

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BALİSTİK ZIRHLARDA KULLANILAN KOMPOZİT
MALZEME KOMBİNASYONLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Sefa Emin ÖZGÜLTEKİN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM ve
İMALAT
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İbrahim Kutay
YILMAZÇOBAN

Ağustos 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BALİSTİK ZIRHLARDA KULLANILAN KOMPOZİT
MALZEME KOMBİNASYONLARININ İNCELENMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Mak. Müh. Sefa Emin ÖZGÜLTEKİN

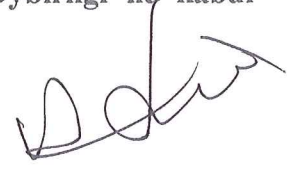
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM ve
İMALAT

Bu tez 31/03/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


.....
Jüri Başkanı
Prof. Dr.
Abdullah MİMARÖZÜ


.....
Üye
Yrd. Doç. Dr.
İ. Kutay YILMAZGÖBAN


.....
Üye
Yrd. Doç. Dr.
Adil BAŞOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında maddi manevi desteğini esirgemeyen değerli danıŐman hocam Yrd. Doç. Dr. İbrahim Kutay YILMAZOBAN' a, numunelerin hazırlanmasında Mustafa KALKAN, Hüseyin YİğİT ve Ramazan ŐEN arkadaşlarıma, deneylerin yapılmasında değerli katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Osman Hamdi METE ve Yrd. Doç. Dr. Osman İYİBİLGİN hocalarıma, Sami DÖNER arkadaşıma ve her zaman yanımda olan kıymetli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Bu alıŐma SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiŐtir.(Proje no:2012–50–01–003)

Sefa Emin ÖZGÜLTEKİN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Balistik Bilimi.....	2
1.2. Balistik Biliminin İnceleme Alanları.....	2
1.2.1. İç Balistik.....	2
1.2.2. Dış Balistik.....	3
1.2.3. Hedef Balistiği.....	3
1.3. Hasar Mekanizmaları.....	4
1.4. Zırh Tasarımına Etki Eden Faktörler.....	5
1.5. Balistik Amaçlı, Koruyucu Kompozit Malzemeler.....	7

BÖLÜM 2.

DENEYSEL ÇALIŞMA.....	21
2.1. Balistik Deney Standartları.....	21
2.1.1. NIJ 0101.06 standartı.....	22
2.1.2. Balistik testlerde deney süreci.....	24
2.2. Deneysel Çalışma.....	25
2.2.1. İlk kademe deney numuneleri.....	25

2.2.2. İkinci kademe deney numuneleri.....	28
2.2.3. Deney düzeneği.....	32
2.3. Deneyler.....	33
2.3.1. İlk kademe numuneleri.....	33
2.3.2. İkinci kademe numuneleri.....	38
BÖLÜM 3.	
BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEME VE ANALİZ.....	44
3.1. Modelin Oluşturulması ve Sınır Şartları.....	45
3.2. Numunelerin Analizi.....	48
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR.....	51
4.1. İlk Kademe Sonuçları.....	51
4.2. İkinci Kademe Sonuçları.....	53
4.3. Simülasyon Sonuçları.....	55
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	61

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AP	: Armor Piercing
BFS	: Back Face Signature
FMJ	: Full Metal Jacketed
FN	: Flat Nose
JSP	: Jacketed Soft Point
NIJ	: National Institute of Justice
PAN	: Poliakrilonitril
PP	: Polipropilen
SJHP	: Semi Jacketed Hollow Point

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Balistik korumada başarılı olan bir Al-7017 alaşımı.....	9
Şekil 1.2.	Örgülü kompozit kumaşın yapısı.....	11
Şekil 1.3.	Zırh yapısında oluşan arka yüz işareti.....	12
Şekil 1.4.	Twaron kumaşı üzerinde yapılan deney.....	13
Şekil 1.5.	Bazı malzemelerin özgül modül değerine bağlı olarak özgül çekme dayanımı değerlerinin değişimi.....	19
Şekil 2.1.	Test aralığı konfigrasyonu.....	24
Şekil 2.2.	İlk kademe numuneleri.....	26
Şekil 2.3.	Epoksi uygulanmış Kevlar numuneleri.....	27
Şekil 2.4.	Hazırlanan numunelerin sıkıştırılması.....	28
Şekil 2.5.	Karbon fiber katmanlarının hazırlanması.....	29
Şekil 2.6.	Çelik elek teli- epoksi numunesinin hazırlanması.....	29
Şekil 2.7.	Polipropilen bal peteğinin epoksi karışımı ile doldurulması.....	30
Şekil 2.8.	On kat Kevlar kumaşı ile hazırlanan tabaka.....	31
Şekil 2.9.	Safir T-14 Classic av tüfeği.....	32
Şekil 2.10.	Yavaşçalar 36 kalibre fişek.....	32
Şekil 2.11.	Deney düzeneği.....	33
Şekil 2.12.	Birinci numunenin atış sonrası kesit görünüşü.....	34
Şekil 2.13.	İkinci numunenin atış sonrası kesit görünüşü	34
Şekil 2.14.	Üçüncü numunenin atış sonrası kesit görünüşü.....	35
Şekil 2.15.	Dördüncü numunenin atış sonrası kesit görünüşü.....	36
Şekil 2.16.	Beşinci numunenin atış sonrası kesit görünüşü.....	36
Şekil 2.17.	Altıncı numunenin atış sonrası kesit görünüşü.....	37
Şekil 2.18.	PP-Kevlar numunesinin atış sonrası görünüşü.....	38
Şekil 2.19.	Çelik tel-Kevlar numunesinin atış sonrası görünüşü	39
Şekil 2.20.	Karbon fiber- Kevlar numunesinin atış sonrası görünüşü.....	39
Şekil 2.21.	Kevlar- karbon fiber numunesinin atış sonrası görünüşü.....	40

Şekil 2.22.	Karbon fiber- Kevlar-çelik tel numunesinin atış sonrası görünüşü	41
Şekil 2.23.	Yedinci ve sekizinci atışlar sonunda numunenin görünüşü.....	41
Şekil 2.24.	Dokuzuncu numunenin atış sonrası görünüşü.....	42
Şekil 2.25.	On ikinci numunenin atış sonrası görünüşü.....	43
Şekil 3.1.	Dört numaralı numune ve merminin çeyrek simetrik katı modeli.	45
Şekil 3.2.	Modelin mesh uygulaması ardından görünüşü.....	46
Şekil 3.3.	Modelin sınır şartları uygulandıktan sonraki görünümü.....	48
Şekil 3.4.	Merminin birinci numune içerisindeki hareketine bağlı hız değişimi.....	49
Şekil 3.5.	Merminin dördüncü numune içerisinde hareketi sırasındaki hız değişimi.....	50
Şekil 4.1.	İlk kademe numunelerinin deneysel test sonuçları.....	52
Şekil 4.2.	Birinci ve dördüncü numunelerin kinetik enerji değişimi.....	56

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Kevlar 29 kumaşının fiziksel özellikleri.....	17
Tablo 1.2.	Karbon fiber kumaşının fiziksel özellikleri.....	18
Tablo 1.3.	Bazı kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri.....	20
Tablo 2.1.	Bazı ulusal ve uluslar arası balistik koruyucu standartlar.....	22
Tablo 2.2.	NIJ STD-0101.06'a göre balistik test kriterleri.....	24
Tablo 2.3.	İlk kademe deneysel çalışmada kullanılan numune dizilişleri.....	26
Tablo 2.4.	İkinci kademe deneylerinde kullanılan numune dizilişleri.....	31
Tablo 2.5.	Safir T14 Classic av tüfeğinin özellikleri.....	32
Tablo 3.1.	Numuneyi oluşturan malzemelerin fiziksel özellikleri.....	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kompozit malzemeler, Zırh, Balistik, Çarpma

Günümüzde savunma sanayi büyük önem taşımaktadır. Sanayiye yatırım yapan ülkeler gerek askeri gerekse ekonomik açıdan önemli seviyelerde bulunmaktadır. Savunma sistemlerinde kullanılan koruyucu zırhların geliştirilmesi adına birçok çalışma yapılmaktadır.

Kompozit malzemeler, zırh sistemlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Geleneksel zırh sistemlerinde kullanılan çelik ve türevi maddelerin ağırlık dezavantajı, kompozit malzemelerin araştırılmasının yolunu açmıştır.

Bu çalışmada, kişisel koruyucu zırhlarda kullanılan kompozit malzemelerin balistik davranışları deneysel ve sayısal metotla incelenmiştir.

İki kademe olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, ilk kademe deneyleri yapılarak zırh numunelerindeki tabaka dizilişleri hakkında altyapı bilgisi elde edilmesi hedeflenmiştir. İkinci kademe deneylerinde ise, ilk kademede çalışmalarından elde edilen diziliş bilgilerinin yanı sıra Aramid kumaşının dizilişlerdeki önemi ve etkisi araştırılmıştır.

Farklı malzemelerden oluşan katmanlar, değişik kombinasyonlarda sıralanarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu katmanlar; aramid kumaş, karbon fiber, epoksi reçine ile takviye edilmiş polipropilen bal peteği yapısı ve yine epoksi reçine ile tabakalaştırılmış çelik elek telidir. Safir T14 uzun namlulu tüfek ve Yavaşçalar 36 kalibre tek kurşun fişek kullanılarak numunelerin balistik davranışları incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda aynı malzemelerin farklı şekilde dizilişleri ile birbirinden çok farklı davranışlar gösterdiği saptanmıştır. İlk kademede dört ve altı numaralı zırh numuneleri, ikinci kademede ise sekiz numaralı zırh numunesi başarı ile insan bedenini, 10 m mesafeden 700 m/s hıza sahip mermiye karşı korumuştur.

INVESTIGATION OF THE COMPOSITE MATERIAL COMBINATIONS FOR THE BALLISTIC ARMORS

SUMMARY

Keywords: Composite materials, Armor, Ballistic, Impact

Nowadays, defense industry is of great importance. Countries that made investments in this industry are in the significant levels both military and economic fields. Many investigations are being made to develop protective armors that used in defense systems.

Composite materials play an important role in the development of armor systems. Weight disadvantage of steel and similar materials that are being used in conventional armor systems paved the way for search about composite materials.

In this study, ballistic behaviors of the composite materials used for human body armors were investigated experimentally and numerically.

For the first stage of the experimental studies, it was aimed to be obtained the differences for sequencing the armor layers. By the second stage of the experiments, effects and importance of the Aramid fabric positions in the composite combinations were investigated.

Specimens prepared by different combination of different layers that are Kevlar, carbon fiber, resin reinforced polypropylene honeycomb and steel sifter wire that shaped in resin. Safir T14 long-barreled rifle and Yavascular 36 caliber one cored projectile were used to define ballistic behaviors of the specimens.

As a result of this study it is obtained from those different combinations of the same materials show different ballistic behaviors. For the first combinations of the same materials show different ballistic behaviors. For the first combinations, fourth and sixth armor specimens, and for the second combinations, eighth armor specimen was protected the human body against the speed of 700 m/s projectile from 10 m distance.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu çalışma ile savunma sanayinde kullanılan kişisel koruyucu zırhlarının, kompozit kumaşlar ve epoksi sistemler yardımıyla, deneysel ve nümerik metotlarla yeniden tasarımının yapılarak zırh teknolojisinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmalar neticesinde kişisel koruyucu zırhların, daha hafif ve koruma özelliği yüksek olması için yapılacak uygulamalara deneysel altyapı sağlanmış ve yeni hazırlanacak zırh kombinasyonları için farklı fikirler ortaya konulması sağlanmıştır.

İnsan, tarihi boyunca korunma ihtiyacı içinde olmuştur. Gerek günlük hayatında, gerekse savaş durumlarında, bu ihtiyacının bir sonucu olarak daha iyiyi keşfetmek için sürekli çalışma içinde olmuştur. Bunun için taş ve sopaların kullanımı ile başlayan silahları geliştirmiştir. Silahlanmanın yayılması silah tehdidine karşı korunma ihtiyacını meydana getirmiştir. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda insanoğlu kişisel koruyucu kalkan ve zırhlar kullanmak durumunda kalmıştır. Eski zamanlarda sert cisimlerle savaşan insanlar, yine sert ve dayanıklı cisimlerle kendisini korumuştur. Tarih boyunca savaşlar geçirmiş ve gelişen teknoloji ile birlikte ürettiği yeni silah ve zırh ekipmanlarını kullanmıştır.

Hızla gelişen silah teknolojisi barutun ve ateşli silahların icadıyla yeni bir boyut kazanmıştır. Silahların ağırlığı azalıp, boyutları küçülürken etki ve menzilleri artmıştır. Buna paralel olarak gerek bina ve araç gerekse kişisel koruyucu zırhlarında yüksek başarı ve düşük yoğunluk hedefi kaçınılmaz olmuştur ve tüm bu gelişmeler balistik biliminin ortaya çıkmasını sağlamıştır [1].

1.1. Balistik Bilimi

Balistik, Fransızca “balistique” sözcüğünden gelen bir kelime olup, mermilerin namlu içindeki ve dışındaki devinimlerini ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bilimdir [2].

1800' lü yılların ortalarında temelleri atılan balistik bilimi, ilk zamanlarda bazı basit prensiplerle silahlara uygulanmıştır. Fakat daha sonra geliştirilen uygulamalarla balistik, başlı başına bir bilim dalı olmuştur. Bu bilimin ortaya çıkmasının sebebi; silah, mermi ve zırhların birbiriyle olan etkileşimlerini incelemektir. Balistik biliminin gelişimi sonucunda; silah, mermi ve zırh teknolojisi de hızla geliştirilmiştir.

1.2. Balistik biliminin inceleme alanları

Balistik bilimi genel anlamda merminin hareketini incelemek üzerine yoğunlaşmıştır. Başka bir deyişle, merminin ateşleme anından itibaren namlu içindeki ve havadaki hareketi ve çarptığı hedef üzerindeki etkilerini incelemektedir. Buradan hareketle;

- a) İç balistik
- b) Dış balistik
- c) Hedef balistiği

olmak üzere balistik biliminin üç ana dalı vardır.

1.2.1 İç balistik

İç balistik, kimyasal enerji kaynağını, gazın genişlemesini ve ortaya çıkan enerjinin kontrolünü ve yönlendirilmesini incelemektedir. Askeri silahlar, diğer silahlara göre sıcaklık ve basınç bakımından daha çok zorlanmış durumlarda çalışmaktadır. Bir merminin silah içerisindeki hareketi, gazın mermiye etkisi ile ilgilidir. Mermi hareketi sırasında, içinde bulunduğu namluya basınç yaparken arada sürtünme kuvveti ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki gaz, namluyu o derece ısıtır ki, kimyasal reaksiyon dahi gözlemlenebilmektedir.

1.2.2. Dış balistik

Mermi ve yanan barut gazları namluyu terk ettikten sonra, hedefe ulaşmaya kadar geçen sürede merminin uçuş hareketini ve bu harekete etki eden faktörleri inceleyen bölüme dış balistik denilmektedir. Yerçekimi dışında merminin havadaki hareketini etkileyen faktörler, mermi ile ilgili olanlar ve merminin içinde hareket ettiği atmosfer ile ilgili olanlar olarak iki kısımda incelenebilmektedir. Mermi veya füze etki eden atalet, yerçekimi ve hava tarafından tesir eden aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi halinde, yörüngelerin hesabı kolaylıkla tespit edilebilir.

1.2.3. Hedef balistiği

Hedef balistiği, merminin hedef üzerindeki veya hedefin(zırhın) mermi üzerindeki etkileri ile ilgilenmektedir. Mermi hedefe ulaştığında meydana gelen olayları bütün yönleriyle içine almaktadır. Hedefe etkime mekaniği, zırh arkasındaki etkiler, saçılan parça yapıları, toplu ölümcül durumlar, yüksek basınçtaki patlamalar, ölümcül olmayan etkiler ile canlı organları ve dokuları üzerindeki etkileri incelemektedir. Özellikle, bu son konu giderek daha da önemli hale gelmektedir. Silahlı kuvvetlerin ölümlerden ziyade bu konuya aşırı ilgi duyuyor olmasından dolayı, “yara balistiği” olarak bilinen kendine özgü bir dal sınıflandırılması yapılmıştır [3].

Darbe sırasında iki madde arasındaki ilişki yalnızca askeri sahada değil, birçok alanda mevcuttur. Sivil teknolojinin gelişmesiyle birlikte, malzemeler üzerine ani yüklemelerin, malzeme özelliklerine etkisi ile alakalı birçok sonuç elde edilmiştir. Bu ve benzeri şekilde gerçekleşen kısa süreli ve yüksek değerdeki yüklere maruz kalabilecek yapılarda, güvenli ve ideal tasarımın yapılabilmesi için kullanılacak malzemelerin bu yükler karşısındaki davranışlarının açık bir şekilde anlaşılması gerekmektedir [1].

Ateşli silahlardaki merminin tipi, küçük çaplı ateşli silahlar ile ağır ateşli silahlarda birbirinden farklıdır. Örneğin; tüfek, tabanca gibi küçük çaplı silahların mermileri,

çarpma etkisi ile hedefi delmektedir. Büyük çaplı, ağır ateşli silahlar olan topların mermileri ise hedefi bulduğunda patlamaktadır.

Ateşli silahlarda kullanılan barut, çok hızlı yanan bir maddedir. Yandığında ortaya çıkan gazların basıncı, ateşli silahlarda mermi için itici gücü oluşturmaktadır. Barut, düşük seviyeli patlayıcılar grubunda bulunmaktadır. Yandığında sestem yavaş bir parlama ortaya çıkmaktadır. Bu sayede, silahta barutun yanmasından oluşan basınç, mermiyi itecek kadar güç ortaya çıkarırken, namluya da zarar vermemektedir [2].

1.3. Hasar Mekanizmaları

Balistik çarpma genellikle, bir kaynak tarafından itilen merminin oluşturduğu düşük kütleli, yüksek hızlı çarpma olarak adlandırılmaktadır. Balistik çarpma yüksek hızlı bir olay olmasına rağmen, hedef üzerindeki etkileri çarpmanın olduğu noktaya yakın bir çevrede gerçekleşmektedir. Çarpma esnasında enerji transferi, mermiden hedefe doğru ilerlemektedir. Hedef malzemesinin özelliklerine ve mermi parametrelerine bağlı olarak;

- 1) Mermi hedefi delmekte ve arka yüzden belirli bir hızda çıkmaktadır. Bu, merminin ilk enerjisinin, hedefin absorbe edebileceği enerjiden fazla olduğunu göstermektedir.
- 2) Mermi, hedefe kısmen girmektedir. Bu, merminin ilk enerjisinin, hedefin absorbe edebileceği enerjiden daha düşük olduğunu göstermektedir. Hedef malzemenin özelliğine bağlı olarak mermi, ya hedefin içinde kalmakta ya da sekteye uğramaktadır.
- 3) Mermi, hedefi tamamen delmektedir; fakat çıkış hızı sıfırdır. Böyle bir durumda verilen kütle için, merminin ilk hızı balistik limit olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca merminin bütün enerjisi sadece hedef tarafından absorbe edilmektedir [4].

Hedef balistiğinde sıkça kullanılan nüfuz etme (penetrasyon) kavramı, merminin hedefin herhangi bir bölgesine girme durumunun gelişimi olarak tanımlanmaktadır. Çarpışma esnasında, mermi hedefe birkaç şekilde nüfuz edebilmektedir. Hedef üzerinde meydana gelen hasarlar; malzeme özelliği, çarpışma hızı, mermi burun

şekli, mermi yörüngesi ve mermi ile hedefin göreceli boyutları gibi çeşitli değişkenlere bağlı olmaktadır [3].

Genellikle zayıf ve düşük yoğunluklu hedeflerde, gevrek kırılma görülmektedir. Başlangıçtaki gerilmenin, malzemenin en yüksek dayanım değerini aşması sonucu meydana gelmektedir. Düşük veya orta sertlikteki kalın levhalarda görülen tipik hasar mekanizması ise sünek delinme ile birlikte küçük parça kopmasıdır. Sünek delik gelişimi, dolgu oluşumu ve taç yaprağı oluşumu sünek malzemelerde çok görülen hasar şekilleri olmakla birlikte farklı hasar şekilleri bulunmaktadır [3].

1.4. Zırh Tasarımına Etki Eden Faktörler

İnsanoğlu, varoluşundan beri sürekli değişim içinde olmuş ve bu değişimin neticesinde hep daha iyiye doğru yönelmiştir. Hayatta kalmak adına saldırı için her ne kadar gelişim içinde olmuşsa da aynı şekilde kendisine karşı gelen tehditlere karşı da aynı şekilde savunma sistemi geliştirmek zorunda kalmıştır. Bu sebeple; patlayıcı, delici, kesici tehlikelere karşı insanları ve donanımları koruma amacı taşıyan giysiler veya taş, duvar, hendek gibi bariyerler zırh olarak kullanılmıştır. İlk koruyucu giysiler hayvan derilerinden yapılmıştır. Daha sonra, uygarlıkların gelişmesiyle beraber, tahta ve metal zırhların kullanımına başlanmıştır [5].

Teknolojik gelişmelerin beraberinde, yapılan bilimsel çalışmalar neticesinde, zırh yapımında kullanılacak malzeme çeşitleri, yüksek dayanım, düşük ağırlık, yüksek hareket kabiliyeti ve süreklilik gibi birçok parametrenin önemine değinilmektedir.

Tasarımcılar ve zırh kullanıcılarının her ikisi içinde; ağırlıktan kaynaklanan rekabet koşullarının nasıl en iyi şekilde dengeleneceği, belirli bir tehdit seviyesinde zırh paketi için kalınlık ve maliyet parametreleri önemlidir. Tekil tabaka olarak üretilen bir zırh sistemi ufak çaplı kalibredeki mermiler için iyi bir dayanım gösterebilmektedir. Bunun yanında, zırh delici mermileri alt etmek için çoklu katmanlı örneğin kompozit destekli sert seramik ön yüzeyli zırh sistemleri gereklidir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip mermiler, sertleştirilmiş çelik veya tungsten karpit gibi sert çekirdek malzemesi içermekte ve seramik yüzey, çarpma

sırasında merminin etkisini azaltmakta ve aşındırmaktadır. Kompozit destek ise yavaşlamış olan merminin kinetik enerjisini absorbe etmekte ve ayrıca seramik ve mermi parçalarını tutarak daha fazla hasara neden olmasını engellemektedir [6].

Jena [7], zırh tasarımında ağırlık kavramı üzerine çalışma yapmıştır. Hafif zırhlar, enerji korunum ve hareket kabiliyetinin artırılması için önemlidir. Metalik malzeme olarak, yüksek dayanımlı çelikler, alüminyum alaşımlar ve titanyum alaşımlar zırh yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Çünkü bu malzemeler, yüksek mukavemet, iyi şekillendirilebilme ve buna bağlı yüksek tokluk, kaynak edilebilirlik ve yüksek balistik performans parametrelerinin birleşimine sahiptir. Bunun yanında monolitik metalik malzemeler genel olarak ağır olmaktadır [7].

Majumdar [8] ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada erkek askerlerin giydiği ağır zırhların fizyolojik etkileri üzerinde durmuşlardır. Altı erkek asker, 26° C' deki laboratuvar ortamında koşu bandı üzerinde 11 kg ağırlığındaki zırhları giydiği ve giymediği durumlarda gözlemlenmiştir. Altı farklı asker, sıcak ve nemli odada zırhları giydikleri ve giymedikleri durumlarda bir saatlik hafif fiziksel antrenmana tabi tutulmuştur. Kalp atış hızı, nefes ventilasyonu ve oksijen alımı, zırhın koşu bandında giyildiği durumda, giyilmediği duruma göre artmıştır. Kalp atış hızı dakikada 15 atış, oksijen alımı ise 6 ml artmıştır. Nemli odada ki testte ise kalp atış hızı ve deri sıcaklığı zırh giyilmediği duruma göre, ortalama% 5 oranında yüksek ölçülmüştür [8].

Günümüzde zırh yapımında en yaygın olarak çelik kullanılmaktadır. Çelik hakkındaki teknolojik bilgi birikiminin genişliği üretiminin diğer malzemelere nazaran daha ucuz olması, tercih edilmesindeki en büyük etkenlerdir. Fakat hafif zırh tasarımında, yüksek yoğunluğu sebebiyle çelik uygun değildir. Bu durum araştırmacıları, daha iyi malzeme geliştirmeye ve farklı malzeme kombinasyonları üretmeye teşvik etmiştir [9].

Balistik deneyler sırasında, genellikle hedef malzemesinin radyal olarak hareketinin gerçekleştiği sünek delik genişlemesi görülmektedir. Bu sebepten dolayı, hedef malzemenin akma mukavemetinin yüksek olması, nüfuziyet direncinin de yüksek

olmasına sebep olmaktadır. Yüksek tokluk ve sünekliklerinden dolayı, metallerin çoklu çarpmaya karşı koyma kabiliyetleri oldukça yüksektir. Bununla birlikte metallere yumuşak malzemelerdir ve çarpışma esnasında hemen hemen merminin bütün kinetik enerjisi, hedefin deformasyonu ile sönmülmektedir. Seramikler ise metallere göre çok daha gevrek ve çoklu çarpmalara karşı mukavemetleri zayıf olmasına rağmen; düşük yoğunluk, yüksek rijitlik, yüksek sertlik ve yüksek basma mukavemetlerinden dolayı zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Balistik çarpmada, çarpma yüzeyindeki yükler, basma niteliğinde olduğu için, burada yüksek sertlik ve rijitlik önem kazanmaktadır. Düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve rijitliklerinden dolayı seramikler, genellikle zırh kombinasyonlarının ön yüzeyinde kullanılmaktadırlar. Çok yüksek sertlik ve elastisite modüllerinden dolayı seramikler, yüksek hızlı ve zırh delici mermileri hasara uğratabilmektedir. Ancak bu işlevi yerine getirirken parçalanırlar ve kullanımları tekil çarpma durumu ile sınırlı kalır. Buna karşılık tanecik takviyeli metal matrisli kompozitler, seramikler ve metallere sunduğu özelliklerin karışımına sahip oldukları için bu malzemelerin balistik performanslarının incelenmesi, önemli bir araştırma konusu olmaktadır [10]

Onga [11] ve arkadaşları zırh sistemindeki tabakaların dizilişinin önemini incelemiştir. Birinci tabaka olarak mermiyi deforme edecek ve kırarak sert bir tabaka, ikinci olarak şok dalgasını yavaşlatacak ortotropik tabaka, şok dalgasının enerjisini absorbe etmek için gözenekli üçüncü tabaka ve son olarak da gözenekli tabakaya destek olacak bir dördüncü tabaka tasarlamışlardır. Tasarlanan bu tabakalar için de sırasıyla Al_2O_3 , Dyneema HB25 ve gözenekli poliüretan köpük kullanılmıştır. Bu çalışma neticesinde kompozit zırh, aynı yoğunluktaki çeliğe göre daha üstün davranış sergilemiştir [11].

1.5. Balistik Amaçlı, Koruyucu Kompozit Malzemeler

Belirli bir amaç için uygun olmayan iki veya daha fazla malzemeyi, hedeflenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak makro yapıda bir araya getirerek elde edilen, bileşenlerinden farklı özelliklere sahip yeni malzemeye kompozit malzeme denilmektedir.

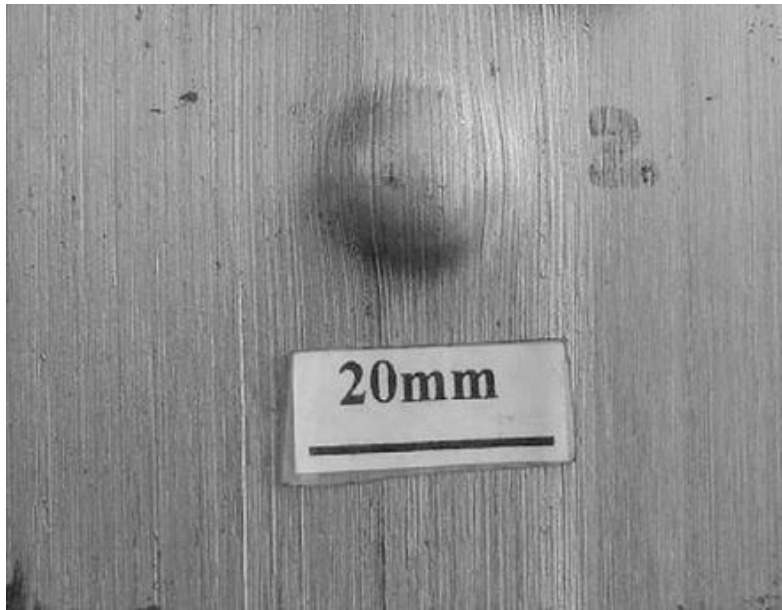
Kompozit malzemelerde temel olarak kullanılan bir fiber malzeme bulunmakta ve bu malzemenin etrafını hacimce saran bir matris malzemesi yer almaktadır. Böyle bir sistemde fiber malzeme, kompozit malzemenin dayanım ve yük taşıma özelliğini, matris malzemesi ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamaktadır. Matris malzemesinin bir diğer özelliği de artan yükler altında fiber malzemeyi bir arada tutmak ve oluşan yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır.

Çok fonksiyonlu malzemelere ve yapılara olan ilgi, yeni malzeme ve yapı geliştirme ihtiyacına bağlı olarak artmaktadır. Bu tip malzemelere örnek olarak, yüksek dayanım, yüksek sertlik ve yüksek kırılma tokluğu gibi özelliklere sahip olan kompozit yapılar verilebilir. Kompozit malzemelerin kullanımındaki güçlü gelişme, çok fonksiyonlu tasarım gereksinimliliğinden etkilenmiştir. Kompozit yapıların gelişimi ile ilgili geleneksel yaklaşım, yük taşıma işlevleri ile diğer özelliklerini ayrı ayrı belirtmeye yöneliktir [12]

Evcil [13] yaptığı çalışmada kompozit malzemelerin belirli bir düşük ağırlıkta gösterdikleri mekanik özellikleri incelemiştir. Bu özellikler mühendislere, performans kaybı olmadan, ince ve sert yapılar tasarlamada yardımcı olmaktadır. Kompozit malzemelerin birçok faydası olmasına rağmen, çok karmaşık bir çarpma davranışı göstermekte ve artan yük çekme kapasitelerini güçlü bir şekilde etkileyen görünmez darbelere karşı oldukça hassas davranmaktadırlar [13].

Billon [9], kumaş zırhların balistik davranışı etkileyen parametreleri incelemiştir. Kumaş bir zırhta balistik performans, zırhı oluşturan kumaş ve çarpan merminin fiziksel özellikleri ile yakından alakalıdır. Kumaşın fiziksel özellikleri, iplik elastisite modülü, iplik çekme gerinimi, iplik doğrusal yoğunluğu ve dokuma yapısı gibi başlıklardır. Mermi karakteristikleri, kütle ve şekilden oluşmaktadır. Balistik kumaş malzemelerinin katmanları, bölgesel yoğunluğu artırmak ve kullanışlı zırhlar üretmek üzere kaplanmaktadır. Bu kumaş tabakaların balistik davranışları, modele göre optimize edilebilirse daha da kullanışlı olabilmektedir [9].

Jena [14] ve arkadaşları, Al-7017 alaşımı ve çelik zırh numunelerinin, 7.62mm' lik deforme olabilen mermi karşısındaki balistik davranışlarını incelemiştir. Yüksek dayanımlı zırh çeliği, iki farklı ısıl işleme tabi tutularak, farklı mekanik özelliklerin balistik davranışları gözlemlenmiştir. Zırh çeliği, 910°C'de östenitmeye ve de devamında yağ soğutmasına maruz bırakılarak tam martenzitik bir yapı elde edilmiştir. Daha sonra plakalar 200°C'de temperlemeye ve akabinde hava soğutmasına tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonucunda Al-7017 alaşımının 30,28 ve 27mm olduğu numuneler, mermiyi tutmuş, 26mm'de delinme gözlemlenmiştir. 200°C' de temperlenmiş çelik ise 8, 7 ve 6mm kalınlıklarındaki mermiyi tutmuş, 5mm kalınlıktaki numunede ise delinme gözlemlenmiştir. Yine aynı çeliğin fabrika şartlarındaki üretiminden elde edilen numunelerde ise aynı mermi için 9mm'de delinme gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Al-7017 alaşımı ve çelik numuneleri balistik davranışları açısından karşılaştırılmış ayrıca çelik numunelerinin ısıl işleme tabi tutuldukları zamanki davranış değişiklikleri gözlemlenmiştir [14].

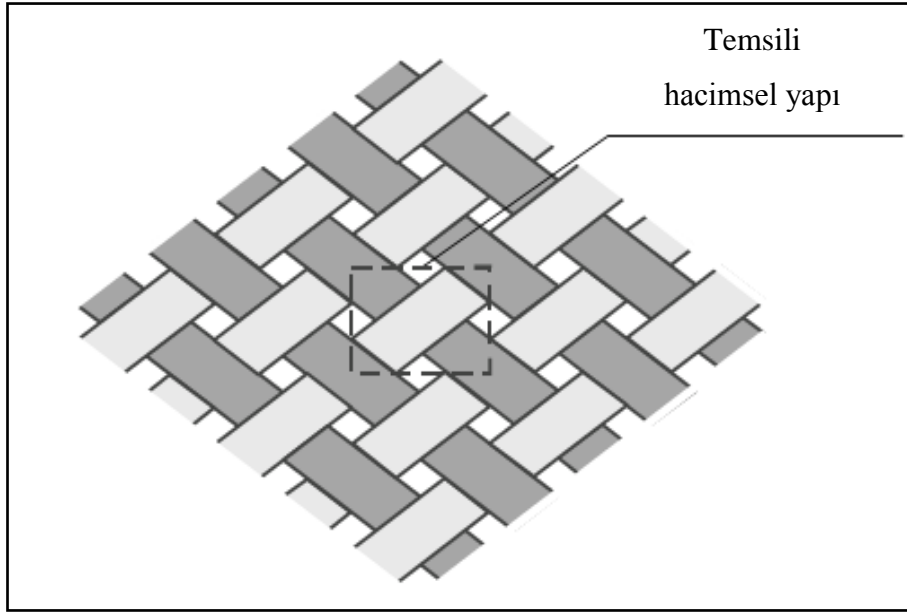


Şekil 1.1. Balistik korumada başarılı olan bir Al-7017 alaşımı [14]

Askeri sistemler, özellikle kara kuvvetlerini destekleyenler, daha hızlı, daha çevik ve daha mobil olmaya yönelik gelişmektedir. Bunun bir sonucu olarak, gelişmiş hafif vücut zırhı ve hafif araç zırhı talebi, yeni zırh malzemelerinin gelişmesine neden olmuştur. Yüksek performans fiber malzemelerinden her iki uygulama için de faydalanılmaktadır. Örneğin yumuşak, esnek fiber kumaşları olarak vücut zırhlanması veya rijit polimer matris kompozitlerinde takviye malzemesi olarak hafif

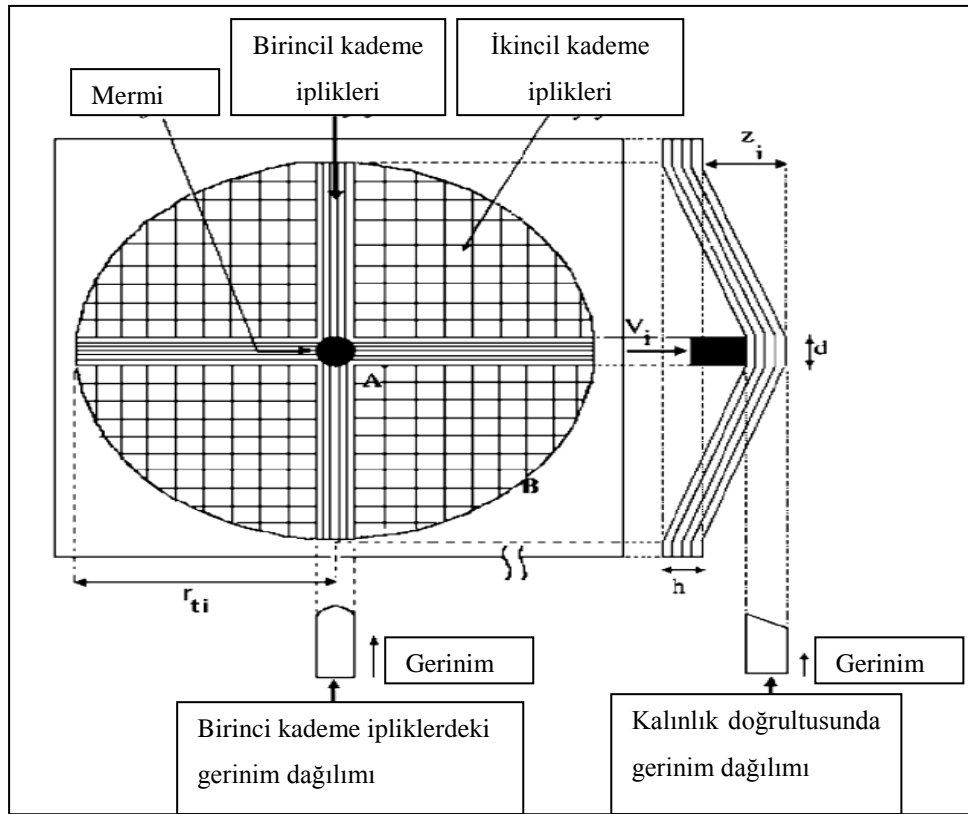
araç zırhlanmasında kullanılabilir. Tüm tarihsel gelişme boyunca hafif ve esnek malzemeler araştırılarak, daha hafif vücut zırh sistemleri ile hareket kabiliyetini artırmak ve aynı zamanda belirli tehditlere karşı koruma sağlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk zamanlarda deri ve ipek, metal plakalar ile birlikte kullanılarak, ihtiyaç duyulan korumaya ulaşılmaya çalışılmıştır. Metallerin tamamen vücut zırh sistemlerinden kalkması, Kore savaşına kadar gerçekleşmemiştir. Bu noktada II. Dünya Savaşı süresince geliştirilmiş olan, bir naylon kumaş yelek ve bir E-cam fiber/etil selüloz kompozit yelek, kullanıma alınmıştır. Bu yelekler bomba ve parçaların neden olduğu yaralanma ve ölümlerin büyük bir kısmına karşı koruma sağlamıştır. Naylon ve E-cam fiberler, düşük maliyetlerinden ötürü günümüzde hala bazı uygulamaları bulunmasına rağmen, yüksek performans fiberleri, birçok fiber takviyeli zırh uygulamaları için standart haline gelmiştir. Yüksek performans fiberleri tipik örülmüş kumaş halinde yelekler, örülmüş veya örülmemiş olarak polimer matris kompozitlerinde takviye malzemesi halinde başlık amaçlı kullanılabilir [15].

Örülmiş kompozit materyaller birçok uygulamada birincil yapı bileşeni olarak kullanılmaktadır. Bu tip yapıların hasar analizleri, yapı tasarımlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Avantajlarının yanında, örgülü kumaş kompozitlerinin karmaşık yapısı, analizleri ve simülasyonları oldukça zorlaştırmaktadır. Örgülü kompozitlerin modellenmesi üzerine yapılan çalışmaların büyük kısmı, malzemelerin elastik özelliklerini öngörmek amacıyla yapılmıştır. Fakat pek az deneysel çalışmada da hasar davranışları üzerinde durulmuştur. Bu nedenden dolayı ki, örgülü kumaş kompozitlerinin ilerleyen hasar davranışları karmaşık bir olgu olmaktadır. Bu olgu, matris malzemesinin kumaş ile geometrik açıdan doğrusal boyutta olmayan uyarlanması ve etkileşimdeki bileşenlerin gerilme yığılmasıyla hasar birikimlerinden oluşmaktadır [16].



Şekil 1.2. Örgülü kompozit kumaşın yapısı [16]

Tabakalı balistik kompozit malzemeleri, koruyucu başlıklarda veya seramik ve diğer malzemelerin katkısıyla koruyucu gövde zırhlarında kullanılabilir. Standart sert plaka korumalı vücut zırhları genellikle mermiyi kırmak veya yavaşlatmak için seramik plaka, mermiyi durdurmak için de çok katlı kompozit panellerden oluşan çoklu tabakalardan yapılmaktadır. Zırh, dinamik deformasyondan kaynaklanan potansiyel yaralanmayı azaltmak için kullanılan sarsıntı karşıtı tabaka içerebilir. Çarpma sırasında zırhta oluşan maksimum deplasman, arka yüz işareti (BFS) olarak tanımlanır ki bu balistik performans için önemli bir parametredir. Aramid içeren iki tip yaygın kompozit kumaş, vücut koruyucu zırhlarda kullanılabilir. Bunlar Kevlar ve polietilen asıllı Dyneema' dır. Dokuma ya da tek yönlü liflerin katmanları termoplastik veya ısı ile sertleşen polimer matrislerle bağlanmaktadır [17].



Şekil 1.3. Zırh yapısında oluşan arka yüz işareti [4]

Genellikle seramik tabakalı sert ön yüzey ve fiber destekli arka plakanın kombinasyonu olarak tasarlanan modern zırhlar, balistik ve yapısal gereksinimleri sağlamak üzere geliştirilirken aynı zamanda yaklaşık %30-40 oranında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır [18].

Ticari ve sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yüksek performans organik kumaş malzemesi aramid, polimerik reçine sistemleri ile mekanik ve kimyasal etkileşimi sınırlayan pürüzsüz ve düzgün bir yüzey sağlamaktadır. Kumaş ve reçineyi birbirinden karakteristik olarak ayıran bu özellik ara yüzeyde bir form oluşmasını imkânsızlaştırmaktadır. Aramid ile diğer organik kumaş ve farklı reçine sistemleri arasındaki ara yüzey etkileşimlerini artırmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır [19].

Yüksek mukavemetli kumaşlar, daha öncede bahsedildiği gibi, esneklik ve hafifliğin önemli olduğu balistik koruma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmalar neticesinde, iç yüzeySEL sürtünme, bu tür kumaşların çarpma enerjisini

absorbe kabiliyetini etkilemektedir. Tan [20] ve arkadaşları, tek katmanlı Twaron kumaşının balistik performansı üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarında, farklı kalibredeki mermilerle, karşılıklı iki kenarlarından sıkıştırılmış dikdörtgen kumaş numuneleri üzerinde çarpma testleri yapmışlardır. Çalışmalar neticesinde, gelişmekte olan mermi tipleri ile kumaş arasındaki sürtünmenin, çarpma sırasındaki enerjinin sönmülmesinde önemli bir mekanizma olduğu görülmektedir [20].

Karahan [21] ve arkadaşları, farklı sayıda katlardan oluşan ve üç farklı dikiş tipi ile panel haline getirilen Twaron Ct710 tipi kumaş zırh numunelerinin balistik davranışlarını incelemiştir. Kumaşların balistik performanslarına, darbe derinliği ve darbe çapı ölçülerek karar verilir. Kumaş tarafından absorbe edilen enerji ve arka yüzeye iletilen enerji, darbe derinliği ve darbe çapı değerlerine farklı bir yaklaşımla elde edilir. Görülmüştür ki, kumaş kat sayısı ve dikiş modeli balistik özellikler konusunda önemli etkilere neden olmuştur [21].



Şekil 1.4. Twaron kumaşı üzerine yapılan balistik deney [21]

Briscoe ve Motamedi [22], üç farklı Kevlar kumaş tipinin balistik performansları bakımından sürtünme karakteristiklerini incelemiştir. Kullanılan kumaş tipleri için anlaşılmıştır ki, sürtünme derecelerinin artırılmasıyla bağlantılı olarak, hedefi delmek için gerekli hız da artmalıdır. Yüksek sürtünme derecesine sahip olan kumaş, daha fazla enerjiyi absorbe etmektedir [22].

Akil ve Tan [23], yaptıkları çalışmada polipropilen bal peteği ve bu petek üzerine lamine edilmiş alüminyum fiber metal ve cam fiber destekli termoplastik prepreg kompozit panelinin çarpma özelliklerini incelemiştir. Numuneler düşme tipi elemanlı çarpma testi makinesinde, bir seri teste tabi tutulmuştur. Farklı yüksekliklerden deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar optik mikroskop ile gözlemlenmiştir. Deneyler sonrasında, düşük enerjili çarpmaların, sadece çarpma noktasının çevresinde girinti yaptığı, yüksek enerjili çarpmaların ise yüzeyde delaminasyona ve malzeme yapısında eğilmeye neden olduğu gözlemlenmiştir [23].

Çarpmayı absorbe eden malzemelerin önemli bir sınıfı olarak kumaşlar ve esnek lifli kompozitler, kurşungeçirmez yelekler ve diğer vücut zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin kişisel koruma uygulamalarında kullanılmış olması, bu malzemelerin ve bu malzemelerden yapılan bileşenlerin mekanik tepkilerini anlamak üzere deneysel altyapının geliştirilmesini gerektirmektedir. Cheng [24] ve arkadaşları, Kevlar kumaşının mekanik özellikleri üzerine deneysel çalışma yapmıştır. Kevlar kumaşı yüksek sertlik, yüksek dayanım ve hafiflikleri sayesinde kişisel koruma uygulamalarında geniş olarak kullanılmıştır. Bir kumaş zırh sisteminin deformasyon sürecini anlamak için malzeme özelliği, kumaş yapısı, mermi geometrisi, çarpma hızı, çoklu tabaka etkileşimi, uzak alan sınır koşulları ve sürtünme gibi birçok konu araştırılmalıdır. Bu faktörlerin içinde, malzeme özellikleri zırhın etkenliğini belirlemede kritik önemde olmaktadır [24].

Kompozit malzemeler, birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılık göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre oldukça önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hafif yapılarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımı sağlamaları da ilgili kullanım alanları için birer üstünlük parametreleri olarak göze çarpmaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajlı olan yanları alt kısımda kısaca ele alınmıştır. Bu malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik, teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler, metal malzemelerin yerini alabilecektir [2].

Ramadhan ve arkadaşları [25], nitrojen gaz silahı kullanarak, kompozit lamine plakaların çarpma davranışları üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Testlerde malzeme olarak Kevlar 29 fiber /epoksi reçine ve 6061-T6 alüminyum plakalar kullanılmıştır. Silindirik şekilli 7.62mm çaplı çelik mermi 180-400m/s hız değerlerinde kullanılarak çarpma testleri uygulanmıştır. Balistik limit hızı, hedefe malzeme tarafından absorbe edilen enerji değeri ve simülasyonlar ile deneysel çalışma arasındaki kıyaslamayı görmek üzere nümerik çalışma yapılmıştır. Alüminyum plakanın her diziliş şekli (ön, orta, arka) için testler tekrarlanmıştır. Alüminyumun arkada olduğu durumda, çarpma yüklemelerine dayanıklı bir sonuç elde edilmiştir [25].

Gustin ve arkadaşları [26], Kevlar ve karbon fiber kombinasyonlu sandviç kompozit numuneler konusunda çarpma testleri yapmıştır. Çarpma yüzeyindeki malzeme değiştirilerek, farklı karbon fiber/Kevlar, karbon fiber/hibrit kombinasyonları elde edilmiştir. Tüm testler boyunca arka yüzeydeki malzeme olarak karbon fiber kullanılmış ve çalışmanın asıl amacı olarak, ön yüzeyde kullanılan karbon fiber yerine, Kevlar ya da hibrit kullanıldığında sonuçta bir iyileşme olup olmadığı gözlemlenmiştir. Yine bu çalışmada ara katman olarak poliüretan köpük doldurulmuş Mikor bal peteği yapısı kullanılmıştır. Testler Instron Dynatup 9250 HV cihazı vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde, ön yüzeyde Kevlar ve hibrit kullanıldığı durumlarda numunenin çarpma dayanımlarında, karbon fibere oranla yaklaşık %10 artış gözlemlenmiştir [26].

Reis ve arkadaşları [27], dolgu matrisli Kevlar / epoksi kompozitlerinin düşük hızlı çarpma davranışlarını incelemiştir. Dolgu malzemesi olarak mantar tozu ve nanokil Cloisite 30 B, numunelerin çarpma dayanımlarını iyileştirmek için kullanılmıştır. Dolgu eklemesi maksimum çarpma yüklemesini arttırmaktadır. 21J değeri için maksimum yüklemedeki artış, mantar tozu dolgulu numunede %4.5, mantar tozu ve kil olan numunede %10.4, sadece kil olan numunede ise %16.1 olarak ölçülmüştür. Elastik iyileşme şartları dâhilinde en iyi performans, dolgu malzemesi olarak nanokillerin kullanıldığı numunelerden elde edilmiştir. 21J çarpma değeri için, nanokil dolgulu kompozitin elastik iyileşmesi, kontrol malzemesinden %40.1 daha yüksek olarak gözlemlenmiştir [27].

Balistik çarpma sonrasında, hedef malzemesinin arka yüzeyinde bir koni oluşumu gözlemlenmektedir. Ön yüzeyde kaymanın oluşturduğu tıkama ve arka yüzeydeki koni formu, balistik çarpma olayı esnasında hedef malzemenin özelliklerine bağlı olarak yer almaya başlamaktadır. Koni formunun hızı merminin hızı ile aynı olmaktadır. Başlangıçta hızları aynı olmakla birlikte koni formunun kütlesi sıfır değerindedir. Zaman ilerledikçe, koni formunun kütlesi artmakta ve hızda bir düşüş meydana gelmektedir. Koni formu tam şeklini aldığı anda, iplikler deforme olmakta ve bir miktar enerjiyi absorbe etmektedir. En fazla deformasyona mermi hareketine direnç gösteren birincil iplikler uğramaktadırlar ki bu da başarısızlığa yol açmaktadır. Birincil ipliklerin tümü bozulduğunda, mermi hedeften çıkmaktadır. Balistik çarpma olayı sırasında koniyi oluşturan katmanlı yüzeyde delaminasyon ve matris çatlaması meydana gelmektedir [28].

Merminin çarpma esnasında kaybolan toplam kinetik enerjisi, hedef tarafından absorbe edilen toplam enerjinin zaman bağlı bir ifadesi olarak kaşımıza çıkmaktadır.

$$E_{TOTAL_i} = E_{KE_i} + E_{SP_i} + E_{D_i} + E_{TF_i} + E_{DL_i} + E_{MC_i} + E_{F_i}$$

Burada, E_{KE} koni formunun kinetik enerjisi, E_{SP} kayma ile oluşan tıkama, E_D ikincil ipliklerin deformasyonu, E_{TF} birincil ipliklerin kopma sınırı, E_{DL} delaminasyon, E_{MC} matris çatlaması ve E_F sürtünme enerjisi olarak adlandırılmaktadır [28].

Kevlar, 1972 yılında DuPont firması tarafından piyasaya çıkarılan ve aynı ağırlıktaki çelikten beş kat daha sağlam sloganıyla tanınan bir elyafıdır. Kevlar yanmaya karşı dirençli olmakla beraber, erime yada akmaya uğramamaktadır. Bu elyaf aynı zamanda, yüksek elastisite modülü, yüksek çekme gerilimi, kimyasallara karşı dayanıklılık, üst düzey ısıl özellik ve boyutsal kararlılık gibi avantajları sayesinde günümüzde birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [29].

Tablo 1.1. Kevlar 29 kumaşının fiziksel özellikleri [29]

Kevlar Kumaşının Fiziksel Özellikleri	
Yoğunluk (g/cm ³)	1.45
Young modülü (GPa)	130
Çekme modülü (g/denye)	1100
Çekme dayanımı (GPa)	3.6
Elektriksel dayanıklılık (mohm-m)	.1015
Isıl iletkenlik (W/mK)	0.04-0.08
Erime noktası (°C)	460°C' de ayrışır
Basınç dayanımı (MPa)	393

Kevlar, karbon esaslı bir polimer olup, yapısal olarak naylona benzemektedir. Naylonlar, solüsyon içerisinde yüksek konsantrasyonda olduğunda, esnek zincir yapısı fazlaca dolaşmaktadır. Bu dolaşıklığa bağlı olarak, solüsyon büküldüğünde, lif yapısını olumsuz yönde etkileyen orta uzunluklu lifler meydana gelmektedir.

Kevlar liflerinin, vücut zırhı gibi kumaş uygulamalarında kullanılabilmesi için, ilk olarak iplik haline bükülmesi ve plastik reçine ile kaplanarak, liflerin rijitliğinin artırılması gerekmektedir. Kaplanan bu lifler daha sonra sıkıca örülerek etkili bir kumaş elde edilmekte ve plastik film ile tabakalaştırılarak ilave rijitlik ve dayanım eklenmektedir. Tabakalar, çarpma dayanımının kaynağıdır, çünkü her bir katman bir kısım enerjiyi absorbe etmekte ve çarpma şiddetini malzeme boyunca yaymaktadır.

Tüm bu özellikleri sayesinde Kevlar, gemi inşası, basınçlı kaplar, spor ürünleri, ısıl dayanıklılık gerektiren iş kıyafetleri, yangın battaniyeleri, motosiklet ve uçak gibi araçlar için gerekli yüksek hız lastiği, konveyör kayışları ve hidrolik hortumları gibi birçok günlük uygulamanın yanı sıra kurşungeçirmez yelek ve kask imalatı, araç koruması ve stratejik ekipman kalkanı gibi hayati koruma gerektiren uygulamalarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [29].

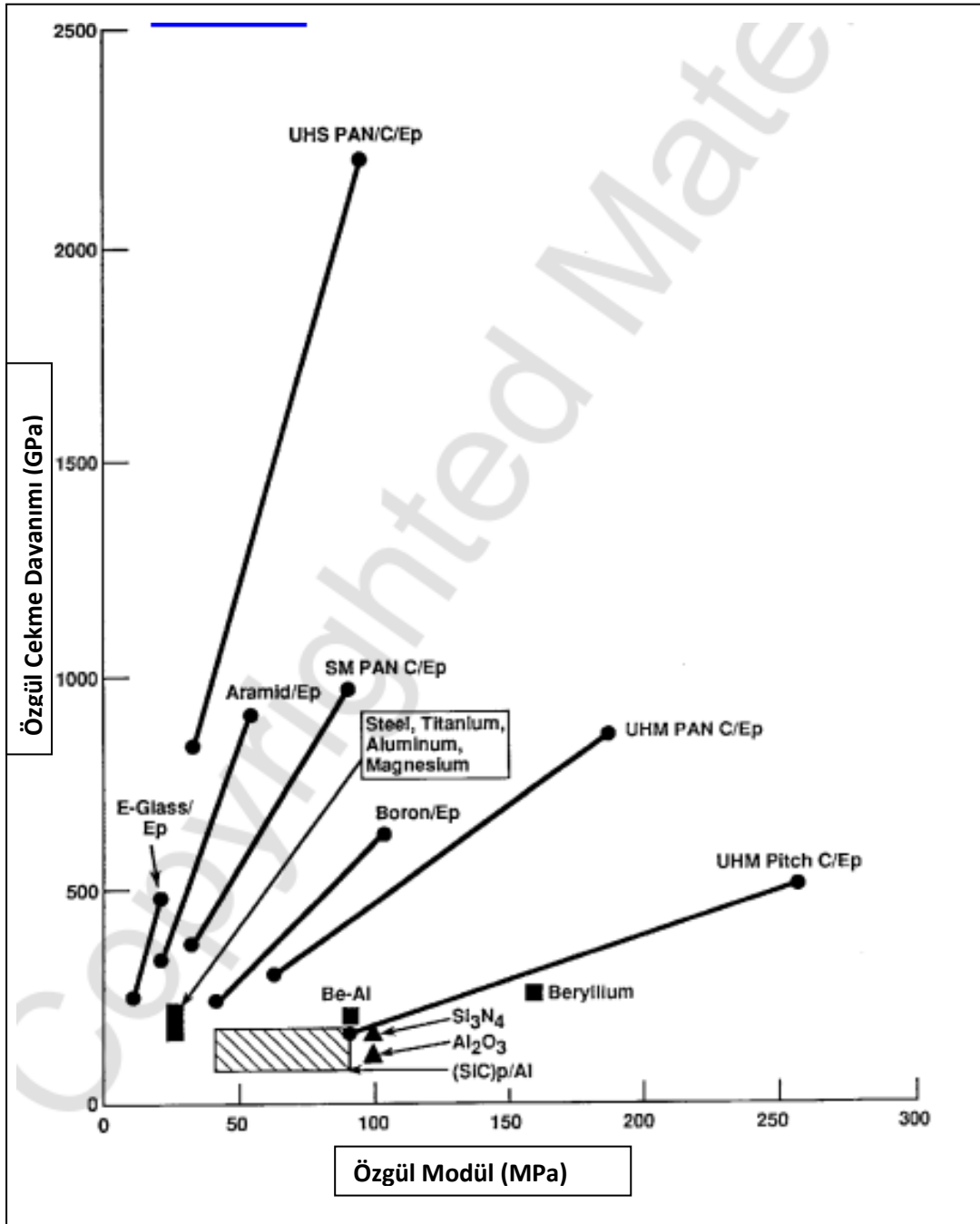
Karbon fiberler, yapay ipek, poliakrilonitril (PAN) ve izotropik ziftlerden geliştirilmektedir. Günümüzde PAN temelli karbon fiberler yaygın olarak kullanılmaktadır. PAN tipi fiberlerin üretimi temel olarak kuru ve ıslak döndürme yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Fakat en çok tercih edilen yöntem ıslak döndürme

olmaktadır. PAN liflerindeki kirlilik ve boşluk, karbon fiberin sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Tablo 1.2. Karbon fiber kumaşının fiziksel özellikleri [29]

Tip	Üretici	Ürün Adı	Çekme dayanımı (GPa)	Young modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)
PAN	Toray	T300	3.53	230	1.5
		T100	7	294	2
		M55J	3.92	540	0.7
	Hercules	IM7	5.3	276	1.8
GP-Zift	Kureha	KCF 200	0.85	42	2.1
HP-Zift	BP- Amoco	Thornel P25	1.4	140	1

PAN' in karbon fibere dönüştürülmesi formülasyonu karmaşık ve üretim hattı ile ilgili birçok detay gizli tutulmaktadır. Genel olarak, nitril gruplarının gerilmeye maruz bırakılarak bir çevrime sokulması ve akabinde havanın 600°C ısıtılarak polimere oksijen atomu eklemek suretiyle liflerin oksidasyona uğratılması gibi iki temel kademedeki karbon fiber üretilmektedir. Karbon fiberler askeri uçaklarda, medikal araçlarda, spor ürünlerinde, endüstriyel uygulamalarda ve altyapı çalışmalarında geniş çaplı olarak kullanılmaktadır [29].



Şekil 1.5. Bazı malzemelerin özgül modül değerine bağlı olarak özgül çekme dayanımı değerlerinin değişimi [31]

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar elyafları bir arada tutmak, yük elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir. Bu niceliklerinden dolayı matris malzemesinin mekanik özellikleri çok önemlidir.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri; epoksi, polyester, vinil ester ve fenolik reçinelerdir. Yüksek mukavemet istenmeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinelerdir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise yaygın olarak epoksi reçine sistemleri tercih edilmektedir [2].

Epoksi sistemler, yapıştırıcı sınıfına girmekte ve fiber takviyeli polimerin matrisini oluşturmaktadır. Termosetler, biri reçine diğeri ise sertleştirici olmak üzere iki bileşenin oda sıcaklığında veya ısıtılarak tepkimeye girmesi ve sertleşmesi ile elde edilmektedir [30].

Epoksiler, uçak gövde yapılarında ve diğer havacılık uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmakta olan bir malzemedir. Matrisini oluşturdukları kompozitlerde mükemmel yapısal özellik sağlamaktadırlar. Epoksiler gevrek malzeme eğilimindedirler, fakat temperlenmiş formülasyonları, yüksek çarpma dayanımı sağlamaktadır [31].

Tablo 1.3. Bazı kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri [31]

Malzeme	Sınıf	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Kopma Uzaması (%)	Isıl Genleşme Katsayısı (ppm/K)
Epoksi	Polimer	1.8	3.5	70	3	60
Alüminyum	Metal	2.7	69	300	10	23
Titanyum	Metal	4.4	105	110	10	9.5
Silikon karpit	Seramik	2.9	520	-	<0.1	4.9
Alümina	Seramik	3.9	380	-	<0.1	6.7
Cam (borosilikat)	Seramik	2.2	63	-	<0.1	5
Karbon	Karbon	1.8	20	-	<0.1	2

BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde vücut koruyucu hafif kompozit zırh tasarımlarının özelliklerini incelemek amacıyla malzeme kombinasyonları hazırlanmış ve üzerinde balistik atış deneyleri yapılmıştır. Bu süreç iki kademedeyi gerçekleştirmiştir. İlk kademedeyi sert malzeme kombinasyonları kullanılırken ikinci kademedeyi kevlar kumaş tabakası bulunan geliştirilmiş kompozit kombinasyonları atış testlerine tabi tutulmuştur. Tüm deney sonuçlarından ise kullanılan kompozitler ve kombinasyonları için bilgi birikimi elde edilmiştir.

2.1. Balistik Deney Standartları

Balistik koruyuculuğu ölçmek amacıyla National Institute of Justice (NIJ) ve NATO gibi kuruluşlar çeşitli standartlar geliştirmiştir. NIJ ve Alman standartlarında, kullanılan merminin kalibresi, tipi ve hızı dikkate alınarak koruma seviyeleri tanımlanmıştır. Bu konu ile ilgili, Türk Standartları Enstitüsü tarafından da bir standart hazırlanmış, ayrıca çeşitli askeri standartlar da oluşturulmuştur. Bu standartların oluşturulmasının temelinde, yapılacak zırh çalışmaları için ortak bir başarı kriteri meydana getirme amacı bulunmaktadır. Deney şartları, kullanılacak ekipmanlar, sonuçların değerlendirilmesi gibi belirli parametreler bu standartların içeriğini oluşturmaktadır. Tablo 2.1’de ulusal ve uluslararası balistik standartlardan bazıları sunulmuştur [2].

Tablo 2.1. Bazı ulusal ve uluslar arası balistik koruyucu standartlar [2]

STANDART NO	STANDART ADI
MIL-STD-662 F	V50 Ballistic Test ForArmor (Zırhlar İçin V50 Balistik Testi)
NIJ-STD-0101.06	BallisticResistance of Personal Body Armor (Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Dayanımları)
STANAG 2920	Ballistic Test MethodForPersonalArmor (Kişisel Zırhlar İçin Balistik Test Metotları)
TS 11164	Balistik Koruyucu Yelek
PPAA STD-1989-05	PersonalProtectiveArmorAssociation, TestingStandartsForBallisticResistance of Personel Body Armors (Kişisel Koruyucu Zırh Birliği, Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Dayanım Test Standartları)
MIL-P-46199	Plate: AluminiumOxideCeramic (ForUseInArmorComposite) (Alüminyum Oksit Seramik Plakalarının Zırhlarda Kullanımı)
DIN EN ISO 14876-2	ProtectiveClothing - Body Armor - Part 2: BulletResistance; Requirementsand Test Methods (Koruyucu Giysi - Vücut Zırhı - Bölüm 2: Mermi Dayanımı Gereksinimleri ve Test Metotları)

2.1.1. NIJ 0101.06 standardı

Bu standardın amacı, silah ateşlemelerine karşı koruma amacıyla tasarlanmış olan kişisel vücut zırh malzemelerinin balistik dayanımına yönelik minimum performans gerekliliklerini ve test yöntemlerini belirlemektir. Bu standardın kapsamı sadece balistik direnç (balistik dayanım) ile sınırlı kalmaktadır. Bıçak ve keskin aletlerin neden olduğu tehditleri, kapsamları farklı olmalarından ötürü bu test yöntemlerinin arasında içermemektedir.

Koruma seviyesi yani balistik performans; balistik uygulamalarda kullanılan mermi mühimmatının kalibresi, tipi, ağırlığı ve hızı dikkate alınarak belirlenen bir kıstas olmaktadır. Bu standart kapsamında bulunan kişisel koruyucu vücut zırhları, koruma seviyesine göre beş grupta sınıflandırılmıştır (IIA, II, IIIA, III, IV). Tablo 2. 2' de bu sınıflandırmalar için gerekli olan mermi tipleri ve test koşulları belirtilmiştir. Bu sınıflandırmaya ek olarak özel bir test sınıfı daha tanımlanarak, zırh malzemesinin diğer beş standart sınıfı tarafından kapsanmamış olan tehditlere karşı da geçerli olması amaçlanmıştır. Yani özel bir gereklilik isteyen bir alıcı, test devri ile hızları

açık ve tam olarak belirlemeli ve bu standardın diğerlerinden farklı bir konumda tutulması gerektiğini belirtmelidir [32].

Ayrıca, Temmuz 2008 tarihinde “NIJ Standart-0101,06” oluşturulmuştur. Bu standart, Eylül 2000 tarihli “NIJ Standard-0101.04”ün bir revizyonudur. Ayrıca 2005 tarihli “NIJ 2005 Interim Requirements”, “NIJ Standard-0101,04” ve diğer tüm revizyonları ile buna ilave olan diğer tüm standartların yerine geçmektedir [32].

Tablo 2.2. NIJ STD-0101.06’ a göre balistik test kriterleri [32]

Zırh Tipi	Test Atışı	Test Kurşunu	Kurşun Ağırlığı	Standart Zırh Test Hızı	Levha başına 0° açı ile vuruş	Azami BFS Derinliği	Levha başına atış	Levha Sayısı
IIA	1	9mm FMJ RN	8.0 g (124gr)	355 m/s	4	44 mm	6	6
	2	.40 S&W FMJ	11.7 g (180gr)	325m/s	4	44mm	6	6
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124gr)	379m/s	4	44mm	6	6
	2	.357 Magnum JSP	10.2 g (158gr)	408m/s	4	44mm	6	6
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8.1 g (125gr)	430m/s	4	44mm	6	6
	2	.44 Magnum SJHP	15.6 g (240gr)	408m/s	4	44mm	6	6
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g (147gr)	847m/s	6	44mm	6	4
IV	1	.30 Caliber M2AP	10.8 g (166gr)	878m/s	1-6	44mm	1-6	4-24
Özel	-	Zırh performansı ve atış gereksinimleri zırh tipine bağlı olmalıdır.						

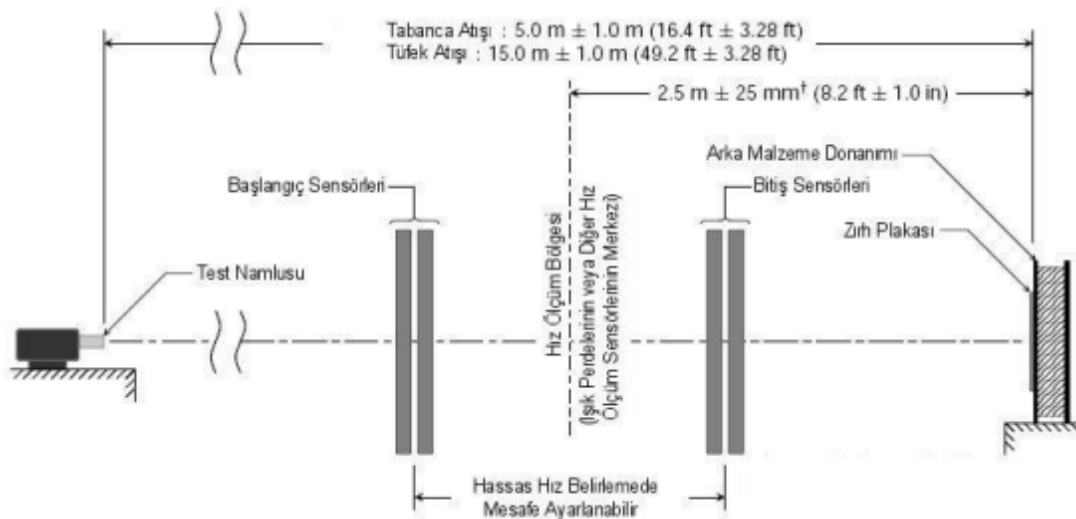
2.1.2. Balistik testlerde deney süreci

Zırh malzemesi, aşağıdaki koşulları sağlayan ortam koşullarında, test malzemeleri ile birlikte denenmelidir. Her bir zırh plakasına atış öncesinde ve sonrasında çevre koşulları kayıt altına alınmalı ve çevre şartları özel koşullar olmadıkça aşağıda belirtilen durumda olmalıdır;

- Sıcaklık: $21^{\circ}\text{C} \pm 2,9^{\circ}\text{C}$
- Bağıl Nem: $\%50 \pm \%20$

Test malzemeleri Şekil 2,1'de görüldüğü gibi düzenlenmelidir. Özel durumlar dışında tabanca atışları için zırh plakası test namlusuna $5,0 \pm 1,0$ m mesafeye, tüfek atışları için ise $15 \pm 1,0$ m mesafeye yerleştirilmelidir. Zırh plakasına çarpma ile aşırı sapmayı olasılığını minimize etmek için veya atış koşulları sonucu mesafe ayarlanabilir [32].

Destek malzeme bağlantısı, uygun test tezgâhı tarafından sıkı bir şekilde tutulmalıdır. Test tezgâhı, zırh plakasını ve destek malzemeyi dikey ve yatay yönde değiştirebilecek şekilde bağlanmasını mümkün kılmalı ve destek malzeme test tezgâhına monte edilmelidir. Test öncesi bütün elektronik malzemeler yeterli sürede çalıştırılarak stabilizasyon sağlanmalıdır.



Şekil 2.1. Test aralığı konfigürasyonu [32]

Test atış hızları en az iki ayrı şekilde yerleşim kullanılarak belirlenecektir. Doğru hız ölçümleri birbirinden bağımsız her bir ölçümün 3m/s hız içinde yapıldığı ölçümlerdir. Hız bütün doğru hız ölçümlerinin aritmetik ortalaması alınarak kaydedilmelidir. Hız ölçümleri 1.0m/s den daha az değişkenlikte olmalıdır. Hız, destek malzemenin ön yüzünden $2.5 \pm 0.025m$ mesafeden ölçülmelidir. Kronograf(Hız ölçeği), tetikleme ekranlarıyla birleştirilerek kullanıldığında, ekranlar destek malzemenin ön yüzünden $2.5 \pm 0.025m$ mesafede merkezlenmelidir.

2.2. Deneysel Çalışma

İlk kademe deneysel çalışmada, öncelikle Kevlar 49 kumaşı, karbon fiber takviyeli alüminyum bal peteği yapısı ve kontrplak malzemelerinin farklı kombinasyonlarından hazırlanan altı numune üzerinde balistik testler gerçekleştirilmiştir. Başarı sağlayan numunelerdeki diziliş formatı ve literatürde edinilen bilgiler doğrultusunda ikinci etap çalışmalar için ise, Kevlar 49 kumaşı, karbon fiber kumaşı, polipropilen bal peteği yapısı ve çelik elek teli malzemeleri tercih edilmiştir. Karbon fiber kumaşı ve çelik elek teli malzemeleri, epoksi reçine ve sertleştirici karışımı ile sert tabaka haline getirilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Polipropilen bal peteği yapısı ise boşluklu geometrisinden istifade edilerek epoksi sistemi ile doldurulmuş ve sert katman olarak numunelerde kullanılmıştır.

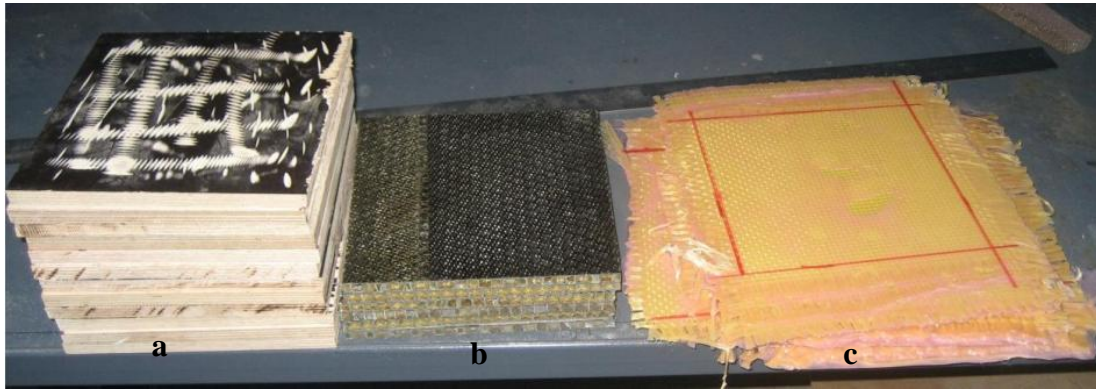
2.2.1. İlk kademe deney numuneleri

DEMİR A. ve ÖZTÜRK M. E. İle yapılan deneysel çalışmada Kevlar 49 kumaşı, karbon fiber lamine edilmiş alüminyum bal peteği yapısı ve kontrplak (plywood) malzemesi farklı şekillerde sıralanarak atışlar gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada uygulanan numune dizilişleri Tablo 2.3' de gösterilmektedir.

Tablo 2.3. İlk kademe deneysel çalışmada kullanılan numune dizilişleri

Numune	Katman Sıralaması
1	Kontrplak, Kevlar, bal peteği
2	Bal peteği, Kevlar, kontrplak
3	Kevlar, bal peteği, kontrplak
4	Kevlar, kontrplak, bal peteği
5	Kontrplak, bal peteği, Kevlar
6	Bal peteği, kontrplak, Kevlar

Deney numunelerinin boyutu 200mm x 200mm' dir. Bal peteği yapısı ve tahtalar bu boyutta kesilmiştir (Şekil 2.2). Kevlar, epoksi uygulaması yapılmadan önce 250mm x250mm boyutunda hazırlanmıştır. Epoksi uygulandıktan sonra kenarlarından spiral yardımı ile kesilerek boyutu 200mm x 200mm ölçülerine getirilmiştir. Numunelerin kalınlığı yaklaşık 40 mm boyutundadır.



Şekil 2.2. İlk kademe numuneleri (a) Kontrplak (b) Al5052 bal peteği (c) Kevlar [11]

Bal peteği yapısının yüzeyine laminasyon işlemi için öncelikle adheziv film yapıştırıcı uygulanmıştır. Film yapıştırıcının üzerine prepreg karbon fiber yapıştırılmıştır. Ardından 180°C sıcaklıkta ve 4 bar basınçta fırına verilerek 30 dakika boyunca prepreg ürünün kurluşmesi sağlanmıştır.

Piyasada kontrplak olarak bilinen plywood, her biri 10mm kalınlığında olan iki katman olarak kullanılmıştır. Bir katman kendi içinde 9 tabakadan oluşmaktadır. Kontrplağın malzemesi huş olarak tercih edilmiştir.

Kevlar'a uygulanacak olan epoksi, ağırlık olarak %60 Kevlar, %40 matris malzemesi olarak hazırlanmıştır. Matris malzemesi ise 100 birim reçine, 42 birim sertleştirici oranında karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan epoksi, tahtanın üzerine bir rulo fırça yardımı ile sürülmüştür. Epoksinin üzerine Kevlar kumaşının ilk katı konulmuştur (Şekil 2.3). Kevların üzerine rulo fırça yardımıyla epoksi sürülmüştür. Bu işlem 2. ve 3. kat Kevlar için tekrarlanmıştır. Diğer 5 numune için de epoksi uygulaması aynı şekilde yapılarak yaklaşık 10°C sıcaklıkta 12 saat kürleşmeye bırakılmıştır.



Şekil 2.3. Epoksi uygulanmış Kevlar numuneleri [11]

Matrislerin hazırlanmasının ardından, önceden belirlenen sıralamalara göre numuneler hazırlanmış ve yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı, balistik testlere etki göstermesinin engellemek amacıyla sadece kenarlarda kullanılmıştır. Daha sonra sıkıştırılan numuneler Şekil 2.4.'deki gibi kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 2.4. Hazırlanan numunelerin sıkıştırılması [11]

2.2.2.İkinci kademe deney numuneleri

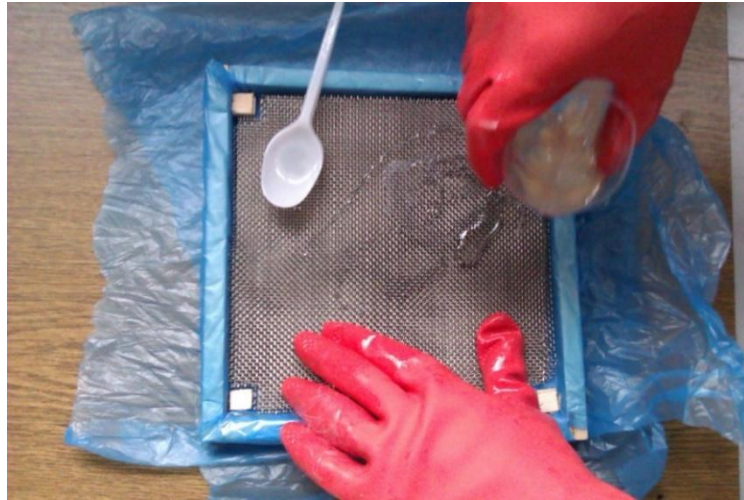
İlk çalışmadan elde edilen verilerin yanı sıra, ikinci kademe deneyler için farklı malzeme türleri araştırılmış ve farklı dizilimler ortaya konulmuştur. Bu deneylerde ise özellikle kumaş olarak tercih edilen 10 katlı Kevların davranışının etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışmanın bu kademesinde karbon fiber kumaşı kendi başına bir katman olarak düşünülmüştür. 200mm x 200mm ebatlarında kesilen karbon fiber kumaşlar epoksi reçine ve sertleştirici karışımı uygulanarak on kat dizilmiş ve kürleşmeye bırakılarak sert bir katman elde edilmiştir. Bu işlem uygulanarak on adet karbon fiber katmanı hazırlanmıştır. Epoksi reçine-sertleştirici oranı ağırlıkça 10/4 olarak uygulanmıştır.



Şekil 2.5. Karbon fiber katmanlarının hazırlanması

Mermiyi karşılayacak sert yüzey olarak çelik elek teli malzemesi düşünülmüştür. Ağ örgü aralığı 12 numara olan çelik elek teli tercih edilmiştir. Bu malzeme de yine 200mm x 200mm ebatlarında kesilmiş ve daha sonra 5 kat üst üste koyularak bir havuz içerisinde, sızdırmazlık önlemleri alınarak epoksi karışımı içine daldırılmış ve tabakalaşmaya bırakılmıştır (Şekil 2.6.).



Şekil 2.6. Çelik elek teli – epoksi numunesinin hazırlanması

İlave ara katman olarak öngörülen polipropilen bal peteği malzemesinin boşluklu yapısı numune için yeni fikirler ortaya çıkarmıştır. İki yüzeyde bulunan polyester tül yapısından bir taraftaki sökülerek Şekil 2.7.' da görüldüğü üzere boşluklu bal peteği yapısı epoksi karışım ile doldurulmuştur. Böylece yumuşak bir malzeme olan polipropilen bal peteği yapısı, daha sert ve merminin hızını kesebilecek şekilde yapının sürtünme ve direncini artırarak daha aktif bir katman haline getirilmiştir.



Şekil 2.7. Polipropilen bal peteğinin epoksi karışım ile doldurulması

Literatür araştırmalarında da bahsedildiği üzere, koruyucu vücut zırhı numunesinin başarılı bir performans gösterebilmesi için mermi ile karşılaşacak ilk yüzeyin, mermi enerjisini ve çarpma şiddetini maksimum düzeyde absorbe edecek şekilde sert olması gerekmektedir. Bu tabakanın arkasında ise merminin hareketini yavaşlatacak yoğun bir katmana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda sert katman olarak reçine uygulanmış karbon fiber kumaş, reçine ile kalıplaştırılmış çelik tel tabakası ve epoksi sistem ile doldurulmuş polipropilen bal peteği yapıları meydana getirilmiştir.

Mermiyi tutacak yüzey olarak kullanılacak olan Kevlar 49 kumaşı, 10 kat halinde, herhangi bir epoksi uygulaması olmadan, serbest davranabilecek şekilde dikilmiştir (Şekil 2.8.). Bu yöntemle deneylerde kullanılmak üzere Kevlar tabakaları hazırlanmıştır.



Şekil 2.8. On kat Kevlar kumaşı ile hazırlanan tabaka

Tüm katmanlar hazırlandıktan sonra, birinci kademe deneylerinde edinilen bilgiler ışığında ve yeni materyallerden oluşan kompozit katmanların kombinasyonları ile ikinci kademe numuneler hazırlanmıştır (Tablo 2.4).

Tablo 2.4. İkinci kademe deneylerinde kullanılan numune dizilişleri

Numune	Katman Sıralaması
1	Polipropilen bal peteği - Kevlar
2	Çelik tel – Kevlar
3	Karbon fiber – Kevlar
4	Kevlar – Karbon fiber
5	Karbon fiber – Kevlar – Çelik tel
6	Çelik tel – Kevlar – Karbon fiber
7	Karbon fiber – Polipropilen bal peteği – Çelik tel
8	Karbon fiber – Polipropilen bal peteği (x2) – Çelik tel
9	Kevlar – Polipropilen bal peteği- Çelik tel
10	Karbon fiber – Kevlar – Polipropilen bal peteği –Çelik tel
11	Çelik tel – Karbon fiber – Çelik tel
12	Çelik tel – Kevlar –Çelik tel

2.2.3. Deney düzeneği

Deney sırasında atışlar Safir T14 Classic uzun namlulu av tufeği ile yapılmıştır (şekil 2.9.). Tufeğin özellikleri Tablo 2.5' de verilmiştir.

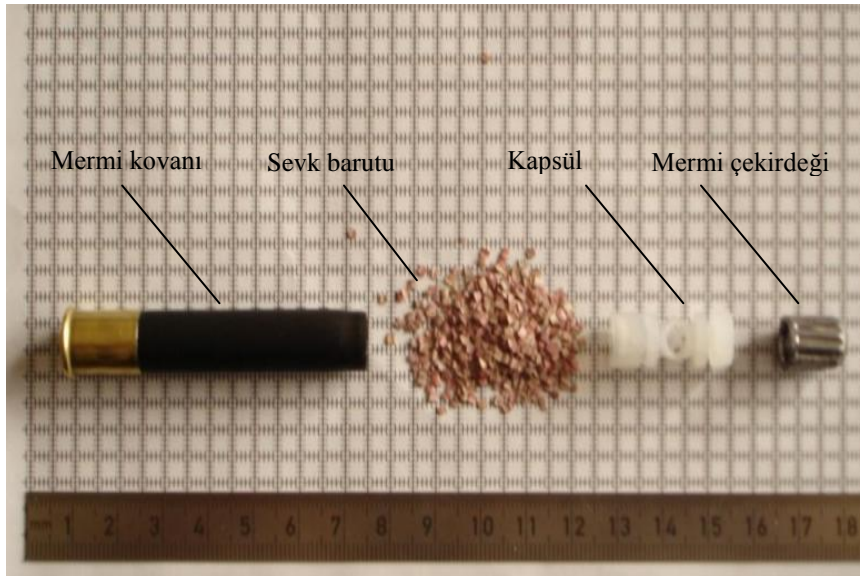


şekil 2.9. Safir T14 Classic av tufeği [33]

Tablo 2.5. Safir T14 Classic av tufeğinin özellikleri [33]

Ağırlık	2850 gr
Namlu uzunluğu	51 cm
Toplam uzunluk	96 cm
Namlu çıkış hızı	700 m/s
Namlu apı	410 Cal

Test sırasında Yavaşçalar markalı 36 kalibre tek çekirdekli fişek kullanılmıştır (şekil 2.10.).



şekil 2.10. Yavaşçalar 36 kalibre fişek [11]

Zırh numuneleri, daha önceden hazırlanmış olan (Şekil 2.11) çelik kare levhanın içine yerleştirilerek cıvata yardımıyla sıkıştırılmıştır. Deney düzeneği atış sırasında rijit bir davranış sergilemektedir.



Şekil 2.11. Deney düzeneği [11]

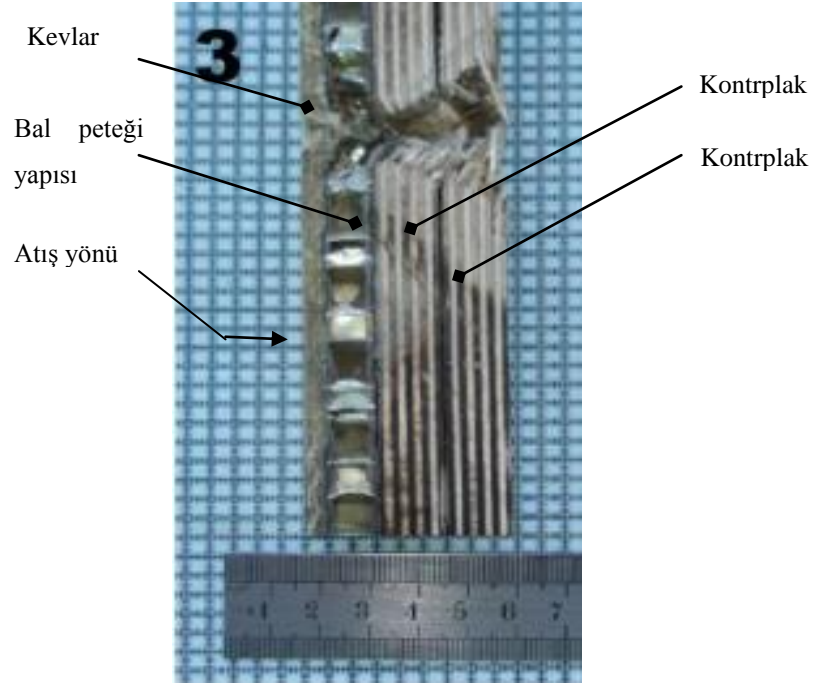
2.3. Deneyleler

Atışların, daha gerçekçi olması için, sabit bir düzenek yerine bir insan tarafından yapılması uygun görülmüştür. Balistik standartlar gereği uzun namlulu tüfekler için atışların 15m yapılması gerekse de güvenlik açısından bütün deney süresince atışlar 10m mesafeden yapılmış ve atışlar tek bir kişi tarafından gerçekleştirilmiştir.

2.3.1 İlk kademe numuneleri

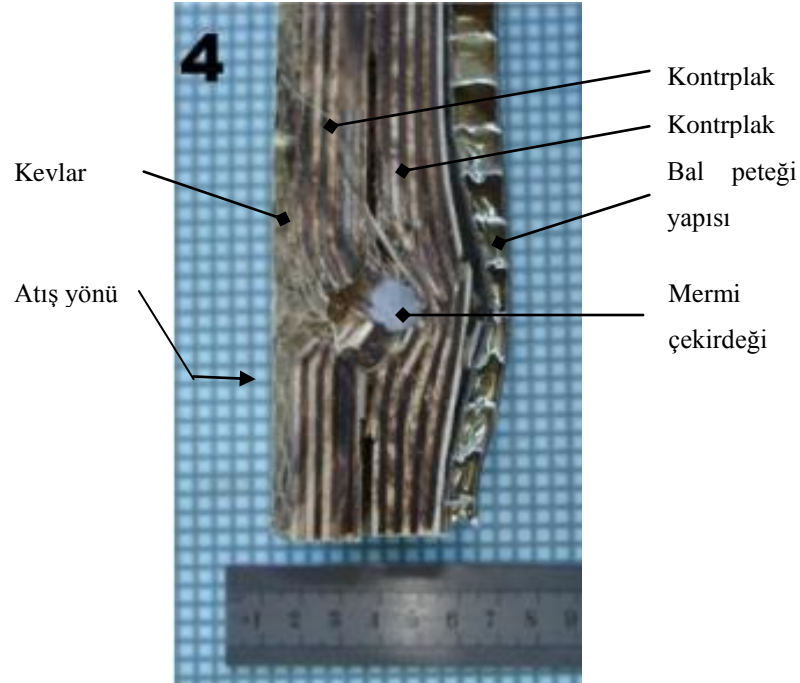
İlk atış, ön yüzeyde kontrplak, ara katman olarak Kevlar ve arka yüzey olarak da bal peteği yapısının sıralandığı numuneye yapılmıştır (Şekil 2.12). Merminin numuneyi delerek arka taraftan çıktığı gözlemlenmiştir.

Üçüncü numunede Kevlar ve bal peteği katmanlarının yerleri değiştirilmiş, kontrplak arka katman olarak kullanılmaya devam edilmiştir. Atış sonrasında, ilk iki numunede olduğu gibi bu numunede de delinme gözlemlenmiş ve numune başarısız olmuştur(Şekil 2. 14.).



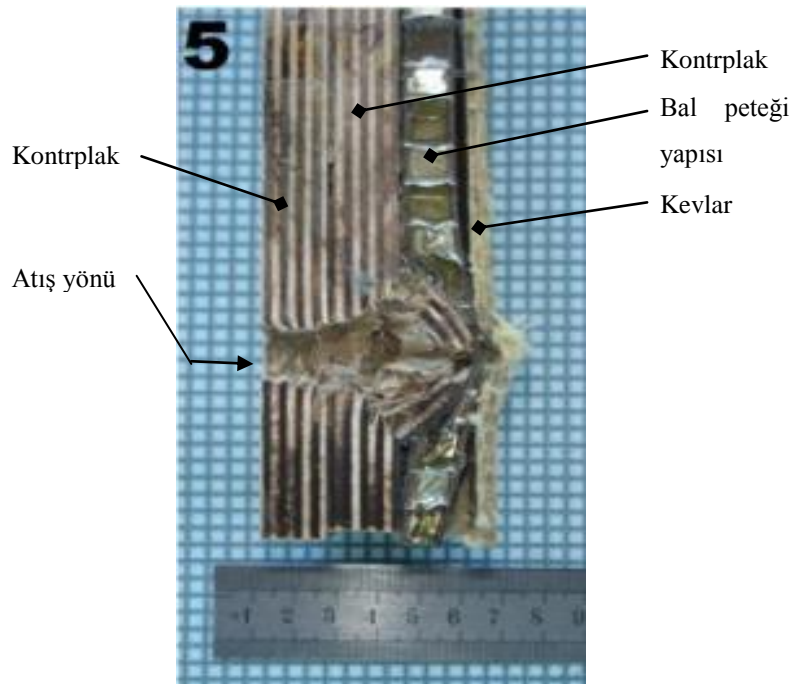
Şekil 2.14. Üçüncü numunenin atış sonrası kesit görüntüsü

Dördüncü numunede kontrplak tabakası ortaya alınmış ve Al5052 bal peteği yapısı arka katman olarak kullanılmıştır (Şekil 2.15). Atış sonrasında mermi çekirdeğinin numune içinde kaldığı ve arka yüzeyde ufak bir çıkıntı neden olduğu gözlemlenmiştir. İlk üç numuneden farklı olarak bu numune başarılı olmuştur.



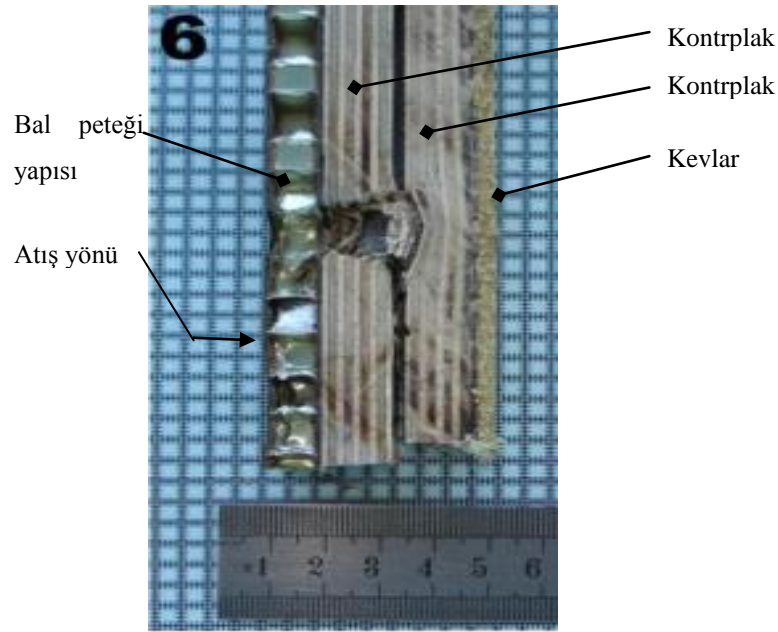
Şekil 2.15. Dördüncü numunenin atış sonrası kesit görünüşü

Beşinci numunede kontrplak tabakası ön yüzeye getirilmiş ve reçine takviyeli Kevlar tabakası arka yüzey olarak kullanılmıştır. Bu numune aynı zamanda üç numaralı numunenin diziliş olarak tersi konumundadır. Atış sonrasında numunenin mermiyi tutamadığı ve başarısız olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Beşinci numunenin atış sonrası kesit görünüşü

Altıncı numunede diziliş olarak dördüncü numunenin tersi bir sıralama kullanılmıştır. Atış sonrasında merminin yine numunenin içinde kaldığı ve dördüncü numuneden farklı olarak numunenin arka yüzeyinde çikıntı oluşmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.17.). Çarpmanın etkisiyle kontrplak tabakaları ayrılmış ve delaminasyon meydana gelmiştir. Bu numune başarılı olmuştur.

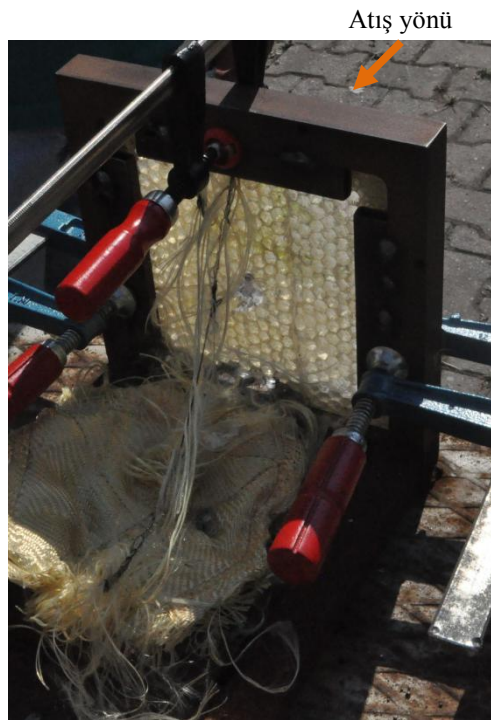


Şekil 2.17. Altıncı numunenin atış sonrası kesit görünüşü

İlk kademe numunelerine yapılan atışlar sonrasında dördüncü ve altıncı numunenin başarılı olduğu, diğer dört numunenin ise balistik koruma başarısı gösteremediği gözlemlenmiştir. Bu kademe yapılan atışlar neticesinde; ön yüzeyde sert malzemenin kullanıldığı, arka yüzeyde ise yine mermi tutucu yüzey olarak sert olan tabakaların tercih edildiği numunelerde başarı sağlanmıştır. Diğer katmanlara nazaran yumuşak malzeme olan kontrplağın ön veya arka yüzey olarak kullanıldığı durumlarda ise zırh numunesi mermiyi tutacak performansı gösterememiştir. Bu bilgiler yeni kombinasyonların tasarımında birebir etkili olmasa da deneysel altyapı açısından büyük yarar sağlamıştır.

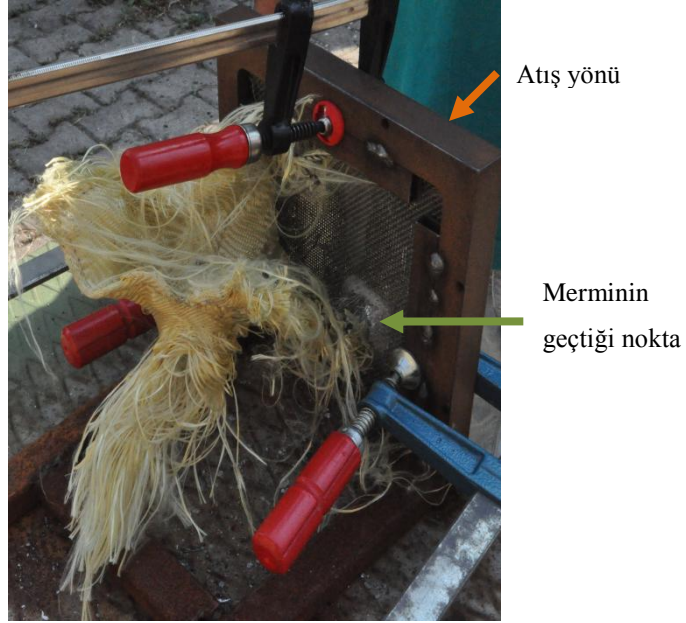
2.3.2. İkinci kademe numuneleri

Bu kademedede diziliş açısından ilk kademe çalışmaları temel alınsa da esas olarak kompozit malzemelerin kendi içlerindeki diziliş farklılıklarındaki davranışları üzerinde durulmuştur. Kevların kumaş olarak kullanıldığı bu kademedede, kevların numunelerdeki yer değişiminin zırh katmanına ve diğer materyallere etkisi esas alınmıştır. İlk olarak ön yüzeyde polipropilen (PP) bal peteği arka yüzeyde ise Kevlar tabakasının olduğu iki tabakalı numune denenmiştir. Mermi zırh numunesini delerek arka yüzeyden çıkmış ve Kevlar tabakası büyük hasara uğramıştır (Şekil 2.18.).



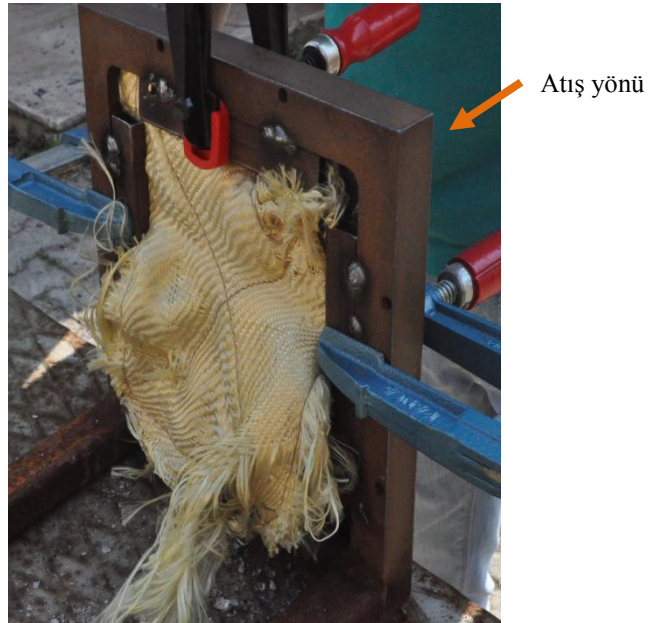
Şekil 2.18. PP-Kevlar numunesinin atış sonrası görünüşü

İkinci numune olarak ön yüzeyde epoksi ile tabakalaştırılmış çelik elek teli, arka yüzeyde Kevlar kumaşı kullanılmıştır. Atış sonrası, birinci numuneye benzer şekilde davranmış ve mermiyi tutma başarısı gösterememiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Çelik tel-Kevlar numunesinin atış sonrası görünüşü

Üçüncü numunede karbon fiber ve Kevlar kombinasyonu denenmiştir. Karbon fiberin önde olduğu bu numunede mermi zırhı yine delmiştir (Şekil 2.20.).



Şekil 2.20. Karbon fiber- Kevlar numunesinin atış sonrası görünüşü

Dördüncü numunede, Kevlar tabakası öne getirilmiş, karbon fiber tabakası ise arka yüzeyde kullanılmıştır. Atış neticesinde, mermi her iki katmanı da delerek arka yüzeyden çıkmıştır (Şekil 2.21). İlk üç numunede olduğu gibi bu numune de başarısız olmuştur.



Şekil 2.21. Kevlar- karbon fiber numunesinin atış sonrası görünüşü

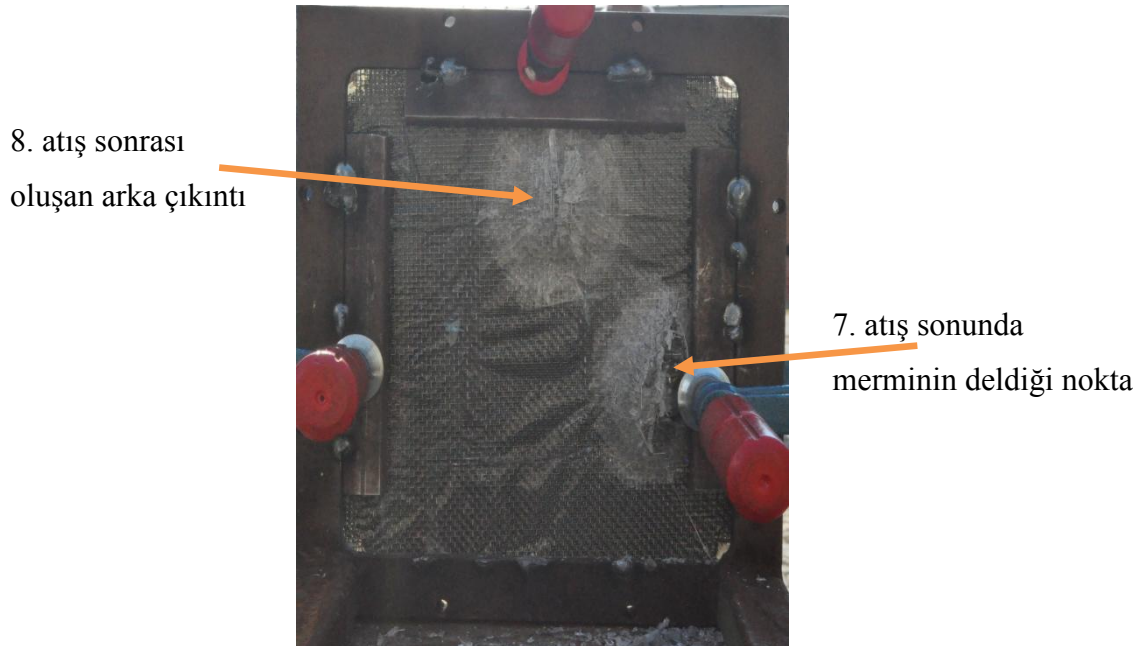
Beşinci numuneden itibaren üç adet katman kullanılmaya başlanmıştır. Bu zırhta önde karbon fiber, ara katmanda Kevlar ve arka katman olarak çelik tel tabakası kullanılmıştır. Atış sonrasında mermi, zırh numunesini delmiş fakat ara katmandaki Kevlar kumaşı esneyerek mermiyi tutmuştur. Fakat Şekil 2. 22' de görüldüğü üzere arka yüzeyde merminin etkisi ile oluşan derinlik, kişisel koruyucu zırh kombinasyonu için istenenden fazladır.

Altıncı numunede ise diziliş çelik teli önde, Kevlar ortada, karbon fiber tabakası arkada olacak şekilde değiştirilmiştir. Atış sonrasında zırh katmanı, beşinci numune ile aynı davranışı sergilemiştir. Mermi çelik tel tabakasını delmiş, oluşan çarpmanın şiddeti ile arka yüzeyde bulunan karbon fiber tabakası da delinmeye maruz kalmıştır fakat ara katman olan Kevlar tabakası mermiyi tutma başarısı göstermiştir. Yine bu numunede de müsaade edilen arka yüz derinlik limiti aşılmıştır.



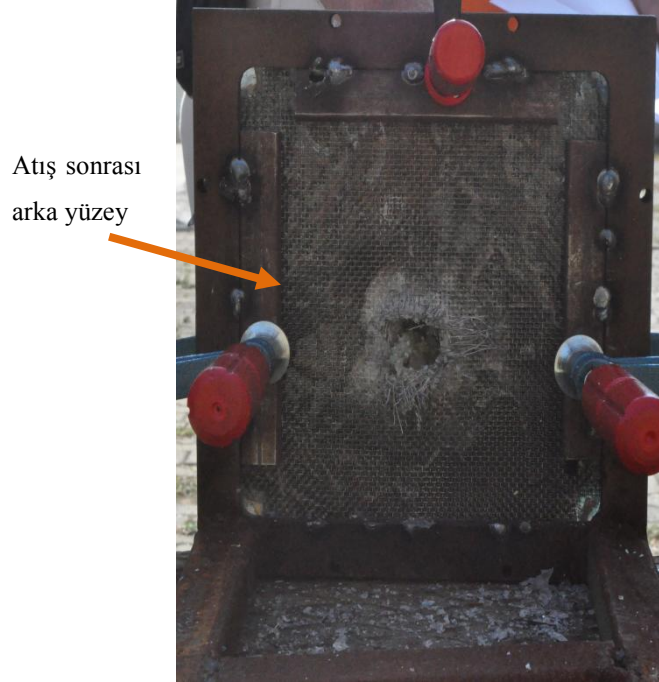
Şekil 2.22. Karbon fiber- Kevlar-çelik tel numunesinin atış sonrası görünüşü

Yedinci numunede karbon fiber ve çelik tel tabakaları arasında PP konularak atış gerçekleştirilmiştir. Mermi zırhı delerek arka yüzeyden çıkmıştır. Bir sonraki atışta ise araya ilave bir PP tabakası daha konularak test gerçekleştirilmiştir. Bu numunede mermi zırhın içinde kalmış ve numune başarılı olmuştur (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 Yedinci ve sekizinci atışlar sonunda numunenin görünüşü

Dokuzuncu numunede önde Kevlar, ortada PP ve arkada çelik tel tabakası kullanılmıştır. Şekil 2.24' de görüldüğü gibi atış sonrasında numune mermiyi tutamamış ve başarısız olmuştur. Kevlar malzemesinin ön yüzeyde kullanıldığı numunelerde başarı sağlanamamıştır.



Şekil 2.24 Dokuzuncu numunenin atış sonrası görünüşü

Onuncu atış için karbon fiber, Kevlar, PP ve çelik tel sıralaması kullanılmıştır. Mermi numuneyi delip arka yüzeyden çıkmış ve numune başarısız olmuştur. On birinci atışta iki çelik tel tabakası arasına karbon fiber konularak atışlar yapılmıştır. Kevlar tabakasının olmadığı bu numunede mermi zırh plakasını delmiş ve numune başarısız olmuştur.

On ikinci ve son numune olan çelik tel, Kevlar, çelik tel kombinasyonuna yapılan atışa sonucunda mermi, çelik tel tabakasına çarptığında hızının bir bölümünü kaybetmiş, Kevlar tabakası ise mermiyi tutma başarısı göstermiştir. Fakat oluşan darbe şoku nedeniyle mermi zırh plakasının arka yüzeyinden Kevlar tabakası ile birlikte çıkmış ve arka yüzde darbe sonucu oluşan çıkıntı balistik standartların üzerinde olduğu için numune başarısız olmuştur (Şekil 2.25).



Şekil 2.25. On ikinci numunenin atış sonrası görünüşü

BÖLÜM 3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEME ve ANALİZ

Günümüzde deneysel çalışma alanında araştırmacılar birçok zorlukla karşılaşmaktadır. Bunların en başında tekrarlanan deneylerden dolayı oluşan malzeme ihtiyacı ve güvenlik gerekçeleri gelmektedir. Yine deneysel çalışma ile sensör veya dış etkenler sebebiyle her zaman sayısal veriler doğru elde edilememekte, bu da istenilen sonuca ulaşmak için daha çok deneysel çalışmanın yapılmasını gerekli kılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte modelleme ve analiz yazılımlarının kullanılabilirliğinin yaygınlaşması deneysel çalışma sahasına farklı bir boyut getirmiştir. Çalışmalarda kullanılan parçaların modellenmesi, deneyin uygulandığı durumdaki sınır şartları ve ortam koşullarının uygulanması ve belirli kabuller yardımıyla sayısal analizlerinin gerçekleştirilmesi, araştırmacılara zaman, maddi boyut ve doğru sonuca ulaşma açısından büyük kolaylık sağlamaktadır.

Sayısal analiz yönteminin bir diğer boyutu ise, elde edilen sonuca göre modeller üzerinde iyileştirmeler yaparak ya da kabul edilen ortam koşulları ve sınır şartları değiştirilerek birçok farklı durum için ortaya çıkabilecek sonuçlar Deneysel çalışma ile bilgisayar ortamındaki analiz sonuçları karşılaştırılarak doğru bir sonuca ulaştıktan sonra bilgisayar ortamında çeşitli düzeltmelerle daha kısa bir zamanda daha gerçekçi sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır.

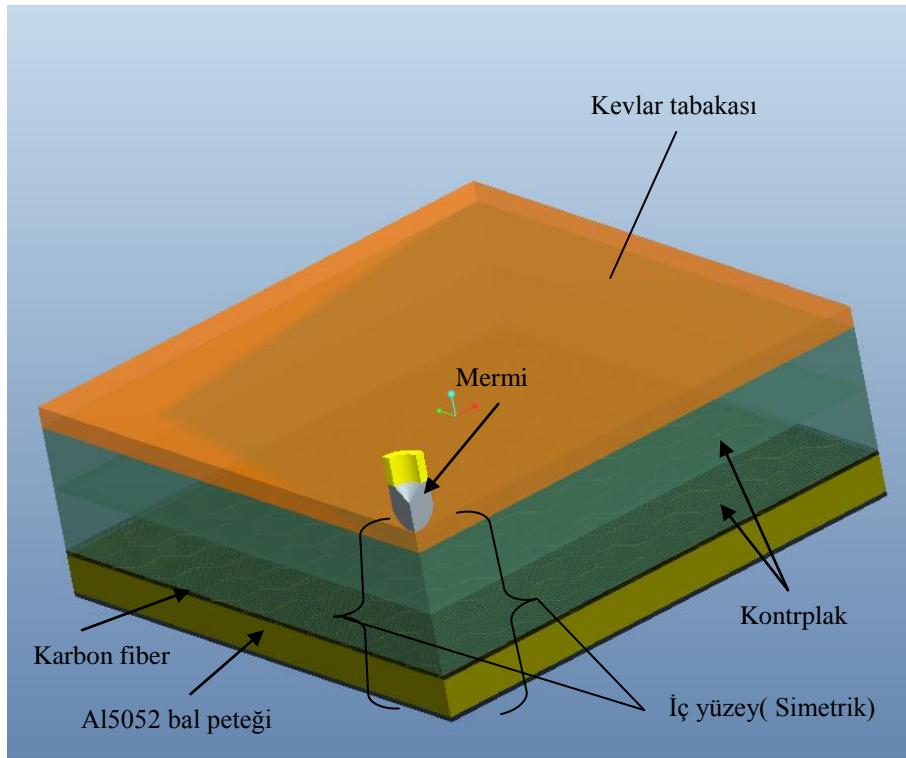
Araştırmacılar tarafından kullanılmakta olan birçok analiz programı vardır. Her bir yazılımın etkili olduğu alanlar farklıdır. Hangi durumlarda nasıl bir analiz yazılımının kullanılması gerektiği, tek amaçlı yazılımlar hariç, kullanıcıya bağlıdır. Bu çalışmada çok amaçlı mühendislik yazılımı olan ANSYS/LSDYNA Explicit Çözümleyici kullanılmıştır. Analiz açısından birçok avantajı olan ANSYS, karmaşık yapıların modellenmesi konusunda ise kullanıcılara sorun teşkil etmektedir; zira bilgisayar ortamında analiz yapılabilmesi için ilk olarak deneyde kullanılan yapının bilgisayar ortamında modellenmesi gerekmektedir. Burada ise ciddi bir mühendislik

ve sayısal analiz tecrübesine ihtiyaç vardır. Çalışmada analiz öncesi modelleme kısmında ise Pro/ENGINEER kullanılmıştır. Sayısal analiz çalışmalarının en büyük artısı, paket programlar arasında veri alışverişi yapılarak kolaylık sağlanmasıdır. Böylece farklı programların avantajlı yönleri kullanılarak sonucun daha kolay elde edilmesi sağlanmaktadır.

DeneySEL çalışmada incelenen ilk kademe numunelerinden örnek olarak ele alınan başarısız sonuç veren bir numaralı ve mermiyi tutma başarısı gösteren dört numaralı numuneler bilgisayar ortamında modellenerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1. Modelin Oluşturulması ve Sınır Şartları

Katı modelin oluşturulması öncelikli aşama olduğu için ilk olarak Pro/ENGINEER programında bir ve dört numaralı numuneler ve merminin katı modelleri oluşturulmuştur. Şekil3.1’ de dört numaralı numunenin ve mermi yapısının çeyrek simetrik modeli görülmektedir.



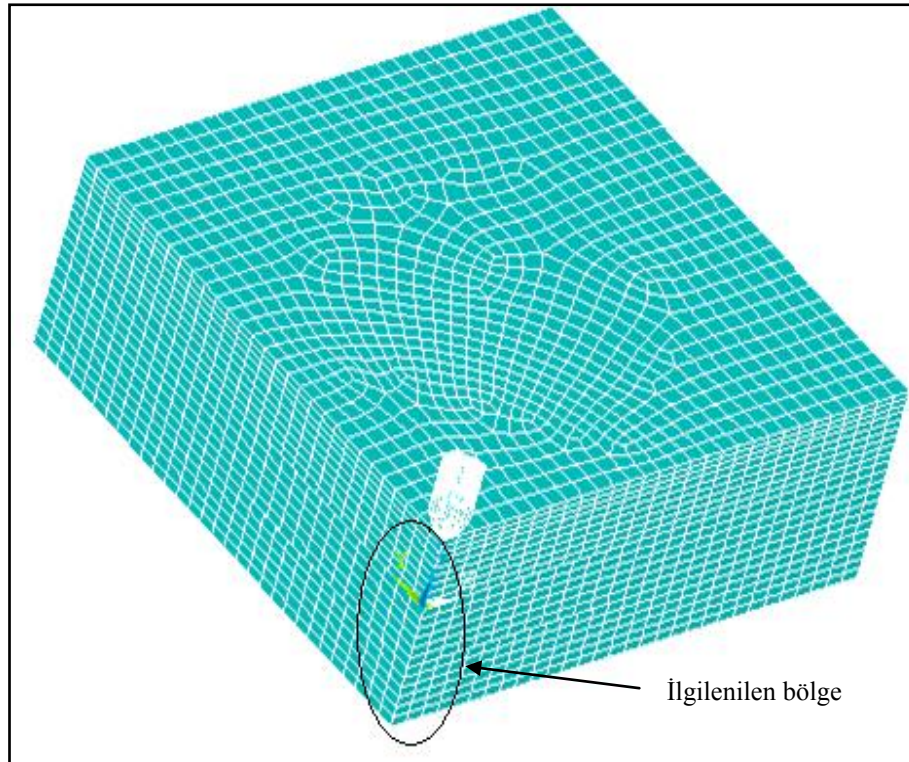
Şekil 3.1. Dört numaralı numune ve merminin çeyrek simetrik katı modeli

Oluşturulan katı model daha sonra ANSYS/LSDYNA programında aktarılmıştır. Analize başlamadan önce hazırlık safhası olarak numuneyi oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri, analizde kullanılacak eleman tipi, katmanlar arası ilişki, mermi yapısının mekanik özellikleri gibi birçok parametre tanımlanmıştır. Tablo 3.1’ de numuneyi oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Numuneyi oluşturan malzemelerin fiziksel özellikleri

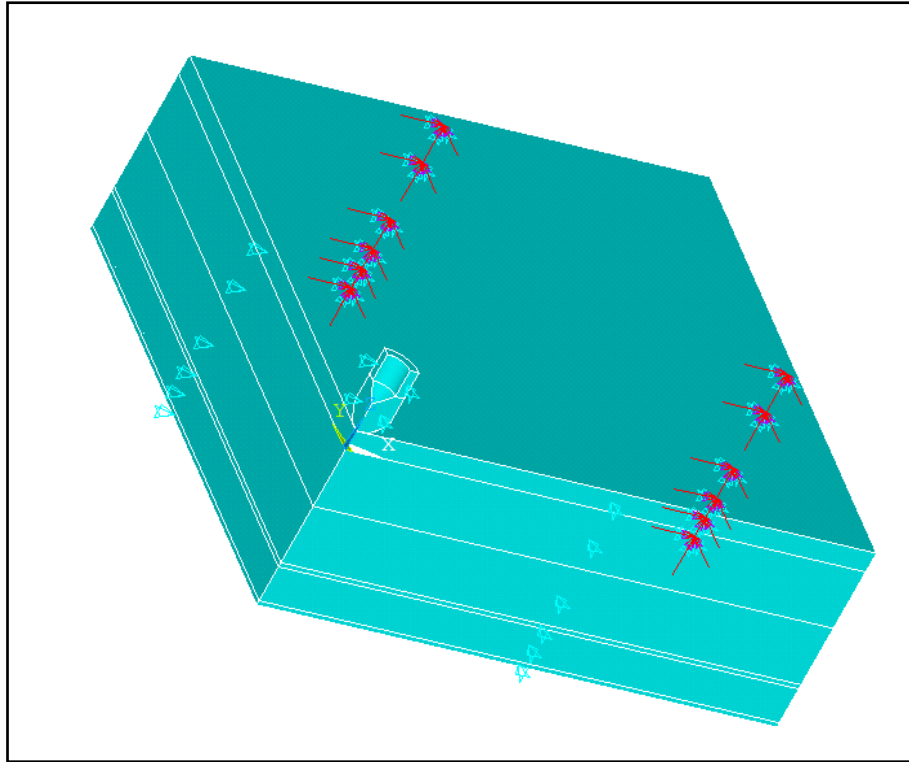
	Al5052 bal peteği	Karbon fiber	Kevlar	Kontrplak
Yoğunluk (kg/m^3)	2680	1900	1440	700
Elastisite modülü (GPa)	70,3	590	124	15
Poisson oranı	0,33	0,2	0,36	-
Akma gerilmesi	193	3800	3600	37,9
Hata parametresi	0,75	0,75	0,75	0,75

Daha sonra modeli sonlu elemanlara ayırmak için mesh uygulaması yapılmıştır. Analizin doğru çalışabilmesi için düzgün bir mesh yapılmalıdır. Şekil 3.2’ de modele mesh işlemi uygulandıktan sonraki görünümü verilmiştir.



Şekil 3.2. Modelin mesh uygulaması ardından görünüşü

Analizin hassasiyeti için merminin ilerleme güzergahı ve ilgilenilen bölgede mesh yapısının düzgün ve hegzahedral yapıda olmasına özen gösterilmiştir. Mesh atılmasından sonra modeller “MERMİ” ve “HEDEF” olmak üzere iki farklı alt modele ayrılmıştır. “HEDEF” merminin çarptığı katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlar “PlasticKinematic” materyal model olarak seçilmiş ve “GLUE” (yapıştırma) işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan model çözüm zamanını azaltmak maksadıyla çeyrek simetrik olarak modellenmiştir. Bunun için ise, simetrik iç yüzeylerin, dik oldukları eksene göre hareketleri engellenmiş, dış yüzeyler her eksende sabitlenmiştir (Şekil 3.3). Tüm analizlerde “Static friction” (statik sürtünme) değeri 0.2 olarak alınmıştır.



Şekil 3.3 Modelin sınır şartları uygulandıktan sonraki görünümü

Merminin özelliği rijit olarak kabul edilmiş ve hızı tüm analizlerde $-Z$ yönünde 700,000mm/s olarak alınmıştır. Bu hız deneysel ortamdaki mermi hızı ile aynıdır. Analizlerde “Solution time” (Çözüm süresi) olarak 0.0001s alınmıştır. Bu değerlerin dışında “Output file type” parametresi “ANSYS and LS-DYNA” alınmış ve tüm sonuçların incelenebilmesi için “ASCII output file” kullanılmıştır. Son olarak ANSYS/LSDYNA yazılımında veriler “explicit solver” kullanılarak çözümlenmiştir.

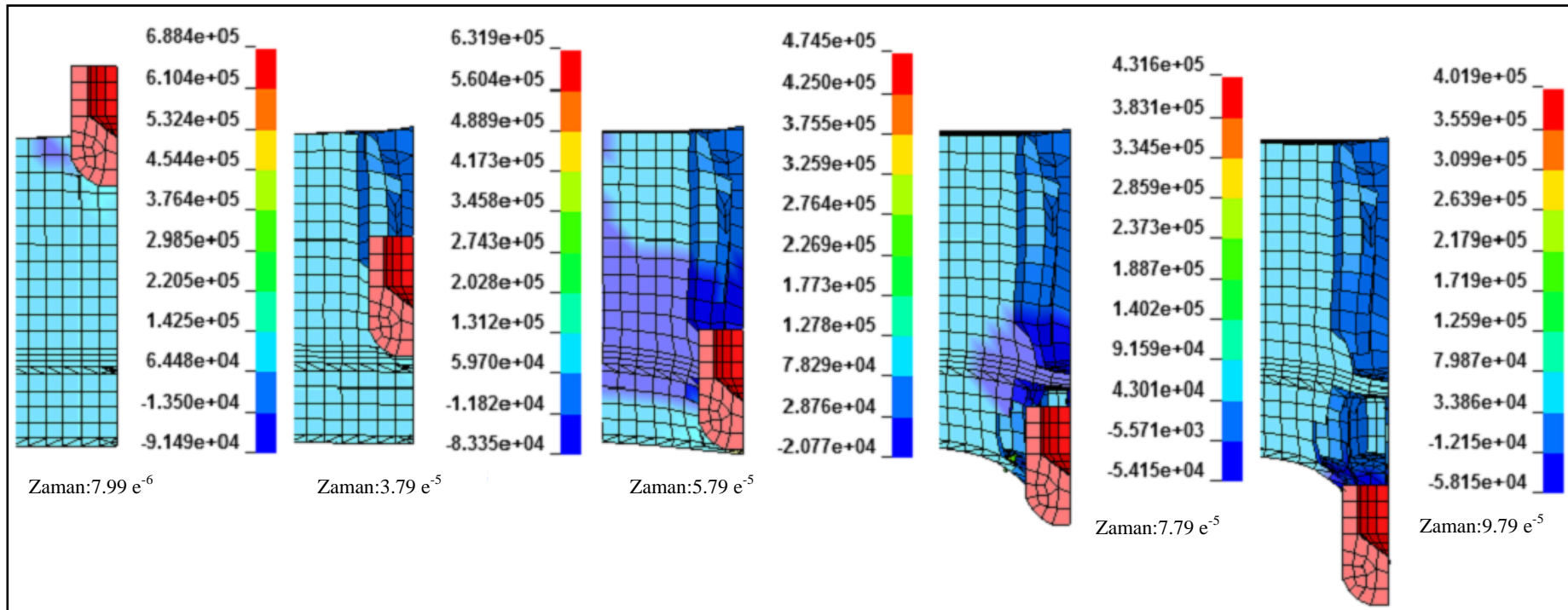
3.2. Numunelerin Analizi

Kontrplak, Kevlar ve alüminyum bal peteği sıralamasından oluşan birinci numunenin analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4' de merminin hedefteki ilerlemesi bağlı olarak hızındaki değişim gözlemlenmektedir.

Başlangıç hızı $700 \frac{m}{s}$ olan merminin, çarpmanın etkisiyle zırhı terk ettiği anda yaklaşık $400 \frac{m}{s}$ lik bir hıza sahip olduğu görülmektedir. Tıpkı deneysel çalışmada olduğu gibi mermi burada zırhı delerek arka yüzeyden çıkmıştır.

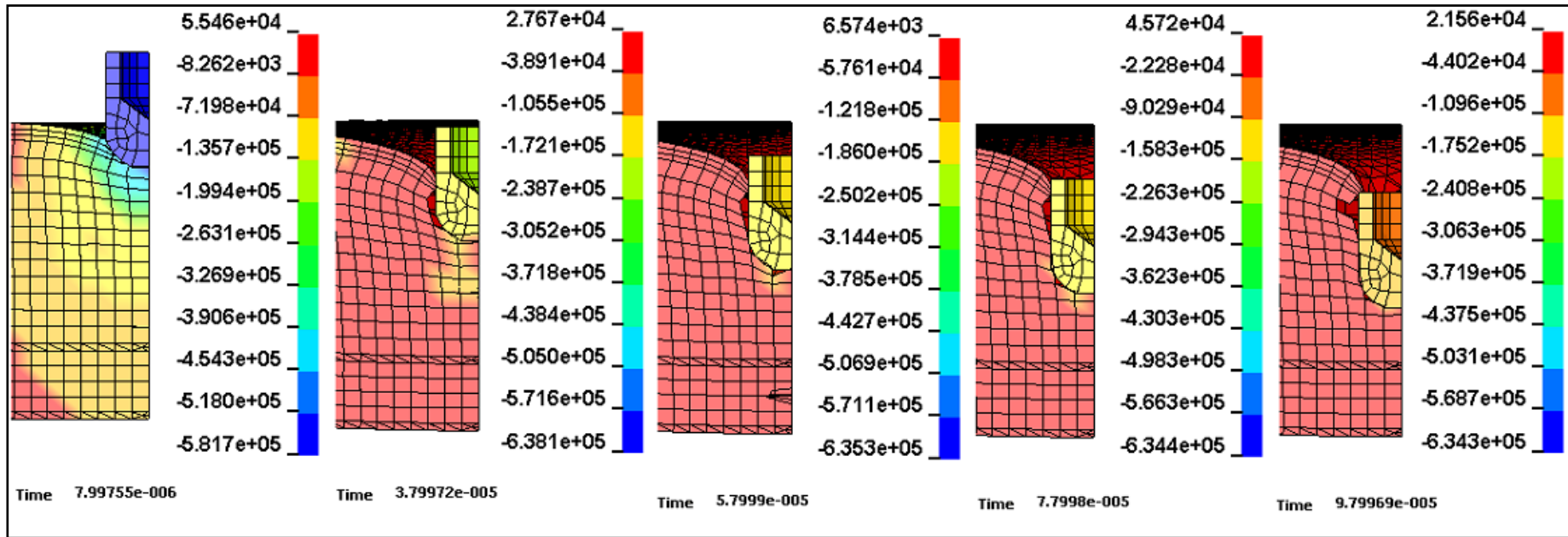
Kevlar' ın önde, bal peteği yapısının arkada ve kontrplak yapısının arada olduğu dördüncü numunenin analizi de yine LS-DYNA yardımı ile aynı sınır şartları altında yapılmıştır. Şekil 3.5' de merminin dördüncü numunede ilerleyişi sırasındaki hız değişimi görülmektedir. Hedefle karşılaştığı ilk anda hızı $700 \frac{m}{s}$ olan mermi, analizin sonunda tamamen durarak zırh numunesinin içinde kalmıştır. Bu sonuç da deneysel çalışmada olduğu gibi gerçekleşmiştir. Diğer anlamda, deneysel çalışma ile analiz arasında doğruluk sağlanmıştır.

Şekil 3.4' de görüldüğü üzere merminin, birinci numune ile ilk teması ve numuneyi delerek arka yüzeyden çıkışı arasında geçen süre zarfında numune içerisindeki ilerleyişi görülmektedir. Mermi, kontrplak tabakalarını ve kevları hasara uğratarak ilerler iken, karbon fiber lamine edilmiş bal peteği yapısında bir miktar çöküntü oluşturarak zırhı terk etmiştir. Katmanlar arasında ilerledikçe merminin hızında azalma gözlemlenmektedir. Nitekim zırhı terk ettiği anda mermi hızının yaklaşık 400 m/s değerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Merminin birinci numune içerisindeki hareketine bağlı hız değişimi

Merminin zırh içinde kaldığı dördüncü numunenin analizini gösteren Şekil 3.5'e bakıldığında, mermi ilk olarak kevlar tabakasıyla karşılaşmaktadır. Burada hızını bir miktar kaybeden mermi, kevlar tabakasını geçip kontrplak tabakası ile karşılaştığında kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü yitirmiş halde bulunmaktadır. Arka tutucu yüzey olarak kullanılan bal peteği yapısının desteği ile, kontrplak tabakası mermiyi durdurmayı başarmış ve merminin kinetik enerjisi tamamen sönmüştür.



Şekil 3.5. Merminin dördüncü numune içerisinde hareketi sırasındaki hız değişimi

BÖLÜM 4. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalardan sonra numuneler birinci ve ikinci kademe olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

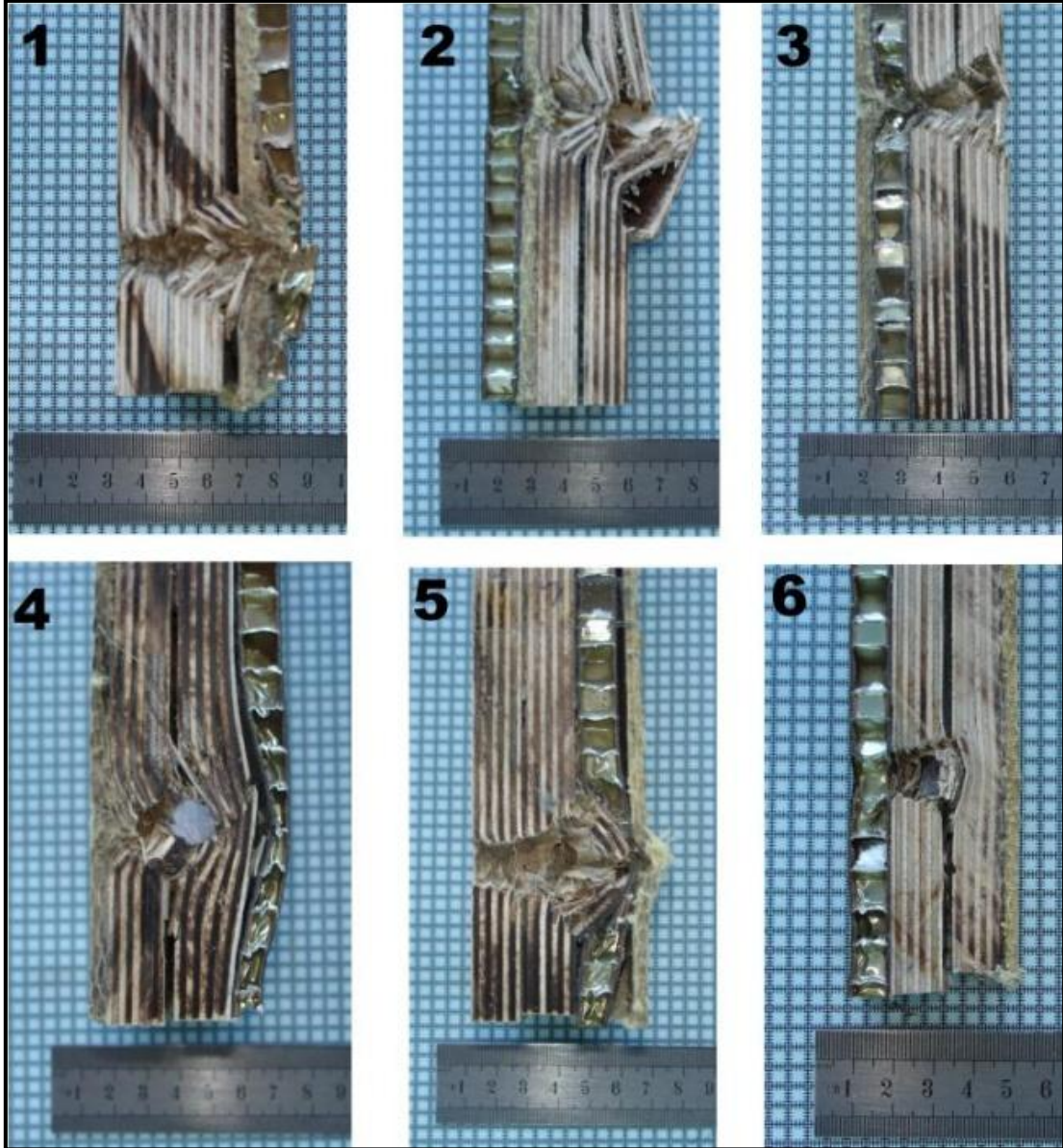
4.1. İlk Kademe Sonuçları

Balistik testlerden sonra zırh numuneleri mermi doğrultusunda iki parça halinde kesilmiştir (Şekil 4.1). Birinci numunede, mermi zırh kombinasyonunu delmiştir. Kontrplak tabakasının yapraklanmaya uğramasına karşın, kevlar ve bal Peteği yapısı bir arada kaldığı gözlemlenmiştir. Fakat bal Peteği yapısını destekleyen karbon fiber katmanı kırılmıştır. Bu numunenin, insanı silahlı saldırı tehlikesine karşı koruyamayacağı anlaşılmaktadır.

İkinci numune incelendiğinde, ilk numunedeki dizilişin tersi olmasıyla paralel, sonuç değişmemiştir. Ayrıca kontrplak tabakaları arasında yapraklanma oluşmuştur. Arka tutucu malzeme olarak düşünülen kontrplak işe yaramamıştır. Son kontrplak tabakaları parçalara ayrılmıştır. Bu kombinasyonda başarısız olmuştur.

Üçüncü zırhta, karbon fiber takviyeli bal Peteği ile epoksi takviyeli kevların yeri değiştirilmiştir. Fakat sonuç aynı olup hiçbir koruma sağlanamamıştır.

Dördüncü numuneye geçildiğinde, dikkate değer bir koruma sağlandığı görülmektedir. Epoksi takviyeli kevlar tabakası ile sert bir çarpışmaya maruz kalan mermi, ikinci kontrplak tabakasını geçememiştir. Arka tutucu katman olan bal Peteği yapısı, ikinci kontrplak tabakasını sıkıştırmış ve enerjisini absorbe etmiştir. Kontrplak tabakaları arasında ufak çaplı yapraklanma oluşmuş olsa da kişisel koruma sağlanmıştır.



Şekil 4.1. İlk kademe numunelerinin deneysel test sonuçları

Beşinci numune, diziliş olarak üçüncü numunenin tersi olarak düşünülmüştür. Bu katmanlı zırhta mermi, ilk katman tarafından durdurulamamıştır. İlk yüzeyde yumuşak kontrplak yapısı mevcut olduğu için merminin hızının çok yüksek olması, diğer ardışık iki tabakanın, merminin enerjisini absorbe edebilmesine imkân vermemiştir.

Altıncı numunede, tıpkı dördüncü numunede olduğu gibi mermi başarı ile durdurulmuştur. Zaten diziliş olarak dördüncü numunenin tersi olan bu numunede,

kontrplak tabakaları arasında yapraklanma gözlemlenmiş fakat mermi ikinci kontrplak tabakasını delemeyen durmuştur.

Bu tür çalışmalarda, sadece mermiyi durdurabilmek, balistik koruma açısından yeterli değildir. Arka yüz işareti diye adlandırılan merminin zırhın içinde kaldığı durumlarda arka yüzde oluşturduğu çıkıntı, koruma açısından önemli bir parametredir. Daha öncede bahsedildiği üzere oluşan çıkıntı, izin verilen değer olan 44mm' den fazla olmamalıdır. Bu çalışmada dördüncü numunedeki arka yüz işareti yaklaşık 10mm' dir. Altıncı numunede ise arka yüz işareti gözlemlenmemiştir. Sadece 2.5mm delaminasyon meydana gelmiştir.

4.2. İkinci Kademe Sonuçları

Kevlar kumaşının farklı sıralamalardaki davranış ve etkisinin incelendiği ikinci kademe deneyleri için yapılan atışlar sonrası, deney numuneleri tek tek incelenmiştir. Birinci numunede öndeki PP bal peteği yapısı, merminin enerjisini absorbe edememiş ve mermi arka yüzeyden kevlar tabakasını da hasara uğratarak çıkmıştır.

İkinci numunede mermiyi karşılayacak ön yüzeyde bulunan çelik elek teli tabakası, tıpkı birinci numunede olduğu gibi merminin geçmesine engel olamamıştır. Fakat bu numunede farklı olarak çelik tel tabakada yapraklanma gözlemlenmiştir. Mermi, kevlar tabakasını da geçmiştir ve numune başarısız olmuştur (Şekil 2.19).

Üçüncü numunede karbon fiber ve kevlar dizilişi denenmiştir. Önde bulunan sert karbon fiber tabakası merminin hızını bir miktar kesmiş olsa da tam olarak durduramamış ve mermi kevlar tabakasını da geçerek zırhı terk etmiştir. İlk iki numuneye nazaran bu kombinasyonda kevlar tabakası daha az hasara uğramıştır (Şekil 2.20).

Dördüncü numunede bir önceki dizilişin tersi uygulanmıştır. Öndeki kevlar tabakası, lifli yapısı sayesinde merminin enerjisini bir miktar absorbe etmiş fakat yumuşak yapısından dolayı tam olarak durduramamıştır. Arkada bulunan karbon fiber tabakası da başarısız olmuş ve mermi zırhı delerek çıkmıştır (Şekil 2.21).

Üç katman olarak uygulanan beşinci numunede, öndeki karbon fiber tabakası mermiyi hasara uğratmış, ara katman olarak kullanılan kevlar tabakası ise mermiyi tutarak tam delinmeyi engellemiştir. Fakat kevlar tabakasının esnek yapısından dolayı merminin meydana getirdiği şok etkisi arka katman olan çelik tel tabakasını da delmiştir. Mermi numune içinde kaldığı halde arka yüzeyde oluşan çıkıntı, standartlarda müsaade edilen limiti aştığından dolayı numune kişisel koruma amacı için yetersiz kalmıştır.

Altıncı numune diziliş olarak beşinci numunenin tersi konumundadır. Sonuç olarak aynı davranış gözlemlenmiş ve balistik standart aşıldığı için numune başarısız sayılmıştır (Şekil 2.22).

Karbon fiber, PP bal peteği ve çelik tel kombinasyonu olan yedinci numunede mermi zırhı tamamen delmiş ve arka yüzeyde bulunan çelik tel katmanında yapraklanma gözlemlenmiştir. Ara katman olan PP bal peteği ise kırılmaya maruz kalmıştır. Bu numuneye ilave olarak aradaki PP bal peteği yapısının bir adet artırıldığı sekizinci numunede mermi arkada bulunan çelik tel tabakasını delememiş ve numune başarılı olmuştur. Arka yüzde oluşan çıkıntı, balistik koruma limiti dâhilinde olduğu için kişisel koruma sağlanmıştır (Şekil 2.23).

Kevlar tabakasının önde kullanıldığı bir başka diziliş olan dokuzuncu numunede, kevlar ve PP bal peteği yapısı merminin enerjisini absorbe edememiş ve mermi çelik tel tabakasında yapraklanma oluşturarak zırhı terk etmiştir.

Onuncu numunede, tabakalar mermiyi tutmada başarısız olmuştur. Ara katman olan PP bal peteği yapısı tamamen kırılmış ve arkada bulunan çelik tel tabakasında taç yaprağı oluşumu gözlemlenmiştir.

Çelik tel, karbon fiber ve çelik tel dizilişi uygulanan on birinci numune başarısız olmuştur. Mermi çelik tel tabakasında yapraklanmaya neden olmuş ve zırhı terk etmiştir.

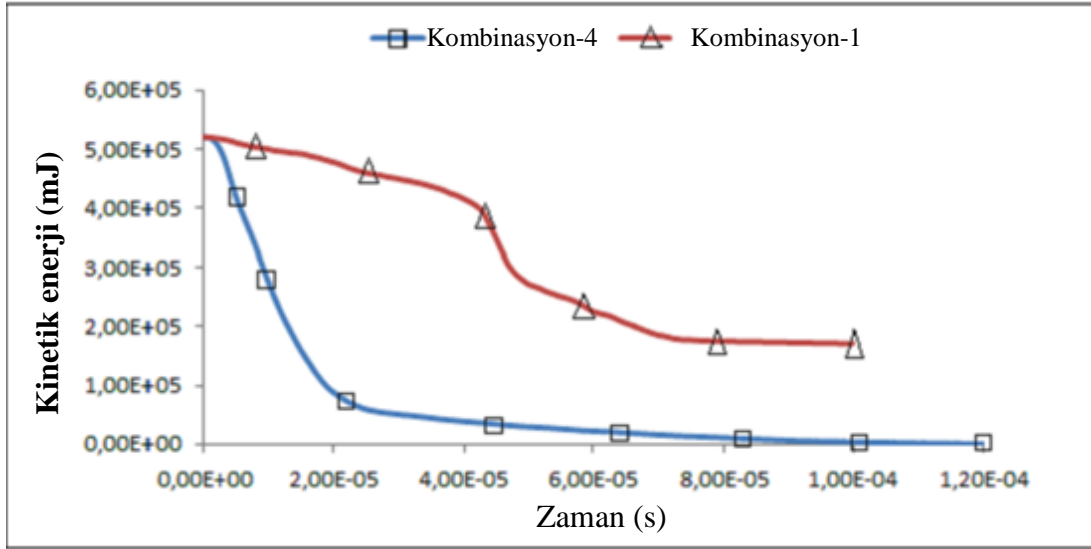
On ikinci numunede, iki çelik tel tabakası arasında bulunan kevlar tabakası mermiyi tutmayı başarmıştır. Önde bulunan çelik tel tabakası merminin ilk hızını büyük ölçüde azaltmış ve enerjisini absorbe etmiştir. Hemen ardında bulunan kevlar tabakası ise lifli yapısı sayesinde mermiyi tutmayı başarmıştır. Fakat beşinci numunede gözlemlendiği gibi merminin meydana getirdiği şok etkisi nedeniyle kurşunu tutan kevlar tabakası arkada bulunan çelik tel tabakasını delerek çıkıntı oluşturmuştur. Meydana gelen çıkıntı, kabul edilebilir limitin üstünde olduğu için mermi numune içinde kaldığı halde numune başarısız sayılmıştır (Şekil 2.25).

4.3. Simülasyon Sonuçları

LS-DYNA yazılımı ile yapılan simülasyonlarda, merminin rijit yapıda kabul edilmesinden dolayı, dördüncü ve altıncı numunelerde bazı farklılıklar elde edilmiştir. Testlerde bu numunelere yapılan atışlarda merminin geometrisinde değişim meydana gelmiş ve mermi zırh tarafından durdurulmuştur. Fakat LS-DYNA simülasyonlarında rijitlikten dolayı, mermi beklenenden bir miktar fazla ilerlemiştir. Merminin delip zırhı terk ettiği birinci, ikinci, üçüncü ve beşinci numunelerde simülasyon, deneysel çalışma ile birebir sonuçlanmıştır.

İlk numunede (Şekil 3.4) mermi hızı $700 \frac{m}{s}$ 'den $400 \frac{m}{s}$ hıza düşmüş ve tıpkı deneylerdeki gibi zırh tamamen delinmiştir. Dördüncü numunede ise (Şekil 3.5), merminin hızı tamamen zırh tarafından emilmiştir. Dördüncü numunenin atış testinin ve simülasyonun sonuçları, zırh tarafından absorbe edilen mermi enerjisini karşılaştırmıştır.

Kompozit numunelerin koruma kabiliyetlerini anlayabilmek için merminin kinetik enerjisindeki değişim dikkate alınmalıdır. Hız ile enerji değerlerini karşılaştırmaya bir örnek olarak, birinci ve dördüncü numunelerdeki mermilerin kinetik enerji değişimi, diğer bir anlamda, numunelerin enerji absorbe kapasiteleri Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.2. Birinci ve dördüncü numunelerin kinetik enerji değişimi

İlk kombinasyonun, kontrplak tabakasından sonra kinetik enerji absorbe kapasitesi artmıştır fakat kevlar ve bal peteği tabakaları mermiyi durdurmada başarılı olamamıştır. 0.1ms sonunda mermi zırhı delerek arka yüzeyden çıkmıştır. Merminin enerji seviyesi 520J' den 171J'e kadar düşmüştür. Dördüncü numune göz önüne alındığında, ön yüzeydeki kevlar 49 tabakası 432J enerji absorbe etmiştir. Merminin kalan enerjisi ise kontrplak tabakaları arasında sıfırlanmıştır.

İlk kademe deneylerinde atış gerçekleştirilen altı numuneden yalnız dört ve altı numaralı numuneler mermiyi tutma başarısı göstermiştir. Ön yüzeyde sert tabaka ile karşılaşan mermi hızını büyük ölçüde kaybetmiş ve ara katmanlarda daha da yavaşlayarak zırhı delemeyen durmuştur.

Kevlar kumaşının zırh kombinasyonu içerisindeki yerinin etkisinin incelendiği ikinci kademe deneylerinde beş, altı, sekiz ve on iki numaralı numuneler mermiyi tutma başarısı göstermiştir. Bu numunelerden beş, altı ve on iki numaralı numuneler mermiyi tuttuğu halde, zırhın arkasında oluşan arka yüz derinliği balistik standartlarda belirtilen limit değerinin üzerinde olduğu için kişisel koruma sağlanamamıştır. Sekiz numaralı numunede ise mermi zırh numunesi içinde kalmış ve numune başarılı olmuştur. Arka yüzde oluşan derinlik balistik standart limit değerinin altındadır.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

İlk kademe sonuçlara bakıldığında, merminin karşılaşacağı ilk yüzeye sert malzeme konulmalıdır. Merminin ilk enerjisinin bu yüzeyde absorbe edilmesi sağlanmalı ve arkada bulunan daha yumuşak katman, merminin sert çarpma ile oluşturduğu enerjiyi sönmülemelidir. Son tabaka da merminin kalan enerjisini absorbe edecek ve yumuşak tabakayı bir arada tutacak sertlikte ve destekleyici nitelikte olmalıdır.

İkinci kademe sonuçları göz önüne alındığında, kevlar kumaşının önde kullanıldığı numuneler başarısız olmuştur. Kevlar tabakası yumuşak yapısından dolayı merminin ilk enerjisini karşılama kabiliyeti gösterememiştir. Bu yüzden mermi ile ilk teması sağlayacak ön yüzeyde sert bir malzeme kullanılması durumu bir kez daha doğrulanmıştır.

Kevlar tabakasının en arkada olduğu kombinasyonlarda, esnek yapısı itibari ile bu tabaka büyük hasara uğramıştır. Sert tabakayı delen mermi, kevlar tabakası herhangi bir tabaka ile desteklenmediği için rahatça geçerek numunelerin başarısız olmasına neden olmuştur. Bu sebepten dolayı, kombinasyonlarda üç katman kullanılması daha uygun sonuçlar vermektedir. Nitekim kevlar tabakasının ara katman olarak kullanıldığı beş, altı ve on iki numaralı numuneler mermiyi tutma başarısı göstermiştir. Bu numunelerdeki arka çıkıntı miktarını balistik limit seviyesine çekmek için, kevlar tabakasındaki katman sayısı artırılabilir ya da ön ve arka yüzeylerde daha sert bir yapıya sahip tabakalar kullanılabilir.

Son olarak, test ve LS-DYNA simülasyon sonuçları birbirine benzer gelişmiştir ve ileriki çalışmalarda, ekipman maliyeti, hazırlık aşamaları ve test giderleri açısından faydalı olacaktır. Bağdaştırılan sonuçlar, çalışma sürelerinin azalmasına ve birçok farklı materyal için farklı analizler yapılmasına imkân sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] DEMİR, T., "Metal ve Katmanlı Zırh Malzemelerinin 7,62 mm lik Zırh Delici Mermiler Karşısında Balistik Başarımlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ağustos 2008.
- [2] YAVAŞ, M. O., "Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2009.
- [3] DENİZ, H., "Çift Fazlı Bir Çeliğin 7,62 mm lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Mayıs 2009.
- [4] NAIK, N. K., SHRIRAO, P., REDDY, B. C. K., "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation", International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 1521-1552.
- [5] ÖZTÜRK, M., E., DEMİR, A., "Kompozit Malzemelerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi", Bitirme Tezi, Sakarya Üniversitesi, Mayıs 2011.
- [6] KRISHNAN, K., SOCKALINGAM, S., BANSAL, S., RAJAN, S. D., "Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact", Composites Part B, 2010, 41: 583-593.
- [7] JENA, P. K., "Ballistic Studies On Layered Structures", Materials and Design, 2009, 30: 1922-1929.
- [8] MAJUMDAR, D., SRIVASTAVA, K. K., PURKAYASTHA, S. S., PICHAN, G., SELVAMURTHY, W., "Physiological effects of wearing heavy body armour on male soldiers", International Journal of Industrial Ergonomics", 1997, 20: 155-161.
- [9] BILLON, H. H., "Models for the ballistic impact of fabric armour", International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 411- 422.
- [10] CERİT, A. A., "Partikül ve Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitin Balistik Performansının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Haziran 2004.

- [11] ONG, C. W., BOEY, C.W., HIXSON, R. S., SINIBALDI, J. O., “Advanced layered personnel armor”, *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38: 369-383.
- [12] GIBSON, R. F., “ A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures”, *Composite Structures*, 92, 2793-2810, 2010.
- [13] EVCİ, C., "Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi", *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Kasım 2009.*
- [14] JENA, P. K., MISHRA, B., KUMAR, K. S., BHAT, T. B., “An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armor materials against 7.62 mm deformable projectile”, *Materials & Design*, 2010, 31: 3308-3316.
- [15] LANE, R. A., “High performance fibers for personnel and vehicle armor systems”, *Amptiac Quarterly*, 2005, 9: 3-9.
- [16] TABIEI, A., IVANOV, I., “Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004, 39: 175-188.
- [17] GOWER, H. L., CRONIN D.S., PLUMTREE A., “Ballistic impact response of laminated composite panels”, *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1000–1008.
- [18] GUDEN, M., YILDIRIM, U., HALL, I. W., “Effect of strain rate on the compression behavior of a woven glass fiber/SC-15 composite ”, *Polymer Testing*, 2004, 23: 719–725.
- [19] LEAL, A. A., DEITZEL J. M., MCKNIGHT S. H., GILLESPIE J. W. JR., “Interfacial behavior of high performance organic fibers”, *Polymer*, 2009, 50: 1228-1235.
- [20] TAN V. B. C., LIM C, T., CHEONG C.H., “Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry”, *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(2): 207–222.
- [21] KARAHAN, M., KUŞ, A., EREN, R., “An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics”, *International journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 499-510.
- [22] BRISCOE B. J., MOTAMEDİ F., “The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction”, *Wear*, 1992, 158(1–2): 229–247.

- [23] TAN, C. Y., AKIL, M. H., “ Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core”, *Composites : Part B*, 2012, 43: 1433-1438.
- [24] CHENG, M., CHEN W., WEERASOORIYA T., “Experimental investigation of the transverse mechanical properties of a single Kevlar_KM2 fiber, *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 6215-6232.
- [25] RAMADHAN, A. A., TALIB, A. R., RAFIE, A. S. M., ZAHARI, R., “High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminium laminated panels”, *Materials and Design*, 2012.
- [26] GUSTIN, J., JONESON, A., MAHINFALAH, M., STONE, J., “Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites”, *Composite structures*, 2005, 69: 396-406.
- [27] REIS, P. N. B., FERREIRA, J. A. M., SANTOS, P., RICHARDSON, M. O. W., SANTOS, J. B., “Impact responses of Kevlar composites with filled epoxy matrix”, *Composite structures*, 2012.
- [28] NAIK, N. K., SHRIRAO P., “Composite structures under ballistic composite”, *Composite Structures*, 2004, 66: 579-590.
- [29] AFSHARI, M., KOTEK, R., CHEN, P., “Polymers &Plastics-High performance fibers”, 2011, 269-340.
- [30] ASHBY, M. F., JONES, D. R. H., “Engineering Materials 2 – Polymers”, *Butterworth Heinemann*, 1998, 219-221.
- [31] KUTZ, M., “Handbook of material selection”, *John Wiley & Sons*, 2002, 357-397.
- [32] ASHBY, M. F., JONES, D. R. H., “Engineering Materials 2 – Composites: fibrous, particulate and foamed”, *Butterworth Heinemann*, 1998, 263-276.
- [33] Safir T-14 Classic Teknik Bilgi, Safir Silah Sanayi Tic. Ltd. Şti.

ÖZGEÇMİŞ

Sefa Emin Özgültekin, 09.12.1988 de Yozgat' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bursa' da tamamladı. 2006 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2010 yılında bitirdi. 2010 yılında Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği EABD' nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen İsar Otomotiv Ltd. Şirketi' nde Yetkili Mühendis olarak görev yapmaktadır..