

**T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KBRN ANA BİLİM DALI
EL YAPIMI PATLAYICILAR VE PATLAYICILARLA
MÜCADELE PROGRAMI**

**KOMPOZİT ZIRH TASARIMININ BALİSTİK
PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammed Bahri BARUK
1981408**

**TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ**

**ANKARA
Temmuz 2022**

**T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KBRN ANA BİLİM DALI
EL YAPIMI PATLAYICILAR VE PATLAYICILARLA
MÜCADELE PROGRAMI**

**KOMPOZİT ZIRH TASARIMININ BALİSTİK
PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Bahri BARUK
1981408

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ

ANKARA
Temmuz 2022

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KBRN ANA BİLİM DALI
EL YAPIMI PATLAYICILAR VE PATLAYICILARLA
MÜCADELE PROGRAMI

KOMPOZİT ZIRH TASARIMININ BALİSTİK
PERFORMANSA ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Bahri BARUK
1981408

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.05.2022
Tezin Savunulduğu Tarih : 15.06.2022

Tez Oy birliği ile başarılı bulunmuştur.

	Unvanı Adı Soyadı	İmza
Tez Danışmanı	Dr Öğr.Üyesi Öğ.Alb.Ayhan AYTAÇ	
Jüri Üyeleri	Prof .Dr. Ulvi ŞEKER	
	Doç. Dr. Öğ.Alb.Alpaslan ATMANLI	

ANKARA
Temmuz 2022

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a)Kapak Sayfası, b) Giriş, c) Ana Bölümler ve ç) Sonuç ve Öneriler kısımlarından oluşan toplam 97 sayfalık kısmına ilişkin, 31/05/2022 tarihinde “Turnitin” adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, benzerlik oranı % 7’dir.

Uygulanan Filtrelemeler:

1-Kaynakça hariç

2-Alıntılar hariç

3-5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü tez Çalışması Özgünlük raporu alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları’nı inceledim ve bu Uygulama Usul ve Esasları’nda belirtilen azami benzerlik oranına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Muhammed Bahri BARUK

05 / 07 / 2022

ETİK BEYAN

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığı eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Alparslan Savunma Bilimler Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Muhammed Bahri BARUK

05/07/2022

Bu vatanın şehitlik mertebesine ulaşmış yiğit evlatlarına...
Özellikle Allah bu millete bir daha istiklal marşı yazdırmasın diye gözünü kırpmadan
canını feda eden Çanakkale Şehitlerimize

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada; farklı tasarım alüminyum tabakalı kompozit zırh malzemesinin darbeye karşı davranışı ve enerji sönümleme kabiliyeti incelenmiştir.

Ağırlık düşürme metodu kullanılarak, kompozit malzemenin bir yüzüne belirli bir enerji uygulanmış ve sönümlenen enerji üzerinden kompozit malzemenin darbeye karşı davranışı anlaşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmanın düşünülmesinde, proje aşamasından deneysel verilerin değerlendirilmesi ve çalışmanın tamamlanmasına kadar tüm aşamalarında, tecrübeleriyle ve sabırla bana yol gösteren ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım değerli hocam Dr.Öğ.Üyesi Albay Ayhan AYTAÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Kompozit malzemelerin üretimi, işlenmesi ve ağırlık düşürme darbe testlerinin icra edilmesinde her türlü imkanı seferber eden ve yardımlarını esirgemeyen Millî Savunma Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, Makina Laboratuvarı çalışanlarına ve özellikle Dr.Öğr.Üyesi Yarbay Emre AYTAV'a ve Teknisyen Murat KURUCAN'a, yüksek lisans tez programı boyunca bana destek olan, beraber çalışmalarımızı yürüttüğüm ve tezimin bilgisayar modellemesinde yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Mehmet Hurşut GÜVEN'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Yüksek lisans programına başlamamda ve sonrasındaki her aşamada beni teşvik eden, zorlandığım zamanlarda moral vererek sabır ve anlayış içerisinde beni destekleyen sevgili eşime ve çocuklarıma ayrıca teşekkür ederim.

Ankara, Temmuz 2022

Muhammed Bahri BARUK

İÇİNDEKİLER

ÖZGÜNLÜK RAPORU	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SEMBOLLER LİSTESİ.....	xiii
KISALTMALAR	xiv
ÖZ	xv
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Literatürdeki Çalışmalar	4
2.2. Literatür Değerlendirmesi	11
3. BALİSTİK VE ZIRHLARA GENEL BAKIŞ	13
3.1. Balistik 13	
3.2. Yanma ve Patlama	13
3.3. Patlayıcı Maddeler ve Sınıflandırması	14
3.3.1. Patlayıcı Maddeler	14
3.3.2. Patlayıcıların Sınıflandırılması.....	15
3.4. Patlama Sonucu Oluşan Ürünler ve Patlamanın Etkileri	16
3.4.1. Basınç.....	17
3.4.2. Açığa Çıkan Isı	18
3.4.3. Parça/Parçacık Etkisi.....	18
3.4.4. Mesafenin Etkisi	19
3.4.5. Patlama Sonucu Açığa Çıkan Enerji	21
3.5. Zırhlar	22
3.5.1. Zırh Üretim Yöntemleri.....	23

3.5.2.	Zırh Çeşitleri.....	24
3.6.	Kompozit Malzemeler ve Alüminyum	24
3.6.1.	Kompozit Malzemelere Genel Bakış.....	24
3.6.2.	Kompozit Zırh Malzemesi Olarak Alüminyum	25
3.7.	Zırh Çalışmalarında Darbe Deneyleri ve Hasar Türleri	28
3.7.1.	Darbe Deneyleri.....	28
3.7.2.	Şok Dalgası Oluşturmak İçin Kullanılan Yöntemler.....	30
3.7.3.	Şok Parametrelerini Ölçme Araçları ve Teknikleri	31
3.7.4.	Darbe Sonucu Malzemede Oluşan Hasarlar	32
4.	TEMEL KORUNUM YASALARI VE MEKANİK DALGALAR.....	34
4.1.	Temel Korunum Yasaları	34
4.1.1.	Kütlenin Korunumu Kanunu	34
4.1.2.	Enerjinin Korunumu Kanunu	34
4.1.3.	Momentumun Korunumu Kanunu	37
4.2.	Mekanik Dalgalar.....	38
5.	MATERYAL VE METOD	43
5.1.	Materyal	43
5.1.1.	Deney Düzenegi.....	43
5.1.2.	Deney Numunesi	44
5.1.3.	Numunenin Fikstür Üzerine Sabitlenmesi	47
5.1.4.	Numunenin Dinamometreye Montajı	47
5.2.	Metot	48
5.2.1.	Ağırlık Düşürme Testi	48
5.2.2.	Kuvvet Ölçümü	49
5.2.3.	Deneyin Sayısal Modellenmesi.....	50
6.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	51
6.1.	Kuvvet-Zaman Grafikleri.....	51
6.2.	Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri.....	55
6.3.	Hız-Zaman Grafikleri.....	57
6.4.	Yer Değiştirme-Zaman Grafikleri.....	58
6.5.	Enerji-Zaman Grafikleri	59
6.6.	Sayısal Modelleme Sonuçları.....	60
6.7.	DeneySEL ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması	64
6.8.	Patlamada Basıncın Mesafeyle Değişimi	65
6.9.	Özgül Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti (ÖEAK).....	66

7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKÇA	72
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1	Bazı Bileşik ve Elementlerin Oluşum Entalpileri.....	22
Tablo 3.2	Bazı Alüminyum Serilerinin Akma ve Uzama Özellikleri.....	28
Tablo 5.1	5083 Serisi Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (%)	44
Tablo 5.2	İlave Malzeme Özellikleri	46
Tablo 5.3	Darbe Enerjisi Hesaplaması.....	48
Tablo 6.1	Al 5083 Malzeme Özellikleri	60
Tablo 6.2	Al 5083 Malzemesinin Johnson-Cook Değerleri.....	60
Tablo 6.3	Al 5083 Johnson-Cook Hasar Değerleri.....	60
Tablo 6.4	Modelleme Giriş-Çıkış Basınç ve Kuvvet Değerleri.....	62
Tablo 6.5	Polimerli ve Polimersiz Tasarımlara Ait Deneysel Sonuçlar	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1	Basit Bir EYP Patlayıcı Düzeneği	15
Şekil 3.2	Patlamanın Etkileri	16
Şekil 3.3	Basınç-Zaman Grafiği	17
Şekil 3.4	Tipik Bir Patlamada Basınç-Mesafe Grafiği	19
Şekil 3.5	R Uzaklığındaki Patlamanın Etkisi.....	20
Şekil 3.6	Aşırı Basınç, Pr-Z Grafiği	21
Şekil 3.7	Alüminyumun Genel Özellikleri.....	26
Şekil 3.8	Boksit Cevheri	26
Şekil 3.9	Geri Tepme, Penetrasyon ve Perforasyonun Oluşumları.....	32
Şekil 3.10	Hasar Mekanizmaları	33
Şekil 4.1	Kapalı Uçlu Grafik.....	36
Şekil 4.2	Açık Uçlu Grafik	37
Şekil 4.3	Şok Dalgası ve Partiküllerin Havadaki Hareketi.....	39
Şekil 4.4	Yüksek Basıncı Bir Dalganın hareketi	40
Şekil 4.5	Basınç Dalgasının Şok Dalgasına Haline Geçişİ	41
Şekil 4.6	Şok Dalgalarının Gücünü Yitirmesi	42
Şekil 5.1	Deney Düzeneği	43
Şekil 5.2	Deney Numunesi Ana Gövdesi.....	45
Şekil 5.3	Sandviç Plakalı Zırh Deney Materyali	45
Şekil 5.4	Fikstür Üzerine Numunenin Yerleşimi	47
Şekil 5.5	Numunenin Dinamometreye Montajı.....	47
Şekil 5.6	Kistler Kuvvet Ölçüm Sistemi	50
Şekil 6.1	(a): Ağırlık Düşürme Testi Kuvvet-Zaman Grafiği (4 Farklı Tasarım) (b): Ağırlık Düşürme Testi Kuvvet-Zaman Grafiği (7 Farklı Tasarım) (c): Dinamometre Kuvvet-Zaman Grafiği (4 Farklı Tasarım) (ç) Dinamometre Kuvvet-Zaman Grafiği (7 Farklı Tasarım).....	52
Şekil 6.2	(a): Polimer Yapı Ağırlık Düşürme Testi Kuvvet-Zaman Grafiği (b): Polimer Yapı Dinamometre Kuvvet-Zaman Grafiği	54
Şekil 6.3	(a): Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği (4 farklı tasarım) (b): Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği (7 farklı tasarım) (c): Polimer Yapı Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği	56
Şekil 6.4	(a): Hız-Zaman Grafiği (b): Polimer Yapı Hız-Zaman Grafiği	57
Şekil 6.5	(a): Yer Değiştirme-Zaman Grafiği (b): Polimer Yapı Yer Değiştirme-Zaman Grafiği	58
Şekil 6.6	(a): Enerji-Zaman Grafiği (b): Polimer Yapı Enerji-Zaman Grafiği	59

Şekil 6.7	(a): Sayısal Modelleme Darbenin İlerlemesi (B Yapı) (b): Sayısal Modelleme Ön Yüzde Darbenin İlerlemesi (D Yapı) (c): Sayısal Modelleme Arka Yüzde Darbenin İlerlemesi (D Yapı)	61
Şekil 6.8	Sayısal Modellemede Darbenin Etki Alanı	62
Şekil 6.9	Modelleme Enerji-Zaman Grafiği (D)	63
Şekil 6.10	Modelleme Enerji-Zaman Grafiği (B)	63
Şekil 6.11	Enerji-Zaman Grafikleri	64
Şekil 6.12	Deneyssel ve Sayısal Modelleme Giriş ve Çıkış Kuvvetlerinin Karşılaştırması	65
Şekil 6.13	Tasarıma Bağlı Olarak Giriş ve Çıkış Kuvvetleri Oranı Korelasyonu	67
Şekil 6.14	Çıkış/Giriş Kuvvetleri Yoğunluk İlişkisi	68
Şekil 6.15	ÖEAK Grafiği	68



SEMBOLLER LİSTESİ

<u>Semboller</u>	<u>Açıklamalar</u>
Al	: Alüminyum
°C	: Santrigrat derece
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
Fe	: Demir
g	: Yerçekimi İvmesi (m/s ²)
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
ρ	: Yoğunluk
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
V	: Hız
Zn	: Çinko

KISALTMALAR

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	: Aralıklı Numune
B	: Boşluklu Numune
AB	: Alümina Bilya
CETK	: Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit
ÇB	: Çelik Bilya
DAQ	: Data Toplama Sistemi
D	: Dolu Numune
FÇ	: Çıkış Kuvveti
FG	: Giriş Kuvveti
GKK	: Grafen Katkılı Kompozit
K	: Kevlar
KYP	: Düşük Yoğunluklu Köpük Yapılı Polimer
MO	: Çıkış Kuvveti x Süresi/Giriş Kuvveti x süresi
SASS	: Stres Altında Sıvı Emdirilmiş Kevlar
ÖEAK	: Özgül Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti

ÖZ

Kompozit Zırh Tasarımının Balistik Performansa Etkisinin Deneysel Olarak Modellenmesi

Muhammed Bahri BARUK

Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü

Ankara, Temmuz 2022

Malzemelerin darbeye karşı mukavemetinin hangi parametrelerle ne ölçüde değiştiği, yani darbeye karşı davranışı, darbe testleri marifetiyle ölçülebilmektedir. Patlayıcıların patlama sonucu hedef üzerinde oluşturduğu şok dalgaları da bir takım ölçüm teknikleri ile ölçülerek, malzemelerin enerji sönmüleme kabiliyetleri hakkında yorum yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, Al 5083 matrisli deney materyalinin, patlama olayında darbeye karşı davranışının incelenmesi ve böylece benzer materyallerin kullanıldığı zırh tasarımlarının etkinliğini belirleyebilecek bilgiler elde edilmesi hedeflenmiştir.

Deney materyali, Al 5083 esaslı iki plaka arasına, alümina ve çelik bilya başta olmak üzere 10 farklı malzeme yerleştirilerek oluşturulmuştur. Tasarlanan malzemenin bir yüzeyine ağırlık düşürme testi ile darbe uygulanmış, malzemenin arka yüzünden dinamometre kullanılarak çıkış kuvvetleri ölçülmüştür.

Çalışmada, ağırlık düşürme test cihazında, 10 J enerji ile ağırlık düşürme testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra testler, malzemenin ön yüzüne uygulanan kuvvetlerin daha stabil hale getirilmesi için, ön yüzeye polimer bir malzeme yerleştirilerek tekrarlanmış, ayrıca abaqus programı kullanılarak modellenmiştir.

Polimerli ve polimersiz tasarıma ait test sonuçları, sayısal modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Ön yüzeyin polimerli yapı ile desteklendiği durumda giriş kuvvetlerinin daha düşük olduğu, buna karşılık olarak polimersiz yapılarda daha fazla enerji sönmülemesinin gerçekleştiği, karşılaştırma sonucunda test sonuçlarıyla sayısal modelleme sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuçlar, Özgöl Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti (ÖEAK) açısından incelenerek, ÖEAK'nin zırh tasarımında bir kriter olabileceği değerlendirilmiştir. Böylece, bir patlama olayı simüle edilerek, üretilen alüminyum matrisli kompozit zırh sisteminin, bir patlama olayında enerji sönümleme kabiliyetini açıklayan bir model geliştirilmiştir.

Bu kapsamda, geliştirilen modelin farklı konfigürasyonlarda üretilecek kompozit zırhların değerlendirilmesinde fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler:

Ağırlık Düşürme Testi, Kompozit Zırh, Darbe Mekaniği, Patlama Modellemesi, Özgöl Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti (ÖEAK)

Bilim Kodu :

Sayfa Sayısı :

Tez Danışmanı : Dr. Öğr.Üyesi Öğ. Alb.Ayhan AYTAÇ

ABSTRACT

EXPERIMENTAL MODELING OF THE EFFECT OF COMPOSITE ARMOR DESIGN ON BALLISTIC PERFORMANCE

Muhammed Bahri BARUK

Turkish National Defense University, Alparslan Defense Sciences and National
Security Institute

Ankara, July 2022

The impact resistance of materials changes with which parameters and to what extent, that is, their behavior against impact, can be measured by impact tests. The shock waves generated by the explosives on the target as a result of the explosion are also be measured by a number of measurement techniques, and comments can be made on the energy absorption capabilities of the materials.

In this study, it is aimed to investigate the impact behavior of the Al 5083 matrix test material in the event of explosion, and thus to obtain information that can determine the effectiveness of armor designs using similar materials.

The test material was designed by placing 10 different materials, mainly alumina and steel ball, between two Al 5083 based plates. An impact was applied to one of the surface of the designed material with a weight drop test, and the output forces were measured from the back surface of the material using a dynamometer.

In the study, weight drop tests with 10 J energy were performed in the weight drop test device. Then, the tests were repeated by placing a polymer material on the front surface to make the forces applied to the front surface of the material more stable, and it was also modeled using the abaqus program.

The test results of the polymer and non-polymer design were compared with the numerical modeling results.

It has been seen that the input forces are lower when the front surface is supported by the polymeric structure, on the other hand, more energy dissipation occurs in the

polymer-free structures, and as a result of the comparison, the test results and numerical modeling results are compatible with each other.

The results were analyzed in terms of Specific Energy Absorption Capability (ÖEAK) and it was evaluated that ÖEAK could be a criterion in armor design.

Thus, by simulating an explosion event, a model has been developed that explains the energy absorption capability of the produced aluminum matrix composite armor system in an explosion event.

In this context, it is thought that the developed model will be beneficial in the evaluation of composite armors to be produced in different configurations.

Keywords: Drop Weight Test, Composite Armour, Impact Mechanics, Explosion Modeling, Specific Energy Absorption Capability (ÖEAK)

Science Code :

Pages :

Supervisor : Assist Prof.Dr. Col. Ayhan AYTAÇ

1. GİRİŞ

Ülkemiz, Afrika, Asya ve Avrupa'nın kesişim noktasında stratejik öneme sahip bir bölgede yer almaktadır. Zengin yeraltı kaynakları ve ticaret yollarının güzergahı üzerinde olması gibi sebepler, bu bölgenin geçmişten günümüze kadar her dönemde cazibe merkezi olarak görülmesine sebep olmuştur. Günümüzde de, enerji transferi, hava, deniz ve karayolu taşımacılığında geçiş noktası olarak cazibesini gitgide artırmaya devam etmektedir.

Bu coğrafyada, her alanda güçlü kalabilmek çok önemlidir. Bu da ancak teknolojik alanda iyi bir seviye yakalamakla mümkündür.

Teknolojik gelişim, kapalı ve açık dönem olmak üzere iki dönemde incelenmektedir. Kapalı dönemde devlet teknolojik evrime öncülük ederken, açık dönemde teknolojik evrimde özel sektör bayrağı devralmaktadır (Cronin, 2019).

Teknolojik gelişimin bu iki dönemi için en güzel örnek ARPANET'tir. ARPANET, Amerikan Savunma Bakanlığı bünyesinde çevrim içi askeri bir ihtiyaç olarak geliştirilmiş, daha sonra özel sektör marifetiyle bugün toplumda yediden yetmişe herkes tarafından kullanılan internet halini almıştır (Cronin, 2019).

Tarih boyunca askeri ihtiyaçlara yönelik çalışmalar, teknolojik gelişimde lokomotif rol oynamıştır. Askeri alandaki ihtiyaçlar, kapalı dönem teknolojik gelişim için bir başlangıç niteliğindedir. Bu ihtiyaçların en önemlilerinden birisi de korunma ihtiyacıdır. Zırhlar, korunma ihtiyacı sonucunda ortaya çıkan ürünlerdendir ve düşmanın vermek istediği ölümcül zararı yok etmek veya en azından azaltmak maksadıyla kullanılırlar.

Faydalarının yanısıra ağırlıkları dolayısıyla zırhlar, savaşan unsurların hareket, hız ve enerji verimliliği gibi kabiliyetlerinde kısıtlamalar getirebilmekte, maliyetleri nedeniyle yüksek harcamalara neden olabilmektedir. Bu nedenlerle daha hafif, daha ucuz ve koruyuculuğu daha yüksek zırh geliştirmek, her zaman önemli bir hedef olmuştur.

Alüminyum esaslı malzemelerin zırh geliştirilmesinde kullanılmaya başlaması da bu

problemin bir yansımasıdır. Zira alüminyum yüksek mukavemeti, kolay şekillendirilebilmesi, çeliğe göre daha hafif olması ve maliyetinin düşük olması sebepleriyle çalışmalarda öne çıkmıştır.

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin birbirinin zayıf yönlerini kuvvetlendirmek amacıyla üretilen yeni malzemelerdir. Kompozit malzeme çalışmalarıyla alüminyumun bazı özelliklerinin kuvvetlendirilmesi zırh üretimindeki cazibesini daha da artırmaktadır.

Malzemelerin darbeye karşı mukavemetinin hangi parametrelerle ne ölçüde değiştiği, yani darbeye karşı davranışı, darbe testleri marifetiyle ölçümlenebilmektedir. Bu testler, patlama yardımıyla veya bir silahla atış yapılarak doğal şartlarda gerçekleştirilebileceği gibi, bazı deneyler yardımıyla laboratuvar şartlarında da gerçekleştirilebilmektedir. Böylece hem gerçek şartlardaki riskler minimize edilmekte, hem de düşük maliyet ile sonuç alınabilmektedir. Çalışmamızda kullanılan ağırlık düşürme testi de bu yöntemlerden biridir.

Bu çalışmada kullanılmak üzere, belirli bir kalınlıkta 5083 serisi alüminyum iki plaka, üç sıra halinde belirli çaplarda seramik bilyelerle takviye edilmiş ve böylece yeni bir malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzeme, bir patlama olayıyla benzeştirilerek ağırlık düşürme testlerine maruz bırakılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı malzemelerin enerji sönmüleme kabiliyetlerinin anlaşılması için bir deney düzeneği tasarlamak ve giriş-çıkış kuvvetleri arasındaki ilişkiye dayanan bir model geliştirmektedir.

Bu kapsamda belirli bir kalınlıkta Al 5083 plaka arasına, 10 farklı tasarımda malzemeler yerleştirilerek, farklı malzeme kombinasyonları denenmiştir. Üretilen bu kompozit malzeme kombinasyonları ağırlık düşürme testlerine maruz bırakılmış, çıkış kuvvetlerinin ölçülmesi için, arka yüzeye de bir dinamometre yerleştirilmiştir.

Patlama olayında dalgalarının dairesel olarak yayıldığı göz önünde bulundurularak belirli çapta yarı küresel bir vurucu uç tercih edilmiştir.

Testlerde, kompozit malzemenin bir yüzüne 9,41 kg ağırlık düşürülerek 10 J enerji uygulanmış, diğer yüze yerleştirilen dinamometre marifetiyle malzemeye etki eden kuvvetler ölçülmüştür. Ağırlık düşürme test cihazından zamana bağlı olarak hız, yer değiştirme, enerji ve kuvvet değerleri ölçülmüştür.

Ağırlık düşürme test cihazı sonuçlarında, giriş kuvvetlerinin daha stabil olması için darbenin gerçekleştirildiği ön yüze polimer bir malzeme yerleştirilerek testler tekrarlanmış, ayrıca kullanılan ağırlık ve hız girdileri esas alınarak, sayısal modelleme de yapılmıştır.

Testler sonucunda polimerli ve polimersiz yapılara ait test sonuçları ile sayısal modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelenerek giriş kuvvetleri ile çıkış kuvvetleri birbiriyle karşılaştırılmış, buradan hareketle kompozit malzemenin zırh olarak kullanılması halinde, koruyuculuğu hakkında çıkarımlar elde edilmiştir. Test sonuçlarından Özgül Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti (ÖEAK) modeli oluşturulmuştur.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Literatürdeki Çalışmalar

Darbe ile ilgili çalışmalar, atış testleri, deneysel çalışmalar veya bilgisayar programları marifetiyle yapılan simülasyonlar olmak üzere üç kategoride yapılmaktadır. Bu çalışmalardan deneysel veriler ve bilgisayar simülasyonları, çalışmaların maliyetinin düşük olması nedeniyle çoğunlukla tercih edilmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda listelenmiştir;

İ.V.Akceylan tarafından hazırlanan, “Rijit bir zemin üzerindeki tabakalı kopozit levhanın düşük hızlı darbe hasarı” konulu yüksek lisans tezinde, E-Camı/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbeye karşı davranışı, ağırlık düşürme testi yardımıyla incelenmiştir. Çalışmada numune, 24 mm çaplı yarı-küresel uca sahip 30 kg vurucu kütlesi ile 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s çarpma hızlarında darbeye maruz bırakılmıştır. 7 mm kalınlığında 180x50 mm, 180x100 mm, 180x150 mm ebatlarında deney numuneleri kullanılan çalışmada, kuvvet-zaman değişimleri incelenmiş, ayrıca her bir vurucunun numune üzerinde oluşturduğu hasar alanları değerlendirilmiştir. Çarpma hızı arttıkça, darbe enerjisinin arttığı görülmüş, darbe enerjisi arttıkça, hasarın ve enerji emiliminin yükseldiği tespit edilmiştir (Akceylan, 2009).

D.Karaca tarafından hazırlanan, “Farklı kalınlık ve oryantasyon yüzdelilerindeki tabakalı kompozit levhaların düşük hızlı darbe enerjileri altında davranışlarının deneysel incelenmesi” konulu yüksek lisans tezinde, farklı kalınlıkta tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların düşük hızlı darbeye karşı davranışı, ağırlık düşürme test cihazı marifetiyle, birden çok numuneye farklı enerji seviyelerinde darbeler uygulanarak incelenmiştir. Darbe davranışı için, darbe enerjisi, tabaka kalınlığı ve vurucu kütle ağırlığı parametreleri irdelenmiştir. Ayrıca bir numune üzerinde delinme meydana gelene kadar tekraren yapılan darbe testleri ile geri sekme, nüfuziyet ve delip geçme darbe davranışları incelenmiş, darbe sonrası levhaların iç yapılarında oluşan hasar türleri mikroskop ile incelenmiş, hasar alanları ultrasonik C-scan analizi ile incelenmiş ve çentik derinliğinin zamana bağlı değişimi ise komparatör ile ölçülmüştür. Hasarlı ve hasarsız numunelerin burkulma testleri

yapılmış ve kritik burkulma dayanımları bulunmuştur. Darbe enerjisi ile yutulan enerji, maksimum temas kuvvetindeki enerji ve toplam yer değiştirmenin doğru orantılı olduğu, nüfuziyet gerçekleşinceye kadar temas süresinin enerji artışıyla arttığı, nüfuziyet sonrası azaldığı, en kalın numunede en yüksek temas kuvvetinin olduğu, kalınlık arttıkça yer değiştirmenin azaldığı tespit edilmiştir (Karaca, 2010).

L.Bozkurt tarafından hazırlanan, “Hibrit kompozit levhaların düşük hızlı darbe davranışı” konulu yüksek lisans tezinde, Tabakalanmanın etkisinin incelenmesi için farklı yığınlama sıralamalarıyla üretilen, E-cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı hibrit kompozit malzemelerin, geliştirilen cihaz marifetiyle, düşük hızlı darbe için ağırlık düşürme testine maruz bırakılmış ve malzemenin dinamik cevabı ile hasar davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar MATLAB bilgisayar programına yüklenmiştir. Söz konusu veriler üzerinden darbe sonrası elastik davranış ve enerji absorpsiyonları değerlendirilmiştir. Yapılan tasarımlar arasında, kompozit üretiminde karbonun dış yüzeyde planlandığı tasarımların, enerji absorpsiyon kabiliyetinin daha fazla olduğu görülmüştür (Bozkurt, 2011).

S.Yeşildal tarafından hazırlanan, “Darbe yüklerine maruz denizel kompozitlerde hasar mekanizmaları” konulu yüksek lisans tezinde, gemilerde iç bölme ve dekorasyonlarda kullanılabilecek maliyeti düşük, üretimi kolay kompozit malzeme araştırması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak, jüt bitkisinden elde edilen liflerden imal örme kumaş kullanılarak jüt-epoksi kompozit malzeme 4-10 mm arasında değişen altı farklı kalınlıkta ve tek plaka halinde üretilerek 100x100 mm ebatlarında kesilerek hazırlanmıştır. Her bir numuneye ağırlık düşürme metoduyla 10J değerinde darbe enerjisi uygulanmış, bu işlem malzeme delininceye kadar her defasında 10J artırılarak tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda numune kalınlığı arttıkça, darbe enerjisine karşı delinme eşik değerinin de arttığı görülmüş, numune kalınlığı ile delinme eşik kuvveti arasındaki grafiğin lineer olduğu ve eğim değerinin 2,8 olduğu tespit edilmiştir. Buradan hareketle, aynı özelliklerde üretilmiş farklı bir kalınlıktaki malzemenin dayanabileceği darbe enerjisinin hesaplanabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Yeşildal, 2010).

S. Fidan tarafından hazırlanan, “Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarın mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi” konulu doktora tezinde, polimer matrisli cam fiber ve aramid+cam fiber takviyeli hibrit kompozitler üretilmiştir. Üretilen numuneler, ağırlık düşürme metoduyla, düşük hızlı

darbe yüklerine maruz bırakılmış, testlerde dört farklı çapta, yarı küresel ve düz olmak üzere iki farklı geometride darbe ucu kullanılmıştır. Numuneler, darbe testleri sonrasında görsel, ultrasonik tarama, termal kamera incelemesi, röntgen, bilgisayarlı tomografi (CT) ve mikro bilgisayarlı tomografi (mikro-CT) gibi yöntemlerle tahribatsız olarak incelenmiş ve iç yapı hasarları ortaya konmuştur. Darbe ucu çapının etkisinin ortaya konması ve kompozitlerin darbe sonrası hasar mekanizmalarının ayrıntılı bir şekilde karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Darbe testleri sonrası, tıp alanından yaygın olarak kullanılan mikro-CT cihazının, mikron seviyesinde çözünürlüklerde içyapı görüntüleri sağlamasının kompozitlerde ortaya çıkan matris hasarı, fiber kırılması ve delaminasyon gibi hasar mekanizmalarını incelemede avantajlar sağladığı görülmüştür. Ayrıca, Cam fiber takviyeli kompozitin 80 J enerji seviyesinde tam delindiği tespit edilmiştir (Fidan, 2011).

Y.Kutlay tarafından hazırlanan, “Değişik uç geometrilerine sahip fiberlerle güçlendirilmiş polyester kalsit kompozit malzemenin darbe davranışının incelenmesi” konulu yüksek lisans tezinde, deney için üç değişik şekilli fiber çubuklarla güçlendirilmiş polyester kalsit kompozit malzeme, 40, 80 ve 120 °C olmak üzere üç ayrı sıcaklıkta fırınlanarak üretilmiş ve düşük enerjili ağırlık düşürme testlerine maruz bırakılmıştır. Böylece yüksek ve düşük sıcaklıklarda kürlenmenin darbe davranışına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Deneyler sonucunda, kullanılan fiberin malzemesinin, şeklinin ve hacim oranının kompozitin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilediği anlaşılmış, 120 °C sıcaklıkta fırınlanmış numunelerin diğerlerinden daha fazla enerji absorbe ettikleri görülmüştür (Kutlay, 2012).

M.Ç.Erik tarafından hazırlanan, “Otomotiv gövde imalatında kullanılan polimer malzemelerin enerji sönümleme yeteneklerinin incelenmesi” konulu yüksek lisans tezinde, 4 farklı otomobil üreticisinin ürettiği otomobillere ait gövde imalatında kullanılan, PP ve EPDM katkılı polimerlere, değişik kalınlıklarda ve 3 farklı hızda ağırlık düşürme testleri yapılarak, darbeye karşı enerji sönümleme kabiliyetleri incelenmiştir. Elde edilen veriler, absorbe edilen enerji-uzama, gerilme-yer değiştirme ve hız zaman grafiklerinde gösterilmiştir. Tamponların et kalınlığının artmasının, enerji sönümlemeye önemli bir katkısının olmadığı, buradan hareketle tamponların daha ince üretilmesinin araç ağırlığını azaltması sonucu egzoz gazı emisyonlarına olumlu katkısının olduğu değerlendirilmiştir. Darbenin

durdurulamadığı ve malzemenin delindiği 10 m/s hızın sınır değeri olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, kavis ve bombenin fazla olduğu tampon tasarımlarında, enerji sönmeme kabiliyetinin diğer tasarımlara oranla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Erik, 2019).

H.Masuya ve arkadaşları tarafından, “Experimental study on the perforation of steel fiber reinforced concrete slab by impact” başlıklı çalışmada, çelik elyaf takviyeli kompozit beton üretilerek, ağırlık düşürme testine tabi tutulmuştur. Deney numuneleri, üç ayrı malzeme kalınlığı ve üç ayrı lif hacmi ile üretilmiştir. Deneyler sonucunda, darbeye karşı mukavemetin, çelik elyaf lif miktarına bağlı olduğu görülmüştür (Masuya vd., 2000).

M.Uyaner ve arkadaşları tarafından, “Experimental study of the impact behavior of laminated composites stricken by sharp impactors” başlıklı çalışmada, E-camı/epoksi esaslı laminat kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerden 180x50 mm ebatlarında ve 7 mm kalınlıkta 18 kattan oluşan deney numuneleri hazırlanarak, 20 kg ağırlık, 2,5 m/s hızla ağırlık düşürme testlerine tabi tutulmuştur. Testlerde, 120° ve 90° konik, 24 mm ve 12 mm çaplı yarı küresel, 120° piramit olmak üzere 5 farklı uç geometrisi kullanılmıştır. Yapılan incelemede, temas kuvvetinin, 90° konik uçlu darbede en küçük, 24 mm yarı küresel uçlu darbede en büyük olduğu, piramidal uçlu darbede, enerji emiliminin en yüksek olduğu görülmüştür (Uyaner & Kara, 2012).

H.Ku ve arkadaşları tarafından, “Drop Weight Impact Test Fracture of Vinyl Ester Composites” başlıklı çalışmada, normal ortam şartlarında ve mikrodalga ortamında olmak üzere iki ayrı şekilde üretilen vinil ester parçacıklı kompozit yapıların darbe dayanımları, ağırlık düşürme metodu ile incelenmiştir. Mikrodalgada üretilen numuneler, 180 ve 360 W mikrodalga radyasyonuna 30, 35 ve 40 s maruz bırakılarak üretilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, 400 mm yükseklikten düşürme testi uygulandığında, mikrodalga ortamında üretilen malzemelerin ezildiği ve kırılmama eğilimi gösterdiği, normal ortam koşullarında üretilen malzemelerin kırılma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir (Ku vd., 2005) .

M.Bakır ve arkadaşları tarafından, “Aromatic Thermosetting Copolyester Foam Core and Aluminum Foam Face Three-Layer” başlıklı çalışmada, iki alüminyum tabaka arasında, köpük yapılı bir malzeme sentezlenmiş, sentezlenen malzeme kimyasal

uygulamayla alüminyum tabakalara yapıştırılmış ve kompozit yapıda farklı kalınlıkta malzemeler üretilmiştir. Malzemeler, ağırlık düşürme testi ile 90 J ve 200 J enerjiye maruz bırakılmıştır. 90 J enerjiyle yapılan testlerde, 1,25 ve 2,5 cm kalınlığındaki alüminyum köpüklerin 3 kN maksimum yüke dayanabildiği, sandviç yapının ise 90 J enerjinin tamamını sönümlediği görülmüştür. 200 J enerji ile yapılan testlerde, sandviç yapının 150 J enerjiyi absorbe edebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, aynı kalınlıktaki sandviç yapıdaki kompozit malzemenin, köpük malzemeye kıyasla enerji sönümlemesinin dört kat fazla olduğu tespit edilmiştir (Bakır vd., 2017).

S.E.ÖZGÜLTEKİN tarafından hazırlanan, “Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi” konulu yüksek lisans tezinde, kişisel koruyucu zırh olarak kullanılan kompozit malzemelerin balistik davranışı hem deneysel hem de bilgisayar ortamında incelenmiştir. Çalışmada, aramid kumaş, karbon fiber, epoksi reçine ile takviye edilmiş polipropilen bal peteği yapısı ve epoksi reçine ile tabakalaştırılmış çelik elek teli, tabakalar halinde farklı kombinasyonlarda dizilerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelere, Safir T14 uzun namlulu tüfek ve Yavaşçalar 36 kalibre tek kurşun fişek kullanılarak belirli bir mesafeden atışlar yapılmıştır. Atışlar sonucunda, malzeme dizilişlerinin darbeye karşı direnci önemli ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bazı kombinasyonların insan bedenini, 10 m mesafeden 700 m/s hıza sahip mermiye karşı koruduğu görülmüştür (Özgültekin, 2012).

R.Hosseinzadeh ve arkadaşları tarafından, “Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected” başlıklı çalışmada, ince cam elyaf takviyeli plastik, kalın cam elyaf takviyeli plastik, karbon fiber takviyeli plastik ve karbon cam elyaf takviyeli plastik olmak üzere dört farklı fiber takviyeli kompozit plaka, ağırlık düşürme testlerine tabi tutulmuştur. Testlerde, 2,5 ve 5,5 kg ağırlığında kütleler ile 30, 50 ve 100 J enerji seviyesinde darbeler gerçekleştirilmiştir. Hasar bölgeleri, ultrasonik tahribatsız muayene yöntemiyle de incelenmiş, ayrıca çalışma elektronik ortamda da ANSYS LS DYNA V6.1 kullanılarak modellenmiş, hasar bölgesi şekillerinin, testlerden elde edilen verilerle uyum sağladığı görülmüştür. Kalın ve ince cam elyaf takviyeli plakaların, düşük enerji seviyesinde hasar gördüğü, karbon/cam hibrit kompozit plakaların ise hasar görmediği ve %30 ağırlık tasarrufu sağlaması nedenleriyle havacılık endüstrisinde kullanımının tavsiye edilebileceği, sayısal modelleme ile malzemelerin hasar eşiğinin tahmin edilebileceği sonucuna

ulaşılmıştır (Hosseinzadeh vd., 2006).

Slawinski ve arkadaşları tarafından, “Modelling and Numerical Analysis of Explosion Underneath the Vehicle” başlıklı çalışmada, zırhsız ve hafif zırhlı araçların patlama yüküne maruz kalışı CATIA, HyperMesh, LS-PrePost, LS-Dyna programları kullanılarak modellenmiştir. Modellemede, aracın zeminine 8 mm ek metal zırh ve daha sonra 50 mm alüminyum alaşım monte edilmiştir. Aracın altında merkezi bir yerde 0,5 ile 10 kg arasında TNT eşdeğerlerinin patladığı kabul edilmiştir. Zırhlandırılmış ve zırhlandırılmamış araçlarda yer değiştirmenin zamana karşı değişimi incelenmiş, alüminyum kaplanmanın olmadığı durumda yer değiştirmenin daha fazla olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, alüminyum esaslı düşük yoğunluklu bir malzeme kullanılarak zırhlandırılmış araçlarda patlamanın etkisinin önemli ölçüde azaltılabileceği tespit edilmiştir (Sławiński vd., 2017).

B.Bitlisli tarafından, “Zırhlı Araçlarda kullanılan kompozit zırh malzemelerinin balistik performansının incelenmesi” konulu yüksek lisans tezinde, UHMWPE (Ultra Hight Molecular Weight Polyethylene-Yüksek Yoğunluklu Polietilen), Aramid, Karbon, Karbomid ve Cam Elyafı kullanılarak, sıcaklık ve presleme ile birleştirilmek suretiyle üretilen kompozit malzemelerin NİJ standartlarına uygun olarak beş metre mesafeden 8 gram ağırlığında çekirdeği olan 9x19 parabellum FMJ fişekler ile atışlar yapılmış, plakaların üretimindeki proses farklılıkları, plakaların ağırlığı, oluşan deformasyonlar, plakaların kalınlıkları, elyafların alansal yoğunlukları, elyafların dokuma tipleri, kat sayıları, mermi giriş delikleri ve varsa çıkış delikleri karşılaştırılmıştır. UHMWPE ve Karbon elyafı numunelerin kurşun çekirdeğini durdurduğu, Aramid+UHMWPE ve Cam elyafı numunelerde kurşun çekirdeğinin geçtiği, Karbomid elyaf numunede ise kurşun çekirdeğinin numunenin tam arka yüzeyinden çıkıp orada kaldığı tespit edilmiştir (Bitlisli, 2019).

Y.Yanfei ve arkadaşları tarafından, “Energy absorption among layers in the multiply system under ballistic impact “ başlıklı çalışmada, kumaş dokumanın balistik davranışı anlaşılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, Twaron düz dokuma 0,20 mm kalınlığında 1,2,3,6 ve 9 katmanlı kumaşlar birleştirilerek 0,20-0,40-0,60-1,20 ve 1,80 mm kalınlığında paneller elde edilmiştir. Elde edilen deney materyaline, 5,5 mm çaplı 483 m/s hızlı ve 1 gr ağırlığa sahip silindirik mermilerle atışlar gerçekleştirilmiştir. Farklı katmanların enerji absorpsiyonunun anlaşılabilmesi amacıyla, enerji absorpsiyonunun yoğunluğa bölünmesiyle elde edilen Spesifik

Enerji Absorpsiyonu (SEA) değeri kullanılmıştır. Ayrıca, FE simülasyon modelleme ile deneyler modellenmiştir. Katman sayısı arttıkça, SEA değerinin ve ön katmanların enerji absorpsiyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Ek katman sayısı arttıkça, ön katmanların enerji absorpsiyonunun azalmasının belirli bir sınır değere ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, enerji emiliminin, ön katmanlarda arkaya doğru arttığı, ancak artışın katmanların enine deformasyonlarının kısıtlı olması nedeniyle lineer olmadığı görülmüştür. Buradan hareketle, optimum koşullarda enerji absorpsiyonunun, farklı özelliklerde katman malzemeleri kullanılarak, maksimum enerji absorpsiyonuna imkan sağlayacak şekilde zırh tasarlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Y. Yang & Chen, 2014).

E.Randjbaran ve arkadaşları tarafından, “ Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar/Carbon/Glass Woven Fabrics for Ballistic Impact Testing” başlıklı çalışmada, kompozit malzemelerin dizilişinin balistik performansa etkisi incelenmiştir. Çalışmada, kevlar, karbon, cam dokuma kumaş reçine ile birleştirilerek, 6 katmanlı farklı dizilişlere sahip 5 kompozit malzeme üretilmiştir. Tüm numuneler, eşit kütle, şekil ve yoğunluğa sahip olacak şekilde malzemelerin sırası değiştirilerek tasarlanmıştır. Deney düzeneği, NIJ Standardı 0108.01 [10]'a göre hazırlanmıştır. Üretilen kompozit zırh malzemesi, laboratuvar ortamında yüksek hızlı kameralarla hızın ölçüldüğü atışlı darbe testlerine maruz bırakılarak, enerji absorpsiyonları incelenmiştir. Malzemelerin diziliş sırasının enerji absorpsiyonunda önemli bir etken olduğu anlaşılmıştır (Randjbaran vd., t.y.).

G.L.Farley tarafından, “Energy Absorption of Composite Materials” başlıklı çalışmada, grafit/epoksi, kevlar/epoksi ve cam epoksi formlarında üretilen üç ayrı kompozit silindirik malzeme(tüp), dikey ekseninde statik basma ve ağırlık düşürme testleri ile dinamik yüklere maruz bırakılmış ve enerji absorpsiyonları incelenmiştir. Ağırlık düşürme testlerinde, 45 kg ağırlık ile 7,6 m/s hızla testler yapılmıştır. Grafit-epoksi tüpün alüminyuma oranla daha fazla enerji absorbe ettiği, Kevlar epoksi malzemenin ise ezilme sonrası daha iyi malzeme bütünlüğü gösterdiği görülmüştür. Boru çapının, duvar kalınlığının, kat oryantasyonunun ve matris malzemelerinin enerji absorpsiyonu üzerinde etkili olduğu belirtilerek, daha sonra grafit-epoksi tüp ile alüminyum tüp karşılaştırılmış ve testler sonucunda, grafit epoksi malzemenin alüminyum malzemeye oranla daha fazla enerji emdiği tespit edilmiştir (Farley, 1983).

M.Quaresimin ve arkadaşları tarafından, “Energy absorption in composite laminates under impact loading” başlıklı çalışmada, dokuma karbon epoksi kompozitin karşı ağırlık düşürme testi ile düşük hızlı darbeye karşı davranışı incelenmiştir. Deney Materyali, karbon dokuma kumaş ve standart sertleştirilmiş epoksi matrinden farklı istifleme sıraları ve farklı kalınlıklarda otoklavla kalıplanmış kare paneller olarak üretilmiştir. 1,84 kg vurucu ağırlığı, 12,7 mm yarı küresel vurucu ucu, 1,5-10 J enerji ve 1,3-3,3 m/s hız aralığında deneyler yapılmıştır. Daha sonra numuneler, hasar mekanizmalarını araştırmak ve anlamak için nüfuz edici geliştirilmiş X-ışınları, optik mikroskop ve ultrasonik kat-kat Cscan ile analiz edilmiştir. Malzemede, sönümlenen enerjinin istifleme sırasına ve laminat kalınlığına bağlı olduğu ve darbe enerjisiyle hemen hemen orantılı olduğu görülmüştür (Quaresimin vd., 2012).

R.Karakuzu ve arkadaşları tarafından, “Tabakalı Kompozit Plakların Darbe Davranışı Üzerine Deniz Suyu Etkisinin Araştırılması” başlıklı çalışmada, 0^0 , 30^0 , 60^0 ve 90^0 oryantasyonuna sahip cam lifi-epoksi tabakalı kompozit plakalardan 135 adet hazırlanmış, deniz suyunda 1, 3, 6 ve 9 ay bekletilmiştir. Kuru ve bekletilmiş numunelere; 5, 10, 15 kg ağırlıklar ile 10, 20 ve 30 J enerji ile ağırlık düşürme testine tabi tutulmuşlardır. Numunelerde en fazla çökmenin ve absorbe edilen maksimum enerjinin 15 kg, 30 J ağırlık ile yapılan testlerde olduğu, hasar alanının 9 ay bekletilen numunede maksimum değerine ulaştığı tespit edilmiştir (Karakuzu vd., 2017).

2.2. Literatür Değerlendirmesi

Literatür araştırmasında incelenen çalışmalardan, darbe etkisi araştırmalarının, otomotiv endüstrisinden, havacılığa, askeri zırh araştırmalarından, inşaatla kadar pek çok konuya açıklık getirmek amacıyla çalışıldığı anlaşılmaktadır.

Çalışmalarda, genellikle darbe testlerinin; maliyet, hız, uygulama ve modelleme kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle tercih edildiği, ayrıca testlerin atışlı uygulamalar ve/veya bilgisayar programlarıyla modellenerek doğrulandığı görülmektedir.

Deney tasarımlarının, test edilecek malzeme özelliği, malzemenin kullanım alanı, çalışmanın hedefi ve deney numunesinin özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak ağırlık düşürme testleri için ufak farklılıklarla amaca göre kolayca tasarlanabildiği ve bu sebeple test tercihinde ön plana çıktığı anlaşılmaktadır.

Köpük malzemeler enerji sönümleme kabiliyeti, yoğunluk, iç yapı özellikleri, ısı-

elektrik iletkenliği gibi özellikleriyle farklılık göstermekte ve ayrıca fiziksel ve mekanik özellikleri enerji sönümlene kabiliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Patlamanın oluşturduğu şok dalgalarının malzemelerin dış yüzeyini etkilemesi sonucu, iç yüzeylerinde oluşan kuvvetler sebebiyle enerji sönümlene kabiliyetleri önem kazanmaktadır.

Literatürde, bunun ölçülmesiyle ilgili teknikler geliştirilerek arka/serbest yüzeydeki etkisini ölçen geliştirilmiş bir takım modeller oluşturulmuş, ancak; ağırlık düşürme testleri (deney plakasının ön yüzünden ölçüm (giriş kuvveti)) ve bir kuvvet ölçüm sisteminin (deney plakasının arka yüzünden ölçüm (çıkış kuvveti)) beraber tasarlandığı bir deneysel çalışmaya rastlanmamıştır.

Literatürde yer alan ağırlık düşürme testleri çoğunlukla malzemenin bir yüzüne etki eden kuvvetleri ölçmek veya malzemenin darbeye karşı hangi davranışı sergilediğini anlamak amacıyla kullanılmaktadır.

Malzemenin arka yüzeyine etki eden kuvvetlerin anlaşılması amacıyla bu testlere ilave olarak arka yüzeye dinamometre yerleştirilmesi ve böylelikle giriş kuvvetlerinin arka yüzeydeki etkilerinin neler olacağı anlaşılacak istenmiştir.

Bu sebeplerle çalışmada, patlamanın malzemenin ön ve arka yüzeyindeki etkisinin araştırılması için ağırlık düşürme testi ile dinamometrenin beraber kullanıldığı bir test düzeneği geliştirilerek bir model oluşturulmuş ve bu şekilde literatüre bir test tekniği kazandırılması hedeflenmiştir.

3. BALİSTİK VE ZIRHLARA GENEL BAKIŞ

3.1. Balistik

Balistik, Fransızca kökenli “balistique” kelimesinden gelmekte olup mühimmatın namlu içinde ve dışındaki hareketleri ile hedef üzerindeki etkisini inceler. Namlu içinde iç balistik, namlu dışında dış balistik ve hedef üzerinde ise hedef balistiği olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir (Özgültekin, 2012).

Mermiyle zırhın buluşmasında, üç durum ortaya çıkar (Özgültekin, 2012) ;

Birinci durumda, mermi zırhı delemmez, zırha saplanır veya zırhın yüzeyine sıvanır. Bu durumda çarpışma esnasında merminin, zırhın enerji sönümleme kapasitesinin altında bir enerjiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

İkinci durumda, mermi zırhı deler ancak yoluna devam edemez. Bu çarpışmada, merminin enerjisi zırhın enerji sönümleme kapasitesine eşittir. Bu durumda merminin hızı balistik limit olarak adlandırılmaktadır (Aslan, 2020).

Üçüncü durumda, mermi zırhı deler ve yoluna devam eder. Bu durum, çarpışma esnasında merminin zırhın enerji sönümleme kapasitesinden daha fazla enerjiye sahip olduğu anlamını taşımaktadır.

Bir zırhın tasarlanmasında, çarpma esnasında merminin taşıdığı enerjinin tek başına dikkate alınması yeterli değildir. Merminin şekli, darbenin açısı, zırhın şekli ve tasarımı gibi unsurlar çarpışma sonucunu etkilemektedir.

3.2. Yanma ve Patlama

Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile ısı ve ışık yayarak reaksiyona girmesidir. Yanma olayının gerçekleşmesi için yanıcı madde, başlangıç ısı ve oksijenin aynı ortamda bir arada bulunması şarttır (İşyarlar & Kirbaş, 2016).

Oksijenin fazla olduğu ortamda tam yanma, az olduğu durumlarda ise eksik yanma meydana gelir. Tam yanmada yanma ürünleri arasında diğer ürünlerin yanısıra karbon dioksit (CO₂) ortaya çıkarken, eksik yanmada karbon monoksitin yanısıra çok zehirli bir madde olan karbon monoksit de (CO) oluşur (İşyarlar & Kirbaş, 2015).

Patlama, bir çeşit yanmadır ve ekzotermik bir reaksiyondur. Yani reaksiyon sonucunda ısı açığa çıkar. Tüm patlamalarda büyük miktarda ve ani olarak gaz ve ısı çıkışı oluşur ve bunlara bağlı olarak yüksek basınç meydana gelir. Reaksiyon çok hızlı gerçekleşir (Özcan, 2017). Her patlamanın bir yanma olayı olduğu söylenebilir. Ancak, ani olarak yüksek miktarda gaz ve ısı çıkışı ile basıncın beraber ortaya çıkmadığı yanma patlama olarak nitelendirilemez (Akçay, 2010).

3.3. Patlayıcı Maddeler ve Sınıflandırması

3.3.1. Patlayıcı Maddeler

Patlayıcı maddeler, kimyasal enerji depolayan, darbe, sürtünme, kıvılcım veya şok gibi dışarıdan gelen bir etki sonucu hızla kimyasal reaksiyona giren, ani olarak büyük miktarlarda ısı ve gaz yayan kimyasal maddelerdir (Akçay, 2010).

Patlama için dışarıdan oksijen almaya ihtiyaç duymaksızın hızlı bir şekilde reaksiyona girerek yüksek miktarda ısı ve basınç açığa çıkaran maddeler enerjik veya enerjetik maddeler olarak adlandırılmaktadır (Şen & Bozkuş, 2019). Enerjik maddelerde oksijen balansı önemlidir. Burada, oksijen miktarının fazlalığı, azot oksit oluşmasına, azlığı ise eksik yanma meydana geleceği için karbon monoksit (CO) oluşumuna yol açar (Dağçimen, 2006).

Patlayıcılar, dışarıdan gelen etki veya şok sonucu kimyasal reaksiyona girmemeleri veya kimyasal reaksiyon sonucu ısı ve gaz açığa çıkaramamaları halinde patlayıcı olarak kabul edilmezler. Örneğin azot ve oksijen kimyasal reaksiyona girerek azot oksit meydana getirdiklerinde, ortama ısı vermeyip aksine ortamdan ısı çektiklerinden patlayıcı olarak kabul edilmezler (Akçay, 2010).

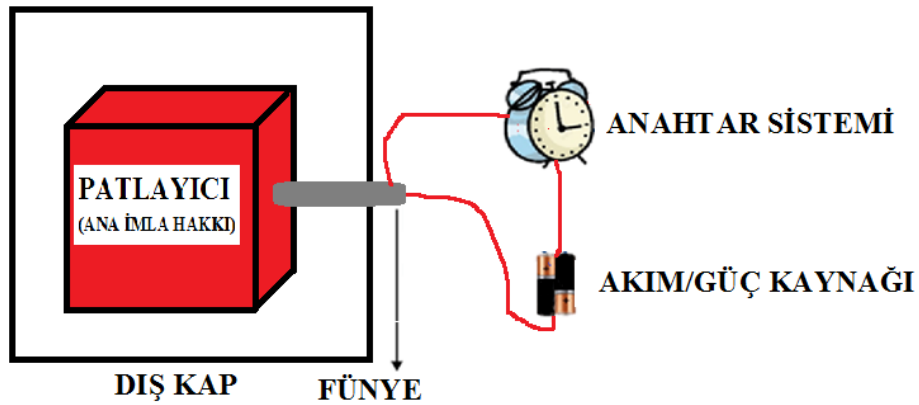
4536 Sayılı “Denizlerde ve Yurt Yüzeyinde Görülen Patlayıcı Madde ve Şüpheli Cisimlere Uygulanacak Esaslara İlişkin Kanun”da patlayıcı maddeler tanımlanmış, Kanun kapsamında hazırlanan “Denizlerde ve Yurt Yüzeyinde Görülen Patlayıcı Madde ve Şüpheli Cisimlere Uygulanacak Esaslara İlişkin Yönetmelik” Yönetmelik’te; “El Yapımı Geliştirilmiş Patlayıcı Madde ve Düzenler İle Bombalar; Öldürmek, tahrip etmek, zarar vermek, şeklini bozmak, ilgiyi başka yere çekmek, taciz etmek için standart dışı olup, elde mevcut veya temin edilebilen askerî, ticarî, sanayi ziraî veya tıbbî amaçla imal edilmiş malzemelerin amacı dışında el ile veya başka usullerle bir araya getirilmesi ve yerleştirilmesi ile yapılmış patlayıcı düzenekleri ifade eder” olarak tanımlanmıştır.

El Yapımı Patlayıcılar (EYP) ise, “taciz etmek, şaşırtarak dikkat dağıtmak, zarar vermek, işlevini bozmak veya yok etmek maksatlarıyla yıkıcı, tahrip edici, zehirleyici veya öldürücü kimyasalları bünyesinde barındıran el yapımı veya başka usullerle bir araya getirilmiş düzenekler” olarak tanımlanmaktadır (Kılıç, 2020).

Patlayıcı maddelerin askeri ve sivil kullanım alanları mevcuttur. Bunlar, ulaşım-yol yapım projeleri, baraj projeleri, su-yapı projeleri, madencilik, taşocağı işletmeleri, tünel-kanal projeleri, sert kayaçların patlatılması projeleri ve benzeri faaliyetler olarak sıralanabilir (Gümüşçü vd., 2016).

EYP’lerin terör örgütlerince sıklıkla tercih edilmesinin sebebi, eylemin daha az kişi ile yapılabilmesine, düşmana verilecek zararın artırılmasına ve dikkat çekmeden kolayca kaçma olanağı sağlamasıdır. Bomba düzenekleri, intihar bombacılarının üzerlerine, tekerlekli araçlara, yol kenarlarına veya menfez altlarına yerleştirilerek kullanılabilmektedir (Şen vd., 2015).

Basit bir El Yapımı Patlayıcı (EYP) düzeneği başlıca 5 ana unsurdan oluşur. Bunlar, anahtar sistemi/komuta düzeneği, akım/güç kaynağı, başlatıcı/fünye, dış kap ve ana imla hakkı/patlayıcı maddedir. Ayrıca bazı EYP düzeneklerinde tercihen emniyet anahtarı da bulunabilmektedir (Kılıç, 2020). Basit bir EYP düzeneği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Basit Bir EYP Patlayıcı Düzeneği

3.3.2. Patlayıcıların Sınıflandırılması

Tarihte bilinen ilk patlayıcı kara baruttur. Keşfedildiği tarih tam olarak bilinmemekle birlikte, 1200’lü yıllarda tesadüfen, martı dışkısından Çin’de keşfedildiği görüşü hakimdir. Barutu askeri alanda ilk kullananlar İngilizlerdir. Barut, 1300’lü yıllarda

tabanca patlayıcısı, 1600'lü yıllarda ise tahrip edici olarak kullanılmıştır. Patlama için gerekli olan oksijeni bünyesinde barındıran enerjik maddelerle ilgili 1800'lü yıllardaki keşifler patlayıcı maddeler alanında çığır açmış, enerjik maddeler 1900'lü yıllarda da geliştirilmeye devam etmiştir (Şen, 2013).

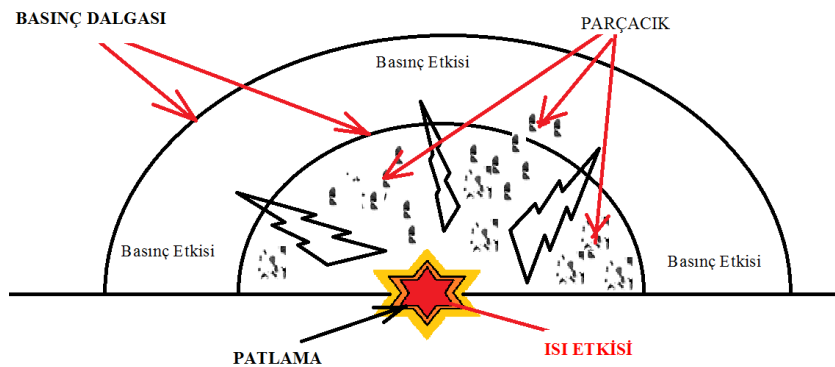
Patlayıcı maddeler sınıflandırılırken, kimyasal özellikleri, üretim şekilleri, kullanım amaçları ve ateşleme hızları göz önünde bulundurulur. Bu sebeple bir patlayıcı, birden çok sınıfa dahil olabilmektedir.

Bazı sınıflar daha alt sınıflara da ayrılmaktadır. Örneğin; kimyasal yapıları ve saflıkları, kimyasal özelliklerine göre sınıflandırmanın alt sınıflarıdır.

Terör örgütleri tarafından kullanılan patlayıcılar, yüksek hızlı patlayıcılar olup terörün yanısıra madencilik, yıkım veya askeri alan gibi değişik amaçlarla da kullanılırlar. 1000-9000 m/s aralığında patlama hızlarına sahiptirler (Hışır, 2013), (Sağlam, 2011).

3.4. Patlama Sonucu Oluşan Ürünler ve Patlamanın Etkileri

Patlama sırasında, patlayıcı bünyesinde bulunan maddeler, ani olarak hızlı bir şekilde gaz haline geçerler. Eş zamanlı olarak çevreye, çok büyük miktarlarda enerji yayılımı meydana gelir (Keshavarz & Nazari, 2006). Büyük miktarlarda ve aniden ortaya çıkan enerji, patlamanın merkezinde ve çevresinde şiddetli bazı etkilere sebep olur. Kullanılan patlayıcı miktarı, patlayıcı cinsi gibi faktörler ortaya çıkan enerji miktarını etkilemektedir. Patlama sonucu Basınç, Isı, Enerji ve Parça/Parçacık meydana gelirken, patlamanın merkezinden uzaklaştıkça etkisinin azalacağını söyleyebiliriz. Şekil 3.2.'de bu etkileri görebiliriz.



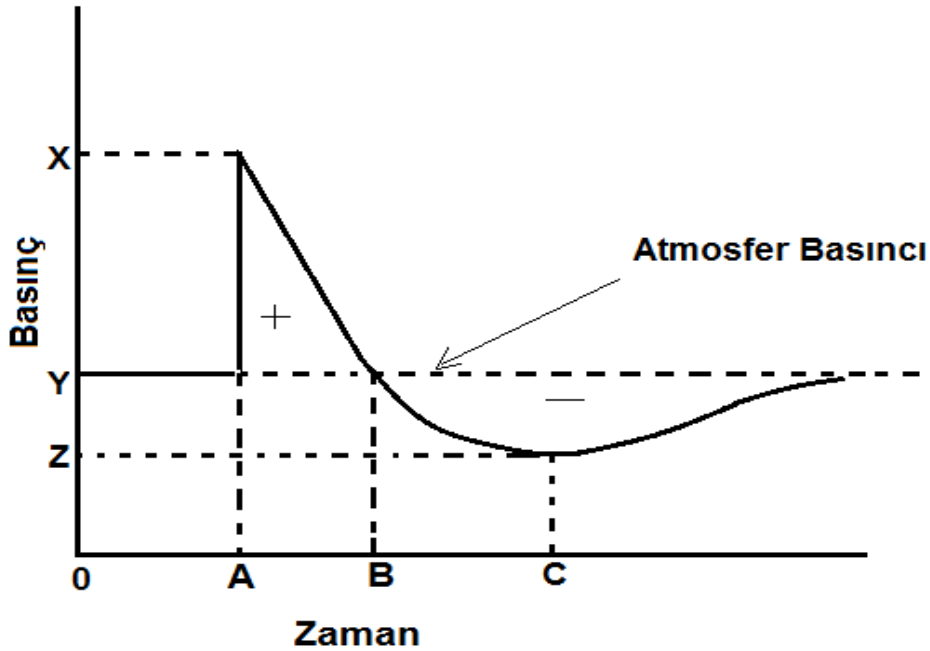
Şekil 3.2 Patlamanın Etkileri

3.4.1. Basınç

Patlamada, kimyasal reaksiyon sonucunda büyük miktarlarda gaz çıkışı ve sıcaklık artışı meydana gelir.

Açığa çıkan gazlar, devasa miktarlarda enerji yüklü oldukları için patlamanın merkezinden, basıncın düşük olduğu dış kısma doğru aniden büyük bir hızla hareket etmeye çalışır. Bu sıkışık durum, gazların kinetik enerjisinin çok yüksek olmasının bir sonucudur. Devasa bir basınç meydana geldiği anlamını taşımaktadır. Söz konusu basınç dalgalar halindedir ve birbirini havada itmek ister.

Patlamanın merkezinden uzaklaştıkça, sıkışmanın azalması sebebiyle mesafeye bağlı olarak gücünü kaybeder ve basınç giderek azalır. Oluşan bu basınç dalgasının yönü, öncelikle patlamanın merkezinden dışarıya (pozitif yöne) doğru etki ederken, patlamanın merkezinde basıncın iyice azalmasıyla beraber patlamanın merkezine (negatif yöne) doğru yönelmektedir. Basınç etkisi blast olarak da adlandırılmaktadır. Bu pozitif ve negatif basınç dalgalarını, aşağıdaki şekilde grafik halinde gösterebiliriz (Kinney & Graham, 1985).



Şekil 3.3 Basınç-Zaman Grafiği

G. F. Kinney ve K. J. Graham, Explosive Shocks In Air, 2. New York: Springer Science+ Business Media, LLC, 1985. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: DOI:10.1007/978-3-642-86682-1'den uyarlanmıştır.

Grafikten de anlaşılacağı üzere, patlamanın başlangıcında (A noktasında), basınç ani bir şekilde artmaktadır. Burada patlamanın merkezinden dışarıya doğru bir pozitif basınç dalgası yayılmaktadır. Pozitif basınç etkisini yitirdikten sonra, B noktasında bir an dengelenir ve daha uzun süreli negatif bir basınç etkisi gerçekleşmeye başlar. Negatif basınç ile kıyaslandığında pozitif basıncın etkisi, süre açısından daha kısa, basınç farkı (X-Y) açısından ise daha yüksektir (Kinney & Graham, 1985).

Negatif basınç dalgası, pozitif basınca oranla daha güçsüzdür.(Y-Z) Ancak, pozitif basınç dalgasından hemen sonra oluştuğu ve pozitif basıncın etki ettiği yönün aksi istikamette etki ettiği için yıkıcı etkisi daha büyüktür. Asıl yıkıcı etki de bu sebeple büyük olur.

Ayrıca, negatif basınç dalgasının, pozitif basınç dalgasının etrafa fırlattığı cisimleri patlama merkezine doğru çekmesi de bu etkiyi artıran diğer bir faktördür.

3.4.2. Açığa Çıkan Isı

Sıcaklık artışı, patlama sırasında oluşan kimyasal reaksiyonun bir sonucudur. Açığa çıkan enerji ya da ısı “patlama ısısı” olarak adlandırılmaktadır. Patlama ısısı, tanımından da anlaşılacağı üzere, patlayıcı maddenin bir ekzotermik (ısı veren) reaksiyon sonucu infilak etmesi sürecinde açığa çıkan enerjidir (Simic vd., 2016).

Genel olarak, patlamanın merkezindeki sıcaklık ve basınç yükselmesinin merkezden uzaklaştıkça ve zamana bağlı olarak azaldığı söylenebilir (Gümüşçü vd., 2016). Gücü yüksek patlayıcıların, gücü düşük patlayıcılara oranla daha yüksek ısı açığa çıkardığı, ancak patlamanın etkisinin daha kısa sürdüğü söylenebilir.

3.4.3. Parça/Parçacık Etkisi

Patlayıcının patlaması esnasında, dış kap olarak kullanılan malzemeler, patlamanın etkisiyle parçalanır. Ortaya çıkan enerjinin bir kısmını kinetik enerji olarak bünyesine alır ve büyük bir hızla rastgele yönlerle doğru hareket etmeye başlar. Parçacıklar o kadar hızlıdır ki, etrafa büyük zararlar verebilirler (Mazonka & Shine, 2012).

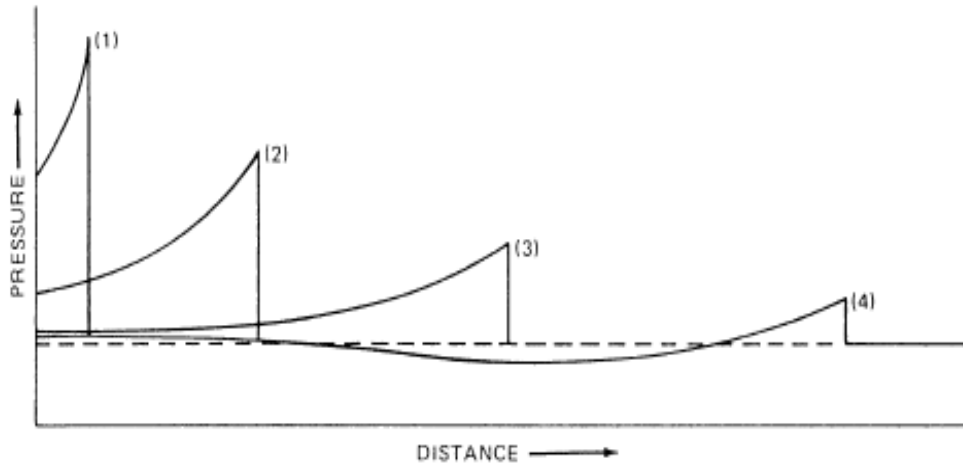
Bazen, patlayıcının etkisini artırmak ve etrafa daha fazla zarar vermek amacıyla patlayıcı kabına çivi, metal ve benzeri parçalar bilinçli olarak da eklenmektedir. Parça tesirli olarak tanımlanan bu patlayıcılar, terör örgütleri tarafından patlamanın etkisini artırmak ve hedefe daha fazla zarar vermek için sıklıkla kullanılırlar.

Parçanın/parçacığın etkisi/tesirini, hedefin patlama noktasına uzaklığı, şekli, patlamanın yönü gibi faktörler etkilemektedir (Mazonka & Shine, 2012).

Patlamadan hemen sonra parçacık ilk hızları 1500-2200 m/s seviyesindedir (Özer vd., 2010).

3.4.4. Mesafenin Etkisi

Patlama sırasında oluşan şok dalgaları, yoğun bir basınç şeklinde patlamanın merkezinden itibaren küresel olarak yayılır. Patlama bölgesinden uzaklaştıkça patlamanın etkisi azalır. Bu etkiyi aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

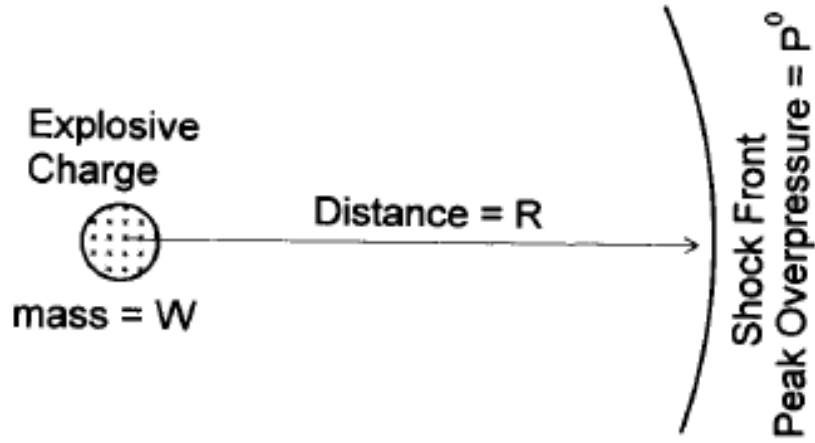


Şekil 3.4 Tipik Bir Patlamada Basınç-Mesafe Grafiği

G. F. Kinney ve K. J. Graham, Explosive Shocks In Air, 2. New York: Springer Science+ Business Media, LLC, 1985. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: DOI:10.1007/978-3-642-86682-1'den uyarlanmıştır.

Patlamadan sonra basınç, dalgalar halinde birbirini iterek yayılırken, zamanla etkisini kaybetmeye başlar. Bu sebeple, patlamanın merkezinden uzaklaştıkça etki eden maksimum basınç miktarı düşme eğilimindedir (Kinney & Graham, 1985).

Patlamada sırasında, patlamanın merkezinde ani olarak devasa bir basınç yükselmesi meydana gelir. Ani basınç artışı sonucunda, hava molekülleri birbirini patlamanın merkezinden dışarıya doğru itmeye başlar. Bu sıkışma sonucu, blast etkisi adı verilen, dalgalar halinde hava partikülleri patlama merkezinden uzaklaşmak üzere hareket ederler. Bu sıkışma sonucu oluşan blast, bazen çıplak gözle bile görülebilir (Cooper, 1996).



Şekil 3.5 R Uzaklığındaki Patlamanın Etkisi

P. W. Cooper, Explosive Engineering. New York: WILEY-VCH, 1996'dan uyarlanmıştır.

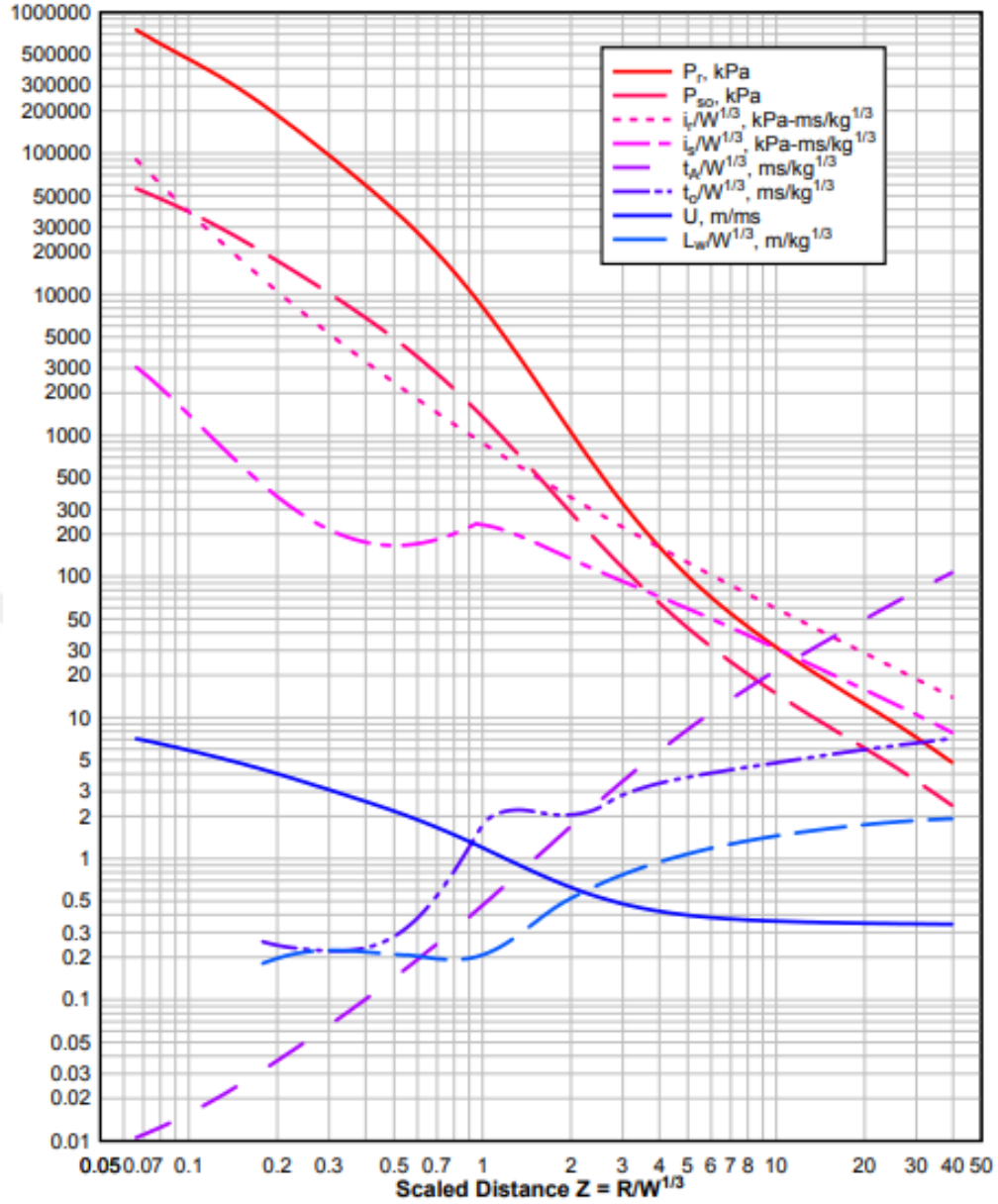
Ölçekli mesafe Z ($m/kg^{1/3}$), patlayıcı ağırlığı W (kg) ve patlama merkezinden uzaklık R (m) olmak üzere;

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (3.1.)$$

eşitliğinden bulunan Z değerinin, Şekil 3.6.'da grafikten karşılığı bulunur. Bulunan değer KPa cinsinden basınç sonucudur. Söz konusu hesaplamalarda kullanılan ağırlık değeri, TNT için geçerlidir. TNT dışında bir patlayıcı kullanılacaksa, kullanılacak patlayıcının TNT eşdeğerinin;

$$\text{TNT Eşdeğeri} = \frac{D^2}{48,3} \quad (3.2.)$$

eşitliği üzerinden hesaplanması gerekir. Hesaplanan değer kullanılacak patlayıcının ağırlığıyla çarpılarak ağırlık kg cinsinden bulunur (Cooper, 1996) (Karlos & Solomos, 2013).



Şekil 3.6 Aşırı Basınç, Pr-Z Grafiği

Karlos, V., & Solomos, G. (2013). Calculation Of Blast Loads For Application to Structural Components (EUR 26456 EN; s. 58). European Commission Joint Research Centre Institute for Protection And Security Of The Citizen. doi:10.2788/61866

3.4.5. Patlama Sonucu Açığa Çıkan Enerji

Patlayıcının patlaması esnasında, büyük miktarlarda enerji, ısı ve basınç formunda açığa çıkar. Patlayıcı türlerine bağlı olarak açığa çıkan enerji, temel olarak TNT eşdeğeri olarak ifade edilir (Özcan, 2017).

Bir gram TNT, patlama sırasında 4100 ila 4602 Joule'lük enerji açığa

çıkarır. Buradan hareketle, 1 gram TNT'nin 4184 J açığa çıkardığı standart olarak kabul görmektedir. (*TNT Eşdeğeri*, 2021).

Kimyasal bileşikler oluşurken, bileşiği oluşturan elementler kimyasal bir reaksiyona girerler. Burada ısı değişimi reaksiyon entalpisi olarak adlandırılmaktadır. Aşağıdaki tabloda, bazı maddelerin oluşum entalpileri (ΔH) verilmiştir (Cooper, 1996).

Tablo 3.1 Bazı Bileşik ve Elementlerin Oluşum Entalpileri

Madde	Reaksiyon Entalpisi, ΔH (Kcal/g.mol)	Molekül Ağırlığı (gram,g)
CO(gaz)	-26,4157	28,01
CO ₂ (gaz)	-94,0518	44,01
H ₂ O, sıvı	-68,3174	18,02
H ₂ O (gaz)	-57,7979	-
NH ₃	-11,04	17,03
C ₂ H ₅ (NO ₃) ₃	-88,6	227,1

Bir reaksiyonun entalpisi;

$$\Delta H = \Delta H_{\text{Hürünler}} - \Delta H_{\text{Girenler}}$$

formülüyle hesaplanır. Elementlerin (O₂, N₂ gibi) oluşum entalpileri sıfır olarak alınır.

Nitrogliserinin patlama ısını hesaplayacak olursak;

4 Mol Nitrogliserin (C₃H₅(NO₃)₃) yandığında, 12 mol CO₂, 10 mol H₂O, 6 mol N₂ ve 1 mol O₂ meydana gelir. Yani 4 mol nitrogliserinin yanması, 29 mol gazın oluşmasını sağlamıştır.

$$\Delta H = n_{\text{CO}_2} \cdot h_{\text{fCO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot h_{\text{fH}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} \cdot h_{\text{fN}_2} + n_{\text{O}_2} \cdot h_{\text{fO}_2} - n_{\text{C}_3\text{H}_5(\text{NO}_3)_3} \cdot h_{\text{fC}_3\text{H}_5(\text{NO}_3)_3}$$

$$= ((12 \times 94,0518 + 10 \times 57,7979 + 6 \times 0 + 1 \times 0) - 4 \times 88,6) / 4 = 338,0502 \text{ Kcal/mol}$$

Hesaplamalarda, suyun oluşum ısısı olarak gaz halindeki ısısı dikkate alınmıştır. Tam yanma olduğu, dolayısıyla CO oluşmadığı varsayılmıştır (Akçay, 2010; Öztürk, 1984).

3.5. Zırhlar

İnsanoğlu, dışarıdan gelebilecek zararlara karşı tarih boyunca kendini korumak içgüdüleriyle hareket etmiştir. Bu içgüdünün bir sonucu olarak zırhlanma ihtiyaç halini almış ve bunun bir sonucu olarak da çeşitli zırhlar üretilmiştir.

Kullanım alanlarına göre zırhlar;

Kişisel Zırhlar (Kurşun geçirmez yelekler, kasklar vb.)

Hafif Zırhlar (Savaş uçakları ve helikopterlerde kullanılan zırhlar)

Ağır zırhlar (tanklarda kullanılır) olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir (Aytaç, Aztekin, vd., t.y.).

İlk dönemlerde zırhlar, çeşitli hayvan derileri ve metal malzemelerden yapılmış kalkanlarla sınırlıydı. Daha sonraları, gelişen savaş teknolojilerine karşı yetersiz kalmaları ve mukavemetlerinin artırılması ihtiyacı neticesinde, zırh çalışmalarında yüksek dayanımlı ve düşük yoğunluklu malzemelere yönelim ağırlık kazanmıştır (Yumak vd., 2013).

3.5.1. Zırh Üretim Yöntemleri

Zırh üretimlerinde yöntem olarak genellikle dış kısma sert, iç kısma daha yumuşak malzeme kullanılır. Bunun sebebi; ilk katmanın sert olması neticesinde ilk yüzeyin sertliği alması, ikinci yani yumuşak yüzeyin ise enerjiyi emmesi amaçlanmaktadır (*Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeşitleri ve Malzemeleri*, 2019).

Zırh Üretim Yöntemleri genel olarak 4 başlık altında toplanmaktadır. Bunlar;

- **Monoblok Zırh:** Malzemenin tek parça halinde üretilmesidir. Tanklarda kule ve gövde tek parçadır.
- **Çok Bloklü Zırh:** Zırh bloklarının birbirinin peşisıra kaynak ile birleştirilmesiyle üretilmektedir. Katmanlar halinde bulunduğu için mühimmatın etkisi her katmanda azalmaktadır.
- **Aralıklı Çok Bloklü Zırh:** Zırhı oluşturan bloklar, aralıklı olarak kaynakla birleştirilir. Mühimmatın ürettiği enerji hem bloklarda, hem de bırakılan boşluklarda emilir. Bu da daha yüksek balistik koruma sağladığı anlamını taşımaktadır.
- **Eğimli Aralıklı Çok Bloklü Zırh:** Blokların, belirli bir açı ve eğim ile kaynaklanmasıyla üretilir. Böylece mühimmatın hedefe ulaşması için gereken mesafe artırılmış olur. Ayrıca sahip olduğu eğim sebebiyle mühimmatın ucu kırılabilir veya mühimmat yön değiştirip sekebilir (*Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeşitleri ve Malzemeleri*, 2019).

3.5.2. Zırh Çeşitleri

Günümüzde zırh teknolojileriyle ilgili çalışmalar hızla devam etmektedir. Kolay şekil alabilme, seri üretime uygunluk, makinelerin çalışması sırasında üzerinde oluşabilecek gerilmelere dayanabilme ve deformasyon zorluğu gibi özellikler malzemelerin zırh teknolojilerinde kullanılmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Üretim tecrübesi, kaliteli işçilik, imalat tekniği ve mühendislik bilgisi gibi faktörler de zırhların etkinliğinin artırılmasında öne çıkan unsurlardandır. Bununla birlikte, günümüzde genel olarak zırh çeşitleri 4 grupta incelenmektedir (*Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeşitleri ve Malzemeleri*, 2019). Bunlar;

- **Parçacık Kalkanı:** Araçların iç kısımlarına yerleştirilirler. Herhangi bir delinme olduğunda iç bölgeye (malzeme ve personele) zarar verebilecek şarapnel etkisini engeller/azaltır. İncelik ve hafiflik zorunluluğu nedeniyle genellikle kompozit esastır.
- **Sıvı Zırh:** Rus zırhlarında kullanıldıkları tahmin edilmektedir. Bu tür zırhlarda, iki çelik blok arasında, mühimmatın temasıyla katı hale geçen jel halinde bulunan sıvı kullanılır. Diğer zırhlara göre daha hafiftir.
- **Patlayıcı Reaktif Zırh:** Dış yüzeye, çelik kutular içerisinde olacak şekilde perçinlenerek üretilir. Mühimmatın teması ile dışa doğru patlayacak şekilde aktif hale geçerek mühimmatın etkisini azaltır.
- **Ek Izgara ve Ağ Zırhlar:** Mühimmatın ana gövdeye ulaşmadan patlamasını sağlarlar. Ucuz, hafif ve zarar gördüğünde kolayca değiştirilme özelliklerine sahiptir.

3.6. Kompozit Malzemeler ve Alüminyum

3.6.1. Kompozit Malzemelere Genel Bakış

Kompozit malzemeler, birbirinin zayıf yönlerini kuvvetlendirerek üstün fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek amacıyla iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelerdir (Karaca, 2010). Kompozit malzemeler, zırh çalışmalarında ağırlığın düşürülmesi ve balistik performansın iyileştirilmesi amacıyla önemlidir (Aslan, 2020).

Kompozit malzemeler, matris, takviye ve katkı malzemesi olmak üzere üç ana bileşenden oluşur (Akceylan, 2009; Y. Şahin, 2000; Yeşildal, 2010).

Malzemeyi bir arda tutmak, yükü malzeme üzerinde dağıtmak ve bileşenleri çevresel etkilerden korumak için matris malzemesi kullanılır. Matriks olarak da adlandırılır (Bozkurt, 2011).

Takviye elemanı, kompozit malzemelerde temel mukavemet elemanıdır. Takviye elemanı çekirdek olarak da adlandırılır. Kompozit Malzemelerde takviye elemanı olarak, cam, karbon, boron, alüminyum oksit, silisyum karbür, organik moleküller ve metalik camlar başta olmak üzere çok çeşitli malzemeler kullanılabilir (Y. Şahin, 2000).

Korozyon, yalıtım gibi özellikleri ise katkı malzemeleri sağlar (Bozkurt, 2011).

Kompozit malzemelerin avantajlarını; yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, hafiflik, yüksek sertlik, kırılma tokluğu, ısı iletkenliği veya ısıl direnç, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, yüksek yorulma dayanımı, iyi korozyon direnci, estetik görünümü olarak sıralayabiliriz. Üretim ve işleme güçlüğü, istenen yüzey kalitesinin elde edilmesinin zorluğu, malzemenin geri dönüşümünün olmaması, kırılma uzamasının sınırlılığı ve enine özelliklerdeki zayıflıklar ise dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. (Bulut, 2003; Fidan, 2011; Yeşildal, 2010).

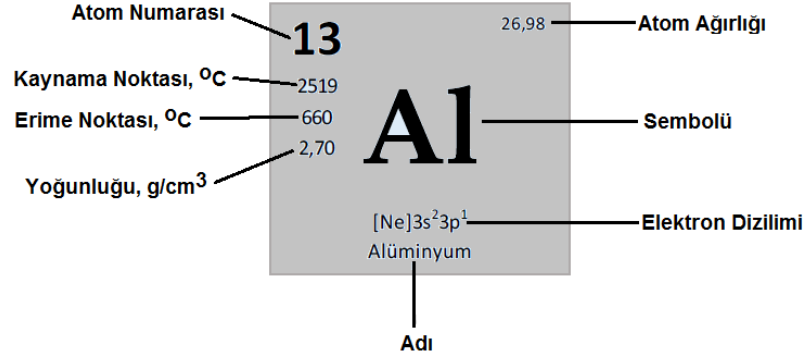
Kompozit malzemeler, düşük maliyetli su depolarından uçak parçalarına, gıda ambalajlarından, inşaat malzemelerine ve savunma sanayii ürünlerine kadar pek çok alanda ihtiyaç duyulan ürünler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Petrol esaslı ürünler, kompozit malzeme üretiminde, yüksek mekanik özelliklere sahip olmaları ve üretim kolaylığı nedeniyle çok yüksek oranlarda tercih edilmektedir. Ancak, doğada çözünmesinin uzun zaman alması nedeniyle çevrede olumsuzluklara da sebep olmaktadır (Kandaş & Özdemir, 2021).

3.6.2. Kompozit Zırh Malzemesi Olarak Alüminyum

3.6.2.1. Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum, Al simgesiyle gösterilen, periyodik cetvelin III A grubunda yer alan, gümüş renkli hafif bir metaldir. Şekil 3.7.'de alüminyumun bazı özellikleri görülmekte olup yoğunluğu $2,70 \text{ gr/cm}^3$ 'dir (Gürbüz, 2018).



Şekil 3.7 Alüminyumun Genel Özellikleri

Dr. G. Eroğlu ve M. Şahiner, “Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum”, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, Ara. 2018.

Dünyamızda oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Doğada oksit ve silikat bileşikleri halinde bulunur, saf olarak bulunmaz (Al-Saadi & Tunay, 2017; Eroğlu & Şahiner, 2018).

Boksit cevheri alüminyumun oksitli bileşiğidir ve doğada, Şekil 3.8.’de görüldüğü gibi fotoğraflanmıştır. (M. B. Şahin vd., 2015).



Şekil 3.8 Boksit Cevheri

M. B. Şahin, H. Ağrı, E. Koşun, ve H. Mengi, Mineraller, İkinci Baskı. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü, 2015. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.mta.gov.tr

İlk olarak, Sir Humphrey Davy tarafından 1807 yılında üretilmiş, 1800’lü yılların sonuna doğru elektroliz yöntemi kullanılarak üretilmeye başlanmasıyla beraber maliyeti düşmüş ve alüminyum üretimi endüstriyel anlamda artmaya başlamıştır (Ediz, 2011; Alüminyum, 2021).

Alüminyum metali üretimi birincil ve ikincil üretim olmak üzere ikiye ayrılır. Birincil alüminyum üretimi boksit cevherlerinden elde edilirken, ikincil alüminyum ise hurda alüminyumun geri dönüşümü ile üretilir. Dünyadaki alüminyum üretiminin yaklaşık üçte biri ikincil alüminyum'dur. Günümüzde yüksek enerji maliyetleri ve çevreci yaklaşımlar, ikincil alüminyum talebinin hızla artmasına sebep olmaktadır (Eroğlu & Şahiner, 2018; Gürbüz, 2018; İzgi, 2011).

Fransız hükümeti tarafından torpido teknelerinde alüminyumun kullanımı, askeri alandaki alüminyum kullanımına ilk örnektir. Daha sonra, Alman hükümeti'nin, demir ve çelik sıkıntısı çektiği 1. Dünya Savaşında tanklarında alüminyum kullanması, alüminyumun kullanımı açısından dikkat çekici bir örnektir.

Son yıllarda, hafifliği, yapılan çalışmalarla artırılan mukavemeti, sertliği, kolay şekillendirilebilmesi, ucuzluğu ve kolay bulunabilirliği alüminyumun kullanımının gitgide artmasına yol açmıştır (Çağan vd., 2017).

Alüminyum, hafiflik, mukavemet, üstün korozyon direnci, yüksek derecede ısı ve elektrik iletkenliği, kolay şekillendirilebilme, işleme ve ısıl işlem yapılabilirliği özelliklerine sahiptir (Demirbaş & Çevik, 2020). Bu özellikleriyle otomotiv, inşaat, gemi inşa, gıda, ambalaj, kimya, savunma sanayi, otomotiv, havacılık, uzay endüstrisi, boya ve taşımacılık sanayinde çok geniş kullanım alanına sahip olmuştur. Bu bir sonucu olarak, demir-çelikten sonra en çok üretilen ikinci metal konumundadır (Ediz, 2011; Eroğlu & Şahiner, 2018).

Zırh tasarımında, darbeye karşı mukavemetinin yüksek olması, maliyetinin düşük olması, kolay şekillendirilebilmesi, korozyona karşı direncinin yüksek olması ve düşük yoğunluğundan dolayı hafifliği, son dönemlerde alüminyumu öne çıkarmaktadır (Kutlay, 2012).

3.6.2.2. Zırh tasarımında Kullanılan Alüminyum Serileri

Tasarımda kullanılacak alüminyum alaşımı serisi, askeri araçların zırh gereksinimleri göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Tek bir alaşım, tüm ihtiyaçları karşılamayabilmekte, aracın farklı bölümlerinde farklı alaşımların kullanımına ihtiyaç duyulabilmektedir. Alt kısımlarda farklı bir alaşım kullanılırken, tavanda başka bir alaşım seçilmesi gerekebilmektedir. Her seriden farklı alüminyum alaşımları, birbirinden farklı mekanik özellikleri dolayısıyla farklı koruma seviyeleri sağlamaktadır (Thompson vd., 2012).

Patlama direnci yüksek 5XXX serisi alüminyumlar, genellikle araçların alt kısımlarında kullanılmaktadır. 2XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımları ise aracın üst kısımları için tavsiye edilmektedir (Ghaziary, 2011).

5XXX, 7XXX ve 2XXX serisi alüminyum alaşımları, zırh çalışmalarında en çok çalışılan alaşımlardandır (Çağan vd., 2017). Bu serilerden 5083, 5059, 7039, 2519, 2139 ve 2195 alaşımlar, zırh plakası için kullanılan alaşımlara örnek olarak verilebilir. 8XXX serisi alüminyum-lityum alaşımları henüz araştırılma aşamasındadır. 2XXX, 5XXX ve 7XXX serisi bazı alüminyum alaşımlarının akma dayanımı ve % uzama özellikleri Şekil 3.3.'deki tabloda görülmektedir (Ghaziary, 2011).

Tablo 3.2 Bazı Alüminyum Serilerinin Akma ve Uzama Özellikleri

Alaşım Numarası	Akma Dayanımı (MPa)	Süneklik, %
2139	441	11,7
2519	400	12,4
5083	255	9,3
7039	351	13,6

3.7. Zırh Çalışmalarında Darbe Deneyleri ve Hasar Türleri

3.7.1. Darbe Deneyleri

Yapılan araştırmalarda, askeri personel sevkiyatlarında, terör kaynaklı patlamalara karşı, enerji sönümleyici malzeme içeren balistik teçhizat kullanımının (başlık ve yelek) yanında, araç içi döşemenin enerji sönümleyici sandviç kompozitlerle donatılmasının, ölümcül yaralanma olasılığını azalttığı belirlenmiştir. Ancak, özellikle askeri personel taşıyan zırhlı araçlarda, kullanılan zırh çeliği gibi homojen ve tek katlı balistik kaplamaların, patlama veya şok dalgalarının aracın iç kısmına geçmesi neticesinde, bir kalkan olmak yerine ölümle sonuçlanan kazalara neden olduğu da ifade edilmektedir. Buradan hareketle, tek katlı zırh çeliği yerine, ana zırh çeliğinin iç kısmında ikincil koruma sağlayan, düşük hızlı çarpmalardan yüksek hızlı patlama etkilerine kadar etkileri sönümleyebilen, metalik köpük ve hücreli geometride çekirdek malzemeli sandviç kompozit yapıların, geliştirilerek kullanılmasının bu tehlikeyi azaltabileceği düşünülmüştür (S. Yang & Qİ, 2013).

Kompozit malzemelerde darbe hasarı çalışmaları bu sebeple, darbe sırasında malzemenin enerji sönümleme kapasitesi ve/veya darbe sonrasında yük taşıma kapasitesindeki değişim etrafında yoğunlaşmaktadır (Quaresimin vd., 2012).

Darbe dayanımı, bir metalin kırılma ya da çatlamaya karşı mukavemet gösterirken, darbe enerjisini emme yeteneği olarak ifade edilmektedir. Tokluk olarak da bilinir ve genellikle metrik sistemde metre başına Joule (J/m) olarak ifade edilir. Burada etki gücünü test etmek için birkaç yöntem vardır. Balistik limit ve darbe direnci gibi yöntemler, darbenin anlaşılması ve darbeye direncin artırılması çalışmalarında kullanılmaktadır.

Balistik limit, merminin kompozit malzeme içerisinde ilerlerken kinetik enerjisinin tamamını kaybettiği maksimum hızı ifade etmektedir. Günümüzde yapılan çalışmalar, bu sınır dayanımının ölçülmesi, böylece darbe dayanımının anlaşılması ve balistik limitin artırılmasını hedeflemektedir (Turan, 2007).

Darbe direnci, birçok alanda kritik öneme sahip, ürün güvenilirliği ve ürün dayanımı konusunda da ipuçları veren önemli bir kriterdir. Parça geometrisi, sıcaklık, üretim esnasındaki kalıplanma, geçiş bölgeleri ve kaynak çizgileri gibi zayıf noktalar, katkı maddeleri gibi etkenler darbe direncini etkileyen unsurlardandır.

Balistik limit ve darbe direnci gibi kriterlerin incelendiği darbe deneyleri, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Malzemelerin dayanımları, aldıkları darbenin büyüklüğü, yönü ve sıcaklık gibi etkenler nedeniyle değişiklik gösterebilmektedir.

Bir malzemenin darbe dayanımının ölçülmesi için kabul edilmiş standart bir test metodu bulunmamakla birlikte, charpy, izod, ağırlık düşürme ve yüksek hızlı darbe testleri (basınçlı hava ve split-hopkinson) darbe dayanımı için en bilinen testlerdir (Gemi, 2014).

Bu testin charpy ve izod testlerine göre avantajı, Böylelikle, daha karmaşık malzeme sistemleri test edilebilmesidir (Fidan, 2011).

Bu testler arasında ağırlık düşürme darbe testi, çarpma hızı ve darbe enerjisi sınırlamalarının bulunmaması, gerçek hayatta karşılaşılabilecek şartlara daha yakın şartlar sağlanabilmesi farklı geometrilerdeki numunelerin bu teste tabi tutulabilmesi, uygulama kolaylığı ve yöntemin basitliği gibi sebeplerle daha çok tercih edilmektedir. (Oltulu & Altun, 2018).

Bu proje çalışmasında farklı dolgulu malzemelere, aynı enerji seviyesinde darbeler uygulanmış ve arka yüzeyden ölçülen darbe verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, testlerden elde edilen veriler, gerçekleştirilecek sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.7.2. Şok Dalgası Oluşturmak İçin Kullanılan Yöntemler

Darbeye karşı malzemenin direncini ölçmek için şok dalgası oluşturmak ve dalgaların malzeme içerisindeki hareketini anlamak çok önemlidir. Bu kapsamda darbe oluşturmak için aşağıdaki yöntemler kullanılabilmektedir.

- **Patlatma Cihazları**

Şok dalgaları üretmenin en kolay yolu patlatma cihazlarıdır. Maliyeti ucuz ve kullanımı kolay olmakla birlikte, patlayıcının kontrolü açısından tehlikelidir. Cihazlarda bir plakanın arkasında patlatma yapılarak ani basınç yükselmeleri oluşturulur. Patlamadan hemen sonra basınç düşmeye başlar. Darbe, 1-10 mm kalınlıktaki plakaları, 1-6 km/s hıza kadar hızlandırabilir. Söz konusu hızın altındaki hızlarda darbeler üretmek, bir zayıflatıcı plaka kullanılmasıyla mümkündür. Çarpma tertibatının hızı, patlayıcının bileşimi, yoğunluğu, plakanın hafifliği ve kalınlığı parametrelerinin değiştirilmesi ile kontrol edilebilir (Tarabay vd., 2002).

- **Gaz ve Barut Silahları**

Patlayıcı kullanımına alternatiftir. Çarpma tertibatının hızını kontrol etmek mümkündür. Tabancanın boyutları, büyük ölçüde değişiklikler göstermekle birlikte, genellikle delik çapı 20-150 mm ve namlu uzunluğu 3-30 m arasında değişmektedir. Namluda sıkıştırma için azot ve helyum gazı kullanılır. Namluda, 15 MPa'ya kadar sıkıştırılmış gaz basıncı ile 100-1500 m/s hıza kadar sevk hızı üretilebilir. Sürtünme sebebiyle, ek bazı düzenlemeler yapılmadan 100 m/s altında deneyler için sağlıklı sonuçlar elde etmek mümkün değildir (Fowles vd., 1970).

- **Elektrikli (Elektro Patlayıcı) Silahlar**

Elektro patlayıcı cihazlar, yüksek güçlü darbeleri lazer ve parçacık ışınları, darbe deneylerinde elde edilen parametre aralığını genişletme isteğinin sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Malzemenin, bir enerji kaynağı ile hızlıca ısıtılarak patlatılması esasına dayanır. Darbe hızı, 100 m/s ile 10 km/s arasında değişebilir (Osher vd., 1989).

- **Radyasyon Cihazları**

Bir malzemenin küçük bir alanına, güçlü bir lazer ışınının odaklanması sonucu yüksek enerji konsantrasyonu elde edilmesi prensibiyle çalışır. Malzeme buharlaşırken hedefte bir şok dalgası oluşur. Malzemenin mekanik özelliklerini çok küçük sürelerde tespit etmek mümkündür. Yüksek voltaj darbesiyle oluşan parçacık demetinin bir yüzey tabakasında emilimi sonucu kinetik enerjileri, ısı enerjisine dönüşür. Malzemenin belirli bir bölgesindeki bu ısınma, malzemede bir şok dalgası meydana gelmesini sağlar (Paisley vd., 1991).

3.7.3. Şok Parametrelerini Ölçme Araçları ve Teknikleri

Şok dalgalarının malzeme içerisinde ilerlemesinin zaman bağı olarak sürekli ölçülmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için gereklidir. 1960'lı yıllardan sonra, malzemede oluşan gerilim ve parçacık hızlarının ölçülmesi için teknikler geliştirilmiştir.

- **Kapasitör Ölçer**

Elektrik ileten bir yüzeyin hareketini ölçmek için kullanılır. Malzemenin bir ucuna uygulanan darbe, malzemenin üzerinde ilerlerken bir elektrik akımı oluşturur. Söz konusu akım, darbeye maruz kalan malzemenin iç bölgesindeki parçacık hızıyla, dolayısıyla da darbenin büyüklüğüyle orantılıdır. Cihazın, elektriksel gürültüye karşı aşırı hassas olması doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir (Tarabay vd., 2002).

- **Elektromanyetik Ölçer**

Parçacık hızının ölçülmesi amacıyla kullanılan Faraday'ın indüksiyon yasasına dayanmaktadır. İki plaka arasına gerilim ölçer yerleştirilir. Malzemeden geçen akımın zamana karşı değişimi, gerilim ile orantılıdır. Gerilim ölçer tarafından okunan hız, malzemenin parçacık hızıdır (Tarabay vd., 2002).

- **Lazer Hız Ölçer**

Açıklanan iki hız ölçüm tekniğinde de ölçüm mesafesinin kısıtlı ve eğimli olması, ölçümün doğruluğunu etkilemektedir. Lazer ölçümünde hedef yüzeyden yansıyan doppler kaydırmalı ışık, ölçümlerde doğruluğun artmasına katkıda bulunur. 1986'da yapılan çalışmalarla, tüm yüzeyin hızını ölçmek için, yüzey üzerindeki belirli noktaların hızları belirli bir zaman için ölçülmüştür. Daha sonra yapılan çalışmalar ile hedef yüzey üzerindeki hız değişimi ölçülmüştür (Barker & Hollenbach, 1974).

3.7.4. Darbe Sonucu Malzemede Oluşan Hasarlar

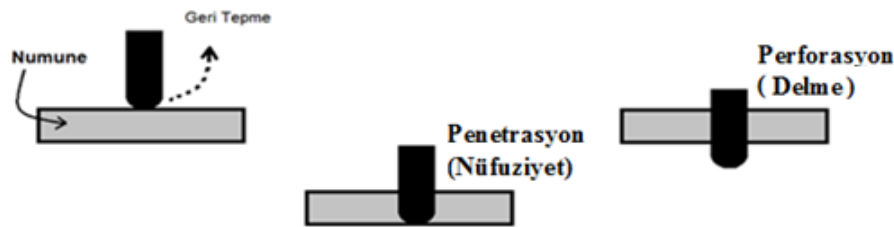
Malzemelerin darbeye maruz kalmalarında; imalat, servis ve bakım süreçleri önemli bir yer tutmaktadır. Bir uçağın piste iniş-kalkış sırasında, pistteki küçük çakıl taşlarını hızlı bir şekilde itmesi, servis sürecindeki darbelere güzel bir örnektir. Alet düşmesi gibi istenmeyen darbeler ise bakım sürecinden yaşanabilecek darbe örneklerindendir. Bu hasarlar, genellikle gözle görülemeyen hasarlar şeklinde oluşur (Randjbaran vd., t.y.).

Bu sebeple, yapılan çalışmalarda, darbe sonucu oluşan hasarların yapay ortamlarda deneylerle simüle edilmesi, sebeplerinin araştırılması ve oluşumunun anlaşılması, çözüm üretmek konusunda rehber niteliğindedir. Bu deneylerden hareketle, malzemelerin gerçek kullanım koşullarında uğrayabileceği hasara karşı önlem alınması ve malzemenin kullanım ömrünün uzatılması başlıca hedeflerdendir (Ceyhun & Turan, 2003; Randjbaran vd., t.y.).

Darbeye maruz kalan malzemelerde görülen hasar türleri, malzemenin yük taşıma kapasitesini önemli derecede azaltmaktadır (Esendemir vd., 2020).

Bir mühimmatın, hedefe nüfuz etmesi (penetrasyon) veya hedefi delip içinden geçmesi (perforasyon) mühimmatın sahip olduğu kinetik enerjiyle ilişkilidir (Özşahin, 2003). Perforasyon oluştuğunda, sönmülenen enerji, temas süresi ve kuvveti kritik seviyeye ulaşmış demektir (Gemi, 2014; Yağbasan, 2019).

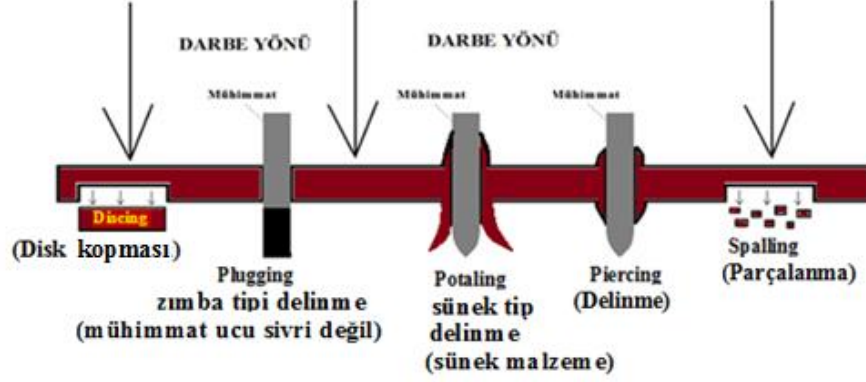
Penetrasyon ve perforasyon balistik sınıra yakın hızlarda meydana gelir. Hızın daha düşük olması durumunda ise geri tepme de meydana gelebilir. Geri tepme, penetrasyon ve perforasyon oluşumları aşağıdaki şekilde görülmektedir (Yağbasan, 2019).



Şekil 3.9 Geri Tepme, Penetrasyon ve Perforasyonun Oluşumları

M. Yağbasan, “Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Plakaların Çarpma Açısına Bağlı Düşük Hızlı Darbe Davranışının ve Darbe Sonrası Basma Mukavemetinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019’dan uyarlanmıştır.

Ayrıca, darbe sonucunda malzemede disk kopması (discing), sivri olmayan mühimmat ucu ile zımba tipi delinme (plugging), sünek malzeme ile sünek tipi delinme (potaling), delinme (piercing, ductile), parçalanma (spalling) şeklinde hasarlar meydana gelebilmektedir (Macar, 2014). Şekil 3.10’da malzemede oluşan hasar türlerinden bazıları gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Hasar Mekanizmaları

M. Macar, “Investigation Of Dynamic Behavior Of Aluminum Alloy Armor Materials”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2014.’den uyarlanmıştır.

4. TEMEL KORUNUM YASALARI VE MEKANİK DALGALAR

4.1. Temel Korunum Yasaları

Kütlenin korunumu, enerjinin korunumu ve momentumun korunumu kanunları, patlama olayının mekaniğini anlamak konusunda bize ışık tutmaktadır. Evrende enerji veya kütle anlamında, hiçbir şey vardan yok olmaz veya yoktan var olamaz. Evrende, bir denge söz konusudur. Darbe mekaniğini anlamak için yapılan çalışmalar, bu temel kanunlar üzerine inşa edilmektedir. Şimdi bu kanunların dayandığı ana kuralları kısaca açıklayalım;

4.1.1. Kütlenin Korunumu Kanunu

Basitçe ifade etmek gerekirse, kimyasal bir reaksiyonda reaksiyona girenlerin kütleleri ile çıkanların kütlesi birbirine eşittir. Yani reaksiyonun her aşamasında toplam kütle sabittir.

Bunu;

$$\int_V \rho \cdot dV = \text{sabit} \quad (4.1)$$

eşitliği ile ifade edebiliriz. Yani patlama olayında da, bütün reaksiyonlarda olduğu gibi reaksiyona giren maddelerin kütlelerinin toplamı ile reaksiyondan çıkan maddelerin kütlelerinin toplamı eşittir (Özşahin, 2003).

4.1.2. Enerjinin Korunumu Kanunu

Patlamada, maddenin bünyesinde tutulan enerji, ani bir şekilde oluşan reaksiyonun etkisiyle hızla açığa çıkar. Bu enerjiyi, patlamadan sonra kinetik enerji, ısı enerjisi ve benzeri formlarda görebiliriz. Bu enerji bazen de iş olarak karşımıza çıkar. Yani enerji de kütlenin korunumunda olduğu gibi kaybolmaz. Ama başka bir forma dönüşebilir. Bu sebeple enerjiyi ifade ederken yapılan işi de görmezden gelemeyiz.

Modelleyeceğimiz patlama örneğinde, ağırlık düşürme metodunu kullanacağız. Düşen ağırlığın enerjisi, malzemenin diğer yüzüne aktarılan enerji temel araştırma konularımızdan olacaktır.

4.1.2.1. Darbe Enerjisinin Korunumu

Uygulama alanları açısından genel olarak darbeler düşük, orta ve yüksek hızlı olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar arasında kesin bir ayırım yapılamamakla birlikte, genel olarak 1-10 m/s düşük hızlı darbe, 10-100 m/s orta hızlı darbe ve üzerindeki hızlar ise yüksek hızlı darbe olarak kabul edilmektedir (Karaca, 2010; Cantwell & Morton, 1989).

Darbe sırasında, bir cismin hızından dolayı sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı veya tamamı, cismin çarptığı yani darbeye maruz kalan cisme aktarılır. Söz konusu çarpışmada; vurucu cisim çarptığı cismi delip geçebilir, çarptığı cisme yapışarak beraber hareket edebilir veya bir sekme hareketiyle cisimler farklı yönlere doğru hareketlerine devam edebilirler. Burada toplam enerji değişmez, sabittir.

Düşey harekette ise cisim, ilk hızı sıfır olarak serbest düşmeye bırakılır, cismin sahip olduğu potansiyel enerji, hızın artmasıyla birlikte kinetik enerjiye dönüşür.

Burada E enerji (J), m kütle (kg), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), h yükseklik (m), t süre (s) olmak üzere potansiyel enerjiyi;

$$E_p = m.g.h \quad (4.2.)$$

eşitliğiyle hesaplayabiliriz (Akceylan, 2009). Kinetik enerjiyi ise v hız (m/s) olmak üzere;

$$E_k = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (4.3.)$$

eşitliğiyle hesaplayabiliriz. Burada enerji birimi Joule= $kg.m^2/s^2$ veya N.m ($N=kg.m/s^2$)'dir.

Serbest düşme hareketinde cismin ilk hızı sıfırdır. Burada;

$$h = \frac{1}{2} . g . t^2 \quad (4.4.)$$

$$V=V_0+g.t \quad (4.5.)$$

$$V=\sqrt{2gh} \quad (4.6.)$$

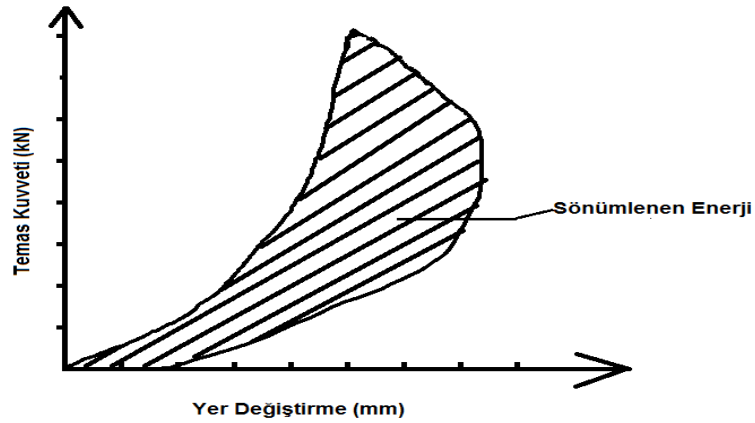
eşitlikler kullanılabilmektedir (Akceylan, 2009) , (Bozkurt, 2011).

4.1.2.2. Temas Kuvveti-Yer Değiştirme İlişkisi

Bir cisme kuvvet uygulandığında, temas noktasında küçük bir kesit alanında basınç yükselir. Darbe ucu ile numune arasında enerji alış-verişi meydana gelir. Vurucunun enerjisi, numuneye transfer olurken, bir miktar yer değiştirme de meydana gelir.

Temas kuvveti-yer değiştirme ilişkisi darbe çalışmalarında incelenen verilerdendir. Oluşan verilerle temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri oluşur. Bu grafikler genellikle, açık uçlu ve kapalı uçlu olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkmaktadır (Ataş & Sayman, 2008).

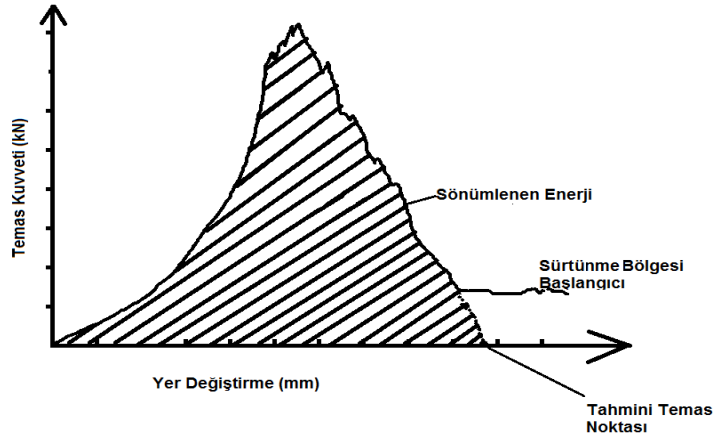
Kapalı uçlu grafik örneği Şekil 4.1.'de görülmektedir. Perforasyon (delinme) olmayan numunelerde görülür. Darbe, numunede hasara neden olabilecek yeterli bir enerji seviyesine sahip olmadığından bir miktar geri sekme de meydana gelir (Ataş & Sayman, 2008; Yağbasan, 2019).



Şekil 4.1 Kapalı Uçlu Grafik

C. Ataş ve O. Sayman, "An Overall View On Impact Response Of Woven Fabric Composite Plates", ScienceDirect, c. 82, sy 3, ss. 336-345, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.01.014>. 'den uyarlanmıştır.

Açık uçlu grafik örneği Şekil 4.2.'de görülmektedir. Perforasyon oluşan numunelerde görülür. Numune delindikten sonra bir sürtünme enerjisi de meydana gelir. Bu sebeple grafiklerin sonunda yatay bir bölge oluşur. Bu sebeple şekildeki gibi eğrinin aşağı yönelen bölgesi yer değiştirme eksenini ile birleştirilir (Ataş & Sayman, 2008; Yağbasan, 2019).



Şekil 4.2 Açık Uçlu Grafik

C. Ataş ve O. Sayman, “An Overall View On Impact Response Of Woven Fabric Composite Plates”, ScienceDirect, c. 82, sy 3, ss. 336-345, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.01.014>’den uyarlanmıştır.

4.1.3. Momentumun Korunumu Kanunu

Eğer kapalı bir sistem hiçbir dış etkiye maruz kalmıyorsa, momentum sabittir (Özşahin, 2003). Kütlesi M , hızı V olan bir cisim MV momentumuna sahiptir. Eğer cisme bir F kuvveti etki ederse, Newton’un ikinci kanununa göre momentumda bir değişikliğe neden olur. Newton’un ikinci kanununa göre bir cismin momentumunda zamana bağlı olarak değişim, etki eden kuvvet ile orantılı ve kuvvetin yönü ile aynı doğrultuda olur. Bu durumu;

$$F = \frac{\partial MV}{\partial t} \quad (4.7.)$$

eşitliğiyle ifade edebiliriz (Bozkurt, 2011).

Bir çarpışma olayında, momentumun çarpışmadan önce ve çarpışma sonra eşit olduğunu, yani toplam momentumun değişmediğini söyleyebiliriz. Buna göre;

$$M_1.V_1 + M_2.V_2 = M_3.V_3 + M_4.V_4 \quad (4.8)$$

olmalıdır. Aynı düzlemdeki çarpışmalarda, aynı malzemelerden üretilmiş iki materyalin çarpışması ile farklı malzemelerde üretilmiş iki malzemenin çarpışmasında farklı hız ve kuvvetlerin oluşması da etken olmaktadır. Ayrıca, malzemelerin ebatlarının farklı olması da çarpışmasının seyrini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Akceylan, 2009).

Modelleyeceğimiz patlama olayında, deneyler düşey düzlemde yapılacağından dikey eksendeki hız önem arz etmektedir. Dikey eksen düşen ağırlığın hızı ile vektörel hız aynı olacaktır. Ancak, geri sekmede vektörel hızın yönünün değişeceğinin de bilinmesi gerekmektedir.

4.2. Mekanik Dalgalar

Dalgalar için kısaca, enerji taşıyan titreşimler tabirini kullanabiliriz. Mekanik dalgalar, yayılmak için su veya hava gibi bir ortama ihtiyaç duyan dalgalardır. En bilinen mekanik dalgalar, su yüzeyinde veya yay üzerinde oluşan dalgalardır.

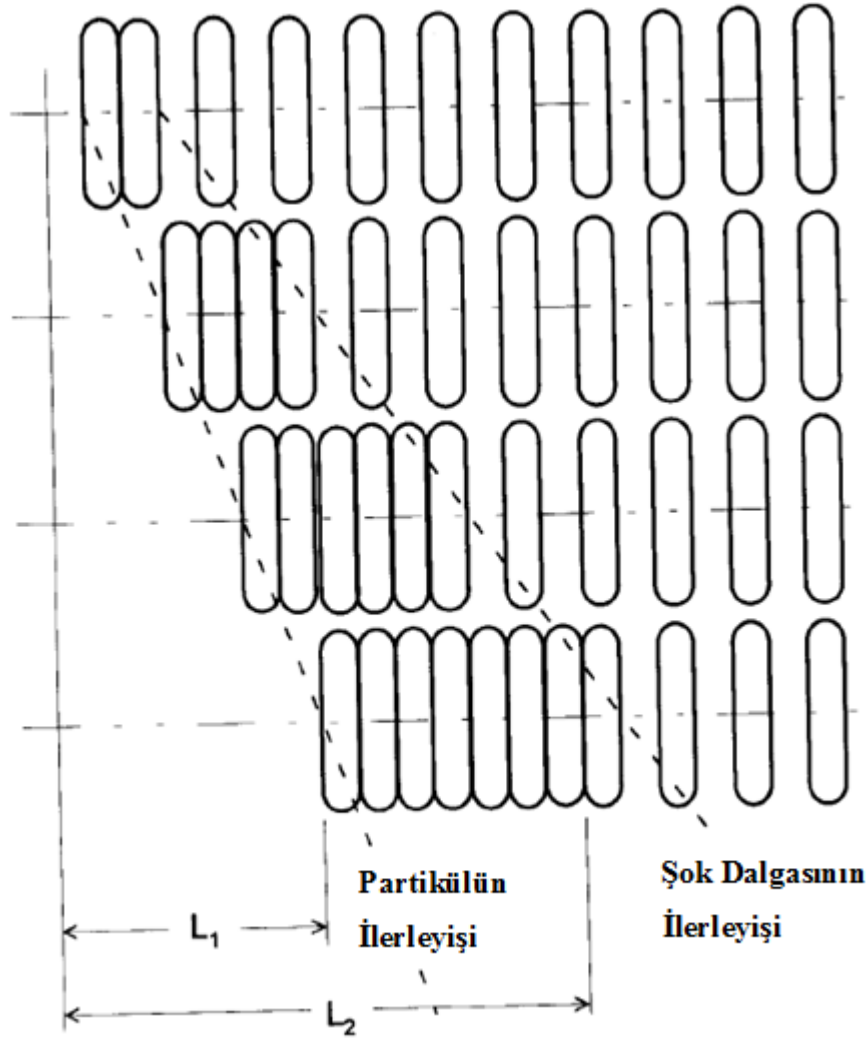
Gözle görülemeseler bile, katı cisimler içerisinde de mekanik dalgalar oluşmaktadır ve bu dalgalar su veya havada olduğu gibi hareket kabiliyetine sahiptir. Deprem dalgalarının yer kabuğunda oluşarak ilerlemesi, dalgaların katılar içerisinde ilerlemesine verilebilecek en güzel örneklerdendir.

Mekanik dalgaların oluşabilmesi için bir enerji girişine ihtiyaç olduğu gerçeğinden hareketle tüm mekanik dalgaların bir enerjiye sahip olduğu söylenebilir. Dalgalar, uzun mesafeler boyunca hareket edebilirken, iletim ortamının hareketi sınırlıdır.

Patlama olayında devasa büyüklüklerde enerji açığa çıkmakta ve patlamanın gerçekleştiği ortama aktarılmaktadır. Çoğunlukla bu ortam, hava olmaktadır.

Patlama hava ortamında gerçekleşiyorsa, açığa çıkan enerji, hava molekülleri vasıtasıyla iletilir ve küresel olarak hareket eder. Söz konusu enerji transferi sonucu hava molekülleri arasında bir sıkışma meydana gelir. Bu sıkışma sonucu hava moleküllerinin birbirini itmesi, blast adı verilen, bazen gözle bile görülebilen dalgaların oluşmasına sebep olabilir.

Patlamada şok dalgasının ve partiküllerin havada nasıl yayılım gösterdiği çoğunlukla tam olarak anlaşılamamaktadır. Bu kavramları patlamada oluşan dalgaların çubuklar şeklinde olduğu varsayılarak, Şekil 4.3.'deki mekanizmayla açıklamak mümkündür. Buna göre, hava molekülleri (veya partikülleri) çubuklarla temsil edilmektedir. Patlamadan hemen sonra, patlama merkezine en yakın olan çubuk, kendinden sonraki çubuğu iter ve aynı zamanda yoluna da devam eder. Bu olay diğer çubuklara aktararak devam eder. Blast hızı hareketin devam ettiği en öndeki çubukta görülürken, partikül hızı en arkadaki çubuğun hızıdır. (Cooper, 1996).



Şekil 4.3 Şok Dalgası ve Partiküllerin Havadaki Hareketi

P. W. Cooper, Explosive Engineering. New York: WILEY-VCH, 1996'dan uyarlanmıştır.

Patlama olayında, başlangıçta dalgalar küresel olarak hareket ederler. Hemen ardından dalgalar, çok çok kısa bir zaman diliminde hava moleküllerinin basıncın etkisiyle birbirini itmesinin bir sonucu olarak daha dik bir hale gelirler.

Katılar içerisinde dalgaların ilerlemesi, tıpkı havada veya suda olduğu gibi, moleküllerin hareketi bir sonraki moleküle aktarması ile devam eder.

Bir çubuk üzerinde dalganın ilerlediğini düşünürsek, darbenin başladığı ilk anda çubuk üzerinde bir bası/basma dalgası oluşur. Bütün malzemeler sonsuz olmadığı için dalga, sabit uca, serbest uca veya bir birleşme noktası gibi devamsızlık olarak adlandırılan bir noktaya ulaştığında geri yansır. Yansıyan bu dalgaya çeki/çekme dalgası denir.

Basma ve çekme dalgaları bir malzemeye uygulandığında malzeme üzerinde bir gerilim meydana gelir. Herhangi bir malzemede A alanına bir kuvvet uygulandığında oluşan gerilim;

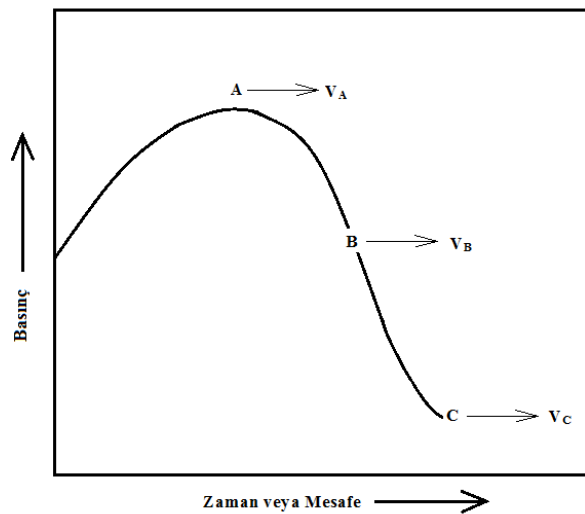
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.9)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Bası ve çeki dalgaları, iki çubuğun birbirine çarptırılarak düzeneğin üzerindeki sensörler yardımıyla oluşan kuvvetlerin ölçülmesi esasına dayanan Split-Hopkins test düzeneği ile ölçülmektedir. Darbe olayından sonra malzemenin eski şeklini alabildiği bölge elastik bölge olarak isimlendirilir.

Elastik bölgede, yoğunluk ve basıncın birbiriyle ilişkisi doğrusaldır. Buradan hareketle, malzeme içerisindeki dalgaın ilerleyiş hızının, eşitlik 4.10.'da gösterildiği gibi, basınçtaki değişimin yoğunluktaki değişime oranı olduğunu söyleyebiliriz (Erdik, 2017).

$$c = \frac{dP}{d\rho} \quad (4.10)$$

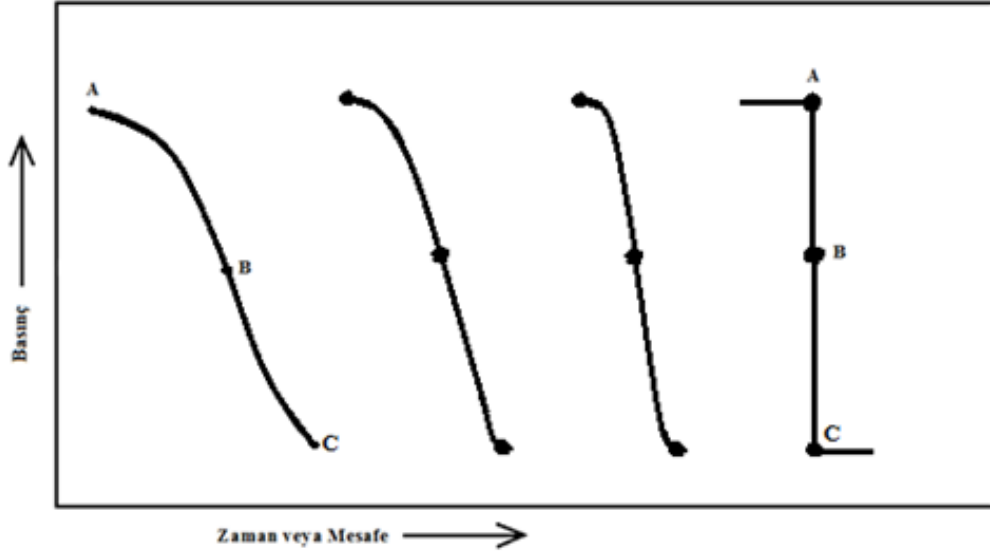
Patlama sonucu oluşan şok dalgaları, Cooper tarafından tanımlanmıştır (Cooper, 1996). Buna göre soldan sağa doğru hareket eden yüksek basınçlı bir dalgaın bir kesiti, Şekil 4.4.'de gösterilmektedir. Burada, A noktasındaki basınç diğerlerine oranla daha fazla, c noktasındaki basınç daha azdır (Cooper, 1996).



Şekil 4.4 Yüksek Basınçlı Bir Dalgaın hareketi

P. W. Cooper, Explosive Engineering. New York: WILEY-VCH, 1996.

Dalga'nın hızı, gerilme veya basıncın artışıyla artmaya devam eder. Bu sebeple, A noktasında dalga'nın hızı daha yüksek, C noktasında ise daha düşüktür. Patlama olayında basınç dalgası, zamanla Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi şok dalgası haline dönüşür.



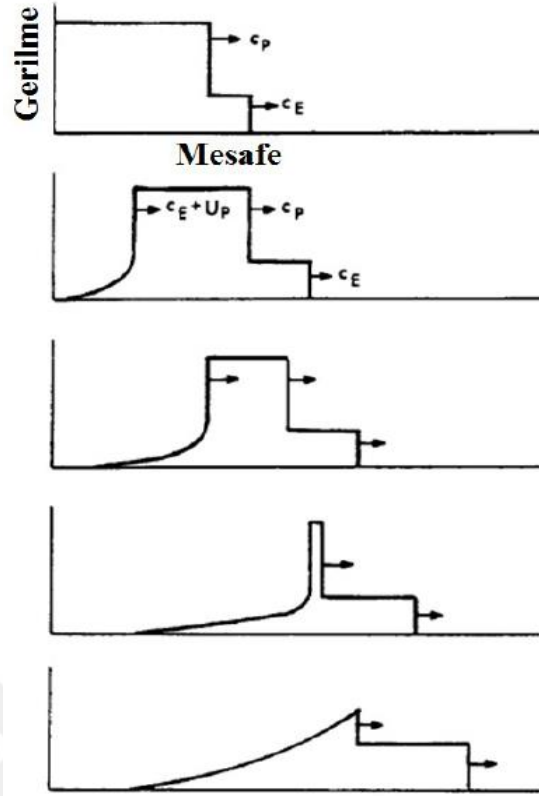
Şekil 4.5 Basınç Dalgasının Şok Dalgasına Haline Geçişi

P. W. Cooper, Explosive Engineering. New York: WILEY-VCH, 1996.

Şekil 4.5.'da, dalga'nın şeklinin zamanla düşey yönde bir çizgi halini alıncaya kadar değiştiği ve şok dalgasına dönüştüğü görülmektedir. Dalga'nın düşey yönde bir çizgi halini almasından sonra, dalga'nın önündeki ve arkasındaki partiküllerin/moleküllerin birbiri arasındaki düzgün geçişi biter. Böylece dalga hareketi son şeklini alarak şok dalgası haline dönüşmüş olur.

Patlamanın ani bir şekilde oluşmasından bir süre sonra, basınç değeri maksimum seviyeye ulaşır. Bu seviyeden sonra kimyasal tepkimenin tamamlanmasına kadar hareketine devam eder. Kimyasal tepkimenin tamamlanmasıyla beraber, patlamanın merkezinde basınç düşmeye başlar ve şok dalgaları gücünü yitirmeye başlar.

Hareketin sonunda şok dalgaları Şekil 4.6.'de görüldüğü gibi gücünü yitirir ve yavaş yavaş sönümlenir.



Şekil 4.6 Şok Dalgalarının Gücünü Yitirmesi

P. W. Cooper, Explosive Engineering. New York: WILEY-VCH, 1996.

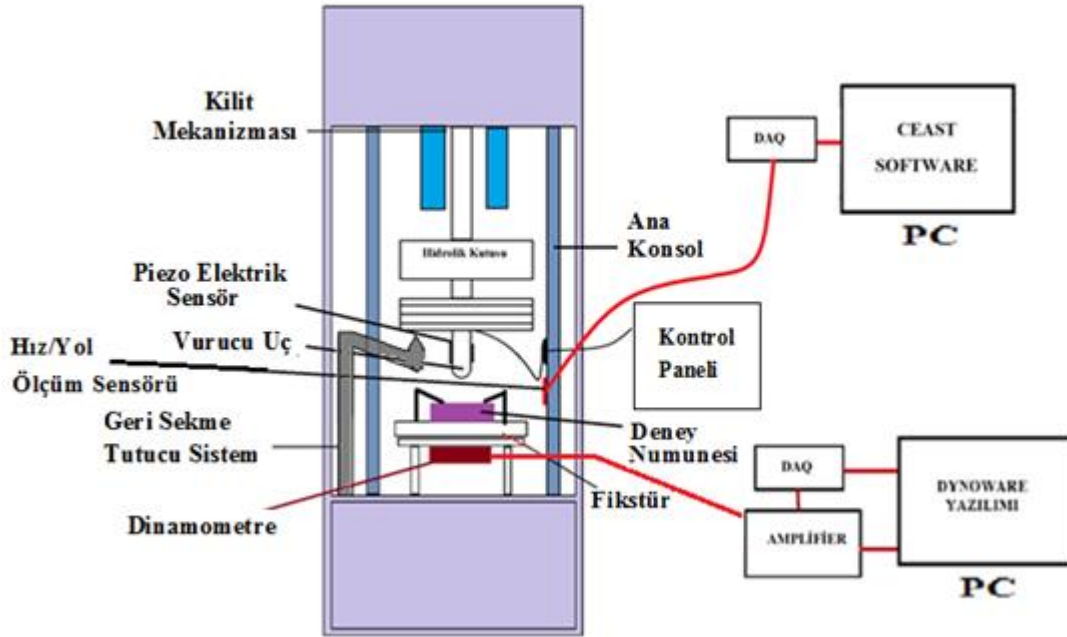
5. MATERYAL VE METOD

5.1. Materyal

5.1.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada, Al 5083 matrisli deney materyalinin, patlama olayında darbeye karşı davranışının incelenmesi ve böylece benzer materyallerin kullanıldığı zırh tasarımlarına katkı sağlayacak bilgiler elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla bir deney düzeneği (Şekil 5.1.) tasarlanmıştır. Deney tasarımının kurgulanmasında, Instron Ceast 9350 Ağırlık Düşürme Test Cihazı ana unsur olarak planlanmıştır.

Söz konusu testler, Milli Savunma Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan Instron Ceast 9350 Ağırlık Düşürme Test Cihazında yapılmıştır. Ağırlık düşürme test cihazının fikstür kısmına deney numunesi yerleştirilerek, gömme başlı M8 çelik civata ile dinamometre bağlanmış, kistler kuvvet ölçüm sistemi yardımı ile de dinamometreden alınan veriler bilgisayarda işlenmiştir. Deney tasarımının Şekil 5.1.'de şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 5.1 Deney Düzeneği

Literatürde, ağırlık düşürme testlerinin (deney plakasının ön yüzünden ölçüm) ve bir kuvvet ölçüm sisteminin (deney plakasının arka yüzünden ölçüm) beraber tasarlandığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Malzemelerin enerji sönümlene kabiliyetlerinin anlaşılması üzerine kurgulanmış standart olmayan metotlar geliştirildiği görülmesine rağmen, tasarımı yapılan ölçme sistemine benzer bir tasarım bulunmamaktadır.

Patlama her ne kadar ön yüzde etkilerini gösterse de, malzemenin arka yüzüne yansıyan kuvvetlerin de anlaşılması için giriş ve çıkış kuvvetlerinin ölçüldüğü bu şekilde bir tasarım tercih edilmiştir.

Bu amaçla, Al 5083 matrisli kompozit zırh tasarımının temel alındığı bir modelleme üzerinde, (dolu, boşluklu ve aralıklı tasarım dahil) 10 farklı tasarım denenmiş ve bir enerji sönümlene modeli oluşturulmuştur.

5.1.2. Deney Numunesi

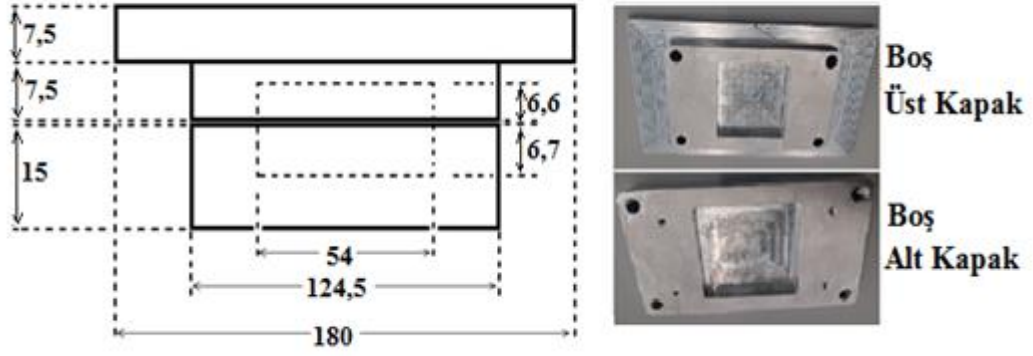
Deneyisel çalışmada, kimyasal özellikleri Tablo 5.1.'de verilen 5083 serisi alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Deney plakaları, 15 mm kalınlığında Al 5083 malzemedan, CNC tezgah yardımıyla, üst kapak eni 100 mm ve alt kapak eni 74,5 mm olacak şekilde, alt ve üst kapaklar birbiriyle örtüştürülerek kesilmiştir. Al 5083 alaşımının yoğunluğu, 2,7137 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Kapaklar, 30 mm uzunluğunda, 4 adet gömme başlı M8 metrik cıvata ile birleştirilecek şekilde tasarlanmıştır.

Tablo 5.1 5083 Serisi Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (%)

Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Ti	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni
93,70	4,83	0,551	0,336	0,29	0,100	0,050	0,050	0,035	0,030	0,010	0,007

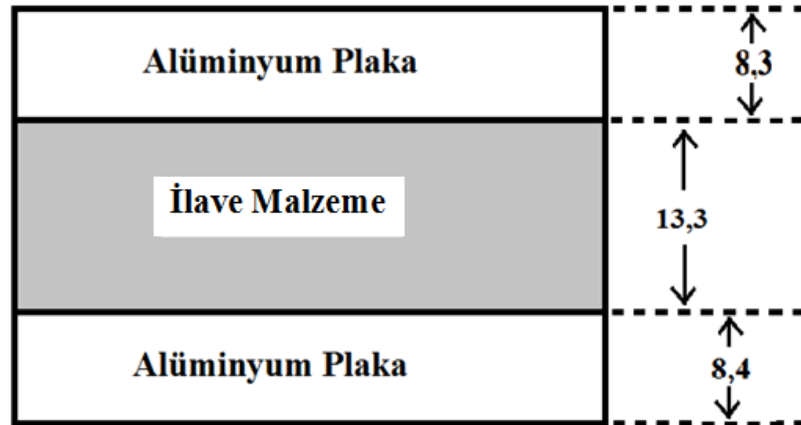
J. Sumit, S. Neeraj, ve G. Rajat, "Dissimilar alloys (AA6082/AA5083) joining by FSW and parametric optimization using Taguchi, grey relational and weight method", Engineering Solid Mechanics 6, ss. 51-66, doi: doi: 10.5267/j.esm.2017.10.003.'den uyarlanmıştır.

Alüminyum plakaların içinden, alümina bilyaların (Çap:5,4 mm) 10 adeti sıgacak şekilde, 54x54 mm ebatlarında kare bölge boşaltılarak, boşaltılan kısma ilave malzeme yerleştirilerek deney numuneleri üretilmiştir. Boşaltılan kısmın görünümü Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Deney Numunesi Ana Gövdesi

Deneylerde vurucu ucun etki bölgesi, 54 mm ebadında kare olarak kesilen kısmın merkezine doğru olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda deney numunelerini, Şekil 5.3.'deki gibi iki plaka (üst ve alt kapak) arasına çeşitli malzemelerin (ilave malzeme) yerleştirildiği sandviç plakalı zırh şeklinde bir deney materyali olarak düşünebiliriz.



Şekil 5.3 Sandviç Plakalı Zırh Deney Materyali

İlave malzeme olarak, alümina bilya (Al_2O_3 çap:5,4 mm), çelik bilye (100MnCr5), grafen katkılı kompozit kumaş (GKK) (Aytaç, Aytav, vd., t.y.), düşük yoğunluklu

köpük yapılı polimer (KYP), kevlar kumaş plaka, stres altında sıvı emdirilmiş kevlar (SASS) ve karbon elyaf takviyeli kompozit (CETK) kullanılarak boşluklu plakalar doldurulmuş ve elde edilen materyal ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde ilave malzeme olarak kullanılan materyale ait bilgiler aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 5.2 İlave Malzeme Özellikleri

Malzeme Adı	Malzeme Kodu	Ağırlık (g)	Toplam Ağırlık (g)	Toplam Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
Dolu	D	105,24	237,39	87,48	2,7137
Boşluklu	B	0	132,15	87,48	1,5106
Aralıklı	A	40,45	172,60	87,48	1,9730
Alümina Bilya	AB	89,92	222,07	87,48	2,5385
Çelik Bilya	ÇB	232,9	365,05	87,48	4,1730
Grafen Katkılı Kompozit Kumaş	GKK	36,54	168,69	87,48	1,9283
Düşük Yoğunluklu Köpük Yapılı Polimer (Ersan Sünger- $\rho=39$ kg/m ³ Poliüretan Sünger)	KYP	1,52	133,67	87,48	1,5280
Kevlar Plaka	K	30,25	162,40	87,48	1,8564
Stres Altında Sıvı Emdirilmiş Kevlar	SASS	20,44	152,59	87,48	1,7443
Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit	CETK	48,34	180,49	87,48	2,0632

5.1.3. Numunenin Fikstür Üzerine Sabitlenmesi

Deney materyalinin ağırlık düşürme cihazı fikstürüne yerleşimi Şekil 5.4.'de görülmektedir. Deney materyalinin, düzeneğe tam olarak yerleşebilmesi için, köşeleri yuvarlatılmıştır. Ayrıca numuneler, 4 adet metal klemp sistemi ile deney numunesine sabitlenmiştir.



Şekil 5.4 Fikstür Üzerine Numunenin Yerleşimi

5.1.4. Numunenin Dinamometreye Montajı

Numune, Kistler 9119AA2 model dinamometreye, Şekil 5.5.'de görüldüğü gibi alt kapağın altından, M8 çelik civata ile monte edilmiştir. X, Y ve Z doğrultusunda kuvvet ölçümü alabilmektedir.



Şekil 5.5 Numunenin Dinamometreye Montajı

5.2. Metot

5.2.1. Ağırlık Düşürme Testi

Ağırlık düşürme testi, darbe testleri arasında en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık düşürme testi bazı kaynaklarda, düşen ağırlık testi olarak da adlandırılmaktadır.

Testlerde kullanılan ağırlık düşürme test cihazları, optik algılayıcılarının yardımıyla, yer değiştirme, kuvvet, darbe enerjisi ve hız bilgilerini ölçebilmektedir (Kutlay, 2012).

Testler, yatay ekseninde fiktür üzerinde sabitlenmiş deney numunesinin üzerine, belirli bir kütlenin belirli bir yükseklikten kılavuz raylar yardımıyla serbest bırakılarak veya ilk hızla itilerek çarptırılması esasına dayanır. Deney kütlesi, üzerine bırakıldığı materyali delemese, bir miktar geri sekme de meydana gelebilir. Geri sekme sonrası ikinci darbenin istenmediği durumlar için cihazda, geri sekmede tutucu sistem de bulunmaktadır (Fidan, 2011; Yağbasan, 2019).

Ağırlık Düşürme Testleri, MSÜ Makina Mühendisliği bölümünde yer alan Instron Ceast 9350 ağırlık düşürme test cihazı ile ASTM D7136, 2020 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

Bu test sisteminde 10 J enerji elde etmek için vurucu üzerine 4 kg ağırlık bağlanmıştır. Deneyler, vurucu ucun bağlı olduğu sistemin ağırlığıyla beraber toplam 9,41 kg ağırlık ile ve 10 J enerji ile gerçekleştirilmiştir. Çarpma anında 1.46 m/s hız değerine ulaşılmıştır. Çarpma testleri ile zaman, hız, yer değiştirme, kuvvet ve enerji verileri elde edilmiştir.

Tablo 5.3’de (4.2.) ve/veya (4.3.) denklemleri kullanılarak vurucu kütlenin sahip olduğu enerji seviyeleri ayrıca hesaplanmıştır (Akceylan, 2009).

Tablo 5.3 Darbe Enerjisi Hesaplaması

Malzeme Kütlesi (kg)	Yükseklik (m)	Çarpma Hızı (m/s)	Enerji (J)
9,41	0,108	1,46	10,029

Ağırlık düşürme test cihazından, zamana bağlı olarak kuvvet, enerji hız ve yer değiştirme değerleri alınabilmektedir. Bununla birlikte, W iş (J), h yükseklik (m), F kuvvet (N), t süre (s), m kütle (kg), a ivme (m/s^2), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), V hız (m/s), V_0 ilk hız olmak üzere;

$$W = F \cdot h \quad (5.1.)$$

$$F = m \cdot a \quad (5.2.)$$

$$H = g t^2 / 2 \quad (5.3.)$$

$$V = V_0 + g.t \quad (5.4.)$$

(5.1.), (5.2.), (5.3.) ve (5.4.) eşitlikleri yardımıyla iş, serbest düşme, hız değerleri manuel olarak da hesaplanabilmektedir.

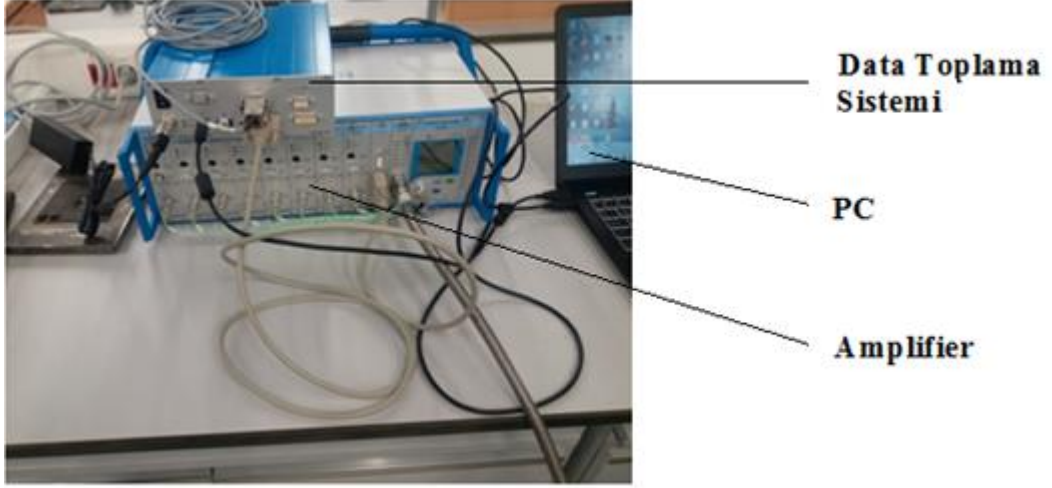
Herhangi bir patlama olayında enerji, mekanik dalgalar halinde ve küresel olarak yayılmaktadır. Bu nedenle testlerde, 20 mm çapında yarı küresel çelik bir vurucu uç tercih edilmiştir.

5.2.2. Kuvvet Ölçümü

Kuvvet ölçüm sistemi, Kistler 9119AA2 model dinamometre, Type 5697 DAQ (Data Toplama Sistemi), Type 5080 Multi Charge Amplifier ve PC'den oluşmaktadır. Dinamometreden gelen veriler, veri toplama sistemi ve amplifier yardımıyla işlenmekte ve bilgisayara aktarılmaktadır (*KISTLER Dynoware Kullanım Kılavuzu*, t.y.).

Ayrıca plakaların altına bağlanan dinamometre ile uygulanan enerji seviyesine bağlı olarak elde edilen kuvvet değerleri de kaydedilmiştir.

Şekil 5.6.'daki fotoğrafta, ölçümlerin gerçekleştirildiği kuvvet ölçüm sistemi görülmektedir. Altta Amplifier, sağ yanda PC ve üstte DAQ (Data Toplama Sistemi) yer almaktadır.



Şekil 5.6 Kistler Kuvvet Ölçüm Sistemi

5.2.3. Deneyin Sayısal Modellenmesi

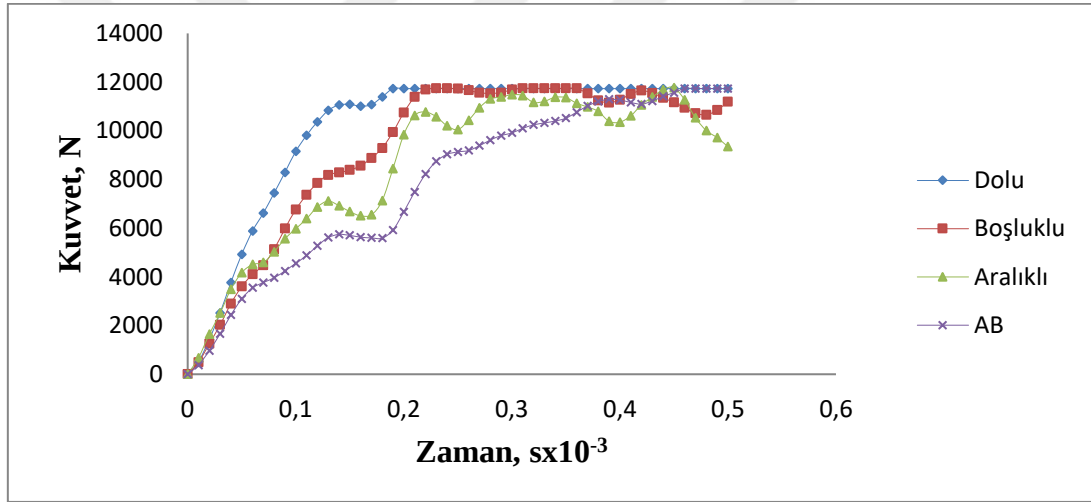
Deneyin sayısal modellenmesinde, ABAQUS programı kullanılmıştır. Modellemeden çıkan sonuçların ağırlık düşürme test cihazı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırması işlemlerinde ağırlık düşürme test cihazında gerçekleştirilen ağırlık düşürme testlerinden elde edilen darbe ucu ağırlığı ve hızı temel alınarak program çalıştırılmıştır. Buna göre modellemede, 10 J enerji miktarına karşılık gelecek şekilde vurucu başlık ağırlığı, 9,41 kg ve darbe hızı 1,46 m/s olarak alınmıştır.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

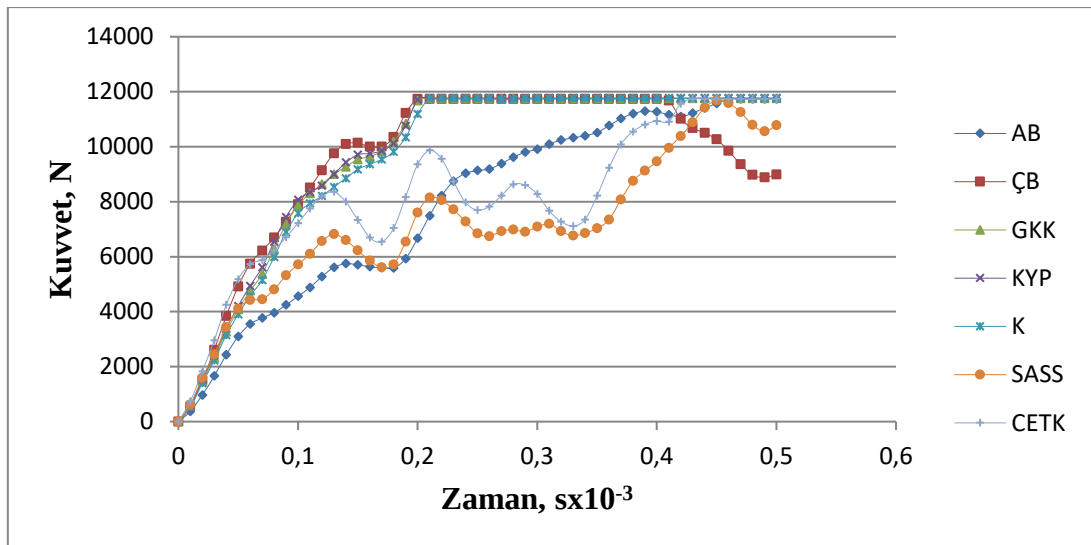
Deneyle, Milli Savunma Üniversitesi Savunma Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümün laboratuvarında bulunan Instron 9350 Ağırlık Düşürme Test Cihazı ile yapılmıştır. Cihaz, 9,41 kg ağırlık ile 10 j enerji seviyesinde darbe işlemini gerçekleştirecek şekilde ayarlanmıştır.

6.1. Kuvvet-Zaman Grafikleri

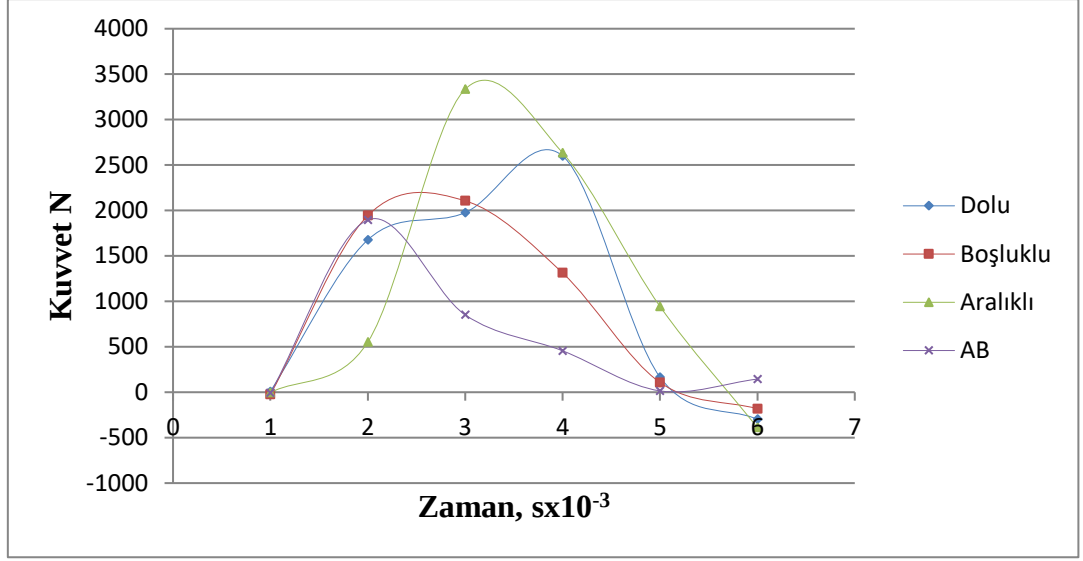
Şekil 6.1.(a), 6.1.(b), 6.1.(c) ve 6.1.(ç)'de ağırlık düşürme test cihazı verileri ile dinamometre verileri karşılaştırılmaktadır.



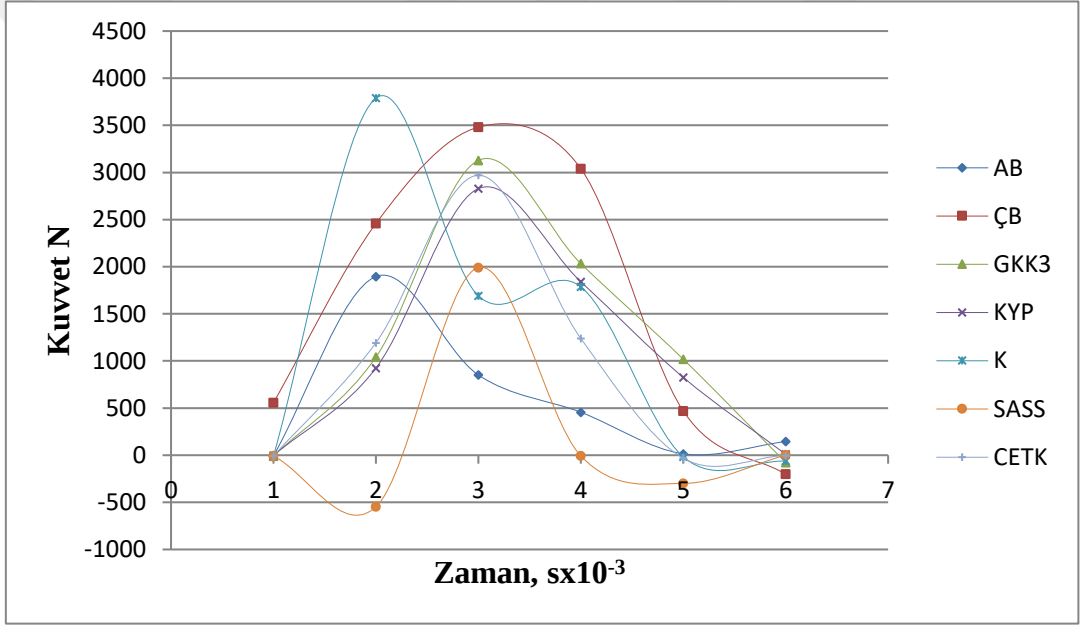
(a)



(b)



(c)



(ç)

Şekil 6.1 (a): Ağırlık Düşürme Testi Kuvvet-Zaman Grafiği (4 Farklı Tasarım)
(b): Ağırlık Düşürme Testi Kuvvet-Zaman Grafiği (7 Farklı Tasarım)
(c): Dinamometre Kuvvet-Zaman Grafiği (4 Farklı Tasarım)
(ç) Dinamometre Kuvvet-Zaman Grafiği (7 Farklı Tasarım)

Ağırlık düşürme testlerinin sonuçlarına göre, alümina bilya, Şekil 6.1.(a)'da ilk etapta dolu, boşluklu ve aralıklı yapıya sahip deney numunesiyle, daha sonra Şekil 6.1.(b)'de diğer numunelerle karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.1.(a) grafiği incelendiğinde, aynı temas süresinde (0,13 ms) dolu malzemeye etkileyen kuvvet 10.832,73 N olarak gerçekleşirken, sırasıyla boşluklu, aralıklı, AB tasarımlarında ölçülen kuvvet miktarı daha düşük gerçekleşmiştir.

Şekil 6.1.(a)'da maksimum kuvvet miktarına en erken dolu malzemenin, en geç AB yapısının ulaştığı, Şekil 6.1.(b)'de maksimum kuvvete en erken ÇB yapısının, en geç ise AB ve SASS yapılarının ulaştığı görülmüştür.

Şekil 6.1.(b) grafiğinde dolu numuneye göre 0,13 ms'de temas kuvvetleri daha düşük gerçekleşmiş, 0,45 ms'de tüm tasarımlarda maksimum temas kuvvetine ulaşılmıştır. Ancak D ve ÇB tasarımlarında 0,2 ms'de maksimum temas kuvvetine daha önce ulaşılmıştır.

D ve ÇB tasarımlarının daha erken sürede maksimum temas kuvvetine ulaşması, beklenen bir sonuçtur. Bu durumu, monoblok yapının, etkiyen tüm kuvveti karşılaması ve rijit yapısından dolayı kalınlığı boyunca iletmesi ile açıklayabiliriz (Ataş & Sayman, 2008).

A, AB, SASS, CETK yapılarının ağırlık düşürme testinde, yükleme esnasında, benzer dalgalı grafiklerin oluştuğu görülmektedir.

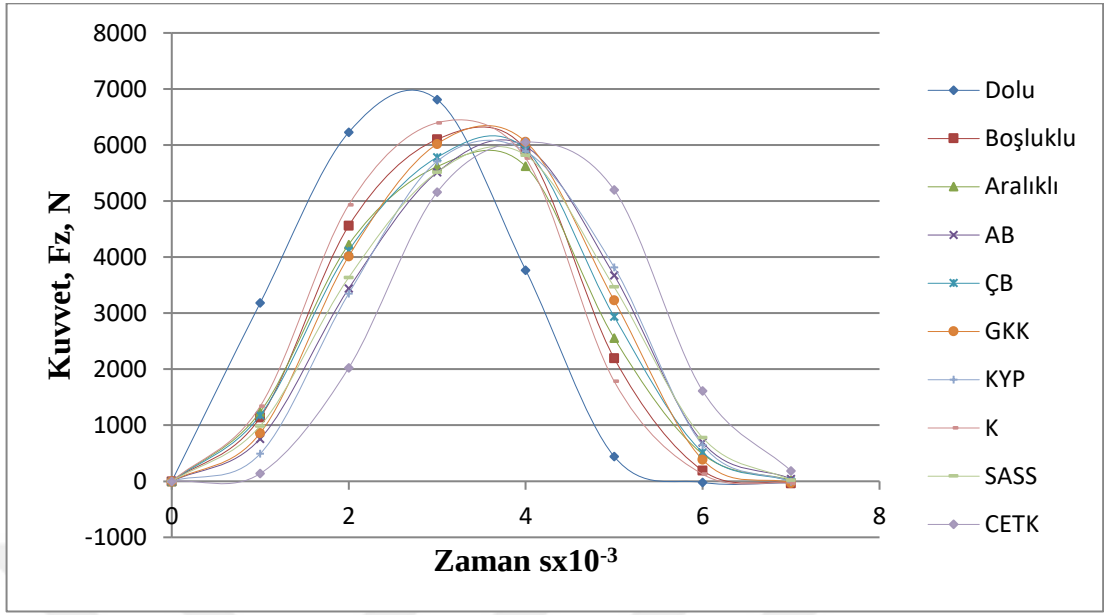
Grafiklerden, ağırlık düşürme cihazı ile aktarılan enerjilerin aynı seviyede olmasına rağmen, dinamometre ile arka yüzden okunan değerlerde, alümina bilyalı yapıda diğerlerine oranla daha düşük değerler okunduğu görülmektedir.

6.1.(c) ve 6.1.(ç) grafikleri incelendiğinde, dinamometre sonuçlarına göre, 6.1.(c) grafiğinde AB yapısında en düşük kuvvetin ölçüldüğü, 6.1.(ç) grafiğinde ise, AB ve SASS yapılarında en düşük kuvvet değerinin ölçüldüğü görülmüştür.

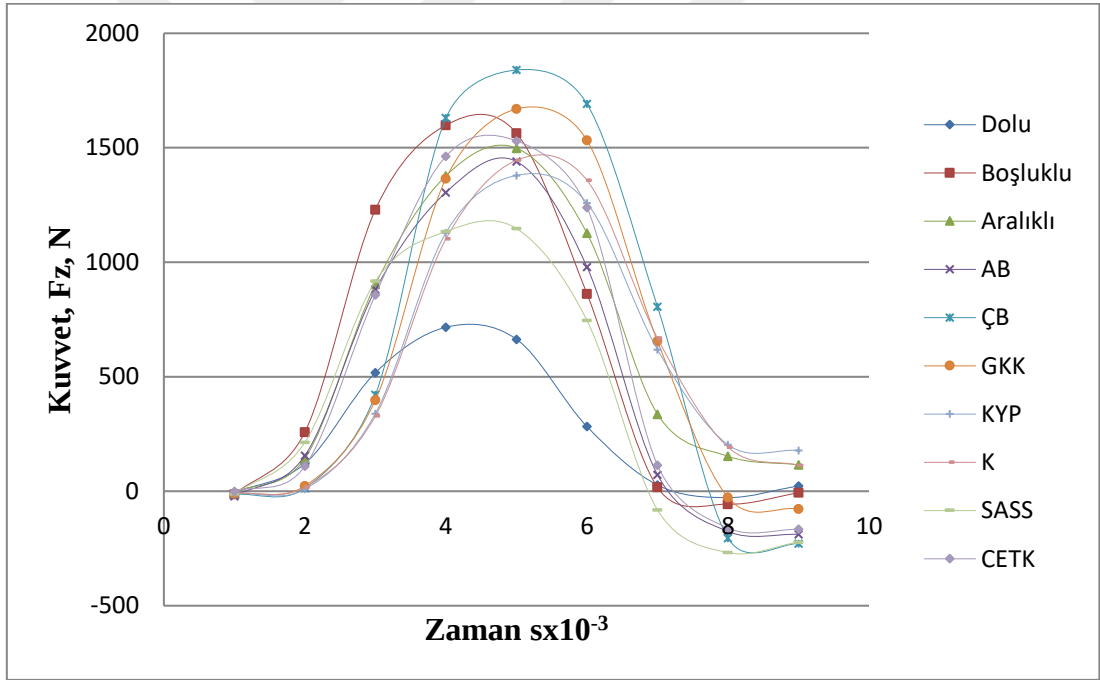
Latis yapıli zırh tasarımlarının enerji sönümleme kabiliyetlerinin daha yüksek oluşu beklenen bir sonuçtur. Alümina bilyaların boşluklu mikro yapısı da seramiklerin enerji sönümleme etkinliğini artırmaktadır.

Şekil 6.1.(a) ve Şekil 6.1.(b)'de yer alan kuvvet-zaman grafiklerinde, ilk 0,2 ms'lik zaman diliminde darbe ucunun geri sekmesi dolayısıyla dalgalı bir grafik gözlemlenmiştir.

Dalgalı kısmın daha stabil bir kuvvet dağılımı haline gelmesi maksadıyla, deney numunesi üzerinde darbe ucunun temas ettiği yüzey üzerine, doğuş polimer plastik firması tarafından üretilen polimer bir malzeme yerleştirilerek, darbe ucunun temas esnasındaki titreşim miktarı azaltılmış ve deneyler tekrarlanmıştır. Yeni deney sonuçları polimer adı ile adlandırılmış olup kuvvet-zaman 6.2.(a) ve 6.2.(b) grafiklerinde verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.2 (a): Polimer Yapı Ağırlık Düşürme Testi Kuvvet-Zaman Grafiği
(b): Polimer Yapı Dinamometre Kuvvet-Zaman Grafiği

Şekil 6.2.(a)'da polimer yapının ağırlık düşürme testlerine ait kuvvet-zaman grafikleri görülmekte olup, numunelerdeki maksimum kuvvet değerleri birbirine çok yakındır.

Şekil 6.2.(a) incelendiğinde, 10 farklı tasarımdan D malzeme haricindeki tasarımlar benzer sürelerde (3,7 ms) ortalama 6.000 N değerlerine ulaşırken, dolu malzemenin 2,5 ms'de 7.000 N değerine ulaştığı görülmektedir. Polimer ön plakasız yapılarla veriler kıyaslandığında, yük etkisinin daha stabil olduğu görülmektedir.

Bu durum, vurucu ucun sekme yapmadan maksimum temas kuvvetine ulaştığını göstermektedir.

Buna karşılık dinamometreden alınan sonuçlara göre Şekil 6.2.(b)'de yer alan grafikte, D tasarımı en düşük kuvvet değerlerini gösterirken, ÇB tasarımı en yüksek kuvvet değerini göstermiştir. Ayrıca, D tasarımın diğer tasarımlara oranla %37,58 (716,107/1147,09) daha düşük kuvvet meydana getirdiği görülmektedir.

Sandviç plakalı yapılarda, ilk katman elastomer, ikinci katman monoblok yapılı tasarımlar, şok dalgalarının oluşturduğu giriş kuvvetlerine karşılık, arka yüzden ölçülen çıkış kuvvetlerini düşürmektedir.

6.2. Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri

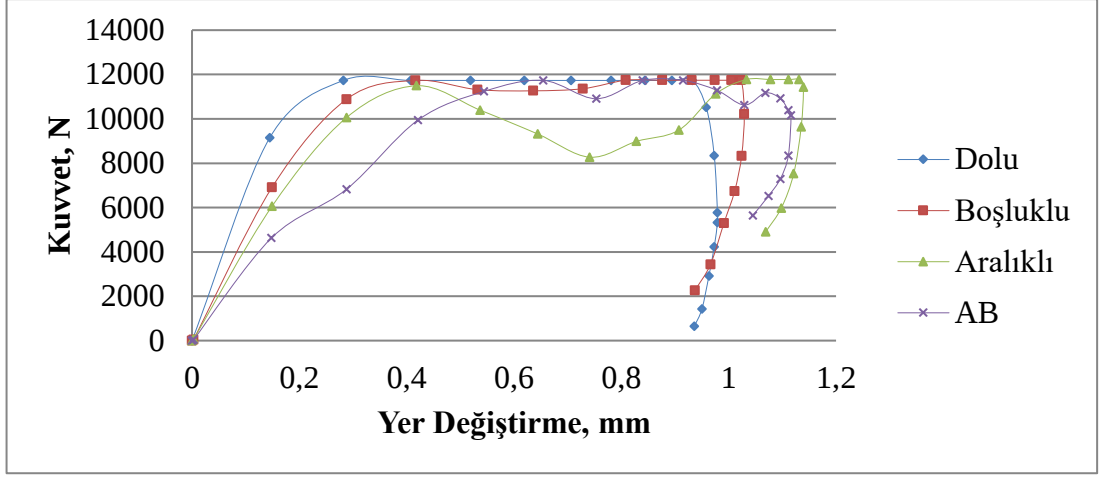
Kuvvet-yer değiştirme grafikleri, değerlendirmelerde esas alınan grafiklerdendir. Şekil 6.3.(a) ve 6.3.(b)'de yer değiştirme değerlerinin 1 mm civarında düşmeye başladığı görülmektedir. Buradan hareketle, sekmenin bu noktalarda başladığını söyleyebiliriz. Polimer yapıda, kuvvetin azalmaya başladığı değerler, geri sekmenin başladığı noktaları göstermektedir.

Elde edilen grafikler, enerjinin korunumu bölümünde yer alan kuvvet-yer değiştirme kapalı uçlu grafikleriyle uyumludur (Ataş & Sayman, 2008).

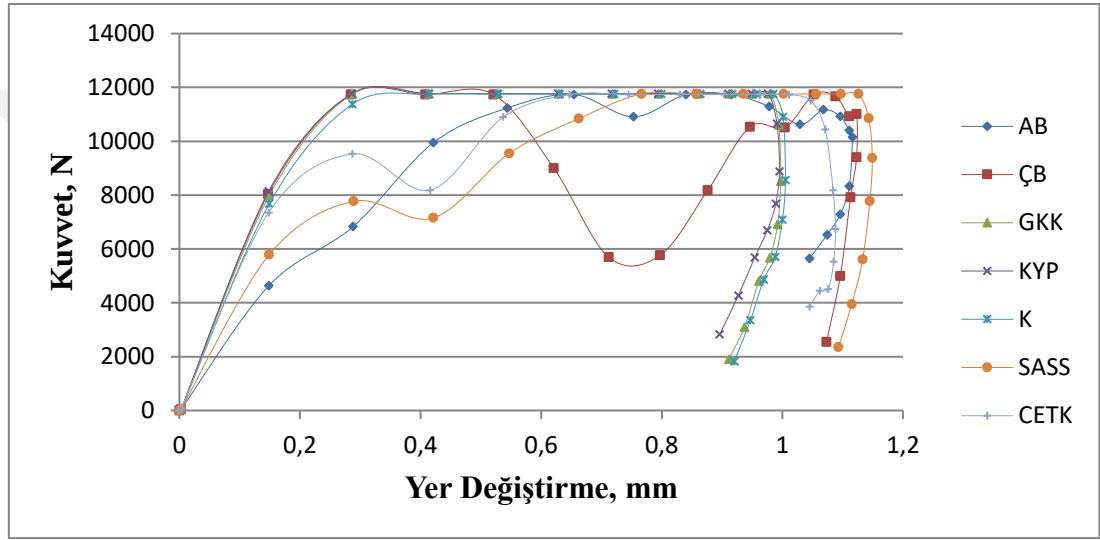
Şekil 6.3.(a) ve Şekil 6.3.(b)'de vurucu ucun maksimum 1,15 mm ilerlediği görülmektedir.

Ancak Şekil 6.3.(c)'de dolu malzemede 3,04 mm, diğer tasarımlarda 3,5-5 mm aralığında ilerleme gerçekleştiği görülmektedir.

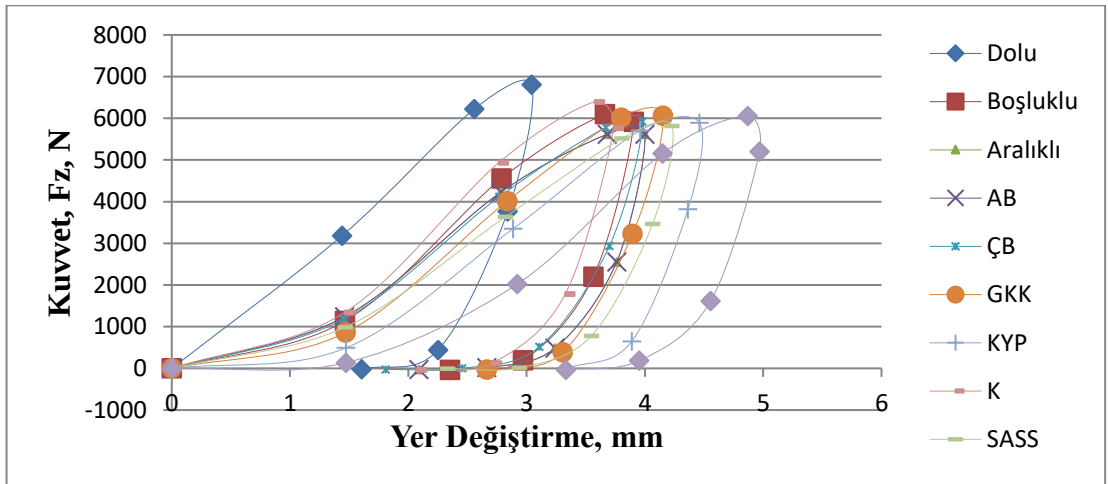
İlk katmanın polimer esaslı malzeme oluşundan dolayı ilerleme miktarının artması, polimer malzemede vurucu ucun ilerlemesinin yüksek olması sebebiyle, beklenen bir durumdur. Ön yapının polimer esaslı malzeme ile katmanlandırılması kuvvet-yer değiştirme grafiğinde elde edilen ilerleme miktarlarında farklı ayrı değerlerin oluşmasını sağlamıştır.



(a)



(b)

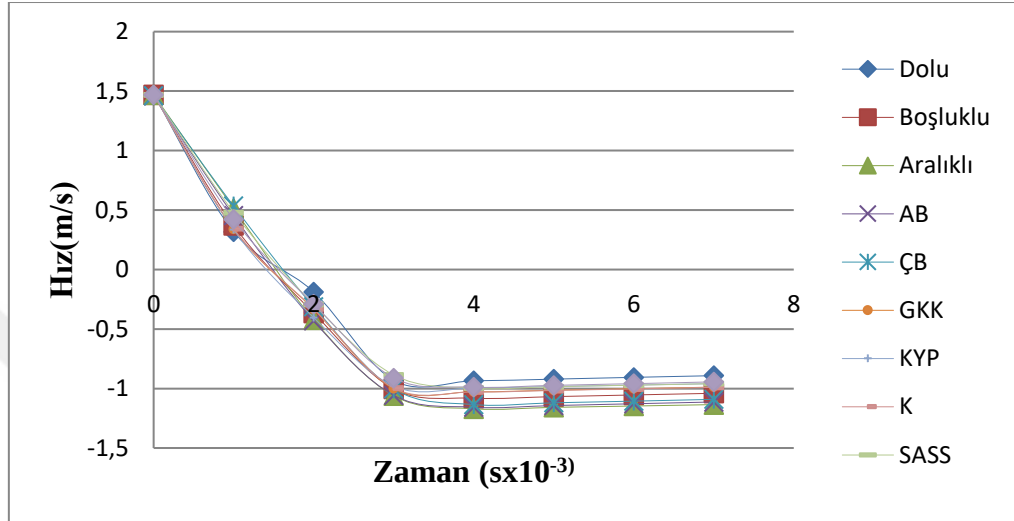


(c)

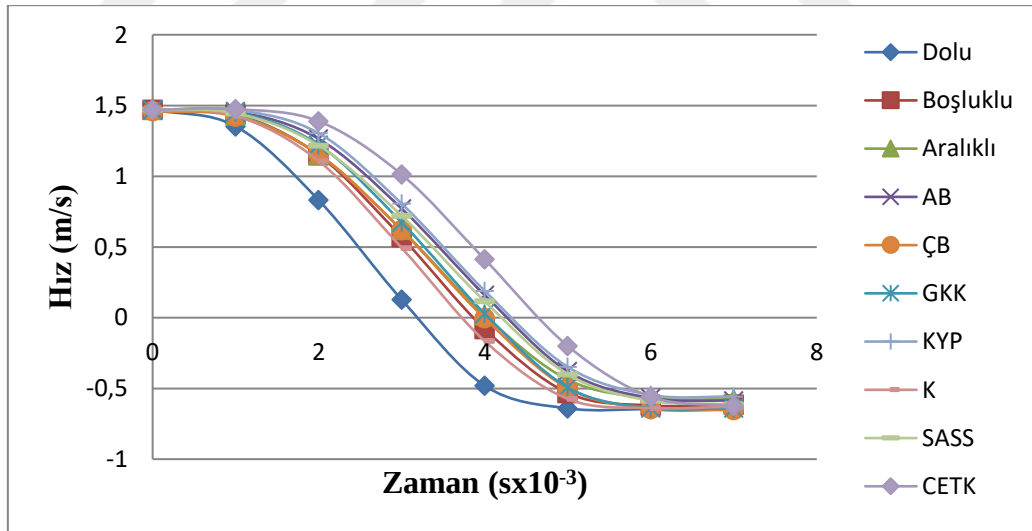
Şekil 6.3 (a): Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği (4 farklı tasarım)
(b): Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği (7 farklı tasarım)
(c): Polimer Yapı Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

6.3. Hız-Zaman Grafikleri

Şekil 6.4.(a) ve Şekil 6.4.(b)'de yer alan hız zaman grafiklerinden, darbenin başlangıcından itibaren hızın yaklaşık 1,46 m/s değerinden düşmeye başladığı, zamanla düşüş miktarının negatif değerlere ulaştığı ve daha sonra hızın yönünün yeniden artı değerlere doğru değiştiği görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.4 (a): Hız-Zaman Grafiği
(b): Polimer Yapı Hız-Zaman Grafiği

Polimer yapısız tasarımda darbenin negatif değere ulaştığı ikinci milisaniyeden itibaren geri sekmenin başladığı görülmektedir.

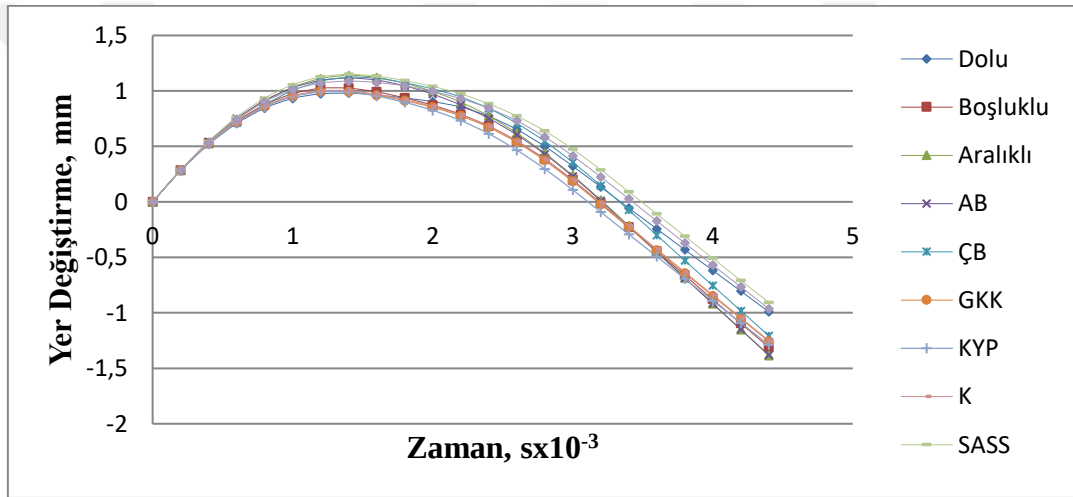
Geri sekme, polimer yapı malzemedeki 4. milisaniyeden itibaren başlarken, malzeme yapısıyla bağlantılı olarak D yapıda daha erken başlamaktadır (3,2 ms).

6.4. Yer Değiştirme-Zaman Grafikleri

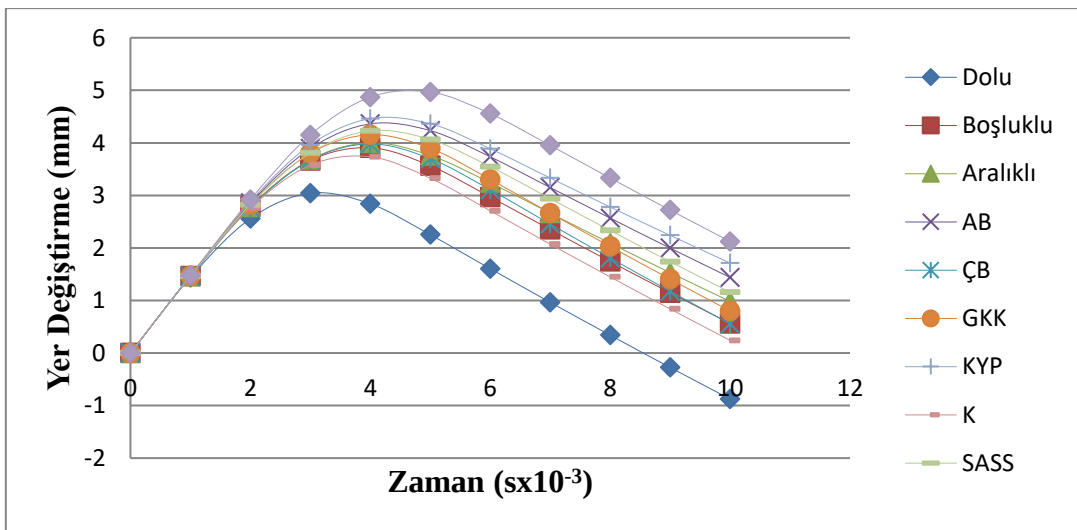
Şekil 6.5.(a) ve 6.5.(b)'deki grafiklerde, ilk 5 ms'lik zaman diliminde, zamana karşı yer değiştirme miktarları görülmektedir. Grafiklerde, yer değiştirme davranışları birbirleriyle uyumlu şekilde ilerlemiştir.

Grafiklerin başlangıcında, yer değiştirme miktarları uyumlu davranışlar sergilemiş ve grafik çizgileri bariz bir şekilde birbirinden ayıramamıştır. Bu durum, yüklenen enerji miktarlarının aynı seviyede olduğunu göstermektedir. Polimer yapı için de aynı durum söz konusudur.

Hız-zaman grafiklerinde görülen zaman farkı, yer değiştirme-zaman grafiklerinde de görülmektedir.



(a)

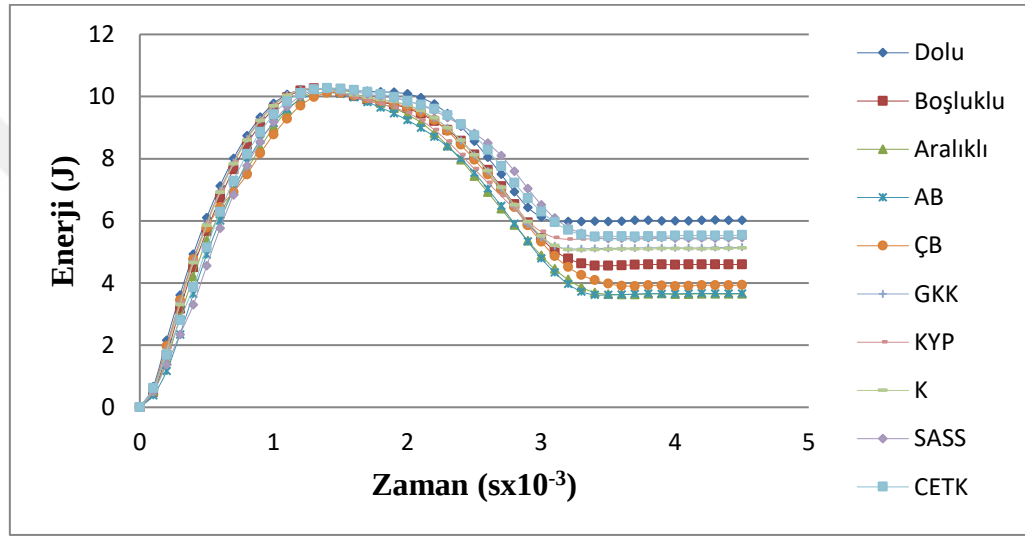


(b)

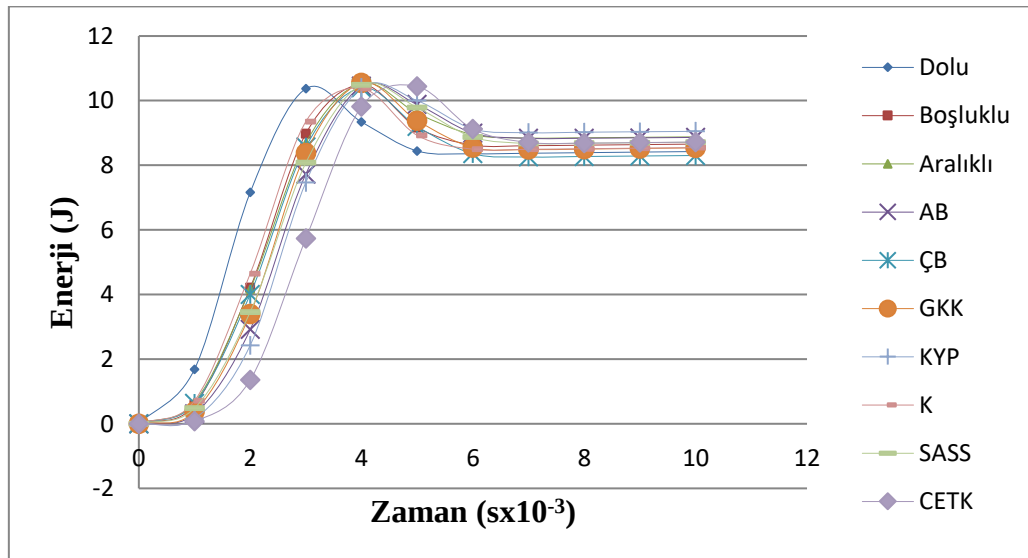
Şekil 6.5 (a): Yer Değiştirme-Zaman Grafiği
(b): Polimer Yapı Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

6.5. Enerji-Zaman Grafikleri

Şekil 6.6.(a) ve 6.6.(b)'de enerji zaman grafikleri görülmektedir. Enerji seviyesinin sabitlenmeye başladığı yaklaşık üçüncü ms'deki zamanı, vurucu ucun deney numunesiyle temasının bittiği an olarak değerlendirebiliriz. Burada, enerji seviyelerinin zamana bağlı olarak sabitlendiği seviyeler karşılaştırıldığında, AB yapısında enerji seviyesinin diğer yapılara göre en düşük değerde sabitlendiği görülmektedir. Bu durum, AB yapısının daha fazla enerji sönümlendiğini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.6 (a): Enerji-Zaman Grafiği
(b): Polimer Yapı Enerji-Zaman Grafiği

Polimer yapı ile desteklenmiş deney sonuçlarında, enerji seviyelerinin zamana bağlı olarak sabitlendiği değerler karşılaştırıldığında, ÇB yapısının enerji seviyesinin diğer yapılara göre en düşük seviyede sabitlendiği görülmektedir. Buradan hareketle, polimer yapı destekli deneylerde ÇB yapısının daha fazla enerji sönümlendiğini söyleyebiliriz.

6.6. Sayısal Modelleme Sonuçları

Ağılık düşürme deneyi, Abaqus (CAE/Explicit 2022) programında modellenmiştir. Modelleme programı, dolu numuneye 10 J enerji ile vuruş yapılacak şekilde çalıştırılmıştır.

Bilgisayar programında kullanılan parametreler, Tablo 6.1. Tablo 6.2. ve Tablo 6.3.'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Al 5083 Malzeme Özellikleri

Elastisite Modülü (E)	Poisson Oranı	Yoğunluk	Öz Isı
70 GPa	0,3	2700 kg/m ³	910 J/kgK

Mishra, V., & Kukshal, V. (2021). Numerical Analysis For Estimating Ballistic Performance Of Armour Material. Elsevier, 2021(44), 4731-4737. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.matpr.2020.11.221>.

Tablo 6.2 Al 5083 Malzemesinin Johnson-Cook Değerleri

A	B	n	C	m	Tm	ε0
210 MPa	620 MPa	0,375	0,0125	1,525	933 K	1

Gray III, G., Bingert, S., Wright, S., & Chen, S. (1994). High Temperature Silicides and Refractory Alloys.

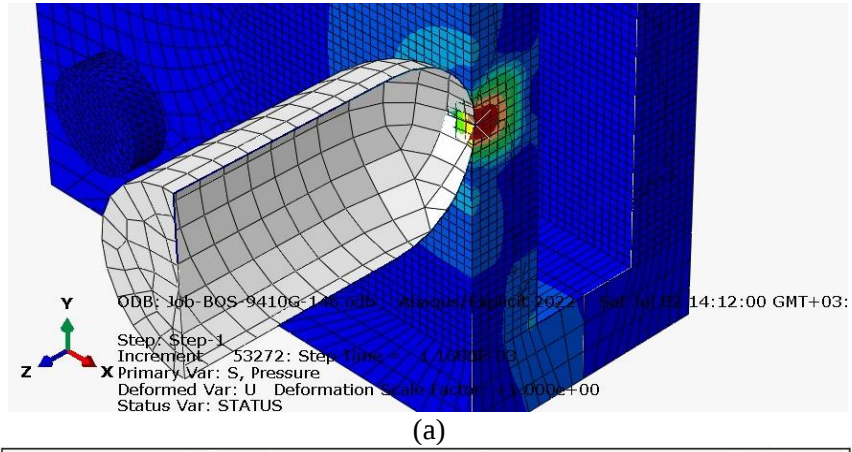
Tablo 6.3 Al 5083 Johnson-Cook Hasar Değerleri

D1	D2	D3	D4	D5
0,0261	0,0263	-0,349	0,247	16,8

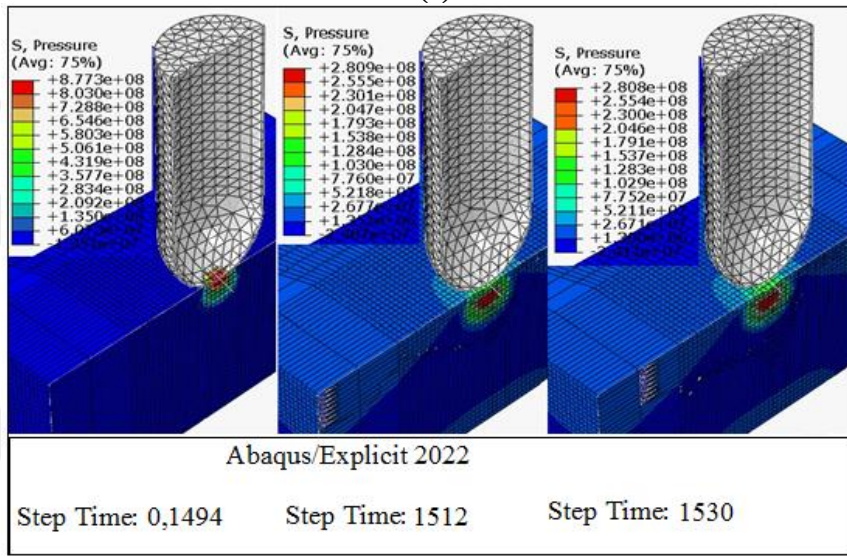
Mishra, V., & Kukshal, V. (2021). Numerical Analysis For Estimating Ballistic Performance Of Armour Material. Elsevier, 2021(44), 4731-4737. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.matpr.2020.11.221>.

Modelleme sonucunda darbenin ilerlemesi, B yapı için Şekil 6.7.(a)'da, dolu yapı için, Şekil 6.7.(b)'de (ön yüzde) ve Şekil 6.7.(c)'de (arka yüzde) görülmektedir. Darbenin ilerlemesi esnasında zamanla git gide basıncın arttığı darbenin

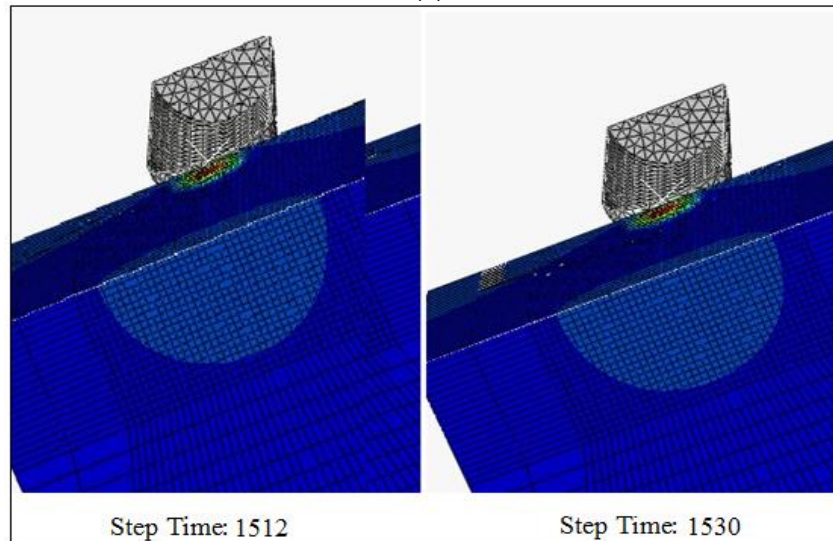
merkezindeki renk değişiminden anlaşılmaktadır.



(a)



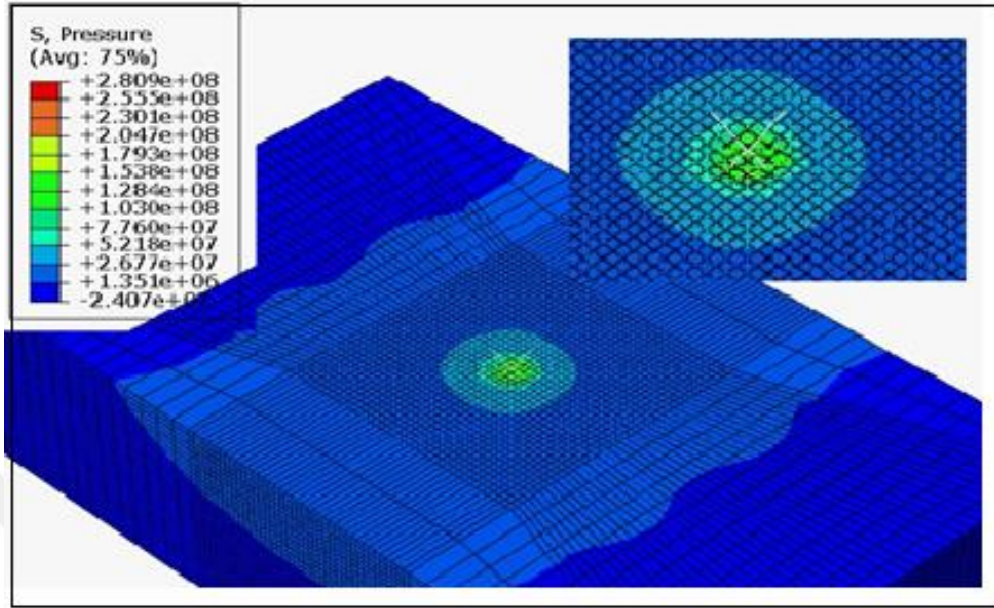
(b)



(c)

Şekil 6.7 (a): Sayısal Modelleme Darbenin İlerlemesi (B Yapı)
(b): Sayısal Modelleme Ön Yüzde Darbenin İlerlemesi (D Yapı)
(c): Sayısal Modelleme Arka Yüzde Darbenin İlerlemesi (D Yapı)

Şekil 6.8.'de darbenin etki alanı görülmektedir. Vurucu ucun yaklaşık 14 birim (yeşil renkli bölge) kareye etki ettiği hesaplanmıştır.



Şekil 6.8 Sayısal Modellemede Darbenin Etki Alanı

Modelleme programı sabit hızla darbeyi gerçekleştirecek şekilde ayarlanmış ve darbe gerçekleştirilmiştir.

Modelleme programından, dolu (D) ve boşluklu (B) yapı için alınan giriş ve çıkış maksimum basınç değerleri Tablo 6.4.'de verilmiştir.

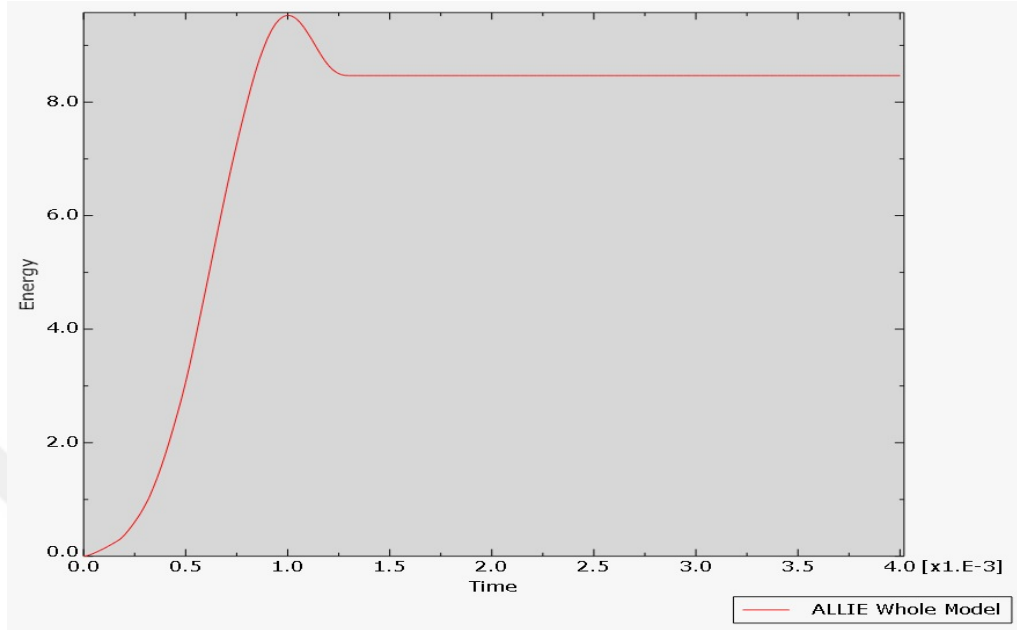
Elde edilen basınç değerleri, alan değeri (14 birim kare) ile çarpılarak basınç değerlerine karşılık gelen kuvvet değerleri hesaplanmıştır.

Çıkış kuvvet değerlerinin hesaplanmasında da aynı alan değeri kullanılmıştır.

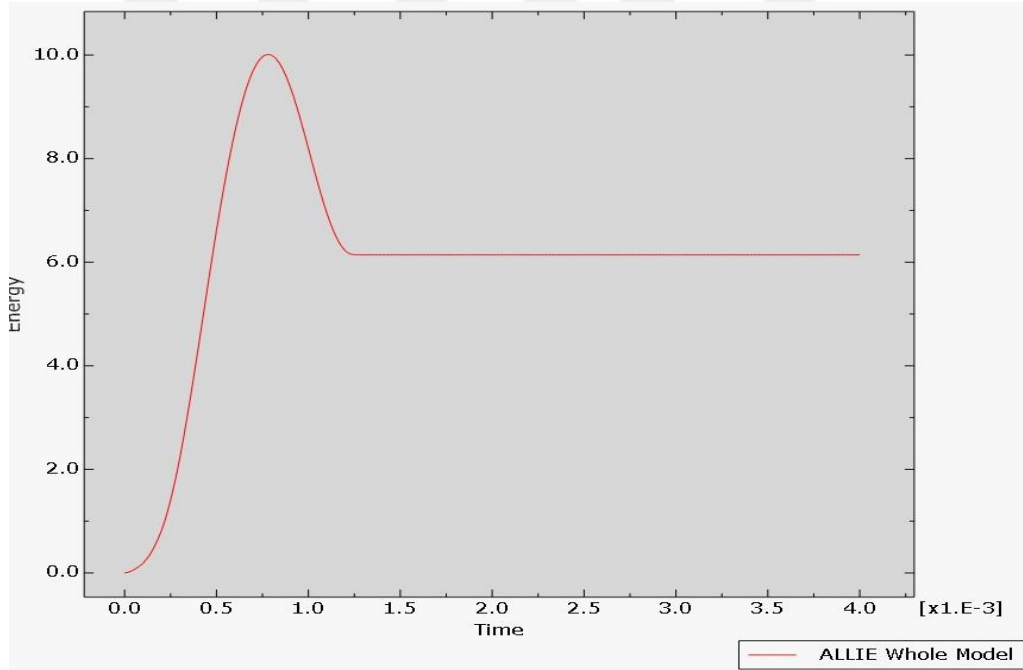
Tablo 6.4 Modelleme Giriş-Çıkış Basınç ve Kuvvet Değerleri

Malzeme	Maksimum Giriş-Çıkış Değerleri MPa		Maksimum Kuvvet Değerleri (N)	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
D	1.021,65	13,095	14.303,10	183,33
B	1.075,60	6,224	15.058,40	87,136

Sayısal modelleme, sabit hızda gerçekleştirildiğinde, enerjinin zamana bağlı olarak değişimi D yapı için Şekil 6.9. ve B yapı için Şekil 6.10'daki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 6.9 Modelleme Enerji-Zaman Grafiği (D)



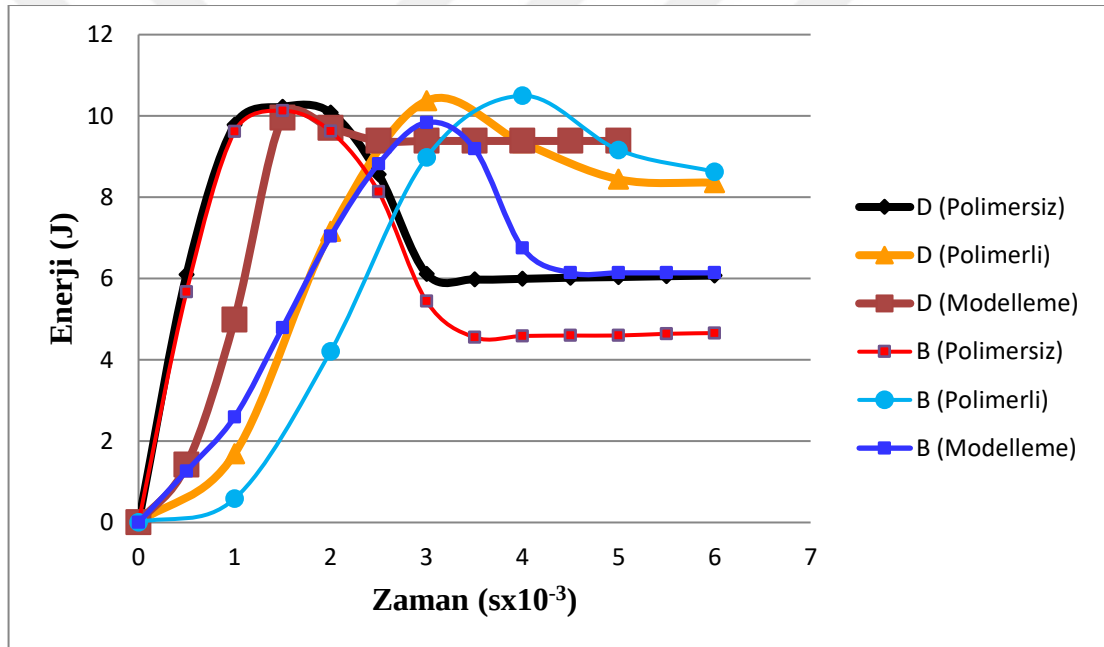
Şekil 6.10 Modelleme Enerji-Zaman Grafiği (B)

Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'da yer alan D ve B enerji-zaman grafikleri karşılaştırıldığında, grafiklerin birbiriyle benzerlik gösterdiği görülmektedir. D yapı için darbeden sonra enerjinin 9,3 J, B yapı için ise 6 J seviyesinde sabitlendiği görülmektedir.

6.7. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Dolu (D) ve boşluklu (B) yapılara ait ağırlık düşürme testi, polimer yapı ağırlık düşürme testi ve sayısal modelleme deneylerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 6.11'deki grafikte yer almaktadır. Grafik verilerinin birbiriyle benzer olduğu görülmekle birlikte, üç deney tipindeki çalışmada elde edilen zaman periyotları sebebiyle darbenin ilerlemesinin farklı olmasından dolayı, benzerliğin sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır.

D malzemesi için darbe sonrası enerji, ağırlık düşürme testinde polimersiz yapı 6 J, polimerli yapı 8,4 J ve sayısal modelleme 9,3 J civarında stabil hale gelirken, B malzemesi için ağırlık düşürme testinde polimersiz yapı 4,6 J civarında, polimerli yapı 8,6 J civarında ve sayısal modelleme 6,1 J civarında stabil hale gelmiştir.



Şekil 6.11 Enerji-Zaman Grafikleri

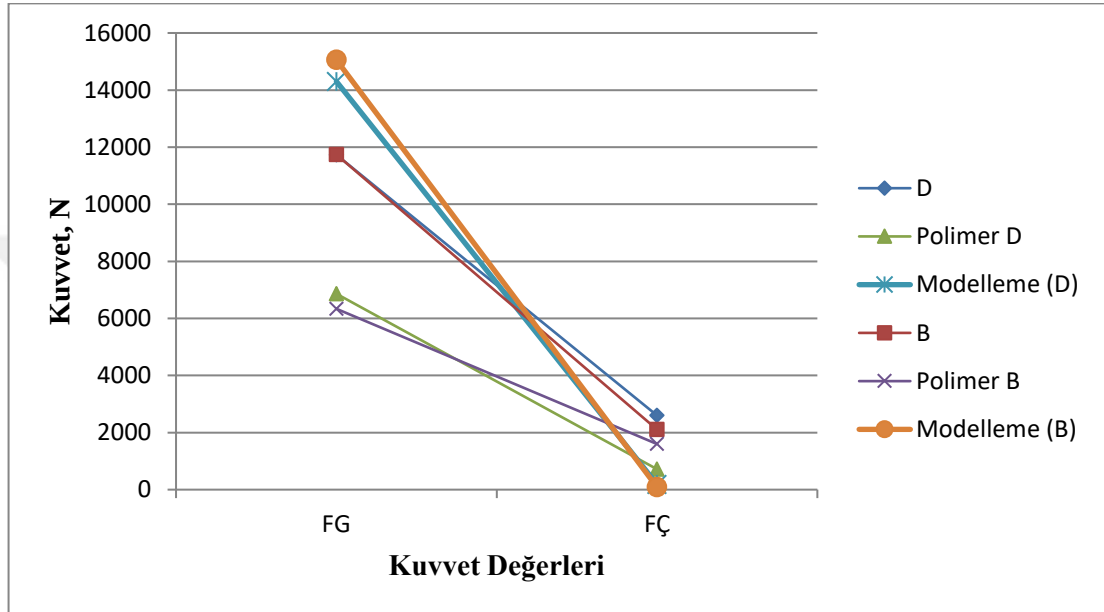
Sayısal modellemede, kompozit malzemeler için veri kütüphanesinin yetersiz olması nedeniyle diğer malzemeler için modelleme yapılamamıştır.

Deneysel veriler ile modellemeden elde edilen sonuçlara göre giriş ve çıkış kuvvetleri, Şekil 6.12'de karşılaştırılmıştır. Modelleme ile deneysel verilerin giriş ve çıkış kuvvetlerinin birbiriyle benzeştiği ve paralel sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Polimerli yapıda, polimersiz yapıya oranla daha düşük giriş kuvveti malzemeye etki etmiş, buna karşılık polimersiz yapıda malzeme içerisinde daha fazla enerji sönümlenmesi gerçekleşmiştir.

Modelleme sonuçlarının, deneysel sonuçlara oranla grafikteki eğimin daha fazla olduğu görüldüğünden, modellemenin enerji sönümlemesinin deneysel sonuçlara oranla daha fazla olduğu görülmektedir.

Deneysel ve sayısal modelleme sonuçları arasındaki söz konusu farkın kullanılan malzeme parametrelerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 6.12 Deneysel ve Sayısal Modelleme Giriş ve Çıkış Kuvvetlerinin Karşılaştırması

6.8. Patlamada Basıncın Mesafeyle Değişimi

Patlama basıncı mesafe ve patlayıcı miktarı ile ilişkilidir. Dolu malzemeye uygulanan 707,68 MPa basıncın (707.680 KPa) Şekil 3.6.'daki grafik kullanılarak, $Z=0,07$ değerine karşılık geldiği bulunur.

Buradan hareketle; Z ölçekli mesafe değeri ve eşitlik 3.1. kullanılarak, 0,5 m mesafede 364,43 kg TNT patladığında, malzemenin yüzeyine 707,68 N/mm² basınç oluşturur diyebiliriz.

Hesaplamalarımızda çıkan sonuç, patlamadaki basıncın etkisini göstermek olup metal parçalar veya bilye gibi malzemelerle patlayıcının zarar verme potansiyelinin artacağı unutulmamalıdır.

6.9. Özgöl Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti (ÖEAK)

Polimerli ve polimersiz testlerde, ağırlık düşürme ve dinamometreden elde edilen deney sonuçları, Tablo 6.5.'de yer almaktadır.

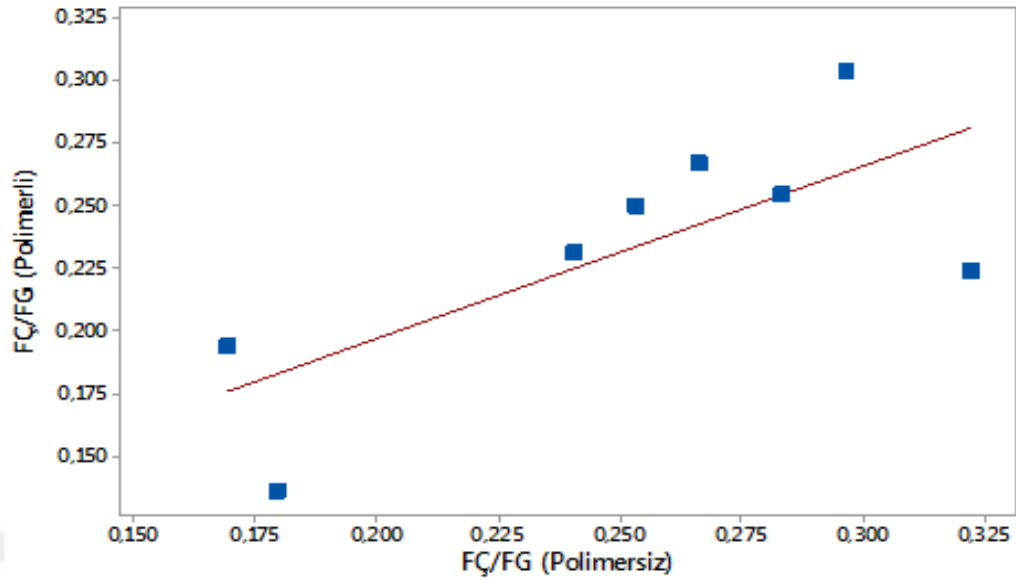
Tablo 6.5 Polimerli ve Polimersiz Tasarımlara Ait DeneySEL Sonuçlar

Malzeme Kodu	Polimersiz			Polimerli		
	Ağırlık Düşürme	Dinamometre	FÇ/FG	Ağırlık Düşürme	Dinamometre	FÇ/FG
	FG (N)	FÇ (N)		FG (N)	FÇ (N)	
B	11741,258	2105,81	0,17935	6336,981	862,228	0,13606
KYP	11768,273	2828,73	0,24037	5970,155	1379,35	0,23104
SASS	11756,898	1991,31	0,16937	5921,814	1147,09	0,19371
K	11752,633	3788,45	0,32235	6464,943	1445,49	0,22359
GKK	11758,32	3128,14	0,26604	6255,938	1669,82	0,26692
A	11773,96	3334,69	0,28323	5894,8	1498,52	0,25421
CETK	11735,571	2970,06	0,25308	6125,132	1530,28	0,24984
AB	11735,571	1896,09	0,16157	6031,293	1440,06	0,23876
D	11732,73	2599,59	0,22157	6863,048	716,107	0,10434
ÇB	11736,993	3480,62	0,29655	6066,838	1839,78	0,30325

Tablo 6.5. incelenerek, öncelikle polimersiz [MO (N)] ve polimerli [MO (P)] tasarımların giriş ve çıkış kuvvetlerinin oranları arasında bir korelasyonun bulunup bulunmadığı Pearson korelasyon metodu kullanılarak MINITAB 20.3 istatistik programıyla incelenmiştir. AB ve D tasarımlarının değerleri korelasyon dışı bulunarak dikkate alınmamıştır.

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.5.'de deneysel verilerin çıkış ve giriş kuvvetleri oranı polimerli ve polimersiz tasarımlar için analiz edilmiş ve çok kuvvetli, anlamlı ve pozitif bir ilişki olduğu ($r=0,731$ ve $p=0039$ ($p<0,05$)) görülmüştür. Tabloda yer alan polimerli ve polimersiz tasarımlar arasındaki korelasyon grafiği

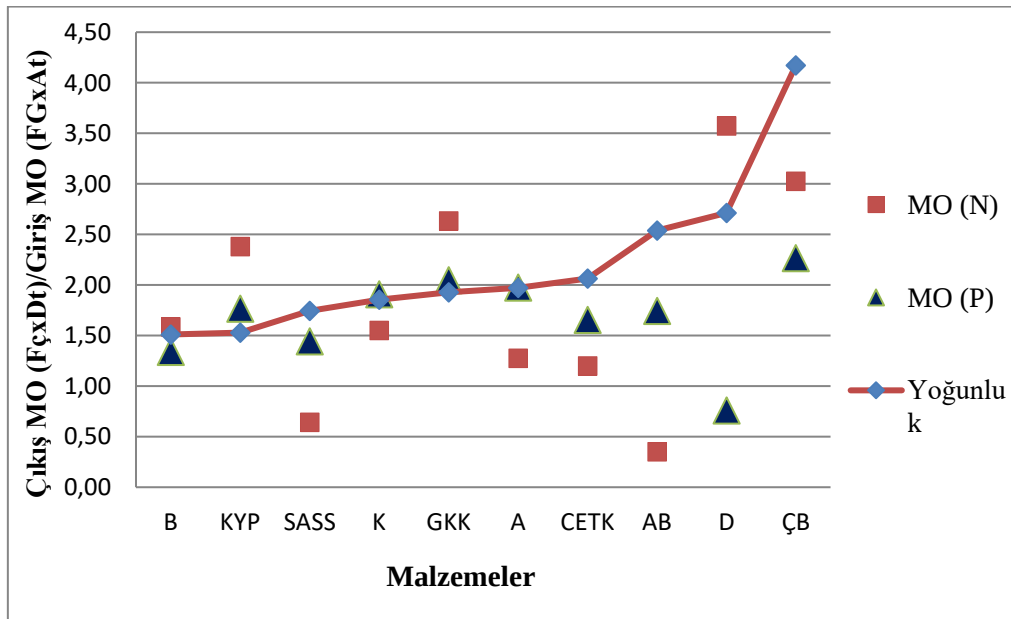
Şekil 6.13’de yer almaktadır.



Şekil 6.13 Tasarıma Bağlı Olarak Giriş ve Çıkış Kuvvetleri Oranı Korelasyonu

Daha sonra, Şekil 6.14’de, Tablo 5.2.’de verilen yoğunluk değerleri ile Tablo 6.5.’de iki farklı tasarım için elde edilen giriş ve çıkış kuvvetleri momentum oranları (MO) karşılaştırıldığında, polimerli yapıda iki malzeme haricinde bir orantının bulunduğu, yoğunluk arttıkça iletilen kuvvet oranının azaldığı, dolu malzemede, en iyi değerlerin elde edildiği görülmüştür.

Ancak, ön yüzeyi polimerle kaplı olmayan diğer tasarımda, yoğunluğa bağlı olarak sapma değerlerinin daha fazla olduğu, en iyi değerlerin AB, SASS, CETK yapılarında elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6.14 Çıkış/Giriş Kuvvetleri Yoğunluk İlişkisi

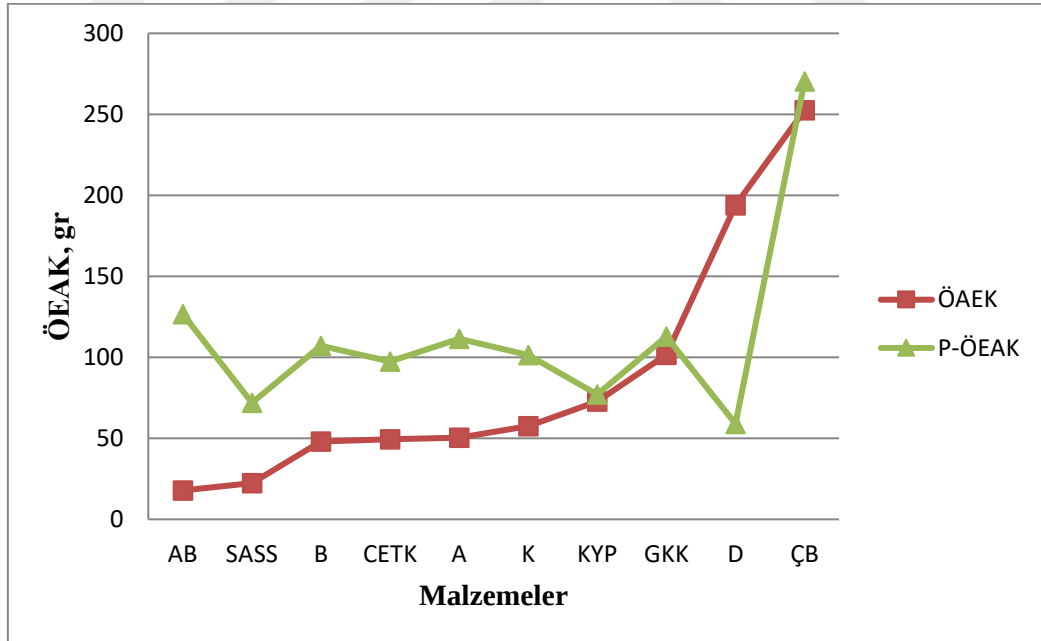
Yoğunluğun kıyaslandığı Şekil 6.14 grafiğinde, kütle değerlerinin hesaplamalarda bir etken olduğu görülmüştür. Buradan hareketle; ÖEAK modeli için aşağıda gösterilen eşitlik 6.1. oluşturulmuştur.

Burada;

Özgül Enerji Absorpsiyon Kabiliyeti (ÖEAK), Dt, çıkış kuvveti süresi (s), At, giriş kuvveti süresi (s), FÇ Çıkış Kuvveti (N), FG: Giriş Kuvveti (N), ρ yoğunluk (gr/cm^3) ve V hacim (cm^3) eşitlik 6.1.'de verilen eşitlik ile hesaplanmıştır. Birimi, gr'dır.

$$\text{ÖEAK} = K1 \times K2 \times \frac{Dt \times F\check{\text{C}} \times \rho \times V}{At \times FG} \quad (6.1.)$$

Kütle değerlerinin dikkate alındığı ve eşitlik 6.1. yardımıyla hesaplanan ÖEAK değerlerini gösteren grafik Şekil 6.15.'de yer almaktadır. Burada polimersiz yapıda en iyi değerlerin AB ve SASS malzemelerinde, polimerli yapıda ise en iyi değerlerin dolu malzemede elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6.15 ÖEAK Grafiği

ÖEAK değerleri hesaplanırken, K1 (malzeme sabiti) ve K2 (tasarım sabiti) katsayıları 1 olarak alınmıştır.

P-ÖEAK vurucu uç ile malzeme arasına polimer bir katman yerleştirildiğinde elde

edilen sonuçları temsil etmektedir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Patlamanın simüle edildiği pek çok çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmada, patlamanın simüle edildiği 10 J enerjinin aktarıldığı bir deney düzeneği tasarlanmıştır.

Deneyde Al 5083 matrisli sandviç plaka yapılı kompozit bir zırh tasarımı denenmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde 10 farklı tasarım kullanılmış olup giriş ve çıkış kuvvetleri zamana ve yer değiştirmeye bağlı olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilerin, belirlenen ÖEAK sonuçlarına uyumluluğu karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aşağıda sıralanmıştır;

- i. Malzemelerin enerji sönümleme kabiliyetlerini ölçmek amacıyla yapılan farklı tasarımlarda, giriş temas kuvvetinin şiddeti ve etki süresiyle, arka yüzeyde kuvvet şok dalgalarının oluşturduğu kuvvet miktarları ve etki süreleri anlamlı olarak değişmektedir.
- ii. Sandviç plakalı zırh tasarımında, ilave edilen ara malzemeler enerji sönümleme kabiliyetini etkilemektedir.
- iii. Tüm tasarımlarda benzer giriş temas kuvveti olduğundan, dinamometre ile arka yüzden alınan en düşük maksimum kuvvet değerlerinin enerji sönümleme kabiliyeti açısından bir gösterge olduğu değerlendirilmiştir. Dinamometreden alınan kuvvet değerleri incelendiğinde, AB tasarımında diğer tasarımlara oranla daha düşük maksimum kuvvet değeri (1896,09 N) elde edildiği görülmüştür. Buna göre enerji sönümleme kabiliyeti açısından en iyi sonuçlar sırasıyla AB, SASS tasarımlarında elde edilmiştir.
- iv. Sandviç plakalı yapılarda, ilk katman polimer yapılı olduğunda, giriş kuvvetinin oluşturduğu şok dalgalarına karşılık, arka yüzeyden ölçülen çıkış kuvvetleri düşmektedir. Polimer katmana ilave edilen ikinci katman monoblok gövdeli olduğunda bu fark belirgin biçimde artmaktadır.
- v. Sandviç plakalı yapılarda ilk katman polimerli malzemedan olduğunda, arka yüzeyden ölçülen kuvvetler polimersiz tasarıma göre ortalama %49,3 (Ort:1426,5/Ort:2812,35) daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir.

vi. Polimer yapılı tasarımlar; giriş kuvvetinin temas sürelerini ve yer değiştirme miktarlarını artırmıştır.

vii. Deney materyaline polimersiz yapıda, polimerli yapı giriş kuvvetinin %58,5'i oranında (D, Polimerli:6863,048 N / Polimersiz: 11732,727 N) giriş kuvveti etki etmektedir. Buna karşın, polimersiz yapıda malzeme içerisinde daha fazla enerji sönümlenmesi gerçekleşmiştir.

viii. ÖEAK değerleri, malzemelerin darbeye karşı davranışının ve enerji sönümleme kabiliyetlerinin bir göstergesi olarak kullanılabilir.

ix. ÖEAK sonuçlarına göre genel olarak tasarımın birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir.

x. AL 5083 matrisli kompozit zırh tasarımında ÖEAK sonuçlarına göre polimersiz yapıda en iyi sonuç AB ve SASS tasarımında, polimerli yapıda en iyi sonuç D tasarımında elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında bundan sonra yapılacak çalışmalarda, oluşturulan modelin geliştirilmesi maksadıyla, bu deney düzeneğinin kullanıldığı tasarımlarda farklı matris yapıları elemanların deneysel olarak sonuçları irdelenebilir. Modeli geliştirecek değişken parametreler (kalınlık, tasarım faktörü, ön katman malzemesinin etkisi, katmanlı yapı, monoblok yapı vb.) denenebilir. ÖEAK değerleri ölçümlenerek, hesaplama yöntemi zenginleştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Akceylan, İ. V. (2009). *Rijit Bir Zemin Üzerindeki Tabakalı Kompozit Levhanın Düşük Hızlı Darbe Hasarı* [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akçay, M. (2010). *Balistik* (2. Baskı).
- Al-Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525-532. <https://doi.org/10.21923/jesd.287005>
- Aslan, B. (2020). *Lazer Kaplama Yöntemiyle Zırh Çeliklerinde Balistik Performansın İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü.
- Ataş, C., & Sayman, O. (2008). An Overall View On Impact Response Of Woven Fabric Composite Plates. *Composite Structures*, 82(3), 336-345. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.01.014>
- Aytaç, A., Aytav, E., Aztekin, K., & Çanakçı, B. (t.y.). *Investigation Of Low Speed Impact Behaviour Depending On The Bonding Agent Of Graphene Impregnated Fabric Reinforced Composite Plates*. 207-223. https://www.gecekitapligi.com/Webkontrol/uploads/Fck/yayinengineering_1.pdf
- Aytaç, A., Aztekin, K., & Aytav, E. (t.y.). *New Horizons in The Engineering* (1. bs). Gece Akademi.
- Bakır, M., Bahçeci, E., Economy, J., & Jasiuk, I. (2017). Aromatic Thermosetting Copolyester Foam Core and Aluminum Foam Face Three-Layer Sandwich Composite for Impact Energy Absorption. *Materials Letters*, 196(S0167-577X(17)30467-6), 288-291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.03.116>
- Barker, L. M., & Hollenbach, R. E. (1974). *Shock Wave Study of the α - ϵ Phase transition in Iron*. 45(11), 4872-4886. <https://doi.org/10.1063/1.1663148>
- Bitlisli, B. (2019). *Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performansının İncelenmesi*. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bozkurt, L. (2011). *Hibrit Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Davranışı* [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bulut, H. (2003). *Balistik Koruyucu Teçhizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Cantwell, W. J., & Morton, J. (1989). Geometrical Effects in the Low Velocity Impact Response of CFRP. *Composite Structures*, 12(1), 39-59. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(89\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0263-8223(89)90043-3)
- Ceyhun, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. *Mühendis ve Makina*, 44(516), 35-41. <https://app.trdizin.gov.tr/makale/TIRFek9UYzM=/tabakali-kompozit-malzemelerin-darbe-davranisi>

- Cooper, P. W. (1996). *Explosive Engineering*. WILEY-VCH.
- Cronin, A. K. (2019). *Power To The People* (Oxford University Press). Oxford University Press.
- Çağan, S. Ç., Uğurlu, M., Buldum, B. B., & Sevim, İ. (2017, Nisan 6). Alüminyum ve Alaşımlarının Askeri Araçlarda Kullanımı. 2. *Uluslararası Savunma Sanayii Sempozyumu*. 2. Uluslararası Savunma Sanayii Sempozyumu. https://www.researchgate.net/publication/325487199_Aluminyum_ve_Alasi_mlarinin_Asker_Araclarda_Kullanimi-Aluminum_and_Its_Alloy_Applications_in_Military_Vehicles
- Dağçimen, A. (2006). *Patlama Tasarımı İçin Geliştirilen Bir Bilgisayar Programı* [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demirbaş, K., & Çevik, S. (2020). TİG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş Alüminyum 1050 Alaşımının Mekanik Ve Mikroyapı Özellikleri. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8(3), 471-477. <https://doi.org/10.21541/apjes.644267>
- Ediz, Ç. (2011). *Alüminyumun Geri Dönüşüm Süreci ve Süreçte Kullanılan Malzemelerin Alüminyum Bileşenlerine Etkileri* [Yüksek Lisans Tezi]. Bilecik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erdik, A. (2017). *Mayın Patlamasına Maruz Kalan Zırhlı Bir Aracın Sayısal Simülasyon Modelinin Geliştirilmesi* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erik, M. Ç. (2019). *Otomotiv Gövde İmalatında Kullanılan Polimer Malzemelerin Enerji Sönümleme Yeteneklerinin İncelenmesi*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eroğlu, Dr. G., & Şahiner, M. (2018). *Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum* (s. 23). MTA Genel Müdürlüğü.
- Esendemir, Ü., Şimşek, R., & Saraç, M. F. (2020). Hibrit Kompozit Yapılarda Nanokil İlavesinin Darbe Davranışına Etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2831-2839. <https://doi.org/10.21597/jist.661094>
- Farley, G. L. (1983). Energy Absorption of Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, 17, 267-279. <https://doi.org/10.1177/002199838301700307>
- Fidan, S. (2011). *Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarın mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi*. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fowles, G. R., Duvall, G. E., Asay, J., Bellamy, P., Feistmann, F., Grady, D., Michaels, T., & Mitchell, R. (1970). *Gas Gun for Impact Studies*. 41(7), 984-996. <https://doi.org/DOI:10.1063/1.1684739>
- Gemi, L. (2014). *Düşük Hızlı Darbe Hasarlı Filaman Sarım Hibrid Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışı* [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Ghazary, H. (2011). *Application and Performance Characteristics of Aluminum Armor Plate for the Hull Construction of Current and Future Military Tactical Vehicles*. 9. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0536>
- Gümüşçü, M., Cebe, A., Erdiñç, A., & Uyanik, S. (2016). Sivil Amaçlı Kullanılan Patlayıcı Madde Cinsleri, Özellikleri, Çevreye Olan Etkileri Ve Alınacak Önlemler. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 81-91. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dufed/698218>
- Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeşitleri ve Malzemeleri*. (2019, ubat). Savunma Sanayi ORG. <https://www.savunmasanayi.org/gunumuzde-kullanilan-zirhlar-ve-cesitleri/>
- Gürbüz, M. (2018). Atık İçecek Kutularından Üretilmiş Alüminyumun Mekanik Özelliklerine Soğuk İşlemin Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(58), 28-35. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/491556>
- Hışır, A. (2013). *TNT'nin Duyarsızlaştırılmasında Nano Vanadyum Pentaoksit (V2O5)' in Etkisinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü.
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. M., & Lessard, L. (2006). *Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts*. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.025>
- İşyarlar, B., & Kirbaş, İ. (2015). Doğal Gaz Yakıtlı Bir Yanma Odasında Hava ve Yakıt Hızlarının Sıcaklık, Entalpi ve Entropi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 60-66. <https://doi.org/10.17714/gufbed.2015.05.005>
- İşyarlar, B., & Kirbaş, İ. (2016). Doğal Gaz Yakıtlı Bir Yanma Odasında Hava ve Yakıt Sıcaklıklarının Sıcaklık, Entalpi ve Entropi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 24-31. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ordubtd/132186>
- İzgi, N. (2011). *Alüminyumun Geri Dönüştürülmesi ve Özelliklerinin Geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Kandaş, H., & Özdemir, O. (2021). Çam ve Meşe Palamudu Tozu Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 147-155. <https://doi.org/DOI:10.21205/deufmd.2021236713>
- Karaca, D. (2010). *Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelerindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının DeneySEL İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karakuzu, R., Çalık, İ. C., & Deniz, M. E. (2017). Tabakalı Kompozit Plakların Darbe Davranışı Üzerine Deniz Suyu Etkisinin Araştırılması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 1-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/buyasambid/309432>
- Karlos, V., & Solomos, G. (2013). *Calculation Of Blast Loads For Application to Structural Components* (EUR 26456 EN; s. 58). European Commission Joint

Research Centre İnstitute for Protection And Security Of The Citizen.
doi:10.2788/61866

- Keshavarz, M. H., & Nazari, H. R. (2006). A Simple Method To Assess Detonation Temperature Without Using Any Experimental Data And Computer Code. *Elsevier*, 133(1-3), 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.10.001>
- Kılıç, B. (2020). *El Yapımı Patlayıcılar (EYP) İle Mücadelede Teknoloji Yol haritasının Belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü.
- KISTLER Dynoware Kullanım Kılavuzu*. (t.y.). Kistler.
- Kinney, G. F., & Graham, K. J. (1985). *Explosive Shocks In Air* (2.). Springer Science+Business Media,LLC. DOI:10.1007/978-3-642-86682-1
- Ku, H., Cheng, Y. M., Snook, C., & Baddeley, D. (2005). Drop Weight Impact Test Fracture of Vinyl Ester Composites: Micrographs of Pilot Study. *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, 39(18), 1607-1620. <https://doi.org/10.1177/0021998305051111>
- Kutlay, Y. (2012). *Değişik uç geometrilerine sahip fiberlerle güçlendirilmiş polyester kalsit kompozit malzemenin darbe davranışının incelenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Macar, M. (2014). *Investigation Of Dynamic Behavior Of Aluminum Alloy Armor Materials*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Masuya, H., Yamamoto, M., Toyama, M., & Kajikawa, Y. (2000). Experimental study on the perforation of steel fiber reinforced concrete slab by impact. *WIT Press, Structures Under Shock and Impact VI*, 205-214. <https://doi.org/10.2495/SU000191>
- Mazonka, O., & Shine, denis. (2012). *Simple Physical Models in Support of Vulnerability and Lethality Data for Wargaming and Simulation Environments*. <https://www.researchgate.net/publication/301543965>
- Oltulu, M., & Altun, M. G. (2018). Betonun Darbe Dayanımının Tespitinde Ağırlık Düşürme Deney Yöntemi ve Yapılan Çalışmalar. *GÜFBED/GUSTIJ* (2018), 8(1), 155-163. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.318540>
- Osher, J. E., Barnes, G., Chau, H. H., Lee, R. S., Lee, C., Speer, R., & Weingart, R. C. (1989). *Operating Characteristics And Modeling of the LLNL 100-kV Electric Gun*. 17(3), 392-402. <https://doi.org/DOI: 10.1109/27.32247>
- Özcan, E. (2017). *Dendrimerik Fosfazen Çekirdekli TNT Tayinine Duyarlı Floresans Sensörlerin Geliştirilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özer, M. T., Coşkun, K., Ögünç, G. İ., Eryılmaz, M., Yiğit, T., Kozak, O., Apaydın, K., & Uzar, A. İ. (2010). *Patlama yaralanmalarının gizli yüzü: Şok dalgaları*. 16(5), 395-400.
- Özgültekin, S. E. (2012). *Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Özşahin, E. (2003). *Entegre Bir Zırhın Yüksek Hızlı Çarpma Yükleri Altındaki Davranışı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Öztürk, A. R. (1984). *İç Balistik* (Genişletilmiş 2. Baskı). MKE Gn.Md.lüğü Özel Yayınları.
- Paisley, D. L., Warnes, R. E., & Kopp, R. A. (1991, Temmuz 17). *Laser-Driven Flat Plate Impacts to 100 Gpa with Sub-Nanosecond Pulse Radiation and Resolution For Material Property Studies*. 1991 American Physical Society (APS) conference on shock compression of condensed matter, Williamsburg/United States. <https://www.osti.gov/biblio/6213179>
- Quaresimin, M., Ricotta, M., Martello, L., & Mian, S. (2012). Energy absorption in composite laminates under impact loading. *Composites, Part B*(44), 133-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.020>
- Randjbaran, E., Zahari, R., Abdul Jalil, N. A., & AbdulMajid, D. L. A. (t.y.). Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar/Carbon/Glass Woven Fabrics for Ballistic Impact Testing. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-7. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/413753>
- Sağlam, Ş. (2011). *Nitro-Aromatik ve Nitramin Sınıfı Enerjetik Maddelerin Tayini İçin Elektroanalitik Yöntemlerin Geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Simic, D., Andjelic, U., Knezevic, D., Savic, K., Draganic, V., Sirovatka, R., & Tomic, L. (2016). *Thermobaric Effects of Cast Composite Explosives of Different Charge Masses and Dimensions*. 13(1), 161-182. <https://doi.org/10.22211/cejem/64970>
- Sławiński, G., Świerczewski, M., & Malesa, P. (2017). Modelling and Numerical Analysis of Explosion Underneath the Vehicle. *Journal of Kones Powertrain and Transport*, 24(4), 279-286. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.3146>
- Şahin, M. B., Ağırlı, H., Koşun, E., & Mengi, H. (2015). *Mineraller* (İkinci Baskı). MTA Genel Müdürlüğü. www.mta.gov.tr
- Şahin, Y. (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Gazi Kitabevi.
- Şen, N. (2013). *Azit ve Nitro Grubu İçeren Organik Patlayıcı Maddelerin Termal Analiz Yöntemleri İle İncelenmesi ve Yüksek Basınçlı Sıvı Kromatografisi (HPLC) kullanılarak Analiz Olanaklarının Araştırılması* [Doktora Tezi]. Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Şen, N., & Bozkuş, S. İ. (2019). 2,4,6-Trinitrofenol ve Trinitrotoluen ile 1-Bromopiren arasında oluşan Yeni Enerjik Ko-kristalin Karakterizasyonu ve Enerjik Performans Özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 14(1), 136-149. <https://doi.org/10.29233/sdufeffd.537748>
- Şen, N., Üzek, U., Aksoy, Ç., Bora, T., & Atakol, O. (2015). Farklı Yapıdaki Organik Patlayıcı Maddelerin LC-MS-MS ile Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 10(1), 95-106. <https://doi.org/10.29233/sdufeffd.134823>
- Tarabay, A., Seaman, L., Curran, D. R., Kanel, G. I., Razorenov, S. V., & Utkin, A. V. (2002). *Spall Fracture*. Springer.

- Thompson, B., Doherty, K., Niese, C., Eff, M., Stotler, T., Pramann, Z., Spencer, R., & White, P. (2012). Friction stir welding of thick section aluminum for military vehicle applications. *Al*, 20. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA574537.pdf>
- TNT Eşdeğeri. (2021, Mart 20). [Bilgi]. Wikipedia Özgür Ansiklopedi. https://tr.wikipedia.org/wiki/TNT_e%C5%9Fde%C4%9Feri
- Turan, M. (2007). Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı. *Mühendis ve Makina*, 48(575), 3-8. <https://app.trdizin.gov.tr/makale/TnpRM01qSXk/tabakali-kompozit-malzemelerde-yuksek-hizli-darbe-hasari>
- Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği. (2021, Mart 11). [Kamuya Faydalı Dernek Resmi Sitesi]. Alüminyum Her Yerde. <http://talsad.org.tr/aluminyum/aluminyum-ve-tarihce/>
- Uyaner, M., & Kara, M. (2012). *Experimental study of the impact behavior of laminated composites stricken by sharp impactors*. *Sci Eng Compos Mater*(19), 307-313. <https://doi.org/10.1515/secm-2011-0135>
- Yağbasan, M. (2019). *Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Plakaların Çarpma Açısına Bağlı Düşük Hızlı Darbe Davranışının ve Darbe Sonrası Basma Mukavemetinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü.
- Yang, S., & QI, C. (2013). Blast-resistant improvement of sandwich armor structure with aluminum foam composite. *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, 2013, 8. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/947571>
- Yang, Y., & Chen, X. (2014). *Energy absorption among layers in the multiply system under ballistic impact*. 1-4.
- Yeşildal, S. (2010). *Darbe Yüklerine Maruz Denizel Kompozitlerde Hasar Mekanizmaları* [Yüksek Lisans Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yumak, N., Pekbey, Y., & Aslantaş, K. (2013). Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. *Makine Teknolojileri Dergisi*, 10(4), 1-21. https://www.researchgate.net/publication/329246124_Zirh_tasariminda_kullanilan_kompozit_malzemelerin_deformasyon_karakteristiginin_arastirilmesi