



**BALİSTİK ETKİSİNE KARŞI AA5083 / Al₂O₃ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMEDEN VE AA5083
KÖPÜKTEN OLUŞAN ZİRH MALZEMESİNİN ÜRETİLMESİ VE
GELİŞTİRİLMESİ**

Hande ARDIÇOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2019

Hande ARDIÇOĞLU tarafından hazırlanan “BALİSTİK ETKİSİNE KARŞI AA5083 / Al₂O₃ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMEDEN VE AA5083 KÖPÜKTEN OLUŞAN ZIRH MALZEMESİNİN ÜRETİLMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hanifi ÇİNİCİ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

İkinci Danışman: Dr. Halil KARAKOÇ

Hacettepe ASO 1. Meslek Yüksekokulu, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Arif Uzun

Makine Mühendisliği, Kastamonu Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Kubilay KARACİF

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/12/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına 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 yararlandığım 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.

Hande ARDIÇOĞLU

27/12/2019

BALİSTİK ETKİSİNE KARŞI AA5083/Al₂O₃ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMEDEN VE AA5083 KÖPÜKTEN
OLUŞAN ZIRH MALZEMESİNİN ÜRETİLMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hande ARDIÇOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2019

ÖZET

Bu çalışmada, balistik etkilere karşı koruyucu zırh malzemesi olarak kullanılabilecek metalik köpük ve altı kademeli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit yapıdan oluşan fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzeme üretilmiştir. Bu kapsamda, bir yüzeyi %100 alüminyum köpük, diğer yüzeyi ise fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve oranları %10,20,30,40,50,60 olarak değişen Al₂O₃ içerikli kademeli kompozit yapıya sahip fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeler üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda, 60x60x24 mm, 60x60x36 mm ve 60x60x48 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla, AA5083, Al₂O₃ ve TiH₂ tozları hassas terazide tartılmış ve tartılan tozlar yüksek enerjili ve üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar 500 °C sıcaklık ve 300 MPa basınç altında sıkıştırılarak blok numuneler elde edilmiştir. Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemelerin kademeler ve kademeler arasındaki ara yüzeyin makro sertlik ölçümleri, SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Farklı kademe kalınlıklarında üretilen kompozit malzemelerin sertlik, MIL-DTL 46027 standardına göre balistik performansları ve düşük hızda darbe dayanımları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda makro sertlikte en yüksek değer 167 HB ile kademe kalınlığı 2 mm olan numunede elde edilmiştir. Kademe kalınlığı 4 ve 6 mm olan numunelerde 300 Joule darbe enerjisinde delinme meydana gelmemiştir. Balistik testlerde standartta yer alan V₅₀ hız limitlerinin üzerinde değerler elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91512
Anahtar Kelimeler : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM),balistik,AA5083
Sayfa Adedi : 74
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hanifi ÇİNİCİ
2. Danışman : Dr. Halil KARAKOÇ

PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF ARMOR MATERIALS FROM
AA5083/Al₂O₃ FUNCTIONAL GRADED COMPOSITE MATERIAL AND AA5083
FOAM AGAINST BALLISTIC EFFECTS

(M. Sc. Thesis)

Hande ARDIÇOĞLU

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2019

ABSTRACT

In this study, a functional graded foam material consisting of metallic foam and a six-stage functionally graded composite structure, which can be used as a protective armor against ballistic effects, was produced. In this context, one surface is 100% aluminum foam, the other surface have changing ratios of 10, 20, 30, 40, 50, 60% functional graded foam materials with graded composite structure containing Al₂O₃ were produced. The dimensions of the foam materials in 3 different groups are 60x60x24 mm, 60x60x36 mm, 60x60x48 mm respectively. The AA5083, Al₂O₃ and TiH₂ powders are weighed on a precision scale and the weighed powders are mixed in a high-energy and three-dimensional mixer. Mixed powders were compressed under temperature 500 °C and 300 MPa pressure to obtain block samples. Macro hardness measurements, SEM and XRD analysis of the interface between the stages and stages of the functional graded foam materials were performed. The hardness, ballistic performance according to MIL-DTL 46027 standard and impact strength of composite materials of different stage thicknesses were analyzed. As a result of the studies, the highest value of macro hardness was obtained with 167 HB and the sample with step thickness 2 mm. In samples with step thicknesses of 4 and 6 mm, no puncture of 300 joule impact energy occurred. In ballistic tests, values above the V₅₀ speed limits in the standard were obtained.

Science Code : 91512

Key Words : Functionally Graded Material (FGM), ballistic, AA5083.

Page Number : 74

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

Co-Supervisor : Halil KARAKOÇ, Ph.D.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince kıymetli vakitlerini ayırıp bana yardım eden çok değerli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Hanifi ÇİNİCİ'ye ve Dr. Halil KARAKOÇ'a teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım. Numune üretimi sırasında manevi desteklerinden dolayı değerli arkadaşlarım Seher İrem AYDOĞAN ve İlhan DANACI' ya teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölüm başkanlığına teşekkür ederim. Bu çalışma Savunma Sanayi Başkanlığı, Gazi Üniversitesi ve FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. arasında imzalanan protokol gereği Savunma Sanayi İçin Araştırmacı Yetiştirme Projesi'dir. Çalışmalarımda bana sağladıkları desteklerden dolayı FNNS Savunma Sistemleri A.Ş. AR-GE ekibine ve Savunma Sanayi Başkanlığı'na teşekkür ederim. Son olarak yüksek lisans süresince hep yanımda oldukları ve beni destekleri için anneme, babama, kardeşime ve eşime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. ZİRH SİSTEMLERİ	7
3.1. Araç Koruma Sistemleri	7
3.1.1. Denizcilikte kullanılan zırh sistemleri	7
3.1.2. Havacılıkta kullanılan zırh sistemleri	9
3.1.3. Karacılıkta kullanılan zırh sistemleri	10
3.1.4. Zırh üretiminde kullanılan malzemeler	11
3.2. Bireysel Zırh Sistemleri	12
3.3. Portatif (Modüler) Zırh Sistemleri	13
4. LAMİNE VE SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN DARBE TEPKİSİ	15
4.1. Düşük Hızlı Darbe (DHD) Etkisi	15
4.2. Ağırlık Düşürme Darbe Testi	15
5. BALİSTİK	17
5.1. İç Balistik	17

	Sayfa
5.2. Dış Balistik	17
5.3. Terminal Balistik	17
5.4. Adli Balistik	18
5.5. Balistik Performansın Ölçüm Yöntemleri	18
5.6. Balistik Darbe Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları	18
5.6.1. Test yöntemleri	20
6. METALİK KÖPÜK MALZEMELER	21
6.1. Metalik Köpüklerin Tarihçesi	21
6.2. Metalik Köpüklerin Özellikleri	22
6.2.1. Metalik köpüklerin mekanik özellikleri	22
6.3. Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri	26
6.3.1. Ergitme yöntemi	26
6.3.2. Toz metalürjisi	29
6.4. Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları	30
6.4.1. Yapısal uygulamalar	30
6.4.2. Fonksiyonel uygulamalar	32
6.5. Metalik Köpüklerin Savunma Sanayindeki Yeri	33
7. MALZEME VE METOT	35
7.1. Malzeme	35
7.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Köpük Malzeme Üretimi	36
7.2.1. Tozların hazırlanması	36
7.2.2. Tozların preslenmesi ve köpürtme işlemi	36
7.3. Üretilen FDKM'lerin Mikroyapısal Karakterizasyonu	39
7.4. Üretilen FDKM'lere Uygulanan Mekanik Testler	39

	Sayfa
7.4.1. Makro sertlik testi	39
7.4.2. Darbe testi	40
7.4.3. Balistik test	41
8. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	43
8.1. Mikro Yapısal Karakterizasyon	43
8.1.1. SEM (Taramalı elektron mikroskobu) analizleri	43
8.1.2. XRD (X-Işını Kırınımı Yöntemi) analizleri	46
8.2. Mekanik Testler	47
8.2.1. Makro sertlik ölçümleri	47
8.2.2. Düşük hızda darbe testi sonuçları	49
8.2.3. Balistik test	59
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Kullanılan tozların boyutları	35
Çizelge 7.2. AA5083 alaşımının kimyasal kompozisyonu	35
Çizelge 7.3. Kademe kalınlıklarına göre numune grupları	38
Çizelge 7.4. Farklı numune gruplarına uygulanan darbe testindeki darbe yükleri ve darbe enerjileri	40
Çizelge 8.1. A grubu numunelere uygulanan balistik atış hızları	60
Çizelge 8.2. B grubu numunelere uygulanan balistik atış hızları	61
Çizelge 8.3. C grubu numunelere uygulanan balistik atış hızları	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Düşük hızlı ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterimi	16
Şekil 4.2. Numuneyle temas kurmak için dairesel açıklığa sahip tipik numune fikstürü	16
Şekil 5.1.Sırasıyla balistik darbe anında oluşan hasar mekanizmaları	19
Şekil 5.2. Tabakalı kompozit malzemede balistik darbe anında oluşan hasar mekanizmaları.....	19
Şekil 6.1. Alüminyum ve polietilen köpüklerin gerinim-gerilim eğrileri	23
Şekil 6.2. AlSi ₁₂ serisi metalik köpüğün young modülü	23
Şekil 6.3. Metalik köpüklerin tek eksenli yük altında tipik davranışı	24
Şekil 6.4. AlSi ₁₂ serisi metalik köpüğünün sıkıştırma mukavemeti	25
Şekil 6.5. Farklı yoğunluklardaki ve kompozisyonlardaki üç alüminyum köpük için yükleme eğrileri	25
Şekil 6.6. Yoğun katı malzeme ve köpük arasındaki enerji emilim farkı	26
Şekil 6.7. Metalik köpük üretiminde ergitme yöntemi aşamaları	27
Şekil 6.8. Ergiyik metale köpürtücü madde ilavesi	28
Şekil 6.9. Karıştırma sürelerinin viskoziteye etkisi	28
Şekil 6.10. Gaz enjekte edilerek alüminyum köpük levha üretimi	29
Şekil 6.11. Toz metalürjisi ile metalik köpük üretiminin aşamaları	29
Şekil 6.12. Toz metalürjisi ile üretilen farklı şekillerdeki metalik köpükler	30
Şekil 6.13. Köpük metalden üretilen ısı değiştirici	32
Şekil 6.14. Alüminyum köpükten yapılmış susturucular	33
Şekil 7.1. Kademe kalınlıkları 2, 4, 6 mm olan FDM ve Al köpükten oluşan FDKM zırh malzemesinin şematik gösterimi	37
Şekil 7.2. Balistik test düzeneğinin şematik gösterimi	41
Şekil 7.3. Balistik testlerde merminin temas yüzeyinin gösterimi	41
Şekil 8.1. A, B, ve C grubu numunelerinin kademelerinin SEM görüntüleri	44

Şekil	Sayfa
Şekil 8.2. A, B ve C grubu numunelerinin kademeler arası SEM görüntüleri	45
Şekil 8.3. A, B ve C grubu FDKM'lerin XRD grafikleri	47
Şekil 8.4. Kademe kalınlığına bağlı olarak kademelerdeki sertlik değişimi grafiği	48
Şekil 8.5. Kademe kalınlığına bağlı olarak kademeler arasındaki sertlik değişimi grafiği	48
Şekil 8.6. A grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–Absorbe edilen enerji(J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	49
Şekil 8.7. A grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi (mm) ve kuvvet-zaman eğrileri	50
Şekil 8.8. A grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)-absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	50
Şekil 8.9. A grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi (mm) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	51
Şekil 8.10. B grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	52
Şekil 8.11. B grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi (mm) ve kuvvet(N) –zaman(ms) eğrileri	52
Şekil 8.12. B grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)-absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	53
Şekil 8.13. B grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi (mm) eğrileri	53
Şekil 8.14. C grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–absorbe edilen enerji (J) eğrileri	54
Şekil 8.15. C grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)-çökme mesafesi (mm), Kuvvet(N)-Zaman(ms) eğrileri	54
Şekil 8.16. C grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	55
Şekil 8.17. C grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi (mm) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Tiger Tankı	10
Resim 3.2. Balistik korumada kullanılan Kevlar 29	13
Resim 7.1. Yüksek enerjili karıştırıcı	36
Resim 7.2. Presleme kalıbı	37
Resim 7.3. Hidrolik pres	37
Resim 7.4. Pilot deneyler sonrası elde edilen FDKM	38
Resim 7.5. Köpürtme işlemi öncesi FDKM numuneleri	38
Resim 7.6. Köpürtme işlemi sonrası FDKM numuneleri	39
Resim 7.7. Makro sertlik ölçüm cihazı	40
Resim 8.1. A grubunda 15 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar	56
Resim 8.2. A grubunda 30 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar	57
Resim 8.3. B grubunda 15 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar	57
Resim 8.4. B grubunda 30 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar	58
Resim 8.5. C grubunda 15 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar	58
Resim 8.6. C grubunda 30 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar	59
Resim 8.7. A grubu numunelerinin balistik test sonrası görüntüleri	62
Resim 8.8. B grubu numunelerinin balistik test sonrası görüntüleri	63
Resim 8.9. C grubu numunelerinin balistik test sonrası görüntüleri	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alümina
B₄C	Bor karbür
°C	Derece Santigrat
cm³	Santimetreküp
g	Gram
SiC	Silisyum Karbür
TiH₂	Titanyumdihidür

Kısaltmalar

Açıklamalar

AA5083	5083 alüminyum alaşımı
AMK	Alüminyum matrisli kompozit
ASTM	American Society For Testing And Materials.
FDKM	Fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzeme
FDM	Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
HB	Brinell Sertlik
MMKM	Metal matrisli kompozit malzeme
MPa	Megapaskal
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TRS	Çapraz Kırılma Dayanımı
XRD	X-ışını Kırınımı Metodu

1. GİRİŞ

Alüminyum matrisli kompozitler (AMK) üstün mekanik ve tribolojik özelliklerine sahip potansiyel malzemelerdir [1]. Son yıllarda, AMK'ler diğer kompozitlere oranla daha yüksek özgül mukavemet ve yüksek sertlik özelliklerinden dolayı kişisel zırh yapımında tercih edilmektedir. Tokluk , gerilme deformasyon hızı, dinamik yükleme mukavemeti gibi mekanik özelliklerinin zırh üretiminde önemli bir yeri vardır. AMK'ler genellikle matris malzemelerinden daha kırılğan ve daha düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) ile güçlendirilmiş kompozitlerin dinamik kırılma tokluğu statik kırılma tokluğundan daha yüksektir fakat hacimsel oran güçlendirme arttıkça azalır [2-4].

Günümüzde saf metaller farklı talepleri karşılamakta yetersiz kaldıkları için mühendislik uygulamalarında dar bir kullanım alanına sahiptirler. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM), otomobil, havacılık, elektronik, savunma sanayi gibi birçok alanda sıklıkla kullanılan bir kompozit malzeme sınıfıdır [5-6]. FDM'lerde derecelendirilmiş yapı sayesinde iki farklı malzeme arasında ani değişimlerden dolayı meydana gelebilecek olumsuzluklar minimize edilebilir [7-8]. Metal matrisli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (MMFDM) metal ve seramik bileşenler içeren ve tasarım ve üretim olarak en çok tercih edilen FDM'lerdir. MMFDM'ler tasarım ve mühendislik uygulamaları için üstün özelliklere sahiptirler. Mühendislik uygulamalarında MMFDM'lerin kullanımıyla elde edilen özellikler yüksek aşınma direnci, yüzey sürtünme ve ısı özellikler, düzeltilmiş ısı uyumsuzluk, azalmış ara yüzey gerilmeleri, metal-seramik ara yüzeyinde artan yapışma kuvveti, minimize edilmiş termal gerilemeler, artan kırılma tokluğu ve çatlak geciktirmedir [8-9].

Son yıllarda savunma sanayiinde metalik köpük yapılar hafiflik ve enerji sönümleme kabiliyetlerinden dolayı sıkça tercih edilmektedir. En önemli özellikleri ise özgül ağırlıklarının düşük olmasıdır. Bu özelliklere ek olarak; yönden bağımsız şekilde darbe ve titreşim sönümleyebilmeleri metalik köpük yapıları daha avantajlı hale getirmektedir. Al esaslı metalik köpüğün integral zırh malzemesinde kullanımı, hem balistik performans hem de hafiflik açısından yapılan çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır [10-12].

Bu çalışmada balistik etkilerine karşı dayanıklı, hafifliği ön planda olan seramik ile balistik performansı arttırılan ve kademeler arası metalik bağ oluşturarak katmanlar arası ara yüzeyi güçlendirilmiş zırh malzemesi geliştirilip üretilmesi amaçlanmaktadır. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA5083 ve Al_2O_3 'dan FDM ile AA5083 köpükten oluşan zırh malzemesi üretilmesi hedeflenmiştir. Kullanılacak AA5083 köpük yapı, düşük yoğunluğu sayesinde hem zırh malzemesini daha hafif hale getirecek hem de titreşim ve enerji sönümleme kabiliyeti sayesinde balistik darbe anında oluşan parçacıkların tamamen ya da kısmen yok edecektir [13]. Gözenekli malzemeler arasında sergilediği performans ile ön plana çıkan Al köpük yapılar geliştirilecek tasarım içerisine dâhil edilerek yerli ve özgün bir tasarım olarak fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeler (FDKM) elde edilmiştir. Ayrıca Al_2O_3 'nın düşük maliyet, yüksek kırılma direnci ve yüksek sertlik özellikleri sayesinde daha düşük maliyetli ve balistik etkilere karşı yüksek performans sergileyecek zırh malzemesi üretilmesi planlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Übeyli ve arkadaşları [14], toz metalürjisi yöntemi ile SiC takviyeli AA7075 matrisli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit malzeme (FDM) üretmişler ve balistik performansını incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucu, bu kombinasyonla üretilen FDM'lerin balistik darbelere dayanıklı olabilmesi için kalınlıklarının 25mm'den daha büyük olması gerektiğini kaydetmişlerdir. Ayrıca mekanik testlere tabi tutulan numunelerde makro seviyede çatlaklar olduğunu gözlemlenmiştir.

Ramnath v.d. [15], metal matrisli Al_2O_3 ve B_4C takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini kıyaslamışlardır. Al_2O_3 ve B_4C takviyesinin alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, döküm tekniğini kullanılarak numuneler üretilmiş ve üretilen numunelere çeşitli mekanik testler (çekme, eğme, darbe ve sertlik) uygulanmıştır. Numune 1 %3 Al_2O_3 , %2 B_4C , %95 alüminyum alaşımı, numune 2 %2 Al_2O_3 , %3 B_4C , %95 alüminyum alaşımı, numune 3 %100 alüminyum alaşımı içermektedir. Darbe testine göre numune 1'in kırılma enerjisi 2,18 J, numune 2'de 2,42 J numune 3'de ise 2 J, Brinel sertlikleri sırası ile (48,53), (52,80), (37,83) çekme testine göre gerilmeler numune 1 54,60 MPa, numune 2'de 51,75 MPa ve numune 3'de 68,24 MPa, eğme testine göre eğilme dayanımları numune 1'de 199,52 N/mm², numune 2'de 193,85 N/mm² ve numune 3'te 226,84 N/mm² olduğu kaydedilmiştir.

Manes ve ekibi [16], ısıtılma tabi tutulan AA6061 plakaların zırh mermisi karşındaki penetrasyon hareketini gözlemlmek için bir çalışma yürütmüşlerdir. Yapılan bu çalışmada, tungsten ve çelik olmak üzere iki farklı çeşit mermi ve 101,6 mm, 76,2mm, 25 mm kalınlıklarına sahip üç farklı levha kullanılmıştır. Uygulanan balistik testlerin sonucuna göre plaka ve merminin deformasyonunu tartışmış ve LSDYNA, ABAQUS programlarında sayısal analizler yapılmıştır.

Zhou ve ekibi [17], AA2024/ B_4C kompozit malzemesine balistik test uygulamışlar ve malzemenin mikro yapısını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanılarak numuneler üretilmişlerdir. Kompozit levhalara ısıtılma işlem ve ardından balistik test uygulanmıştır. Yapılan balistik test sonucunda, kurşunun üstünde B_4C

parçacıklarına rastlanılmıştır. Böylece kompozit malzemenin kurşun üzerinde aşındırıcı etkisi olduğu kaydedilmiştir.

Sudhakar ve arkadaşları [18], AA7075/ B₄C kompozit malzemesinin balistik performansını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemişlerdir. Ana malzeme olarak 40 mm kalınlığında AA7075-T6 alaşımını, takviye elemanı olarak ise 60 ve 30 µm boyutunda B₄C parçacıkları kullanmışlardır. B₄C parçacıklarını, AA7075-T6 alaşımı üzerine sürtünme karıştırma yöntemini kullanarak yüzeyi kaplamışlardır. Yapılan balistik testler sonucunda, B₄C parçacıklarının mermi ucunu durduğunu ve kompozit malzemenin balistik dayanımını arttırdığını saptamışlardır.

Huang ve arkadaşları [19], fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Al₂O₃- ZrO₂ 'nın mekanik özelliklerinin balistik dayanım yeteneğine etkilerini incelemek için yaptıkları çalışmada, dört ve on bir kademeli Al₂O₃-ZrO₂ içeren FDM numunelerini 1500 °C sıcaklıkta sinterleyerek üretmişlerdir. Ayrıca, kırılma tokluklarını ve sertliklerini analiz etmek için çeşitli Al₂O₃ ve ZrO₂ oranları karıştırılarak test tabakaları oluşturulmuşlardır. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar, % 90 Al₂O₃ 10% ZrO₂ tabakasının 15.12 GPa bir sertlik sergilediğini ve % 50 Al₂O₃-50% ZrO₂ tabakasının 4.7 GPa kadar yüksek bir kırılma tokluğuna ulaştığını ortaya koymuştur. Balistik testler, aynı alan yoğunluğuna sahip (4.64 g / cm²) veya aynı kalınlıktaki (11mm) en yüksek enerji emilimi sağladığını göstermiştir. Deneysel sonuçlar, FGM'lerin seramik konilerin oluşumunu ve çoğalmasını geciktirebildiğini doğruladı. Spesifik olarak, sertleştirilmiş alümina materyalleri radyal ve çevresel çatlakların büyümesini önlediğini, seramik konilerin oluşumunu geciktirdiğini, arka düzlemine çarpan konileri azalttığını ve mermi etkisine sahip seramik malzemelerin delici direnç kapasitesini arttırdığını ortaya koymuştur.

Aydın ve ekibi [20], alüminyum ve silisyum karbür bileşenlerinden oluşan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç plakaların (FGSP) balistik performansı deneysel olarak incelenmişlerdir. Bu çalışmada, toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile üretilen FGSP'lerin balistik testleri, 9 mm Parabellum mermileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dört tip plaka, Al6061, zengin metal bileşimi (n = 0.1), doğrusal bileşim (n = 1) ve seramik bileşimi (n= 10) olarak üretilmiştir. Balistik testler sonucunda, numune plakalarının hiçbirinin tam bir penetrasyona sahip olmadığını ve lineer bileşime sahip örneklerin en iyi balistik performansını sergilediğini kaydetmişlerdir.

Matias Garcia-Avila ve arkadaşları kompozit metalik köpüklerin balistik performansını incelemek için gerçekleştirdikleri çalışmada [21], çarpma yüzü olarak bor karbür seramikleri, ara yüz olarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilen çelik-çelik yapıda metalik köpük ve 25 mm kalınlığında alüminyum 7075 arka panel kullanarak yüksek performanslı hafif kompozit zırh sistemi üretmişlerdir. Üretilen bu sisteme, ulusal adalet enstitüsü (NIJ) standartlarına göre iki farklı mermi tipi kullanarak balistik testler uygulamışlardır. Uygulanan testler sonucunda, kompozit metalik köpüklerin merminin kinetik enerjisinin yaklaşık %60-70 oranında sönümlendiğini ve her iki mermi tipini de durduğu incelenmiştir. Zırh sisteminin hasar mekanizmasını ve enerji emilimini incelemek için yapılan sonlu elemanlar analizinde elde edilen sonuçlar da deneysel sonuçlarla benzerlik göstermiştir.

Tomoyuki Fujii ve arkadaşları [22], spark plazma sinterleme yöntemiyle üretilen Al_2O_3 ve saf Ti içeren fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin kırılma davranışı incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmada, Al_2O_3 ve saf Ti tozları farklı kombinasyonlarda dizilerek fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler üretilmiş ve mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Al_2O_3 -Ti fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin kırılma dayanıklılığının, Ti substratında arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, Al_2O_3 -Ti FDM yüzeyde yüksek sertliğe ve alt tabakada yüksek kırılma tokluğuna sahip bir malzeme olduğu kaydedilmiştir.

Arslan ve Güneş [23], yüksek hızlı darbe yükleri altında Al / B_4C 'den oluşan FDM plakaları ile petek sandviç yapılarının deneysel hasar değerlendirilmesi adlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, altı tip Al6061 plaka ve metal-seramik açısından zengin beş farklı FDM plaka üretilmiştir. Üretilen numuneler darbe testine tabi tutulmuş ve sonuçlar hasar ve deformasyon mekanizmaları açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, FDM plakalarının kompozisyon çeşitliliğinin, hasar modları, enerji emme kapasitesi ve darbe dayanımı üzerinde büyük etkili bir parametre olduğunu ve petek çekirdeğinin sandviç yapının enerji emme kapasitesine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir.

Kırmızı ve arkadaşları [24], SiC takviyeli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş alüminyum köpük kompozitlerin mekanik ve balistik davranışları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, Al7075 ve SiC tozları toz metalürjisi yöntemiyle farklı sıcaklık ve basınçlarda sıkıştırılarak oranları %5, %10 ve %15 olarak değişen dört

kademeli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme (FDM) ve AL7075/SiC-Al7075 serisi Al köpükten oluşan beş katmanlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük malzeme (FDKM) üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çapraz kırılma testi uygulanmış ve sertlikleri ölçülmüştür. FGM' nin V50 hız limitini belirlemek için balistik testler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek sertlik, kırılma tokluğu ve balistik direnç 500° C sıcaklık ve 400 MPa basınç üretim parametrelerinden elde edilmiştir. Ayrıca, FGM'lerin merminin kinetik enerjisini en düşük penetrasyon derinliği ile absorbe ettiği kaydedilmiştir.

Chao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [25], araştırmacılar basınçlı döküm teknolojisini kullanarak $B_4C/AA2024$ 'den oluşan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme üretmişlerdir (FDM). B_4C 'nin hacim oranı üst, orta ve alt katmanda sırasıyla % 70, % 47 ve % 25'dir. Alan yoğunluğu $80\text{kg} / \text{m}^2$ ve $38\text{kg} / \text{m}^2$ olan farklı numunelerin balistik testleri 7.62 mm zırh delici kesici alet (API) kullanılarak yapıldı. Karşılaştırma yapmak için, homojen yapıya sahip hacim oranları %70 ve %47 olan $B_4C/AA2024$ numuneler aynı koşullar altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üç katmanlı hacim oranı %70-47-25 olan $B_4C/AA2024$ FDM'lerin, homojen yapıli hacim oranı %70 olan $B_4C/AA2024$ FDM'lerine göre bütünlüğünü daha iyi koruduğu ve penetrasyon alan yoğunluğunun %47'ye göre %14 azaldığı gözlemlenmiştir. Testlerde kullanılan hedef numunelerin ve mermilerin mikro yapısı incelendiğinde, üst ve orta katmanın ara yüzeyinde çatlak sapmasına rastlanmıştır. Sonuçlar üst katmanda yüksek seramik içerikli FDM'lerin hafif zırhlara iyi bir uygulama vaat ettiğini göstermiştir.

3. ZIRH SİSTEMLERİ

Silahlı çatışmaların başlangıcından bu yana zırh sistemleri bireyleri korumada önemli hale gelmiştir. Geçmişte günümüze zırh sistemleri birçok bireyin yaşamını kurtarmada önemli bir yer edinmiştir. Zırh sistemleri kullanım amacına göre üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar, bireysel koruma, araç (kara, deniz ve hava araçları) koruma ve alansal koruma sistemleridir.

3.1. Araç Koruma Sistemleri

3.1.1. Denizcilikte kullanılan zırh sistemleri

Denizcilikte zırh sistemleri savaş gemilerinde koruma amaçlı kullanılır. Savaş gemileri, deniz savaşlarında kullanılmak üzere tasarlanan bir gemi türüdür. Diğer gemi tiplerinden farklı olarak, savaş gemileri silahlandırılmış, hasara dayanıklı ve zırh kaplıdır.

Savaş gemilerinin tarihsel gelişimi

1845 yılında Fransız hükümeti için tasarlanan fırkateynde dövme demir kaplı zırhlı savaş gemileri bulunmaktaydı. Bu dönemde, çelik çeşitleri arasında dövme çelik yapılan deneyler sonucunda mermiyi sönümleme kabiliyetiyle önde olduğu kaydedilmiştir. Böylelikle, dövme demir denizcilikte zırh malzemesi olarak kullanılmaya başlandı. İç savaş sırasında Amerikan gemilerinde kullanılan zırhların çoğu dövme çelik olmuştur. Fakat uygun kalınlıktaki tel plakaların üretimi için gerekli olan tesis yetersizliğinden dolayı dövme demirin savaş gemilerinde zırh malzemesi olarak kullanılması bir hayli zor hale geldi. Dövme demirin performans geliştirmesi için yapılan deneyler metalürjinin o yıllardaki genel gelişimiyle örtüşmeyince çalışmalar olumsuz sonuçlanmıştır.

1876 yılında gelişen mermi kalitesine paralel olarak savaş gemilerine yapılan saldırılara karşı zırh malzemelerinde yeni bir arayış ortaya çıkmıştır. Fransız firmasının ürettiği üstün balistik performansa sahip çelik levha zırh sistemlerinde kullanılan diğer çelik tiplerini geride bıraktı. Fakat bu düşük karbonlu çelik levha darbe anında deformasyona oldukça meyilliydi ve bu olumsuz özellik bir sonraki gelişime yol açmıştır.

Çeliğin sertliğini bir plaka karşısında demirin sertliği ile birleştirmeye yönelik çalışmalar sonucu bileşik zırh çeşidi ortaya çıktı. Bu zırh çeşidi, iki çelik plaka arasına ergiyik Bessemer çeliğinin dökülmesiyle elde edilmiştir. Bileşik zırh çeşidinin üretiminden sonraki 10 yıl boyunca üretim tekniğindeki iyileştirmeler dışında büyük bir gelişme gözlemlenmiştir.

1889 yılında çelik zırhına nikel ilavesiyle birlikte nikel-çelik zırhı ortaya çıkmış ve bileşik zırh çeşidi tamamen ortadan kalkmıştır. Çelik zırhına yapılan %4 oranında nikel ilavesi çeliğin mukavemetini ve dayanıklılığını büyük ölçüde arttırmış ve zırhın direnci artmıştır. Yani 10 inçlik bir nikel-çelik plakasının dayanıklılığı 13 inçlik demire eşitti.

1890 yılında Harvey sürecinin başlamasıyla savaş gemilerinde kullanılan zırh sistemlerinde büyük bir gelişme yaşandı. Harley'in icadı olan bu süreç, çelik levhanın yüzünü ısıtarak iki ile 3 hafta arasında çok yüksek sıcaklığa tutarak çimentolama işleminden oluşmuştur. Harvey sürecinin kabul edilmesinden kısa bir süre sonra, bir plakanın balistik kalitesinin, sementasyon sonrası yeniden dövme ile iyileştirilebileceği kanıtlanmıştır. Düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirilen bu dövme işlemi, kalınlıkta yüzde 10 ila 15 arasında bir azalmaya sebep olmuştur. Kalınlığın daha hassas bir şekilde düzenlenmesine, yüzey kalitesinin iyileştirilmesine imkan sağlayan bu süreç zaman içinde benimsenmiştir. Bu süreç, Carnegie Steel Company'den Bay Corey tarafından "çift dövme" adı altında patentlenmiştir. Harveyized zırh hemen diğer tüm tiplere üstünlüğünü kurmuştur.

1980'ler boyunca, kromun küçük pota ısı çeliklerine eklenerek elde edilen alaşım, düzgün bir şekilde ıslah edildiğinde yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. 1893 yılında Büyük Alman çelik firması Krupp sorunu çözene kadar çelik üreticilerin sürekli çabalarına rağmen büyük miktarda nikel-krom çelik külçeleri üretilmemiştir. Krupp, çimentolu bir çelik plakanın bir tarafındaki sertleşmeyi derinleştirme işlemini geliştirdi. Bunu yapmak için, plaka, çimentolu taraf açıkta kalacak şekilde kil veya balçık içine gömülmüş ve daha sonra maruz kalan yüz, çok sıcak ve hızlı bir sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Krupp süreci kısa bir sürede tüm zırh üreticileri tarafından uygulanmaya başlandı. Yaklaşık 5 inçten daha kalın olan tüm levhalarda Krupp zırhı, önceki Harveyized zırhından yaklaşık yüzde 15 daha verimli olmuştur, 11.9 inç Krupp, yaklaşık 13 inç Harveyized zırhına denk

gelmektedir. Krupp süreci 1900 yılında Amerikan gemileri için üretilen zırhlarda uygulandı. Son 25 yıldır yapılan zırhların çoğu Krupp çimentolu zırhı olmuştur [26].

3.1.2. Havacılıkta kullanılan zırh sistemleri

Havacılıkta kullanılan zırh sistemleri, helikopterler ve savaş uçaklarında kullanılan zırhları kapsar. Genel olarak havacılıkta kullanılan zırh sistemlerinde; yükü hafifleterek çeviklik ve manevra kabiliyeti sağlaması, daha az yakıtla uzun uçuş süresi sağlamasına ve güç ve korumadan ödün vermemesi özellikleri göz önünde bulundurulur.

1903 yılında Wright kardeşlerin gerçekleştirdikleri ilk kez başarı elde edilen uçuş deneyiminde sonra kompozit malzemeler havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Starke ve Stayley (1996) uçaklarda özgül mukavemet oranının (mukavemet/ağırlık) malzeme seçimindeki en önemli etken olduğunu ve bu nedenle kompozit malzemelerin kullanıldığı belirtmişlerdir [27]. Fakat gelişen teknolojiyle birlikte değişen ihtiyaçlar kompozit malzemelerin ek olarak bazı özelliklere sahip olması gerektiğini ortaya koymuştur. Örneğin, 1990’larda envanterlerde yaşanmaya başlayan uçak filoları sayesinde üreticiler kompozit malzemelerde hasar toleransını ve korozyon direncini arttırmaya yönelik tasarımlara başlamışlardır [28-29]. Yaygın olarak kullanılan ve kompozit malzeme içeren bazı uçaklar şunlardır: F-14-15-16, F/A-18, F-117 Black Hawk, APACHE, B-2 Bomber, JSF-F35 (Joint Strike Fighter), Beech Aircraft Starship, AJF (Advanced Jet Fighter) [30].

İleri polimer matrisli kompozit malzemeler (polymer matrix composite [PMC]) askeri hava araçlarında en çok kullanılan kompozit malzemelerdir. PMC ‘ler adlarını polimerik matrislerinden almaktadırlar. Kompozit malzemelerde polimerler, termoset ve termoplastik olmak üzere iki farklı yapıda bulunmaktadır. PMC yapımında kullanılmadan önce termoset ve termoplastik polimerler kürlendirme işleminden geçirilerek birbirleri arasında çapraz bağ oluştururlar [31].

Karbon fiber takviyeli polimerler (carbon fiber reinforced polymer [CRFP]) askeri uçaklarda sıklıkla kullanılmaktadır (A400M, F-22, F-35, Eurofighter). JSF, EFA vb. askeri uçaklarda, fiber kompozit malzemeler yapısal olarak %40, yüzey alanında ise %70 oranında yer almaktadır.

Günümüzde kullanılan modern savaş uçakları ses hızının üstündeki hızlarda hareket etme yeteneğine sahiptirler. Bu yüksek hızlar için ise grafit PMR-15 ve grafit fiber PMR-11-5 gibi 290°C–345°C sıcaklıkları arasında uzun saatler boyunca kullanıma dayanabilecek çok özel fiber kompozit malzemeler kullanılmaktadır [32]. Kompozit malzeme teknolojileri sürekli değişen bir alandır.

3.1.3. Karacılıkta kullanılan zırh sistemleri

Kara savunma sistemlerinde kullanılan zırhlı araçlar balistik koruma, atış gücü ve hareket kabiliyetine sahiptirler. Bu araçların tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, mürettebata iç aksam ve hareket esnasında en yüksek düzeyde koruma sağlanmasıdır.

Karacılıkta kullanılan zırhlı araçların tarihsel gelişimi

Sanayi devrimi ile birlikte ortaya çıkan demir ve karbon karışımından elde edilen çelik, eskiden ahşap kullanılarak yapılan savaş gemilerinin ana malzemesi haline geldi. Zırhlı araçların üretiminde ise çelik ilk olarak perçinleme işlemiyle kullanılmıştır. Zaman içerisinde yüksek balistik koruma sağlayan tel kaynaklama metodu kullanılmaya başlanmıştır. Bu metotla üretilen Tiger tankı (Resim 3.1) yüksek balistik korumaya sahiptir.



Resim 3.1. Tiger Tankı

Soğuk savaş esnasında balistik korumaya ek olarak farklı yöntemler araştırılmaya başlanmıştır. Bu araştırmalar sonucunda uçaklarda kullanılan balistik alüminyum hem düşük ağırlığı hem de yüksek korozyon direnci sayesinde kara araçlarında kullanılmaya başlanmıştır. Başka bir uygulama ise 1954 yılında T95 tipi tankın prototipinde kompozit zırh kullanımıdır. Ön tarafında 100mm cam, 25 mm çelik ve arka tarafında 50mm çelik bulunan lamine zırhlı bu araç büyük başarılar elde etmiş fakat bu proje maddi yetersizlikler nedeniyle seri imalata geçememiştir.

1966 yılında, iki çelik arasında eriyik cam bulunan kompozit lamine zırhı, ilk olarak T-64 tipi tanklarda kullanılmıştır. Fakat camın kırılkan olması nedeniyle imalattan vazgeçilmiştir. T-72 modeli ve sonrasında imal edilen tanklarda çerçeveli cam elyaf çelik plakaların arasına yerleştirilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte tank üretiminde çelik malzeme kullanımı tamamen son bulmuştur [33].

3.1.4. Zırh üretiminde kullanılan malzemeler

Zırh çeliği : MIL-A-46177 standardında, zırh çeliği 230 mm kalınlığa sahiptir. Bu çeliğin dayanıklılığı NATO tarafından referans kabul edilmektedir. Kara araçlarının zırhlandırılmasında dış bölgeye sert iç bölgeye ise yumuşak çelik uygulanır. Bu sayede herhangi bir darbe anında ilk yüzey direnci alır, ikinci yüzey enerjiyi emer ve açığa çıkan enerji araca daha az hasar verir.

Alüminyum : AA7020 ve AZ5G alüminyum alaşımları genel olarak balistik koruma için kullanılır. Kullanılan bu alaşımlar zırh çeliğine göre daha hafif olduğundan birleştirme işlemi daha çabuk gerçekleştirilir. Alüminyum iskelet kullanılarak üretilen araçlarda ayrıca iskelet yapısına gerek duyulmaması aracı hafifletir. Bu sayede araç, daha fazla yakıt, mühimmat ve asker taşıyabilecek duruma gelir.

Titanyum: Çeliğe göre daha hafif ve yüksek sertliğe sahip olan titanyum kısmi olarak zırhlı araçlarda kullanılır. Bunun sebebi ise, üretimde kullanılan Ti6Al4V olarak adlandırılan titanyum alaşımının çelik zırhtan 1,5 kat daha dayanıklı olmasına rağmen çok daha pahalı olmasıdır.

Kompozitler: Kompozit malzemeler ağırlığı azalttığı ve yüksek koruma sağladıkları için askeri taşıma araçlarında yaygın bir kullanım alnına sahiptirler. Bu kompozitlerden biri de sürekli fiber takviyeli termoplastiklerdir. Kompozit malzemeler zemin ve yan panellerde, koltuk bileşenlerinde, bagaj ve kompartıman bölümlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak kaporta, kapılar, tavan ve tamponlar kompozit kullanımına aday diğer bölümlerdir. Askeri araçlarda koltuklar, taban panel bileşenleri, gövde panelleri, takviye yapılar, motor kaplamaları, tekerlek yuvaları, korkuluk ve çamurluklar ağırlığı azaltmak için kompozit malzemelerin diğer uygulama alanlarıdır. Polimer matrisli kompozitler askeri araçların kaplamalarında ve kaporta parçalarında kullanılır. Akü kutusu, motor kaplamalarında ve diğer görünmeyen parçalarda cam fiber- polipropilen kullanılır. Fiber takviyeli kompozit elemanların şaside kullanımı, çelik kullanıma kıyasla %12 ağırlık azalması sağlayabilir [33].

3.2. Bireysel Zırh Sistemleri

Bireysel zırh sistemleri olarak adlandırılan çelik yelekler ve balistik yelekler (kurşun geçirmez yelekler), bireyi patlama sonucunda oluşabilecek şarapnellerden koruma amaçlı ve ateşli silahlardan çıkan kurşunların etkisini azaltmak için kullanılır. Bireysel zırh sistemlerinde yüksek sağlamlık, yüksek ısı ve darbe direnci, düşük ağırlık, yüksek kimyasal direnç, gibi özellikler ön plandadır. Balistik çelik yeleğin iç kısmı, mermiyi durdurma kuvvetinin harekete geçtiği yerdir. Dış kısım öncelikli olarak merminin yönünü saptırmaya ya da bozmaya çalışır. Çeşitli sentetik elyaflardan oluşan iç kısım, yelek yüzey alanının üzerindeki etkiyi emer ve yayar.

Tarihte askeri personelin vücudunu korumak için gömlek şeklindeki köseleden veya ince metallerden yapılan çeşitli zırhlar kullanılmıştır. Bunlara ek olarak Avrupalılar 10. y.y dan itibaren metalden üretilen miğferler kullanmışlardır. 20. yy da balistik alanında kaydedilen önemli gelişmelerden sonra askeri personeli koruma yöntemlerinde araştırmalar hızlandı ve ilk olarak kurşun levhaların yeleklere yerleştirilmesiyle kurşun geçirmez yelekler icat edildi. Fakat bu yelekler büyük sert parçalardan yapılmış oldukları için giyen personelin hareket kabiliyetini azaltmaktaydı. Bu durum bireysel zırh sistemlerinde hareket kabiliyetini kısıtlamayan ve hafif tasarımlara yöneltti. 1970’li yıllarda Amerika’da DuPont firması Kevlar adı verilen elyaf katkılı malzemeyi ilk defa bu alandan kullandı. Kevlar aynı ağırlığa sahip çelikten beş kat daha güçlü, yanmaya dirençli ve erime ya da akmaya

uğramayan polimer sınıfına giren sentetik bir malzemedir. Hafif ve sağlam olmasının yanı sıra darbe etkisini daha geniş bir alana yayabildiği için darbenin veya gücün bir noktada çok sert hissedilmesini engellemektedir. Günümüzde Kevlar 29 lifi Resim 3.2’de hayati koruma gerektiren zırh malzemelerinin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [34].



Resim 3.2. Balistik korumada kullanılan Kevlar 29 lifi

3.3. Portatif (Modüler) Zırh Sistemleri

Modüler zırh sistemleri herhangi bir tehlike anında taşınabilen ve aynı zamanda yüksek balistik koruma sağlayan zırh sistemleridir. Bu sistemlere balistik mobil kalkanlar ve balistik kulübeler örnek olarak verilebilir.

Balistik kalkanlar çoğunlukla özel zırhlı çelikten yapılır, bunların en büyük dezavantajı ağırlıklarıdır. Bu durum üreticileri balistik kalkanlarda ağırlık azaltıcı tasarımlara yöneltmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda seramik tabanlı kompozit malzemelerin balistik kalkanlarda yüksek bir balistik koruma sağladığı kaydedilmiştir.

Balistik koruma söz konusu olduğunda yüksek sertlik ve elastikiyet modülü, kırılganlığa karşı direnç önemli özelliklerdir. Bu kapsamda modüler zırh sistemlerinde en çok kullanılan seramik malzemeler alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), bor karbür (B_4C) ve bunların türevleridir [35].



4. LAMİNE VE SANDVİÇ KOMPOZİTLERİN DARBE TEPKİSİ

Malzemelerin darbe tepkisi hızın oranlarına göre sınıflandırılır. Darbe tepkisi düşük hız (büyük kütle), orta hız, yüksek (balistik) hız (küçük kütle) ve aşırı hız olmak üzere derecelendirilir. Düşük hızlı darbe tepkisi (DHD) olarak da bilinen büyük kütle darbesi, 10 m s^{-1} 'in altındaki hızlarda meydana gelen takım düşüşlerinden kaynaklanmaktadır. Ara hız darbe etkisi, patlama enkazı, kasırga enkazı ve kara yollarında meydana gelen enkazların oluşturduğu darbe hasarıdır. Ara hız darbe etkisi 10 m/s ile 50 m/s hızları arasında görülmektedir. Yüksek hız darbe etkisi (balistik) hasarı genellikle küçük silahların veya patlayıcı savaş başlığının parçacıklarından kaynaklanmaktadır. Yüksek hız darbe etkisi 50 m/s ile 1000 m/s hızlarında gerçekleşmektedir. Son olarak ise aşırı hız darbesi $2\text{-}5 \text{ km/s}$ hızından yüksek hızlarda olduğu bilinmektedir. Bu hızlarda mermi çok yüksek hızlarda hareket etmektedir [36].

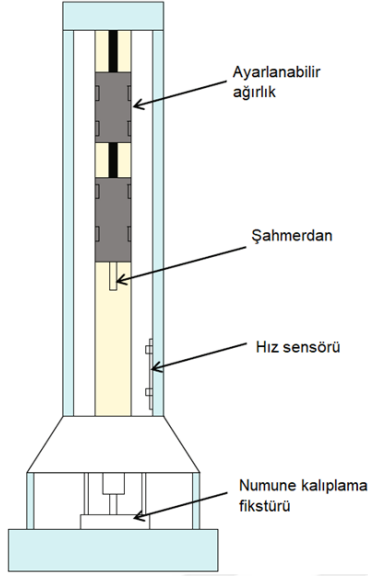
4.1. Düşük Hızlı Darbe (DHD) Etkisi

Polimer matrisli kompozitler düşük hızlı darbe (DHD) etkisinin neden olduğu dâhili hasara karşı hassastır. Birçok durumda, yüzeyde hasar görülmez; bununla birlikte iç hasar önemli olabilir, böylece kompozit bir yapının artık mukavemetini ve servis ömrünü azaltır. kompozitlerin darbe hasarı üzerine yapılan çalışmalar darbe dinamiği, hasar mekaniği, darbe sonrası kalıntı özellik karakterizasyonu ve hasar direncine odaklanmıştır [36-37]. Kompozitlere uygulanan DHD testi birkaç farklı şekilde yapılabilmektedir. Darbe etkisi sallanan bir sarkaç, ağırlık düşürme, dönen bir volan veya gaz tabancasından atılan mermilerle yapılabilir. DHD testi çalışmaları Izod ve Charpy test cihazları veya ağırlık düşürme test cihazları ile yapılabilmektedir [38].

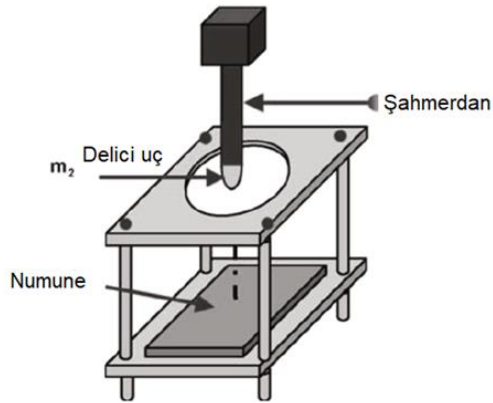
4.2. Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Bu test, lamine veya sandviç kompozit malzemelerin üzerine düşen ağırlıkların enine etki gösterdiği fiziksel özellikleri tayin eder. Şekil 4.1'de ağırlık düşme darbe testi cihazının şematik çizimi verilmiştir. Bu cihazın üzerinde şahmerdan bir uç üzerinde ayarlanabilir bir ağırlık, şahmerdanın düşüş hızını belirleyen bir hız sensörü ve numune kalıplama fikstürü vardır (Şekil 4.2). Cihazın istenilen darbe enerjisinde vurmasını sağlamak için ağırlıklar

eklenebilmektedir. Numuneye uygulanan çarpma hızı, şahmerdanın numuneden olan mesafesine ve düşüş zamanına göre ölçülerek hesaplanır. Kuvvet-zaman geçmişi numune ile ilk temas noktasından ve darbe ucunun numunenin kalınlığından geçerken ölçülür. Enerji, kuvvet-zaman sinyalinin entegrasyonundan hesaplanır. Yük-deplasman, kuvvet-süre ve enerji-zaman geçmişi kaydedilen parametrelerden bazılarıdır [38].



Şekil 4.1. Düşük hızlı ağırlık düşürme darbe testi şematik gösterimi [38]



Şekil 4.2. Numuneye temas kurmak için dairesel açıklığa sahip tipik numune fikstürü [38]

5. BALİSTİK

Fransızcadan dilimize girmiş olan “balistik” kelimesi bir merminin;

- Namludan çıkarak hedefe ulaşması,
- Atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak değişen hareketlerini,
- Hedefe çarptıktan sonraki enerjinin emilmesini,
- Meydan gelen deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Bu bilim dalı 4 farklı ana gruba ayrılır;

5.1. İç Balistik

İç balistik, ateşleme piminin mermiye vurduğu andan merminin namludan çıktığı zamana kadar bir silahın namlusu içinde ne olduğunun araştırılmasıdır. Temelde itici basınçlar, deliğin içindeyken merminin hızlanması, namlu çıkış hızı ve geri tepme ile ilgilidir. Primer tutuşma süresi, primer basınç / zaman eğrileri ve sıcaklık gibi ekzotermik hususlar da iç balistik genel konusuna girer [39].

5.2. Dış Balistik

Dış balistik, merminin silahın namlusundan hedefe uçuşuyla ilgilidir. Bu gerçekten mermi şekli, kesit yoğunluğu, atmosferik basınç ve hatta daha büyük kalibreli silahlarda dünyanın dönüşü gibi parametreleri içeren oldukça karmaşık bir konudur [39].

5.3. Terminal Balistik

Bu balistik türü ise; merminin hedef üzerindeki hareketlerini araştırır. Bu alan merminin sadece bir kağıt hedefini delmekle ilgilenmiyor merminin havadan çok daha yoğun bir malzemeye karşılaştığında ne yaptığını inceliyor. Genellikle hayvan dokusundaki mermi performansı ve yaralama etkileriyle ilgilenirken, buna su, toprak, tuğla, beton, tahta veya kurşun geçirmez malzemelerdeki performansı da dahil olabilir. Balistiğin bu alanı iç ve dış balistiğe oranla daha geri aşamadır. Bunun nedeni de bu türdeki balistikte temel bilgilerin elde edilmesi daha zordur [39].

5.4. Adli Balistik

Adli balistik olay yerinden elde edilen balistik bulguların, adli balistik metotları kullanılarak incelendiği, delil kimliğine kavuşturulduğu alandır. Fişek, ateşli silah, ateşsiz silah, kovan ve mermi çekirdeği gibi faktörleri inceleyerek olay hakkında bilgi verir.

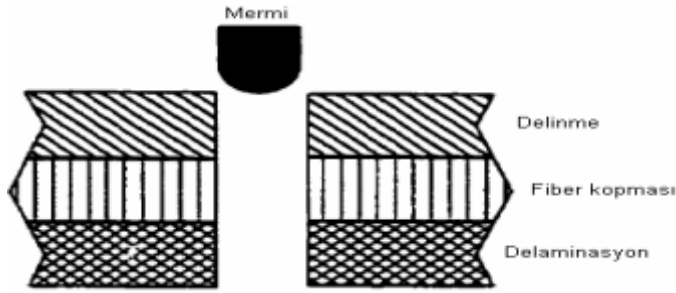
5.5. Balistik Performansın Ölçüm Yöntemleri

Balistik zırh sistemlerinde kullanılan kompozit malzemelerin balistik darbe dayanımını ölçmede çeşitli yöntemler kullanılır. Kompozit malzemelerin balistik davranışına etki eden çok sayıda değişkenin varlığı kullanılan metotların aynı malzeme için bile değişik sonuçlar elde edilmesine sebep olabilir. V50 hız limiti ve balistik limitin belirlenmesi kullanılan en yaygın iki farklı yöntemdir. Balistik limit merminin çarpışma sonucu kompozit malzemede tamamen delinme etkisi yaratmadığı kritik hız seviyesidir. V50 hız limiti ise teste tabi tutulan numunelerin, kullanılan mermi tarafından %50 sinin delinmeye uğradığı kinetik enerji seviyesidir. Günümüzde kullanılan balistik karakterizasyon yöntemlerinin tamamı malzemenin delinmesi ve meydana gelen bozulmanın belirlenmesini araştırmaya yöneliktir [40].

5.6. Balistik Darbe Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları

Genel olarak balistik darbe anında kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları çevre şartlarına, cismin kütlesi ve şekline, darbenin koşullarına, tabaka özelliklerine bağlıdır. Kompozit malzemelerin balistik performansının, fiberin enerjiyi sönümleme özelliğine, matris malzemesinden daha çok bağlı olduğu Segal'in (1991) farklı çeşitlerde fiber ve kompozit malzemeler kullanarak yapmış olduğu çalışmada gözlemlenmiştir [40].

Balistik darbe sonucu kompozit malzemelerde oluşan hasar mekanizmaları matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması ve delinmedir. Bu hasar mekanizmaları genel olarak birbirleriyle etkileşimli meydana gelir ve darbenin meydana geliş koşullarıyla doğrudan bağlantılıdır. Langlie and Cheng (1989), yaptıkları çalışmada hasar mekanizmalarının balistik darbe sonucunda ardışık olarak gerçekleştiğini savunmuşlardır(Şekil 5.1). Bu çalışmaya göre her bir hasar tipi tabakanın toplam kalınlığına ile bağlantılıdır [41].



Şekil 5.1.Sırasıyla balistik darbe anında oluşan hasar mekanizmaları [41]

Şekil 5.2’de ise oluşan hasar mekanizmaları daha detaylı olarak ele alınmıştır. Darbenin başlangıç aşamasında kompozit malzemenin mermiye karşı dayanımı tabaka kalınlığı boyunca yenilmekte ve mermi altında sıkışan numunede meydana gelen çukur kısmında kalınlık boyunca devam eden gerilmelerden dolayı deformasyon oluşur. Kalınlık boyunca meydana gelen bu kesme deformasyonu mermi ile birlikte hareket eden kesilmiş bir kısım oluşur. Hareket halindeki bu kopmuş parça etkisi, balistik hızın çok üzerindeki hızlarda meydana gelmektedir. Fiber kopması ise fiberin kopma dayanımının sonuna kadar mermi tarafından zorlanması sonucu oluşur. Son aşamada ise mermi, kompozit malzeme içinde hareket ederken malzemede yanlara ve aşağıya doğru deformasyon meydana gelir. Tabakalı kompozit malzemelerde malzemeyi oluşturan her katmanın ayrılması durumuna delaminasyon denir. Delaminasyon kademeli kompozit malzemelerde meydana gelen en baskın ve en ciddi hasar türüdür. Delaminasyon oluşumu ve büyümesi, düzlem içinde oluşan sıkıştırma sonucu ortaya çıkan tabakalar arası kesme gerilmeleri ve düzlem dışında meydana gelen sıkıştırmadan oluşan tabakalar arası normal gerilmelerin birlikte bulunması sonucu oluşur [42-44].



Şekil 5.2. Tabakalı kompozit malzemede balistik darbe anında oluşan hasar mekanizmaları [44]

5.6.1. Test yöntemleri

Balistik karakterizasyon testleri temel olarak ordunun hava, kara ve deniz zırh sistemlerinin ve bireysel zırh sistemlerinin güvenilirliğini ölçmek için uygulanır. Balistik testler uluslararası kabul görmüş MIL-DTL (Askeri Detay Şartnamesi), NIJ (Ulusal Adalet Enstitüsü) ve STANAG (NATO üyesi ülkeler arasındaki Standardizasyon Anlaşması) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. Uygulanan bu balistik testler numunede yıkıcı etkiye sahiptir. Hem test hem de malzeme maliyetleri açısından pahalı olabilir. Numune boyutları genellikle sınırlıdır ve balistik karakterizasyon testleri her zaman 20 atıştan daha azıyla sınırlıdır. Bu testler genel olarak merminin zırhı delme olasılığına göre hız limitleriyle adlandırılır ve yaygın olarak kullanılan hız limiti ise merminin zırhı yüzde 50 olasılıkla delmesi beklenen V50 balistik hız limitidir.

6. METALİK KÖPÜK MALZEMELER

Gözenekli yapıya sahip, metalik malzemelerden üretilmiş endüstriyel ürünlere metalik köpük denir. Metalik köpük terimine ek olarak değişen morfolojilere bağlı olarak, gözenekli metal (porous metal), metal sünger (metallic sponge), hücreli metal (cellular metal) terimleri de köpük malzemeleri tanımlamada sıkça kullanılır.

Hücreli Metal (cellular metal): Boşluklar, ayrı hücrelerden oluşmaktadır. Bu hücrelerin duvarları katı metalden yapılmıştır. Tek tek hücrelerin hepsi birbirinden metalle ayrılır.

Gözenekli Metal (porous metal) : Kapalı, kavisli ve gaz formunda gözenekler içeren metal malzemelerdir.

Metal Sünger (metallic sponge) : Boşluklar, sürekli bir ağ içeren metallerle doldurulmuştur.

Metalik Köpük (metallic foam) : Köpürten malzemenin metalik yapıda olduğu ve katılaştıktan sonra da boşluk içeren yapılara metalik köpük adı verilir [44].

6.1. Metalik Köpüklerin Tarihçesi

Dünyada son 20 yılda metalik köpükler ile ilgili yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları oldukça büyük hız kazanmıştır [45]. Sosnik firmasının,1940 yılında kapalı hücre köpük üretimi hakkında yayınladığı belge metalik köpükler hakkında yayınlanan ilk belge olmuştur. 1960 yılında ise United Aircraft Corporation firması metalik köpüklerin üretim patentini almıştır. Kaliforniya’da bulunan Enerji Üretim ve Araştırma şirketi, 1968 yılında polimerik kalıp içerisinden süzme yöntemiyle açık hücreli metalik köpük üretimini hayata geçirmiştir. Metalik köpükler ile ilgili yaşanan bu ilk gelişmeler sayesinde araştırmalar çeşitlenerek devam etmiştir [46].

20. yüzyılın sonlarına doğru dünya genelinde bir çok şirket alüminyum köpük üretimine başlamıştır. Kalsiyum takviyeli sıvıya TiH_2 ’nin direkt enjekte edilmesiyle üretilen metalik köpük üretimini patentli (alporas) olarak gerçekleştiren Shinko Wire CoMPany (Japonya)

bu şirketlerin başında gelir. Norveç'te bulunan Hdyro ve Toronto'da bulunan Cymat şirketleri de sıvı gazdan köpük elde etme işlemini geliştirmişler ve daha sonra Cymat, Hydro'yu bünyesine alıp yüksek hızlı üretim bandını geliştirip üretime devam etmiştir.

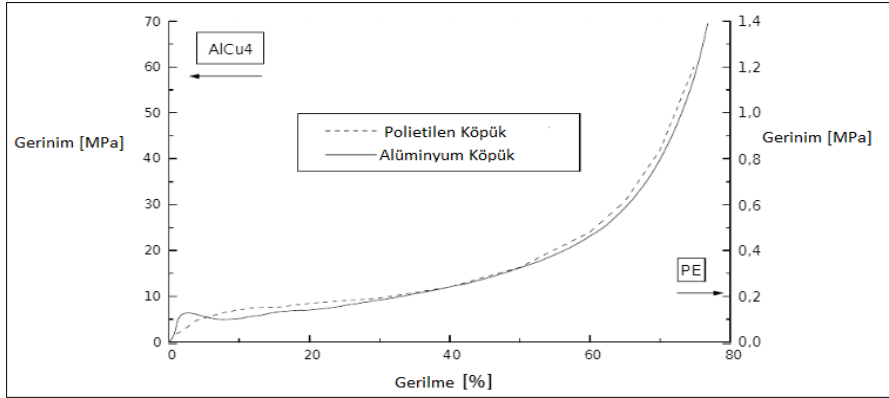
6.2. Metalik Köpüklerin Özellikleri

Günümüzde hem hafif hem de sağlam yapılara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu iki özelliği bir arada barındırabilecek malzeme üretimi için yapılan çalışmalar sonucu metalik köpükler ortaya çıkmıştır. Metalik köpükler;

- Yüksek sıcaklıklarda iç yapılarını polimerik köpüklere oranla daha iyi korurlar,
- Yüksek sıcaklıklarda toksit gaz oluşturmazlar ve sıcaklık dirençleri yüksektir,
- %100 geri dönüştürülebilirlerdir ve bu sayede çevreye zarar vermezler,
- Yönden bağısız olarak titreşim ve darbe sönümleyebilirler,
- Elektromanyetik kalkan özelliğine sahiptirler,
- Isı ve ses yalıtımına sahiptirler,
- Özgül ısı kapasiteleri oldukça düşük olduğundan düşük ısı kapasitesi gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler,
- Isıl şok dayanımları diğer malzemelere göre yüksektir.

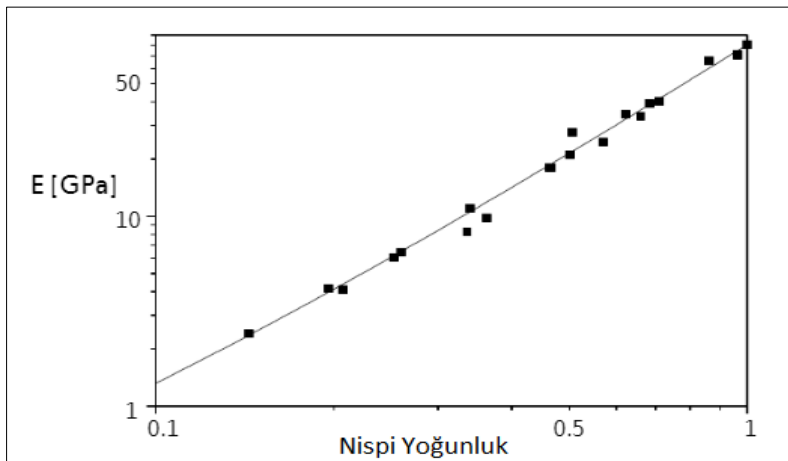
6.2.1. Metalik köpüklerin mekanik özellikleri

Metal köpüklerin tipik bir basma eğrisi, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi birkaç aşamada örneklenebilir: ilk aşamada neredeyse doğrusal deformasyon, ikinci aşamada plastik çökme ve son aşamada ise yoğunlaşma görülebilir. Bir alüminyum ($AlCu_4$) köpüğünün gerilme-gerinim eğrisi ve polietilen (PE) köpüğün eğri $AlCu_4$ köpüğü için PE köpüğüne kıyasla yaklaşık otuz kat daha yüksek bir gerilim genliği bulunması dışında benzerdir.



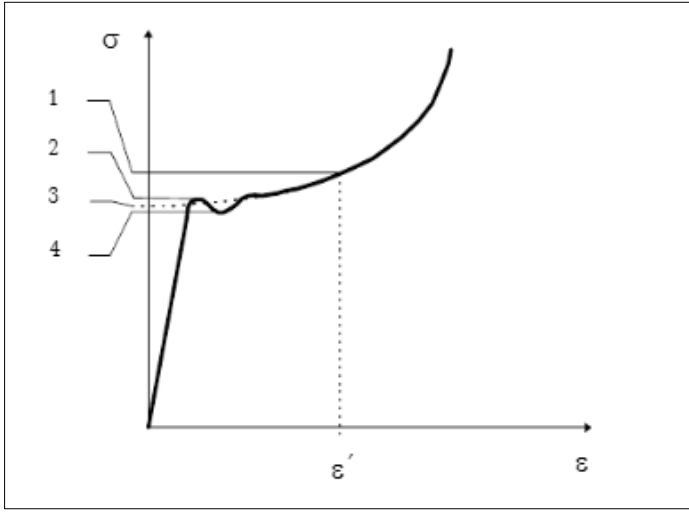
Şekil 6.1. Alüminyum ve polietilen köpüklerin gerinim-gerilim eğrileri

Elastik tepki: Metal köpük bileşenlerin tasarımında, elastik özellikler için güvenilir değerlerin kullanılması esastır. İmalat tekniklerini modellemek için bilgisayar tekniklerinin kullanımındaki ilerlemeler, kısmen bu malzeme sabitlerinin önceden bilinmesine dayanır. Tahribatsız rezonans frekans teknikleri, bu özelliklerin değerlendirilmesinde büyük umut vaat etmektedir [47]. Geleneksel mekanik çekme testi ile elastik özelliklerin belirlenmesi zaman alıcı, maliyetli ve doğrusal olmayan modüller için yorumlamaya tabi olmakla birlikte, rezonans frekans teknikleri hızlı ve tutarlı ölçüm sonuçları sağlar. Ayrıca, metalik köpükler için elastik sabitlerin geleneksel yarı-statik test yöntemleri ile ölçülmesi hatalı sonuçlara yol açar [48]. Şekil 6.2’ de kayıp faktörü 0,5 g / cm³ ila 2,65 g / cm³ (tamamen yoğun bir AlSi₁₂ kompakt) arasındaki bir yoğunluğun fonksiyonu olarak ölçülen Young’ın alaşım AlSi₁₂ modülünü göstermektedir. Ölçülen verilerin çoğu, 1.85’lik bir eğime sahip düz bir çizgiye sığmaktadır, bu nedenle $E \propto \rho^{1.85}$ formunun altında yatan bir güç yasasını göstermektedir [49].



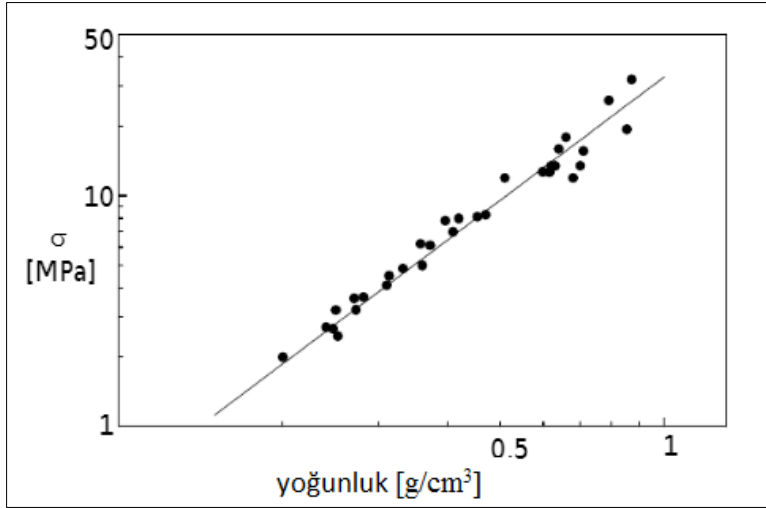
Şekil 6.2. AlSi₁₂ serisi metalik köpüğün young modülü

Sıkıştırma mukavemeti: Metal köpükler tipik bir akmayla plastik deformasyona uğrar. Elastik bozulmadan plastik bozulmaya girdiklerinde Şekil 6.3’de gösterilen evrensel deformasyon davranışını sergilerler. İlk gerçekleşen elastik deformasyonu plastik akma takip eder. Çoğu durumda, iki durum arasındaki geçiş üst ve alt akma noktalarıyla gösterilebilir. Metal köpüklerin akma dayanımı, şekilde gösterildiği gibi dört şekilde tanımlanabilir: (1) gerinim-gerilme, (2) üst akma noktası, (3) alt akma noktası (4) tahmin edilmiş gerilim.



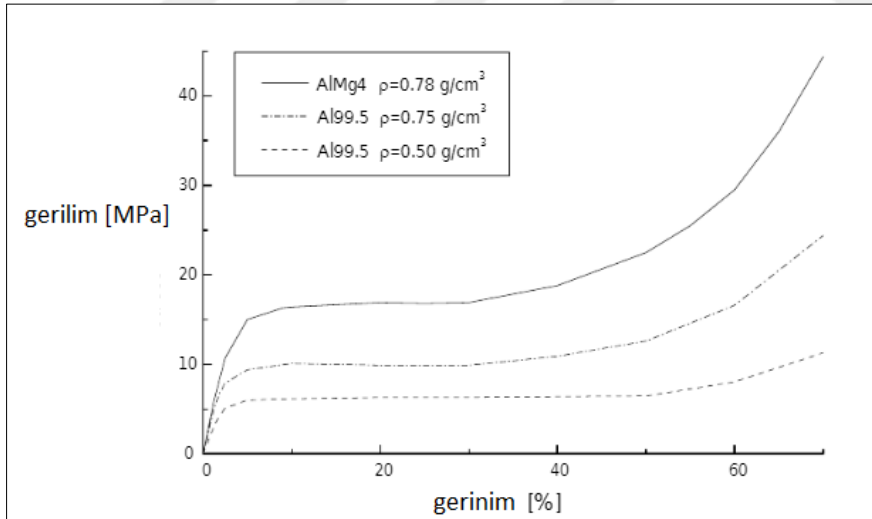
Şekil 6.3. Metalik köpüklerin tek eksenli yük altında tipik davranışı

Şekil 6.4’de alüminyum köpük yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak basma mukavemetini gösterilmektedir. Nispeten doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Gerilme-gerinim eğrisinin elastik bölümünün sadece kısmen geri dönüşümlü olduğunu belirtmekte fayda var. Yükleme sırasında, numune içinde küçük ölçekli bölgesel plastik deformasyon meydana gelmiştir. Bu küçük ölçekli plastik deformasyonlar metal köpüklerin mekanik sönümlemesine de katkıda bulunur.



Şekil 6.4. AlSi₁₂ serisi metalik köpüğünün sıkıştırma mukavemeti

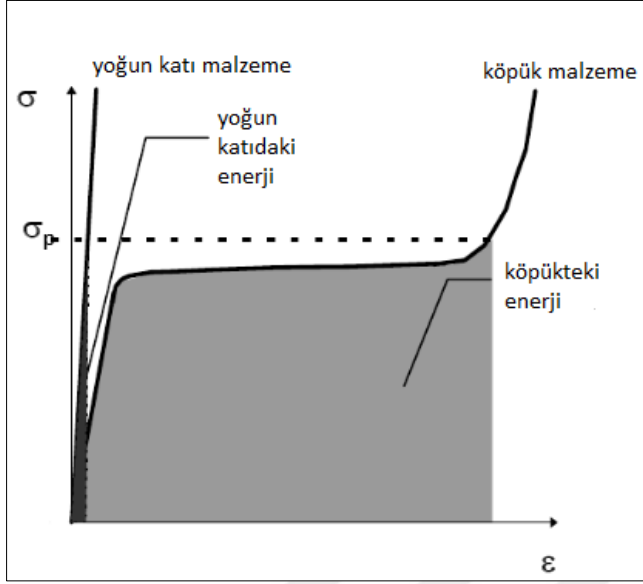
Şekil 6.5’de farklı yoğunluklara sahip olan Al99.5 (0.5 g / cm³), Al99.5 (0.75 g / cm³) ve AlMg₄ (0.78 cm³) alüminyum köpüklerin yükleme eğrileri karşılaştırılmıştır. Al matrisine Mg gibi bir alaşım elementinin eklenmesi köpüğün mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5. Farklı yoğunluklardaki ve kompozisyonlardaki üç alüminyum köpük için yükleme eğrileri

Enerji Emilimi: Kinetik enerjiyi, yüksek bir gerilim seviyesi oluşturmada emme özelliğine sahip olan metalik köpükler, enerji Emilimi gerektiren uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Şekil 6.6’da tamamen yoğun elastik katı maddenin tipik enerji Emilimi ve köpük malzemenin enerji Emilimi arasındaki fark şematik olarak gösterilmiştir. Köpük

malzeme belirli bir gerilim seviyesinde yoğun katıdan çok daha fazla enerji emilimi sergileyebilir. Özellikle metalik köpükler yüksek bir mukavemete sahip oldukları için yüksek seviyede enerjiyi verimli bir şekilde absorbe edebilirler.



Şekil 6.6. Yoğun katı malzeme ve köpük arasındaki enerji emilim farkı

6.3. Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri

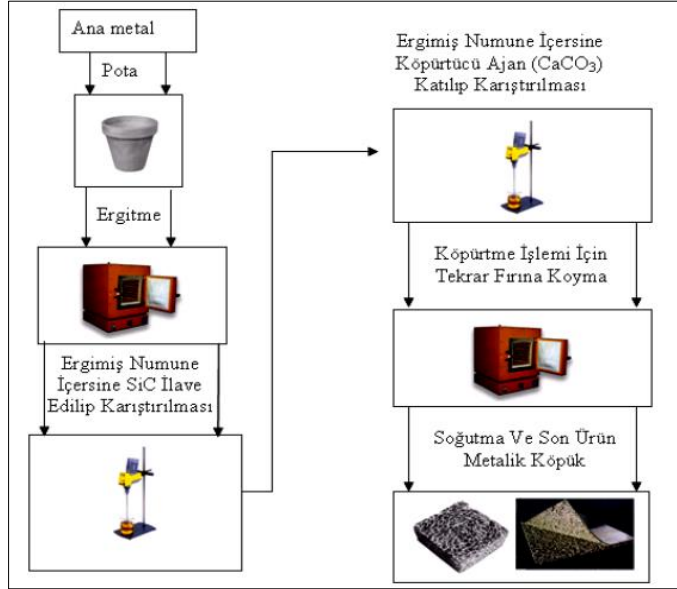
Metalik köpük üretiminde genellikle alüminyum kullanılır. Buna ek olarak nikel ve biyomedikal uygulamalar için tantal ve titanyum da kullanılmaktadır. En belirgin özellikleri düşük yoğunluk olan metalik köpüklerin hacminin yalnızca %5 - %30 'u metal , diğer kısımları havadır.

Metalik köpük üretiminde yaygın olarak kullanılan iki yöntem mevcuttur. Bunlardan biri ergitme yöntemi diğeri ise toz metalürjisi tekniğidir.

6.3.1. Ergitme yöntemi

Ergitme metodu ile köpük üretimi genel olarak üç temel aşamada gerçekleşir. İlk aşama köpürtülecek metalin ergiyik duruma getirilmesidir. Diğer aşamada gaz veya köpürtücü madde gözenekli bir yapı elde etmek için metale eklenir. Son aşamada ise ergiyik halde

bulunan metal soğutma işlemine tabi tutulur. Şekil 6.7’de metalik köpük üretiminde ergitme yönteminin aşamaları gösterilmiştir [50].

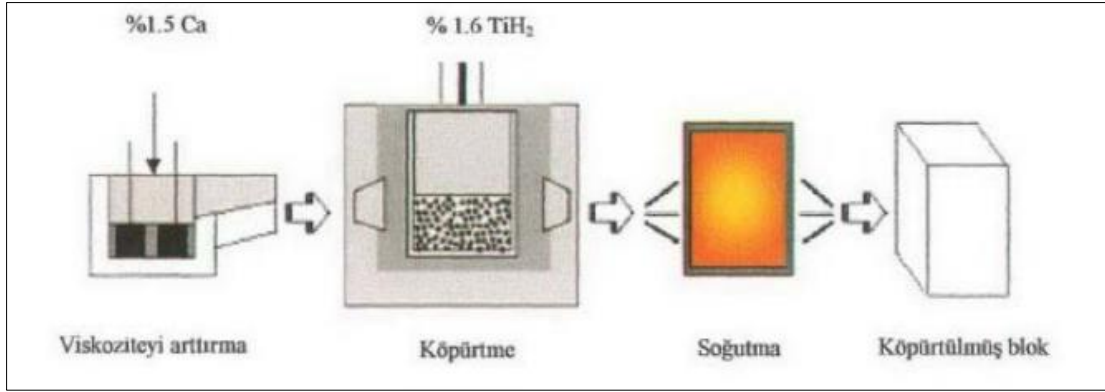


Şekil 6.7. Metalik köpük üretiminde ergitme yöntemi aşamaları

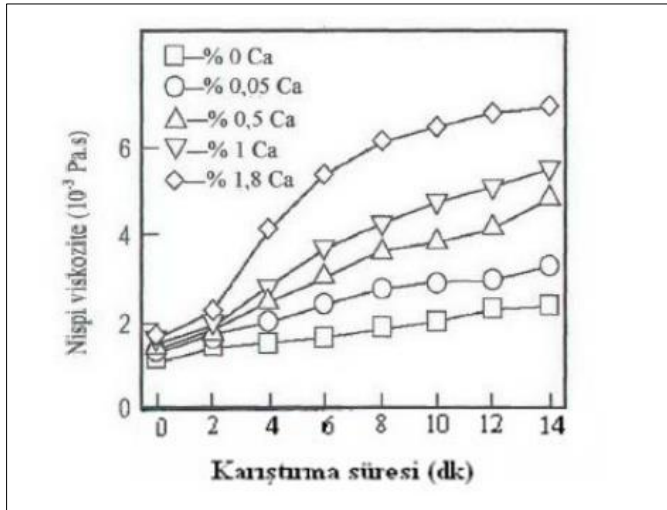
Ergitme yöntemi vasıtasıyla iki farklı şekilde metalik köpük üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yöntemlerden ilki, ergitilmiş metal içerisine gaz enjektörüyle ve ergitilmiş metal içerisine ilave edilen köpürtücü maddelerin köpük oluşturmalarıyla gerçekleştirilir [51].

Ergitilmiş metal içerisine köpürtücü madde ilavesi

Bu yöntem genel olarak alüminyum köpük üretiminde kullanılır. Birinci aşamada, eriyik metale kalsiyum ilave edilerek birkaç dakika karıştırılır. Kalsiyum ilavesi ile CaO , CaAl_2O_4 ve Al_4Ca ara bileşiği oluşur ve böylece eriyik metalin viskozitesi artar. Şekil 6.9’da karıştırma zamanlarının viskoziteye etkileri gösterilmektedir. Köpürtücü madde olarak titanyum hidrür (ZrH_2) veya titanyum dihidrür (TiH_2) kullanılır. Köpürtücü maddenin metal içerisinde kolayca dağılabilmesi için partikül veya toz formunda olması gerekir. TiH_2 eklendikten sonra homojen olarak dağılması için birkaç dakika daha karıştırılır. Yüksek sıcaklıkta TiH_2 ayrışır ve hidrojen gazı ortaya çıkar ve bu sayede gözenek oluşumu gerçekleşir. Ergiyik metal genişlemeye ve kalıbı doldurmaya başlar. Kalıp soğutulur ve sıvı köpük katı hale gelir. Blok halinde metalik köpük elde edilir Şekil 6.8 [52-53].



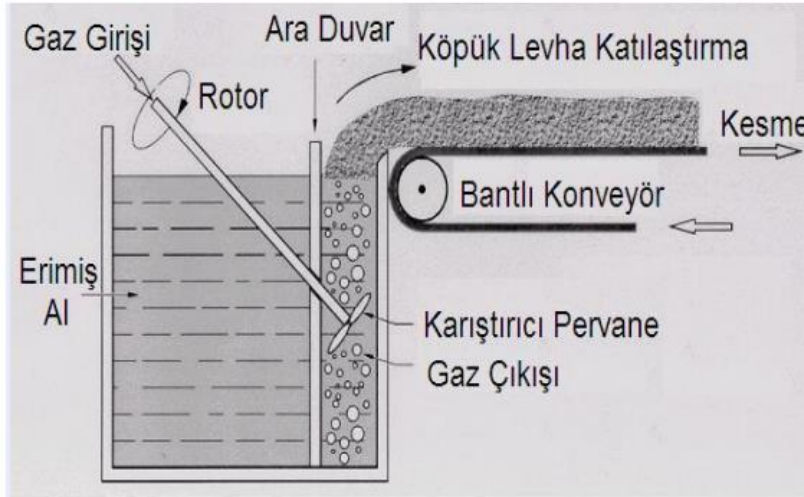
Şekil 6.8. Ergiyik metale köpürtücü madde ilavesi [52]



Şekil 6.9. Karıştırma sürelerinin viskoziteye etkisi

Ergitilmiş metal içerisine gaz enjektəsi

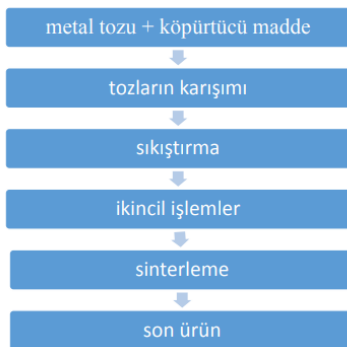
Şekil 6.10'da alüminyumdan köpük levha üretimi gösterilmiştir. Alüminyum alaşımlarına veya sıvı formda bulunan alüminyuma hava, azot ve argon (hava) enjekte edilerek köpük elde edilir. Döner pervane vasıtasıyla gaz, sıvı metale ilave edilir. Sıvı metal, ortaya çıkan gaz kabarcıklarının yüksek kaldırma hızı sayesinde yukarı doğru kaldırılır. Son olarak, katı hale gelen köpük levha istenilen uzunluklara göre kesme işlemine tabi tutulur [54].



Şekil 6.10. Gaz enjekte edilerek alüminyum köpük levha üretimi

6.3.2. Toz metalürjisi

Metalik köpük üretiminde yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem ise toz metalürjisidir. Toz metalürjisi yöntemiyle basit köpük üretimine ek olarak sandviç köpük, küresel köpük üretimi ve profil içerisinde köpürtme işlemi gerçekleştirilebilir [55]. Bu yöntemde, metal ve köpürtücü madde tozları yüksek enerjili karıştırıcıda karıştırılır ve soğuk olarak preslenir ve yarı ürün elde edilir. Elde edilen bu ürün 400-500⁰C sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulur. Sonrasında alaşım kısmen sıvı hale getirilir. Sıvı, köpürtücü madde ile tepkimeye girerek gaz kabarcıkları meydana getirir ve metalik köpük oluşur. Al esaslı metalik köpük üretiminde SiC ve Al₂O₃ ilavesi, köpük malzemeye enerji yüksek derecede enerji sönümlenme kabiliyeti kazandırır [56]. Şekil 6.11’de toz metalürjisi ile metalik köpük üretiminin aşamaları gösterilmiştir. Şekil 6.12’de ise toz metalürjisi ile üretilen metalik köpükler bulunmaktadır.



Şekil 6.11. Toz metalürjisi ile metalik köpük üretiminin aşamaları [54]

Toz metalürjisi ile metalik köpük üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta homojen bir karışım elde edilmesidir. Homojen karışım gözenek oluşumu ve büyümesinde önemli rol oynar. Artan gözenek boyutları katılaşma evresinde gözeneklerin çökmesi ve bozulması gibi sorunlar ortaya çıkarabilir [57].



Şekil 6.12. Toz metalürjisi ile üretilen farklı şekillerdeki metalik köpükler

6.4. Metalik Köpüklerin Kullanım Alanları

Çeşitli uygulamalar için yüksek sertliğe sahip ve hafif malzemeler genelde aranan yapılardır. Metalik köpükler hali hazırda piyasada bulunan ve yapısal ve fonksiyonel uygulamalar için çok tercih edilirler.

6.4.1. Yapısal uygulamalar

Makine imalatı

Metalik köpükler makine parçalarında geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Bunun iyi bir örneği köpükle doldurulmuş kirişlerin ve kolonların sert, ancak hafif olduğu endüstriyel makinelerdir. Düşük atalet sayesinde, hızlı bir şekilde hareket ettirilebilir ve tam olarak

konumlandırılabilirler. Örneğin; sondaj, endüstriyel makinelerin frezeleme, tekstil, kesme, baskı, presleme işlemleri için kullanılan makineler.

Havacılık endüstrisi

Rijitlik/yoğunluk oranının önemli olduğu havacılık sektörü de alüminyum köpüklerin önemli bir kullanım alanıdır. Uzay ve havacılık endüstrisinde köpük metal sandviç panelleri yüksek performansı daha ucuza sağladıkları için tercih edilmektedir.

Gemi yapımı

Düşük yoğunluğu ve yüksek korozyon direnci sayesinde alüminyum köpükler denizcilik sektöründe de sıklıkla kullanılmaktadır. Gemicilik sektöründe özel üretim yaygın olduğu için alüminyum köpük yapılar istenilen özelliklere göre şekillendirilebilirler.

İnşaat sektörü

Alüminyum köpüklerin geniş bir kullanım alanına sahip olduğu diğer bir sektör ise inşaat sektörüdür. Bina cephelerinde, ısı yalıtımı sayesinde ise çatı kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca ses yalıtımı ve sönümlemesi için, viyadüklerde ve otobanlarda kullanılır. Prefabrik yapılarda alüminyum köpük kullanımı oldukça yaygındır [54].

Spor malzemeleri

Maliyetin ikinci planda olduğu bazı spor malzemelerinde metalik köpüklerin benzersiz özellikleri daha belirgin hale gelir. Örneğin, darbe kontrolünü iyileştirmek için bazı golf sopalarında metal köpük yapısının sönümleme özelliğinden faydalanır. Ayrıca futbolcular için kaval kemiği koruyucularında yüksek enerji emiliminden dolayı alüminyum köpük kullanılıyor [52].

Biyomedikal uygulamalar

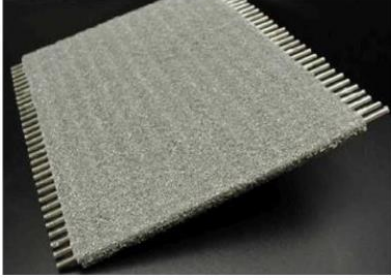
Biyo uyumlu olan titanyum ya da kobalt-krom alaşımları protez veya diş implantlarında kullanılmaktadır. Gözenekli titanyum ya da titanyum köpükler mukavemet, elastisite

modülü gibi önemli mekanik özellikleri karşılayabilmek için biyo medikal uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Magnezyum köpükler ise, kemik büyümesi boyunca yük taşır ve iyileşme sürecinde vücut tarafından emilir yani biyo–bozunur implantlarda kullanılabilir [53].

6.4.2. Fonksiyonel uygulamalar

Isı değıştirticiler

Yüksek korozyon direnci ve termal iletkenliğinden dolayı açık hücreli alüminyum ve bakır köpüklerden ısı değıştirici üretimi mümkündür. Düşük termal iletkenliğe sahip olan kapalı hücreli metalik köpükler termal kalkan olarak kullanılır. Örnek olarak bilgisayar çipleri ve soğutma radyatörleri verilebilir. Şekil 6.13’de köpük metalden yapılmış gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü gösterilmiştir [54].



Şekil 6.13. Köpük metalden üretilen ısı değıştirici

Su arıtıcılar

Suda çözünmeyen iyonların miktarını azaltmak için su arıtma sistemlerinde köpük metaller kullanılır. Köpük metal kullanılan su arıtma sistemlerinde, su açık hücreli köpük içerisinde akıtılır. Hücresel matris yapısı ve iyonlar redoks reaksiyonuna girer [58].

Susturucular

Alüminyum köpük metaller Şekil 6.14’de görüldüğü gibi susturucu parçaların yapımında da kullanılabilir. Ayrıca gösterişli mobilyalar, saatler, lambaların üretiminde de alüminyum köpük yapılara yer verilir.



Şekil 6.14. Alüminyum köpükten yapılmış susturucular

Dekorasyon uygulamaları

Günlük hayatta kullanılan masa , sandalye gibi sağlamlığı ön planda olan mobilyalarda metalik köpükler kullanılırsa mekanik özellikleri daha iyi bir hale gelecektir. Yüksek mukavemet ve daha iyi mekanik özelliklerin yanı sıra metalik köpük kullanımı mobilyaları daha çekici hale getirir [55].

6.5. Metalik Köpüklerin Savunma Sanayindeki Yeri

Uçak, yer ve amfibi balistik koruma için yüksek performanslı sert zırh sistemleri her zaman araştırmacılar için çalışma konusu olmuştur. Sert zırh sistemleri tipik olarak bir seramik veya seramik kompozit plaka ile çoklu tabakalardan oluşur. Balistik çelik veya alüminyum gibi sünek bir malzemeyle desteklenmiş veya yüksek performans sağlayan elyaf takviyeli kompozit yapıya sahiptir. Bu hibrit katman düzeneği zırhı balistik darbelere karşı daha dayanıklı ve gelen darbenin enerjisini yüksek oranda absorbe edebilen bir hale getirir. Mevcut olan çeşitli zırh seçeneklerinin her birinin birçok uygulamada kullanım alanı sınırlıdır. Uçak ve amfibi araçlarda kullanılan ve gelişmekte olan hafif zırh sistemlerinde mobilite ve balistik performansın artırılması gerekmektedir.

Geçmişte yüksek mukavemetli elyaf takviyeli kompozit zırhlar hafif zırhlar başlığı altında geniş çapta çalışılmıştı. Alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi çeşitli seramik malzemeler ve bunların kombinasyonu tipik olarak zırh sistemlerinde çarpma ön yüz plakası olarak kullanılır. Bu seramikler, merminin kinetik enerjisini emmek için yüksek çekme dayanımına sahip aramid lifinden yapılmış KevlarTM ve TwaronTM gibi kompozitlerle veya SpectraTM veya DyneemaTM gibi

polietilen kompozitlerle birleştirilir. Bu kombinasyonlardan bazıları bir dereceye kadar gerçekleştirilse de, maliyet ve ağırlık açısından çok verimli değildir.

Kompozit metalik köpükler (CMF), içi boş metalik matris içine içi boş metalik küreler gömülerek üretilen yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu yapılardır. Yapılan çeşitli çalışmalar sonucu kompozit metalik köpüklerin diğer köpük yapılara oranla daha üstün mekanik özelliklere sahip oldukları kaydedilmiştir [7-15]. Bu üstün özellikler hızlı darbe yükü altında (balistik darbe gibi) daha da geliştirilmiştir [16]. Bu özellikler kompozit metalik köpükleri zırh sistemlerinde güçlü bir aday haline getirmiştir.



7. MALZEME VE METOT

7.1. Malzeme

Yapılan tez çalışmasında toz metalürjisi yöntemi kullanılarak sıcak presleme ile ön alaşımlı AA5083 matrisli Al_2O_3 takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeler (FDKM) üretilmiştir. Üretilen FDKM'lerin 1.kademelerinde %99 AA5083 ve %1 TiH_2 içeren alüminyum alaşımlı köpük, 2.-7. kademelerinde ise fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve oranları %10-%60 arasında değişen Al_2O_3 içerikli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FDM) kompozit yapı bulunmaktadır. Matris malzemesi olarak AA5083 tozu, köpürtücü madde olarak TiH_2 (Aldrich) ve takviye elemanı olarak da Al_2O_3 (Aldour) tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozların boyutları Çizelge 7.1'de AA5083 alaşımının kimyasal kompozisyonu ise Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Kullanılan tozların boyutları

Toz Adı	Boyutu
AA50583	<150 μm
Al_2O_3	<10 μm
TiH_2	<40 μm

Çizelge 7.2. AA5083 alaşımının kimyasal kompozisyonu

Element	% Bileşim
Silisyum	0.40
Demir	0.40
Bakır	0.10
Manganez	0.40 - 1.0
Magnezyum	4.0 - 4.9
Krom	0.05 – 0.25
Çinko	0.25
Titanyum	0.15
Alüminyum	Geri Kalan

7.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Köpük Malzeme Üretimi

7.2.1. Tozların hazırlanması

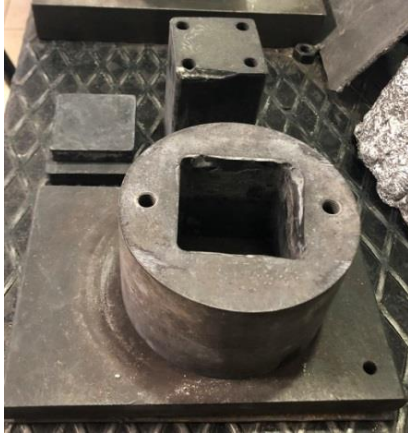
Her kademe için farklı oranlarda hesaplanan AA5083, Al_2O_3 ve TiH_2 tozları hassasiyeti 0,0001 gr olan hassas terazide tartılmış ve tartılan tozlar Resim 7.1’de verilen yüksek enerjili karıştırıcıda 1 saat süreyle karıştırılmıştır.



Resim 7.1. Yüksek enerjili karıştırıcı

7.2.2. Tozların preslenmesi ve köpürtme işlemi

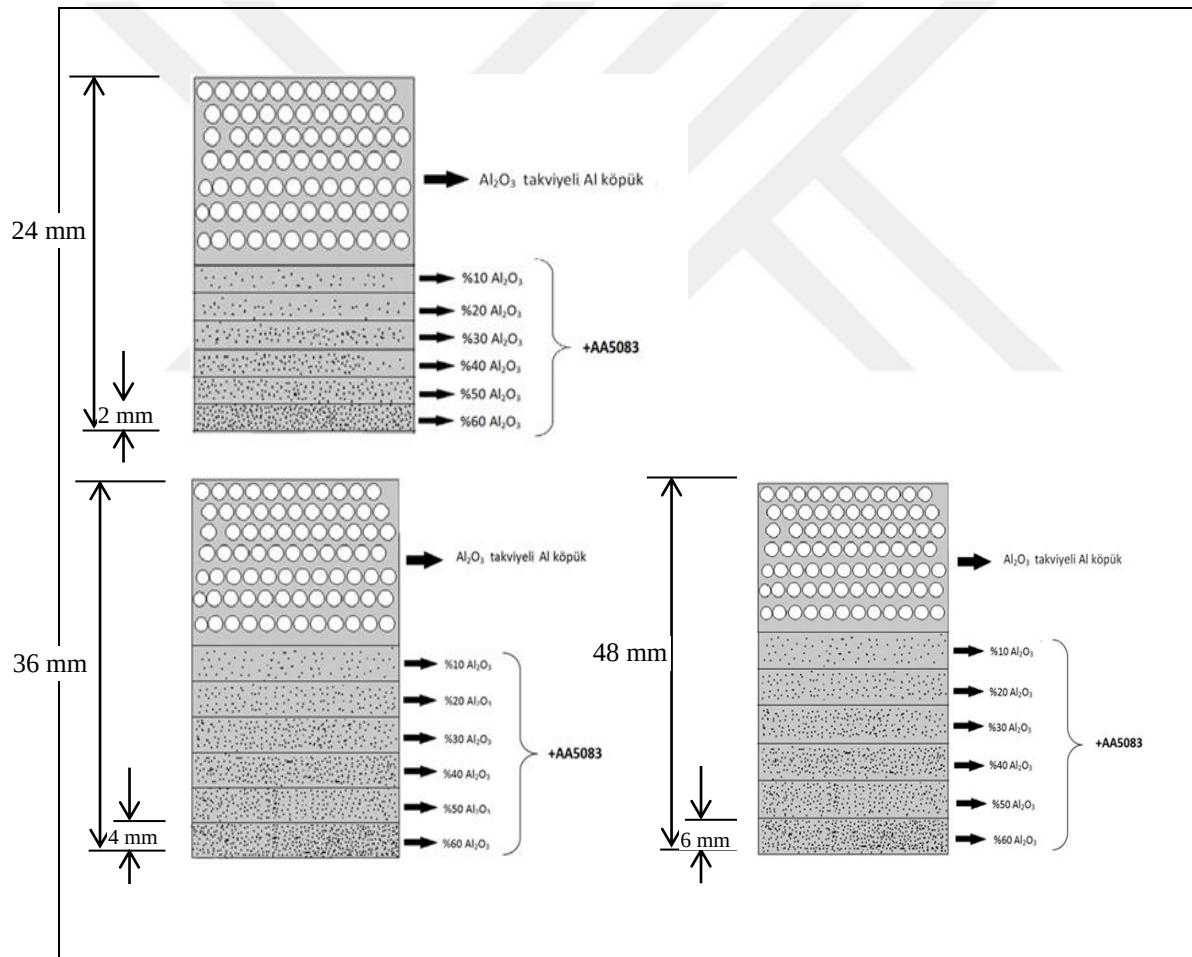
Karıştırılan tozlar, presleme işlemi için özel olarak hazırlanmış kalıba (Resim 7.2) alt kısmında %60 Al_2O_3 ve en üst kısmında köpük olacak şekilde dizilmiştir. Kalıba dizilen tozlara 280 ton presleme kapasitesine sahip hidrolik pres (Resim 7.3) ile ilk olarak 30 MPa ön yük uygulanmıştır. Ön yük uygulandıktan sonra 500° C sıcaklık ve 300 MPa basınç altında sıkıştırılarak toz metal blok numuneler elde edilmiştir (Resim 6.5). Elde edilen toz metal blok numuneler 750°C sıcaklıkta 10 dakika süreyle köpürtme işlemine tabi tutularak 24-36-48 mm (1-1.5 ve 2 inç) kalınlıklarında FDKM’ler üretilmiştir (Resim 7.6). Üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemelerin kademe kalınlıkları 2-4 ve 6 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur (Şekil 7.1 ve Çizelge 7.3). Pilot deneyler sonrası elde edilen fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzeme Resim 7.4’de gösterilmiştir.



Resim 7.2. Presleme kalıbı



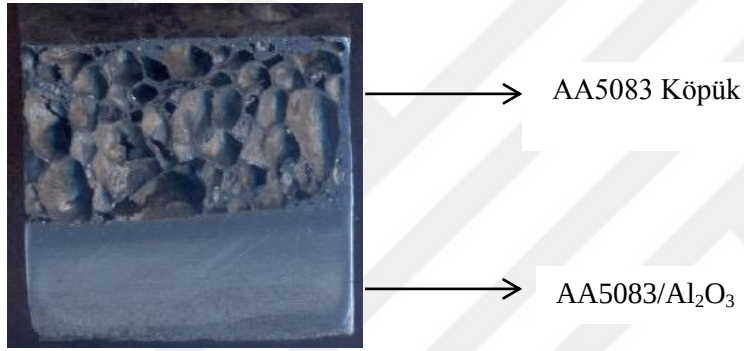
Resim 7.3. Hidrolik pres



Şekil 7.1. Kademe kalınlıkları 2, 4, 6 mm olan FDM ve Al köpükten oluşan FDKM zırh malzemesinin şematik gösterimi

Çizelge 7.3. Kademe kalınlıklarına göre numune grupları

Numune Adı	Kademe ve Köpük kalınlığı
A grubu	2 mm kademe (oranları %10,20,30,40,50,60 olarak değişen Al_2O_3 + AA5083 içerikli kademe) + 2 mm köpük(AA5083)
B grubu	4 mm kademe(oranları %10,20,30,40,50,60 olarak değişen Al_2O_3 + AA5083 içerikli kademe) + 2 mm köpük(AA5083)
C grubu	6 mm kademe(oranları %10,20,30,40,50,60 olarak değişen Al_2O_3 + AA5083 içerikli kademe) + 2 mm köpük(AA5083)



Resim7.4. Pilot deneyler sonrası elde edilen FDKM



Resim 7.5. Köpürtme işlemi öncesi FDKM numuneleri



Resim 7.6. Köptürme işlemi sonrası FDKM numuneleri

7.3. Üretilen FDKM'lerin Mikroyapısal Karakterizasyonu

Sıcak presleme metodu ile üretilen FDKM'lerin AA5083 içindeki Al_2O_3 dağılımı, matris/partikül ara yüzey durumu ve hasar analizlerini incelemek için Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarları'nda Jeol 6060 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve faz değişimlerini incelemek için Bruker D8 marka cihazla X-ışını kırınımı (XRD) yöntemleri uygulanmıştır.

7.4. Üretilen FDKM'lere Uygulanan Mekanik Testler

7.4.1. Makro sertlik testi

FDKM'lerde partikül oranına ve kademe kalınlığına bağlı olarak değişen sertlik değerlerini incelemek için Resim 7.7.'deki DuraScan G5 marka tam otomatik sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik değerleri her kademede ve kademeler arası geçiş bölgelerinden 1.5 mm mesafe ile 5 ayrı noktadan alınmıştır. Ölçümler ASTM E384 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 2.5 mm bilye ucu ve 31,25 N kuvvet uygulanmıştır.



Resim 7.7. Makro sertlik ölçüm cihazı

7.4.2. Darbe testi

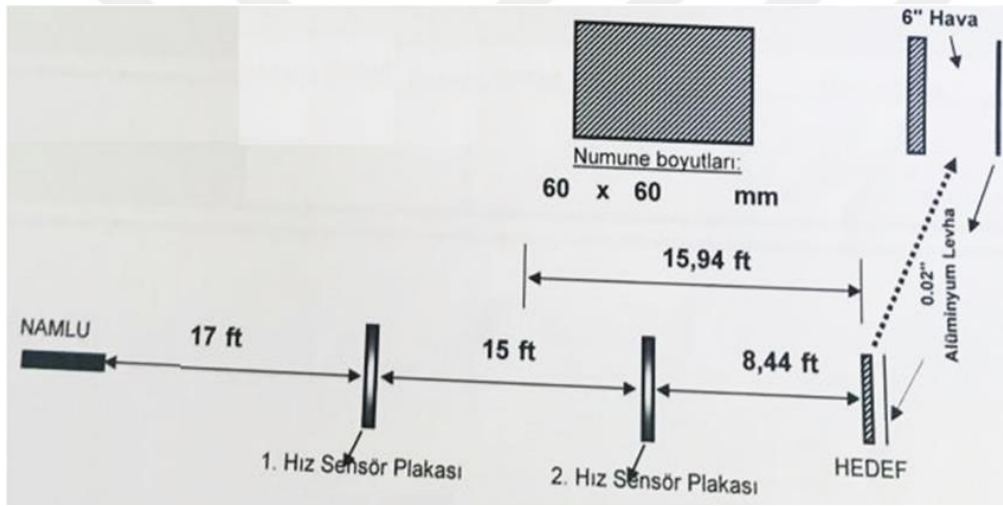
FDKM'lerin düşük hızda darbe enerjilerini belirlemek için Hitit Üniversitesi Laboratuvarında bulunan Instron marka darbe cihazı kullanılmıştır. Darbe testleri ISO 7765 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testler, FDKM'lerin köpük yüzeylerine 2,22-6,3 m/s arasında değişen darbe hızlarında ve çapı 25.7 mm olan yarı küresel darbe ucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan darbe enerjisi değerleri 50-300 Joule aralığındadır. Çalışma kapsamında kullanılan darbe ucunun üzerindeki aparatlar ile birlikte toplam ağırlığı bütün darbe testleri için 15 ve 30 kg'dır. Yapılan darbe testler sonucunda maksimum yük (kN), darbe enerjisi (J) ve absorbe edilen enerji (J) miktarı belirlenmiştir. Çizelge 7.4'de farklı kademe kalınlıklarına sahip numunelere uygulanan darbe testinde kullanılan darbe yükü ve darbe enerjileri verilmiştir.

Çizelge 7.4. Farklı numune gruplarına uygulanan darbe testindeki darbe yükleri ve darbe enerjileri

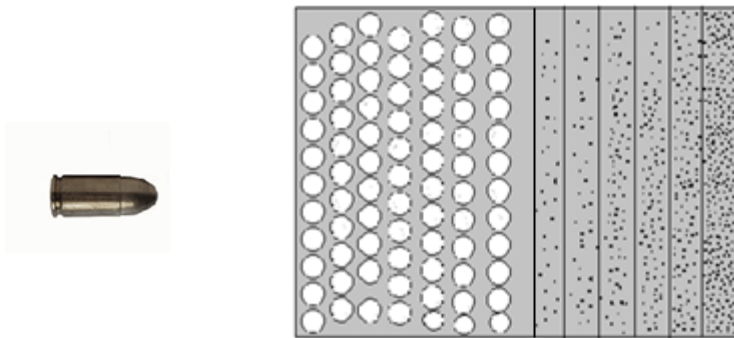
Darbe Enerjisi (J)	15 Kg Darbe Yükü	30 Kg Darbe Yükü
50 J	A, B, C	-
100 J	A, B, C	A, B, C
200 J	A, B, C	A, B, C
300 J	-	A, B, C

7.4.3. Balistik test

Numunelerin balistik performansını belirlemek amacıyla MIL-DTL46027 standardına göre farklı hızlarda atışlar yapılarak FDKM'nin V50 balistik hız limitleri belirlenmiştir. Balistik testler FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.'de bulunan atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Balistik test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 7.2'de verilmiştir. Elde edilecek V_{50} balistik hız limitleri MIL-DTL46027 standardındaki değerlerle kıyaslanmıştır. Balistik hız limitlerinin belirlenmesi için yapılan çalışmada 1-1.5 ve 2 inç kalınlığında FDKM'ler kullanılmış ve balistik testler Şekil 7.3'de gösterildiği gibi FDKM'nin metalik köpük yüzeyinden atışlar yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.2. Balistik test düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 7.3. Balistik testlerde merminin temas yüzeyinin gösterimi

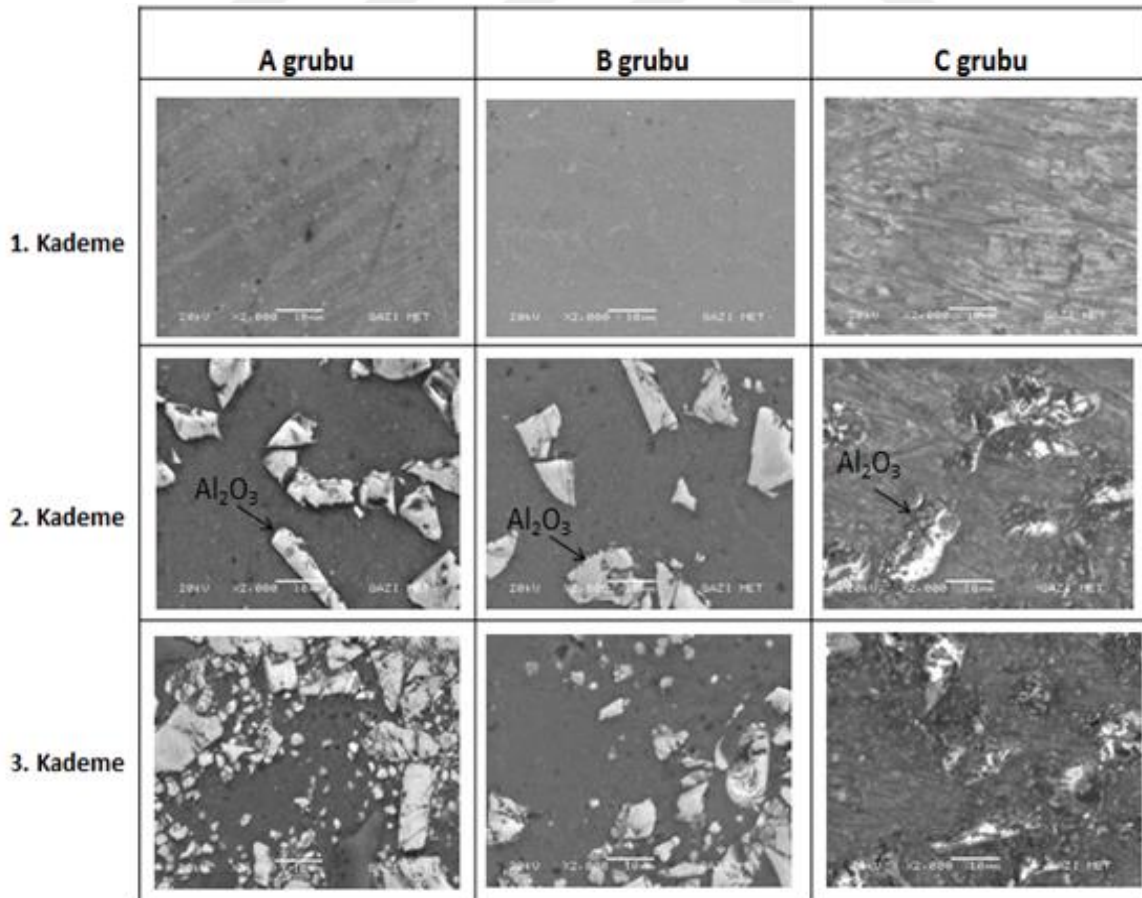


8. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

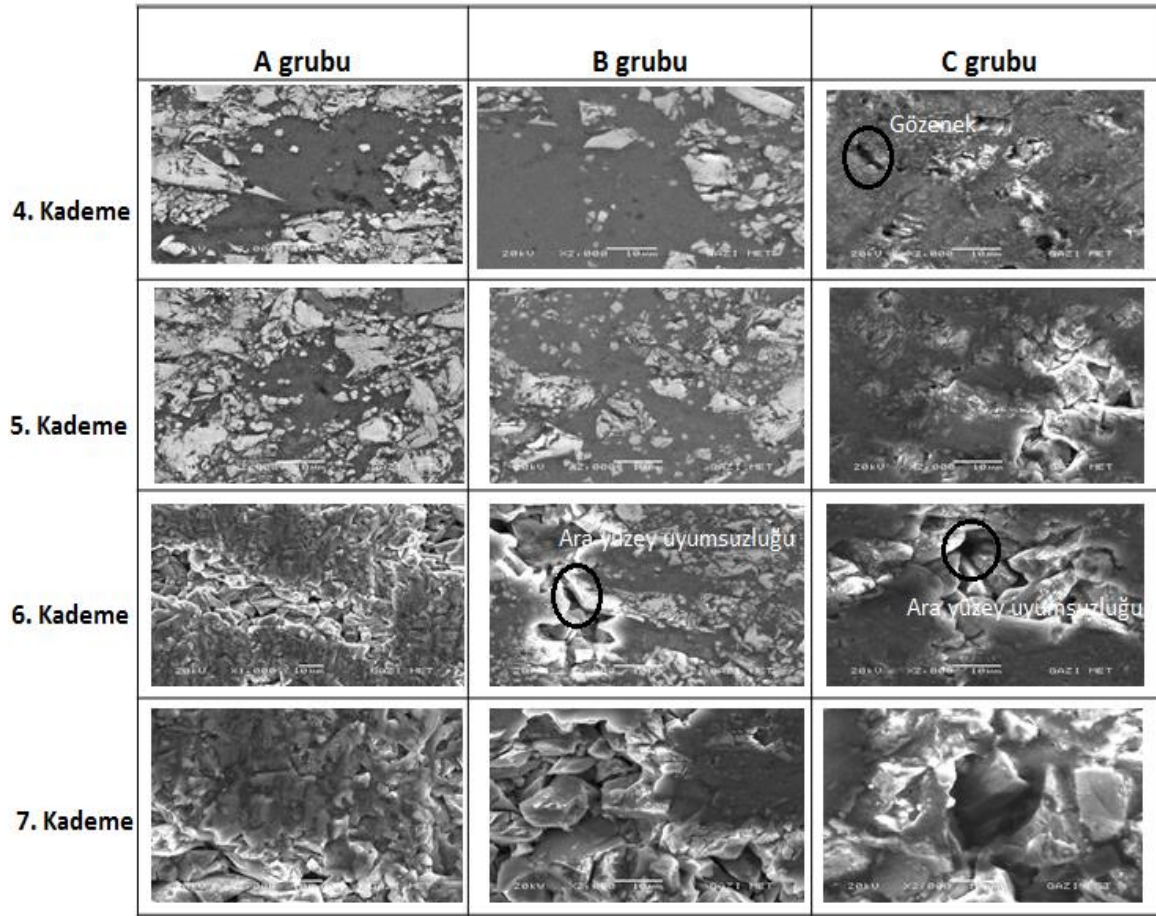
8.1. Mikro Yapısal Karakterizasyon

8.1.1. SEM (Taramalı elektron mikroskobu) analizleri

Üretilen FDKM’lerde AA5083 içindeki Al_2O_3 dağılımı, matris/partikül ara yüzey durumunu incelemek için her kademedan ayrı ayrı ve her kademe arası geçiş bölgelerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Bu işlem kademe kalınlıkları farklı olan numunelere ayrı ayrı uygulanmıştır. Kademe kalınlıkları farklı olan FDKM’lerde SEM görüntüleri Şekil 8.1’de verilmiştir. 1. kademe %100 AA5083 köpük 2. ve 7. Kademelerde ise oranları %10-%60 arasında değişen Al_2O_3 takviyeli FDM yapı bulunmaktadır. Şekillerde koyu renkli yapılar AA5083 matrisi ifade ederken, beyaz renkli yapılar Al_2O_3 parçacıklarını temsil etmektedir.

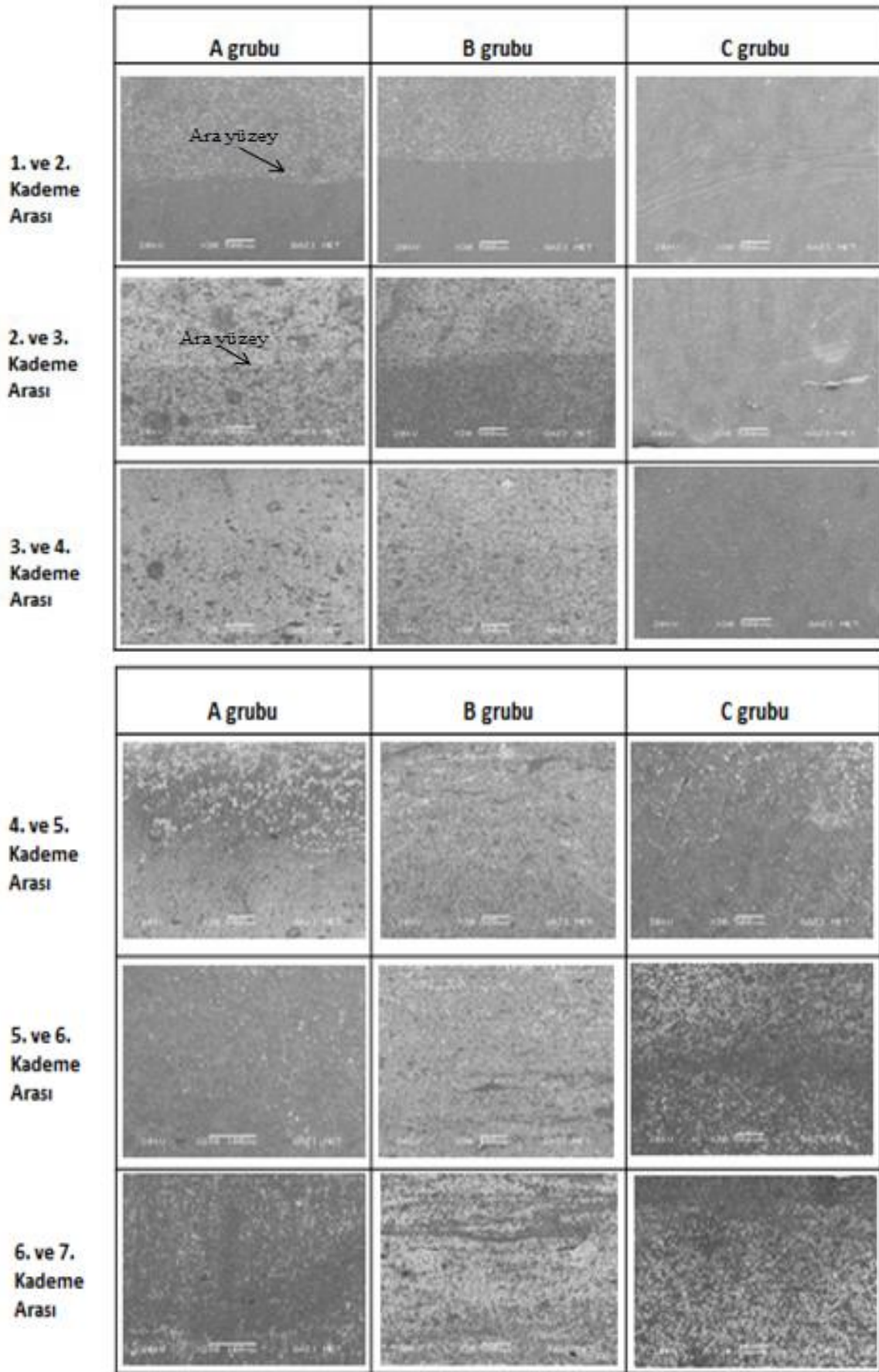


Şekil 8.1. A, B, ve C grubu numunelerinin kademelerinin SEM görüntüleri



Şekil 8.1. (devam) A, B, ve C grubu numunelerinin kademelerinin SEM görüntüleri

Şekil 8.1’de kademe kalınlıkları sırasıyla A, B, ve C grubu numunelerin her kademesinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. %99 AA5083 ve %1 oranında TiH_2 içeren köpük yapının bulunduğu 1. kademelerde partikül gözlemlenmemiştir. Al_2O_3 oranları %10-%60 arasında değişen 2. ,3. ,4. ,5. ,6. , ve 7. kademelerde partikül oranındaki artışa bağlı olarak renk değişimleri gözlemlenmiştir. Al_2O_3 partikülleri kademe kalınlıkları farklı olan her numunede AA5083 matrise homojen bir şekilde dağılmıştır. Ayrıca, A grubu numunesinin 7. kademesinde, B grubu numunenin 6.ve 7. kademesinde ve C grubu numunenin 5. , 6. ve 7. kademesinde AA503 matris ile Al_2O_3 partikülleri arasında mikro boşluklar oluşmuştur. Oluşan bu mikro boşluklar matris/partikül ara yüzey uyumsuzluğunun meydana geldiğini kanıtlar niteliktedir. Sonuç olarak artan Al_2O_3 miktarının matris/partikül ara yüzey uyumsuzluğuna sebep olduğunu düşünülmektedir.



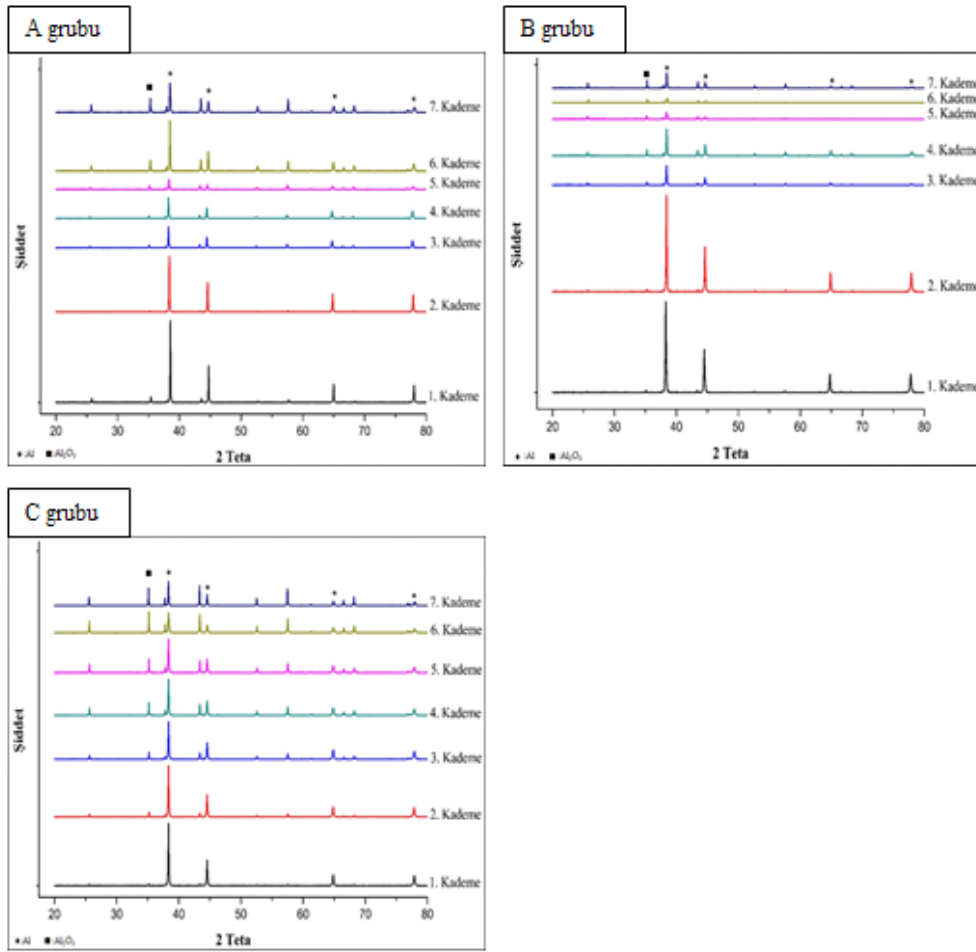
Şekil 8.2. A, B ve C grubu numunelerinin kademeler arası SEM görüntüleri

Şekil 8.2’de A,B ve C grubu numunelerin kademeler arası SEM görüntüleri verilmiştir. A grubu FDKM’lerde 1-2, 2-3, 3-4 ve 5-6 kademeler arasında geçişler belirgin iken, partikül oranının daha fazla olduğu 5-6 ve 6-7 kademelerdeki geçişler belirsiz hale gelmiştir. B grubu FDKM’lerde ise 1-2, 2-3, 3-4 kademe geçişleri belirgin fakat 4-5, 5-6 ve 6-7 kademelerdeki geçiş bölgeleri kaybolmuştur. C grubu numunelerde ise her kademe arası geçişler belirsizdir. Çünkü bu numunede kademe kalınlığı diğerlerine göre daha yüksek olduğu için partiküller daha geniş bir alana yayılmış ve geçiş bölgeleri kaybolmuştur. Sonuç olarak partikül oranındaki ve kademe kalınlığındaki artış kademeler arası geçiş bölgelerini belirsiz hale getirdiği görülmektedir.

8.1.2. XRD (X-Işını Kırınımı Yöntemi) analizleri

FDKM’lerde meydana gelen faz değişimlerini incelemek için kademe kalınlığı farklı olan her numunenin XRD analizleri incelenmiştir.

Şekil 8.3’de A, B, C FDKM’lerin XRD grafikleri verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde partikül oranı arttıkça Al peak şiddetlerinde azalma meydana gelmiştir. Her FDKM’nin 1. 2. kademelerinde Al peak şiddetlerinin 5.ve 6. kademelerindeki peak şiddetlerine oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun, yapı içerisindeki Al_2O_3 oranı ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. Zira, kademelerdeki Al_2O_3 oranı arttıkça Al peak şiddetleri azalmış Al_2O_3 peak şiddetleri belirgin şekilde artmıştır. Ayrıca her üç FDKM’nin grafiklerini genel olarak ele alındığında kademe kalınlığı arttıkça peak şiddetlerinin azaldığı gözlemlenebilir. Kademe kalınlığı 6 mm olan FDKM’nin peak şiddetleri kademe kalınlığı 2 mm olan FDKM’ye göre daha düşüktür.



Şekil 8.3. A, B ve C grubu FDKM'lerin XRD grafikleri

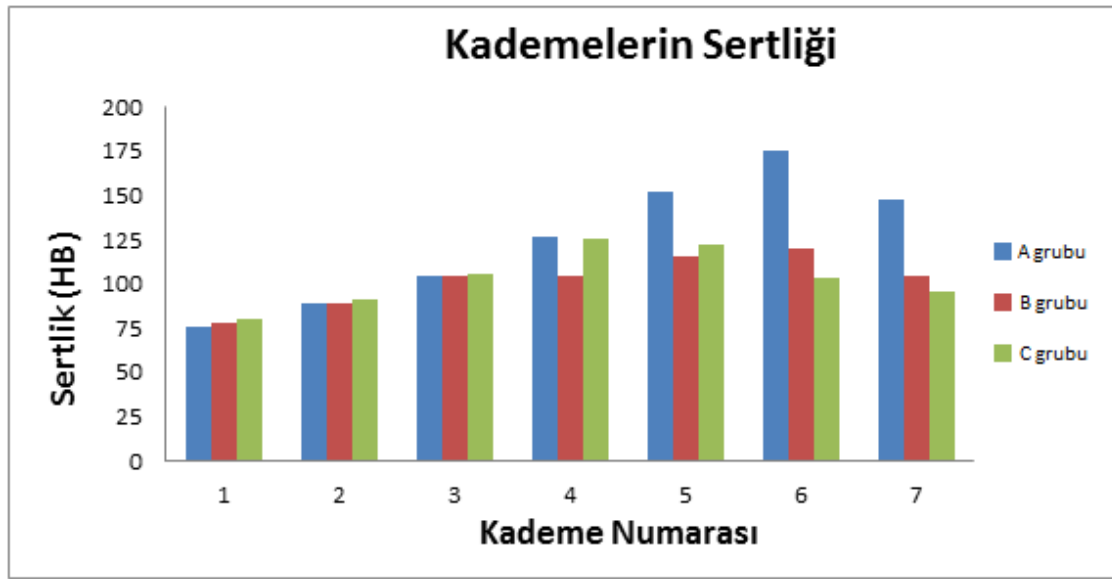
8.2. Mekanik Testler

8.2.1. Makro sertlik ölçümleri

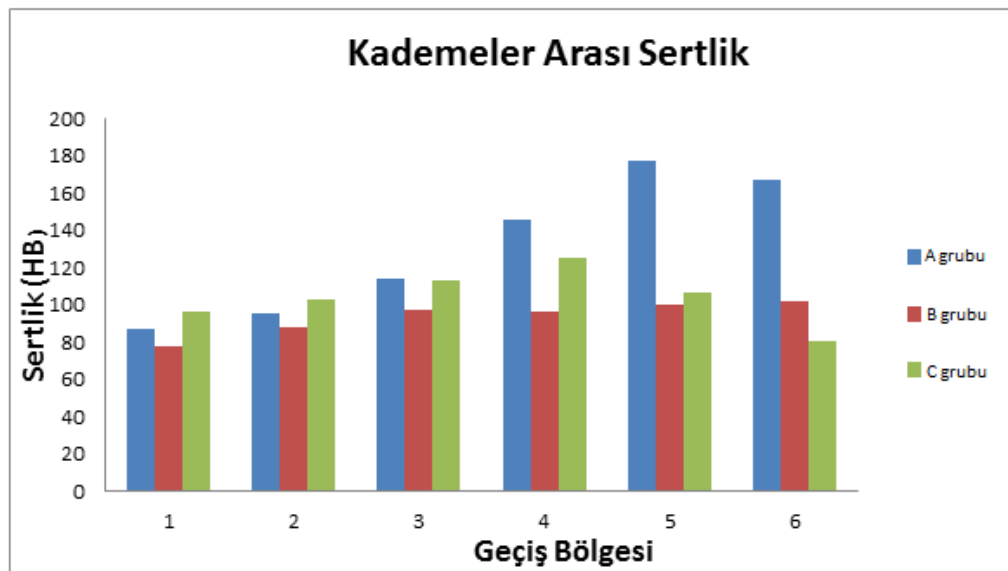
Partikül oranının artışına ve kademe kalınlığına bağlı olarak matris malzemede değişen sertlik değerlerini incelemek için farklı kademe kalınlıklarına sahip her numunenin kademelerinden ve kademeler arası geçiş bölgelerinin makro sertlik değerleri ölçülmüştür.

Farklı kademe kalınlıklarına sahip FDKM'lerin kademelerindeki sertlik değerleri Şekil 8.4'de verilmiştir. A grubu FDKM' de en yüksek sertlik değeri (167 HBN) %50 Al_2O_3 oranına sahip 6. kademede saptanmıştır. %60 partikül oranına sahip 7. kademede ise sertlik değeri 6. kademeye göre daha düşüktür. B grubu FDKM'de ise en yüksek sertlik değeri (129 HBN) %40 oranında Al_2O_3 içeren 5. kademede tespit edilmiştir. %50 ve %60 partikül içeren 6. ve 7. Kademede sertlik değeri düşmüştür. C grubu FDKM'de en yüksek sertlik

değeri %30 Al_2O_3 oranına sahip 4. kademe (127 HBN) saptanmıştır. %40, %50 ve %60 Al_2O_3 içeren 5., 6. ve 7. Kademe sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Farklı kademe kalınlıklarına sahip FDKM'lerin sertlik değerleri genel olarak ele alındığında en yüksek sertlik değeri kademe kalınlığının en düşük olduğu FDKM'de 167 HBN ile elde edilmiştir. Ayrıca her numune kademelerde Al_2O_3 oranının yüksek olduğu kademelerde sertlik değeri düşük değerdedir. Al_2O_3 oranının sertlik değerine olumlu etkisi beklenir fakat Al_2O_3 oranı arttıkça gözeneklilik de arttığı için bu kademelerde sertlik değeri düşmüştür.



Şekil 8.4. Kademe kalınlığına bağlı olarak kademelerdeki sertlik değişimi grafiği

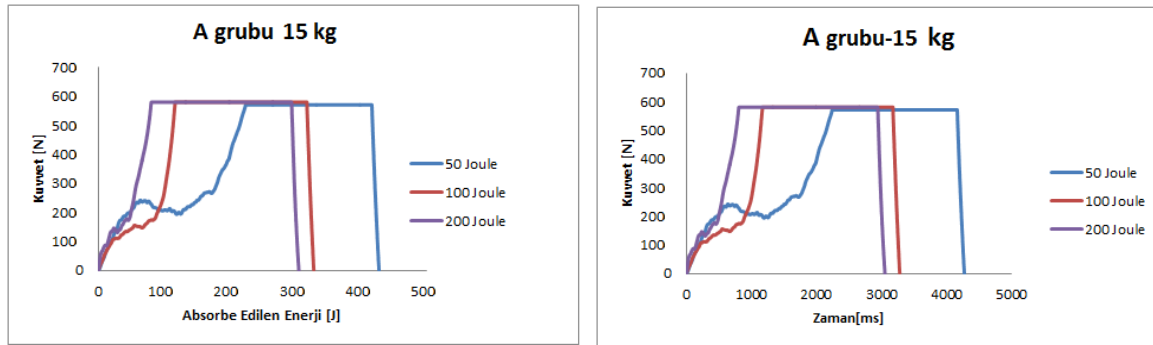


Şekil 8.5. Kademe kalınlığına bağlı olarak kademeler arasındaki sertlik değişimi grafiği

Şekil 8.5’de verilen grafik incelendiğinde Agrubu FDKM’de en yüksek sertlik değeri 5.kademedan (%40 Al_2O_3) 6. Kademeye (%50 Al_2O_3) geçerken (177 HBN) tespit edilmiştir. B grubu FDKM’de en yüksek sertlik değeri 6. kademedan (%50 Al_2O_3) 7. kademeye(%60 Al_2O_3) geçerken (101 HBN) ve C grubu FDKM’de kademeler arası geçişlerde en yüksek sertlik değeri (125 HBN) 5.(%40 Al_2O_3) – 6. (%50 Al_2O_3) kademe arasında elde edilmiştir.

8.2.2. Düşük hızda darbe testi sonuçları

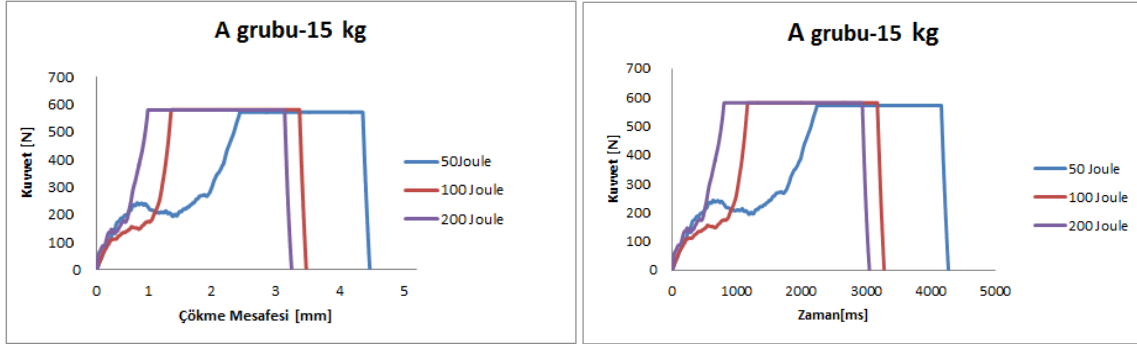
Uygulana darbe testi sonucunda elde edilen verilere göre Kuvvet(N)-Absorbe edilen Enerji(J), Kuvvet(N)-Çökme miktarı (mm), Kuvvet(N)-Zaman(ms) grafikleri incelenmiştir. Kuvvet (N)-Absorbe edilen enerji (J) eğrileri uygulanan darbe esnasında numunenin absorbe ettiği enerji miktarı hakkında bilgi verir. Kuvvet (N)-Çökme mesafesi (mm) eğrileri darbe uygulanması sonucunda darbe ucunun numuneden sekmesi, saplanması ve delmesi gibi durumlar hakkında bilgi verir. Kuvvet(N)-Zaman(ms) eğrileri ise darbe ucunun numuneye uyguladığı kuvvetin zamana göre değişimi hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 8.6. A grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde Kuvvet(N)–Absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

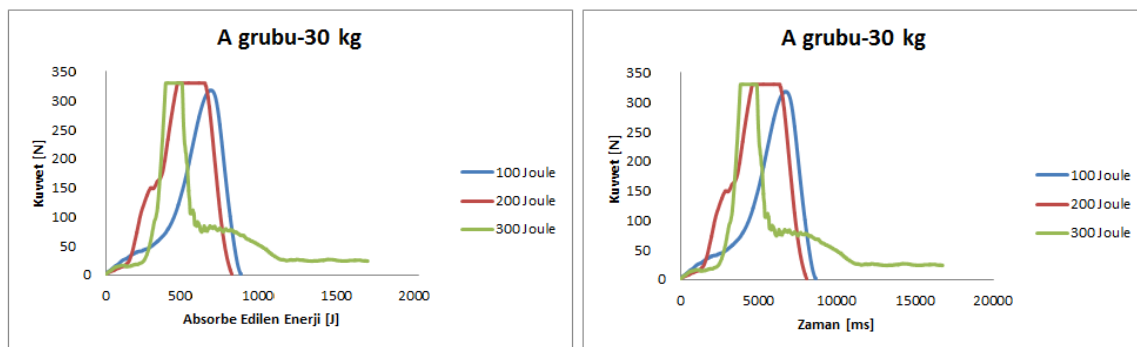
Şekil 8.6’de verilen eğriler incelendiğinde 50 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarı diğer darbe enerjilerine göre daha yüksektir. 200 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarı en düşük değerdedir. Kuvvet (N)-Absorbe edilen enerji (J) eğrilerinde 50, 100 ve 200 J darbe enerjilerinde maksimum kuvvete ulaşıldıktan sonra grafikte düz bir kısım oluşmuş daha sonra kuvvette azalma meydana gelmiştir. Kuvvet (N)-Zaman (ms) eğrileri incelendiğinde, yaklaşık 2 saniye boyunca grafiklerde sabitlik görülmüştür. Bunun

nedeninin, darbe ucunun numunenin köpük kademesini tamamen çöktürerek FDM kademelerine etki etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, numunenin köpük kademesi tamamen çöktükten sonra FDM kademelerinin darbeden dolayı etkiyen kuvveti bir süre taşımış ve daha sonrasında kuvvette azalma meydana geldiği değerlendirilmiştir.



Şekil 8.7. A grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)-çökme mesafesi(mm) ve kuvvet-zaman eğrileri

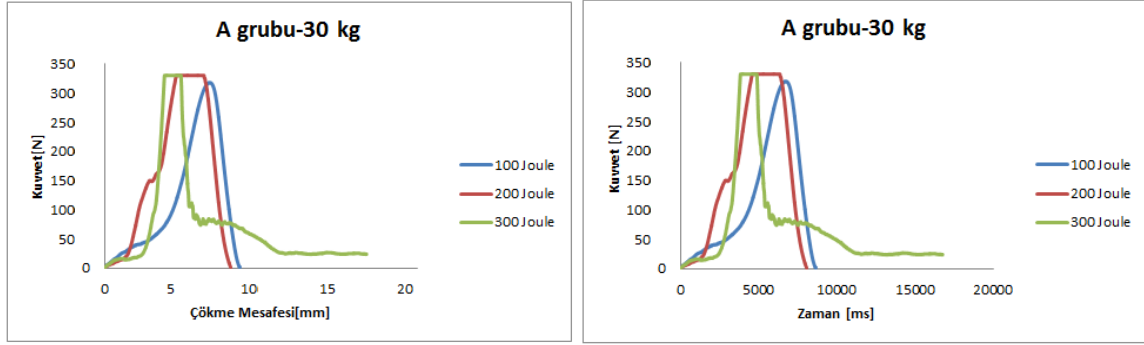
Şekil 8.7'de verilen eğriler incelendiğinde, 50 J darbe enerjisinde meydana gelen çökmenin 100 ve 200 J darbe enerjilerinde meydana gelen çökmeden daha fazla olduğu görülmüştür. Kuvvet (N)-Çökme Mesafesi (mm) eğrilerinde de 50, 100 ve 200 J darbe enerjilerinde maksimum kuvvete ulaşıldıktan sonra grafikte düz bir kısım oluşmuş daha sonra kuvvette azalma meydana gelmiştir. Meydana gelen düz kısmın Kuvvet (N)-Zaman (ms) eğrilerinde meydana gelen bekleme süresinden kaynaklanmış olabileceği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 8.8. A grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)-absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

Şekil 8.8'de verilen eğriler incelendiğinde 100 ve 200 J darbe enerjilerinde numunenin absorbe ettiği enerji miktarları birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. 300 J darbe

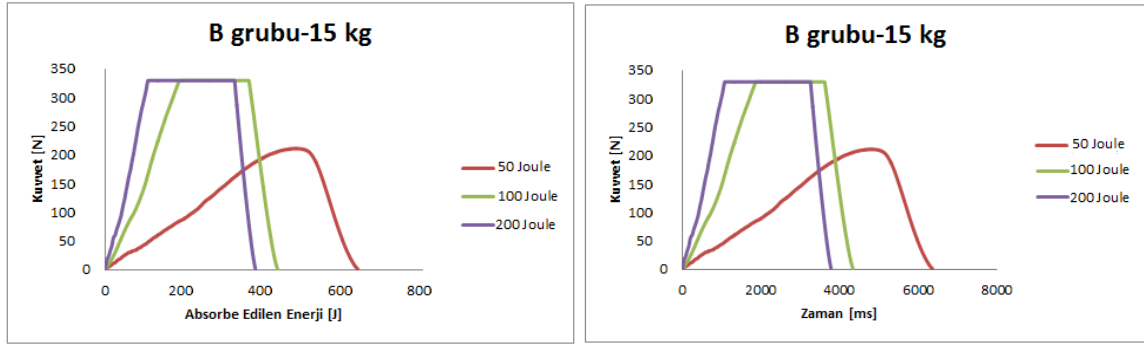
enerjisinde absorbe edilen enerji miktarının daha az olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 50 J darbe enerjisinde elde edilen grafiklerde, yük maksimum miktara ulaştıktan sonra hızlı bir şekilde azalmıştır. 200 ve 300 J darbe enerjilerinde ise yük maksimum miktara ulaştıktan sonra sabitlenmiş ve daha sonra azalma eğilimi sergilemiştir.



Şekil 8.9. A grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi(mm) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

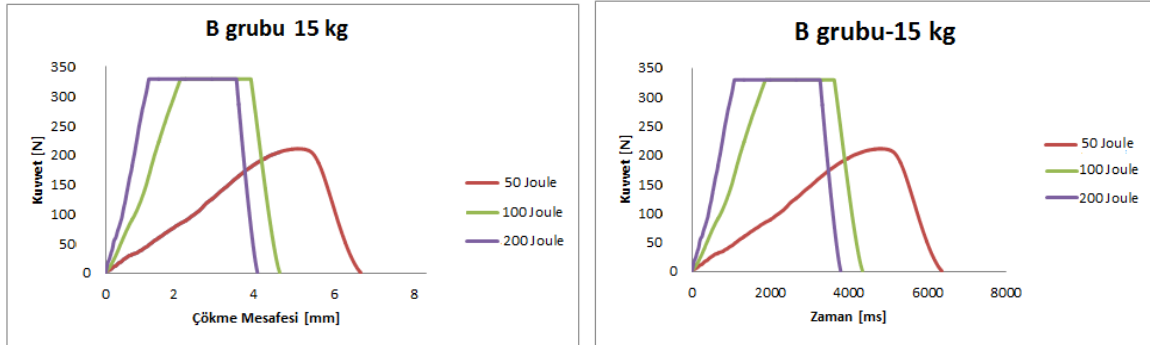
Şekil 8.9 incelendiğinde 30 kg yük ve 300 J darbe enerjisinde meydana gelen çökme miktarının 100 ve 200 J darbe enerjilerine kıyasla daha az olduğu görülmüştür. .

A grubu numunelere 15 kg yük uygulanarak 50 J ve 30 kg yük uygulanarak 100 J’de yapılan darbe deneylerinde meydana gelen çökmenin ve absorbe edilen enerjinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 15 kg yük kullanılarak 50, 100 ve 200 J enerji altında yapılan darbe deneylerinde Kuvvet(N)-Çökme Mesafesi(mm) ve Kuvvet(N)-Absorbe Edilen Enerji(J) grafiklerinde düz kısımların olduğu görülmüştür. 30 kg yük kullanılarak 100 J enerji altında yapılan darbe deneylerinde de benzer durum meydana gelmiştir. Bu durumun, 15 kg yük 50, 100, 200 J ve 30 kg yük 200, 300 J enerji altında yapılan darbe deneylerinde, darbe enerjisinin köpük kademesinde tamamen çökmeye neden olduktan sonra FDM kısmına ise etki etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 30 kg yük 100 J enerji altında yapılan darbe deneylerinde ise, darbe enerjisinin sadece köpük kademesinde çökmeye neden olduğu FDM kısmında ise herhangi bir etki meydana getirmediği düşünülmektedir. Kuvvet(N)-Zaman(ms) eğrilerinin bu düşüncüyü destekler nitelikte olduğu değerlendirilmiştir.



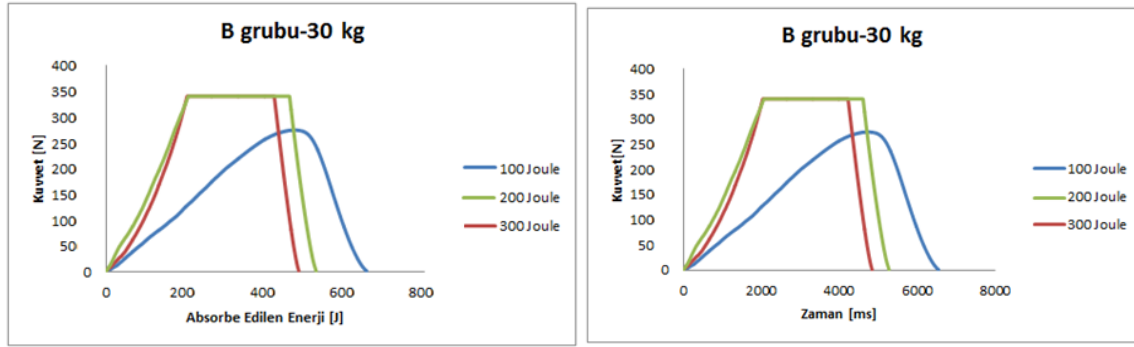
Şekil 8.10. B grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

Şekil 8.10’da verilen B grubu numunelerinin 15 kg yük altında değişik darbe enerjilerini göre Kuvvet (N)-Enerji (J) eğrileri incelendiğinde, 50 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarının en fazla olduğu gözlemlenirken, 200 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarının en düşük olduğu görülmektedir.



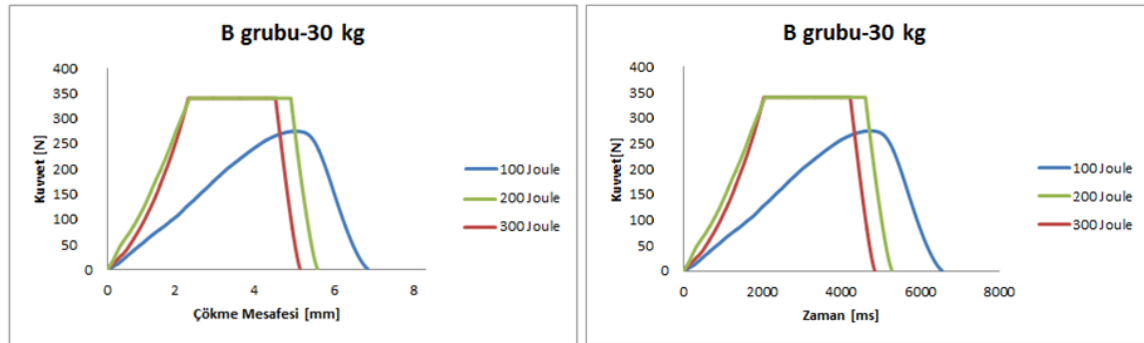
Şekil 8.11. B grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi(mm) ve kuvvet(N) –zaman(ms) eğrileri

Şekil 8.11’de verilen grafik incelendiğinde 15 kg darbe yükü altında 50 J’de meydana gelen çökme mesafesinin 100 ve 200 J’de meydana gelen çökme mesafesinden daha fazla olduğu görülmüştür.



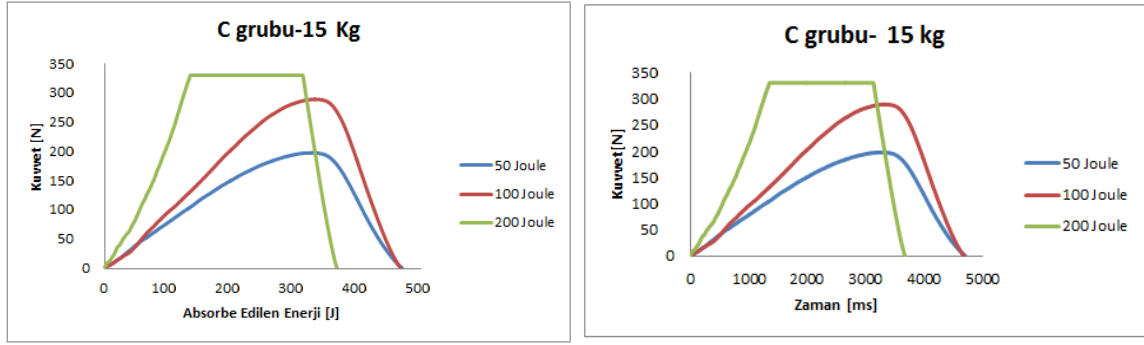
Şekil 8.12. B grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)-absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

30 kg darbe yükü altında B grubu numunelerinin değişen darbe enerjilerine göre Kuvvet (N) – Absorbe Edilen Enerji(J) eğrileri Şekil 8.12’de verilmiştir. 30 kg darbe yükü ve 100 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarı maksimumdur. 300 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarı en düşük seviyededir.



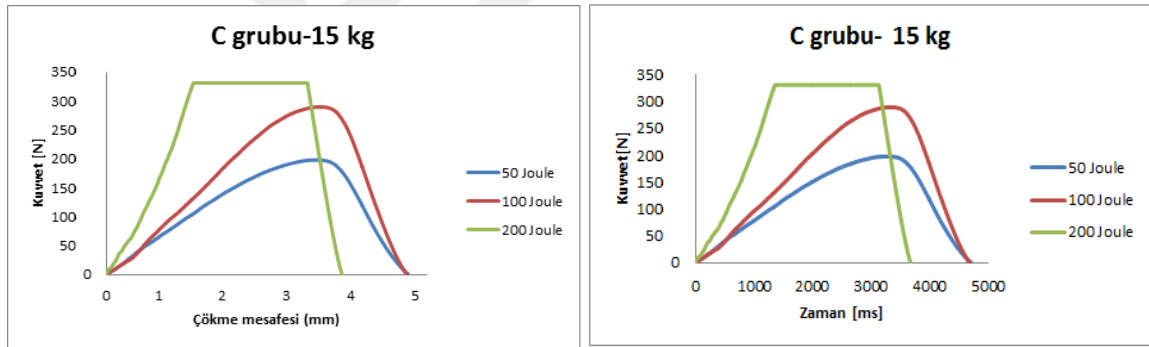
Şekil 8.13. B grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–çökme mesafesi(mm) eğrileri

Şekil 8.13’de verilen grafik incelendiğinde, 100 J darbe enerjisinde alüminyum köpükte çökme miktarı en fazla iken 300 J darbe enerjisinde çökme miktarının en düşük değerde olduğu saplanmıştır.



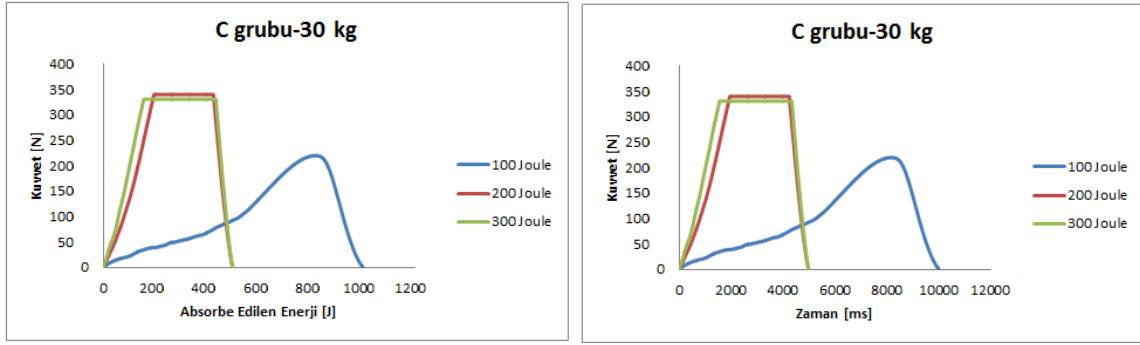
Şekil 8.14. C grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)–absorbe edilen enerji (J) eğrileri

Şekil 8.14’de verilen grafik incelendiğinde 50 ve 100 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarının eşit olduğu, 200 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerjinin düştüğü gözlemlenmiştir.



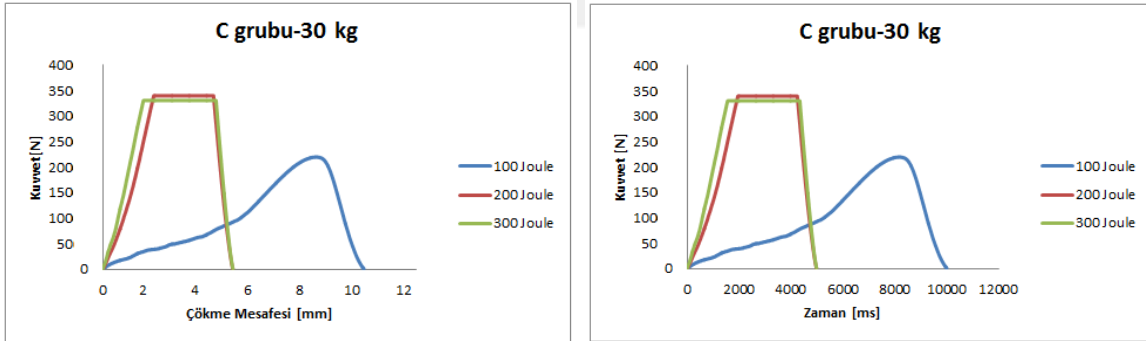
Şekil 8.15. C grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde kuvvet(N)-çökme mesafesi (mm) ,Kuvvet(N)-Zaman(ms) eğrileri

Şekil 8.15’de verilen C grubu numunelerinin 15 kg darbe yükünde gerçekleşen Kuvvet (N)-Çökme Mesafesi (mm) eğrileri incelendiğinde 200 J darbe enerjisinde alüminyum köpükte en düşük iken 50 ve 100 J darbe enerjilerinde çökme mesafesi artmıştır.



Şekil 8.16. C grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)–absorbe edilen enerji (J) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

Şekil 8.16’da verilen eğriler incelendiğinde 200 ve 300 J darbe enerjilerinde maksimum kuvvete ulaştıktan sonra numuneye etki eden kuvvette sabitlenme meydana geldikten sonra ani bir düşüş gözlemlenmiştir. 100 J darbe enerjisinde ise artan kuvvetle birlikte absorbe edilen enerji miktarı da artmış ve azalan kuvvet ile birlikte absorbe edilen enerji miktarında da bir düşüş gözlemlenmiştir. 100 J darbe enerjisinde absorbe edilen enerji miktarı maksimumdur.



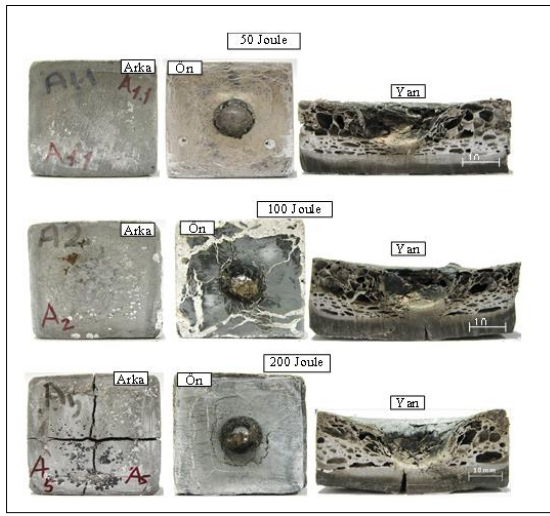
Şekil 8.17. C grubu numunelerinin 30 kg darbe yükünde kuvvet(N)-çökme mesafesi(mm) ve kuvvet(N)-zaman(ms) eğrileri

Şekil 8.17’de verilen eğriler incelendiğinde 200 ve 300 J darbe enerjilerinde çökme mesafesi ve darbe ucunun numuneye uyguladığı kuvvetin süresinin eşit olduğu gözlemlenmiştir. 100 J darbe enerjisinde ise darbe ucu numunenin köpük kısmına etki ettiği için çökme miktarı 200 ve 300 J darbe enerjisine göre daha yüksektir.

Farklı kademe kalınlıklarına sahip numunelerin Kuvvet(N)-Absorbe Edilen Enerji(J), Kuvvet(N)-Çökme mesafesi(mm) ve Kuvvet(N)-Zaman(ms) eğrileri genel olarak değerlendirildiğinde A grubu numunelerinde absorbe edilen enerji miktarı diğer numune

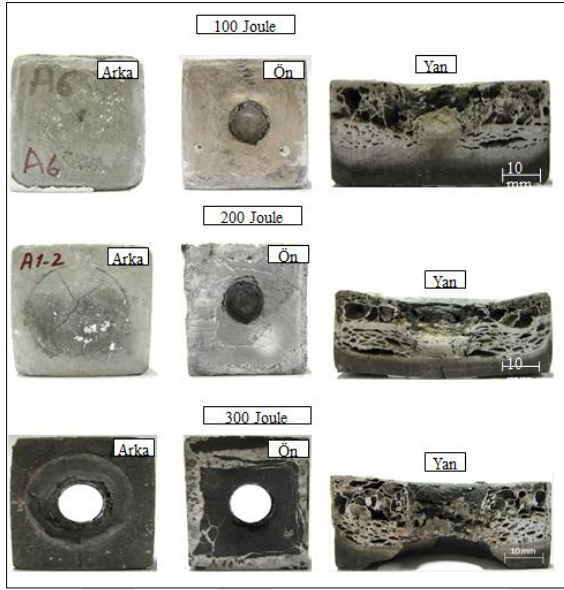
gruplarına göre daha düşüktür. Maksimum kuvvete ulaştıktan sonra absorbe edilen enerji miktarı en yüksek B grubu numunelerde gözlemlenmiştir.

Maksimum kuvvete ulaşınca meydana gelen çökme mesafeleri incelendiğinde ise C grubu numunelerinde çökme mesafesi diğer numune gruplarına göre daha düşükken, kademe kalınlığına göre en yüksek çökme mesafesi A grubu numunelerde gözlemlenmiştir. Böylece darbe esnasında kademe kalınlığı arttıkça çökme mesafesinin azaldığı söylenebilir.



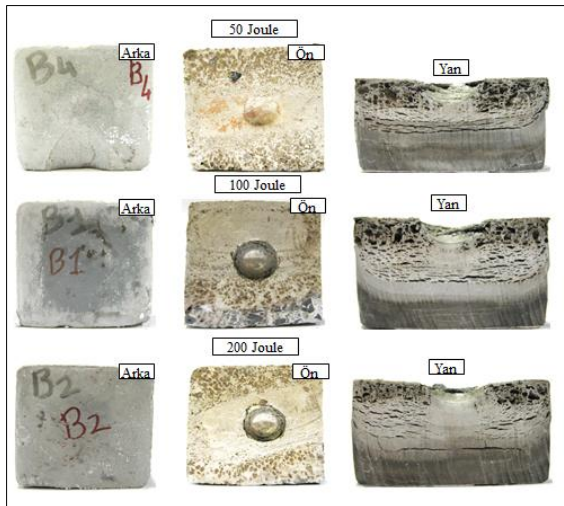
Resim 8.1. A grubunda 15 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar

Şekil 8.1'de darbe testi sonrası A grubu numunelerinin ön, arka ve yan yüzeylerinde meydana gelen değişiklikler verilmiştir. 50 ve 100 J darbe enerjisinde numunelerin ön yüzeyinde çökme meydana gelirken arka yüzeyinde herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. 200 J darbe enerjisinde ise numunenin ön yüzeyinde çökme, arka yüzeyinde çatlak meydana gelmiştir.



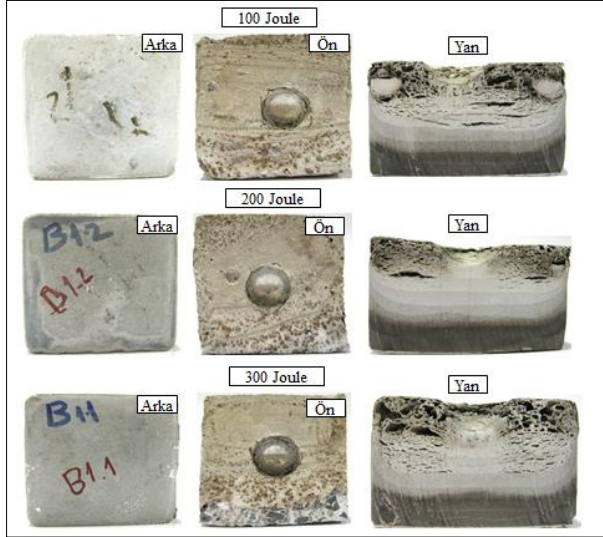
Resim 8.2. A grubunda 30 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar

Resim 8.2. incelendiğinde A grubu numunelere 30 kg'lık darbe testi uygulandığında 100 ve 200 J darbe enerjilerinde numunelerin köpük kademesinde çökme meydana gelmiştir. 100 J darbe enerjisinde numunenin köpük kademesinde çökme meydana gelmiş arka yüzeyinde ise herhangi bir deformasyona rastlanmamıştır. 200 joule darbe enerjisinde köpük kademesinde çökme arka yüzeyde ise çatlama meydana gelmiştir. 300 J darbe enerjisinde ise köpük kademesinde ve FDKM'de delinme meydana gelmiştir.



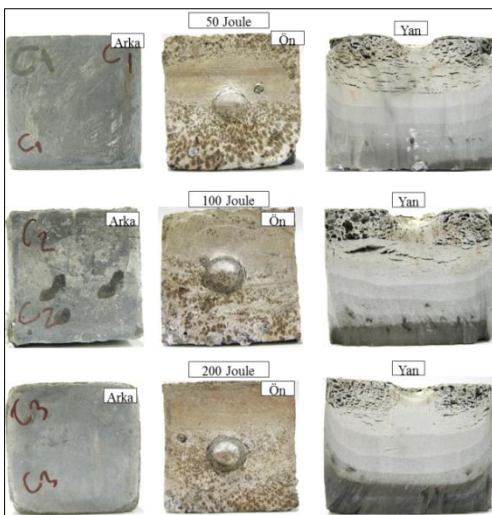
Resim 8.3. B grubunda 15 kg'lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar

Resim 8.3’de verilen görüntüler incelendiğinde kademe kalınlığı 4 mm olan numunelerde 50, 100, 200 J darbe enerjilerinde ön yüzeylerinde çökme meydana gelirken, arka yüzeylerinde herhangi bir deformasyona rastlanmamıştır.



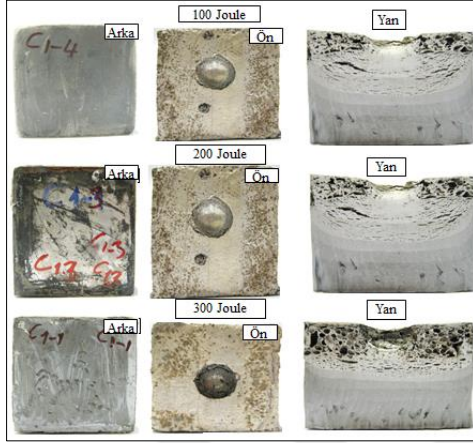
Resim 8.4. B grubunda 30 kg’lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar

Resim 8.4 incelendiğinde B grubu numunelerine 30 kg’lık darbe yüklü, 100, 200, 300 enerjili darbe testi uygulandığında numunelerin arka yüzeyinde deformasyon meydana gelmemiştir. Ön yüzeylerinde çökme meydana gelmiştir.



Resim 8.5. C grubunda 15 kg’lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar

Resim 8.5’de verilen görüntüler incelendiğinde, C grubu numunelere 15 kg’lık darbe yükü ve 50, 100, 200 joule darbe enerjisiyle yapılan darbe testi sonucunda numunelerin ön yüzeylerinde çökme meydana gelirken arka yüzeylerinde deformasyon gözlemlenmemiştir.



Resim 8.6. C grubunda 30 kg’lık darbe testinde meydana gelen deformasyonlar

100, 200, 300 ve 700 J darbe enerjisi ve 30 kg darbe yükü ile uygulanan darbe testi sonucunda C grubu numunelerin FDM kısımlarında deformasyon oluşmamıştır (Resim 8.6).

Darbe testleri sonucu numunelerde oluşan deformasyonlar genel olarak incelendiğinde kademe kalınlığına bağlı olarak en yüksek kademe kalınlığına sahip C grup numunelerinde farklı darbe enerjileri ve darbe yüklerinde gerçekleşen testler sonucunda defromasyonlar numunenin sadece köpük kısmında meydana gelmiştir. B grubu numunelerinde çökme numunelerin sadece köpük kısmında meydana gelmiştir. Kademe kalınlığı en düşük olan A grubu numunesinde ise 30 kg darbe yükü ve 300 J darbe enerjisinde numunenin hem köpük hem FDM kısmında deline meydana gelmiş ve 15 kg darbe yükü ve 200 J darbe enerjisinde köpük kısmında çökme FDM kısmında ise çatlak meydana gelmiştir. Sonuç olarak kademe kalınlığının artması FDKM’lerin darbe dayanımını arttırdığı söylenebilir.

8.2.3. Balistik test

MIL-DTL 46027 standardına uygun olarak yapılan balistik testlerde numunelere 3 adet delen ve 3 adet delmeyen olmak üzere yapılan 6 atışın ortalaması alınarak V50 hız limitleri belirlenmiştir. Balistik testlerde, A ve B grubundan 9 adet numunenin, C grubundan ise 8

adet numunenin arka kısmına Al levha konularak atışlar yapılmıştır. Çekirdeğin malzemeyi deldikten sonra Al levhayı delip delmeme durumuna göre değerlendirme yapılmıştır. Balistik atışlarda arka kısımda yer alan Al levhada iz meydana geldiğinde CP (Deldi) olarak adlandırılmaktadır. Al levhada iz meydana gelmemiş ise PP(Delmedi) olarak adlandırılır.

Çizelge 8.1. A grubu numunelere uygulanan balistik atış hızları

Numune Kodu	Ortalama Hız(m/sn)	Çarpma Hızı (m/sn)	Sonuç - PP (Delmedi) - CP (Deldi)
A1	459	457	CP
A2	455	452	CP
A3	461	458	CP
A4	450	449	CP
A5	429	427	PP
A6	428	426	PP
A7	435	433	CP
A8	433	431	CP
A9	416	414	CP

V 50 BL (Balistik limit) (m/sn)	425
Standarttaki V50 Balistik Limit (m/sn)	412

(Çizelge 8.1) incelendiğinde A grubu numunelere yapılan atışlarda 427 m/sn ve 426 m/sn hızlı atışlarda şahit plakalarda delinme meydana gelmemiştir. Yapılan atışlar sonucunda kademe kalınlığı 2 mm olan numunenin V50 balistik hız limiti 425 m/sn olarak belirlenmiştir.

Çizelge 8.2. B grubu numunelere uygulanan balistik atış hızları

Numune Kodu	Ortalama Hız (m/sn)	Çarpma Hızı (m/sn)	Sonuç - PP (Delmedi) - CP (Deldi)
B1	566	564	PP
B2	577	576	CP
B3	574	572	CP
B4	565	563	CP
B5	552	550	PP
B6	562	560	PP
B7	566	565	CP
B8	563	562	PP
B9	566	565	Geçersiz

V (50) BL(P) (Balistik limit) (m/sn)	564
Standarttaki V50 Balistik Limit (m/sn)	554

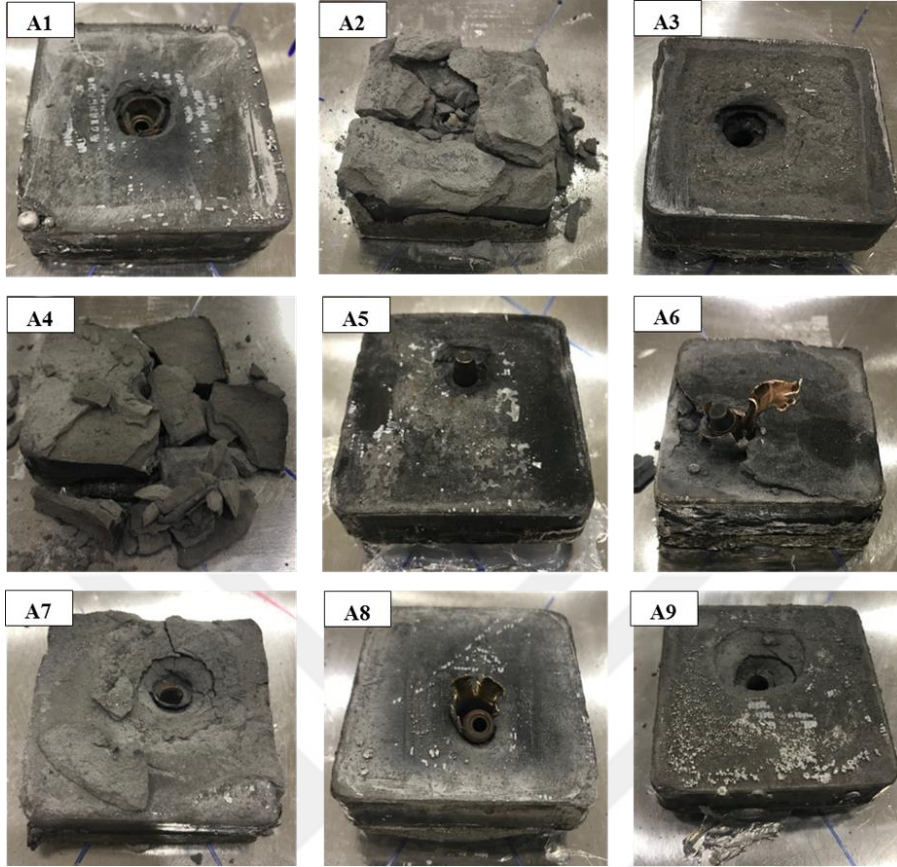
B grubu numunelere yapılan atışlarda 550 m/sn, 560m/sn, 562 m/sn ve 564 m/sn hızlı atışlarda şahit plakada delinme meydana gelmemiştir (Çizelge 8.2). B grubu numunelerin V50 balistik hız limiti 564 m/sn olarak kaydedilmiştir.

Çizelge 8.3. C grubu numunelere uygulanan balistik atış hızları

Numune Kodu	Ortalama Hız (m/sn)	Çarpma Hızı (m/sn)	Sonuç - PP (Delmedi) - CP (Deldi)
C1	566	564	PP
C2	723	720	Geçersiz
C2	728	726	CP
C3	721	719	PP
C4	704	701	PP
C5	722	720	PP
C6	714	711	PP
C7	730	727	CP
C8	719	718	CP
V (50) BL(P) (Balistik limit) (m/sn)		721	
Standarttaki V50 Balistik Limit (m/sn)		718	

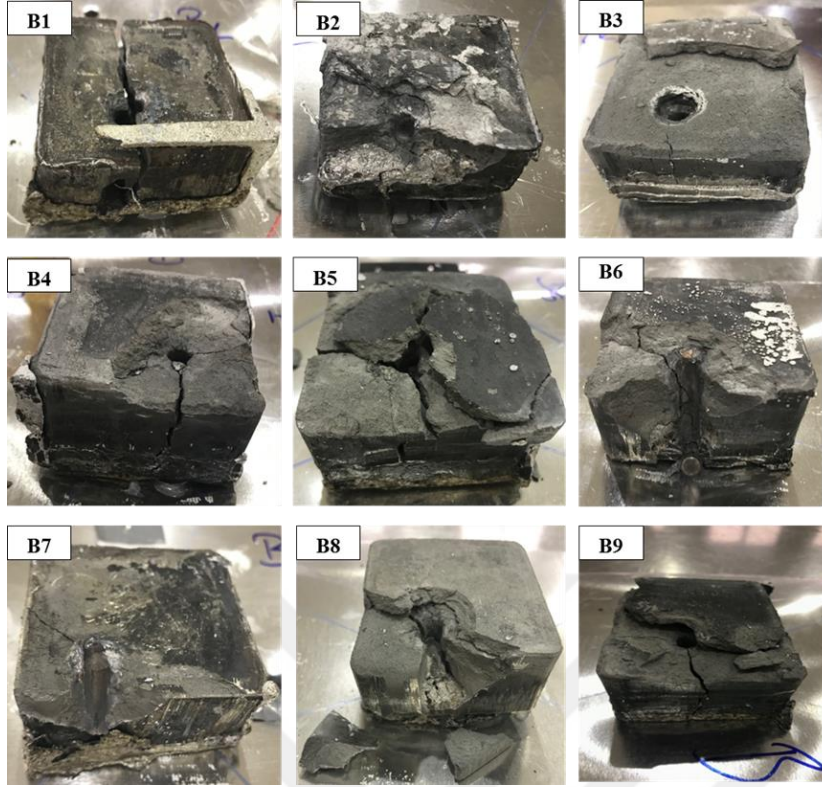
Çizelge 8.3’de C grubu numunelere yapılan balistik atış hızları verilmiştir. Yapılan atışlardan 726 m/sn,727 m/sn ve 718m/sn ‘de delinme meydana gelmiştir.Kademe kalınlığı 6 mm olan numunenin V50 hız limiti 721 m/sn olarak belirlenmiştir.

Farklı kademe kalınlıklarına sahip her numune grubunda MIL-DTL 46027 standardında verilen V50 hız limitlerinin üzerinde değerler elde edilmiştir.



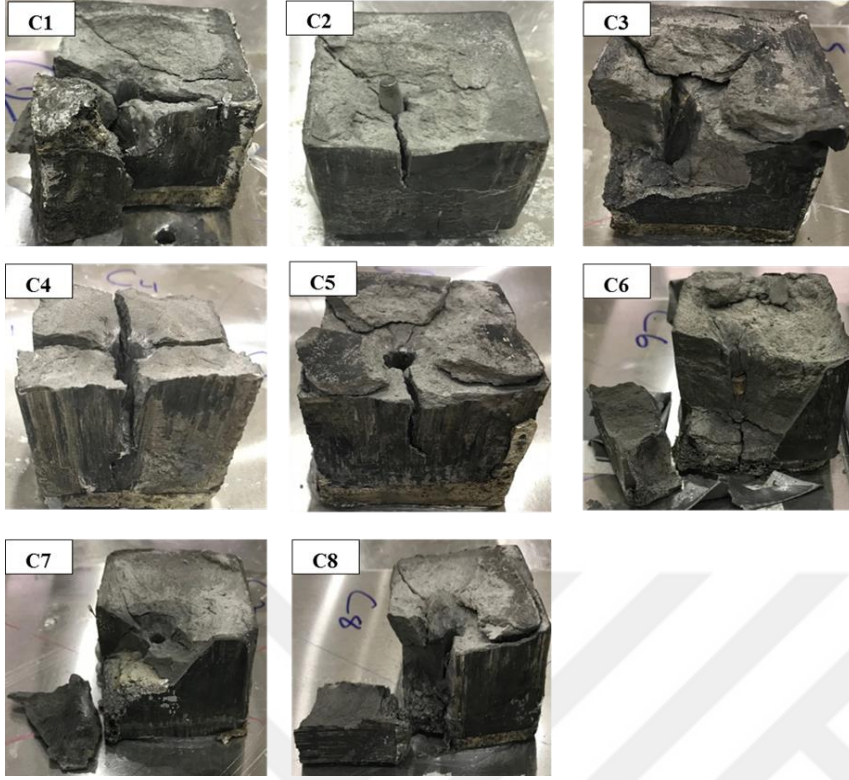
Resim 8.7. A grubu numunelerinin balistik test sonrası görüntüleri

Resim 8.7’de A grubu numunelerde balistik test sonrası oluşan deformasyonlar verilmiştir. 452m/sn hızda atış yapılan A2 numunesinde ve 449 m/sn hızda atış yapılan A4 numunesinde delinme ve parçalanma meydana gelmiştir. Sırasıyla 427 m/sn ve 426 m/sn hızlarında atış yapılan A5 ve A6 numuneleri ise gelen balistik darbeyi sönümlemiştir.



Resim 8.8. B grubu numunelerinin balistik test sonrası görüntüleri

(Resim 8.8) incelendiğinde B5 ve B9 numunelerinde çatlak meydana geldiği gözlemlenmiştir. Fakat sırasıyla 550 m/sn ve 565 m/sn hızlarında gelen balistik darbeyi sönümleyerek şahit plakada delinme meydana gelmemiştir. B5 ve B9 numunelerine göre daha yüksek hızlarda atış yapılan B1 ve B4 numelerinde balistik darbeye bağlı olarak çatlaklar gözlemlenmiştir.



Resim 8.9. C grubu numunelerinin balistik test sonrası görüntüleri

701 m/sn hızla atış yapılan C4 numunesinde ayrılma meydana gelmiş fakat şahit plakada delinme gözlemlenmemiştir (Resim 8.9). Sırasıyla 727 m/sn ve 718 m/sn hızlarda atış yapılan C7 ve C8 numunelerinde ayrılma meydana gelmiştir. 720 m/sn hızla atış yapılan C2 numunesi gelen balistik darbeyi sönümlemiştir.

Genel olarak kademe kademe kalınlığı ve partikül oranı en düşük olan A grubu numunelerinde V50 hız limitinin daha çok üstüne çıkmıştır. Kademe kalınlığı ve partikül oranı arttıkça balistik hız limitinin azaldığı söylenebilir.

MIL-DTL standardında yer alan AA5083 alaşımı soğuk deformasyonla üretildiği için V50 hız limiti, sertlik, darbe ve balistik dayanımı gibi mekanik özellikleri yüksektir. Bu çalışmada AA5083 alaşımı toz metalürjisi yöntemiyle üretildiği için mekanik özellikleri soğuk deformasyona göre daha düşük olabilir. Buna rağmen bu çalışmada üretilen AA5083 alaşımı içeren toz metal blok numuneler standardın üzerinde V50 hız limitlerine sahip oldukları gözlemlenmiştir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması sonucunda elde edilen çıktılar aşağıda verilmiştir;

1. Makro sertlik test sonuçlarına göre kademe kalınlığı arttıkça sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri A grubu numunenin 6. kademesinde 167 HB olarak elde edilmiştir.
2. XRD ile her numune grubu için gerçekleştirilen analizlerde, AA5083 oranının en fazla olduğu 1. kademelerde peak şiddeti en yüksektir. Al_2O_3 oranı arttıkça peak şiddetlerinde de azalma meydana gelmiştir. Genel olarak kademe kalınlığı arttıkça peak şiddetleri azalmıştır.
3. A, B ve C grubu numunelerinin düşük hızda darbe dayanımını belirlemek için yapılan testlerde 100,200 ve 300 joule darbe enerjisi kullanılmıştır. Bu darbe enerjilerinde A grubu numunelerde 300 joule darbe enerjisinde delinme meydana gelmiş olup, B ve C grubu numunelerinde delinme meydana gelmemiştir.
4. Yapılan testlerde her numune grubu için uygulanan darbe enerjisinin sadece köpük kısımlarında çökmeler meydana getirdiği ve kademeler arası herhangi bir ayrılamaya sebep olmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte B ve C grubu numunelerinin köpük kısmında A grubuna oranla daha az çökme meydana gelmiştir.
5. C grubu numunelerine uygulanan 700 joule darbe enerjisi sonucunda sadece köpük kısmında çökme meydana geldiği ve kademelerde delaminasyon oluşmadığı gözlemlenmiştir.
6. A,B ve C grubu numunelerinin balistik darbe dayanımını belirlemek için MIL-DTL 46027 standardına uygun olarak gerçekleştirilen testler sonucunda, A grubu numuneleri için standartta yer alan V50 hız limit 412 m/sn iken V50 limiti 425 m/sn olarak belirlenmiştir. B grubu için standarttaki V50 hız limiti 554 m/sn iken V50 hız limiti 564 m/sn ve C grubu için standartta yer alan V50 hız limiti 718 m/sn iken V50 hız limiti 721 m/sn olarak belirlenmiştir.

Yapılan tez çalışmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde öneriler aşağıda verilmiştir;

1. Kademeler arasında ki partikül (Al_2O_3) miktarının farkı azaltılabilir.

2. Farklı kombinasyonlarda Al matrisli Al_2O_3 takviyeli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit malzeme üretimi yapıp mekanik özellikleri ve mikro yapısı incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. Mondal, D. P., Das, S., Rao, R.,N., Singh, M. (2005). Effect of SiC addition and running-in-wear on the sliding wear behavior of Al–Zn–Mg aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 402,307–319.
2. Marchand, A., Duffy, J., Christman, T. A., Suresh, S. (1988). An experimental study of the dynamics mechanical properties of an Al–SiCw composite . *Engineering Fracture Mechanics*, 3, 295–315.
3. Skolionas, S. (1996). Mechanical behavior of cast SiCp-reinforced Al–4.5%Cu–1.5%Mg alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 210:76–82.
4. Surrapa, M. K., Sivakumar, P. (1993). Fracture-toughness evaluation of 2040-Al/Al₂O₃ particulate composites by instrumented impact. *Composites Science and Technology*, 46, 287–292.
5. Recep, E., Kemal, A. M., Yildırım, M. (2011). Indentation behavior of functionally graded Al–SiC metal matrix composites with random particle dispersion . *Composite Part B: Engineering*, 42,1497–1507.
6. Mahamood M. R., Esther T., Member, A., IAENG, S., Mukul, P. Sisa (2012). “Functionally Graded Material: An Overview”, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012*, 3 ,WCE.
7. Taheri, A. H., Hassani, B., Moghaddam, N.Z.(2014). Thermo-elastic optimization of material distribution of functionally graded structures by an isogeometrical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 51, 416–429.
8. Mortensen, A., Suresh, S. (1995). Functionally graded metals and metal–ceramic composites. Part 1: Processing . *International Materials Reviews*, 40, 239–265.
9. Rajan, T. P. D., Pillai, R.M. (2010). Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum–silicon carbide metal matrix composites. *Materials Characterization*, 61, 923–928.
10. Miao, D., Rabiei, A., (2014). Introduction of a new type of metal foam (Metallic bubble wrap). *Procedia Materials Science*, 4, 8–12.
11. Liu, X.R., Tian, X.G., Liang, B. (2014). Sandwich plates with functionally graded metallic foam cores subjected to air blast loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 84, 61–72.
12. Skolionas, S. (1996). Mechanical behavior of cast SiCp-reinforced Al–4.5%Cu–1.5%Mg alloy . *Materials Science and Engineering A*, 210,76–82.
13. Vleira, A. C., Sequeira, P. D., Gomes, J. R., Rocha, L. A. (2009). Dry sliding wear of Al alloy/SiCp functionally graded composites: Influence of processing conditions. *Wear*, 267, 585–592.

14. Übeyli, M., Balcı, E., Sarıkan, B., Öztaş, K., Camuşçu, N., Yıldırım, O., Keleş, Ö., (2014). The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy. *Materials and Design*, 56, 31-36.
15. Ramnath, B.J., Elanchezhian, C., Jaivignesh M., Rajesh S., Parswajinan C., Ghias, A., (2014). Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy–alumina–boron carbide metal matrix composites. *Materials and Design*, 58, 332-338.
16. Manes, A., Pagani, M., Saponara, M., Mombelli, D., Mapelli, C., Giglio, M. (2014). Metallographic characterisation of Al6061-T6 aluminium plates subjected to ballistic impact. *Materials Science and Engineering* , 608, 201-220.
17. Zhou, Z., Wu, G., Jiang, L., Li, R., Xu, Z. (2014), Analysis of morphology and microstructure of B4C/2024Al composites after 7.62 mm ballistic impact. *Materials and Design*, 63, 658-663.
18. Sudhakar, I., Madhusudhan, G., Ra, K.S. (2016). Ballistic behavior of boron carbide reinforced AA7075 aluminium alloy using friction stir processing – An experimental study and analytical approach. *Defence Technology*, 12, 25-31.
19. Huang, C., Y., Chen, Y., L. (2016). Effect of mechanical properties on the ballistic resistance capability of Al₂O₃-ZrO₂ functionally graded materials. *Ceramics International* , 42, 12946-12955.
20. Aydın, M., Apalak, M., K. (2016). Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact. *Materials Science and Engineering: A*, 671: 107-117.
21. Garcia-Avila, M., Portanova M., Rabiei, A. (2015). Ballistic performance of composite metal foams. *Composite Structures*, 125, 202-211.
22. Fujii, T., Tohgo, K., Iwao, M., Shimamura, Y. (2018). Fabrication of alumina-titanium composites by spark plasma sintering and their mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 759-768.
23. Arslan, K., Güneş, R. (2018). Experimental damage evaluation of honeycomb sandwich structures with Al/B₄C FGM face plates under high velocity impact loads. *Composite Structures*, 202, 304-312.
24. Kırmızı, G., Arık, H., Çinici, H. (2018). Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 345-357.
25. Chao, Z. L., Jiang, L.T., Chen, G.Q., Qiao, J., (2019). The microstructure and ballistic performance of B4C/AA2024 functionally graded composites with wide range B4C volume fraction. *Composite Part B: Engineering* , 161, 627-638.
26. Slover, G., (1957) *Gene Slover's US Navy Pages Naval Ordnance and Gunnery* Chapter XII.

27. Starke, Jr. E.A., Staley, J.T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*,32,131–172.
28. Loughlan, J., Thompson, S.P. ve Smith, H. (2002). Buckling control using embedded shape memory actuators and the utilisation of smart technology in future aerospace platforms. *Composite Structures*, 58,319–347.
29. Soutis, C. (2005). Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Materials Science and Engineering*, 412-171.
30. Huda, Z. ve Edi, P. (2013). Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: a review. *Materials and Design*, 46,552–560.
31. Vaidyaa, U.K., Pillay, S.B., Thattai, K. B. and Ning, H. (2012). Advanced Reinforced Thermoplastic Composites for Mass Transit and Heavy Truck Application. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 4(3), 0975-3060,92-95.
32. Özgültekin, S.E. (2012). *Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
33. Rojek, M., Stabik, J. (2013) .Composite materials with the polymeric matrix applied to ballistic shields. *Archives of Materials Science and Engineering*,63,25-26.
34. Heard,B. (2008). Handbook of Firearms and Ballistics: *Examining and Interpreting Forensic Evidence*. Second Edition, 101-143.
35. Frissen, R., Govaert, L., and Peijs, T. (1995). Modelling of the Ballistic Impact Behaviour of Polyethylene-Fibre Reinforced Composites. *Proceedings of ICCM-10, Canada*, 759-766.
36. Abrate, S. (Ed.). (2011). *Impact engineering of composite structures* .Springer Science & Business Media,526.
37. Richardson, M. O. W., & Wisheart, M. J. (1996). Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(12), 1123-1131
38. Cain, P. J. (1987). Instrumented impact testing of plastics and composite materials, ASTM STP 936. Philadelphia: American Society for Testing and Materials
39. Peijs, T., Smetts, E., and Govaert, L. (1994). Strain Rate and Temperature Effects on Energy Absorption of Polyethylene. and Carbon Fibres, *Advanced Composite Materials*,1(1),35-54.
40. Segal, C. (1991) .High-Performance Organic Fibers, Fabric, and Composites for Soft and Hard Armor Applications. *23rd International SAMPE Technical Conference*, 651-660.

41. Langlie, S. and Cheng, W. (1989). Numerical Simulation of High Velocity IMPact on Fibre-Reinforced Composites. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, USA, 51-64.
42. Zhu, G., Goldsmith, W., and Dharan, C. (1992) .Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles - I. Experimental Investigation. *Intemational Journal of Solid and Structures*, 29(4),399-420.
43. Banhart. J., Weaire. D. (2002).On the road again: metal foams find favor. *Physics Today* 55, 37-42.
44. Polat, B., Keleş, Ö., Taptık, Y. (2010).Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri. *Metal Dünyası* , İstanbul.
45. Yu .C.J. and T. Prucher. (1993) .Measuring Young's Modulus and Shear Modulus - A Comparison of Dynamic and Mechanical Techniques. *Proceedings of the Powder Metallurgy & Particulate Materials Conference*, 1, 273-286.
46. Banhart, J. (1993) . *VDI-Berichte 1021*, 277, Almanya.
47. Banhart, J., Baumeister, J., and Weber.M. (1996). Damping Properties of Aluminum Foams, *Materials Science and Engineering*. A205,221-228.
48. Yavuz, İ., Başpınar, M., Bayrakçeçen, H. (2011). Ergitme Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Köpüklerde Değişik Oranlarda SiC ve Al₂O₃ İlavesinin Köpürme Üzerindeki Etkisi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey.
49. Yang C.C., Nakae H. (2000).Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam. *Journal of Alloys and Compounds*, 313,188–191.
50. Banhart, J. (2001), Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, *Progress in Materials Science*, 46, 559-632.
51. Çinici, H. (2004). *Toz Metalurjisi Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 76.
52. Güven, Ş.,Y. (2011). Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler. *Sdu Teknik Bilimler Dergisi*, 2,22-28.
53. Stöbener K., Baumaster J., Lehmhus D., Stanzick H., Zöllner V. (2003).Composite based on Metallic foams: Phenomenology; Production;Properties and Principles. *Int. Conf. On Advanced Metallic materials*, Smolenice, Slovakia.
54. Yavuz, İ., Başpınar, S., M., Bayrakçeken, H. (2009) .Metalik Köpük Malzemelerin Taşıtlarda Kullanımı. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED)*, 3 , 43- 51.
55. *Türk Toz Metalurjisi Derneği, Haber Bülteni*, Aralık 2008, Sayı: 34.

56. Nakajima, H. (2007). Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores. *Prog. Mater. Sci.*, 52,1091–1173.
57. Oluklu, E. (2015). *Seramik Katkılı Alüminyum Esaslı Köpük Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi , Eskişehir Osmangazi Üniversitesi .
58. Banhart, J. (2003). Aluminium Foams for Lighter Vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37, 1-19.





ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ARDIÇOĞLU, Hande
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.02.1994, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0(507) 267 05 23
 e-mail : hndbrcn@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Çankaya Üniversitesi /Malzeme Bilimi ve Mühendisliği	2016
Lise	Peyami Safa Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-2020	Gazi Üniversitesi-FNSS	SAYP projesinde araştırmacı
2017- 2017	Gazi Üniversitesi	TUBİTAK projesinde bursiyer

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Gökmen, U., Kırmızı, G., Bircan, H., Çinici H., (2017). AZ91 Matrisli TiB₂ Takviyeli Kompozitlerin Yaşlandırma Davranışı ve Karakterizasyonu. *2. uluslararası Savunma Sanayisi Sempozyumu Bildiri Kitabı*,(262-271).

2. Ardıçoğlu, H., Çinici, H. (2019). Fonsiyonel Olarak Derecelendirilmiş $Al_2O_3/AA5083$ ve AA5083 Köpük Yapıdan Oluşan Malzemelerin Değişen Kademe Kalınlıklarına Göre Mikro Yapısal Karakterizasyonu. *VI. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu Özet Kitabı* , (121).

Hobiler

Tenis oynamak, müzik dinlemek.





GAZİ GELECEKTİR..