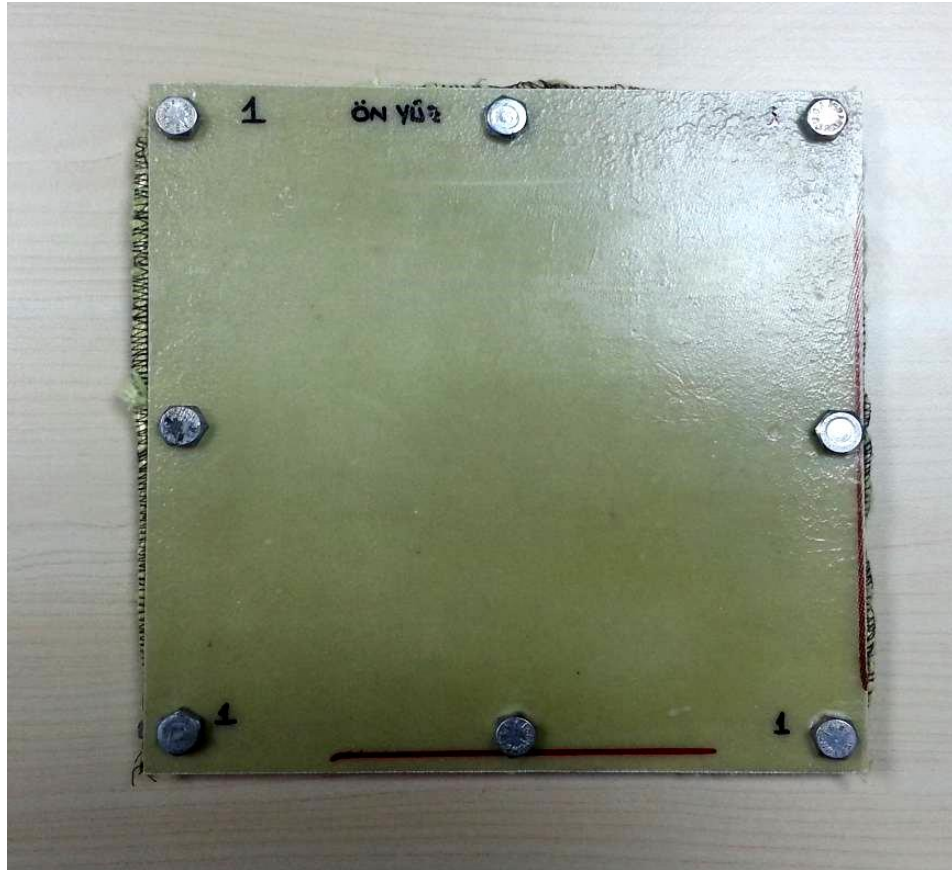
İkinci tip hibrid kompozit plakada ise tabakalar deformasyona izin verecek şekilde ayrı ayrı tasarlanmış ön yüzeyde mermiyi şekil değiştirmeye zorlayacak s-cam elyaf takviyeli kompozit, arkasında sırasıyla termoplastik reçineli e-cam kompozit, kevlar kumaşı ve tekrar termoplastik reçineli e-cam kompozit plakalar kullanılacak şekilde tasarlanmıştır, Şekil 3.28



Şekil 3.28 İkinci tip hibrid kompozit tabakaları

Malzemelerin sertleşip gevrekleştikçe daha kırılğan bir yapıya sahip olmaları balistik performanslarını düşüreceğinden kevlar kumaşı bu kompozit yapı içerisinde reçine emdirilmeden kullanılmıştır. Böylelikle kevlar maksimum enerji sönümlemesini gösterebilecektir. Kevlar kumaş bütünlüğünü koruması ve darbe esnasında deformasyona izin verecek yapıda olması sebebiyle her iki tarafından termoplastik reçineli e-cam kompozit ile desteklenerek kompozit yapı oluşturulmuştur.

Kevlar kumaşı iki kat kullanılmış ve bu iki kat kumaş birbirlerine dikilmiştir. Darbe esnasında kumaş kenarlarından lif çekilmesini engellemek için kenar dikişi uygulanmıştır. Son olarak plakalar üretildikten sonra belirli noktalardan civatalar kullanılarak hibrid kompozit yapı mekanik şekilde birleştirilmiştir. İkinci tip hibrid kompozit plakaların birleştirilmiş son hali Şekil 3.29'da gösterilmektedir.



Şekil 3.29 İkinci tip hibrid kompozit



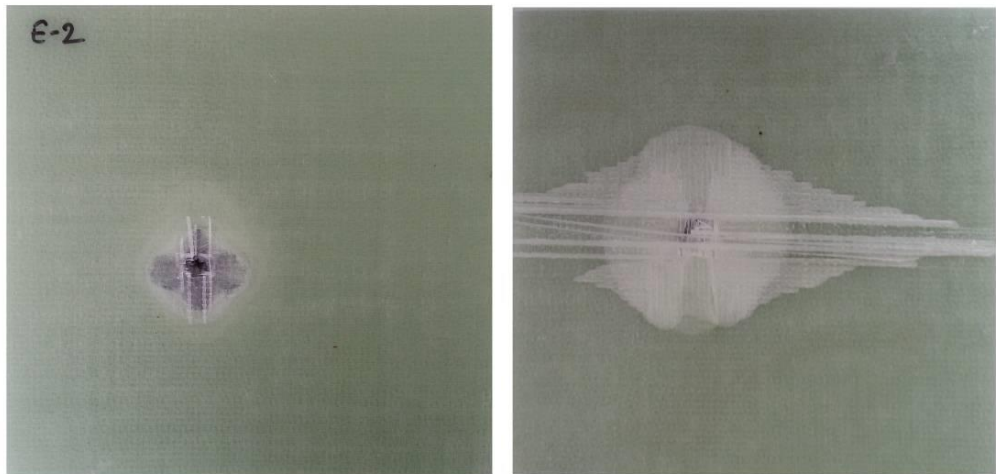
Tablo 3.2 Hibrid kompozit yapıları

Numune Tipi	Takviye Malzemesi	Üretim Yöntemi	Dizilim
1	E-cam / S-cam	Sıcak Pres	$[woven]_{8(s-cam)} / [0/90]_{8S(e-cam)} / [woven]_{8(s-cam)}$
2	S-cam / E-cam / Kevlar	Sıcak Pres	$[woven]_{12(s-cam)} / [0/90]_{4s(e-cam)} / [woven]_{2(kevlar)} / [0/90]_{4s(e-cam)}$

### 3.5 Balistik Test Sonuçları

#### 3.5.1 E-cam Takviyeli Termoset Kompozit Balistik Test Sonucu

E-cam epoksi kompozit plakaya yapılan test sonucunda plaka ön yüzeyinde 10,15 mm çapında arka yüzeyinde ise 12,8 mm çapında bir delinme meydana gelmiştir. Tabakalarda önemli derecede hasar oluşmuş plakalarda meydana gelen delaminasyon yoğunluğu plaka ön yüzünde 42 mm çapında bir bölgede plaka arka kısmında ise 90 mm çapında bir bölgede oluşmuştur. Plakada gevrek kırılma hasarı meydana gelmiş mermi şekil değiştirmesi ve kompozitin çeki ve bası dayanımı arasındaki fark sebebiyle ön ve arka yüzde aşağıdaki şekilde oluşmuştur.



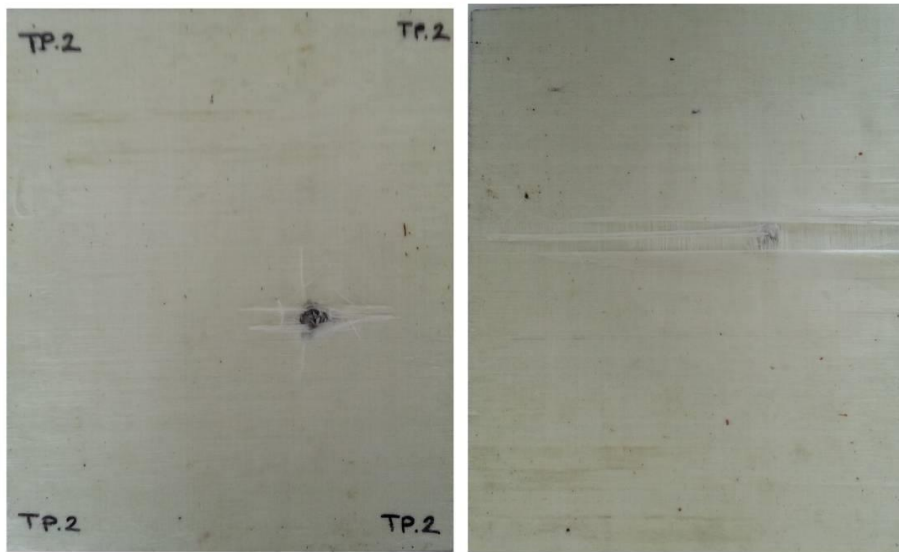
Şekil 3.30 E-cam termoset kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda oluşan deformasyon



Mermi hedefe 432 m/sn lik bir ilk hızla girmiş ve 324 m/s hızla terk etmiştir. Bu test neticesinde hedefe 700 joule değerinde bir enerji ile darbe uygulanmış ve plakadan saçılan parçacıkların ağırlığıda hesaba katılarak çıkıştaki kinetik enerji değeri hesaplanmış ve 461,9 joule olarak bulunmuştur. Buradan hareketle enerji dengesi yazıldığı takdirde plaka tarafından absorbe edilen enerji 238,1 joule olarak elde edilir. Aynı zamanda bu değer balistik limit hızın bulunmasında bahsettiğim, balistik testlerde hesaplanan absorbe edilen enerji miktarının düşük hızlı darbe testlerinde absorbe edilen enerjinin (109 joule) iki katı seviyesinde olduğunu gösterir niteliktedir.

### ***3.5.2 E-cam Takviyeli Termoplastik Kompozit Balistik Test Sonucu***

E-cam termoplastik reçineli kompozit plakaya yapılan test sonucunda plaka ön yüzeyinde 10,05 mm çapında arka yüzeyinde ise 12 mm çapında bir delinme meydana gelmiştir. Tabakalarda önemli derecede hasar oluşmuş plakalarda meydana gelen delaminasyon yoğunluğu plaka ön yüzünde 53 mm çapında bir bölgede plaka arka kısmında ise 100 mm çapında bir bölgede oluşmuştur. Ancak kesit incelendiğinde bu hasarlar kalınlık boyunca ilerlememiş sadece yüzeysel olarak kalmışlardır.

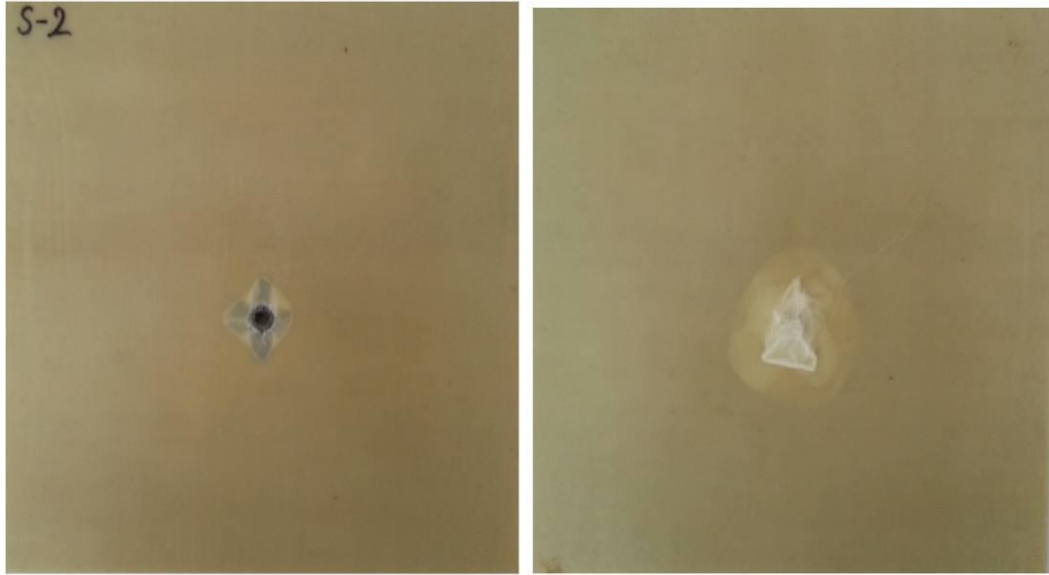


Şekil 3.31 E-cam termoplastik kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda oluşan deformasyon

Hedefe 432 m/sn hızla atış gerçekleştirilmiş ve merminin hedeften çıkış hızı 337 m/sn olarak ölçülmüştür. Darbe neticesinde hedefe uygulanan enerji 700 joule artk kinetik enerji ise 482 joule olarak hesaplanmıştır. Böylelikle plaka tarafından absorbe edilen enerji 217 joule olarak tespit edilmiştir.

### 3.5.3 S-cam Takviyeli Termoset Kompozit Balistik Test Sonucu

S-cam termoset reçineli kompozit plakaya yapılan test sonucunda plaka ön yüzeyinde 10,03 mm çapında arka yüzeyinde ise 14 mm çapında bir delinme meydana gelmiştir. Plakalarda meydana gelen delaminasyon yoğunluğu plaka ön yüzünde 27 mm çapında bir bölgede plaka arka kısmında ise 55 mm çapında bir bölgede oluşmuştur.



Şekil 3.32 S-cam termoset kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda oluşan deformasyon

Hedefe 432 m/sn hızla atış gerçekleştirilmiş ve merminin hedeften çıkış hızı 100 m/sn olarak ölçülmüştür. Darbe neticesinde hedefe uygulanan enerji 700 joule artk kinetik enerji ise 41 joule olarak hesaplanmıştır. Böylelikle plaka tarafından absorbe edilen enerji 659 joule olarak tespit edilmiştir. Mermi büyük oranda deformasyona uğramış ve plakada tapalama olarak hasar tiplerinde anlattığımız deformasyon gerçekleşmiş ancak seçilen hız değeri plakanın balistik hız limitinin üzerinde

olduğundan kopan parça ile birlikte hedefi terk etmiştir. Mermide deformasyon sebebiyle yüzey alanı genişlemesi ve plakanın yüksek çeki ve bası dayanımına sahip olması hedefin arka yüzeyinde kabuklanma tipi hasar oluşmasına neden olmuştur.

#### **3.5.4 Birinci Tip Hibrid Kompozit Balistik Test Sonucu**

Birinci tip hibrid kompozit plaka ön yüzeyde 4 tabaka S-cam ara katmanda 16 tabaka termoplastik reçineli E-cam ve arka yüzeyde tekrar 4 kat S-cam kumaştan oluşmaktaydı. Yapılan test sonucunda plaka ön yüzeyinde 10,03 mm çapında arka yüzeyinde ise 12 mm çapında bir delinme meydana gelmiştir. Farklı reçine tipleri ve bu reçinelerin kürleşme sıcaklıkları arasında büyük farklar olması tabakalar arasında yapışmanın istenilen düzeyde gerçekleşmesine engel olmuş ve bu sebeple darbe sonucu tabakalar arasında büyük deformasyonlar oluşmuştur.

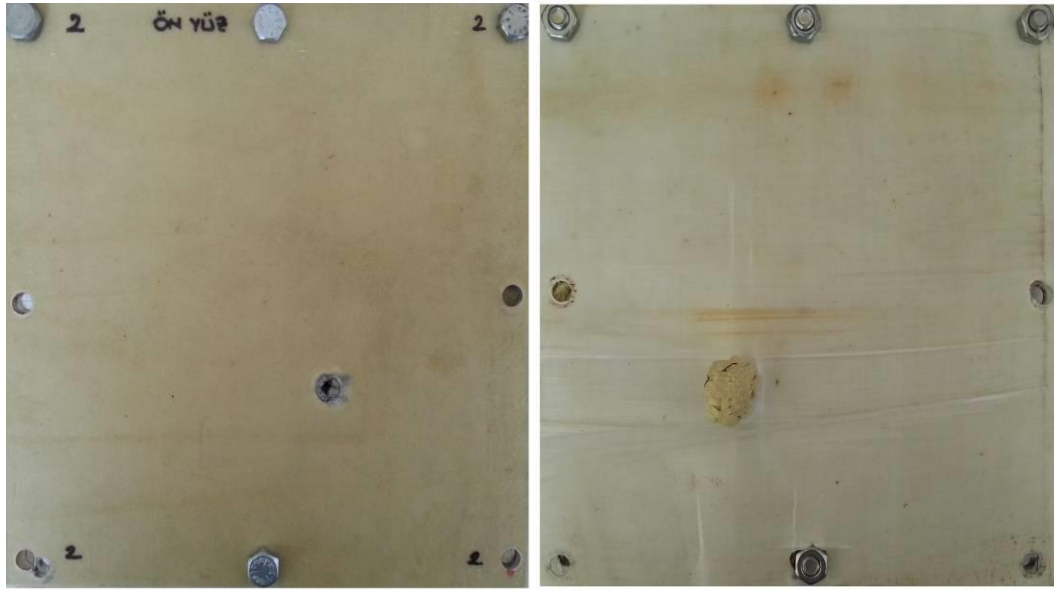


Şekil 3.33 Birinci tip hibrid kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda oluşan deformasyon

Hedefe 432 m/sn hızla atış gerçekleştirilmiş ve merminin hedeften çıkış hızı 322,5 m/sn olarak ölçülmüştür. Darbe neticesinde hedefe uygulanan enerji 700 joule artık kinetik enerji ise 410 joule olarak hesaplanmıştır. Böylelikle plaka tarafından absorbe edilen enerji 290 joule olarak tespit edilmiştir.

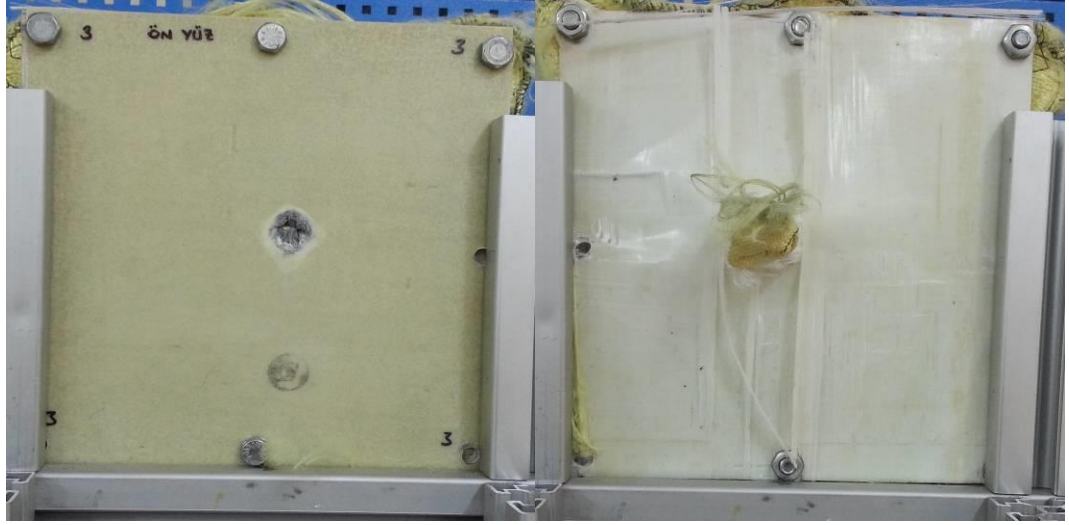
### 3.5.5 İkinci Tip Hibrid Kompozit Balistik Test Sonucu

İkinci tip hibrid kompozit plaka 16 tabaka S-cam/ 8 tabaka termoplastik reçineli E-cam/ 2 kat Balistik Kevlar/ 8 tabaka termoplastik reçineli E-cam plakadan oluşmakta toplam kalınlığı 8,6 mm ağırlığı 470 gram olarak ölçüldü. Yapılan test sonucunda plaka ön yüzeyinde 9,5 mm çapında arka yüzeyinde ise 12 mm çapında bir delinme meydana gelmiş ancak kevlar kumaşı deforme olarak mermiyi tutmayı başarmıştır.



Şekil 3.34 İkinci tip hibrid kompozit plakada darbe sonrası ön ve arka kısımlarda oluşan deformasyon

Hedefe 432 m/sn hızla atış gerçekleştirilmiş ve mermi hedefte kalmıştır. Darbe neticesinde hedefe uygulanan 700 joule değerinde enerjinin tamamı hedef tarafından absorbe edilmiştir. İkinci tip hibrid kompozite yapılan her iki atışta başarılı olduğundan 3 atış için namlu çıkış hızı 410 m/s olan farklı bir tüfekle 31 gram ağırlığında mermi kullanılarak bir atış daha gerçekleştirilmiş ve plakanın absorbe ettiği enerji hesaplanmıştır. Bu atış sonunda mermi hedefi 270 m/s hızla terk etmiştir. Bu değerlere göre mermi giriş enerjisi 2605 joule, artık enerji ise 1136 joule absorbe edilen enerji ise 1470 joule olarak belirlenmiştir. Bu test sonucunda hedef plakada oluşan deformasyon Şekil 3.35'de gösterilmektedir.



Şekil 3.35 İkinci tip hibrid kompozit 12 kalibre testi sonucu meydana gelen deformasyon

NUMUNE	MERMİ AĞIRLIĞI (gr)	GİRİŞ HIZI (m/s)	ÇIKIŞ HIZI (m/s)	İLK AĞIRLIK (gr)	SON AĞIRLIK (gr)	KALINLIK (mm)	ALANSAL YOĞUNLUK (kg/m <sup>2</sup> )
E 1	7,5	432	324	511,77	510,44	5,1	9,41
E 2	7,5	432	318	496,4	495,4	5,1	9,13
E 3	7,5	432	329	489,87	488,92	5,1	9,01
TP1	7,5	432	341	334,93	334,13	4,9	7,35
TP2	7,5	432	337	325,59	324,88	4,9	7,11
TP3	7,5	432	ölçüm alınamadı	319,28	318,62	4,9	7,10
S 1	7,5	432	99	415,6	414,94	4,5	8,55
S 2	7,5	432	ölçüm alınamadı	401,46	400,81	4,5	8,37
S 3	7,5	432	102	386,19	385,32	5,3	8,36
HB 1-1	7,5	432	314	343,44	343,1	4,9	7,57
HB 1-2	7,5	432	326	347,63	347,26	5,3	7,63
HB 1-3	7,5	432	322	337,92	337,28	4,9	7,48
HB 2-1	7,5	432	BAŞARILI	592,92		7,8	12,83
HB 2-2	7,5	432	BAŞARILI	597,21		7,8	12,92
HB 2-3	31	432	269	591,63	591,26	7,8	12,80

Şekil 3.36 Test edilen kompozit plakalar ve yapılan testlere ilişkin genel veriler

### 3.6 Değerlendirme

Nümerik analizlerde testlerde elde edilen değerlere çok yakın sonuçlar alınmıştır. Kimyasal enerjili mühimmat kullanılarak yapılan testlerin maliyeti ve bu testler neticesinde elde edilmesi mümkün olan verilerin kısıtlı olması nümerik analizlerin önemini arttırmaktadır. Nümerik analizlerin etkin şekilde kullanılması gerek zaman gerekse maliyet açısından tasarımcılara büyük avantajlar sağlamaktadır.

Termoset ve termoplastik reçineler kullanılarak üretilen E-cam fiber takviyeli kompozit plakalar düşük hızlı darbeye olduğu gibi balistik darbeye de birbirlerine yakın değerler göstermişlerdir. Plakalarda meydana gelen hasarlar incelendiğinde ise termoplastik reçineli kompozitin mermiyi şekil değiştirmeye zorlama yönünden daha başarısız olduğu söylenebilir. Bu sebeple hibrid kompozit tasarımlarında ara katman olarak kullanılması daha uygun olacaktır. Bundan önce başka çalışmalarda kanıtlanan absorbe edilen enerji miktarının parçacık hızıyla birlikte arttığı bu çalışma kapsamında da gösterilmiştir.

Termoplastik reçine kullanılması kompozitin deformasyon kabiliyetini arttırmaktadır ancak bu deformasyon değerlerine daha uygun fiberler ile takviye edilmesi daha başarılı sonuçlar getirebilir.

S-cam fiberler balistik performans olarak E-cam fiberlere göre çok daha başarılı sonuçlar vermiştir. S-cam fiberin kopma uzama değerlerinin E-cam fibere göre daha yüksek olması balistik performansının daha iyi olmasını sağlamıştır. Ayrıca daha ince olan lif yapısı sayesinde tabakalar arasında ve lif ile matris malzeme arasında daha iyi birleşme sağlanmakta bu özellik kompozit yapıyı oldukça rijit hale getirmektedir. Bu özelliğinden dolayı S-cam kompozit hibrid tasarımlarda mermi ile karşılaşacak ilk kısım olarak değerlendirilmelidir. Böylelikle delme kabiliyeti düşürülen mermi ara katmanlarda daha kolay şekilde durdurulabilir.

Test sonuçlarına göre S-glass kompozit malzemenin tabaka sayısı artırılarak çok kalın bir plaka olmadan mermiyi durdurması mümkün gözükmemektedir ancak S-cam

kumaş oldukça maliyetli olması kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Bunun yerine ikinci tip hibrid kompozitte yaptığımız gibi S-cam katman sayısını azaltıp tutucu kumaş olarak kevlar kumaş kullanılabilir.

Düşük hızlı tekrarlı darbe testlerinde tabakalar arası deformasyon oluşumu sonrasında malzemelerin enerji absorbe etme kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Buradan hareketle ayrı ayrı plakalar halinde üretilmiş malzemelerin serbestlik sağlayacak şekilde birleştirilmesi darbe performansını arttıracaktır.

Zırh yapısında meydana gelecek saçılmada çok sayıda parçacık tutucu plakaya isabet edecektir. Tekrarlı darbe testlerinde gösterdiği performans göz önüne alındığında termoplastik reçine sistemi ile üretilen kompozit plakalar böyle bir durumda daha yüksek performans göstereceklerdir.

## KAYNAKLAR

- Abrate, S., (2007), Ballistic impact on composites, *16th International Conference on Composite Materials: Kyoto-Japan*.
- Abu Talib, A.R., Abbud, L.H., Ali, A., ve Mustapha, F., (2012). Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder/epoxy targets under high velocity impact. *Materials & Design*, 35, 12-19.
- Arnold, W., ve Rottenkolber, E., (2003). Behind armor debris investigation - (Part II). *International Journal of Impact Engineering*, 29, 95-104.
- Bartus, S.D., ve Vaidya, U.K., (2005). Performance of long fiber reinforced thermoplastics subjected to transverse intermediate velocity blunt object impact. *Composite Structures*, 67, 263-277.
- Başaran, G., (2013), Kuş çarpması analizleri, *Figes Makale Arge Dergisi*, 1, 8-10.
- Baucom, J.N., Zikry, M.A., ve Rajendran, A.M., (2006). Low-velocity impact damage accumulation in woven S2-glass composite systems. *Composites Science and Technology*, 66, 1229-1238.
- Belingardi, G., Cavatorta, M.P., ve Paolino, D.S., (2008). Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 609-619.
- Ben-Dor, G., Dubinsky, A., ve Elperin, T., (2005). Optimization of two-component composite armor against ballistic impact. *Composite Structures*, 69, 89-94.
- Czarnecki, G.J., (1994). The significance of laminate spallation generated by high-velocity spherical metallic impactors. *Composites Engineering*, 4, 287-297.



- Czarnecki, G.J., (1998). Estimation of the V-50 using semi-empirical (1-point) procedures. *Composites Part B-Engineering*, 29, 321-329.
- Da Silva, J.E.L., Paciornik, S., ve d'Almeida, J.R.M., (2004). Evaluation of the effect of the ballistic damaged area on the residual impact strength and tensile stiffness of glass-fabric composite materials. *Composite Structures*, 64, 123-127.
- Dehkordi, M.T., Nosraty, H., Shokrieh, M.M., Minak, G., ve Ghelli, D., (2010). Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics. *Materials & Design*, 31, 3835-3844.
- Erbil, Y., Ekşi, A.K., ve Bircan, D.A., (2011), Spall liner: From fiber to protection, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*: Turkey.
- Fatt, M.H., Lin, C., Revilock, D.M., ve Hopkins, D.A., (2003). Ballistic impact of glare (TM) fiber-metal laminates. *Composite Structures*, 61, 73-88.
- Fink, B.K., ve Jr. Gillespie, J.W., (2000). Cost-effective manufacturing of damage-tolerant integral armor. *Army Research Laboratory Reports, ARL-TR-2319*.
- Gama, B.A., ve Gillespie, J.W., (2008). Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites. *Composite Structures*, 86, 356-369.
- Gama, B.A., ve Gillespie, J.W., (2011). Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 181-197.
- Gama, B.A., Yarlagadda, S., ve Kubota, M., (2006). Low velocity impact and damage behavior of kevlar bonded carbon/epoxy composites fabricated by Near-IR irradiation, *Composites 2006 Convention and Trade Show American Composites Manufacturers Association: ABD*.

- Gillespie, J.W., Monib, A.M., ve Carlsson, L.A., (2003). Damage tolerance of thick-section S-2 glass fabric composites subjected to ballistic impact loading. *Journal of Composite Materials*, 37, 2131-2147.
- Goncalves, D.P., de Melo, F.C.L., Klein, A.N., ve Al-Qureshi, H.A., (2004). Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 307-316.
- Guedes, R.M., de Moura, M.F.S.F., ve Ferreira, F.J., (2008). Failure analysis of quasi-isotropic CFRP laminates under high strain rate compression loading. *Composite Structures*, 84, 362-368.
- Gupta, B.P., ve Davids, N., (1966). Penetration experiments with fiber-reinforced plastics. *Experimental Mechanics*, 445-450.
- Hayhurst, C.J., ve Clegg, R.A., (1997). Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates. *International Journal of Impact Engineering* 20, 337-348.
- Hosur, M.V., Karim, M.R., ve Jeelani, S., (2004). Studies on stitched woven S2 glass/epoxy laminates under low velocity and ballistic impact loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23, 1313-1323.
- Huang, J., Ma, Z.X., Ren, L.S., Li, Y., Zhou, Z.X., ve Liu, S., (2013). A new engineering model of debris cloud produced by hypervelocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 56, 32-39.
- Iremonger, M.J., ve Went, A.C., (1996). Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 27, 575-581.

- Karpenko, A., ve Pfister, K., (2007). *Behind armour debris analysis method, proceedings of 23rd IS on ballistics*: Spain.
- Lee, M., (2003). Hypervelocity impact into oblique ceramic/metal composite systems. *International Journal of Impact Engineering*, 29, 417-424.
- Lin, C.F., ve Fatt, M.S.H., (2006). Perforation of composite plates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading. *Journal of Composite Materials*, 40, 1801-1840.
- Loft, K., Price, M.C., Cole, M.J., ve Burchell, M.J., (2013). Impacts into metal targets at velocities greater than 1 km s<sup>-1</sup> : A new online resource for the hyper velocity impact community and illustration of the geometric change of debris cloud impact patterns with impact velocity. *International Journal of Impact Engineering*, 56, 47-60.
- Manzella, A.F., Gama, B.A., ve Gillespie, J.W., (2011). Effect of punch and specimen dimensions on the confined compression behavior of S-2 glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 93, 1726-1737.
- Muhi, R.J., Najim, F., ve de Moura, M.F.S.F., (2009). The effect of hybridization on the GFRP behavior under high velocity impact. *Composites Part B-Engineering*, 40, 798-803.
- Naik, N.K., ve Shirao, P., (2004). Composite structures under ballistic impact. *Composite Structures*, 66, 579-590.
- Nunes, L.M., Paciornik, S., ve d'Almeida, J.R.M., (2004). Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts. *Composites Science and Technology*, 64, 945-954.

- Park, R., ve Jang, J., (1998). The effects of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites. *Composites Science and Technology*, 58, 1621-1628.
- Risby, M.S., Wong, S.V., Hamouda, A.M.S., Khairul, A.R., ve Elsadig, M., (2008). Ballistic performance of coconut shell powder/twaron fabric against non-armour piercing projectiles. *Defence Science Journal*, 58, 248-263.
- Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., ve Raju, B.B., (2009a). A combined experimental and numerical approach to study ballistic impact response of S2-glass fiber/toughened epoxy composite beams. *Composites Science and Technology*, 69, 965-982.
- Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., ve Raju, B.B., (2009b). Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 40, 1090-1110.
- Silva, M.A.G., Cismasiu, C., ve Chiorean, C.G., (2005). Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 31, 289-306.
- Sugie, T., Nakai, A., ve Hamada, H., (2009). Effect of CF/GF fibre hybrid on impact properties of multi-axial warp knitted fabric composite materials. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 40, 1982-1990.
- Verolme, J.L., Szymczak, M., ve Broos, P.J.F., (1999). Metallic witness packs for behind-armour debris characterisation. *International Journal of Impact Engineering*, 22, 693-705.
- Walter, T.R., Subhash, G., Sankar, B.V., ve Yen, C.F., (2009). Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading. *Composites Part B-Engineering*, 40, 584-589.

Wang, X., Hu, B., Feng, Y., Liang, F., Mo, J., Xiong, J., ve diğeri. (2008). Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 68, 444-450.

Xiao, J.R., Gama, B.A., ve Gillespie, J.W., (2007). Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading. *Composite Structures*, 78, 182-196.

Zhang, G.M., Batra, R.C., ve Zheng, J., (2008). Effect of frame size, frame type, and clamping pressure on the ballistic performance of soft body armor. *Composites Part B-Engineering*, 39, 476-489.