

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AA2024/B₄C FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT
MALZEMELERİN BALİSTİK VE RADYASYON ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Abdullah Hasan KARABACAK

TEMMUZ 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA2024/B₄C FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT
MALZEMELERİN BALİSTİK VE RADYASYON ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Abdullah Hasan KARABACAK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18.06.2025

Tezin Savunma Tarihi : 16.07.2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“AA2024/B4C Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzemelerin Balistik ve Radyasyon Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu doktora çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda hazırlanmıştır.

Tez süresince bilgi, yönlendirme ve değerli deneyimlerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI’ya en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca yapıcı eleştirileri ve önerileriyle çalışmamı zenginleştiren Dr. Öğr. Üyesi Serdar ÖZKAYA’ya eğitim hayatım boyunca destek olan tüm hocalarıma ve ortak projelerde birlikte çalıştığım Arş. Gör. Sedat Alperen TUNÇ’a ve Arş. Gör. Müslim ÇELEBİ’ye teşekkür ederim.

Başarılarımda her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğiyle beni cesaretlendiren sevgili annem Nebiye KARABACAK’a ve babam Metin KARABACAK’a minnettarım. Son olarak, bu süreci sevgi, sabır ve anlayışla paylaşan değerli eşim Gülcan KARABACAK’a içten teşekkürlerimi iletir, bu çalışmanın akademik camiaya katkı sağlamasını dilerim.

Abdullah Hasan KARABACAK

Trabzon, 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “AA2024/B₄C Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzemelerin Balistik ve Radyasyon Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdığımı, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16.07.2025

Abdullah Hasan KARABACAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Zırh Sistemleri.....	4
1.2. Zırh Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi	4
1.3. Zırh Sistemlerinin Temel Sınıflandırması	5
1.4. Zırh Sistemlerinde Malzeme Seçimi	8
1.4.1. Çelik Esaslı Zırhlar	8
1.4.2. Alüminyum Esaslı Zırhlar.....	10
1.4.3. Kompozit Zırhlar.....	11
1.4.4. Seramik Zırhlar	12
1.5. Radyasyon Zırhlama Teknolojileri.....	13
1.5.1. Radyasyon Türleri ve Özellikleri	14
1.5.2. Radyasyon Soğurma Mekanizmaları	17
1.6. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	17
1.6.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri	18
1.6.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri	20
1.7. Fonksiyonel Dereceli Malzemeler (FDM)	22
1.7.1. FDM’lerin Kullanım Alanları	25
1.7.2. FDM’lerin Üretim Yöntemleri.....	26
1.8. Toz Metalurjisi	30
1.8.1. Toz Üretim Teknikleri	32
1.8.2. Toz Karışımı ve Mekanik Alaşımlama	33
1.8.3. Tozların Sıkıştırılması.....	36

1.8.4. Sinterleme	37
1.9. Literatürdeki İlgili Çalışmaların İncelenmesi.....	38
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	45
2.1. Kullanılan Malzemeler	46
2.2. Mekanik Öğütme İşlemi	47
2.3. Sıcak Presleme İşlemi	49
2.4. Karakterizasyon İşlemleri	52
2.4.1. Toz Boyut Ölçümü.....	52
2.4.2. XRD Analizi	52
2.4.3. Metalografik İşlemler.....	53
2.4.4. Mikroskobik İncelemeler	54
2.4.5. Yoğunluk Ölçümü.....	55
2.4.6. Termogravimetrik Analizler	55
2.4.7. Mekanik Deneyler	56
2.4.8. Serbest Düşme Deneyi	57
2.4.9. Balistik Deney	59
2.4.10. Radyasyon Absorplama Deneyi.....	61
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	64
3.1. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Mikroyapısal ve Fiziksel Özellikleri	64
3.1.1. AA2024/B ₄ C Kompozit Tozların Mikroyapısal ve Toz Boyutu Analizleri.....	64
3.1.2. AA2024/B ₄ C Kompozit Tozların Görünür Yoğunluk Analizleri	69
3.1.3. AA2024/B ₄ C Kompozit Tozların Termogravimetrik Analizler	70
3.1.4. AA2024/B ₄ C Kompozitlerin XRD Analizleri	72
3.1.5. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Yoğunluk Analizleri.....	74
3.1.6. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Mikroyapısal Analizleri.....	77
3.2. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Mekanik, Darbe ve Balistik Analizleri.....	87
3.2.1. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Sertlik Analizleri	87
3.2.2. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Çekme Mukavemeti Analizleri	90
3.2.3. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Darbe Mukavemeti (Serbest Ağırlık Düşme) Analizleri	99
3.2.4. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Balistik Analizleri	112
3.3. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Radyasyon Absorblama Testleri.....	115
3.3.1. AA2024/B ₄ C FDM'lerin Doğrusal ve Kütle Zayıflatma Katsayıları	115

3.3.2. AA2024/B4C FDM’lerin Yarı ve Ondalık Değer Katsayıları.....	120
3.3.3. AA2024/B4C FDM’lerin Ortalama Serbest Yol ve Radyasyon Koruma Verimliliği.....	126
3.4. Optimizasyon Çalışmaları Sonrası Üretilen Fonksiyonel Dereceli Kompozitler.....	134
4. SONUÇLAR.....	138
5. ÖNERİLER.....	140
6. KAYNAKLAR	141
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

AA2024/B₄C FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMELERİN BALİSTİK VE RADYASYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdullah Hasan KARABACAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2025, 152

Fonksiyonel amaçlı zırh malzemeler, katmanlar arası malzeme bileşimi ve mikro yapıyı kademeli olarak değiştirerek hem darbe enerjisini etkin biçimde soğurmayı hem de yapısal bütünlüğü korumayı hedefleyen ileri mühendislik ürünü kompozit sistemlerdir. Bu çalışmada, AA2024/B₄C (ağ. % 0-40) kompozit tozları hem tek katmanlı hem de fonksiyonel dereceli (iki, üç ve dört katmanlı) şekilde toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Yüksek enerjili bilyalı öğütme, 500 MPa basınçta ve 560 °C’de sıcak pres ile sinterleme adımları uygulanan numuneler, morfoloji, faz bileşimi, termal kararlılık, yoğunluk, çekme dayanımı, sertlik, serbest düşme darbe mukavemeti ve gama ışını zayıflatma performansı açısından kapsamlı şekilde karakterize edilmiştir. Analiz sonuçları, orta düzey B₄C içeren üç katmanlı L3_{5/10/20} kompozitin yaklaşık 360 MPa çekme dayanımı ve 90.6 kN darbe mukavemeti ile en dengeli mekanik performansı sunduğunu ortaya koymuştur. Tek katmanlı kompozitlerde ise %10 B₄C takviyesi hem mekanik hem de radyasyon soğurma açısından verimli bir alternatif olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA2024, B₄C, Fonksiyonel Dereceli Malzeme, Zırh Malzeme, Radyasyon Kalkanlama

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF BALLISTIC AND RADIATION PROPERTIES OF AA2024/B₄C FUNCTIONALLY GRADED COMPOSITE MATERIALS

Abdullah Hasan KARABACAK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Material Engineering Program
Supervisor: Prof. Aykut ÇANAKÇI
2025, 152

Functional armor materials are highly engineered composite systems that aim to both effectively absorb impact energy and maintain structural integrity by gradually changing the interlayer material composition and microstructure. In this study, AA2024/B₄C (wt. 0-40%) composite powders were produced by powder metallurgy in both single layer and functional graded (two, three and four layers). The samples, which underwent high-energy ball milling, hot press sintering at 500 MPa pressure and 560 °C, were extensively characterized in terms of morphology, phase composition, thermal stability, density, tensile strength, hardness, free-fall impact strength and gamma ray attenuation performance. The analysis results revealed that the three-layer L3_{5/10/20} composite with moderate B₄C content offered the most balanced mechanical performance with a tensile strength of approximately 360 MPa and impact strength of 90.6 kN. In single layer composites, 10% B₄C reinforcement was found to be an efficient alternative in terms of both mechanical and radiation absorption.

Key Words: AA2024, B₄C, Functional Grade Material, Armor Material, Radiation Shielding

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Bireysel zırh sistemine örnek vücut zırh sistemi	6
Şekil 1.2. Araç zırh sistemine örnek bir tankın savunma sistemi	7
Şekil 1.3. Çelik esaslı zırh sistemi	9
Şekil 1.4. Alüminyum esaslı zırh sistemi	11
Şekil 1.5. Kompozit esaslı zırh sistemi	12
Şekil 1.6. Seramik esaslı zırh sistemi	13
Şekil 1.7. Radyasyon zırhlamasının temel ilkeleri	14
Şekil 1.8. Radyasyon türleri, penetrasyonları ve özellikleri	15
Şekil 1.9. Nötron yakalama reaksiyonunun şematik görüntüsü	15
Şekil 1.10. Madde çifti üretimi ile gama ışını etkileşiminin şematik gösterimi	16
Şekil 1.11. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	18
Şekil 1.12. Matris bazında MMK türleri	19
Şekil 1.13. Çeşitli elementlerin metal matris olarak kullanımı	20
Şekil 1.14. Takviye formlarına göre metal matrisli kompozit kategorileri	21
Şekil 1.15. Bor karbürün kristal yapısı	22
Şekil 1.16. Farklı gradyan biçimlerine sahip işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemeler (a, d) kompozisyon gradyanı, (b, e) gradyan yönlendirme ve (c, f) fraksiyon gradyanı	23
Şekil 1.17. Fonksiyonel dereceli malzemelerde oluşturulabilecek yapısal değişim türlerinin şematik bir temsili	25
Şekil 1.18. FDM'lerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması	26
Şekil 1.19. FDM üretimi için yaygın olarak kullanılan teknikler.....	28
Şekil 1.20. FDM üretimi için yaygın olarak kullanılan teknikle	29
Şekil 1.21. Toz metalurjisi yönteminin üretim sürecine ait akış şeması	32
Şekil 1.22. Çeşitli bilyalı değirmen tiplerinin şematik gösterimi	33
Şekil 1.23. Gezegen tipi bilyalı değirmenin şematik görüntüsü	34
Şekil 1.24. Tozların sıkıştırılma aşamalarının gösterilmesi	36
Şekil 1.25. Sinterleme işleminin aşamalarını gösteren şematik görüntü	37
Şekil 2.1. Çalışmada yapılacak deneylerin genel iş akış şeması	46
Şekil 2.2. Başlangıç tozlarının morfolojik görüntüleri ve toz boyut analizleri	47
Şekil 2.3. Mekanik öğütme işlemi için kullanılan gezegen tipi bilyalı değirmen	48

Şekil 2.4. AA2024/B ₄ C kompozit FDM'lerin üretildiği sıcak pres cihazı.....	50
Şekil 2.5. Fonksiyonel kompozit yapı üretimi için işlem adımları.....	51
Şekil 2.6. Parçacık boyut ölçüm cihazı	52
Şekil 2.7. XRD Cihazı.....	53
Şekil 2.8. Metalografik işlemlerde kullanılan cihazlar (a) kesme ve (b) otomatik zımparalama/parlatma.....	54
Şekil 2.9. Mikroskopik incelemeler için kullanılan SEM/EDS cihazı	55
Şekil 2.10. Termo gravimetrik analiz cihazı	56
Şekil 2.11. Mekanik deneyler için kullanılan cihazlar; (a) sertlik ve (b) çekme cihazları.....	57
Şekil 2.12. Çekme test numunelerinin boyutlarının şematik görüntüsü.....	57
Şekil 2.13. Serbest ağırlık düşürme deneyi	58
Şekil 2.14. Serbest ağırlık düşürme deney düzeneğinin şematik görünümü	59
Şekil 2.15. Balistik atış testlerinde kullanılan milli üretim KCR556 piyade tüfeği	60
Şekil 2.16. Balistik atış deney düzeneği şematik görünümü	60
Şekil 2.17. Balistik atış testlerinde numunenin yerleştirilmesi (a) ve atış anı (b)	60
Şekil 2.18. Gama soğurma spektrometresi	61
Şekil 2.19. Gama radyasyon kalkanı testinin şematik gösterimi.....	63
Şekil 3.1. Kompozit tozların SEM görüntüleri.....	66
Şekil 3.2. Kompozit tozların toz boyut grafikleri.....	67
Şekil 3.3. AA2024/B ₄ C kompozit tozlarının görünür yoğunluk grafiği	70
Şekil 3.4. AA2024/B ₄ C kompozit tozlarının TGA analiz grafiği	72
Şekil 3.5. AA2024/B ₄ C kompozit bulk numunelerin XRD analiz grafiği	74
Şekil 3.6. FDM numunelerin teorik, deneysel ve bağlı yoğunluk değerlerini gösteren grafikler.....	76
Şekil 3.7. AA2024/B ₄ C kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	78
Şekil 3.7. FDM iki katmanlı kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri	79
Şekil 3.8. FDM üç katmanlı kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	80
Şekil 3.9. FDM dört katmanlı kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri	81
Şekil 3.11. AA2024/B ₄ C kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri	84
Şekil 3.12. FDM iki katmanlı kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri.....	85
Şekil 3.13. FDM üç katmanlı kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri.....	86
Şekil 3.14. FDM dört katmanlı kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri.....	87

Şekil 3.15. FDM kompozit numunelerin sertlik değerlerini gösteren grafikler	89
Şekil 3.16. Tek katmanlı AA2024/B4C kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri	92
Şekil 3.17. İki katmanlı FDM kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri.....	92
Şekil 3.18. Üç katmanlı FDM kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri	93
Şekil 3.19. Dört katmanlı FDM kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri.....	93
Şekil 3.20. Tek katmanlı AA2024/B4C kompozitlerin kırılma yüzeyleri	96
Şekil 3.21. İki katmanlı FDM kompozitlerin kırılma yüzeyleri	97
Şekil 3.22. Üç katmanlı FDM kompozitlerin kırılma yüzeyleri.....	98
Şekil 3.23. Dört katmanlı FDM kompozitlerin kırılma yüzeyleri	99
Şekil 3.24. FDM numunelerin 50cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	101
Şekil 3.25. FDM numunelerin 100cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	104
Şekil 3.26. FDM numunelerin 150cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	107
Şekil 3.27. Tek katman kompozitlerden serbest ağırlık düşürme deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler	110
Şekil 3.28. FDM kompozitlerden serbest ağırlık düşürme deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler.....	111
Şekil 3.29. Tek katman kompozitlerden balistik atış deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler.....	113
Şekil 3.30. FDM kompozitlerden balistik atış deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler	114
Şekil 3.31. Gama radyasyon kalkanı testinden sonra numunelerin LAC grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	117
Şekil 3.32. Gama radyasyon kalkanı testinden sonra numunelerin MAC grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	119
Şekil 3.33. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin HVL grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	122
Şekil 3.34. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin TVL grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	125
Şekil 3.35. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin MFP grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	128
Şekil 3.36. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin RPE grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi.....	132
Şekil 3.37. Optimizasyon çalışmaları sonrası üretilen 3 ve 4 katmanlı fonksiyonel kompozit numunelerin sertlik değerleri.....	137

Şekil 3.38 Optimizasyon çalışmaları sonrası üretilen 3 ve 4 katmanlı fonksiyonel kompozit numunelerin balitik testleri sonrası numunelerde oluşan deformasyonlar	137
--	-----



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. AA2024 matris alaşımının (%) kimyasal bileşimi	47
Tablo 2.2. Mekanik öğütme işlemi sonrası üretilen kompozit tozların kodları, takviye oranları ve mekanik öğütme parametreleri	49
Tablo 2.3. Üretilen FDM numunelerin kodları, katman sayıları ve takviye oranları	51
Tablo 2.4. Radyasyon kalkanı verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemleri	62
Tablo 3.1. Serbest ağırlık düşürme testi sonrası bazı numunelerden elde edilen veriler	111
Tablo 3.2. Balistik atış testleri sonrası numunelerin mermi giriş ve çıkış alan verileri	114

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
Al	: Alüminyum
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
XRD	: X-ışınları difraktometresi
d ₅₀	: Ortalama toz boyutu
HB	: Brinell sertlik
µm	: Mikrometre
MPa	: Mega paskal
B ₄ C	: Bor karbür
γ	: Gama
WC	: Tungsten karbür
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: X-ışını spektroskopisi
HF	: Hidroflorik asit
HCl	: Hidroklorik asit
HNO ₃	: Nitrik asit
TGA	: Termogravimetrik analiz

1. GENEL BİLGİLER

Geleneksel zırh malzemeleri, esas olarak yüksek sertlikli çelik alaşımlarından ve bazen nispeten basit seramik plakalar ile desteklenmiş tuğla veya beton kompozitlerinden oluşur. Bu malzemeler, yüksek mukavemet ve tokluğa odaklanarak doğrudan kinetik enerjiyi soğurmayı amaçlar fakat genellikle yüksek ağırlık ve kalınlık gereksinimi ile sınırlıdır. Basit üretim süreçleri ve düşük maliyetleri sayesinde uzun yıllar savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılmış, ancak artan mobilite ve performans talepleri doğrultusunda daha hafif ve fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Günümüzde savunma, güvenlik ve endüstriyel alanlarda kullanılan zırh sistemleri; balistik tehditler, radyasyon etkileri ve çevresel zorlamalar gibi çok yönlü risklere karşı yüksek performanslı koruma sağlamayı amaçlamaktadır. Bu sistemler, yalnızca geleneksel malzemelerle değil; aynı zamanda gelişmiş kompozit yapılar, fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM) ve modern üretim yöntemleri ile desteklenerek daha hafif, daha dayanıklı ve çok işlevli hale getirilmektedir. Zırh teknolojilerindeki bu evrim, kullanılan malzemelerin özellikleri ile üretim süreçlerinin entegre edilmesini ve sistem düzeyinde optimizasyonu gerekli kılmaktadır.

Zırh sistemleri temel olarak üç kategori altında sınıflandırılabilir: kişisel koruyucu zırhlar, araç zırhları ve yapısal zırhlar. Kişisel zırhlar; balistik yelek, kask gibi bireysel ekipmanlardan oluşur ve özellikle düşük kalibreli mühimmatlara karşı koruma sağlar. Hafiflik ve esneklik bu tür sistemlerde öne çıkan özelliklerdir. Seramik-polimer hibrit yapılar, darbe enerjisinin absorbe edilmesinde ve dağıtılmasında kritik rol oynar. Araç zırhları ise zırhlı personel taşıyıcılar, tanklar ve zırhlı keşif araçlarında kullanılır. Yüksek sertlikte çelik, ısıl işlem görmüş alüminyum ve modern kompozit malzemeler bu sistemlerde tercih edilir. Yapısal zırhlar ise stratejik tesislerin, nükleer altyapıların ya da özel binaların korunmasında kullanılır. Burada ağırlık bir sınırlama oluşturmadığından yüksek hacimli koruyucu sistemler uygulanabilir.

Zırh sistemlerinde malzeme seçimi, yalnızca mekanik özelliklere değil; aynı zamanda çevresel dayanım, üretilebilirlik, maliyet ve ağırlık gibi faktörlere de bağlıdır. Geleneksel çelik zırhlar yüksek mukavemet ve süneklik sunmasına karşın, yoğunlukları nedeniyle modern uygulamalarda sınırlı kalabilmektedir. Bu nedenle özellikle hareket kabiliyeti

gereken sistemlerde 2xxx, 5xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik gibi özellikleriyle dikkat çeker. 2xxx serisi (Al-Cu) alaşımlar, yüksek dayanım ihtiyaçlarında taşıyıcı alt yapılarda tercih edilirken; 5xxx (Al-Mg) ve 7xxx (Al-Zn-Mg) serileri farklı çevresel koşullara uygun performans sunar.

Gelişen tehdit senaryoları, yalnızca mekanik dayanım değil; radyasyon sönümlene gibi çok yönlü koruma ihtiyaçlarını da beraberinde getirmiştir. Radyasyon zırhlaması; nükleer enerji santralleri, uzay sistemleri, tıbbi görüntüleme cihazları ve askeri uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Gama ışınları, nötronlar ve X-ışınları gibi yüksek enerjili radyasyonlara karşı koruma sağlamak amacıyla kurşun, tungsten, bor ve barit gibi geleneksel malzemeler kullanılmaktadır. Ancak bu malzemeler genellikle ağır ve işlenmesi zor olduğu için, günümüzde polimer matrisli ve metal matrisli kompozit sistemlere yönelim artmıştır.

Bu bağlamda fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM), çok işlevli ve entegre koruma sağlayan yeni nesil çözümler sunmaktadır. FDM'ler, bir malzemenin bileşiminde, mikroyapısında veya takviye oranında kontrollü bir şekilde kademeli değişim gösteren yapılardır. Özellikle farklı termal genleşme katsayısına sahip seramik-metal çiftlerinde, geçiş bölgelerinin yumuşatılması sayesinde iç gerilmeler azaltılır ve yapısal bütünlük korunur. Bu tür malzemeler sayesinde aynı yapı içerisinde hem darbe direnci hem de radyasyon sönümlene gibi çoklu fonksiyonlar elde edilebilmektedir. FDM'ler uzay araçlarının termal kalkanlarında, nükleer reaktörlerde ve gelişmiş savunma platformlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

FDM yapılarının üretiminde en etkili yöntemlerden biri toz metalurjisidir. Toz metalurjisi, metalik veya seramik tozların belirli bir süreç boyunca preslenip sinterlenerek katı hâle getirilmesini esas alır. Bu yöntem, konvansiyonel döküm veya talaşlı imalat yöntemlerinin sağlayamadığı ölçüde mikro yapısal kontrol ve geometrik esneklik sağlar. Toz metalurjisinde katmanlı yapılar kolayca üretilebildiğinden, gradyanlı (kademeli) FDM sistemlerin tasarlanması ve üretimi oldukça verimli şekilde gerçekleştirilebilir. Bu yöntemin net şekle yakın üretim (near-net-shape) özelliği, fire oranını azaltırken üretim verimliliğini artırır. Ayrıca porozite kontrolü sayesinde, istenen yoğunluk ve işlevsellik sağlanabilir.

Toz metalurjisi süreci; toz üretimi, karıştırma ve mekanik öğütme, presleme ve sinterleme gibi aşamalardan oluşur. Toz üretiminde kullanılan gaz atomizasyonu, su atomizasyonu, kimyasal indirgeme ve mekanik öğütme gibi yöntemler, tozun morfolojisini

ve fiziksel özelliklerini belirler. Karıştırma ve mekanik öğütme adımları ise özellikle metal matrisli kompozitlerde homojen dağılım ve yeni faz oluşumu açısından kritik rol oynar. Mekanik öğütme işlemi sırasında yüksek enerjili çarpışmalar sayesinde soğuk kaynaklama, tane küçülmesi ve amorf faz oluşumu gibi yapısal dönüşümler meydana gelir.

Tozların şekillendirilmesi presleme yoluyla gerçekleştirilir. Soğuk izostatik presleme (CIP) ya da sıcak presleme gibi yöntemlerle tozlar kompakt hâle getirilir. Sıcak presleme, özellikle düşük sinterlenebilirliğe sahip tozlar için tercih edilirken, sinterleme aşaması tozlar arasında difüzyon ile boyun oluşumu, gözenek kapatma ve mikroyapı bütünleşmesi sağlar. Yeni nesil sinterleme teknolojileri olan mikrodalga sinterleme ve Spark Plasma Sintering (SPS), daha kısa sürede, düşük sıcaklıkta ve kontrollü yapı gelişimi ile yüksek performanslı ürünlerin üretimini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojiler, nano yapılı MMK ve FDM yapıların üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Özellikle zırh sistemlerinde kullanılan metal matrisli kompozitler (MMK), toz metalurjisiyle üretilen ve hem balistik hem de çevresel koşullara dayanım sağlayan gelişmiş mühendislik malzemeleridir. Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif metallerin matris olarak kullanıldığı bu sistemlerde; bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al_2O_3) gibi seramik partiküller takviye olarak entegre edilir. Özellikle B_4C hem balistik performans hem de nötron soğurma kapasitesi nedeniyle zırh uygulamalarında öne çıkan bir seramik fazdır.

Sonuç olarak, zırh sistemlerinin tasarımı artık yalnızca bir tehdit türüne karşı koruma sağlamaktan öte, çok yönlü tehdit ortamlarında uzun süreli ve çok işlevli dayanım sunabilecek entegre çözümler üretmeye odaklanmıştır. Bu kapsamda; fonksiyonel dereceli malzemeler, metal matrisli kompozit sistemler ve toz metalurjisi tabanlı üretim yöntemleri birbirini tamamlayan kritik mühendislik araçları haline gelmiştir. Modern zırh sistemleri, yalnızca pasif koruma değil; aynı zamanda optimize edilmiş yapı, düşük ağırlık, yüksek enerji soğurma kapasitesi ve üretim esnekliği gibi kriterleri de bir arada sunarak geleceğin savunma ve güvenlik teknolojilerinde kilit rol oynamaya devam edecektir.

Bu araştırmada, AA2024 alaşımı matris olarak kullanılarak, bor karbür (B_4C) parçacıkları ile takviye edilmiş fonksiyonel dereceli kompozit malzemeler, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Farklı takviye oranlarının, tozların fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri—örneğin morfoloji, tane boyutu ve görünür yoğunluk—ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, değişen takviye oranları ve katman sayılarının, üretilen kompozitlerin mikroyapısal özelliklerine, yoğunluğuna, sertliğine, çekme dayanımına, darbe direncine,

balistik performansına ve gama radyasyonunu soğurma kabiliyetine olan etkileri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda hem takviye oranının hem de katman sayısının kompozit malzemenin genel performansı üzerindeki rolü ortaya konmuş, böylece en uygun takviye ve katman konfigürasyonu belirlenerek fonksiyonel dereceli yapıların uygulama potansiyeli irdelenmiştir.

1.1. Zırh Sistemleri

Zırh sistemleri, bireyleri, araçları ve yapıları dış tehditlere karşı koruyan özel olarak tasarlanmış malzeme ve yapı bileşimleridir. Savunma sanayisinde stratejik öneme sahip bu sistemler, farklı tehdit türlerine karşı geliştirilmiş olup kullanım alanına göre farklılık gösterir. Kişisel koruyucu zırhlar (kask, balistik yelek), askeri kara ve hava araçlarına yönelik araç zırhları ile stratejik yapıların korunmasına yönelik yapısal zırhlar en yaygın kullanım alanlarıdır (Barhoumi et al., 2023; Hani et al., 2012). Kullanılan malzemeler arasında çelik, alüminyum ve titanyum gibi metaller, seramikler, kevlar, UHMWPE ve karbon fiber gibi polimer-kompozit yapılar yer alır. Zırh sistemlerinin etkinliği; balistik dayanım, radyasyon sönümleme, kimyasal direnç ve termal kararlılık gibi çok yönlü mühendislik kriterleriyle değerlendirilir. Bu kriterlere uygun malzeme seçimi ve yapı tasarımı, zırhın etkinliğini belirleyen temel unsurlardır. Teknolojik gelişmelerle birlikte, fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM) gibi çok katmanlı ve çok işlevli yeni nesil zırh sistemleri geliştirilmiş ve geleneksel zırh sistemlerine kıyasla daha hafif, daha dayanıklı ve çok yönlü çözümler sunulmuştur (Naik, 2016; Y. Wang et al., 2023).

1.2. Zırh Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi

Zırh sistemlerinin tarihsel gelişimi, insanlık tarihinin savaş, savunma ve güvenlik ihtiyaçlarıyla doğrudan bağlantılıdır. İlkel toplumlarda avcılık ve kabileler arası çatışmalar sırasında kullanılan deri, tahta ve kemik gibi doğal malzemeler, basit korunma ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik ilk zırh uygulamaları olarak kabul edilebilir. Bronz Çağı ile birlikte madencilik ve metal işleme becerilerinin gelişmesi, bronzdan yapılmış ilk metal zırhların ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu dönemde askerî sınıflar, özellikle de Mısır, Mezopotamya ve Antik Yunan uygarlıklarında, vücut zırhları ve miğferler gibi kişisel koruyucu ekipmanları yaygın olarak kullanmaya başlamıştır. Roma İmparatorluğu döneminde ise

segmental zırhlar (Lorica Segmentata) ve zincir zırhlar, askerî birlikler için standart koruma ekipmanı haline gelmiştir (Laible ve Barron, 1980).

Orta Çağ'a gelindiğinde, özellikle Avrupa'da şövalyelik kültürünün yaygınlaşmasıyla birlikte, dövme demirden ve daha sonra çelikten yapılmış tam vücut plaka zırhlar gelişmiştir. Bu zırhlar, hem estetik hem de yüksek koruyuculuk sağlaması nedeniyle dönemin ileri zırh teknolojilerini temsil etmiştir. Ancak ateşli silahların gelişmesiyle birlikte bu tür zırhlar etkinliğini yitirmiş, Sanayi Devrimi'yle beraber kütleli üretim teknikleri zırh anlayışını kökten değiştirmiştir (Murray, 2020).

20. yüzyılda, özellikle I. ve II. Dünya Savaşları sırasında zırh sistemleri büyük bir dönüşüm geçirmiştir. Tanklar, zırhlı personel taşıyıcıları ve çelik esaslı bireysel koruyucu ekipmanlar bu dönemde yaygınlık kazanmıştır. Soğuk Savaş döneminde ise zırh sistemlerinde hafiflik ve yüksek performans kriterleri ön plana çıkmış, bunun sonucunda seramikler, kevlar ve kompozit malzemeler gibi ileri mühendislik ürünleri zırh teknolojisine entegre edilmiştir (Barhoumi et al., 2023). Günümüzde modern zırh sistemleri, askeri ve sivil alanda kullanılmakta; balistik tehditlere karşı koruma sağlamanın yanı sıra hafiflik, dayanıklılık ve çok yönlülük gibi üstün nitelikler sunmaktadır (Ian G. Crouch, 2019).

1.3. Zırh Sistemlerinin Temel Sınıflandırması

Zırh sistemleri genel olarak üç ana kategori altında incelenebilir: Öncelikle, stratejik öneme sahip bina ve tesislerin korunması amacıyla geliştirilen yapısal zırh sistemleri; ikinci olarak, askeri ve güvenlik personelinin tehditlere karşı koruyan kişisel zırh sistemleri; son olarak ise kara, hava ve deniz araçlarında kullanılan ve taşıt güvenliğini sağlayan araç zırh sistemleri (Hazell, 2022).

Kullanım Alanlarına Göre:

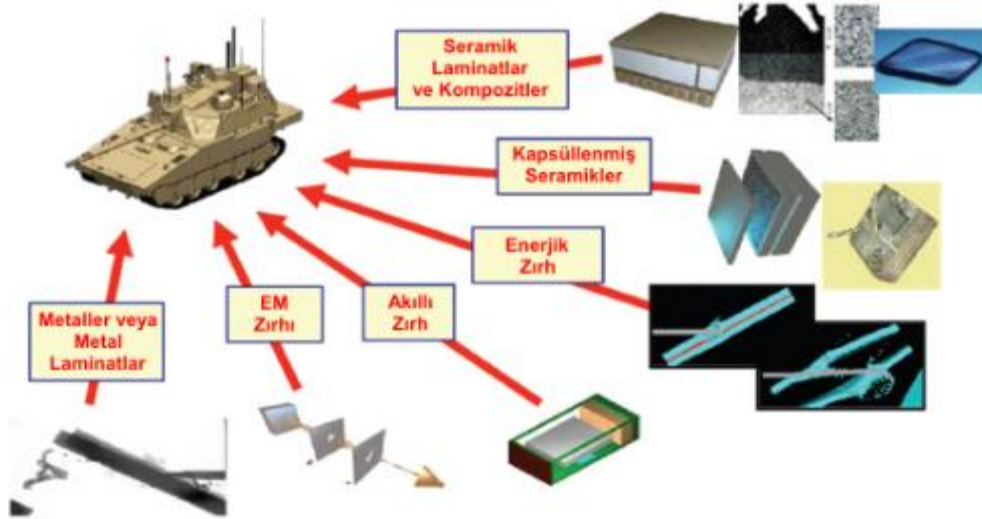
- **Bireysel Zırhlar:** Vücut zırhları, kasklar ve balistik yelekler gibi bireysel koruma ekipmanları. Bireysel zırh sistemleri, kullanıcıyı özellikle hafif silah mermileri ve patlama sonucu oluşan şarapnel gibi tehditlere karşı korumak amacıyla geliştirilen, balistik yelek ve miğfer gibi giyilebilir ekipmanlardan oluşur. Hem koruma sağlamak hem de hareket kabiliyetini sınırlamamak adına bu sistemlerde hafiflik ön plandadır. Kevlar gibi yüksek mukavemetli polimer malzemelerin keşfiyle önemli gelişmeler yaşanmış, zırh sistemleri çok katmanlı yapılarla tasarlanmaya başlanmıştır. Genellikle seramik dış yüzey, darbeyi yayan kompozit iç tabaka, enerji soğurucu

metal köpük ve koruyucu ince metal plaka gibi katmanlar bir araya getirilerek etkili bir koruma sağlanmaktadır (Lässig et al., 2015; Ong et al., 2011). Şekil 1.1’de vücut koruma sistemine örnek bir zırh seti gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Bireysel zırh sistemine örnek vücut zırh sistemi (Naveen et al., 2018)

- **Araç Zırhları:** Kara, hava ve deniz araçlarında kullanılan zırh sistemleri. Araç zırh sistemleri kara, hava ve deniz araçları olmak üzere sınıflandırılrsa da, bu çalışmada özellikle hafif zırhlı kara araçları ve zırhlı personel taşıyıcıları ele alınmaktadır. Tanklar, yaklaşık 100 mm kalınlıktaki zırhlarıyla en korunaklı kara araçları arasında yer alırken, bu zırhlarda genellikle ısıtılmış martenzitik yapı kazandırılmış çelikler kullanılır. Ancak kalınlığın artmasıyla birlikte malzeme homojenliğini korumak zorlaşır. Son yıllarda ise daha hızlı ve çevik olmaları sayesinde hafif zırhlı araçlar öne çıkmıştır. Bu araçlar, 6-8 mm kalınlığında yüksek sertlikte çelik plakalarla üretilmekte ve özellikle düşük kalibreli mühimmatlara karşı personel koruması sağlamaktadır (Crouch, 2016; Hazell, 2022). Şekil 1.2’de bir tankın örnek zırhlama sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Araç zırh sistemine örnek bir tankın savunma sistemi (Guo et al., 2023)

- Yapısal Zırhlar: Binalar ve stratejik tesislerin korunmasına yönelik zırh malzemeleri (Barone et al., 2023). Yapısal zırh sistemleri, özellikle nükleer tesisler, sığınaklar ve barınaklar gibi yüksek öneme sahip yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan koruma çözümleridir. Zaman içinde çok büyük değişim göstermeyen bu sistemler, genellikle hacim veya ağırlık sınırlamalarının olmadığı durumlarda tercih edilir (Chandrasekaran, 2020).

Ayrıca zırh sistemlerinde aranan temel özellikler vardır. Bunlar aşağıda belirtildiği gibidir;

- Balistik Dayanım: Ateşli silahların mermilerine karşı direnç.
- Radyasyon Koruması: Nükleer ve radyolojik tehditlere karşı koruma.
- Kimyasal ve Biyolojik Koruma: Tehlikeli maddelere karşı koruyucu kaplamalar.
- Termal Dayanım: Aşırı sıcaklıklara karşı direnç sağlayan malzemeler.

Zırh sistemlerinin tasarımı, malzeme seçimi ve uygulama yöntemi, tehdit türüne ve kullanım koşullarına bağlı olarak sürekli evrim geçirmektedir.

1.4. Zırh Sistemlerinde Malzeme Seçimi

Zırh sistemlerinde malzeme seçimi, balistik performans, ağırlık optimizasyonu, üretim maliyetleri, çevresel dayanıklılık ve çok yönlü tehditlere karşı direnç gibi çok boyutlu mühendislik kriterlerini dikkate alan karmaşık bir süreçtir. Malzemenin mekanik özellikleri (sertlik, darbe dayanımı, elastiklik modülü vb.), termal kararlılığı, kimyasal kararlılığı ve enerji sönmeme kapasitesi bu seçim sürecinde belirleyici unsurlar arasında yer alır.

Modern zırh uygulamalarında kullanılan başlıca malzeme grupları şunlardır:

Metalik Malzemeler: Özellikle yüksek mukavemetli çelik alaşımları ve ısıtılma işlemiyle sertleştirilmiş alüminyum türevleri, ekonomik olmaları ve işlenebilirlikleri nedeniyle zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Jena et al., 2010). Titanyum esaslı alaşımlar ise düşük yoğunluk ve yüksek özgül dayanım avantajı sağlamaktadır.

Seramik Malzemeler: Alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve silisyum karbür (SiC) gibi ileri seramikler, yüksek sertlikleri ve düşük yoğunlukları sayesinde mermi çekirdeğini parçalayarak etkili balistik performans sunarlar (Wang et al., 2019). Ancak kırılma yapıları nedeniyle genellikle polimer ya da metal matrislerle desteklenir.

Polimer ve Kompozit Malzemeler: Kevlar®, Dyneema® ve UHMWPE gibi yüksek performanslı polimerler, özellikle esnek balistik koruma uygulamalarında kullanılmaktadır. Seramik-polimer hibrit zırh sistemleri ise hem sert darbeleri absorbe edebilme hem de enerji dağılımı açısından avantaj sağlar (Zahraee ve Sabet, 2014).

Fonksiyonel Dereceli Malzemeler (FDM): Malzeme bileşiminin ve mikro yapısının kademeli olarak değiştiği bu tür yapılar, birden fazla tehdide karşı direnç sunmakta ve özellikle balistik + radyasyon gibi çift etkili tehdit ortamlarında üstün performans göstermektedir (Wang vd., 2023).

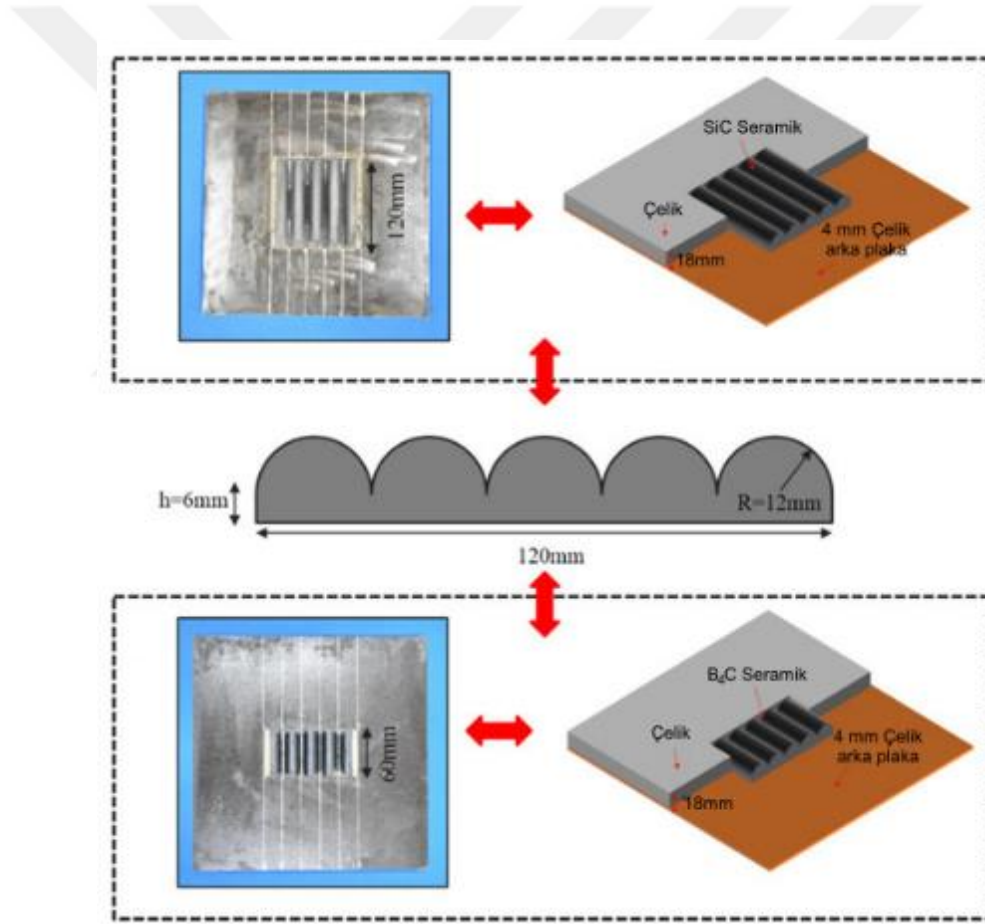
Zırh malzemelerinin seçiminde sadece tehdit tipi değil, aynı zamanda operasyonel koşullar (iklim, taşıma kapasitesi, montaj kolaylığı, bakım ihtiyaçları vs.) da dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda hibrit zırh sistemleri, çok katmanlı yapıları sayesinde farklı malzemelerin avantajlarını bir araya getirerek optimum koruma sağlamaktadır.

1.4.1. Çelik Esaslı Zırhlar

Çelik esaslı zırhlar, yüksek mukavemet, sertlik ve süneklik özellikleri ile bilinen, uzun yıllardır kullanılan geleneksel balistik koruma malzemeleridir. Genellikle düşük alaşımlı ya

da ısıtıl işlemle güçlendirilmiş yüksek dayanımlı çeliklerden üretilirler. Bu çelikler, gelen mermi ya da şarapnel gibi tehditleri kinetik enerji sönümler ve deformasyon yoluyla durdurabilirler (Jena vd., 2016).

Çelik zırhlar, balistik dayanım açısından başarılı olmakla birlikte, yüksek yoğunlukları nedeniyle taşıma platformlarına ek yük bindirirler. Bu sebeple modern uygulamalarda genellikle daha hafif malzemelerle hibrit yapılar oluşturularak kullanımları optimize edilir. Özellikle tank, zırhlı personel taşıyıcı gibi kara araçlarında ve bazı sabit yapısal güvenlik uygulamalarında çelik zırhlar halen yaygın şekilde tercih edilmektedir (McElroy vd., 2017; Tsirogiannis vd., 2024). Şekil 1.3'te katmanlı yapıya sahip çelik esaslı bir zırh çalışmasının örneğine ait numune resminin şematik görüntüsü verilmiştir.



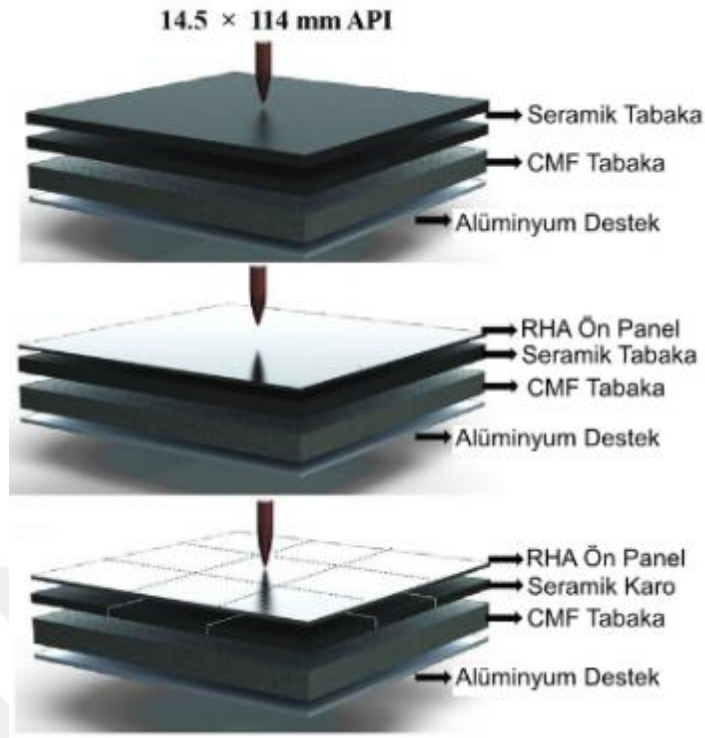
Şekil 1.3. Çelik esaslı zırh sistemi (Jiang vd., 2022)

1.4.2. Alüminyum Esaslı Zırhlar

Alüminyum esaslı zırhlar, özellikle düşük yoğunlukları ve iyi şekillendirilebilme özellikleri sayesinde hafif zırh uygulamalarında sıkça tercih edilen malzemelerdir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunmaları, hareket kabiliyetinin önemli olduğu askeri kara ve hava araçlarında bu malzemelere olan ilgiyi artırmıştır. Özellikle 5xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları, balistik dayanım açısından tatmin edici performans sergilemektedir (Zhou et al., 2024).

Isıl işlem uygulanmış alüminyum levhalar, kinetik enerjili tehditlere karşı deformasyon yoluyla enerji sönümlene sağlayabilir. Ayrıca korozyon direnci, üretim kolaylığı ve kaynaklanabilirlik gibi avantajları da bu malzemeleri cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, çelik ve seramik gibi daha sert malzemelere kıyasla mermiyi delmeden durdurma kapasitesi sınırlıdır; bu nedenle genellikle çok katmanlı hibrit zırh sistemlerinin bir parçası olarak kullanılır (Haro vd., 2016).

Ayrıca 2xxx serisi alüminyum alaşımları da yüksek mekanik dayanımları nedeniyle zırh uygulamalarında değerlendirilmektedir. Bu seri, özellikle bakır alaşımı içeriğiyle bilinir ve yüksek mukavemet sağlar. Ancak, 5xxx ve 7xxx serilerine kıyasla daha düşük korozyon direncine sahiptir. Bu sebeple, yüzey işlemleri ile desteklenerek ya da uygun çevresel koşullarda kullanılarak performansları artırılmaktadır. 2xxx serisi alaşımlar, özellikle zırh sistemlerinde taşıyıcı alt yapıların üretiminde tercih edilmektedir (Campbell, 2012; Sharma vd., 2018). Şekil 1.4'te katmanlı yapıya sahip alüminyum esaslı bir zırh çalışmasının örneğine ait numune resminin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.4. Alüminyum esaslı zırh sistemi (Marx vd., 2020)

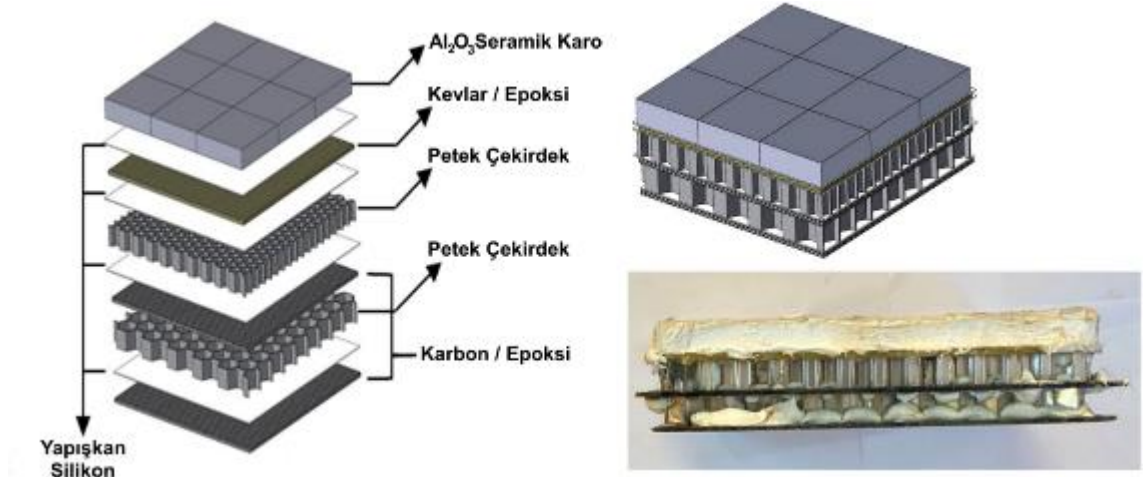
1.4.3. Kompozit Zırhlar

Kompozit zırhlar, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılardır. Bu malzemeler, birlikte çalışarak yüksek balistik performans, düşük ağırlık ve esneklik gibi avantajlar sunar. Genellikle bir çekirdek (core) katmanı, bir taşıyıcı (backing) katman ve enerji dağıtıcı yüzey tabakalarından oluşan yapıya sahiptir (Pereira vd., 2019; Signetti vd., 2022).

Kompozit zırhlarda yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında seramikler (Al_2O_3 , SiC, B_4C), yüksek performanslı polimerler (Kevlar®, UHMWPE), karbon fiber takviyeli yapılar ve metal matrisli kompozitler bulunur. Bu sistemler, mermiyi önce seramik katmanda kırar, ardından kinetik enerjiyi polimer ya da metalik arka katmanda sönmeler (Colombo vd., 2006).

Hafiflikleri sayesinde kompozit zırhlar; helikopterler, insansız hava araçları, hafif zırhlı kara araçları ve kişisel koruyucu donanımlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı zamanda darbe enerjisini yayarak yapısal hasarı minimuma indirir ve kullanıcıya yüksek hareket kabiliyeti sağlar. Ancak üretim maliyetleri, özellikle ileri düzey hibrit sistemlerde, klasik metal zırhlara kıyasla daha yüksektir (Siengchin, 2023). Şekil 1.5'te katmanlı yapıya

sahip kompozit esaslı bir zırh çalışmasının örneğine ait numune resminin şematik görüntüsü verilmiştir.



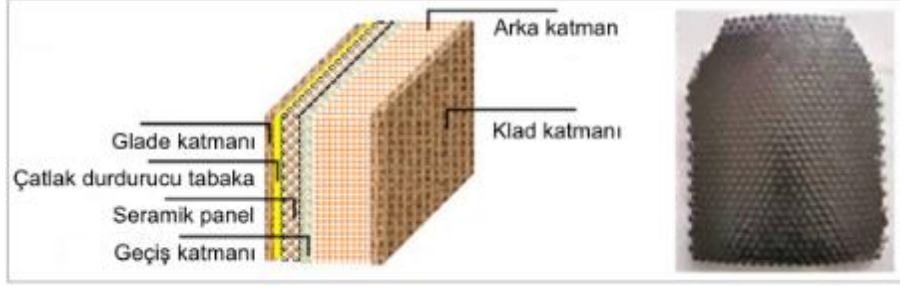
Şekil 1.5. Kompozit esaslı zırh sistemi (Khalaf ve Hamzah, 2024).

1.4.4. Seramik Zırhlar

Seramik esaslı zırhlar, yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve yüksek erime sıcaklığı gibi üstün özellikleri sayesinde modern zırh sistemlerinde önemli bir yer edinmiştir. Özellikle yüksek hızdaki mermi çekirdeklerini parçalama yeteneği, onları balistik koruma uygulamalarında vazgeçilmez hale getirmiştir (Octavian ve Simona, 2024).

Bu tür zırhlarda yaygın olarak kullanılan seramikler arasında alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve silisyum karbür (SiC) yer almaktadır. Bu malzemeler, gelen mermiyi ilk darbede kırarak kinetik enerjinin büyük bir kısmını sönmölemek ve arka katmanlara iletilen enerjiyi azaltmaktadır. Ancak kırılğan yapıları nedeniyle seramik tabakalar genellikle polimer, kompozit veya metalik destek katmanlarıyla birleştirilerek kullanılır (Reddy vd., 2019).

Seramik zırhlar; askeri kara ve hava araçları, kişisel balistik yelekler ve insansız sistemlerde yaygın olarak kullanılmakta olup, hafiflik ve etkin enerji dağılımı açısından büyük avantaj sağlar. Yüksek üretim maliyetleri ve kırılğanlık gibi dezavantajları ise çok katmanlı sistem tasarımlarıyla minimize edilmeye çalışılmaktadır (Tsirogiannis vd., 2024). Şekil 1.6’da katmanlı yapıya sahip seramik esaslı bir zırh çalışmasının örneğine ait numune resminin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.6. Seramik esaslı zırh sistemi (Chen vd., 2022)

1.5. Radyasyon Zırhlama Teknolojileri

Radyasyon zırhlama teknolojileri, iyonlaştırıcı radyasyonun zararlı etkilerini minimize etmek amacıyla geliştirilen mühendislik çözümlerini kapsar. Nükleer enerji santralleri, tıbbi görüntüleme cihazları ve savunma sistemleri gibi birçok alanda kullanılmakta olan bu zırh türleri; nötronlar, gama ışınları ve X-ışınları gibi yüksek enerjili parçacıkların madde ile etkileşimini sönümlemeye yönelik tasarlanmıştır (Chang vd., 2023).

Radyasyon zırhlamada kullanılan malzemelerin seçiminde; yüksek atom numarasına sahip elementlerin fotoelektrik absorpsiyon kabiliyetleri, yoğunluk, kalınlık ve enerjiyi saçma/soğurma özellikleri dikkate alınır. Kurşun (Pb), tungsten (W), bor (B) ve barit (BaSO_4) gibi malzemeler geleneksel olarak kullanılsa da, son yıllarda polimer matrisli ve metal matrisli kompozit malzemelere olan ilgi artmıştır (Apte ve Bhide, 2024; Shahzad vd., 2022).

Yeni nesil radyasyon zırhları, özellikle fonksiyonel dereceli malzeme (FDM) tasarımlarıyla birlikte, çok katmanlı yapılar hâlinde optimize edilmekte ve aynı anda hem mekanik mukavemet hem de radyasyon sönümleme etkisi sağlamaktadır. Bu kapsamda; nükleer silahlara karşı koruma, uzay sistemleri ve askeri zırh sistemleri gibi yüksek öncelikli stratejik uygulamalarda gelişmiş radyasyon zırh teknolojileri kritik bir rol oynamaktadır (Sreedevi ve Lalwani, 2024). Şekil 1.7’de radyasyon zırhlamasının temel ilkelerini gösteren şematik görüntü sunulmuştur.



Şekil 1.7. Radyasyon zırhlamasının temel ilkeleri (Onaizi vd., 2024)

1.5.1. Radyasyon Türleri ve Özellikleri

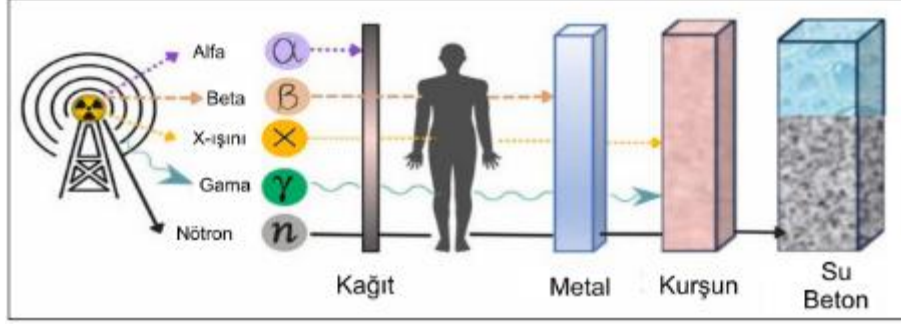
Radyasyon, atom altı parçacıkların ya da elektromanyetik dalgaların yayılımı yoluyla enerji taşıyan bir fiziksel olgudur. Radyasyon türleri genellikle iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olarak sınıflandırılır. Zırh uygulamaları açısından esas olarak iyonlaştırıcı radyasyon önem taşır; çünkü bu tür radyasyon, madde ile etkileşime girdiğinde atom ve molekülleri iyonlaştırarak zarar verebilir (Juraku vd., 2015). Başlıca iyonlaştırıcı radyasyon türleri:

Nötron Radyasyonu: Nötronlar elektriksel yüke sahip olmadıkları için madde içinde derinlemesine nüfuz edebilirler. Bu nedenle nötron zırhlaması, hidrojen içeren malzemeler (örneğin polietilen) ile gerçekleştirilir.

Gama (γ) Radyasyonu: Yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardan oluşur. Fotoelektrik etki, Compton saçılması ve çift oluşumu gibi mekanizmalarla madde içinde etkileşime girer. Zırhlamada yüksek atom numaralı ve yoğunluklu malzemeler tercih edilir.

X-Işınları: Gama radyasyonuna benzer özellik gösterir. Genellikle daha düşük enerjilidir. Medikal ve endüstriyel alanlarda sık kullanıldığından bu alanlara yönelik zırh sistemleri de geliştirilmiştir.

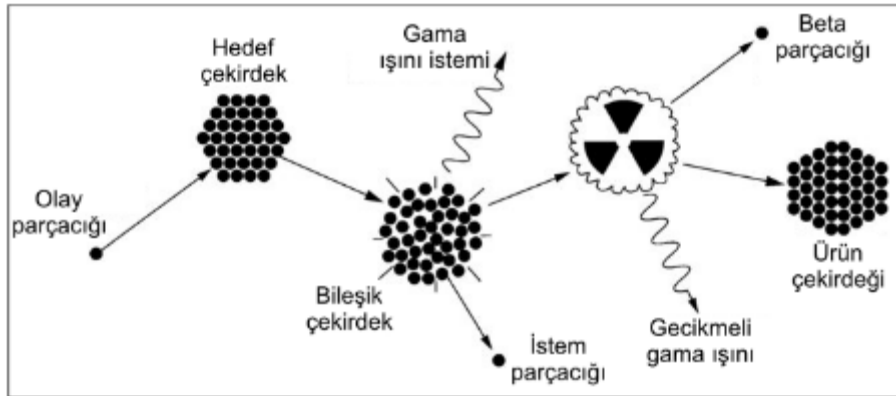
Bu radyasyon türlerinin her biri, farklı fiziksel ve yapısal özellikteki malzemeler ile sönmülenebilir. Bu nedenle, radyasyon türüne göre zırh tasarımı yapılması gereklidir. Şekil 1.8’de radyasyon türleri ve malzeme türlerindeki penetrasyon özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Radyasyon türleri, penetrasyonları ve özellikleri (Abdullah vd., 2022; Tyagi vd., 2020)

(a) Nötron Işınması:

Nötron ışıınımı, özellikle nükleer reaksiyonlar sırasında ortaya çıkan ve elektrik yükü taşımayan serbest nötronlardan oluşur. Nötronlar madde ile etkileşime girdiklerinde atom çekirdeklerinde fisyon veya aktivasyon gibi değişimlere neden olabilir (Swinhoe ve Ensslin, 2024). Bu durum hem biyolojik dokular hem de mühendislik malzemeleri için önemli tehditler yaratır. Nötronları soğurmak için genellikle hidrojen içeren polietilen gibi malzemeler veya bor, lityum gibi nötron emici elementler kullanılır (Toyen vd., 2024). Şekil 1.9’da nötron yakalama reaksiyonunun şematik görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Nötron yakalama reaksiyonunun şematik görüntüsü (Glascock, 2011)

1.5.2. Radyasyon Soğurma Mekanizmaları

Radyasyonun bir madde içerisinde geçerken enerjisinin bir kısmını kaybetmesi veya tamamen durdurulması olayına radyasyon soğurma denir. Bu süreç, radyasyon türüne ve malzemenin fiziksel/kimyasal özelliklerine bağlı olarak farklı mekanizmalarla gerçekleşir (Karttunen vd., 1994). Başlıca radyasyon soğurma mekanizmaları şunlardır:

Fotoelektrik Etki: Düşük enerjili gama ve X-ışınlarının, yüksek atom numaralı bir atomun iç yörüngesindeki elektronu çıkarması ile gerçekleşir. Kurşun ve tungsten gibi elementler bu etki açısından etkilidir (Karpus ve Reilly, 2024).

Compton Saçılması: Orta enerjili fotonların serbest veya zayıf bağlı elektronlarla çarpışması sonucu yön değiştirmesiyle oluşur. Bu etki, organik malzemeler ve polimer matrisli yapılarla ilişkilidir (Chang vd., 2023).

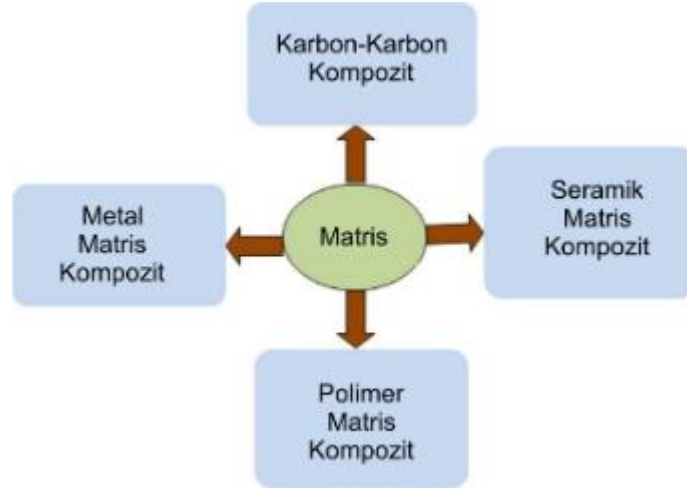
Çift Oluşumu: Yüksek enerjili fotonların (1.02 MeV üzeri) bir atom çekirdeğinin yakınında bir pozitif ve bir negatif elektron (pozitron ve elektron) oluşturmalarıdır. Bu mekanizma daha çok yüksek enerjili radyasyon ortamlarında görülür (Baier vd., 1984).

Nötron Yavaşlatma ve Yakalama: Nötronlar, hidrojen içeren maddelerde yavaşlatıldıktan sonra bor, kadmiyum veya lityum gibi nötron soğurucu malzemeler tarafından tutulur. Polietilen ve bor katkılı kompozitler bu amaçla kullanılır (Uddin vd., 2020).

Bu mekanizmaların anlaşılması, uygun radyasyon zırhının seçimi ve tasarımı açısından büyük önem taşır. Farklı radyasyon türlerine karşı, farklı soğurma stratejileri uygulanarak etkili bir koruma sağlanabilir.

1.6. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, bir metal matrisin içine homojen veya heterojen şekilde dağılmış takviye fazlarının entegre edilmesiyle oluşturulan gelişmiş mühendislik malzemeleridir. Bu yapılar, geleneksel metalik malzemelere kıyasla daha yüksek sertlik, mukavemet, aşınma direnci ve ısı kararlılığı gibi üstün özellikler sunar (Makhesana vd., 2025; Pooja vd., 2025). Şekil 1.11’de kompozit malzemelerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



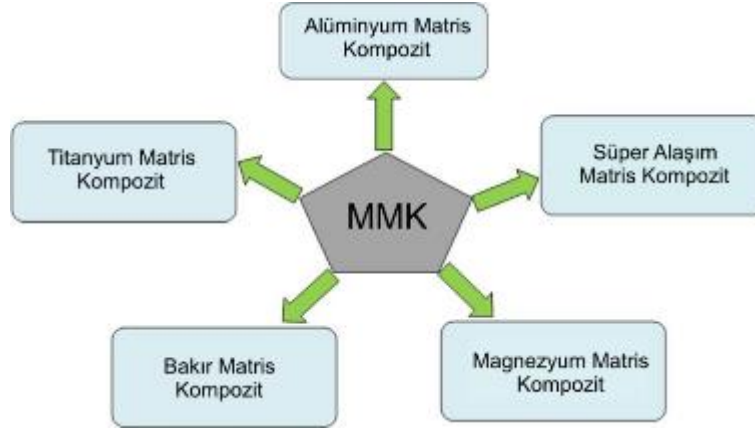
Şekil 1.11. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması. (Ramanathan vd., 2019)

Zırh uygulamalarında MMK'lerin kullanımı hem balistik hem de termal dayanım ihtiyaçlarını aynı anda karşılamaları açısından önemlidir. Özellikle alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif metallerin matris olarak kullanıldığı sistemlerde, seramik parçacıklar (örneğin B_4C , SiC , Al_2O_3) takviye elemanı olarak eklenerek malzemenin balistik performansı artırılır (Lee vd., 2017).

MMK sistemleri, yüksek enerji darbelerine karşı direnç gösterebildikleri gibi, yüksek sıcaklık altında boyutsal kararlılıklarını da koruyabilirler. Bu nedenle savunma sanayiinde zırhlı araç gövdeleri, uçak ve helikopter bileşenleri gibi kritik uygulamalarda tercih edilirler. Aynı zamanda, modern üretim teknolojileri sayesinde kontrollü mikroyapı elde edilerek hem maliyet hem de performans açısından optimize çözümler sunulabilir (Chawla ve Chawla, 2013; Pooja vd., 2025).

1.6.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri

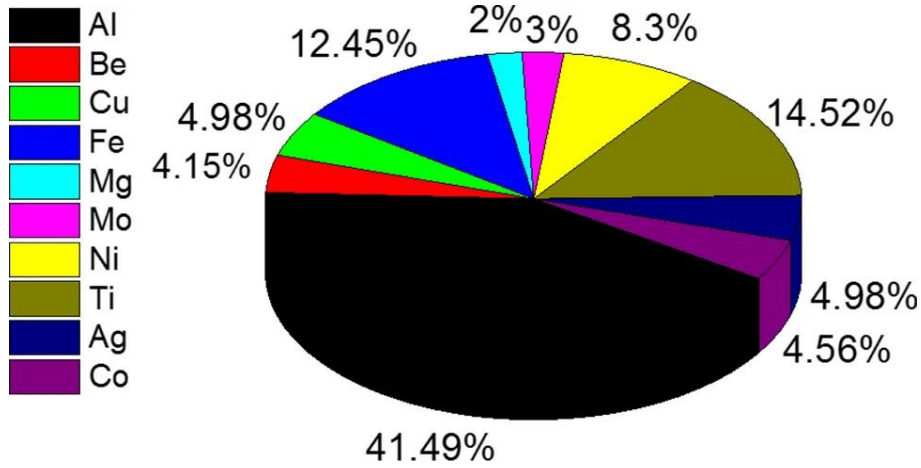
Metal matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri, takviye elemanlarıyla birlikte çalışarak kompozitin genel mekanik davranışını ve çevresel dayanımını belirleyen en temel yapısal bileşenlerdendir. Matris fazı, yük transferinden sorumlu olmakla birlikte, ısı iletim, şekillendirilebilirlik ve üretim yöntemleriyle de doğrudan ilişkilidir (Muzammil Idris vd., 2019). Şekil 1.12’de matris bazında MMK türleri sunulmuştur.



Şekil 1.12. Matris bazında MMK türleri (Kumar vd., 2024)

Alüminyum ve Alaşımları: En yaygın kullanılan matris sistemlerinden biridir. Düşük yoğunluğu (yaklaşık 2.7 g/cm^3), yüksek özgül mukavemeti, iyi şekillendirilebilirliği ve yüksek korozyon direnci sayesinde balistik ve yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir (Rambabu vd., 2017; Skejić vd., 2021). Alüminyum matrisli kompozitlerde özellikle 2xxx, 5xxx ve 7xxx serisi alaşımlar öne çıkar:

2xxx Serisi (Al-Cu Alaşımları): Bu grup, temel alaşım elementi olarak bakır içerir ve yüksek mekanik dayanımıyla bilinir. Isıl işlem uygulanarak mukavemet seviyesi önemli ölçüde artırılabilir. Yüksek darbe ve yorulma dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Ancak korozyon direnci düşüktür, bu nedenle yüzey işlemleri veya kaplamalarla desteklenmelidir. Zırh sistemlerinde taşıyıcı elemanlar ve yapısal bileşenlerde kullanımı yaygındır (Anderson (Ed.) vd., 2019). 5xxx Serisi (Al-Mg Alaşımları): Magnezyum içeriği sayesinde yüksek korozyon direnci ve iyi süneklik sunar. Isıl işleme gerek duymadan soğuk şekillendirme ile güçlendirilebilir. Deniz ortamı gibi zorlu çevre koşullarında tercih edilir (Toros vd., 2008). 7xxx Serisi (Al-Zn-Mg Alaşımları): Yüksek mukavemetli uygulamalar için uygundur. Isıl işlemle güçlendirilerek sertlik ve dayanım özellikleri artırılabilir. Ancak kaynak kabiliyeti sınırlıdır ve stres korozyon çatlamasına karşı hassasiyet gösterir (Anderson (Ed.) vd., 2019b). Şekil 1.13'te çeşitli elementlerin metal matris olarak kullanımı gösteren bir grafik gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Çeşitli elementlerin metal matris olarak kullanımı (Kumar vd., 2024)

Alüminyum, B_4C , SiC gibi seramiklerle takviye edilerek yüksek performanslı MMK'ler elde edilir. Alaşım seçimi, hedeflenen balistik performans, ağırlık azaltımı ve çevresel koşullara göre optimize edilir.

Titanyum ve Alaşımları: Yüksek özgül mukavemeti, yüksek sıcaklık dayanımı ve biyouyumluluğu ile öne çıkar. Yoğunluğu alüminyuma göre daha yüksek olsa da (yaklaşık 4.5 g/cm^3), zorlu çevresel koşullarda üstün performans sağlar. Fakat maliyeti yüksektir ve işlenebilirliği daha zordur (Cui vd., 2011).

Magnezyum ve Alaşımları: Yoğunluğu en düşük metalik matrislerden biridir (yaklaşık 1.74 g/cm^3). Ancak düşük erime noktası ve sınırlı korozyon direnci nedeniyle yalnızca belirli alanlarda uygulanabilir. Isıl iletkenlik açısından avantajlıdır (Tan ve Ramakrishna, 2021).

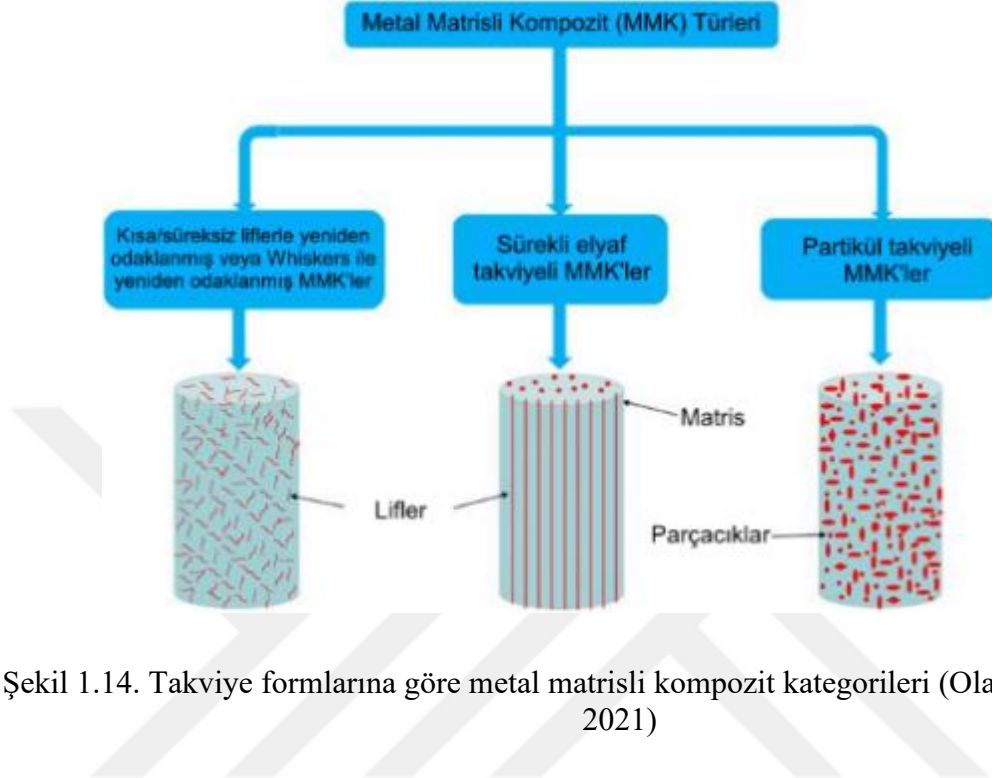
Nikel, Bakır ve Demir Tabanlı Matrisler: Yüksek sıcaklık ve oksidasyon dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Özellikle termal stabilitenin kritik olduğu uzay, havacılık ve nükleer uygulamalarda kullanılır. Yoğunlukları ve maliyetleri alüminyum sistemlerine kıyasla daha yüksektir (Oladijo vd., 2021).

Matris seçimi yapılırken, hedef uygulamanın maruz kalacağı mekanik yükler, termal çevrimler ve üretim teknolojileri dikkate alınarak optimize edilmiş çözümler geliştirilir.

1.6.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

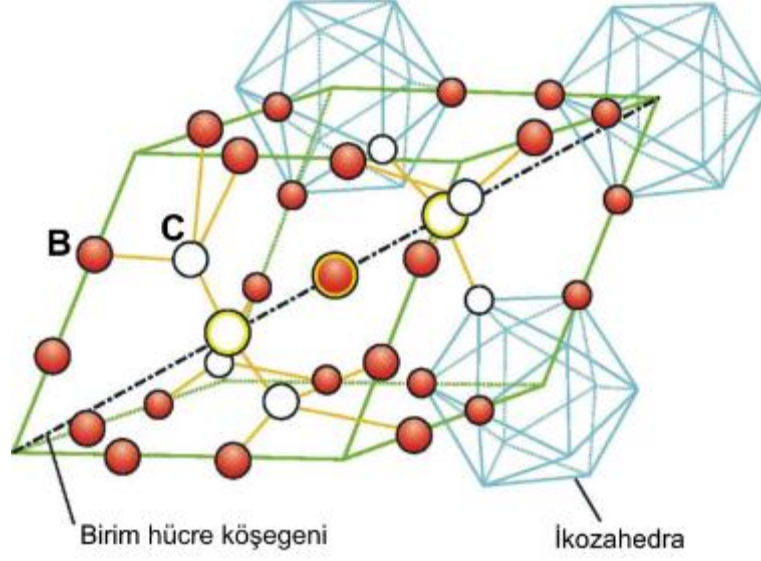
Takviye malzemeleri, metal matrisli kompozitlerin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla matris içine dağıtılan ikinci faz bileşenlerdir. Bu takviyeler genellikle partikül, fiber (lif) veya whisker formunda olabilir ve matris ile güçlü

bir bağ oluşturarak yük aktarımında önemli rol oynar (Lakshmikanthan vd., 2022). Şekil 1.14'te takviye formlarına göre metal matrisli kompozit kategorileri şematik olarak gösterilmiştir. MMK sistemlerinde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri şunlardır:



Şekil 1.14. Takviye formlarına göre metal matrisli kompozit kategorileri (Oladijo vd., 2021)

Bor Karbür (B_4C): Bor karbür, seramik esaslı ileri mühendislik malzemeleri arasında en sert ve en hafif olanlardan biridir. Yaklaşık 2.52 g/cm^3 yoğunluğa sahip olması sayesinde, zırh sistemlerinde hem balistik koruma sağlarken hem de ağırlık azaltımına katkı sunar. Mohs sertlik skalasında 9.5 düzeyinde yer alan B_4C , yüksek balistik dayanımı sayesinde modern kompozit zırh tasarımlarında tercih edilmektedir (Savio vd., 2011). B_4C 'ün sahip olduğu yüksek erime noktası ($2450 \text{ }^\circ\text{C}$), düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenliği, onu yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalar için de uygun kılar. Ayrıca nötron soğurma kabiliyeti sayesinde nükleer uygulamalarda da kullanılmaktadır. Metal matrisle iyi bir arayüz oluşturması ve kimyasal kararlılığı, uzun ömürlü ve yüksek performanslı MMK üretimine olanak sağlar. Ancak toz formunda zor işlenebilirliği ve yüksek maliyeti, üretim süreçlerinde dikkatli parametre kontrolü gerektirir (Campbell (Ed.), 2012). Şekil 1.15'te bor karbürün kristal yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Bor karbürün kristal yapısı (Kovziridze vd., 2013)

- Silisyum Karbür (SiC): Yüksek sertlik, iyi ısı iletkenlik ve aşınma direnci ile bilinir. Hem askeri hem endüstriyel zırh sistemlerinde kullanılır (Ruys, 2023).
- Alümina (Al_2O_3): Ekonomik olması ve yüksek sertlik sağlaması nedeniyle tercih edilen bir seramik takviye malzemesidir (Muraliraja vd., 2019).
- Karbon Fiber: Yüksek elastikiyet modülü ve düşük yoğunluğu sayesinde kompozitin rijitliğini artırırken ağırlığı düşük tutar (Perumal vd., 2021).
- Grafen ve CNT (Karbon Nanotüp): Nano boyutlu takviyeler olarak, yeni nesil MMK sistemlerinde çok yüksek mekanik özellikler sunabilmektedir (Kumar ve Xavier, 2018).

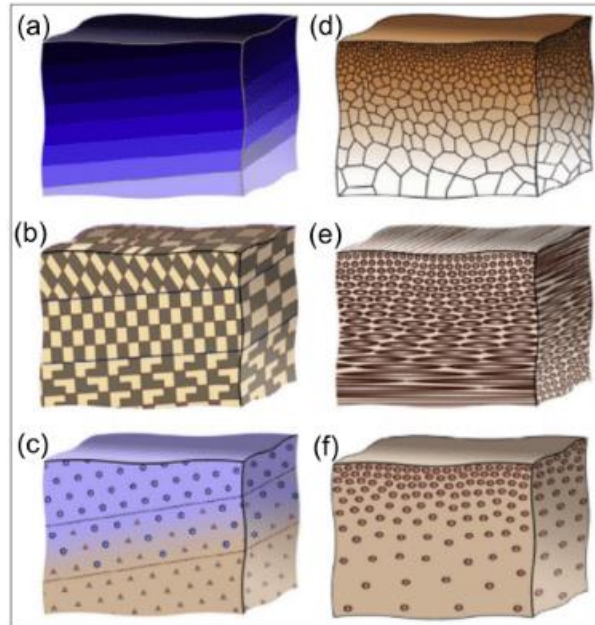
Takviye malzemesi seçimi, kompozitin hedeflenen kullanım alanına, istenen özelliklerine ve üretim yöntemine bağlı olarak belirlenir. Aynı zamanda matris ile kimyasal uyumluluğu da performans üzerinde belirleyici bir etkidir.

1.7. Fonksiyonel Dereceli Malzemeler (FDM)

Bazı mühendislik uygulamaları, malzemenin farklı bölgelerinde birbirinden farklı fiziksel ya da mekanik özelliklerin bulunmasını zorunlu kılmaktadır. Bir bileşenin çeşitli noktalarında farklı davranışlar sergilemesi isteniyorsa, bu durum genellikle yapının belirli kısımlarında bileşim veya faz dağılımının farklılaştırılmasıyla sağlanır. Ancak bu tür yapısal farklılıklar, çoğu zaman keskin geçişlerle oluşturulmakta ve bu da özellikle sıcaklık

değişimleri gibi termal koşullar altında iç gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu iç gerilmeler ise, zamanla malzemede çatlama veya kırılma gibi istenmeyen hasarlara yol açabilir. Bu sorun, özellikle metal ve seramik gibi farklı fiziksel özelliklere sahip malzeme çiftlerinin bir araya getirildiği sistemlerde daha belirgin hale gelir (Ishiguro vd., 1993).

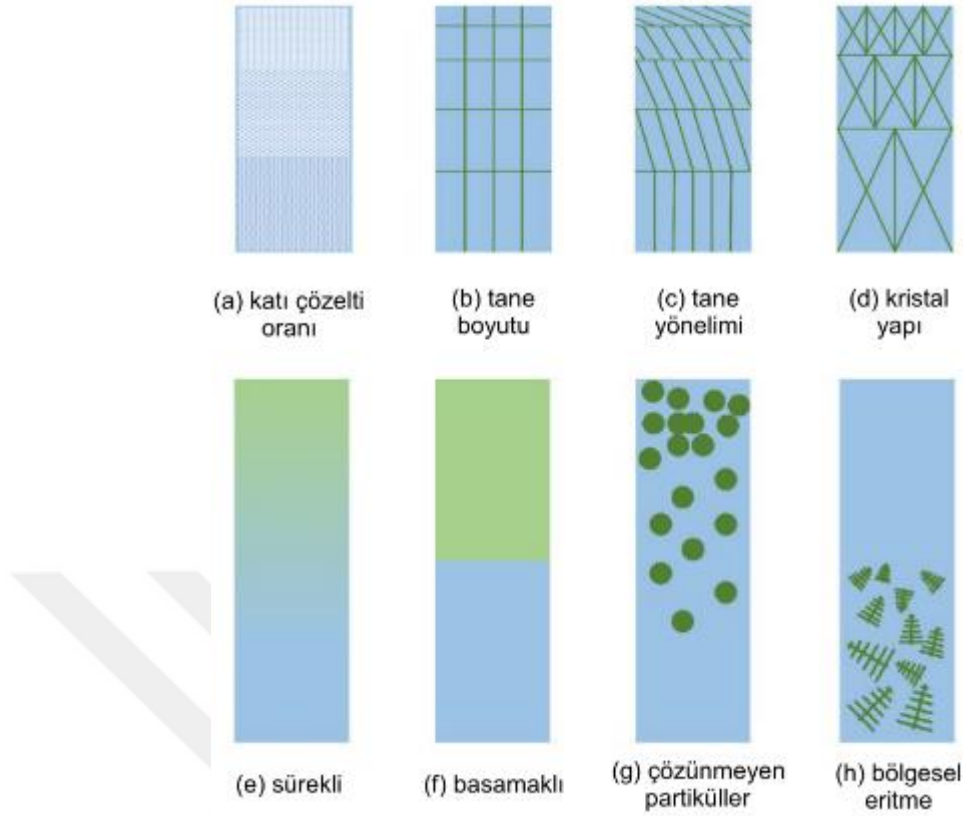
Bu tür problemlerin önüne geçmek amacıyla, malzemenin özellik geçişlerinin ani değil, daha yumuşak ve kademeli olması tercih edilmektedir. Yapısal veya bileşimsel geçişlerin kontrollü bir şekilde sağlandığı malzeme türlerine fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM) adı verilmektedir (Mahamood ve Akinlabi, 2017; Mortensen ve Suresh, 1995). Bu malzemeler, genellikle belirli bir yön boyunca fiziksel, kimyasal ya da mekanik özelliklerinde aşamalı bir değişim gösterecek şekilde tasarlanır. FDM'lerin yapısal özellikleri, içerdiği takviye fazlarının oranı veya dağılımı gibi unsurların kontrollü olarak değiştirilmesiyle elde edilir. Bu yaklaşım sayesinde malzeme boyunca istenilen özelliklerin bölgesel olarak dağıtılması mümkün hale gelir ve ani geçişlerden kaynaklı gerilme oluşumu minimize edilir (Zhang vd., 2022). FDM'lerdeki bu gradyanlı yapı, özellikle çok işlevli uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Takviye fazlarının tipine ve dağılımına bağlı olarak oluşturulabilen gradyan yapılar, ilgili literatürde çeşitli örneklerle görsel Şekil 1.16'da sunulmuştur (Zhang vd., 2019).



Şekil 1.16. Farklı gradyan biçimlerine sahip işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemeler (a, d) kompozisyon gradyanı, (b, e) gradyan yönlendirme ve (c, f) fraksiyon gradyanı (Zhang vd., 2019).

FDM'ler, bir bileşenin işlevsel verimliliğini maksimum seviyeye taşıyacak şekilde malzeme özelliklerinin özel olarak düzenlenmesini esas alan bir tasarım yaklaşımı sunar. Bu malzemeler, üretim süreçlerinin ve mikroyapısal özelliklerin hassas biçimde kontrol edilmesini gerektirdikleri için, ileri mühendislik malzemeleri sınıfında değerlendirilir (Alkunte vd., 2024). FDM kavramının ilk ortaya çıkışı, atmosferik yeniden giriş sırasında dış yüzeyde oluşan ani sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan gerilmelere karşı dayanım sağlama ihtiyacına dayanmaktadır. Seramik-metal hibrit yapılar gibi ani geçişli sistemlerin bu koşullara dayanmakta yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir; bu nedenle özelliklerin kademeli olarak değiştiği FDM yapıları çözüm olarak geliştirilmiştir (Balaraman vd., 2022).

Zaman içerisinde FDM'ler için kullanılan üretim teknikleri, malzeme türleri ve mikroyapısal konfigürasyonlar giderek çeşitlenmiş; dolayısıyla bu malzemelerin uygulama alanları da oldukça genişlemiştir (Mahamood ve Akinlabi, 2017). Fonksiyonel dereceli malzemelerin yapısal farklılıkları, yukarıdan aşağıya olacak şekilde gradyan geçişli olarak şematik biçimde Şekil 1.17'de sunulmaktadır (Zhang vd., 2022). Bu yapısal değişiklikler, kimyasal bileşim farklılıklarından kaynaklanabileceği gibi, mikroyapıdaki düzenlemelerden de doğabilmektedir. Mikroyapıdaki gradyan, fazların türü, boyutu veya malzeme içerisindeki gözeneklilik oranı gibi parametrelerdeki kontrollü değişimlerle sağlanır. Söz konusu bu değişim, sürekli ve kademeli olabileceği gibi, belirli bölgelerde ani ve basamaklı bir biçimde de gerçekleştirilebilir (bkz. Şekil 1.17 (e-f)).



Şekil 1.17. Fonksiyonel dereceli malzemelerde oluşturulabilecek yapısal değişim türlerinin şematik bir temsili (Zhang vd., 2022).

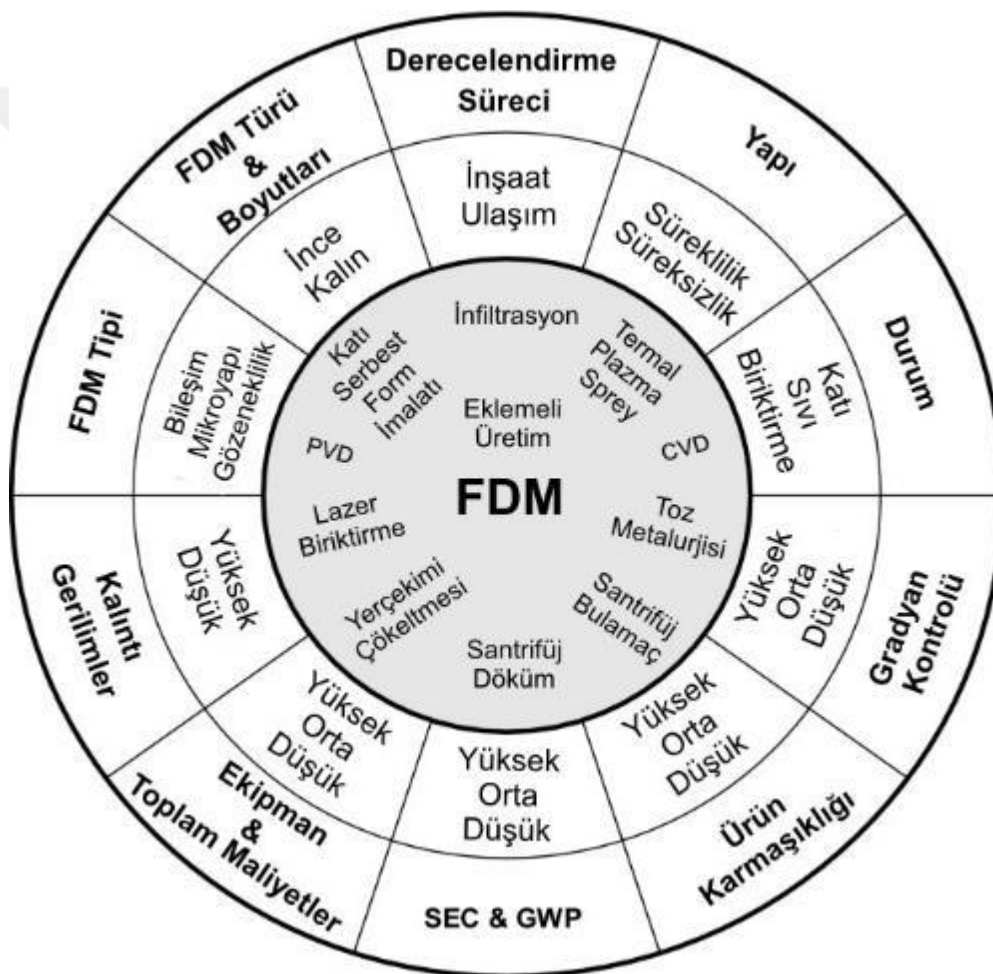
1.7.1. FDM'lerin Kullanım Alanları

FDM'ler, nispeten yeni malzeme türleri olmalarına rağmen kullanım alanları hızla genişlemektedir. Belirli uygulamalara yönelik olarak geliştirilmiş olan bu malzemeler, bileşim veya yapılarına bağlı olarak farklı özellikler sergileyebilmektedirler. Günümüzde ve gelecekte daha fazla kullanılacağı öngörülen sektörler arasında uzay ve havacılık, kara ve hava taşımacılığı, savunma sanayi, enerji sektörü, katalizör uygulamaları ve tıbbi kullanımlar yer almaktadır (Mahamood ve Akinlabi, 2017).

FDM'ler, sıcaklık farklarının büyük olduğu koşullarda, ısı genleşme katsayısındaki farklılıklar nedeniyle oluşan gerilmeleri azaltabilmektedir (Konez ve arkadaşları 2005). Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM), makroskobik olarak sürekli değişen termal ve mekanik özelliklere sahip olup, uzay araçlarının ince duvarlı yapılarında, nükleer reaktörlerde ve yüksek sıcaklık uygulamalarında son yıllarda önemli kullanım alanları bulmuştur. Metal ve seramik bileşenlerden oluşan FDM'nin avantajı, metal kısmın yapısal bütünlüğünü korurken, seramik yüzeyin yüksek sıcaklıklarla başa çıkabilmesidir.

FDM’de malzeme özellikleri ve sıcaklık profili, kalınlık yönünde sürekli değişim gösterdiği için, FDM plakaları simetrik olmayan kalınlıklara sahip olmaktadır (Prakash vd., 2009).

Uzay mekiği, dünya atmosferine yeniden giriş yaptığında çok yüksek sıcaklıklarla karşılaşmaktadır. Bu sebeple, uzay mekiği üzerinde seramik karolar termal koruma olarak kullanılmaktadır. Ancak, ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıklar nedeniyle, bu karoların üst yapılarında çatlaklar meydana gelebilmektedir. Metal ve seramikten üretilen fonksiyonel dereceli malzemeler hem termal koruma sağlamakta hem de yük taşıma kapasitesini tek bir malzeme ile sunabilmektedir (Koizumi, 1997). Şekil 1.18’de FDM’lerin genel anlamda kullanım alanlarına göre üretim yöntemlerinin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 1.18. FDM’lerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması (El-Galy vd., 2019)

1.7.2. FDM'lerin Üretim Yöntemleri

Fonksiyonel dereceli malzemelerin (FDM) üretimi, malzeme bileşiminin kademeli veya sürekli şekilde değiştirilebildiği yöntemleri içerir. Bu üretim teknikleri sayesinde farklı

özelliklere sahip malzemeler, tek bir yapı içerisinde birleştirilebilir ve geçiş bölgeleri kontrollü olarak oluşturulabilir (Mohammadi vd., 2021). FDM üretiminde yaygın kullanılan başlıca yöntemler:

Toz Metalurjisi: Farklı oranlarda hazırlanmış toz karışımları, katmanlar hâlinde üst üste preslenerek şekillendirilir ve sinterlenir. Katman geçişleri manuel ya da otomatik olarak ayarlanabilir.

Sıcak Presleme: Tozların yüksek sıcaklık ve basınç altında bir araya getirilmesiyle yoğun yapı elde edilir. Katman geçişleri sırasında farklı bileşimler kullanılarak FDM yapılar oluşturulabilir.

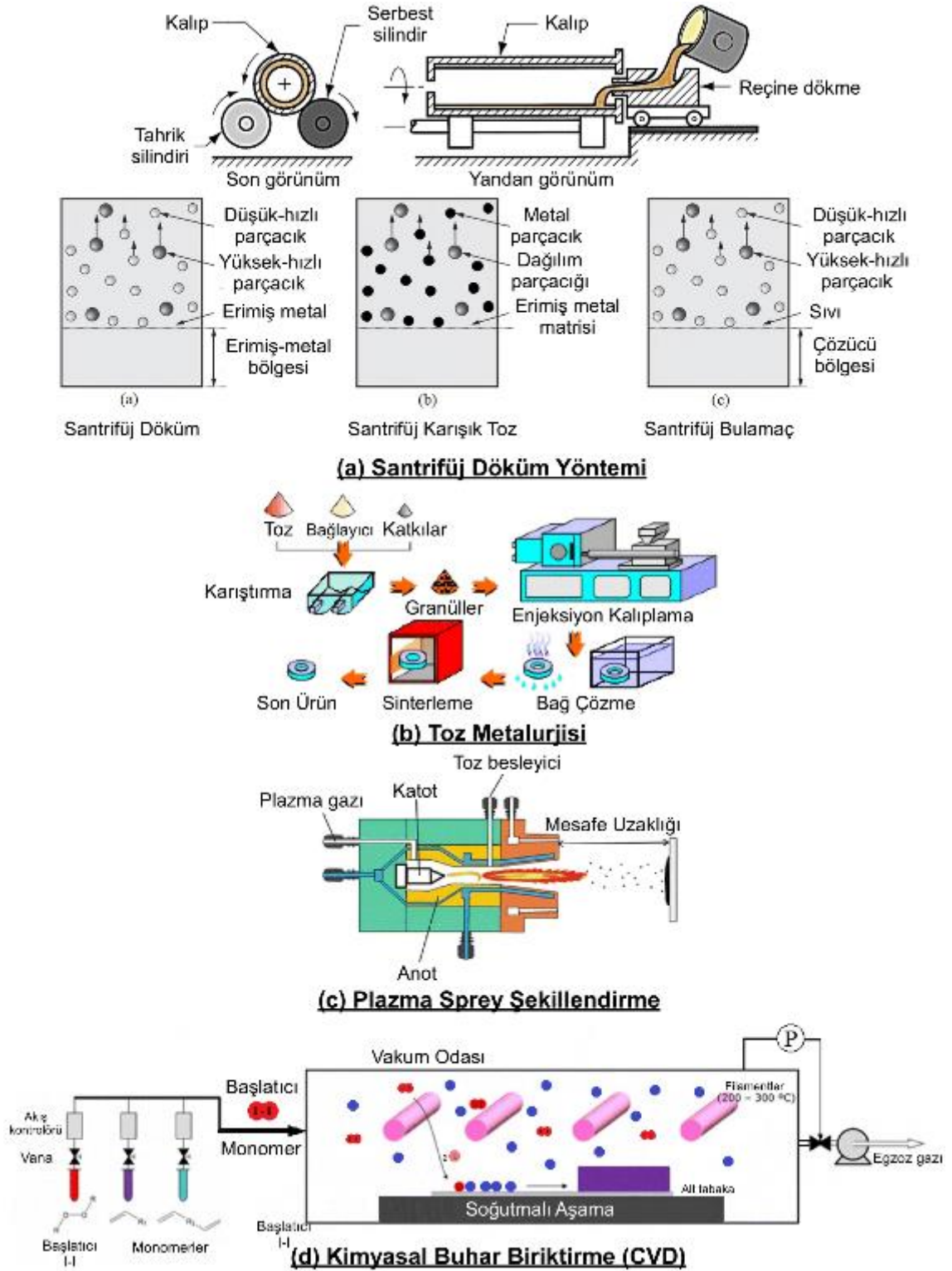
Lazer Katkı Üretimi / Additive Manufacturing (AM): Katman katman ilerleyen üretim sürecinde her bir katmanda bileşim değiştirilebilir. Karmaşık geometrili ve özel fonksiyonlara sahip parçaların üretimi için uygundur.

Santrifüj Döküm: Eriyik metalin dönme hareketiyle kalıba yerleşmesi sağlanır. Merkezden çevreye doğru bileşim farklılıkları oluşturularak fonksiyonel geçiş sağlanabilir.

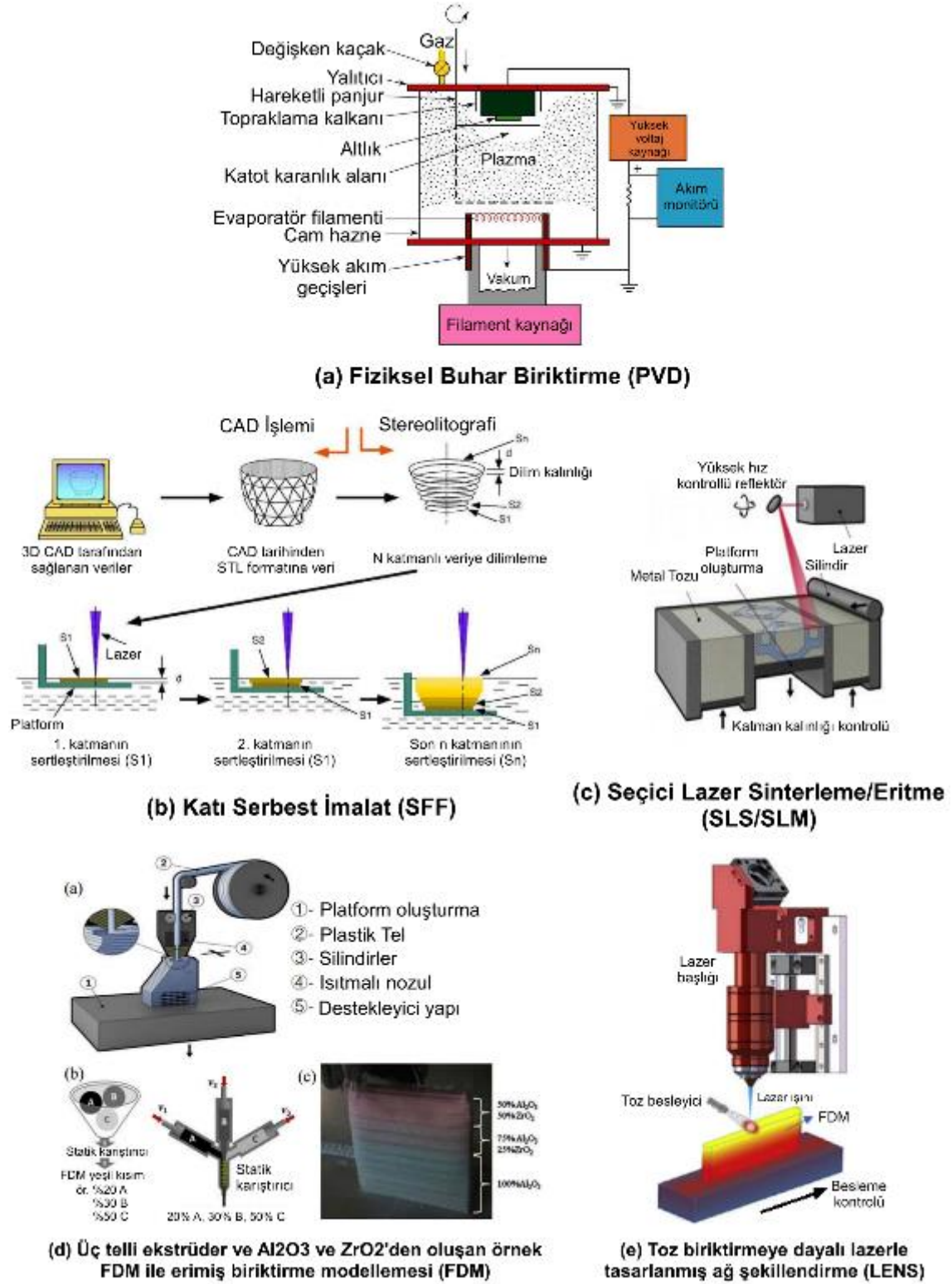
Ergitme Yöntemleri: Matris metali ergitilip takviye fazı ile karıştırılır ve dökülerek katılaştırılır. Özellikle alüminyum bazlı MMK'ler için kullanılır. Fakat takviye fazının homojen dağılımı zor olabilir.

Sprey Biriktirme / Püskürtme: Eriyik matris ve takviye parçacıkları birlikte yüzeye püskürtülür. Hızlı katılma ile ince taneli mikroyapı elde edilir.

Uygulanan yöntemin seçimi; üretilecek parçanın geometrisine, kullanılacak matris ve takviye malzemelerine ve hedeflenen mekanik/fiziksel özelliklere bağlı olarak belirlenir. FDM'lerin üretim yöntemlerine ait şematik görüntüler Şekil 1.19 ve 1.20'de verilmiştir.



Şekil 1.19. FDM üretimi için yaygın olarak kullanılan teknikler (Ansari vd., 2010; Popoola vd., 2016; Tripathy vd., 2018; Watanabe vd., 2011).



Şekil 1.20. FDM üretimi için yaygın olarak kullanılan teknikler (Kumar & Chandrappa, 2014; Leu vd., 2012; Seol vd., 2012; Zhang vd., 2019)

1.8. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, metalik veya seramik tozların belirli bir dizi proses yardımıyla kontrollü şekilde şekillendirilerek, katı ve yoğun yapıdaki ürünlere dönüştürülmesini sağlayan ileri düzey bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, klasik imalat yöntemlerinden olan döküm, dövme, talaşlı imalat ve kaynak gibi işlemlerden farklı olarak katı hal işleme esasına dayanmakta ve bu yönüyle özellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin ve alaşımların şekillendirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır (Selcuk vd., 2010). Katı fazda gerçekleşen bu işlemler sırasında difüzyon mekanizmaları, sinterleme kinetiği, yüzey enerjisi değişimleri ve faz dönüşümleri gibi temel metalurjik prensipler devreye girmekte ve nihai ürünün mikro yapısı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır (Angelo vd., 2022; Kumar vd., 2020).

Toz metalurjisi süreci; başlangıçta toz üretimi, ardından karıştırma ve/veya mekanik alaşımlama, şekillendirme (genellikle presleme), sinterleme ve son işlemler (ısıl işlem, yüzey işlem, infiltrasyon, sıcak izostatik presleme vb.) gibi ardışık adımları içerir. Bu süreç boyunca tozların morfolojisi, tane büyüklüğü dağılımı, yoğunluk, partikül şekli ve kimyasal homojenliği gibi parametreler hassas şekilde kontrol edilerek, hedeflenen mekanik, fiziksel ve fonksiyonel özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir. Özellikle yüksek spesifik dayanım, korozyon ve aşınma direnci, termal kararlılık ve elektriksel/termal iletkenlik gibi çoklu performans kriterlerinin aynı anda sağlanması gereken uygulamalarda toz metalurjisi, geleneksel üretim tekniklerinin sağlayamayacağı düzeyde üstünlükler sunar (Selcuk vd., 2010; Suryanarayana, 2001).

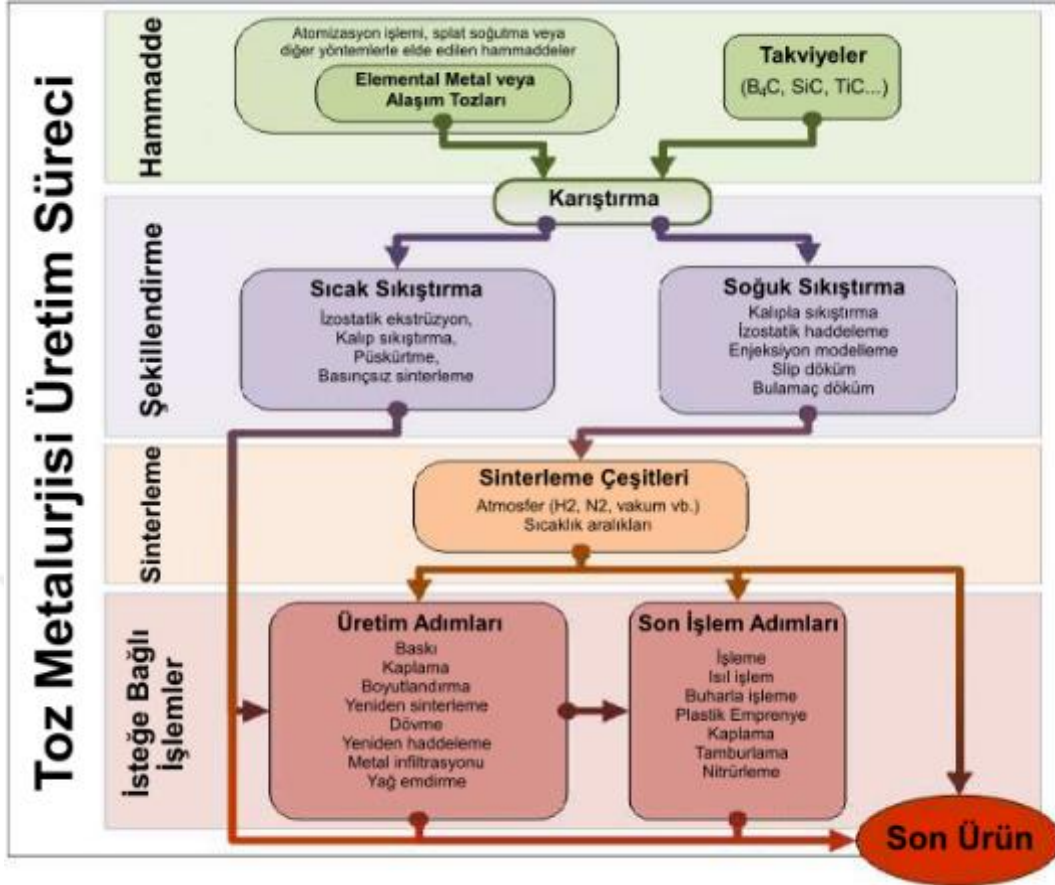
Bu yöntemin öne çıkan bir diğer avantajı ise geometrik esneklik ve net şekle yakın üretim (near-net-shape) yeteneğidir. Karmaşık iç yapıların, ince cidarlı veya porozite kontrollü yapıların üretimi mümkündür. Bu özellik sayesinde biyomedikal alanda kemik doku ile uyumlu gözenekli implant üretiminden, havacılık endüstrisinde yüksek sıcaklığa dayanıklı iç kanallı parçalara kadar birçok kritik bileşen toz metalurjisi ile etkin biçimde üretilmektedir. Ayrıca kontrollü gözeneklilik, sadece mekanik amaçlar için değil, filtrasyon, ses yalıtımı, gaz difüzyonu ve ısı transferi gibi işlevsel özelliklerin de entegre edilebilmesini mümkün kılar (Ping ve Kuangdi, 2024).

Toz metalurjisinin çevresel ve ekonomik avantajları da göz ardı edilemez niteliktedir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri, hammadde üzerinde büyük miktarda işleme gerektirdiğinden yüksek oranda malzeme israfına neden olurken, toz metalurjisi yöntemiyle

malzeme kullanımı optimize edilmekte, fire oranı %5'in altına düşürülebilmektedir (Arrizubieta vd., 2020). Ayrıca talaş oluşmadığı için hem kesici takım ömrü uzamakta hem de ikincil işlem yükü ve enerji tüketimi azalmaktadır. Bu durum, özellikle sürdürülebilir üretim ve döngüsel ekonomi perspektifinden bakıldığında, toz metalurjisini oldukça çevreci bir alternatif haline getirmektedir (Azevedo vd., 2018).

Fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM), metal matrisli kompozitler (MMK), seramik matrisli kompozitler (CMC) ve hibrit yapılar gibi çok fazlı sistemlerin üretimi de toz metalurjisi ile yüksek hassasiyetle gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür yapılar, farklı bölgelerde farklı özellikler gerektiren kritik uygulamalar için geliştirilmiş mühendislik malzemeleridir (Seikh vd., 2024). Örneğin bir parçada yüzeyde yüksek aşınma direnci, iç kısımda ise darbe sönümleme yeteneği gerekiyorsa, bu yapılar toz metalurjisi ile katman katman tasarlanarak üretilebilir. Özellikle mekanik olarak gradelenmiş veya takviye oranı kademeli olarak değişen kompozit yapılar, konvansiyonel yöntemlerle üretilemeyecek kadar karmaşıktır ve toz metalurjisi bu açıdan eşsiz bir tasarım özgürlüğü sunar (Tripathy vd., 2020).

Bu nedenle toz metalurjisi, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv endüstrisi, biyomedikal mühendisliği, nükleer enerji sistemleri, elektronik ve elektromanyetik cihazlar, savunma teknolojileri ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi çok geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Bu alanlarda yüksek performans, hafiflik, işlevsellik, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirlik kriterlerinin aynı anda sağlanması gerektiği için toz metalurjisi vazgeçilmez bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır (Akhtar vd., 2018). Toz metalurjisi üretimine ait akış şeması Şekil 1.21'de verilmiştir.



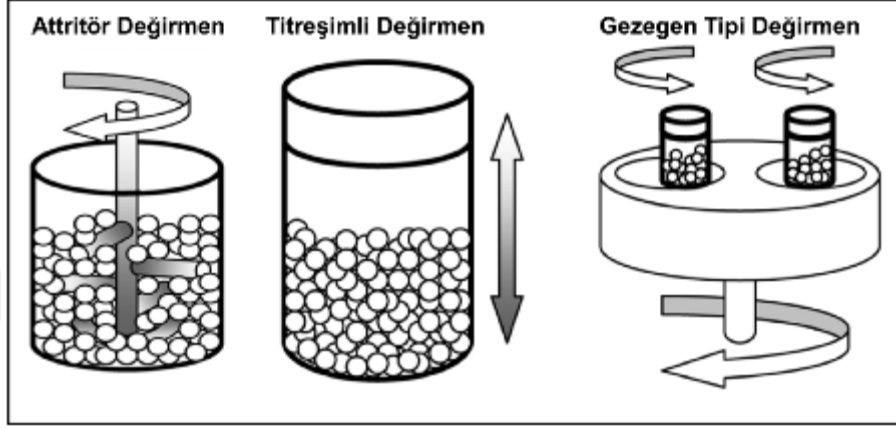
Şekil 1.21. Toz metalurjisi yönteminin üretim sürecine ait akış şeması (Rao vd., 2018)

1.8.1. Toz Üretim Teknikleri

Toz metalurjisi sürecinin başlangıç aşaması olan toz üretimi, nihai ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Metalik tozların morfolojisi, tane büyüklüğü, kimyasal saflığı ve yüzey enerjisi gibi özellikleri, üretim yöntemine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle, farklı toz üretim teknikleri arasında seçim yapılırken, kullanılacak matris veya takviye malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile hedeflenen uygulama dikkate alınmalıdır (Makarenko ve Hetman, 2024).

Atomizasyon yöntemi, ergimiş metalin yüksek basınçlı gaz veya sıvı (genellikle su) jeti yardımıyla küçük damlacıklara ayrılması ve hızlı bir şekilde katılaştırılması esasına dayanır. Bu yöntemle elde edilen tozlar genellikle küresel veya düzensiz morfolojide olup, yüksek yoğunluklu ve iyi akışkanlığa sahip ürünler sunar. Gaz atomizasyonu, oksidasyon hassasiyeti olan alaşımlar için inert atmosfer altında uygulanabilmekte ve bu sayede yüzey kalitesi artırılabilir (Schade ve Dunkley, 2015).

Mekanik öğütme (ball milling) yöntemi ise özellikle katı halde alaşım üretimi veya metal matrisli kompozit tozların hazırlanması için tercih edilmektedir. Bu yöntemde, tozlar yüksek enerjili bilyalı değirmenlerde mekanik etkiyle parçalanır, homojen karışır ve bazen amorf ya da nanokristalin yapılar da oluşabilir. Mekanik alaşımlama sırasında mikroyapısal dönüşümler, deformasyon kaynaklı difüzyon ve tane incelmesi gibi etkiler ortaya çıkar (Şekil 1.22) (Suryanarayana, 2001).



Şekil 1.22. Çeşitli bilyalı değirmen tiplerinin şematik gösterimi (Joy vd., 2022)

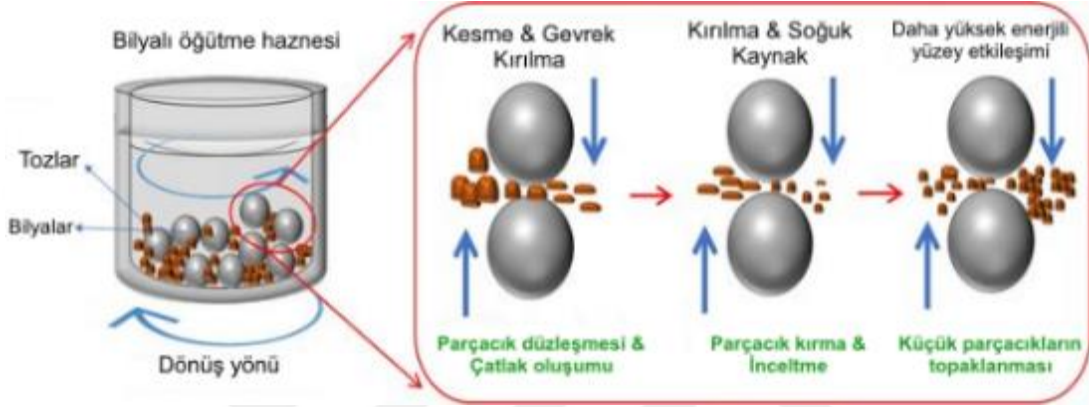
Kimyasal redüksiyon ve elektroliz yöntemleri ise daha çok yüksek saflıkta toz üretiminde kullanılır. Metal oksitlerin kontrollü ortamda indirgenmesiyle elde edilen tozlar genellikle düzensiz şekilli, süngerimsi yapıda olurken, elektrolitik yöntemle üretilen tozlar daha iri, levhamsı veya dendritik formda olabilir (Schade, 2015).

1.8.2. Toz Karışımı ve Mekanik Alaşımlama

Toz metalurjisi sürecinde, homojen kompozit yapıların elde edilebilmesi için kullanılan tozların etkin şekilde karıştırılması gerekmektedir. Karışım homojenliği, ürünün mekanik özelliklerini ve mikro yapısını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Karışım işlemi kuru veya ıslak olarak gerçekleştirilebilir ve bu işlemde V-tipi mikserler, konik mikserler, çift helezonlu karıştırıcılar gibi çeşitli ekipmanlar kullanılır. Karışım süresi, bilye-toz oranı, katkı maddelerinin oranı gibi faktörler, tozlar arası yüzey temasını ve bağ oluşumunu etkiler (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlama (mechanical alloying, MA), konvansiyonel karıştırma işlemlerinden farklı olarak yalnızca bileşen tozlarının homojen dağılımını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda yüksek enerjili çarpışmalar sonucu oluşan plastik deformasyon,

soğuk kaynak (cold welding), kırılma ve yeniden kaynak mekanizmaları aracılığıyla atomlar arası difüzyonu tetikleyerek yeni fazların oluşumunu mümkün kılan bir ileri üretim tekniğidir (Rokkala vd., 2024). Bu yöntem ilk olarak 1970’li yıllarda INCO firması tarafından geliştirilmiş olup, özellikle katı hal reaksiyonları ve termodinamik olarak dengede olmayan yapılar üretmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Benjamin ve Volin, 1974). Şekil 1.23’ de gezegen tipi bilyalı değirmenin çalışma prensibini gösteren şematik görüntü sunulmuştur.



Şekil 1.23. Gezegen tipi bilyalı değirmenin şematik görüntüsü (Rosario vd., 2022)

Mekanik alaşımlama süreci sırasında metalik veya seramik esaslı tozlar, yüksek enerjili bir değirmende (örneğin planetary ball mill, attritor mill, shaker mill gibi) sürekli olarak darbelere maruz kalır. Bu darbeler, partiküllerin tekrar tekrar kaynaklanması ve kırılmasıyla sonuçlanarak, mikro yapıda önemli değişimlere neden olur (Suryanarayana, 2001). Özellikle;

- Tane boyutunun nanometre ölçeğine kadar indirgenmesi (grain refinement),
- Dislokasyon yoğunluğunda artış ve kristal yapıda yüksek düzeyde deformasyon birikimi,
- Amorf veya nanokristalin yapılar gibi denge dışı fazların oluşumu,
- Katı çözelti oluşumu ve intermetalik bileşiklerin sentezi gibi önemli yapısal dönüşümler gözlemlenebilir.

Bu teknik, özellikle farklı ergime sıcaklıklarına ve çözünürlük limitlerine sahip sistemlerin birlikte işlenmesinde büyük avantaj sağlar. Örneğin, metal-matrisli kompozitler (MMK’ler), seramik parçacık takviyeli alaşımlar, fonksiyonel dereceli malzemeler

(FDM'ler) ve yüksek entropili alaşımlar (HEAs) gibi çok fazlı ve karmaşık yapıların üretimi mekanik alaşımlama yoluyla başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir (Vaidya vd., 2019).

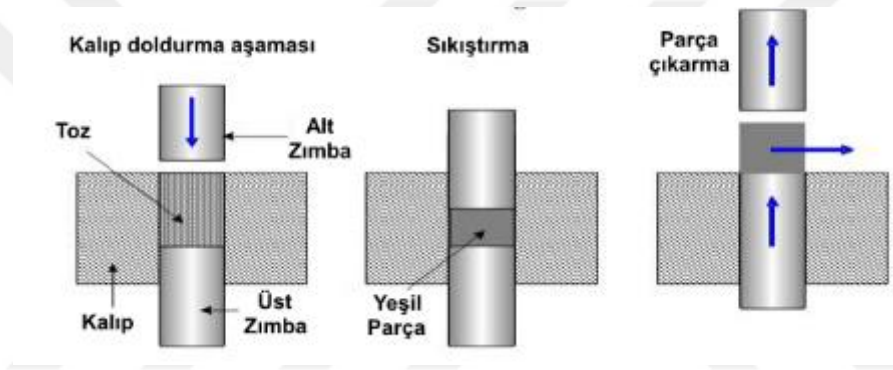
Mekanik alaşımlama sürecinde en kritik parametreler şunlardır (Gusev vd., 2019; Sahu vd., 2023):

- Değirmen tipi: Planetary ball mill, attritor mill gibi farklı değirmen türleri, darbe şiddeti ve frekansı açısından farklılık gösterir. Planetary değirmenlerde merkezkaç kuvvetleri çok daha yüksektir ve bu da daha etkin deformasyon sağlar.
- Bilye/malzeme oranı (ball-to-powder weight ratio, BPR): Tipik olarak 10:1 ile 20:1 arasında değişen bu oran, değirme etkinliğini doğrudan etkiler. Yüksek oranlar, daha şiddetli çarpışmalar ve dolayısıyla daha hızlı faz dönüşümü anlamına gelir.
- Değirme süresi: Süre arttıkça difüzyon, faz dönüşümü ve tane küçülmesi daha belirgin hale gelir. Ancak aşırı değirme, tozların aşırı oksidasyonuna veya kontaminasyonuna neden olabilir.
- Değirmen hızı: Dönüş hızı çarpışma enerjisini belirleyen başlıca faktördür. Düşük hızlarda deformasyon sınırlı olurken, çok yüksek hızlarda aşırı ısı birikimi nedeniyle bazı istenmeyen fazlar da oluşabilir.
- İnert atmosfer kullanımı: Oksidasyonu önlemek amacıyla işlem genellikle argon veya azot gibi inert gaz ortamında gerçekleştirilir. Bazı özel uygulamalarda vakum altında da uygulanabilir.
- Toplam atmosfer basıncı ve nem: Özellikle metal matrisli sistemlerde oksijen veya nemin varlığı, ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Mekanik alaşımlama sonucunda elde edilen tozlar, sinterleme gibi sonraki işlemlerde kullanılmak üzere yüksek yüzey enerjisine ve reaktifliğe sahip olur. Bu da özellikle toz metalurjisi yoluyla kompozit üretimi, fonksiyonel dereceli yapılar için katman oluşturma, nükleer uygulamalarda radyasyon dayanımlı yapılar ve savunma sanayiinde balistik dayanımı yüksek kompozitler gibi alanlarda geniş uygulama imkanları sunar (Suryanarayana vd., 2022).

1.8.3. Tozların Sıkıştırılması

Tozların nihai ürün formuna getirilmesinde kullanılan şekillendirme yöntemleri, parçanın geometrisi, hassasiyet seviyesi ve üretim miktarına göre değişkenlik gösterir. En yaygın yöntemlerden biri olan soğuk presleme, genellikle tek eksenli (uniaxial) veya izostatik (CIP - Cold Isostatic Pressing) olarak gerçekleştirilir (Neikov vd., 2019). Bu yöntemde, tozlar belirli bir kalıba doldurularak yüksek basınç altında sıkıştırılır ve kompakt hâle getirilir. Uygulanan basınç genellikle 200 -800 MPa aralığındadır. Soğuk presleme sonrası elde edilen “yeşil parça”, sinterleme öncesi yeterli mekanik dayanımı sağlayacak şekilde form kazanır (Radchenko, 2004). Şekil 1.24’te tozların sıkıştırılma süreci şematik olarak gösterilmiştir.



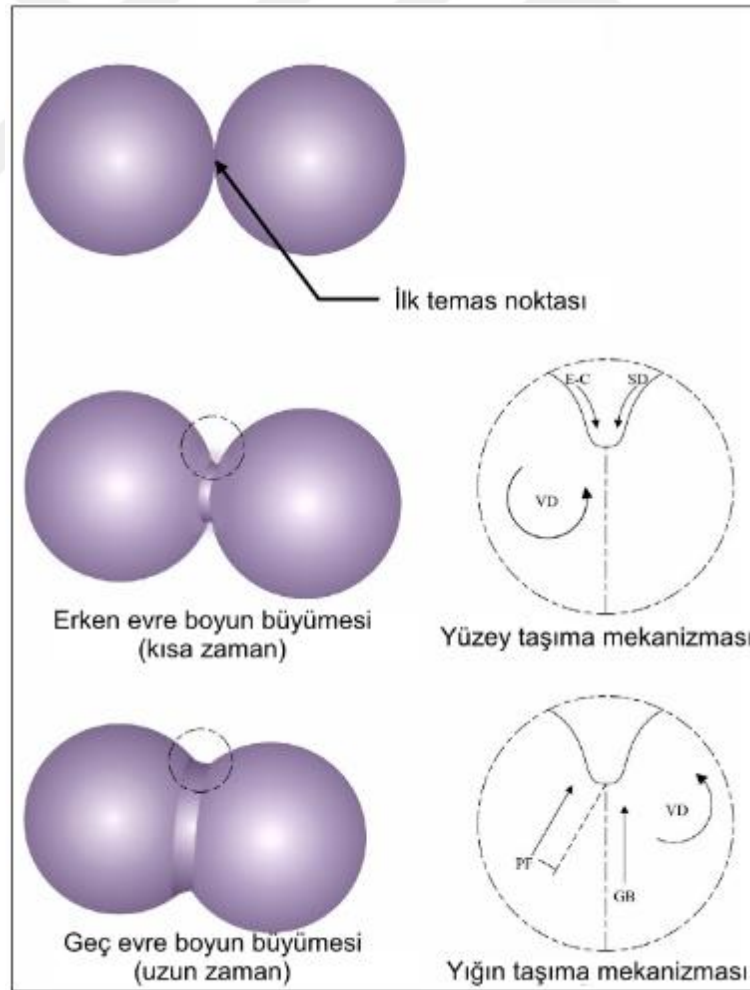
Şekil 1.24. Tozların sıkıştırılma aşamalarının gösterilmesi (Alshataif vd., 2020)

Sıcak presleme, aynı anda hem basınç hem de sıcaklık uygulanarak gerçekleştirilen bir şekillendirme yöntemidir. Bu işlem, özellikle düşük sinterleme kabiliyetine sahip tozlar için tercih edilir. Sıcaklık etkisiyle difüzyon hızları artar, daha az gözenekli ve daha homojen yapı elde edilir. Bu yöntemle üretilen parçalar yüksek yoğunluğa sahiptir ve genellikle ısıya dayanıklı alaşımların üretiminde kullanılır (Finrock vd., 2018; Murali vd., 2024).

Buna ek olarak, metal enjeksiyon kalıplama (MIM) ve toz ekstrüzyon yöntemleri de kompleks geometriye sahip parçaların üretiminde kullanılabilir. MIM süreci, plastik bağlayıcılarla karıştırılmış tozların enjeksiyon kalıplama ile şekillendirilip daha sonra sinterlenmesi esasına dayanır. Bu yöntem, yüksek hacimli üretime olanak tanır ve mikro parçaların üretimi için uygundur (Teferi ve Tsegaw, 2022).

1.8.4. Sinterleme

Sinterleme, toz metalurjisi sürecinin en kritik aşamalarından biridir. Bu işlem sırasında, daha önceden preslenerek belirli bir şekle sokulmuş olan yeşil kompaktlar, belirli sıcaklık ve atmosfer koşulları altında ısıtılarak mikroyapısal bağların oluşması sağlanır. Sinterleme sırasında atomlar, yüzey enerjilerini azaltmak amacıyla katı hal difüzyonu yoluyla hareket eder ve bu süreç sonucunda toz partikülleri arasında boyun oluşumu, tane büyümesi ve gözeneklerin kapanması gibi yapısal değişiklikler meydana gelir (German, 2010). Uygulanan sıcaklık, genellikle malzemenin erime noktasının %70 -85'i arasında seçilir. Örneğin, alüminyum esaslı sistemlerde sinterleme sıcaklığı genellikle 580 -620 °C aralığındadır. Sinterleme süresi ise parçanın kalınlığı, hedeflenen yoğunluk ve mikroyapı kontrolüne bağlı olarak birkaç dakikadan birkaç saate kadar sürebilir (Mohd Tajuddin ve Jamaludin, 2016; Shetty vd., 2022). Şekil 1.25'te sinterleme işlemi sırasında meydana gelen aşamaların şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.25. Sinterleme işleminin aşamalarını gösteren şematik görüntü (Li, 2003)

Sinterleme sırasında ortam atmosferi hem mikroyapı gelişimi hem de yüzey oksitlenmesi açısından büyük önem taşır. Oksidasyona karşı hassas metaller için inert gazlar (argon, azot) veya indirgen gazlar (hidrojen) tercih edilir. Özellikle bor karbür (B_4C) gibi seramik takviyeli kompozitlerde, sinterleme sırasında metal-seramik arayüzeylerinde reaksiyon oluşumunu kontrol etmek için atmosferin yanı sıra sıcaklık rejimi de dikkatle optimize edilmelidir (Sun vd., 2023). Ayrıca bazı uygulamalarda sıvı faz sinterleme tekniği de kullanılır. Bu yöntemde, bileşenlerden biri sinterleme sıcaklığında sıvı hale geçerek diğer tozlarla ıslatma ve bağlayıcılık sağlayarak daha yoğun ve dayanıklı yapıların oluşmasına katkı sunar (Turkoglu ve Celik, 2021).

Yeni nesil sinterleme teknolojilerinden biri olan mikrodalga sinterleme, ısının mikrodalga radyasyonu ile doğrudan malzeme içinde üretilmesini sağlar. Bu yöntem ile daha kısa sürede, daha düşük enerji tüketimiyle sinterleme gerçekleştirilebilir ve aynı zamanda tane büyümesi de kontrol altında tutulabilir. Spark Plasma Sintering (SPS) yöntemi ise elektriksel akımın doğrudan kompakt üzerine uygulanarak hem hızlı ısınma hem de kontrollü difüzyon sağlar; bu sayede nanoyapılı malzemelerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Batienkov vd., 2022).

1.9. Literatürdeki İlgili Çalışmaların İncelenmesi

Son yıllarda alüminyum esaslı alaşımların düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemetleri ve şekillendirilebilirlikleri nedeniyle, özellikle savunma, havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanım oranı hızla artmıştır. Bu alaşımlar arasında yer alan AA2024, Cu katkısı sayesinde yüksek mekanik dayanım ve sertlik sunan, yapısal uygulamalarda yaygın kullanılan bir malzemedir. Ancak bu alaşımın mekanik performansını ve aşınma direncini daha da artırmak amacıyla, matris içerisine seramik takviye fazlarının entegre edilmesi yönünde birçok bilimsel araştırma yürütülmektedir.

Bu kapsamda, B_4C (bor karbür), düşük yoğunluğu (2.52 g/cm^3), yüksek sertliği (3200 kg/mm^2), yüksek erime sıcaklığı ($2763 \text{ }^\circ\text{C}$) ve mükemmel kimyasal kararlılığı ile, Al matrisli kompozit sistemlerde en yaygın tercih edilen seramik takviyelerden biri haline gelmiştir. SiC ve Al_2O_3 gibi geleneksel seramik takviyelere kıyasla hem daha düşük ağırlık sunması hem de daha yüksek özgül mukavemet kazandırması, B_4C 'yi özellikle balistik ve yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için cazip hale getirmiştir. Ayrıca B_4C , nötron

soğurucu özellik göstermesi nedeniyle, sadece mekanik değil, radyasyon koruma uygulamalarında da dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Literatürde yapılan birçok çalışma, B_4C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mikro yapı, sertlik, aşınma ve mekanik performans açısından iyileştirici etkilerini ortaya koymuştur. Luo ve arkadaşları (2017), AA2024/ B_4C kompozitlerinin ağırlıkça %17,5 B_4C 'de optimum mekanik performansa ulaştığını, daha yüksek içeriklerin aglomerasyona ve mukavemetin azalmasına neden olduğunu bildirmiştir. Dislokasyon ve yük taşıma mekanizmalarının öncelikle gözlemlenen gelişmelere katkıda bulunduğunu bulmuşlardır. Karabacak ve arkadaşları (2022) toz metalurjisi kullanarak nano boyutlu B_4C ve SiC ile güçlendirilmiş AA2024 hibrit nanokompozitler üzerinde çalışmıştır. Artan takviyenin, ağırlıkça %5 B_4C /SiC'de maksimum 179,4 HB ile sertliği artırdığını bulmuşlardır. Korozyon direnci de önemli ölçüde iyileşmiştir; güçlendirilmiş kompozit, güçlendirilmemiş AA2024'ten yaklaşık 14 kat daha düşük bir korozyon akımı yoğunluğuna sahiptir. Doğan ve Mutlu (2022), toz metalurjisi kullanarak B_4C -SiC ve B_4C - Y_2O_3 ile güçlendirilmiş AA2024 bazlı kompozitler üretmiştir. Değişen takviye boyutları ve oranlarının aşınma direnci, sertlik ve yoğunluk üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kompozitler 525 MPa'da sıkıştırılmış ve farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş, takviye tipi, boyutu ve oranının mekanik ve fiziksel özellikleri önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Beder (2025), farklı B_4C içeriklerine sahip Al2024/ B_4C kompozitleri incelemiş ve artan takviyenin sertliği ve aşınma direncini iyileştirdiğini, aşırı B_4C 'nin (ağırlıkça %40) ise kırılma eğilimi nedeniyle eğilme mukavemetini azalttığını bulmuştur. En yüksek θ ($CuAl_2$) fazı içeriği ağırlıkça %40 B_4C 'de gözlenmiştir. SEM analizi, delaminasyon, yapışma ve bulaşma ile aşınma yüzeyleri göstermiştir.

Ancak literatürde, kompozit yapının fonksiyonel dereceli olarak tasarlandığı, yani takviye oranının malzeme boyunca kademeli değiştiği ve bu yapıların mekanik ve radyasyon sönümlenme özelliklerine etkisinin birlikte incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Oysa fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM), hem gerilme birikimlerini azaltma hem de çoklu işlevsellik sağlama açısından klasik homojen yapılara göre ciddi avantajlar sunmaktadır. Yapının farklı bölgelerine farklı takviye yoğunluklarının yerleştirilmesiyle; yüzeyde sertlik ve aşınma direnci, iç bölgelerde ise darbe dayanımı gibi özellikler dengeli bir şekilde optimize edilebilmektedir. Ayrıca bu yaklaşım, malzeme boyunca kontrollü mikroyapı değişimi sağladığı için, radyasyon soğurma özelliklerinin de enerjiye bağlı olarak katmanlar arasında değişim göstermesini mümkün kılar.

Literatürde FDM yapılar üzerine yapılan sınırlı sayıda çalışmadan biri, Morales ve arkadaşları (2016), B₄C-Al sermetlerinde bileşimsel ve mikroyapısal gradyanlar oluşturmak için elektroforetik biriktirme (EPD) kullanımını araştırdı. Gradyan oluşumunu kontrol ederek, gelişmiş uygulamalar için malzeme özelliklerini uyarladılar. Tasarlanan yapılara sahip B₄C yeşil gövdeler, basınçsız sinterleme yoluyla Al ile başarılı bir şekilde infiltre edildi ve EPD'nin işlevsel olarak derecelendirilmiş sermetler üretme potansiyelini gösterdi. Xu ve arkadaşları (2019), B₄C partikül boyutunun yarı sürekli döküm ve sıcak haddeleme yoluyla üretilen Al matris katmanlı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdılar. Horsfield dolum prensibini kullanarak partikül boyutunu ve dağılımını optimize etmişlerdir. Artan B₄C partikül boyutunun ve ince partikül fraksiyonunun sertliğin azalmasına yol açtığını, ancak arayüzey artık gerilimi ve partiküller arası aralığa atfedilen darbe ve çekme mukavemetini artırdığını bulmuşlardır. Ambigai ve Prabhu (2021) ise, santrifüj döküm kullanarak uzaysal olarak dağıtılmış silisyum nitrürlü alüminyum alaşımı (ADC-14) kompozitleri üretti. L4 ortogonal dizileri kullanarak kalıp dönüş hızını (800 ve 1200 RPM), takviye boyutunu (50 µm, 100 µm) ve hacim oranını (%8, %12) optimize ettiler. Optik mikroskopi, SEM ve EDS derecelendirilmiş yapıyı doğruladı. En yüksek sertlik, %12 takviye ve 50 µm parçacıklarla elde edildi ve çekirdeğe kıyasla dış bölgede %19'luk bir artış gösterdi. Chao ve arkadaşları (2022) ise, sıkma döküm yoluyla işlevsel olarak derecelendirilmiş B₄C/2024Al kompozitler (%70-47-25 B₄C) geliştirmiş ve bunların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Al-B₄C arayüzünde Mg ve O ayrışması, MgO oluşumuna ve katmanlar arasında faz farklılıklarına yol açmıştır. Eğilme mukavemeti ve elastik modül, 953,4 MPa ve 240,3 GPa tepe değerleri ile gradyan davranışı göstermiştir. Bulgular, B₄C/Al kompozitler için arayüz tasarımının ve ısıtma işlemin optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Ambigai ve Prabhu (2022) ise, santrifüj döküm yoluyla üretilen silikon nitrür (Si₃N₄) ile güçlendirilmiş bir ADC-14 alüminyum matris kullanarak işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemeler üzerinde çalıştılar. Parçacık boyutunu (50 µm ve 100 µm) ve hacim oranını (%8 ve %12) değiştirerek mekanik özellikler üzerindeki etkileri analiz etmişlerdir. Testler, FDM halkalarının dış bölgelerinin daha yüksek Si₃N₄ konsantrasyonu nedeniyle daha yüksek sertlik, çekme ve basınç dayanımına sahip olduğunu ve başarılı kademeli dağılımı doğruladı. Sheraf ve Solomon (2023) ise, toz metalürjisi kullanarak katmanlar arasında değişen SiC takviyesi ile dört katmanlı işlevsel olarak derecelendirilmiş bir alüminyum matris kompozit (FG AMMC) geliştirdi. Testler, daha yüksek SiC içeriği ile artan yoğunluk ve sertliği ortaya çıkarmış ve en üst katman 146 HV'ye ulaşmıştır. Kompozit,

gelişmiş basınç dayanımı (160 MPa) ve düzgün takviye dağılımı göstermiştir. Mikroyapısal analiz, güçlü parçacık bağını ve minimum kusurları doğrularak FG AMMC'yi dişliler ve tahrik milleri gibi uygulamalar için uygun hale getirdi.

Literatürde FDM yapılar üzerine yapılan sınırlı sayıda çalışmadan biri de, zırh sistemlerinde bu malzemelerin potansiyelini ortaya koymaktadır. Fonksiyonel dereceli malzemeler, balistik darbelere karşı çok katmanlı ve enerji soğurucu yapı özellikleriyle geleneksel zırh sistemlerine kıyasla önemli avantajlar sunar. Yüksek sertlik gerektiren dış katmanlar ile enerji yayılımını destekleyen iç katmanların aynı yapı içerisinde kademeli olarak entegre edilmesi, hem mukavemet hem de darbe sönümleme kapasitesini artırmaktadır. Bu sayede, mermi çekirdeğinin ilk temas noktasında parçalanması sağlanırken, arka katmanlarda kinetik enerjinin kontrollü şekilde dağılması mümkün olmaktadır. Ayrıca, katmanlı yapı sayesinde oluşabilecek ani gerilme yığılmaları minimize edilirken, çatlak ilerleme eğilimleri de bastırılabilir. Özellikle B_4C , SiC , Al_2O_3 gibi yüksek sertlikte seramiklerle desteklenen FDM yapılar, hafiflik ve çok yönlü koruma özellikleri nedeniyle modern zırh sistemlerinde hem askeri hem de sivil uygulamalarda gelecek vaat eden çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar aşağıda örnek olarak sunulmuştur:

Arslan ve arkadaşları (2017), alüminyum petek çekirdeklerden ve Al/SiC fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yüzey levhalarından oluşan yeni bir sandviç yapının balistik tepkisini araştırdılar. Gaz tabancası kullanılarak yapılan deneyler ve LS-DYNA® ile simülasyonlar yürütüldü ve malzeme özellikleri kuvvet yasası gradyanları ve Mori-Tanaka ve TTO modelleri kullanılarak modellendi. Metal açısından zengin ($n = 0,1$), doğrusal ($n = 1,0$) ve seramik açısından zengin ($n = 10,0$) kompozisyonları test ettiler. Sonuçlar, seramik içeriğinin enerji emilimini ve hasar davranışını önemli ölçüde etkilediğini, doğrusal gradyanın ($n = 1,0$) en iyi genel balistik performansı sunduğunu gösterdi. Kırmızı ve arkadaşları ise (2019), toz metalurjisi yoluyla üretilen, SiC ile takviye edilmiş $Al7075$ bazlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozitlerin mekanik ve balistik performansını araştırdılar. Artan SiC içeriğine sahip (ağırlıkça %15-60) dört katmanlı FDM'ler üretildi ve Al köpüğü ile birleştirilerek beş katmanlı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpük malzemeleri (FDFM'ler) oluşturuldu ve $750\text{ }^{\circ}C$ 'de köpürtüldü. SEM ve optik mikroskopi, düzgün SiC dağılımını ve iyi arayüz bağlanmasını doğruladı. Sertlik ve enine kopma mukavemeti daha yüksek SiC içeriğiyle arttı ve optimum balistik performans, $500\text{ }^{\circ}C$ ve 400 MPa 'da elde edildi; bu da minimum penetrasyon derinliği ve etkili enerji emilimi gösterdi.

Aydin ve arkadaşları (2020) ise, farklı katman sayıları ve seramik hacim fraksiyonlarına sahip Al6061-SiC fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç plakaların (FGSP'ler) balistik performansını deneysel olarak incelediler. Toz istifleme ve sıcak presleme yoluyla üretilen plakalar, alüminyum dış katmanlara ve derecelendirilmiş ara katmanlara sahipti. 0,3 kalibrelik mermiler kullanılarak yapılan balistik testler, en üstteki alüminyum katmanının hemen altındaki seramik içeriğinin performansı önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. %60'ın üzerindeki bir seramik hacim fraksiyonu balistik direnci azaltırken, daha düşük fraksiyonlar penetrasyonu artırdı. Ek olarak, derecelendirilmiş katmanların sayısının artırılmasının genel balistik performans üzerinde minimum etkisi oldu. Sharma ve arkadaşları (2022) ise, sıcak basınç destekli sinterleme kullanarak, değişen seramik gradyanları (kuvvet yasası indeksleri $N = 0,5, 1, 2,5$) kullanarak beş katmanlı bor karbür takviyeli Al -Zn -Mg -Cu fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) ürettirtiler. FDM $N = 2,5$ en yüksek sertliği (266,7 HV) ve basınç dayanımını (597 MPa) gösterdi. 700 m/s'de yapılan balistik testler, FDM'lerde $N = 1$ ve 2,5'te üstün direnç ortaya koydu ve penetrasyon derinliğini $N = 0,5$ 'e kıyasla sırasıyla %36,27 ve %26,89 oranında azalttı. Seramik açısından zengin üst katman kinetik enerjiyi etkili bir şekilde dağıttı ve analitik sonuçlar gözlemlenen balistik performansı doğruladı. Bu FDM'ler hafif zırh uygulamaları için ümit vericidir. Karabulut ve arkadaşları (2023) ise, karıştırma ve santrifüj döküm ve ardından sıcak haddeleme kullanarak B₄C, SiC ve Al₂O₃ ile takviye edilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Al6061 kompozitleri ürettirtiler. Yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı ve balistik direnci incelediler. Mikroyapısal analiz, B₄C takviyeli FDM'lerde daha iyi parçacık dağılımı gösterdi. B₄C numuneler en düşük yoğunluğa ve üstün çekme dayanımına ve uzamaya sahipti. SiC ve Al₂O₃ takviyeleri daha yüksek sertlik artışları sağlarken, B₄C takviyeli FDM'ler en iyi balistik performansı göstererek 664,25 m/s'ye kadar darbe hızlarına dayandı ve penetrasyonu 14 mm ile sınırladı. Wang ve arkadaşları (2023) ise, balistik darbe altında delaminasyonu önlemek için keskin arayüzleri ortadan kaldıran, pürüzsüz kalınlık geçişli gradyanlara sahip B₄C/2024Al fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) geliştirdiler. 7,62 mm zırh delici mermilere karşı test edilen bu FDM'ler, iyileştirilmiş hasar toleransı ve enerji emilimi gösterdi. Doğrusal bir bileşimsel gradyan, çekme dalga gücünü azaltarak ve etkileşim süresini artırarak en iyi balistik performansı sağladı. Sayısal ve deneysel analizler, gradyan üssünün performans üzerindeki etkisini doğruladı. Eşlenik gradyan yöntemini kullanarak yapısal optimizasyon, hafif, yüksek verimli zırh sistemleri için umut verici bir strateji sunan ideal bir FDM tasarımına yol açtı. Chouhan ve arkadaşları (2024) ise, 7.62×39 mm çelik

çekirdekli mermilere karşı balistik koruma için toz metalurjisi kullanarak düşük alan yoğunluklu SiC/AA7075 fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) geliştirdiler. Değişen SiC içeriğine sahip (ağırlıkça %10-50) 3 ve 5 katmanlı FDM'ler ürettiriler ve bunları homojen bir %30 ağırlıkça SiC kompozitiyle karşılaştırdılar. Katmanlar istiflendi, sıcak preslendi ve sinterlendi, ardından sertliği artırmak için çözelti işlemi ve yaşlandırma uygulandı. Balistik testler, FDM'lerin penetrasyon direncinde homojen kompozitlerden daha iyi performans gösterdiğini gösterdi. Bir gerilim dalgası analizi, iyileştirilmiş performansı destekledi ve FDM'leri etkili hafif zırh çözümleri olarak vurguladı.

Son olarak, fonksiyonel dereceli malzeme (FDM) yapılarının sadece mekanik dayanım ve balistik direnç açısından değil, aynı zamanda radyasyon sönümleme performansı açısından da önemli avantajlar sunduğu çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur. Seramik ve metal fazların kademeli dağılımı sayesinde, geleneksel homojen yapılara kıyasla daha etkili bir gama ve nötron radyasyon kalkanlaması sağlanabilmektedir. Bu kapsamda, FDM yapılarla gerçekleştirilmiş bazı güncel radyasyon soğurma çalışmalarının örnekleri aşağıda sunulmaktadır. Gilys ve arkadaşları (2022), kalay, seryum oksit, tungsten oksit ve bizmut gibi yüksek atom numaralı katkı maddeleri kullanarak X-ışını radyasyon kalkanı için kurşunsuz, silikon bazlı çok katmanlı kompozitler geliştirdiler. Katkı maddesi konsantrasyonlarını ayarlayarak, kurşuna benzer X-ışını zayıflatma özelliklerine sahip esnek, çok katmanlı yapılar elde ettiler ve aynı zamanda olumlu mekanik özellikleri de korudular. Bu kompozitler, geleneksel kurşun bazlı kalkanlama malzemelerine umut verici bir alternatif sunuyor. Özkan ve Gökmen (2023) ise, Phy-X/PSD yazılımını kullanarak, değişen oranlarda B_4C ve TiO_2 içeren fonksiyonel olarak derecelendirilmiş hibrit kompozitlerin radyasyon koruma özelliklerini araştırdı. Doğrusal zayıflama katsayısı, yarı değer tabakası ve nötron giderme kesiti gibi temel parametreler analiz edildi. Sonuçlar, takviye oranının artırılmasının koruma verimliliğini iyileştirdiğini, %25 B_4C + %25 TiO_2 bileşiminin gama ışınlarına ve nötronlara karşı en iyi korumayı sağladığını gösterdi. Bu bileşim, yeni nesil radyasyon koruma uygulamaları için güçlü bir aday olarak belirlendi. Özkan ve arkadaşları farklı bir çalışmada ise (2025), ^{60}Co iyonlarıyla SRIM/TRIM Monte Carlo simülasyonlarını kullanarak, değişen oranlarda (%0-50) B_4C , TiO_2 ve B_4C+TiO_2 ile takviye edilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş AA6082 kompozitlerinin radyasyon hasarı davranışını araştırdılar. İyon dağılımını, hedef iyonizasyonunu ve atomik yer değiştirmeleri analiz ettiler. Saf AA6082 en yüksek iyon penetrasyonunu (8550 Å) gösterirken, TiO_2 iyon aralığını en etkili şekilde azalttı. B_4C takviyeli kompozit, yüksek

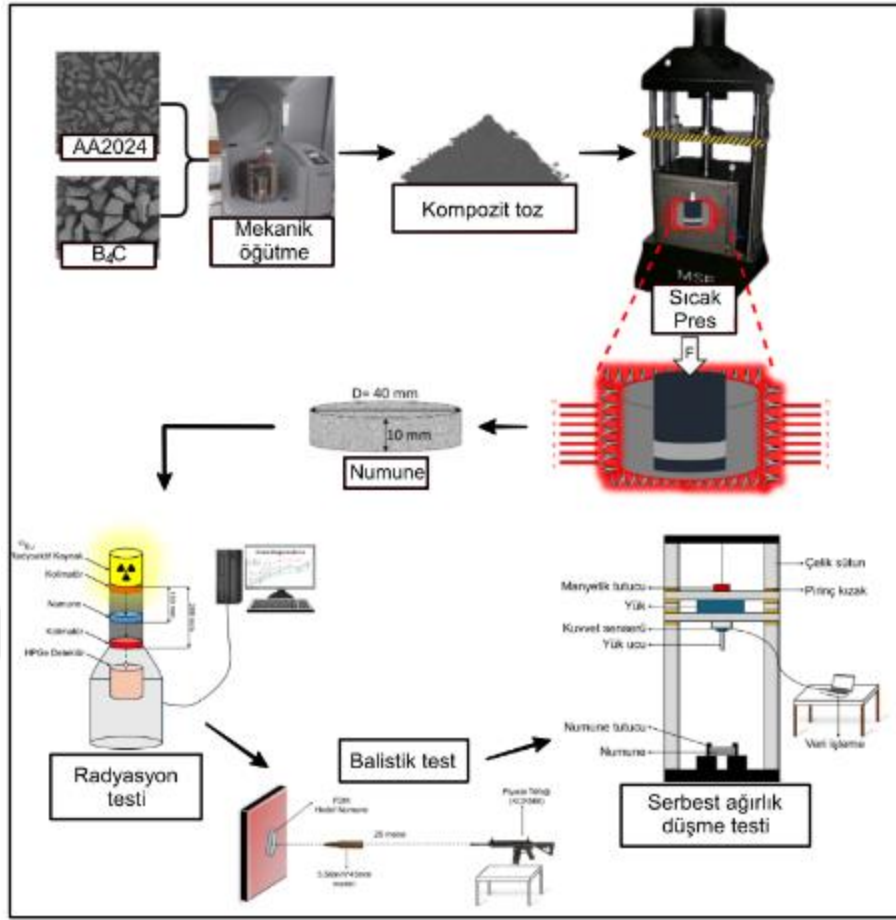
bağlanma enerjisi nedeniyle en düşük boşluk oranını (4782 boşluk/iyon) sergiledi ve bu da etkili bir radyasyona dayanıklı malzeme olarak potansiyelini vurguladı.

Bu çalışmayı literatürdeki benzerlerinden ayıran en önemli yön, sadece B₄C (ağ. %0-40) partikülleri ile takviye edilmiş kompozit yapıların, fonksiyonel dereceli olarak toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi ve ardından mekanik + balistik + radyasyon zırhlama performanslarının birlikte değerlendirilmiş olmasıdır. Bu kapsamda hem farklı takviye oranlarının hem de katman sayısının mekanik özellikler (sertlik, çekme, darbe), balistik özelliklere ve gama radyasyonuna karşı koruma üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Ayrıca Eu-152 kaynağıyla gerçekleştirilen radyasyon testleri, bu malzemelerin sivil ve askeri nükleer uygulamalardaki potansiyelini değerlendirmek açısından da özgün sonuçlar sunmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle AA2024 matrisli, farklı oranlarda B₄C takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler üretilmiş ve katman sayısı ile takviye miktarının bu yapıların fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerine etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Öncelikle farklı oranlarda hazırlanan B₄C takviyeli toz karışımları, sabit parametrelerde mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuş ve her bir katman için uygun toz karakteristikleri belirlenmiştir. Elde edilen kompozit tozların morfolojik yapıları, tane boyutları, XRD analizleri ve görünür yoğunluk değerleri ölçülerek toz karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Toz karakterizasyonunun ardından, tek katmanlı ve çok katmanlı (iki, üç ve dört katmanlı) fonksiyonel dereceli kompozit tozlar, sıcak presleme yöntemiyle 560 °C sıcaklık ve 500 MPa basınç altında Argon gazı ortamında şekillendirilmiştir. Presleme işlemi sonucunda, mekanik ve radyasyon testlerine uygun numuneler elde edilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı, yoğunluk, sertlik, çekme mukavemeti, darbe dayanımı, balistik direnç ve gama radyasyon soğurma özellikleri ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Katman sayısı ve B₄C takviye oranının malzemenin çok yönlü performansına olan etkisi ortaya konmuştur. Çalışma boyunca izlenen genel işlem basamakları Şekil 2.1’de şematik olarak sunulmuştur.



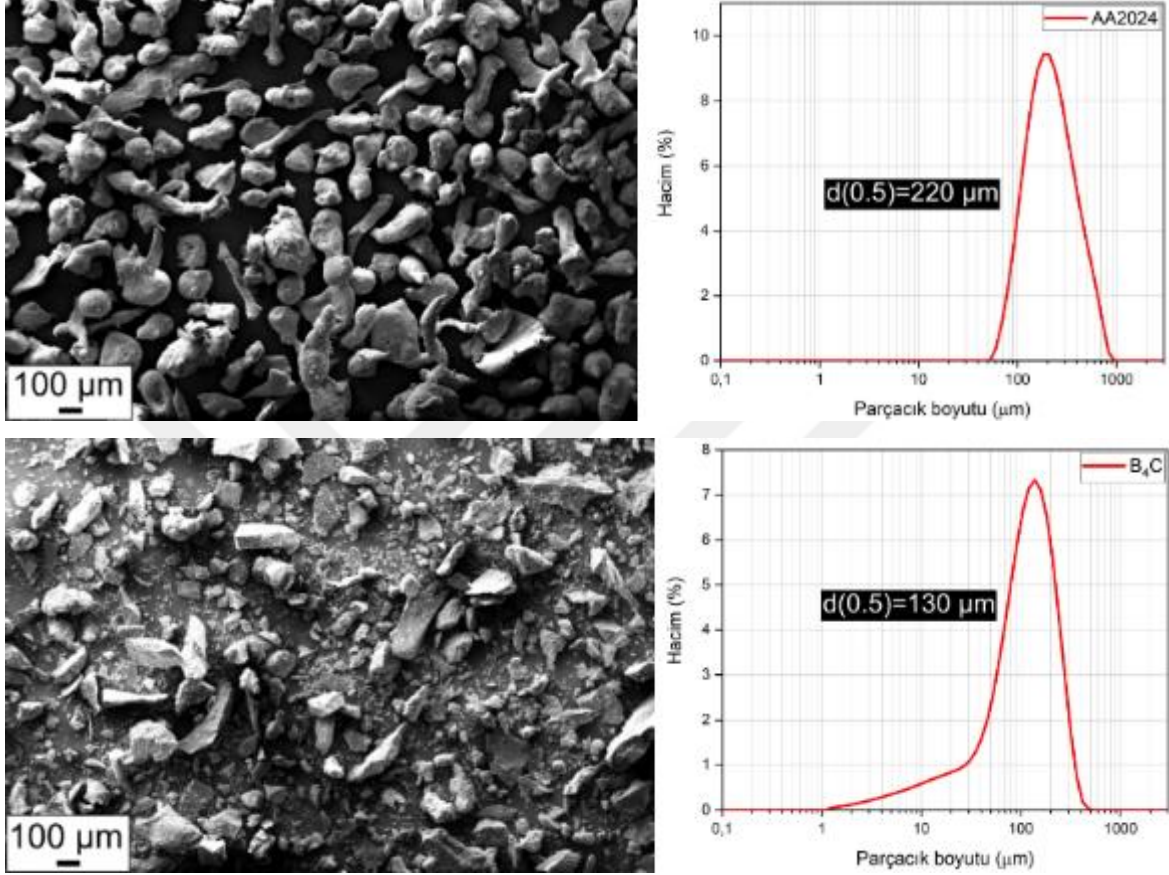
Şekil 2.1. Çalışmada yapılacak deneylerin genel iş akış şeması

2.1. Kullanılan Malzemeler

FDM kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak alüminyum 2024 alaşımı (AA2024) kullanılmıştır. Kullanılan AA2024 tozları yerel üreticiden gaz atomizasyonu ile üretilmiş olup ortalama parçacık boyutu yaklaşık 220 μm 'dir. AA2024 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1.1'de verilmiştir. Artan ağırlık oranlarında kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak ortalama parçacık boyutu 130 μm olan B₄C parçacıkları (Merck, Almanya) kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 tozlarının ve matrise takviye edilen B₄C takviye parçacıklarının başlangıç morfolojisinin SEM görüntüleri ve başlangıç boyutu ile ortalama parçacık boyutu ve dağılımının grafikleri Şekil 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.1. AA2024 matris alaşımının (%) kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Ti	Al
%	4.85	1.78	0.385	0.374	0.312	0.138	0.042	0.005	Kalan



şekil 2.2. Başlangıç tozlarının morfolojik görüntüleri ve toz boyut analizleri

2.2. Mekanik Öğütme İşlemi

AA2024/B₄C FDM kompozitlerinin üretiminde, kompozit tozlar öncelikle toz metalurjisi yöntemine dayalı mekanik öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Ağırlıkça artan oranlarda B₄C takviyeli kompozit malzemeleri oluşturan kompozit tozlar, gezegen tipi bilyalı değirmen kullanılarak öğütölmüş ve takviye parçacıklarının matris içerisinde homojen dağılımı sağlanmıştır. Kompozitleri üretmek için öncelikle %1, 2, 5, 10, 20, 30 ve 40 ağırlık oranında B₄C takviyesi içeren AA2024 matrisli kompozit tozları üretilmiştir. Tablo 1.2’de mekanik öğütme işlemi sonrası üretilen kompozit tozların kodları, takviye oranları ve mekanik öğütme parametreleri verilmiştir. Kompozit tozların üretiminde Retsch PM100 planet tipi bilyalı değirmen kullanılmıştır (şekil 2.3). Mekanik öğütme işlemi 5:1

bilya:toz oranına sahip tungsten karbür (WC) öğütme haznesinde öğütme ortamı olarak 10 mm çapında WC öğütme bilyeleri kullanılarak 400 rpm hızda 5 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Kompozit tozların mekanik öğütülmesi sırasında oluşan bilye-toz-bilye ve bilye-toz-toz haznesi etkileşimleri sonucu oluşan deformasyon sertleşmesi ile birlikte, soğuk kaynağa yatkın aktif yüzeylerin enerjisinin dengelenmesi ve gevrekleşme-kırılma-soğuk kaynak çevriminin kontrol altında tutulması ile, mekanik öğütme işlemi sırasında çevrim halinde oluşan soğuk kaynağa yatkın aktif yüzeylerin enerjisinin dengelenmesi suretiyle homojen bir boyut küçültme ve homojen dağılım elde etmek amacıyla öğütme haznesine belirli oranlarda işlem kontrol ajanları eklenir. Bu bağlamda, mekanik öğütme işlemindeki etkileri dengelemek amacıyla öğütme öncesinde mekanik öğütme haznesine ağırlıkça %2 oranında Metanol eklenmiştir. Öğütme süresi ve işlem kontrol ajanının belirlenmesinde yapılan çalışmalar, tez içeriğinde ayrıntılı yer verilmemiştir. Fakat farklı öğütme süreleri (1, 2, 3, 4, 5 ve 10 saat) ve farklı işlem kontrol ajanları (metanol, etanol, çinko stearat ve stearik asit) denenerek en iyi özellikler gösteren parametreler belirlenerek öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bununla ilgili yayınlanmış SCI-E makaleden ayrıntılı bilgiler edinilebilir (Tunç vd., 2024).



Şekil 2.3. Mekanik öğütme işlemi için kullanılan gezegen tipi bilyalı değirmen

Tablo 2.2. Mekanik öğütme işlemi sonrası üretilen kompozit tozların kodları, takviye oranları ve mekanik öğütme parametreleri

Toz Numune Kodu	B ₄ C miktarı (%ağ.)	AA2024 (%ağ.)	Bilya:Toz Oranı	Kontrol Ajan Miktarı
B1	1	99		
B2	2	98		
B5	5	95		
B10	10	90	5:1	%2 ağ. Metanol
B20	20	80		
B30	30	70		
B40	40	60		

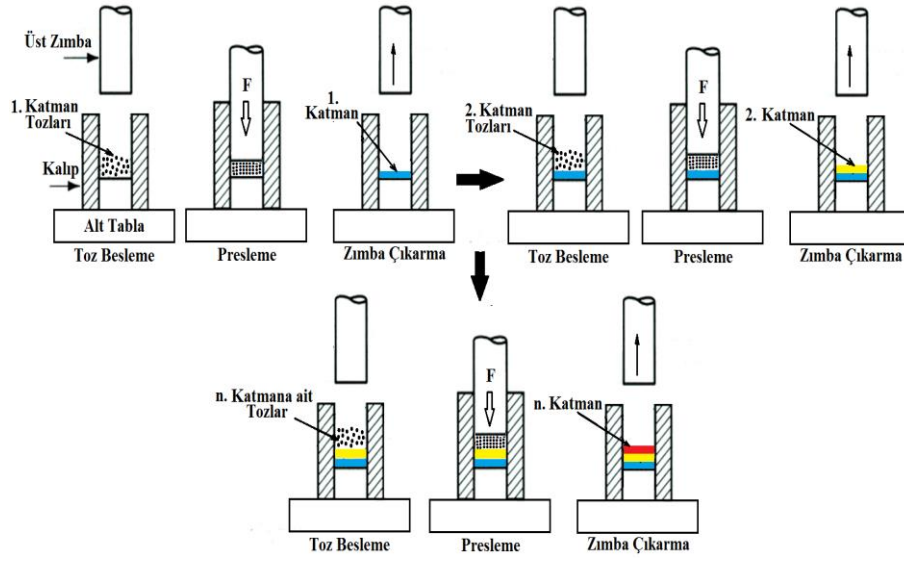
2.3. Sıcak Presleme İşlemi

Üretilen AA2024/B₄C kompozit tozları kalıplara dökülerek 250 MPa basınç altında ön presleme yapılarak ham kompozitler elde edilmiş ve daha sonra 560°C sıcaklık ve 500 MPa basınç altında koruyucu Argon gazı atmosferinde 3 saat boyunca sıcak presleme yöntemi ile sinterlenmiştir. Şekil 2.4'te FDM'lerin üretildiği sıcak pres cihazının resmi verilmiştir.

Çekme numuneleri için 80*10 mm kalıp boşluğu olan kalıplara, balistik testlerde gerekli numuneler için 40 mm çapında kalıplara ilk olarak AA2024 tozu dökülecek ve 250 MPa basınç altında ön yoğunlaştırma işlemi uygulanacaktır. Presleme esnasında kalıp yüzeylerine yağlayıcı olarak çinko stearat uygulanarak kalıp yüzeyi ile parçacıklar arasındaki sürtünme azaltılarak daha etkin bir presleme işleminin gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Katmanların oluşturulması, her bir katman yoğunlaştırıldıktan sonra üst sıkıştırma zımbasının kalıptan çıkarılması, yeni toz karışımının kalıp boşluğuna dökülmesi ve tekrar 250 MPa basıncın uygulanması şeklinde olacaktır. Bu işlem katman sayısına tekrar edilecektir (Şekil 2.5). Ayrıca Üretilen FDM numunelerin kodları, katman sayıları ve takviye oranları Tablo 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. AA2024/B₄C kompozit FDM'lerin üretildiği sıcak pres cihazı



Şekil 2.5. Fonksiyonel kompozit yapı üretimi için işlem adımları

Tablo 2.3. Üretilen FDM numunelerin kodları, katman sayıları ve takviye oranları

Numune Kodu	B ₄ C içeriği (%ağ.)			
	1. Katman	2. Katman	3. Katman	4. Katman
L1 ₀	0			
L1 ₁	1			
L1 ₂	2			
L1 ₅	5			
L1 ₁₀	10			
L1 ₂₀	20			
L1 ₃₀	30			
L1 ₄₀	40			
L2 _{0/1}	0	1		
L2 _{1/2}	1	2		
L2 _{2/5}	2	5		
L2 _{5/10}	5	10		
L2 _{10/20}	10	20		
L2 _{20/30}	20	30		
L2 _{30/40}	30	40		
L3 _{0/1/2}	0	1	2	
L3 _{1/2/5}	1	2	5	
L3 _{2/5/10}	2	5	10	
L3 _{5/10/20}	5	10	20	
L3 _{10/20/30}	10	20	30	
L3 _{20/30/40}	20	30	40	
L4 _{0/1/2/5}	0	1	2	5
L4 _{1/2/5/10}	1	2	5	10
L4 _{2/5/10/20}	2	5	10	20
L4 _{5/10/20/30}	5	10	20	30
L4 _{10/20/30/40}	10	20	30	40

2.4. Karakterizasyon İşlemleri

2.4.1. Toz Boyut Ölçümü

Kompozit tozların parçacık boyutu analizi, güvenilir bir kaynak tarafından doğrulandığı üzere, yaklaşık 0,01 ila 10.000 mikrometrelik bir algılama aralığına sahip olan ve 52 dedektörle donatılmış Malvern 'Mastersizer Hydro 2000e' lazer parçacık boyutu analizörü kullanılarak gerçekleştirildi. Dört ayrı ölçüm yapıldı ve bu kapsamlı çalışma için ortalama değerleri kullanıldı (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Parçacık boyut ölçüm cihazı

2.4.2. XRD Analizi

Artan B₄C oranına sahip AA2024/B₄C kompozitlerinin X-ışını kırınımı (XRD) analizleri PANalytical-‘Pert3 Pro XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Kompozit numunelerin XRD desenlerinin belirlenmesi için 1,54056 Å dalga boyuna sahip Cu-K α X-ışını kaynağı, 40 mA akım ve 45 kV çalışma gerilimi kullanılarak 0,01 %s tarama hızında 2 θ değeri olarak 10-90° aralığında kırınım desenleri oluşturuldu. Şekil 2.7’de XRD analiz cihazının görüntüsü verilmiştir.

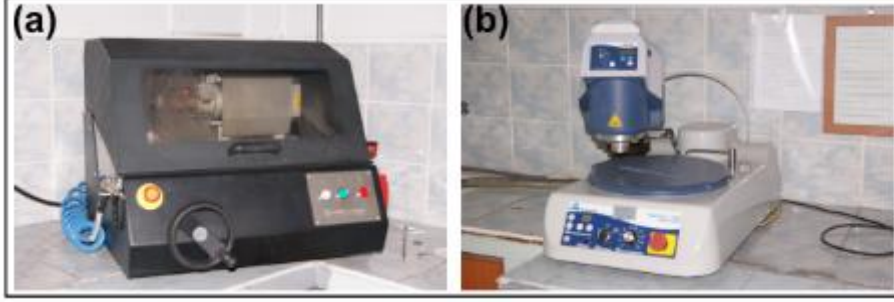


Şekil 2.7. XRD Cihazı

2.4.3. Metalografik İşlemler

Sıcak presleme ve sinterleme işlemlerinden sonra elde edilen son numunelerin mikro yapı analizlerinin yapılabilmesi amacıyla metalografik hazırlık süreci uygulanmıştır. Bu kapsamda numuneler, uygun boyutlarda kesilerek kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlama adımlarına tabi tutulmuştur. İlk olarak, 400'den 2500 mesh'e kadar değişen zımpara kâğıtları kullanılarak yüzey zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, sırasıyla 1 μm tane büyüklüğüne sahip Fumed Silica ve 0.1 μm tane büyüklüğüne sahip Elmas süspansiyonları ile parlatma işlemi yapılmıştır. Bu işlemlerde kullanılan cihazlara ait görseller Şekil 2.8'de sunulmuştur. Zımparalama ve parlatmanın ardından, alüminyum esaslı numunelerin mikroyapılarının daha net gözlemlenebilmesi için dağlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, Keller reaktif olarak bilinen ve 2 ml hidroflorik asit (HF), 3 ml

hidroklorik asit (HCl), 5 ml nitrik asit (HNO₃) ve 90 ml distile su içeren kimyasal karışım kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Metalografik işlemlerde kullanılan cihazlar (a) kesme ve (b) otomatik zımparalama/parlatma

2.4.4. Mikroskobik İncelemeler

Üretilen kompozit tozların morfolojik yapılarının incelenmesi, bu tozlardan elde edilen FDM bulk numunelerin mikro yapı analizleri, FDM numunelerin kırılma yüzeylerinin değerlendirilmesi, darbe ve balistik testler sonrası oluşan yüzeylerin detaylı incelenmesi Zeiss Evo LS100 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tozlar ve bulk haldeki numunelerde yer alan elementlerin tespiti ve dağılım analizleri, SEM cihazına entegre Edax Apex™ Octane Elite model enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) sistemi kullanılarak, haritalama (mapping) yöntemi ile yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılan cihazların görüntüsü Şekil 2.9’da yer almaktadır.



Şekil 2.9. Mikroskobik incelemeler için kullanılan SEM/EDS cihazı

2.4.5. Yoğunluk Ölçümü

Deney kapsamında üretilen numunelerin yoğunlukları, ASTM B962-08 standardında tanımlanan yöntemlere uygun olarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Ağırlık ölçümleri, ± 0.0001 g hassasiyetindeki Ohaus PA214C model elektronik terazi ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin teorik yoğunluklarının hesaplanmasında ise karışım kuralı esas alınmıştır; bu yöntem, numuneyi oluşturan bileşenlerin oranlarına bağlı olarak beklenen yoğunluğun hesaplanmasına olanak tanır. Elde edilen teorik ve deneysel yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması sonucunda, numunelerin gözeneklilik oranları hesaplanmıştır.

2.4.6. Termogravimetrik Analizler

AA2024/B₄C kompozit tozlarının termal kararlılığındaki ve oksidasyon davranışındaki değişiklikleri, artan B₄C içeriği ve mekanik öğütme nedeniyle parçacık boyutundaki değişikliklerle belirlemek için termogravimetrik analizler gerçekleştirildi. Bu

nedenle, TGA analizleri, Perkin Elmer TGA 4000 cihazı kullanılarak (Şekil 2.10), vakum bir atmosferde dakikada 20 °C ısıtma hızıyla 30 °C ila 800 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildi.



Şekil 2.10. Termo gravimetrik analiz cihazı

2.4.7. Mekanik Deneyler

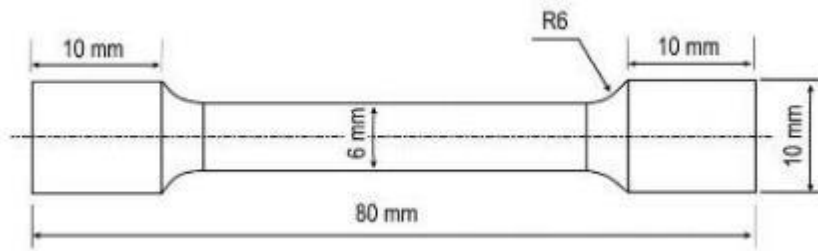
FDM bulk numunelerin sertlik ölçümleri, Innovatest-Nemesis 9000 model dijital sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde, 2.5 mm çapında çelik bir bilye uç tercih edilmiş ve 31.25 kg'lık bir yük, 10 saniyelik bekleme süresiyle uygulanmıştır. Bu test yöntemi, ASTM E10 standardında tanımlanan Brinell sertlik testi prosedürüne uygun olarak yürütülmüştür. Ölçümlerin güvenilirliğini artırmak amacıyla her numune üzerinde en az altı farklı noktadan sertlik değeri alınmıştır. Elde edilen verilerden en düşük ve en yüksek olanlar değerlendirme dışı bırakılmış; kalan dört ölçümün ortalaması alınarak numunenin karakteristik sertlik değeri hesaplanmıştır. Deneyde kullanılan sertlik test cihazının fotoğrafı Şekil 2.11a'da sunulmuştur.

Numunelerin çekme özellikleri, ASTM E8 standardında belirtilen talimatlara uygun olarak değerlendirilmiştir. Çekme testleri, çaprazkafa hızı 1 mm/dakika olarak ayarlanmış olan MTS Criterion Universal model elektromekanik çekme-basma test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu test sistemine ait görsel Şekil 2.11b'de yer almaktadır. Deneyde

kullanılan çekme numunesinin geometrik ölçüleri ise Şekil 2.12’de sunulmuştur. Ölçümlerin doğruluğunu sağlamak amacıyla her test grubu için üç ayrı numune test edilmiş; elde edilen çekme dayanımı sonuçlarının ortalaması alınarak temsilî bir mukavemet değeri elde edilmiştir.



Şekil 2.11. Mekanik deneyler için kullanılan cihazlar; (a) sertlik ve (b) çekme cihazları

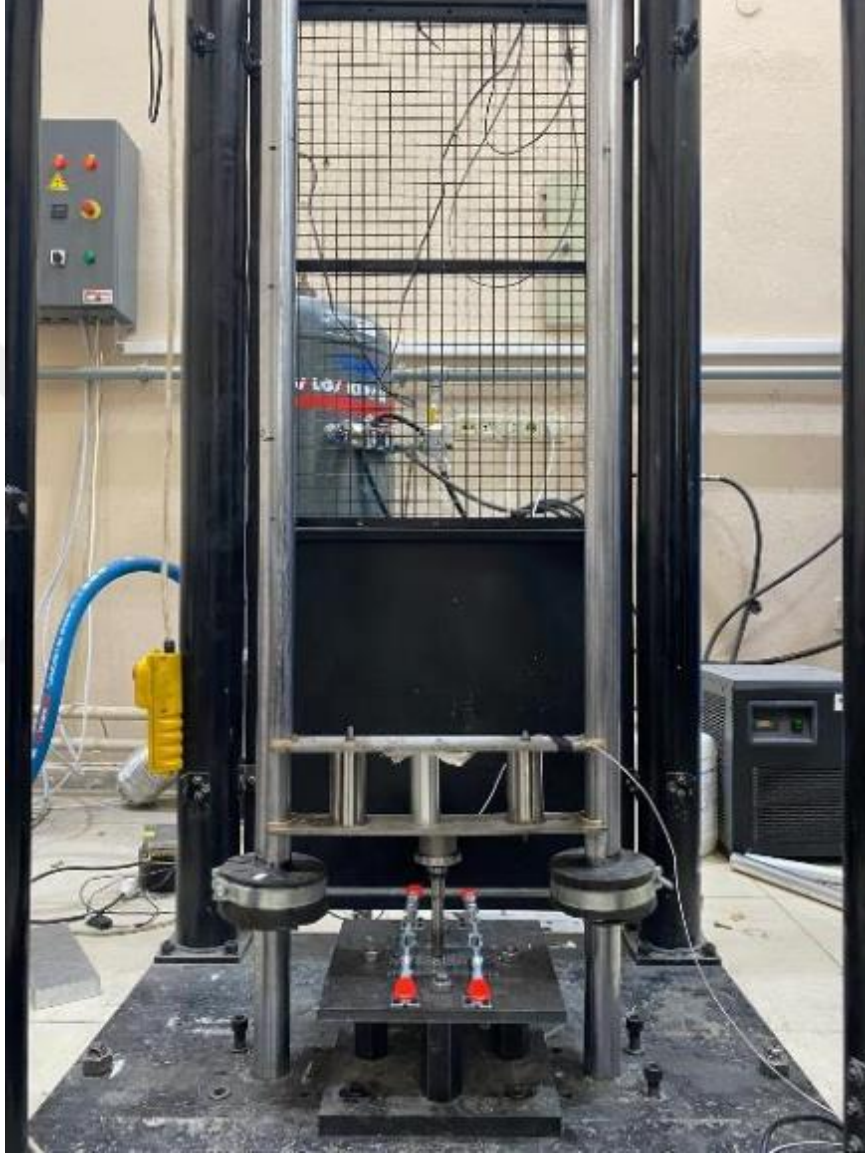


Şekil 2.12. Çekme test numunelerinin boyutlarının şematik görüntüsü

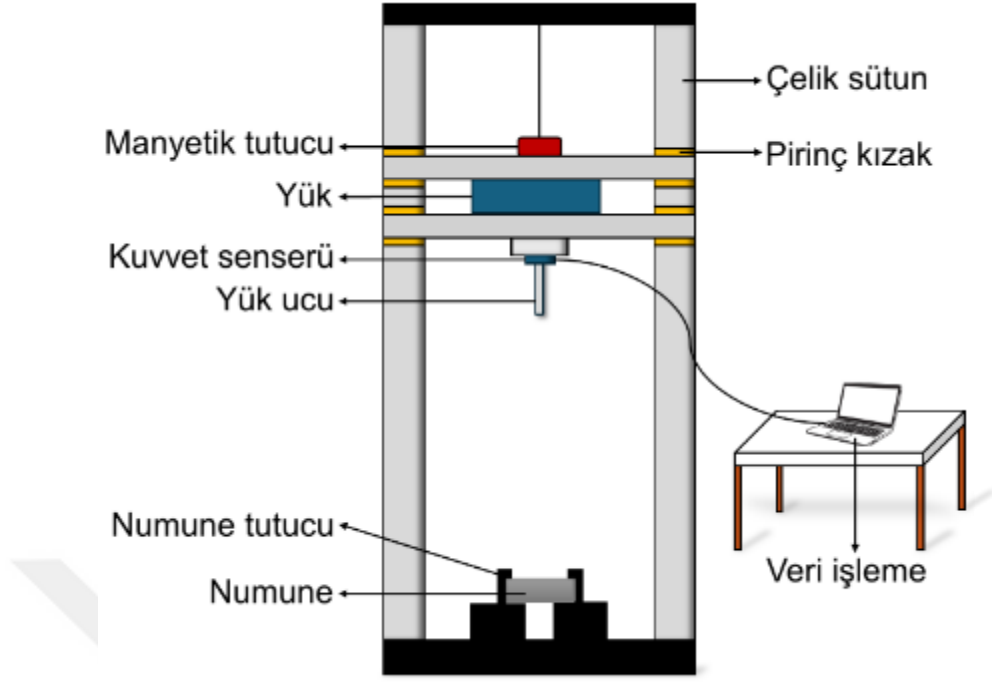
2.4.8. Serbest Düşme Deneyi

FDM numunelerin dinamik şartlarda enerji sönümleme davranışını belirlemek amacıyla Şekil 2.13 ve 2.14’te görülen serbest ağırlık düşürme deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Serbest ağırlık

düşürme deney sisteminde, düşme ağırlığı 7.5 kg kullanılırken, yük 50, 100 ve 150cm mesafeden serbest bırakılmıştır. Kuvvet ve ivme sensörlerinden 16 kanallı DEWE-43A veri toplama kartı ile 20 kHz örneklem hızında alınmış ve kuvvet-zaman, ivme-zaman grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 2.13. Serbest ağırlık düşürme deneyi



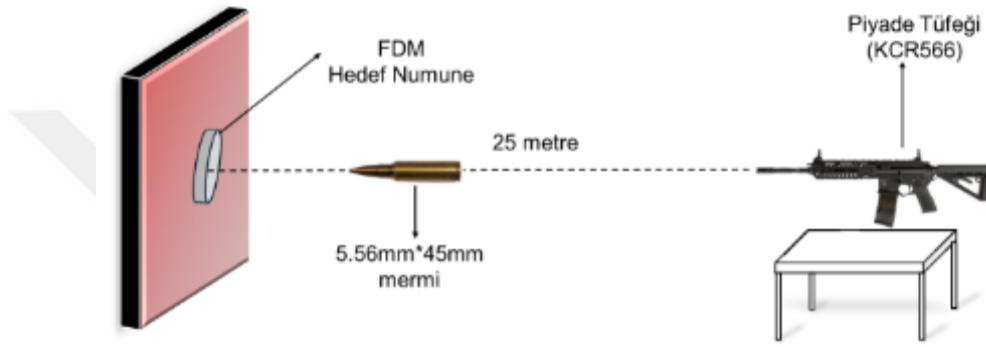
Şekil 2.14. Serbest ağırlık düşürme deney düzeneğinin şematik görünümü

2.4.9. Balistik Deney

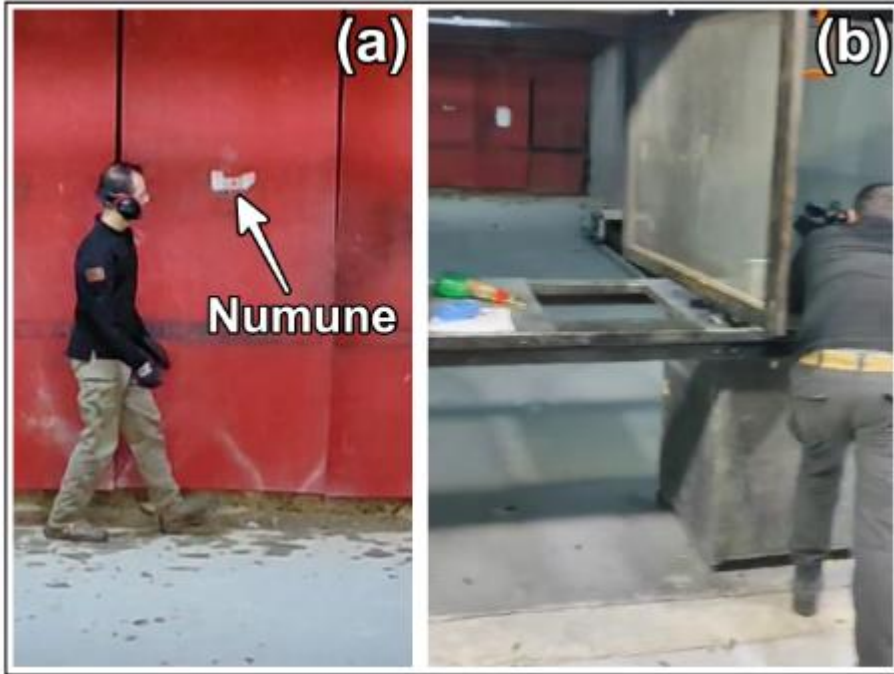
FDM numunelerin balistik performanslarının değerlendirilmesi amacıyla balistik testler, KALE Savunma firmasının test tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Testler, 25 metre mesafeden, KCR556 14.5" model (Şekil 2.15) yerli üretim piyade tüfeği kullanılarak yapılmıştır. Namlu çıkış hızı 870 m/s'dir. Deneylerde, 5.56×45 mm NATO standardında tam metal ceketli (FMJ) mühimmat kullanılmıştır. Her bir numune, aynı şartlar altında en az üç kez test edilmiştir. Balistik etki sonrasında oluşan hasar, giriş ve çıkış yüzeyleri üzerindeki deformasyonlar ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, FDM yapısının balistik direnç üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca balistik deney düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 2.16'da numunenin poligonda yerleştirilmesi ve atış anına dair görüntüler ise Şekil 2.17'de verilmiştir.



Şekil 2.15. Balistik atış testlerinde kullanılan milli üretim KCR556 piyade tüfeği



Şekil 2.16. Balistik atış deney düzeneği şematik görünümü



Şekil 2.17. Balistik atış testlerinde numunenin yerleştirilmesi (a) ve atış anı (b)

2.4.10. Radyasyon Absorplama Deneyi

Radyasyon testleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirildi. ^{152}Eu radyasyon kaynağı ve Yüksek Saflıkta Germanium (HPGe) Radyasyon Dedektörü sistemi (ORTEC-AMETEK, Oak Ridge, TN, ABD), (Şekil 2.18) kullanılarak elde edilen veriler GammaVision yazılımı kullanılarak analiz edildi. ^{152}Eu kaynağı, %10'un üzerinde bir verimlilikle 121.8, 344.3, 778.9, 964.1, 1085.9, 1112.1 ve 1408.0 keV olmak üzere farklı enerji seviyelerinde gama radyasyonu yayar. Kaynağın başlangıç aktivitesi 98.50 μCi 'dir ve üretim tarihi 1 Ekim 2010'dur.



Şekil 2.18. Gama soğurma spektrometresi

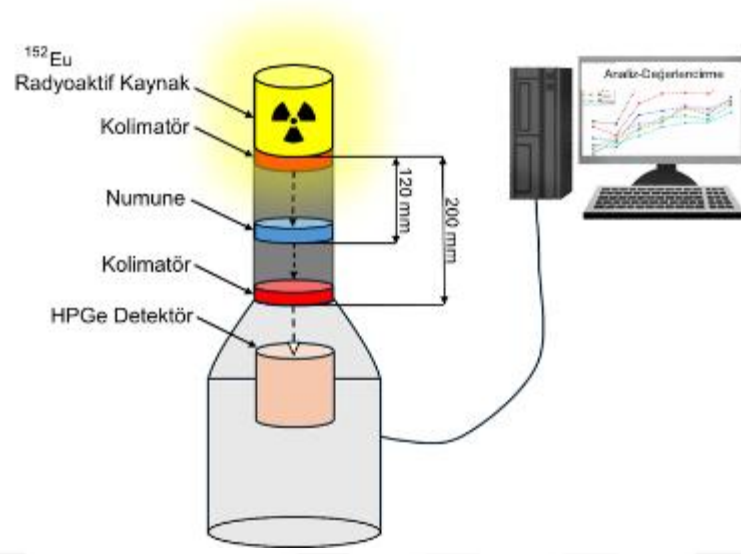
Şekil 2.19'da gösterildiği gibi, kaynak sistemin tepesindeki bir kurşun kalkanın içine yerleştirilmiştir. Kurşun bloktaki 1 mm çapındaki bir delik, yayılan gama radyasyonunu örnek kanalına yönlendirir. Kanala yerleştirilen örnek radyasyonun bir kısmını emerken, kalan radyasyon örneğin altındaki 1 mm çapındaki başka bir delikten geçerek dedektöre ulaşır. Dedektör, fotonları enerjilerini belirleyerek sayar ve yazılım aracılığıyla enerji ve foton sayısı verileri sağlar.

Boş bir örnek kanalıyla alınan ölçüm (I) ile örnek yerindeyken alınan ölçüm (I_0) arasındaki fark, örneğin emilim verimliliğini hesaplamak için kullanılır. Radyasyon kalkanlama verimliliğiyle ilgili hesaplamalar Tablo 1.4'te sunulmuştur. Bu denklemlerde, I ilk foton sayısını, I_0 kalkanlamadan sonraki foton sayısını, x örnek kalınlığını, ρ örnek yoğunluğunu, m örnek kütlesini ve A örneğin yüzey alanını temsil eder.

Tablo 2.4. Radyasyon kalkanı verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan hesaplama yöntemleri (Cinan vd., 2021, 2022)

Radyasyon Kalkanı Etkinliği	Formülasyon
LAC (Doğrusal zayıflama katsayısı) (cm^{-1})	$I = I_0 e^{-\mu_L x}$
MAC (Kütle zayıflama katsayısı) (cm^2/g)	$\mu_m = \frac{\mu_L}{\rho} = -\ln(I/I_0)/(m/A)$
HVL (Yarı değer katmanı) (cm)	$HVL = \frac{\ln 2}{\mu_L} \cong \frac{0.693}{\mu_L}$
TVL (Onuncu değer katmanı) (cm)	$TVL = \frac{\ln 10}{\mu_L} \cong \frac{2.303}{\mu_L}$
MFP (Ortalama serbest yol) (cm)	$MFP = \frac{1}{\mu_L}$
RPE (Radyasyon koruma verimliliği) (%)	$RPE = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100$

Radyasyon kalkanı verimliliğini belirlemek için kullanılan hesaplama yöntemleri gerçekleştirilen ölçümlere dayanmaktadır. MAC, numunenin yoğunluğuna ve karakteristik özelliklerine bağlıdır. Radyasyon kalkanı kabiliyetini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir parametredir. LAC doğrudan numunenin kalınlığıyla ilgilidir ve I ve I_0 ölçümlerinin kalınlığın bir fonksiyonu olarak değerlendirilmesini sağlar. HVL, başlangıç radyasyonunun (I) yarısını emmek için gereken numune kalınlığını temsil eder. TVL, başlangıç radyasyonunu (I) orijinal yoğunluğunun onda birine düşürmek için gereken numune kalınlığını gösterir. MFP, bir fotonun etkileşime girmeden önce malzeme içinde kat ettiği ortalama mesafeyi ifade eder. Radyasyon enerjisi arttıkça, malzeme içinde kat edilen mesafe de artar. RPE, numunenin radyasyona karşı kalkanlamadaki etkinliğini tanımlar.



Şekil 2.19. Gama radyasyon kalkanı testinin şematik gösterimi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. AA2024/B₄C FDM'lerin Mikroyapısal ve Fiziksel Özellikleri

3.1.1. AA2024/B₄C Kompozit Tozların Mikroyapısal ve Toz Boyutu Analizleri

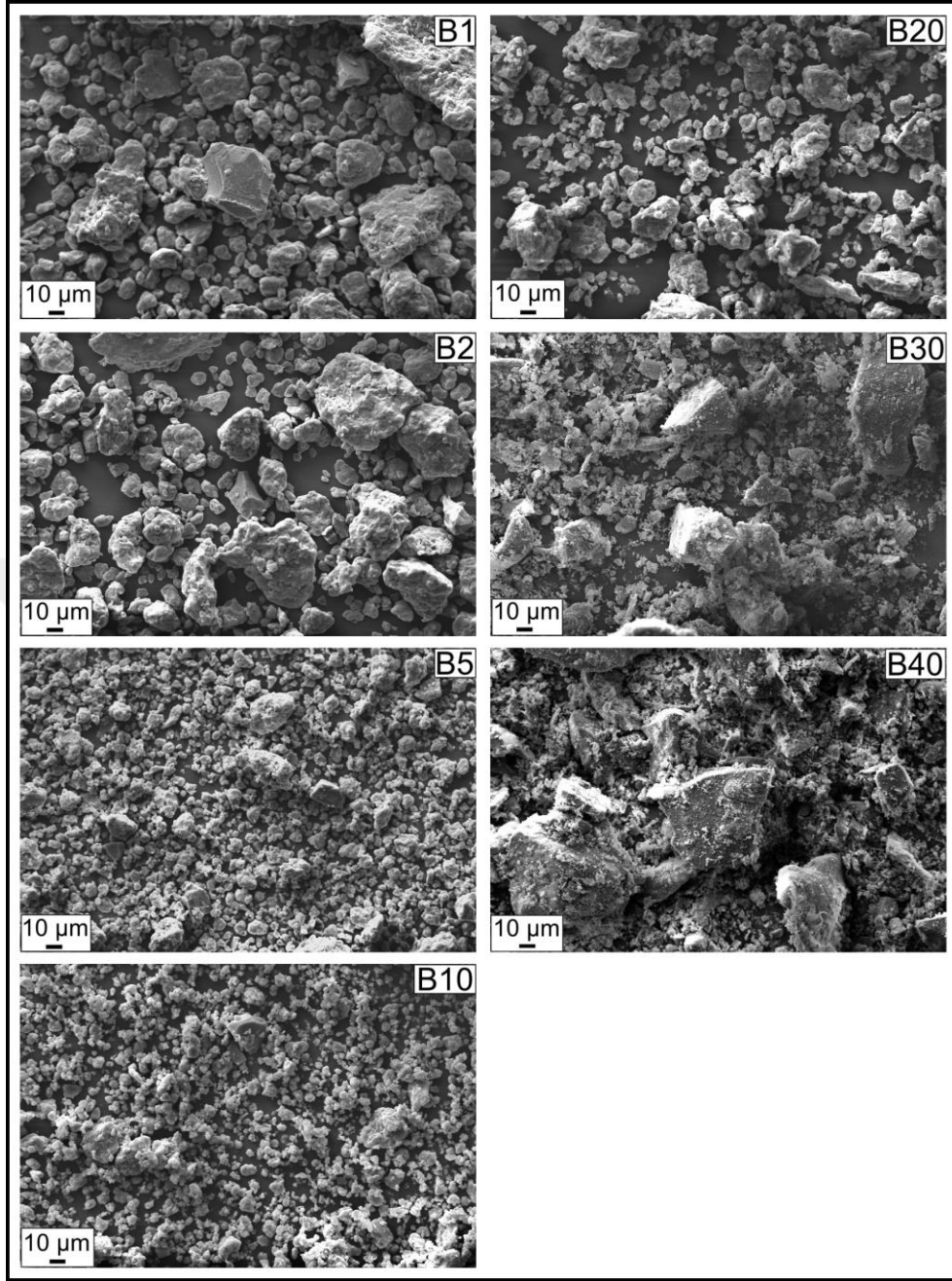
"%1, %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında B₄C içeren AA2024 alaşım tozlarının, 5 saatlik yüksek enerjili bilyeli öğütme işleminden sonra elde edilen morfolojileri ve parçacık boyutu dağılımları Şekil 3.1'de sunulmaktadır. Şekil 3.2'de ayrıca takviye oranının bir fonksiyonu olarak ortalama parçacık boyutlarının değişimini grafiksel olarak göstermektedir. Bu grafik, öğütme sırasında takviye oranının artmasının parçacık boyutuna olan etkisini nicel olarak ortaya koymakta ve farklı oranlardaki B₄C içeriğinin toz mikroyapısına etkisini karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Yüksek enerjili bilyeli öğütme hem matris hem de takviye fazlarının homojen karışımını sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan etkili bir toz işleme tekniğidir. Bu yöntem, özellikle sert takviye parçacıkları içeren metal matrisli kompozitlerin üretiminde, tozların mikroyapısal bütünlüğünü bozmadan etkin bir dispersiyon sağlamasıyla öne çıkmaktadır. AA2024 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bu teknik, takviye fazlarının matrise düzgün bir şekilde dağılmasını sağlayarak kompozit yapının genel dayanımını ve performansını artırır (Varol ve Canakci, 2015).

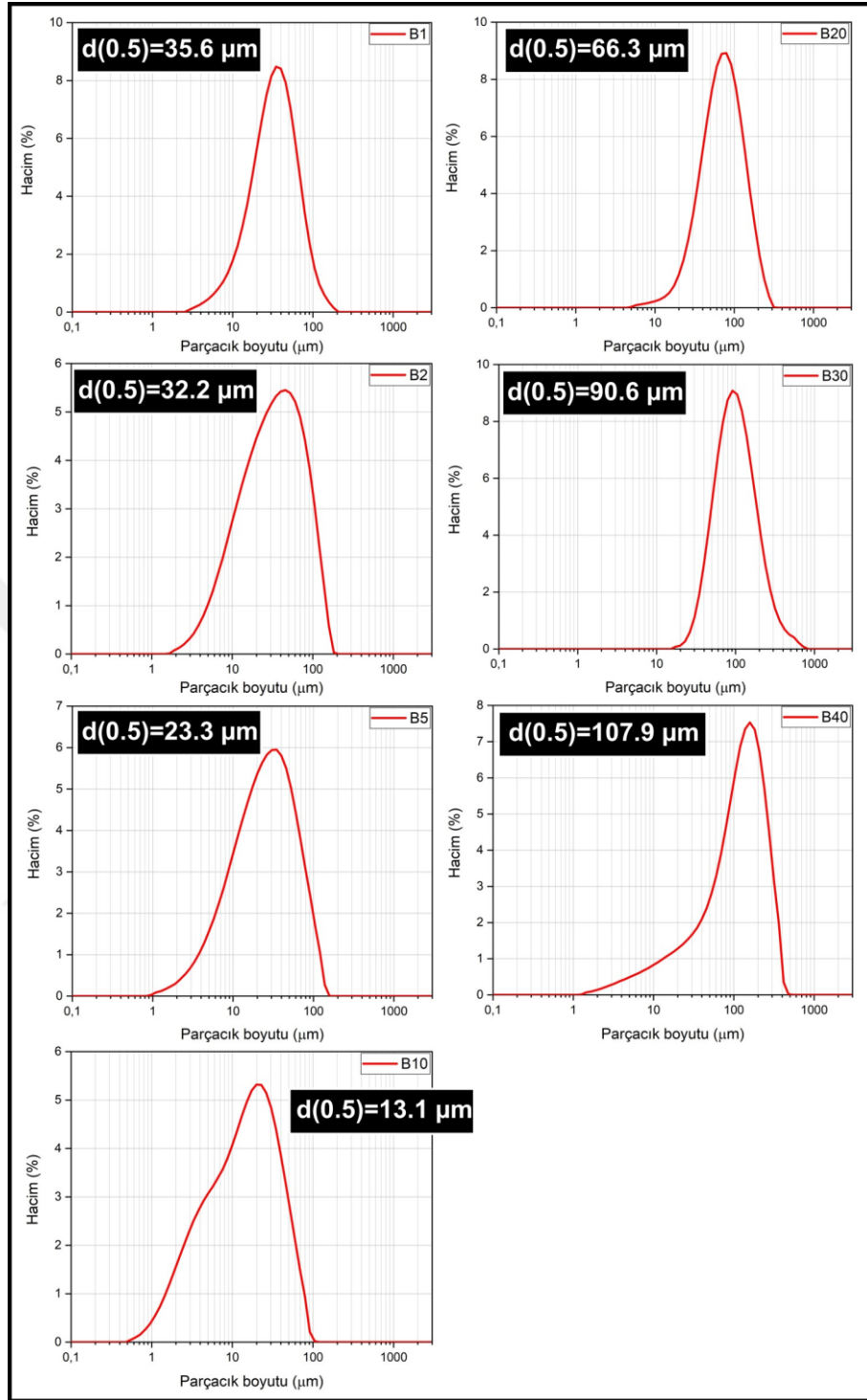
Öğütme süreci sırasında üç temel mekanizma eşzamanlı olarak işler: plastik deformasyon, soğuk kaynak ve kırılma. Plastik deformasyon mekanizması, öğütme bilyeleri ile tozlar arasındaki sürekli çarpışmalar sonucu parçacıkların şekil değiştirerek düzleşmesine ve yüzey alanlarının artmasına neden olur. Bu değişiklikler özellikle düşük takviye oranlarında daha belirgindir, çünkü matrisin sünekliği deformasyon davranışını baskın hale getirir. Soğuk kaynak mekanizması ise, yüksek enerjili çarpışmalar sırasında parçacık yüzeylerinin birbirine yapışması ile aglomereler oluşmasına neden olur. Bu durum, özellikle orta düzeydeki takviye oranlarında daha yaygındır. B₄C parçacıklarının sertliği, matrisin yumuşak yapısıyla birleştiğinde, yoğun temas noktalarında yerel sıcaklık artışlarına ve bunun sonucunda yüzey yapışmalarına sebebiyet verebilir. Öte yandan, kırılma mekanizması parçacıkların sürekli olarak darbe kuvvetine maruz kalmasıyla boyutsal

küçölmeýi sağlar. Bu etki, yüksek takviye oranlarında daha baskındır. Çünkü takviye fazı oranı arttıkça sistemin gevrekliği artmakta ve partiköl bütönlüğü daha kolay bozulmaktadır. Bu durum, ortalama parçacık boyutunun önemli ölçüde azalmasına ve parçacıkların daha düzensiz bir morfolojiye sahip olmasına neden olur (Tunç vd., 2024).

Bu mekanizmaların her biri öğütme süresi, kullanılan bilyelerin malzemesi ve çapı, bilye-toz oranı, uygulanan enerji seviyesi gibi öğütme parametrelerine duyarlıdır. Örneğin, daha büyük çaplı bilyeler kırılma etkisini artırırken, daha küçük bilyeler deformasyon ve soğuk kaynak mekanizmalarını öne çıkarabilir. Aynı şekilde, öğütme süresinin uzaması, önce deformasyonun ardından aglomerasyonun ve en sonunda da kırılmanın baskın hale gelmesine neden olabilir. Elde edilen tozların karakterizasyonu, bu mekanizmaların etkinliğini analiz etmek için kritik bir aşamadır. Parçacık boyutu dağılımı ölçümleri, ortalama boyutlar arasındaki değişimi ortaya koyarken; taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, yüzey morfolojilerindeki farklılıkları doğrudan gözlemlene olanağı sunar. Bu veriler, öğütme parametreleri ile yapısal özellikler arasındaki ilişkiyi kurmak ve optimum üretim koşullarını belirlemek adına son derece önemlidir.



Şekil 3.1. Kompozit tozların SEM görüntüleri



Şekil 3.2. Kompozit tozların toz boyut grafikleri

Şekil 3.1, 5 saatlik bilyalı öğütme işleminden sonra AA2024/B₄C kompozit tozlarındaki morfolojik değişiklikleri göstermektedir. Başlangıçta çubuk benzeri bir morfoloji sergileyen toz parçacıklarının, öğütme işlemi ilerledikçe daha küresel bir şekle dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu morfolojik dönüşüm, yüksek enerjili bilyalı öğütme

sırasında meydana gelen üç temel mekanizmanın etkileşimine atfedilmektedir: plastik deformasyon, soğuk kaynak ve kırılma. AA2024 alaşım tozunun başlangıç parçacık boyutu 220 μm iken, B₄C takviye parçacıklarının ortalama boyutu 130 μm idi. Öğütme işleminden sonra, %1, 2 ve 5 B₄C içeren kompozit tozların parçacık boyutu önemli ölçüde azalarak sırasıyla ortalama 35.6, 32.2 ve 23.3 μm 'ye düşmüştür. Parçacık boyutundaki bu azalma, öğütmenin ilk aşamalarında kırılma mekanizmasının baskın olduğunu ve uygulanan yüksek darbe enerjisi nedeniyle etkili parçacık kırılmasına yol açtığını göstermektedir. Öğütme sırasında verilen mekanik enerji, parçacıkların daha küçük boyutlara parçalanmasına neden olarak öğütme verimliliğini artırmış ve parçacık yapısını iyileştirmiştir. Öğütme süresi ve takviye içeriğindeki artışla, %10 B₄C içeren kompozit tozların parçacık boyutu 13,1 μm 'ye düşmüştür. Bu aşamada, AA2024 matrisinin yüksek sünekliği önemli plastik deformasyonu kolaylaştırmış, parçacıkların yeniden şekillenmesini ve daha homojen bir morfoloji benimsemesini sağlamıştır. Plastik deformasyon etkisinin bir sonucu olarak, AA2024 parçacıkları daha az yüzey pürüzlülüğü ile daha düzgün bir şekil kazanmıştır. Sert seramik faz B₄C'nin eklenmesi, toz parçacıklarının aşırı soğuk kaynaklanmasını önleyen bir bariyer görevi görmektedir. Sert takviye fazlarının varlığı, matrisin plastik deformasyon kabiliyetini sınırlar ve soğuk kaynaklama ile deformasyon mekanizmaları arasında bir denge kurarak büyük aglomeraların oluşumunu engeller (Canakci vd., 2013; Varol ve Canakci, 2013). Üstelik, AA2024 fazının yüksek sünekliği, önemli plastik akışa girmesine izin vererek daha küresel ve rafine bir morfolojiye yol açar (Meher vd., 2021). Bununla birlikte, B₄C içeriği %20, 30 ve 40'a çıkarıldığında, parçacık boyutunun sırasıyla 66.3, 90.6 ve 107.9 μm 'ye yükselmesiyle farklı bir parçacık boyutu dağılımı gözlemlendi. Yüksek B₄C içeriğine sahip sistemlerde, takviye parçacıkları arasındaki etkileşim arttı ve bu da daha yüksek bir kümeleşme eğilimine yol açtı. B₄C parçacıklarının yüksek sertliği nedeniyle, mekanik olarak birbirleriyle kenetlenirler ve Van der Waals kuvvetlerinden etkilenerek daha büyük kümeler oluştururlar. Kümelenmenin bir sonucu olarak, parçacıklar etkili bir şekilde kırılmaz ve öğütme işleminin verimliliğini azaltır (Lubkowitz vd., 2024; Meher vd., 2021). Ek olarak, yüksek B₄C içeriğinin varlığı, plastik deformasyon mekanizmasının etkisini sınırlayarak soğuk kaynak mekanizmasının baskın hale gelmesine neden olur. Parçacıklar, matrisin azalan enerji emme kapasitesi ve azalan deformasyon yeteneği nedeniyle birbirine yapışır ve bu da istenmeyen bir parçacık boyutu artışına neden olur. Sonuç olarak, parçacık boyutu büyümesi, öğütme ortamında yeterli dağılım elde edilememesi ve soğuk kaynak mekanizmasının baskınlığı ile açıklanabilir (Çelebi vd., 2023; Clinktan vd., 2020).

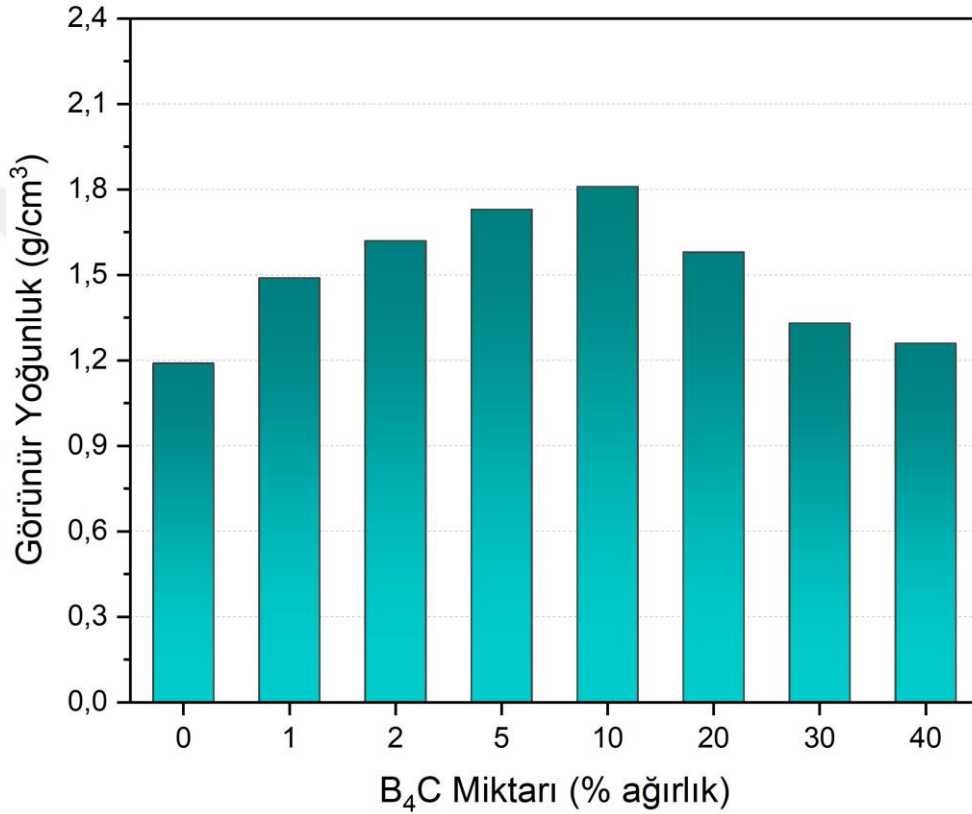
3.1.2. AA2024/B₄C Kompozit Tozların Görünür Yoğunluk Analizleri

Şekil 3.3, B₄C içeriğinin (% ağırlık) AA2024/B₄C kompozit tozlarının görünür yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir. Saf AA2024 alaşımından elde edilen tozların başlangıçtaki görünür yoğunluğu yaklaşık 1,19 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu değer, toz parçacıklarının düzensiz morfolojisi ve yüksek boşluk içeriği nedeniyle nispeten düşüktür. B₄C takviyesi %1, 2 ve 5'e çıkarıldığında ise görünür yoğunluk önemli bir artışla yaklaşık sırasıyla 1.49, 1.62 ve 1.73 g/cm³'e yükselir. Bu artışın temel nedeni, sert B₄C parçacıklarının matris içindeki homojen dağılımının sağladığı “filler etkisi” ve boşlukların metal matrisin plastik deformasyonu sayesinde etkin biçimde doldurulmasıdır. Mikroyapı incelemeleri, bu bileşimde B₄C'in ince boyutlu ve tekil parçacıklar halinde dağılmış olduğunu ve böylece kompaksiyon sırasında metalik yüzeyler arasında yeterli soğuk kaynak (cold welding) gerçekleştiğini ortaya koymuştur (Korim ve Hu, 2020).

B₄C oranı %10'a çıkarıldığında, görünür yoğunluk yaklaşık 1.81 g/cm³'le zirve değerine ulaşır. Bu noktada, artan B₄C miktarı sayesinde toz karışımının ortalama partikül boyutu azalmakta, dolayısıyla paketlenme faktörü (packing factor) maksimuma çıkmaktadır. Ayrıca, yüksek enerjili mekanik öğütme sırasında B₄C parçacıklarının kısmen parçalanarak daha homojen ve ince alt parçacıklar oluşturması, toz yatağının daha sıkı bir şekilde paketlenmesini mümkün kılar. Metalik AA2024 parçacıklarının çevresindeki plastik deformasyon bölgesi genişleyerek mikroskobik boşlukları minimuma indirger ve birleşme bölgelerinin sayısını artırır. Bu kombinasyon, alaşım matrisi ve takviye partikülleri arasındaki interfacial bağlanmayı güçlendirir ve görünür yoğunluğu en üst seviyeye taşır (Khakbiz ve Akhlaghi, 2009).

Buna karşın, B₄C içeriği %20, 30 ve 40'a yükseltildiğinde, görünür yoğunluk tekrar düşüş eğilimine girerek yaklaşık sırasıyla 1.58, 1.33 ve 1.26 g/cm³ civarına geriler. Bu azalışın başlıca nedenleri; B₄C parçacıklarının daha yüksek konsantrasyonlarda aglomere olarak kümeler oluşturması, interpartiküler mesafelerde boşluk oluşumunun artması ve matrisin plastik deformasyon kapasitesinin sınırlanmasıdır. Sert ve kırılğan B₄C fazı, yüksek oranlarda toz yatağındaki parçacıkların birbirine kaynamasını engeller; ayrıca artan sürtünme kuvvetleri, kompaksiyon sırasında tozların yeniden düzenlenmesini zorlaştırır. Soğuk kaynak mekanizmasının baskın olması, aynı zamanda büyük aglomeraların kırılğan çatlaklar oluşturmaya yol açarak kompozit tozun sıkıştırılabilirliğini olumsuz etkiler (Alizadeh vd., 2017).

Bu bulgular, AA2024/B₄C toz kompozitlerinde optimum görünür yoğunluğun ancak belirli bir takviye aralığında (%5-10) elde edilebileceğini göstermektedir. Daha yüksek B₄C içeriklerinde aglomerasyon, boşluk oluşumu ve matris deformasyonunun kısıtlanması nedeniyle yoğunlukta belirgin düşüşler yaşanır. Dolayısıyla, hem toz karışımının mikro yapısal homojenliğini koruyacak hem de görünür yoğunluğu maksimuma çıkaracak ideal B₄C oranının dikkatle tespit edilmesi ve işleme parametrelerinin (öğütme süresi, pres basıncı, sinterleme profili vb.) bu aralığa göre optimize edilmesi kritik önemdedir.

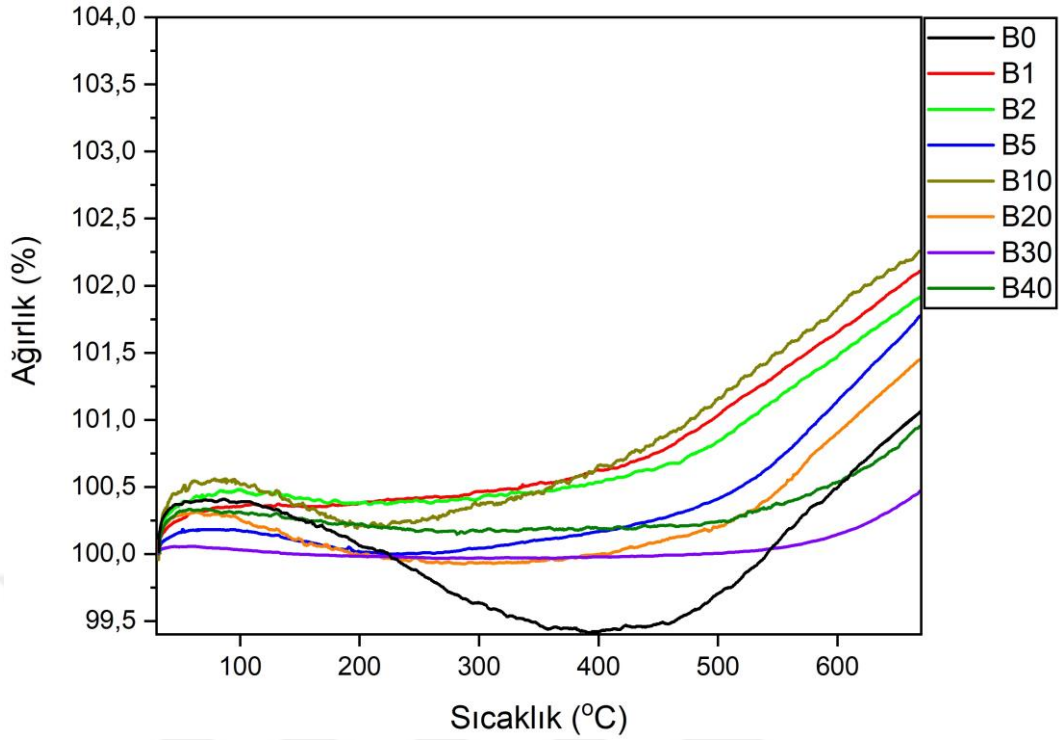


Şekil 3.3. AA2024/B₄C kompozit tozlarının görünür yoğunluk grafiği

3.1.3. AA2024/B₄C Kompozit Tozların Termogravimetrik Analizler

Şekil 3.4, sıcaklık arttıkça %0, %1, %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 B₄C içeren AA2024 alüminyum matris kompozitlerinin sergilediği ağırlık değişimlerini ayrıntılı olarak göstermektedir. Tüm numunelerde (B0-B40) ilk 100 °C'nin altında, toz yüzeyindeki nem, adsorbe su ve uçucu organik kalıntıların uzaklaşmasına bağlı olarak %0.1-%0.5 arasında hafif bir ağırlık artışı veya sabitlik gözlenmektedir. Saf AA2024'ün (B0) ağırlığı bu aralıkta %100,0 düzeyine inerken, düşük oranlı B₄C takviyeli örnekler (B1 -B20) %100.1-100.3

arasında kalır. B₄C içeriği arttıkça bu başlangıç ağırlık artışı azalır; çünkü B₄C, hidroskopik olmayan yapısı sayesinde nem tutulumunu sınırlayarak uçucu maddelerin ayrışmasını dengeler (Öztop vd., 2024). 150 °C'nin üzerinde, B0 ve düşük B₄C içerikli numunelerde (B1, B2, B5) hafif bir ağırlık kaybı başlar. B0, yaklaşık %99.5'e düşerek en büyük kaybı gösterir; bu durum, gevşek Al₂O₃, CuO ve MgO gibi oksit tabakalarının ayrışması ve mikroçatlaklardan oksijen desorpsiyonuna bağlıdır. B₄C oranı arttıkça bu ağırlık kaybı azalır; zira B₄C partikülleri mikroçatlakları doldurarak oksijen difüzyonunu kısmen engeller ve matris içi oksit fazlarının termal kararlılığını artırır. Yaklaşık 350 °C'den itibaren B0'da ağırlık en düşük değere ulaştıktan sonra yeniden artışa geçer. Bu, yüzeyde ince, koruyucu Al₂O₃ tabakasının parabolik kinetikle büyümesinden kaynaklanır. Düşük oranlı B₄C'li örneklerde (B1-B10), oksidasyon daha erken (300 °C) ve daha keskin başlar; çünkü takviyeler, aktif bölge oluşturarak atomik oksijenin bağlanmasını ve oksit büyümesini hızlandırır. Örneğin B10'da 450 °C'ye kadar %101 civarında belirgin bir kütle artışı kaydedilir. 450 °C'den sonra tüm numunelerde doğrusal/parabolik ağırlık artışı hâkimdir. Bu artış hem Al₂O₃ tabakasının kalınlaşması hem de B₄C'nin termal oksidasyonu sonucu oluşan B₂O₃'ün tutulumuyla ilgilidir. Özellikle B10 numunesi, 650 °C'de %102.2 ile en yüksek kütle artışını gösterir. Daha yüksek takviyeli örneklerde (B20-B40) ise artışlar sırasıyla 1.5 % (B20), 0.7 % (B30) ve 1.2 % (B40) aralığında kalır. B30'da gözlenen düşük artış, yüksek B₄C oranının oksijen bariyeri etkisinin baskın olduğuna işaret eder. AA2024/B₄C kompozitlerinin termogravimetrik profili; düşük sıcaklıklarda uçucu madde desorpsiyonu ve gevşek oksit ayrışmasına, orta sıcaklıklarda matrisik oksit fazlarının kararlılığına, yüksek sıcaklıklarda ise koruyucu oksit tabakalarının büyüme kinetiğine dayanmaktadır. Optimum B₄C içeriği (%10), oksidasyonun en hızlı ve en fazla kütle artışıyla gerçekleştiği seviyeyi temsil ederken, daha yüksek takviyeler (B20-B30) oksijen difüzyonunu kısıtlayarak termal stabiliteyi iyileştirmektedir. Bu bulgular, yüksek sıcaklıkta oksidasyona dirençli kompozit tasarımında B₄C oranının kritik bir kontrol parametresi olduğunu göstermektedir (Emmy Prema vd., 2020; Radha vd., 2020).

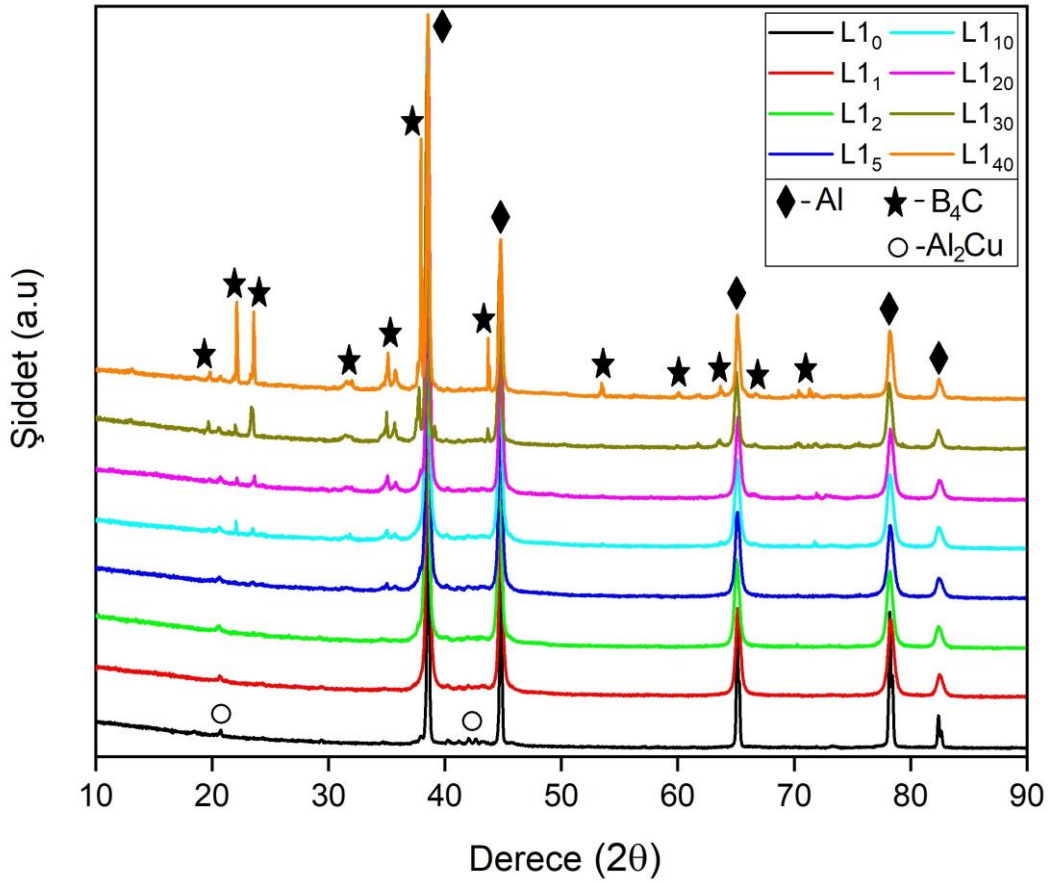


Şekil 3.4. AA2024/B₄C kompozit tozlarının TGA analiz grafiği

3.1.4. AA2024/B₄C Kompozitlerin XRD Analizleri

Toz metalurjisi yoluyla sentezlenen kompozit numunelerde bulunan fazları belirlemek için X-ışını kırınımı analizi gerçekleştirildi. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi elde edilen XRD desenleri, üretilen kompozitlerin faz bileşimi hakkında değerli bilgiler sağlar. Grafikteki örnekler L₁₀ (saf AA2024 tozu) ile başlayıp sırasıyla %1, %2, %5, %10, %20, %30 ve %40 ağırlıkça B₄C takviyeli kompozit tozlarını (L₁₁...L₁₄₀) temsil etmektedir; her bir desen dikey yönde ofsetlenmiş, böylece pik değişimleri kolayca izlenebilmektedir. Bu desenlerin analizi, JCPDS kart No: 04-0787'ye referansla birincil matris elemanı olarak alüminyumun (Al) baskın varlığını ortaya koymaktadır (Adib ve Abedinzadeh, 2023). Alüminyuma karşılık gelen karakteristik kırınım pikleri, sırasıyla (111), (200), (220), (311) ve (222) kristalografik düzlemlere endekslenen 38.4°, 44.7°, 65.1°, 78.2° ve 82.4° kırınım açılarında (2θ) gözlemlendi. Ayrıca, XRD analizi, toz metalurjisine özgü mekanik alaşımlama ve müteakip sıcak presleme işlemleri sırasında oluşan, özellikle Al₂Cu (JCPDS No: 25-0012) intermetalik fazların oluşumunu doğruladı (Liu ve Chen, 2022; Sharma ve Mishra, 2022). Kompozit matris içindeki bu intermetalik fazların nispeten düşük konsantrasyonları nedeniyle,

FDM'ler de dahil olmak üzere kompozitin özellikleri üzerindeki etkileri ihmal edilebilir olarak değerlendirilmiştir. Alüminyum matris ve intermetalik fazlara ek olarak, XRD desenleri, JCPDS kart No: 35-0798'e referansla B₄C'nin varlığını ortaya koymuştur (Lin vd., 2023; H. Wang vd., 2024). B₄C fazının karakteristiği olan kırınım tepeleri; 21.2°, 24.8°, 27.7°, 32.1°, 41.2°, 43.0°, 53.5°, 57.1°, 60.2°, 68.4° ve 72.1°'de gözlenmiştir. Özellikle, bu B₄C tepelerinin yoğunluğu, artan takviye içeriğiyle birlikte kademeli bir artış göstermiştir ve bu da kompozit yapı içinde takviye fazının artan varlığını göstermektedir. Ayrıca, B₄C takviyesinin miktarı arttıkça, Al₂Cu intermetalik piklerinin yoğunluklarının belirgin bir düşüş gösterdiği gözlemlendi. Bu eğilim, B₄C parçacıklarının daha yüksek hacim oranının matris içindeki intermetalik fazların oluşumunu veya tespit hassasiyetini etkilemiş olabileceği olası bir seyreltme etkisini düşündürmektedir. Bu değişikliklere rağmen, bu intermetalik fazların varlığı nedeniyle kompozit özelliklerinde önemli bir zararlı veya yararlı etki gözlenmedi. Sonuç olarak, XRD analizi, toz metalurjisi yoluyla B₄C ile takviye edilmiş Al bazlı kompozitlerin başarılı bir şekilde sentezlendiğini doğruladı. Elde edilen sonuçlar, faz bileşimi, pik yoğunlukları ve takviyenin kompozit malzemelerin mikro yapısal özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin temel bilgiler sağlar (Li vd., 2024; Chao vd., 2022b; Singh, vd., 2022). Özetle, grafikteki XRD desenleri; mekanik alaşımlama ile elde edilen AA2024/B₄C tozlarının mikroyapısal olarak iki ayrı saf faz (Al ve B₄C) halinde korunduğunu; istenmeyen reaksiyon ürünlerinin ve intermetalik yoğunluğunun minimal düzeyde kaldığını; ayrıca artan B₄C içeriğiyle matris fazının hacimsel oranının öngörülebilir biçimde azaldığını ortaya koymaktadır. Pik pozisyonlarındaki sabitlik, kompozit sistemin termal veya basınca bağlı olarak kafes parametresi değişimleri yaşamadığını; buzzerlı pik genişlemeleri ise mekanik alaşımlamanın ince taneli ve yüksek gerilimli bir toz yapısı yarattığını gösterir. Bu sonuçlar, sonraki sıcak pres ya da sinterleme adımlarında dengeli mekanik özellikler ve yüksek homojenlik vaat eden sağlam bir ön çalışma sunmaktadır.

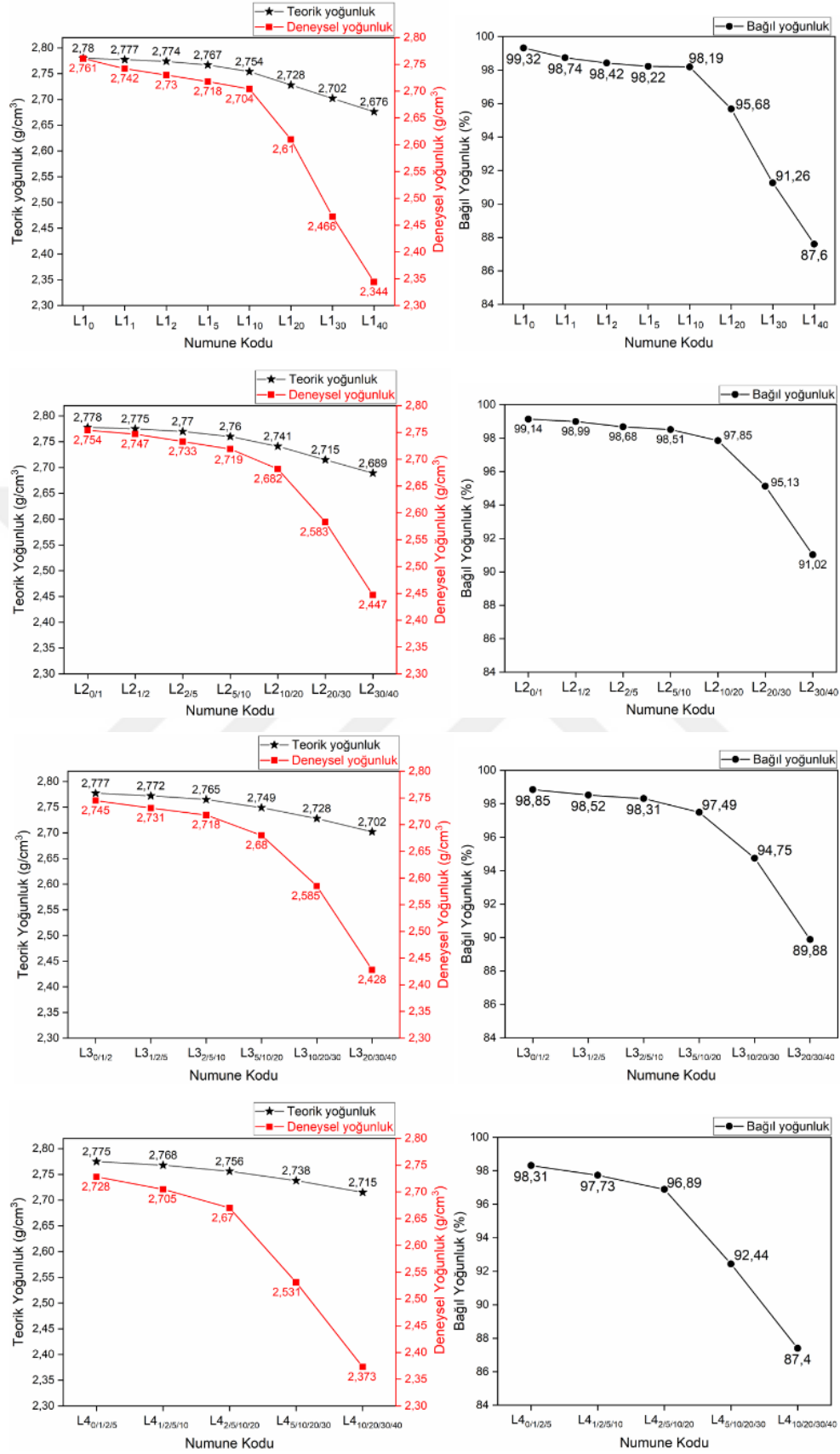


Şekil 3.5. AA2024/B₄C kompozit bulk numunelerin XRD analiz grafiği

3.1.5. AA2024/B₄C FDM'lerin Yoğunluk Analizleri

Şekil 3.6, toz metalurjisi ile üretilen AA2024 alaşımının deneysel yoğunluk ve gözeneklilik değerlerini, AA2024/B₄C kompozit numuneleri ve FDM numuneleriyle birlikte sunmaktadır. Takviye içeriğine ve fonksiyonel gradyan katmanlarının sayısına bağlı olarak bağıl yoğunluk değerlerindeki değişimler, toz sertliği, takviye dağılımının homojenliği ve parçacık boyutu düzgünlüğü dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Chávez-Vásquez vd., 2021). Aşağıdaki dört alt grafikte, AA2024 matrisi içine farklı oranlarda B₄C takviyesi eklenmiş tek katmanlı (L1), iki katmanlı (L2), üç katmanlı (L3) ve dört katmanlı (L4) fonksiyonel dereceli kompozit numunelerin bağıl yoğunluk değerleri gösterilmektedir. Tek katmanlı (L1) kompozitlerde, saf AA2024'ün göreceli yoğunluğu yaklaşık %99.2 olarak ölçülmüştür. B₄C içeriği %1'den %10'a çıkarıldığında yoğunluk yalnızca hafifçe azalarak hâlâ %98'in hemen üzerinde kalmaktadır; burada, düşük oranlı seramik takviyesi, ısıt

aktivasyon altında Al matrisin plastik akışını ve difüzyonunu destekleyerek gözenekleri kapatmaktadır. Ancak %20'nin üzerindeki B₄C oranlarında sert parçacıkların plastik akışı engellemesi ve artan partikül -matris arayüzü nedeniyle gözenek kapanması zayıflar; bu durumda görelî yoğunluk önce %95.7'ye, %30'larda %91.3'e ve %40'ta %87.8'e kadar gerilemektedir. İki katmanlı (L2) tasarımlarda, düşük ortalama B₄C içeriğinde (yaklaşık %2-8) kompozitler %98-99 bandında yüksek densifikasyon göstermektedir. %10/20 (ortalama %15) kompozitte yoğunluk hafifçe %98'e düşerken, %20/30 ve %30/40 gibi daha yüksek gradyanlarda tek katmanlı eşdeğerlerine benzer biçimde %95 ve %91 düzeylerine kadar azalma görülmektedir. Bu durum, katmanlar arası termal genleşme uyumsuzluğu ve arayüz boşluklanmasının iki katmanlı yapı performansını bir miktar kısıtladığını ancak homojen L1 yapıya yakın sonuç verdiğini göstermektedir. Üç katmanlı (L3) örneklerde, ortalama B₄C içeriği %5-10 aralığında yoğunluk %97-98 bandında iken, %10-20 aralığında %94-97'ye ve %30 civarında %90 civarına gerilemektedir. Dört katmanlı (L4) yapılar ise benzer eğilimi sürdürmekle birlikte, arayüz sayısının artması nedeniyle aynı ortalama B₄C oranında bile yoğunluk değerleri L3'ten bir miktar daha düşük seyreder. Örneğin L_{42/5/10/20}'de yoğunluk %96.8 iken, en yüksek gradyanlı L_{410/20/30/40}'ta %87.5'e kadar iner. Bu yoğunluk düşüşlerinin temel mekanizmaları; düşük B₄C oranlarında Al matrisin yüksek sıcaklıktaki tane sınırı difüzyonu ve plastik deformasyonu ile gözenek kapatmanın efektif olması, yüksek B₄C oranlarında ise seramik parçacıkların plastik akışı engelleyip difüzyon yüzeyini bölmesiyle gözenek kapanmasının zorlaşmasıdır. Çok katmanlı yapılar ayrıca katmanlar arası ısıl genleşme katsayısı farklılıklarından kaynaklanan mikroskobik boşluk ve çatlak oluşumuna yatkındır (Çelebi vd., 2025).



Şekil 3.6. FDM numunelerin teorik, deneysel ve bağıl yoğunluk değerlerini gösteren grafikler

3.1.6. AA2024/B4C FDM'lerin Mikroyapısal Analizleri

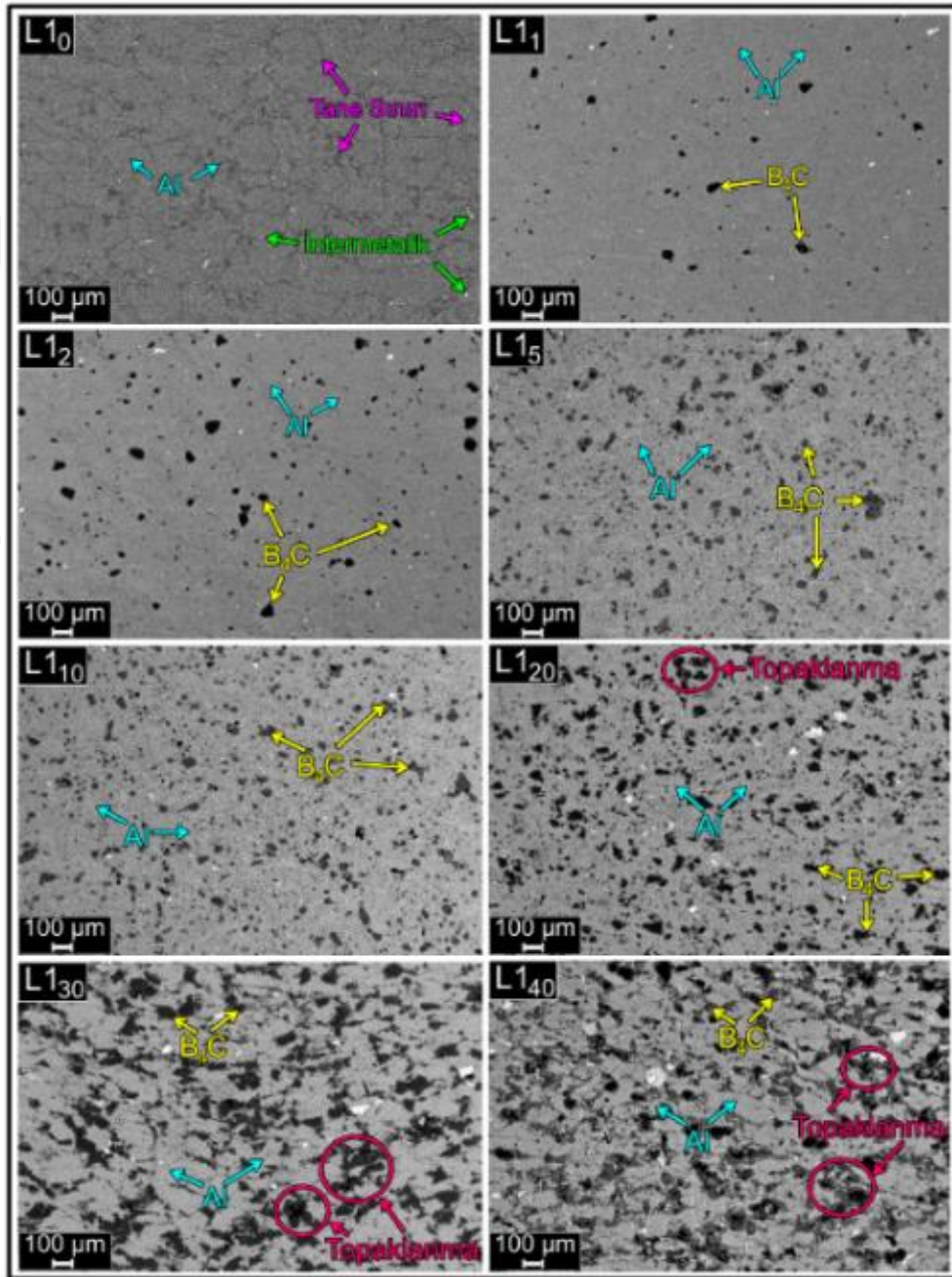
Şekil 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10, toz metalurjisi yoluyla üretilen sinterlenmiş AA2024 alaşımının, AA2024/B₄C kompozitlerinin ve FDM AA2024/B₄C kompozitlerinin mikro yapısal SEM görüntülerini sunmaktadır. Mikro yapısal gözlemler, Al, Al₂Cu ve B₄C fazlarının varlığını doğrulayan XRD analizinin bulgularını desteklemektedir. L₁₀'da saf matriste düşük sertlik-yüksek süneklik dengesi görülürken, L₁₁ ve L₁₂'deki düşük dolgu oranları çok hafif güçlendirme sağlar. L₁₅ ve L₁₁₀'da ise tam bir denge yakalanmıştır: %5 ve %10 B₄C içeren bu örnekler, partiküllerin mükemmel homojen dağılımı ve güçlü partikül-matris bağı sayesinde mekanik sertlik, darbe dayanımı ve aşınma direncini ideal biçimde dengeler. Poroziteleri ihmal edilebilir düzeyde kalırken, Orowan etkisine bağlı güçlendirme maksimuma yaklaşır; bu da onları tek katmanlı seride en yüksek performanslı numuneler haline getirir. %20'nin üzerine çıkıldığında başlayan kümeleşme ve boşluklanma L₁₅ ve L₁₁₀'un başarısını daha da ön plana çıkarır.

L_{20/1} ve L_{21/2}'de gradyan daha hafifken, L_{22/5} ve özellikle L_{25/10}'daki, ara yüzeylerde son derece pürüzsüz geçişler ve minimum boşluklanma sunar. Bu katmanlar, iki aşamalı artışta hem sertlik hem de süneklik kazancını dengede tutarak, çok katmanlı gradyasyonun mekanik verimliliğini en üst düzeye çıkarır. Yoğunluk artışıyla birlikte kırılgenlik sinyallerinin hâlâ düşük kalması, L_{25/10}'u iki katmanlı dizilimde en başarılı örnek yapar. L_{220/30} ve L_{230/40}'ta ise alt katmanlarda sıkışmış agregalar, artan boşluklanma ve debonding bölgeleri görülmüş, malzemenin kırılgenlik riski yükselmiştir.

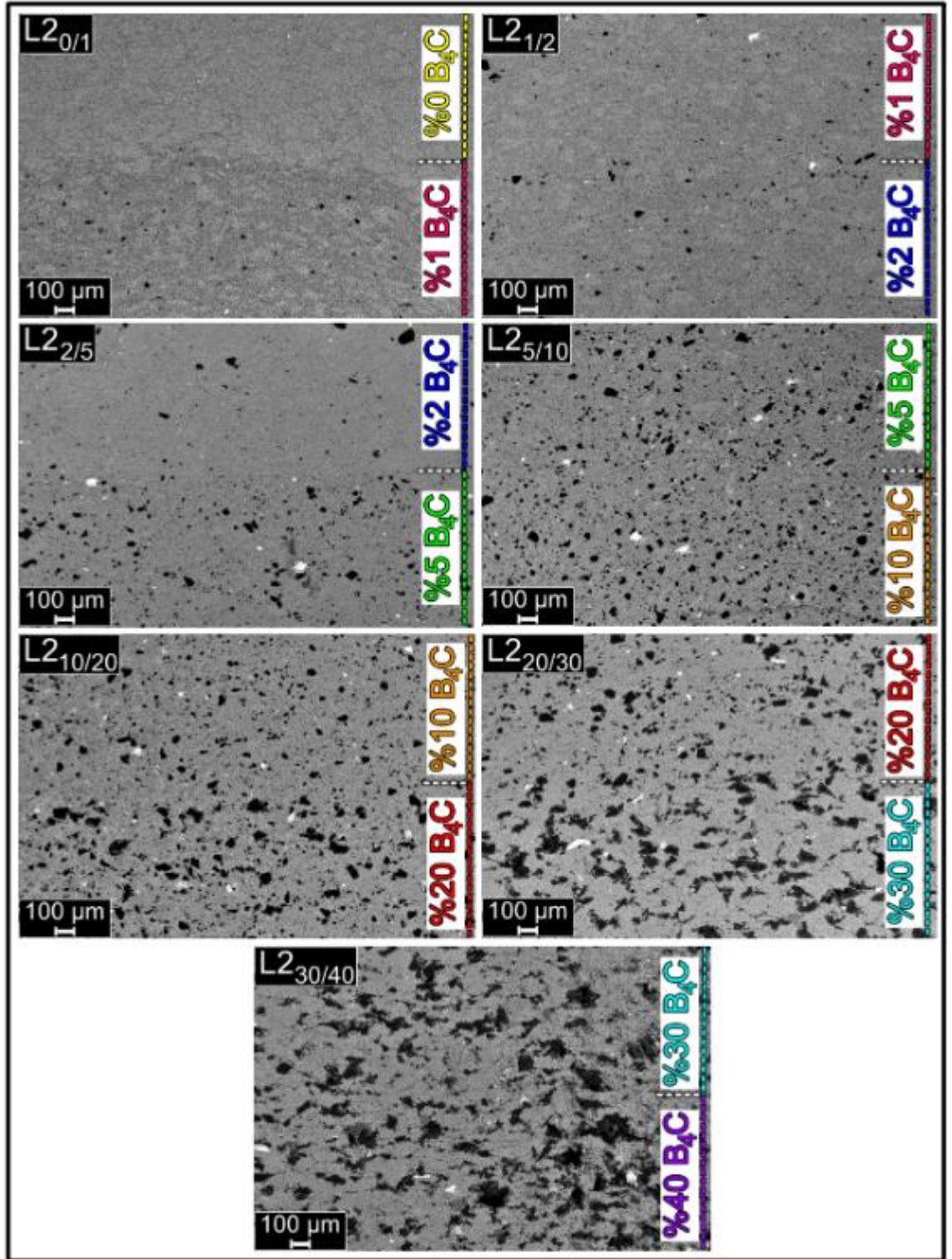
L_{30/1/2} ve L_{31/2/5}'te gradyan kontrollü artış görülürken, L_{32/5/10} ve L_{35/10/20}'deki %5 ve %10 içeren ara katmanlar, üç katmanlı dizilimde en iyi performansı verir. Bu örneklerde Orowan güçlendirmesi ile matris sıkışma mekanizmaları bir araya gelerek hem mukavemeti hem de tok tutumu optimize eder. Agregasyon ve boşluklanma henüz başlamadığı için yüksek dolgu oranlarındaki kırılgenlik riski minimaldir. L_{310/20/30} ve L_{320/30/40}'ta alt katmanlarda yoğun agregalar ve artan boşluklanma ile yüksek dolgu oranlarının kırılgenlik riskini yükselttiği açıkça ortaya çıkar.

L_{40/1/2/5}'te en üst katman saf matrisi, ikinci ve üçüncü katman seyrek parçacıklı, dördüncü katman ise orta yoğunlukta B₄C içerir; katman geçişleri temiz ve porozite çok düşüktür. L_{41/2/5/10} ve L_{42/5/10/20}'de gradyan kontrollü şekilde modüle edilir; %20 katmanda ilk debonding ve boşluk izleri belirirken matris parçacık uyumu korunur. L_{45/10/20/30} ve L_{410/20/30/40}'ta ise alt iki katman agregalar oluşturur, porozite nispeten artar ve debonding

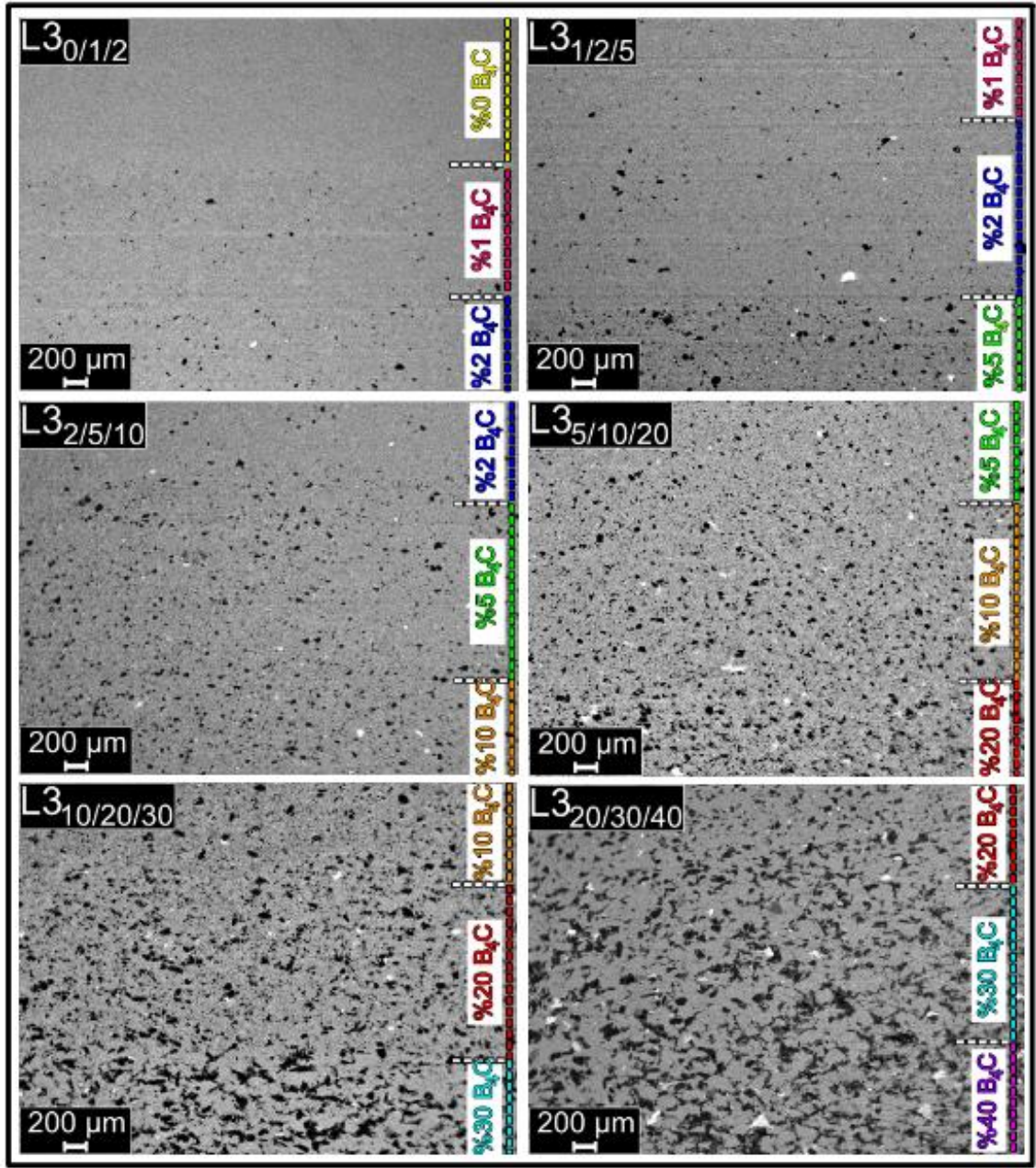
bölgeleri yaygınlaşır; bu durum, yüksek sertlik elde edilirken kırılabilirlik riskinin de artacağını göstermektedir. L4 numunelerde dört katmanlı yapı, en üst katmandan en alt katmana doğru artan B_4C içeriğiyle ciddi mikro yapı sorunları sergilemiştir. Özellikle en alt katmanlarda parçacık aglomerasyonları yaygın, porozite seviyeleri diğer tüm serilere kıyasla en yüksek düzeydedir. Katmanlar arası bağlanma zayıflamış, sık sık debonding izleri ve mikro çatlak ağları gözlemlenmiştir. Bu bozuk süreklilik, mekanik mukavemeti dramatik biçimde düşürmüştür ve kırılabilirlik katsayısını artırmıştır.



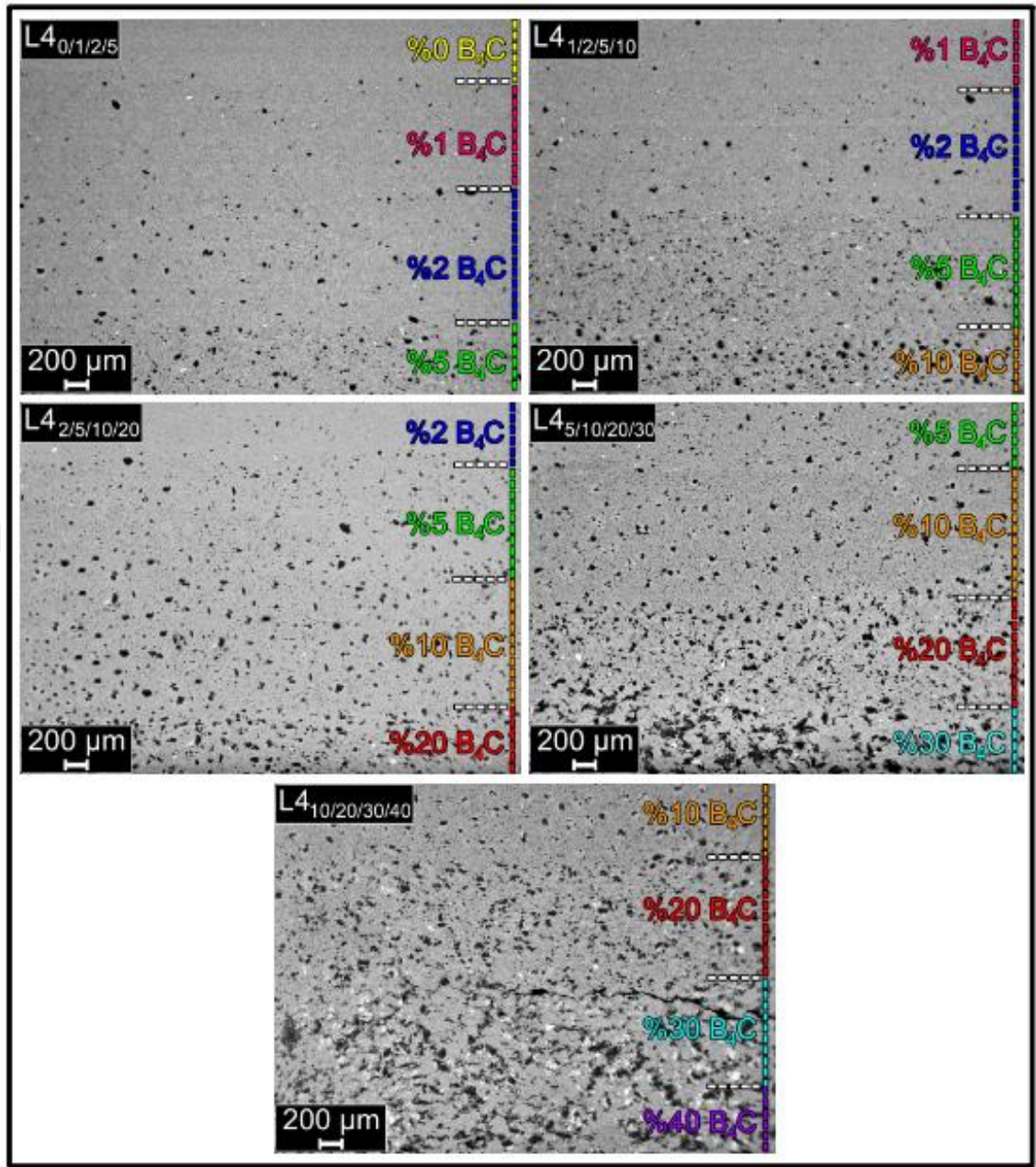
Şekil 3.7. AA2024/ B_4C kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 3.7. FDM iki katmanlı kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 3.8. FDM üç katmanlı kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri



Şekil 3.9. FDM dört katmanlı kompozit numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.11, 3.12, 3.13 ve 3.14, AA2024 alaşımı, AA2024/B₄C kompozitleri ve AA2024/B₄C FDM kompozitlerine karşılık gelen Enerji Dağıtıcı Spektroskopisi (EDS) haritalama görüntülerini sunmaktadır. Tüm EDS görüntülerinde alüminyum (Al) yeşil renkle, bor (B) kırmızıyla ve karbon (C) sarıyla temsil edilmektedir. Şekil 3.10'de (tek katmanlı L₁₀-L₁₄₀ numuneler) EDS haritaları saf Al matrisinin başlangıç mikro yapısını ve takviye partiküllerinin içerik oranına bağlı evrimini açıkça gösteriyor. L₁₀'da yalnızca Al sinyali (yeşil kanal) homojen ve sürekli bir film oluştururken, B (kırmızı) ve C (sarı)

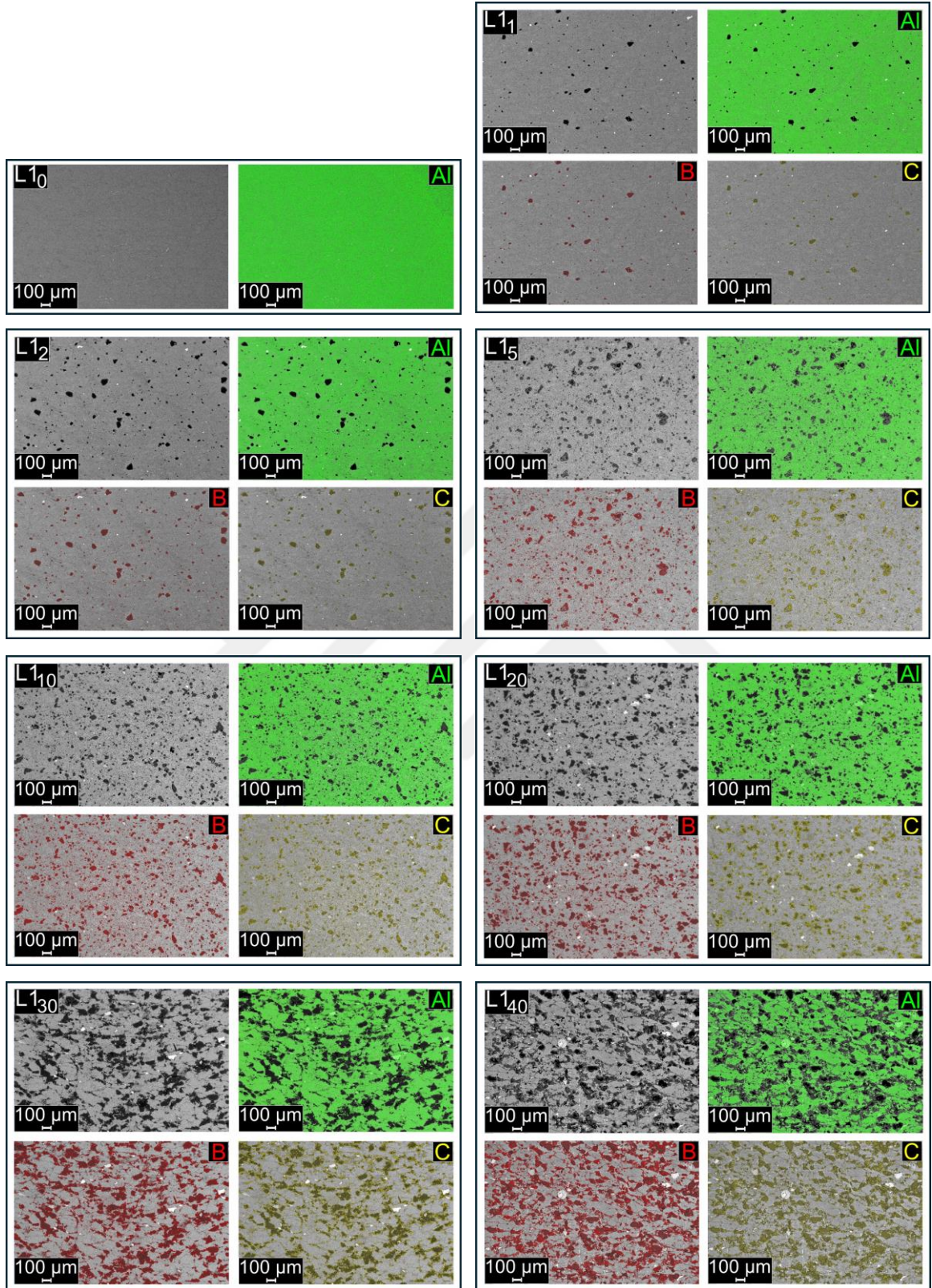
haritalarında neredeyse hiç işaret görülüyor; bu, sinterleme sonrası saf matrisin mikro gözeneksiz yapısını ve düşük difüzyon etkinliğini doğrular. $L1_1$ ve $L1_2$ 'de, %1-%2 seviyesindeki B_4C takviyesinin, ince partiküller olarak dağılmış olduğu; partiküllerin düzensiz bir “nokta” dağılımı izlediği, ancak nispeten zayıf aglomerasyon eğilimi gösterdiği görülüyor. $L1_5$ ve $L1_{10}$ 'da (%5 ve %10) ise partikül nüfusu ve boyut dağılımı optimize edilmiş; kırmızı ve sarı sinyaller hem sayı hem de alan örtüsü bakımından artarken, partiküller matris içine iyi gömülmüş, partikül-matris ara yüzeyleri net ve süreklilik arz ediyor. Bu durum, hem sıkışma sırasında partiküller arası boşlukların azalmasına hem de içsel gerilmelerin dengelenmesine katkı sağlayarak, sertlik ve tokluğun artmasına imkân verir. $L1_{20}$ 'de partikül boyutunda belirgin büyüme ve kümelenme izlenirken, $L1_{30}$ ve $L1_{40}$ 'ta partiküller arası sınırlar bulanıklaşıyor, birleşik B-C faz kümeleri ortaya çıkıyor; bu aglomereler sinter zonlarında mikroyapısal heterojenliğe ve muhtemel kırılma kaynaklarına işaret eder.

Şekil 3.12'de ise (iki katmanlı $L2_{0/1} \rightarrow L2_{30/40}$) fonksiyonel derece gradyanının etkinliğini yansıtıyor. $L2_{0/1}$ 'de alt katman hemen hemen saf Al davranışı sergilerken, üst katman %1-%2 aralığındaki takviye etkilerini zayıf da olsa yansıtıyor; ara yüz, ince bir bant halinde sınırlı difüzyon bölgesi olarak izleniyor. $L2_{1/2}$ ve $L2_{2/5}$ 'te bu sınır bölgesi genişleyip bulanıklaşırken, B ve C sinyallerinin alt ve üst katmanlar arasında lineer bir yoğunluk gradyanı oluşturduğu görülüyor. $L2_{5/10}$ ve $L2_{10/20}$ 'de takviye içerikleri artık makro ölçekte tanımlanabilir; partiküller alt katmana doğru kademeli nüfuz ederken, ara yüzeylerde pürüzsüz geçiş halkaları ince bir dağılım eşitliği sunuyor. Özellikle $L2_{20/30}$ 'da üst katmandaki partikül örtüsü %30'a kadar çıkarken, alt katmanda %20'lik ince bir nüans devam ediyor; burada sinterleme esnasında sağlanan ısı enerjisi ve uygulanan basıncın, katmanlar arası bağlanmayı güçlendirdiği, mikro çatlak oluşumunu engellediği anlaşıyor. $L2_{30/40}$ 'ta ise üst katmanın yoğun B/C ağı, matris içine doğru yer yer difüzyon bandı oluşturarak hem mekanik dayanımı hem de gamma ışın soğurmayı optimize eden çok işlevli bir profil meydana getiriyor.

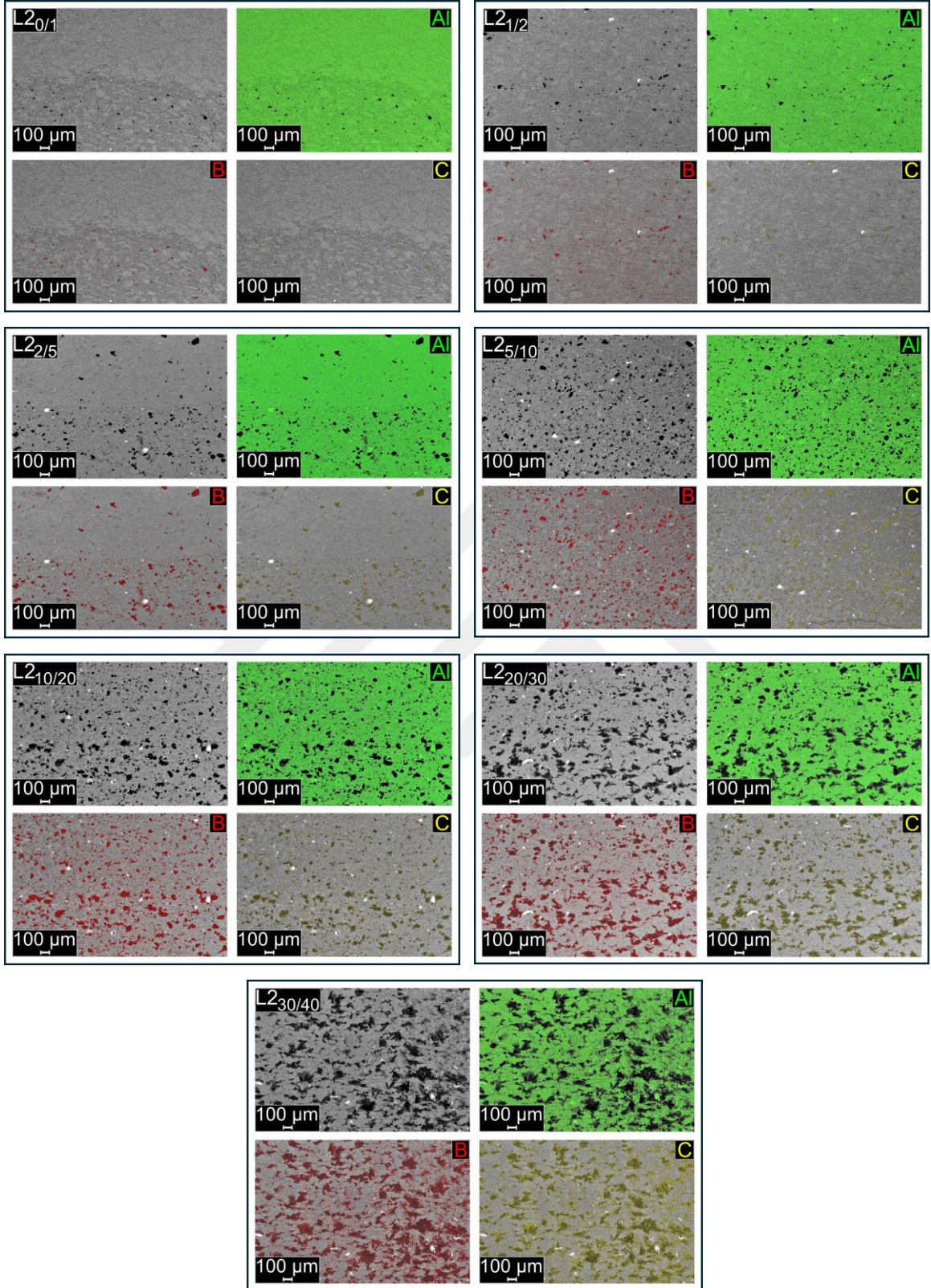
Şekil 3.13'de ($L3_{0/1/2} \rightarrow L3_{20/30/40}$) üç katmanlı işlevsel derece düzenlemesi göze çarpıyor. $L3_{0/1/2}$ 'de alt zon saf Al'a yakın seyir izlerken, orta ve üst zonlarda %1-%2 aralığında ince partikül yoğunluğu artışı; ara zonlardaki sınırlı difüzyon bantları ise küçük çözünme bölgeleri oluşturuyor. $L3_{1/2/5}$ 'te orta katmanın %2-%5 artışa yanıt vererek, bunun da yüzey alanı/volüm oranı bakımından etkin bir yük paylaşımı sağladığı izleniyor. $L3_{2/5/10}$ 'da bu orta zon partikülleri hem birbirine yaklaşıp bir ağ yapısı kuruyor hem de alt

ve üst katmanlarla uyumlu bir birleşim sunuyor; partikül-matris tutunması güçlü, boşluk oluşumu düşük. $L_{35/10/20}$ 'de ara katmanın en yüksek sinyal yoğunluğu, %10-%20 takviye içeren bölgedeki aglomere ve dağılma dengesi sayesinde tokluğa olumlu etki edecek bir mikro yapı sağlıyor. $L_{310/20/30}$ ve $L_{320/30/40}$ örneklerinde üst bölgede %30-%40'a kadar çıkan sinyal yoğunlukları, üst katman fonksiyonelliğini maksimuma çıkarmakla birlikte, alt zonlardaki düşük içerik bölgesinin matrise esneklik kazandırdığını, bu sayede çok katmanlı gerilme dağılımının ideal biçimde gerçekleştiğini gösteriyor.

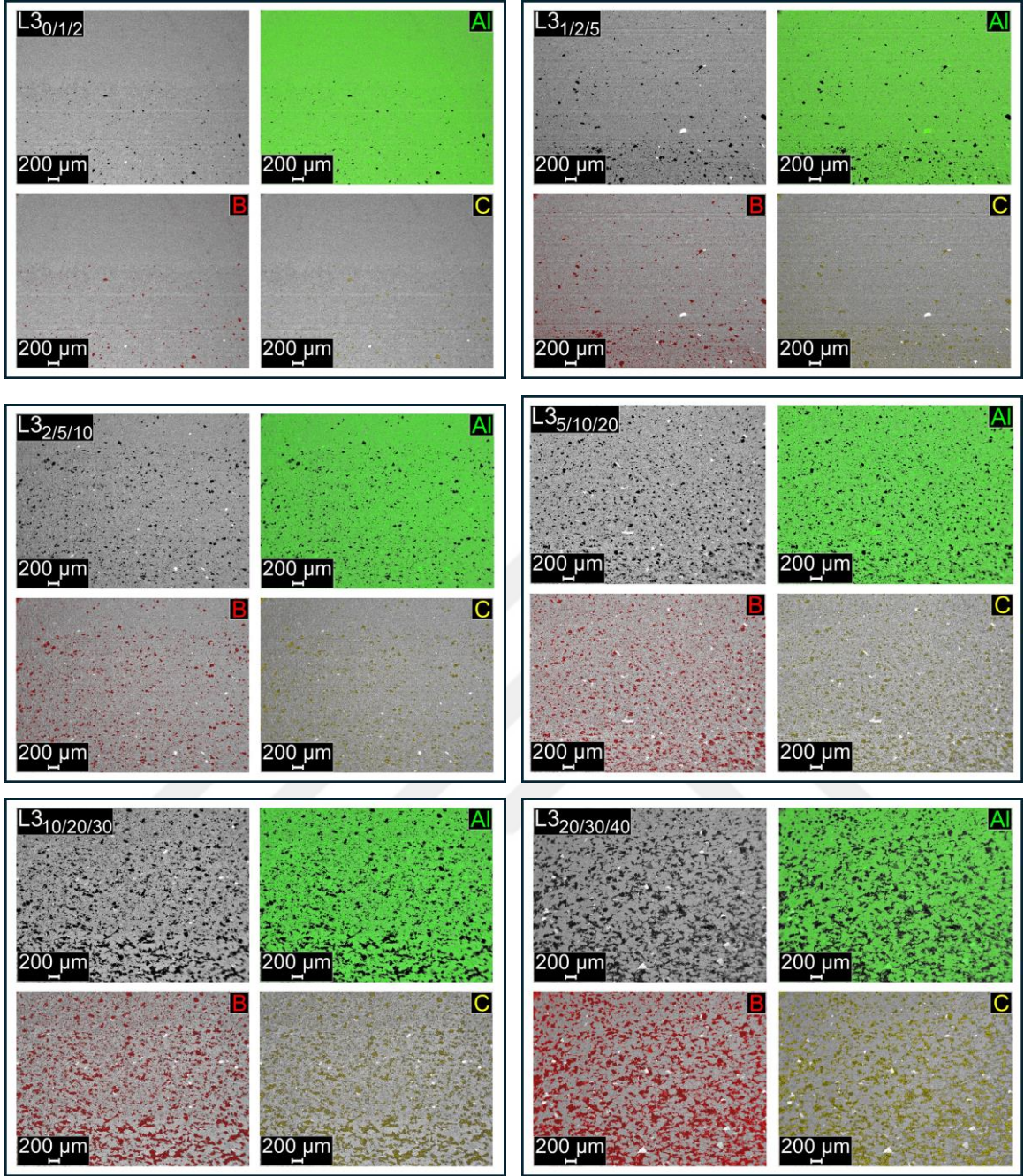
Son olarak Şekil 3.14'te ($L_{40/1/2/5} \rightarrow L_{410/20/30/40}$) dört zonlu FDM tasarımının mikroyapısal karmaşıklığını ortaya koyuyor. $L_{40/1/2/5}$ 'te en alt katman saf Al, onu %1 ve %2 takviye takip ederken, en üst katmanda %5 içeriğe ulaşılmış; tüm zonlardaki difüzyon bantları ince ve keskin hatlıdır. $L_{41/2/5/10}$ 'da bu zon sınırları hafifçe bulanıklaşıp genişlerken, partiküller zonlar arası geçiş bölgelerine nüfuz ederek mikro çatlak oluşumunu engelleyecek şekilde bağlanmış. $L_{42/5/10/20}$ 'de ise orta zon çaprazlamasına ek olarak, %10-%20 takviye içeren seviyede, sinterlendikten sonra oluşturdıkları mikro gözenekleri minimal seviyede tutarak yüksek yoğunluk sağlamış. $L_{45/10/20/30}$ 'da üç orta zonun her biri farklı partikül morfolojisi (küresel, kırıntısız, ince levhacık) sunarak aşınma direncini optimize ederken, $L_{410/20/30/40}$ 'ta üstteki yoğun B/C ağı, alt zonlardaki neredeyse boş iç bölgelerle birleşip hem hafiflik hem de yüksek radyasyon soğurma kapasitesi hedefini başarıyla dengelemiş görünüyor. Bu kapsamlı dört katmanlı EDS haritaları, tekniğe uygun sinterleme ve gradyan tasarımının ideal mikro yapı ve performans parametrelerini nasıl birlikte optimize ettiğini net biçimde ortaya koymaktadır. Bu çalışmada kullanılan toz metalurjisi işleminin, daha yüksek takviye seviyeleri hariç, aglomerasyon ve gözeneklilik gibi kusurların varlığını en aza indirirken hem monolitik hem de FDM numunelerinde homojen bir takviye dağılımını başarıyla sağladığını doğrulamaktadır (Rodriguez-Castro ve Kelestemur, 2002; Sai Charan vd., 2022).



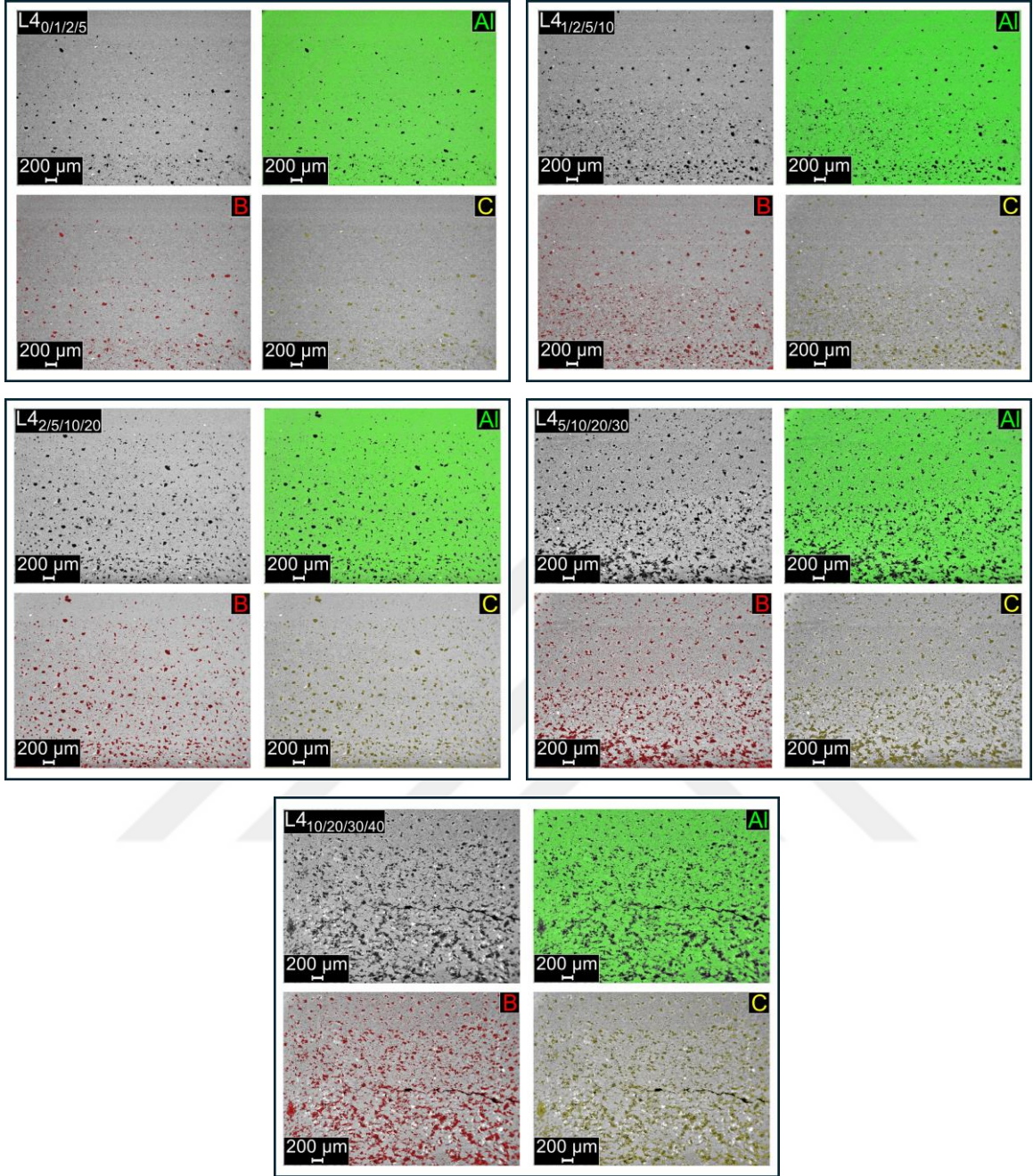
Şekil 3.11. AA2024/B₄C kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri



Şekil 3.12. FDM iki katmanlı kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri



Şekil 3.13. FDM üç katmanlı kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri



Şekil 3.14. FDM dört katmanlı kompozit numunelerin EDS haritalama analizi görüntüleri

3.2. AA2024/B₄C FDM'lerin Mekanik, Darbe ve Balistik Analizleri

3.2.1. AA2024/B₄C FDM'lerin Sertlik Analizleri

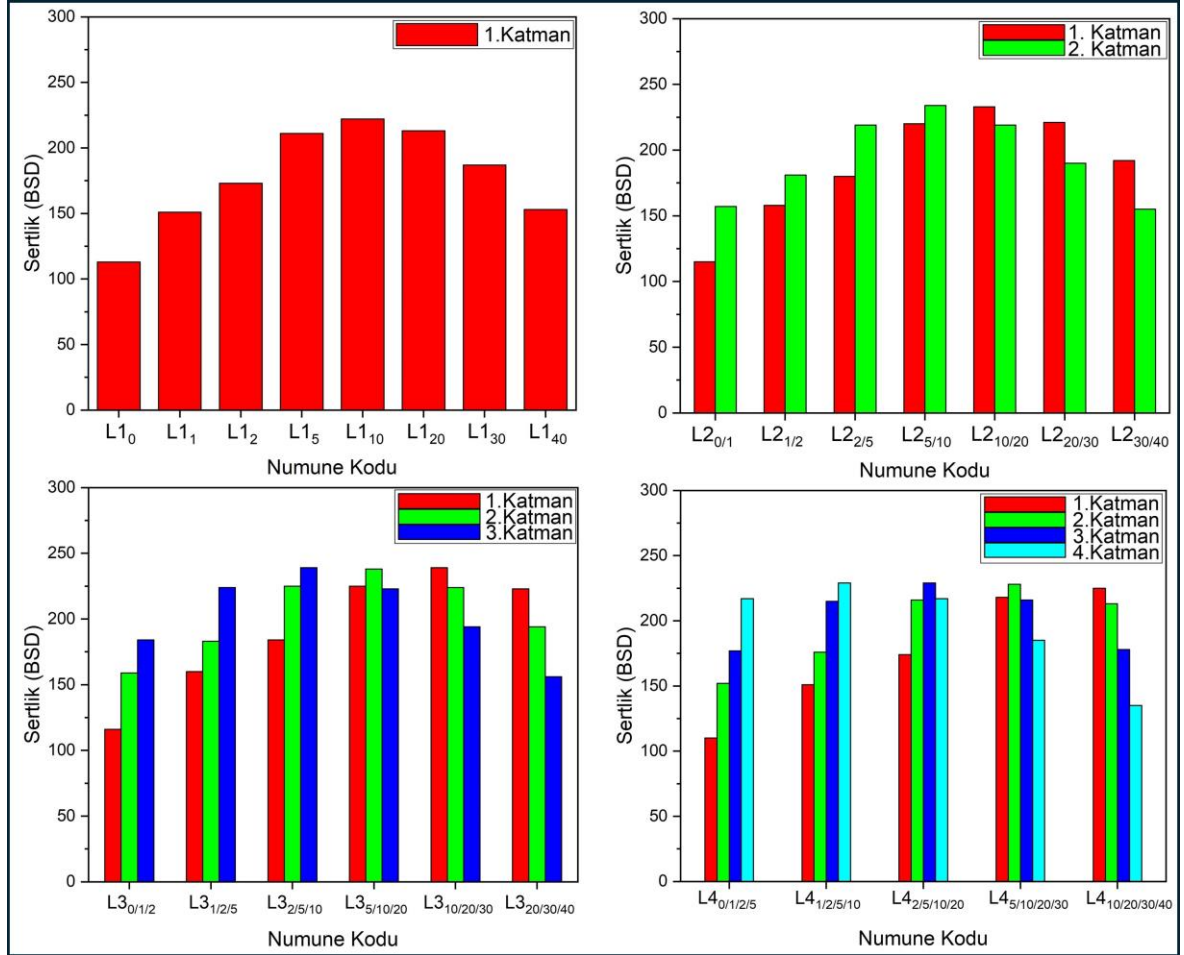
AA2024 matrisi içinde B₄C takviyesinin fonksiyonel dereceli dağılımı, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini kontrollü biçimde optimize etmeye olanak tanır. Sertlik

testleri, bu tür kompozitlerdeki partikül miktarı ve yerleşim düzeninin yüzey sertliği üzerindeki etkisini doğrudan ortaya koyar. Aşağıdaki grafiklerde; tek, iki, üç ve dört katmanlı fonksiyonel dereceli numunelerde gözlenen sertlik davranışlarını, her bir tasarımın neden ve sonuç ilişkileri bağlamında detaylı incelenmiştir (Şekil 3.15).

Tek katmanlı AA2024/B₄C kompozit numunelerde sertlik değerleri, B₄C içeriği arttıkça önce düzenli bir artış, ardından da gerileme eğilimi göstermektedir. Örneğin saf matris (L₁₀) yaklaşık 113 BSD iken, %10 B₄C takviyeli numune (L₁₁₀) en yüksek sertlik olan 222 BSD değerine ulaşmıştır; çünkü %10 seviyesinde partikül dağılımı homojenleşmekte, dislokasyon hareketi engellenmekte ve dolayısıyla deformasyon sertleşmesi maksimuma çıkmaktadır. Ancak B₄C içeriği %20'den sonra (L₁₂₀) sertlik 213 BSD'ye, %30'da (L₁₃₀) 187 BSD'ye; %40'ta (L₁₄₀) ise 153 BSD'ye düşmüştür. Bu gerileme, aşırı partikül aglomerasyonu ve matris-partikül ara yüzeyindeki gözeneklilik artışı nedeniyle sıcak pres sırasında yeterli yoğunlaşmanın sağlanamamasına bağlanabilir. Hata çubuklarının dar olması, ölçümlerin tekrar edilebilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. İki katmanlı yapı, tek katmanlıya kıyasla genel olarak daha yüksek sertlik seviyeleri sunmaktadır. Alt katmanda düşük, üst katmanda yüksek takviye oranı olacak şekilde tasarlanan L_{25/10} ve L_{210/20} numuneleri yaklaşık 225 BSD'de plato yapmıştır; çünkü katman geçişlerinde oluşturulan sert tabaka ile içten destek sağlayan daha sünek alt katman birlikte optimum mekanik uyumu sağlar. Bununla birlikte, üst katmandaki B₄C oranı %30/40'a çıkartıldığında (L_{230/40}) sertlik 173 BSD'ye düşer; bu durum, ara yüzeylerdeki artan arayüzey gerilmeleri ve toz yerleşim düzensizliklerinin bileşik yapının bütünlüğünü bozmasından kaynaklanır. İki katmanlı numunelerde de hata çubuklarının dar olması, proses kontrolünün başarılı olduğunu ortaya koyar. Üç katmanlı kompozitler, orta katmanda en yüksek takviye oranını barındıran L_{35/10/20} numunesinde 228 BSD ile maksimum sertlik gösterir; çünkü katmanlar arası gradyent, dislokasyonların geçişini daha etkin bloke eder ve sınır yüzeylerinde serbest enerji düşüşü sağlar. Alt ve üst katmanlardaki B₄C oranlarının aşırıya kaçması (L_{320/30/40}) ise sertlik değerini 191 BSD'ye geriletir; bunun nedeni, çoklu ara yüzeylerde artan mikro çatlak riski ve toz sıkışmasının azalmasıdır. Ayrıca üç katmanlı yapıda, nispeten dengeli bir mekanik ara yüzey zonlaması sağlandığında numunenin hem sertlik hem de tokluğunun birlikte iyi performans sunduğu gözlenmiştir. Dört katmanlı gradyanlı yapıda sertlik değerleri, çok katmanlı mimari nedeniyle genel olarak daha düşük seyretmiştir. En yüksek sertlik 211 BSD ile L_{45/10/20/30} numunesinin orta bölgesinde gözlenirken, L_{410/20/30/40}'ta 187 BSD'ye gerileme meydana gelmiştir. Katman sayısının dört

olması, ara yüzey sayısını artırarak malzeme içindeki termal ve mekanik gerilmelerin lokalize pürüzlenmesine ve mikro gözenekliliğin yükselmesine yol açmıştır. Bu nedenle, dört katmanlı dizilim metal matrisli kompozitin sertlik kazancını sınırlamış ve ideal katmanlama stratejisinin üç katman civarında olduğunu göstermiştir (Surya ve Prasanthi, 2022).

Bu veriler, AA2024/B₄C kompozitlerde sertlik optimizasyonunun ideal katmanlama ve takviye oranı tasarımına dayandığını göstermektedir. Tek katmanda %10, iki ve üç katmanda orta katmanda %10-20 aralığı, yüzey sertliğini en üst düzeye çıkarmakta; dört katmanlı yapının ise artan ara yüzey etkileri nedeniyle sertlik kazanımının sınırlı kaldığı sonucuna ulaşılmaktadır.



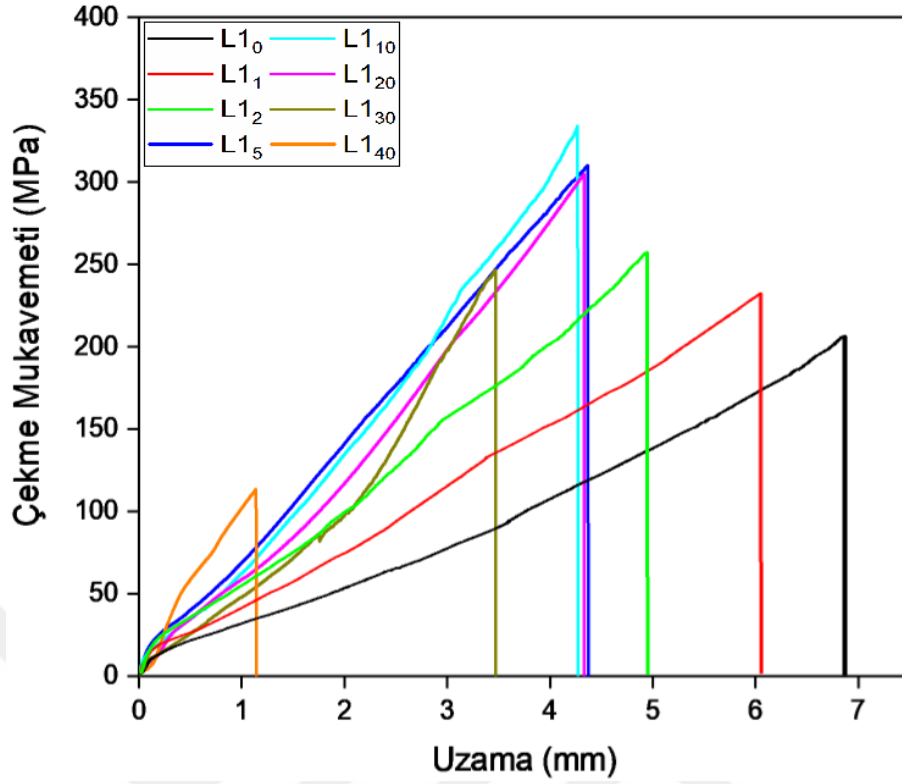
Şekil 3.15. FDM kompozit numunelerin sertlik değerlerini gösteren grafikler

3.2.2. AA2024/B₄C FDM'lerin Çekme Mukavemeti Analizleri

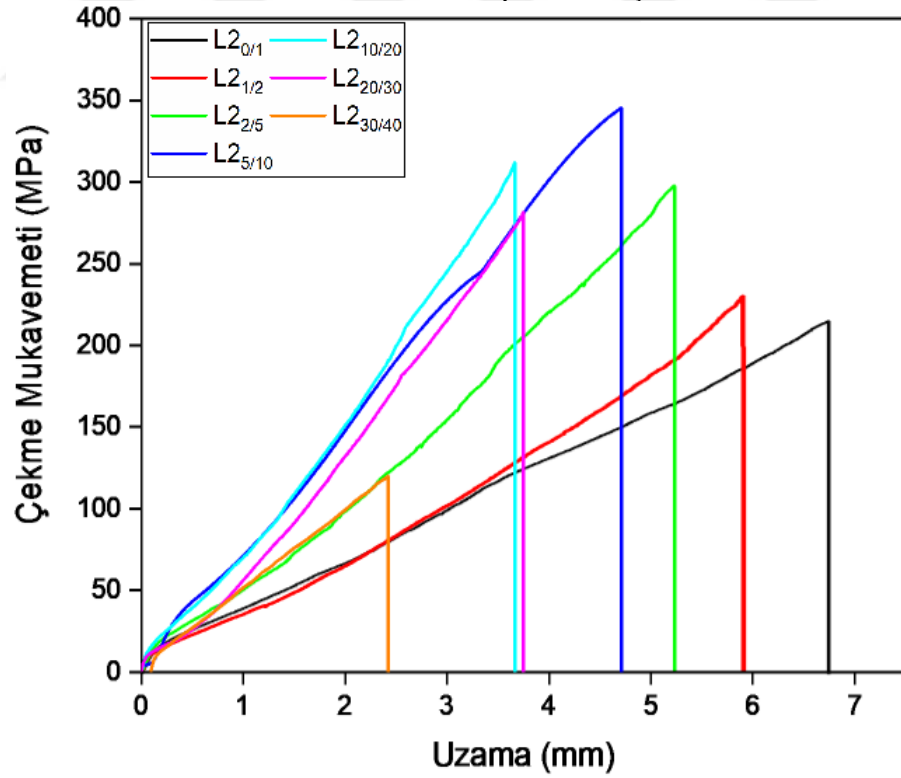
Şekil 3.16, 3.18, 3.18 ve 3.19'de dört farklı katman konfigürasyonuna (tek katmanlı L₁'den dört katmanlı L₄'e) sahip AA2024/B₄C kompozitlerin gerilme-uzama eğrileri gösterilmektedir. Şekil 3.15'te saf AA2024 (L₁₀) yaklaşık 205 MPa'lık maksimum çekme dayanımı ve 7 mm'ye yakın kopma uzamasıyla en düşük mekanik performansı göstermektedir. Çünkü matris içinde sert B₄C takviyesi olmadığından, plastik deformasyonun kolay ilerlemesi sayesinde yüksek sünekliğe (uzamaya) ulaşılmış; ancak çekme mukavemeti, takviyesiz malzemenin sınırlı dislokasyon engellemesi nedeniyle düşüktür. %5 ve %10 B₄C içeren L₁₅ ve L₁₁₀ eğrilerinde ise tepe dayanımı sırasıyla 310 MPa ve 330 MPa'ye yükselirken, uzama değerleri 4-4.2 mm düzeyine gerilemiştir. Bu artış, B₄C parçacıklarının dislokon hareketini kısıtlayarak mukavemeti artırması sayesinde gerçekleşirken, parçacık yoğunluğunun artması gevreklik artışına ve dolayısıyla daha düşük kopma uzamasına yol açmıştır. %20'nin üzerindeki takviyelerde (L₁₂₀, L₁₃₀, L₁₄₀) ise dayanım bir miktar geriye düşmekte veya doyumluğa ulaşmakta, uzama ise 3 mm'nin altına inmektedir; bunun nedeni yüksek takviye oranının partikül aglomerasiyonuna ve matris - takviye bağının zayıflamasına yol açarak erken çatlak başlatmasıdır. Şekil 3.17, arayüz sayısının iki katmana çıkarılması takviye oranlarının dengeli dağılımına imkân tanımıştır. En düşük performans, L_{20/1} ile 215 MPa ve 7 mm uzamadır; çünkü iç katmanda yalnızca %1 takviye, dislokasyon engellemesini zayıf kılmaktadır. L_{25/10} konfigürasyonu (345 MPa, 4.5 mm) en yüksek dayanımı ve makul sünekliği sunmaktadır; bunun sebebi %10 ve %5 katmanlarının ideal sertlik-süneklik dengesini sağlamasıdır. Yüksek takviye içeren L_{230/40} ise düşük uzama (2.3 mm) ve orta dayanım (110 MPa) göstermiştir; zira artan katman içi gerilmeler arayüzde erken çatlak oluşumunu tetiklemiştir. Sonuç olarak, iki katmanlı dizilimde orta seviye takviye kombinasyonları hem gevrek kırılma sınırını öteleyip hem de mukavemeti maksimize edebilmiştir. Üç katmana geçildiğinde (Şekil 3.18), ara katmanlı gradyasyonun katkısıyla L_{35/10/20} eğrisi, 360 MPa'lık en yüksek çekme dayanımını ve 4.8 mm'lik tatminkâr uzamayı sergilemiştir. Bu durum, düşük-orta-yüksek takviye katmanlarının kademeli mekanik özellik geçişi yaratarak stres yoğunlaşmalarını azaltması ve çatlak büyümesini geciktirmesinden kaynaklanmaktadır. L_{32/5/10} ve L_{310/20/30} da sırasıyla 305-310 MPa ve 5 mm uzama değerleriyle ikinci planda kalmıştır. Buna karşın L_{320/30/40} en erken kırılarak (2.1 mm, 140 MPa), yüksek katman takviyesi ve çok sayıda arayüzün birikimli gerilmeleri büyütüp gevrek kırılmayı kolaylaştırdığını göstermiştir. Dolayısıyla üç

katmanda da orta düzey içerikler, malzemenin çatlak karşıtı mekanizmalarını etkin kılmıştır. Şekil 3.19'da dört katmanlı dizilimler genel olarak en düşük mekanik performansı sergilemiştir. En yüksek dayanım 200 MPa ve uzama 3.7 mm ile L4_{0/1/2/5} konfigürasyonu elde edilirken; L4_{5/10/20/30} ve L4_{10/20/30/40} daha düşük (150 MPa, 2.1 mm) değerlere inmiştir. Bunun nedeni, dört arayüzün yarattığı karmaşık gerilme alanlarının ve toz yığınlaşmalarının arayüz zayıflıklarını artırması, dolayısıyla plastik deformasyonun devam etmesini engelleyerek daha erken kırılmaya yol açmasıdır. Ayrıca, çok katmanlı toz metalurjisi işleminde ısı ve basınç dağılımının homojen olmaması, porozite ve mikroyapı heterojenliğini tetikleyerek mukavemeti sınırlamıştır (Parihar vd., 2018).

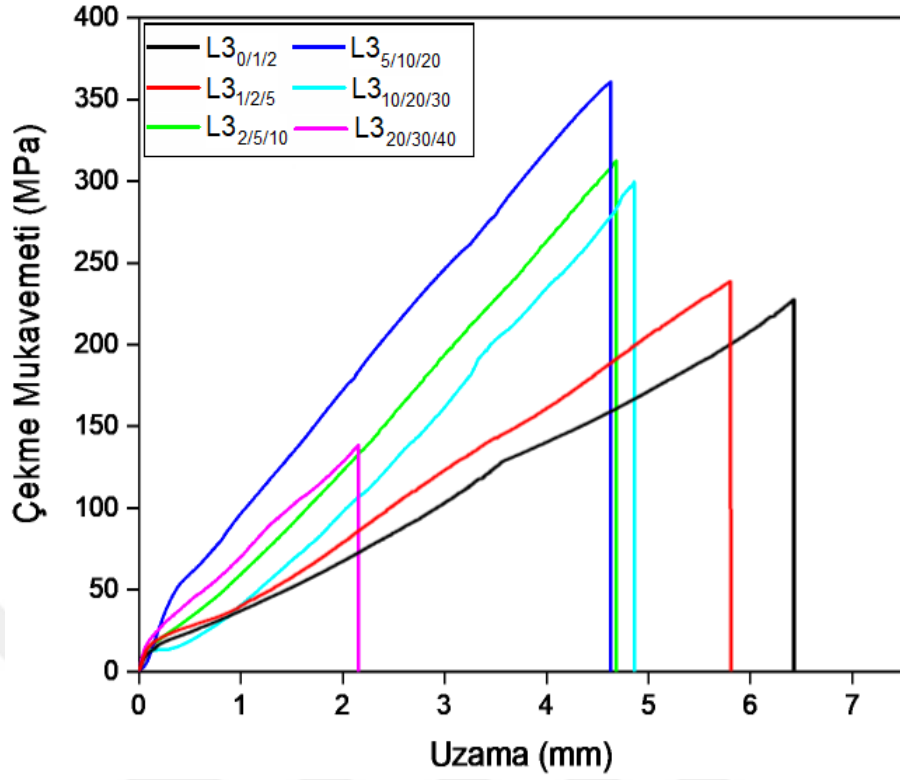
Elde edilen eğriler, B₄C takviyesinin oranı ve katman sayısının malzemenin mukavemet-süneklik dengesini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Tek katmanda %10 takviye optimum kombinasyonu sağlar; çok katmanlı yapıda ise ara katmanlı fonksiyonel gradyasyon çatlak ilerlemesini geciktirerek hem en yüksek mukavemeti hem de yeterli uzamayı sunar. Üç katmanlı L3_{5/10/20} dizilimi, artan takviye oranlarının kademeli geçişi sayesinde malzemenin iç gerilmelerini en aza indirerek, kritik boyunda disperse B₄C parçacıklarının kohezyonunu korumuş ve en iyi performansı sağlamıştır. Buna karşın dört katmana çıktıkça arayüz zayıflıkları birikmiş, gerilme konsantrasyonları artmış ve numuneler daha erken kırılmıştır. Sonuç olarak, AA2024/B₄C kompozitlerde en ideal tasarım, tek katmanda %10 takviye veya çok katmanda (özellikle üç katmanda) %5-%10-%20'lik gradyasyon kombinasyonunu tercih etmektir.



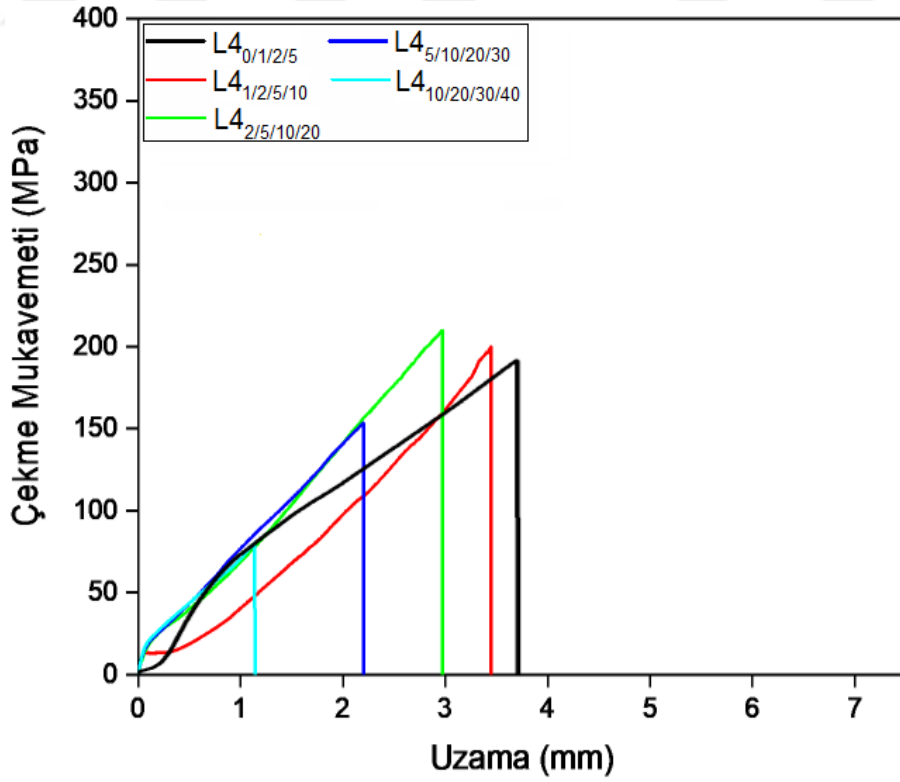
Şekil 3.16. Tek katmanlı AA2024/B₄C kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri



Şekil 3.17. İki katmanlı FDM kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri



Şekil 3.18. Üç katmanlı FDM kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri



Şekil 3.19. Dört katmanlı FDM kompozitlerin çekme mukavemeti eğrileri

Çekme testleri sonrası elde edilen çok katmanlı AA2024/B₄C kompozit numunelerin SEM kırılma yüzeylerine dayanarak, her bir katman düzeni için neden-sonuç ilişkilerine vurgu yapılarak açıklanmıştır. Kırılma yüzeyleri, her bir numunede katman sınırlarının belirgin biçimde ayrıştığı iki ya da daha fazla bölgeye ayrılmaktadır. Çünkü her katman, farklı B₄C takviye oranı ve dolayısıyla farklı akma dayanımı ile yorulma davranışı sergilemiştir; bu da her bölgede farklı şekil değiştirmenin (necking) ve çatlak ilerlemesinin egemen olmasına neden olmuştur. SEM görüntülerinde, yüksek takviye içeriğine sahip katmanlarda düz ve parlak yüzeyler hâkimken; düşük takviye içeren katmanlarda derin, çökük dimple (çukurcuk) kümeleri gözlenmektedir. Bu ayrışma, malzeme boyunca çatlak ilerlemesinin her katmanda farklı mekanizmalar mikroboşluk koalesansı ve gevrek çatlaklar aracılığıyla gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.

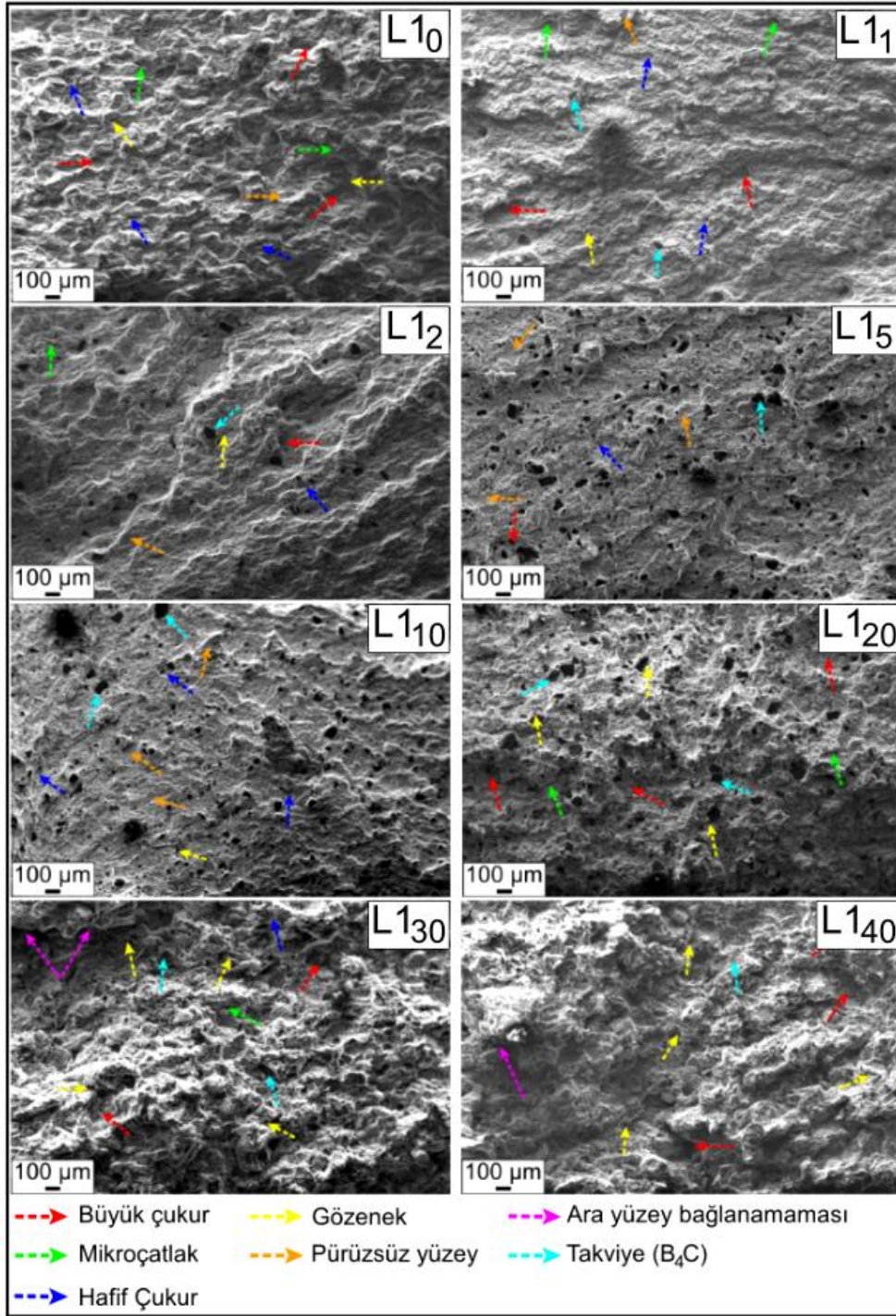
Şekil 3.20, 3.21, 3.22 ve 3.23'te bütün numunelerin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.20'daki L₁₀ numunesinde, saflığa yakın alaşım matrisi boyunca yaygın olarak görülen derin ve geniş dimple ("büyük çukur") oluşumları, malzemenin yüksek süneklik göstermesinden kaynaklanır; çünkü tek fazlı, takviyesiz matriste çekme yükü, metallerde tipik mikro boşluk birikimi ve koalesans yoluyla açığa çıkar. L₁₁ ve L₁₂'de ise az miktarda partikül eklendiği için dimple yoğunluğu benzer kalmakla birlikte, morfolojik olarak daha küçük ve sık nüanslı "hafif çukur"lar gözlenir; bu durum, zayıf bir partikül -matris ara yüzey gerilimi birikimi nedeniyle mikrovoid oluşum eşiğinin düşmesinden ileri gelir. L₁₅ ve L₁₁₀'da dimple alanları azalırken, kırılma yüzeyinde berrak, pürüzsüz düz (cleavage-benzeri) bölgeler belirginleşir; çünkü nispeten yüksek sertliğe sahip B₄C parçacıkları, deformasyonun yerel olarak mekanik ara yüzey ayrılmasına ve parçacık çek-çıkmasına (pull-out) yol açmıştır. L₁₂₀, L₁₃₀ ve L₁₄₀'ta (%20, %30, %40 B₄C), partikül yoğunluğu arttığı için mikroçatlaklar (yeşil ok) ve büyük çukurlar (kırmızı ok) çoğalmış, gözenekler (sarı ok) ise birleşerek makro boşluklara dönüşmüştür; bu da malzemenin tokluk eşiğini aşırı derecede düşürerek kırılma yüzeyinin genellikle gevrek, çok sayıda interfolyel ara yüzey bağlanamamazlığı (mor ok) ve partikül etrafı ayrışma izleri (açık mavi ok) taşımaya neden olmuştur.

Şekil 3.21'deki iki katmanlı numunelerin, katman 1'in (%düşük B₄C) daha sünek yapısı, çekmeye maruz kaldığında yüzeyde genellikle derin dimple kümeleri oluşturur; çünkü bu bölgede mikrovoid koalesansı baskın iken, alt katmana geçişte görülen düzgün, çizgisel çatlak izleri (orange ok) iki katman arasındaki elastik modül farkından doğan gerilme yığılmasına işaret eder. Örneğin L_{20/1}'de üsttekinde geniş çukurlar görülürken,

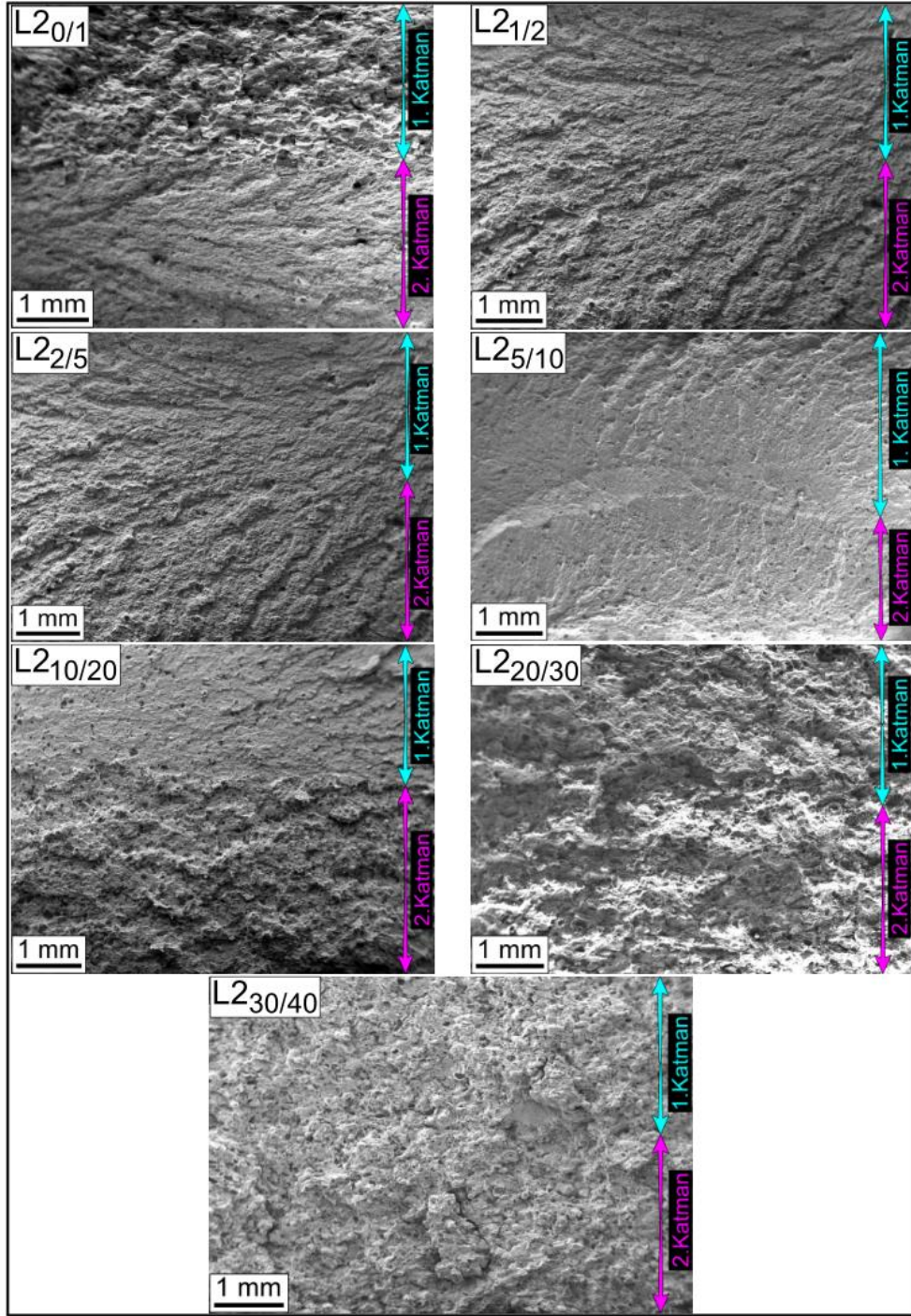
alttaki L_1 yüzeyinde görece dar “hafif çukur”lar ve az sayıda mikroçatlak bulunur; bu da katmanlar arası bağlanmanın yüksek süneklikli tabakada daha homojen, takviye içeren tabakada ise kısmen zayıf olduğunu gösterir. $L_{25/10}$ ’de ise transition bölgesinde hem dimple hem de pürüzsüz yüzey alanlarının bir arada bulunması, ara yüzey yük transferinin sınırlı yer değiştirmelerle dengelendiğini, ancak orta frekansta çatlak gelişimine yatkınlık oluşturduğunu ortaya koyar. Daha yüksek oranlı kombinasyonlarda ($L_{210/20}$, $L_{220/30}$ vb.), ara yüzeyde bağlanamama (mor ok) izleri belirginleşmiş, gözenek yoğunluğu artmış ve parçacık kenarlarından başlayan mikroçatlaklar (yeşil ok) kısa sürede makro ölçeğe ulaşarak kırılmayı kolaylaştırmıştır.

Şekil 3.22’deki üç katmanlı yapılarda, yüzeyden içe doğru kademeli sertlik artışı sağladığı için ilk katmanda yoğun dimple morfolojisi gözlenirken, orta katmanda mikroyapının yarı gevrek/yarı sünek karakteri nedeniyle hem dimple hem pürüzsüz düzlem bölgeler bir arada bulunur; bu durum, orta katmanın deformasyon altındaki stres dağılımını kısmen absorbe ettiğini gösterir. Alt katmanda ise yüksek B_4C oranı, ara yüzey gerilmelerini artırarak partikül -matris ara yüzeyinde erken mikroçatlak oluşumuna (yeşil ok) neden olur, dolayısıyla matris içi gözenekler (sarı ok) birleşip büyük boşluklar oluşturur ve gevrek kırılma faceti (pürüzsüz yüzey, turuncu ok) hâkim olur. Her iki ara yüzeyde de mor oklarla işaretli bağlanamama bölgeleri, farklı sertlik ve tokluk değerleri arasındaki mekanik uyumsuzluktan kaynaklanan delaminasyon eğiliminin somut kanıtıdır. Bu katmanlandırma, çekme yükünün katmanlar arasında adım adım iletilmesini sağlarken, aynı zamanda çok noktalı gerilme konsantrasyonu yaratmıştır.

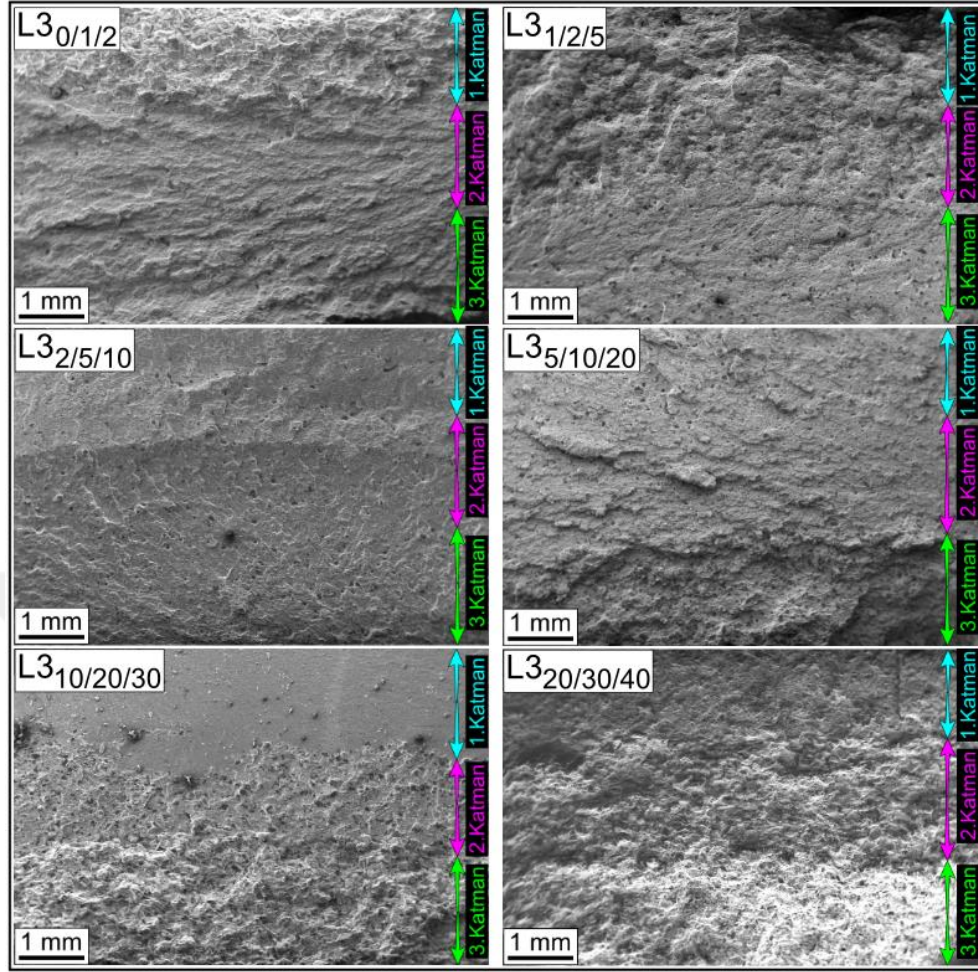
Şekil 3.23’teki dört katmanlı örneklerde ise, en üst katmanın derin dimple bölgesi, başlangıç deformasyonunu yaygın mikrovoid koalesansı ile karşılayarak sünek kırılma eğilimini destekler. İkinci ve üçüncü katmanlar arasında geçen geçiş bölgelerinde, mikroçatlaklar ve pürüzsüz düzlem alanları artar çünkü ara yüzey sertlik uyumsuzluğu, partikül yoğunluğunun kademeli yükselişiyle birleşerek yerel gerilme birikimlerini çoğaltır. En alt katmanda ise, gözenekler birleşip büyük boşluklar oluştururken, parçacık-matris ayrışma izleri ve temiz cleavage yüzeyler çoğalır; bu da kırılmanın gevrek usulde, ara yüzey ayrışmaları boyunca ilerlediğini gösterir. Dört ayrı ara yüzeyde biriken gerilme konsantrasyonları, malzeme genelinde kırılma yolunun dalgalı, çağrimsı (zig-zag) bir hatta ilerlemesine ve kırılma enerjisinin katmanlar arası defektler tarafından hızla dağıtılmasına yol açmıştır.



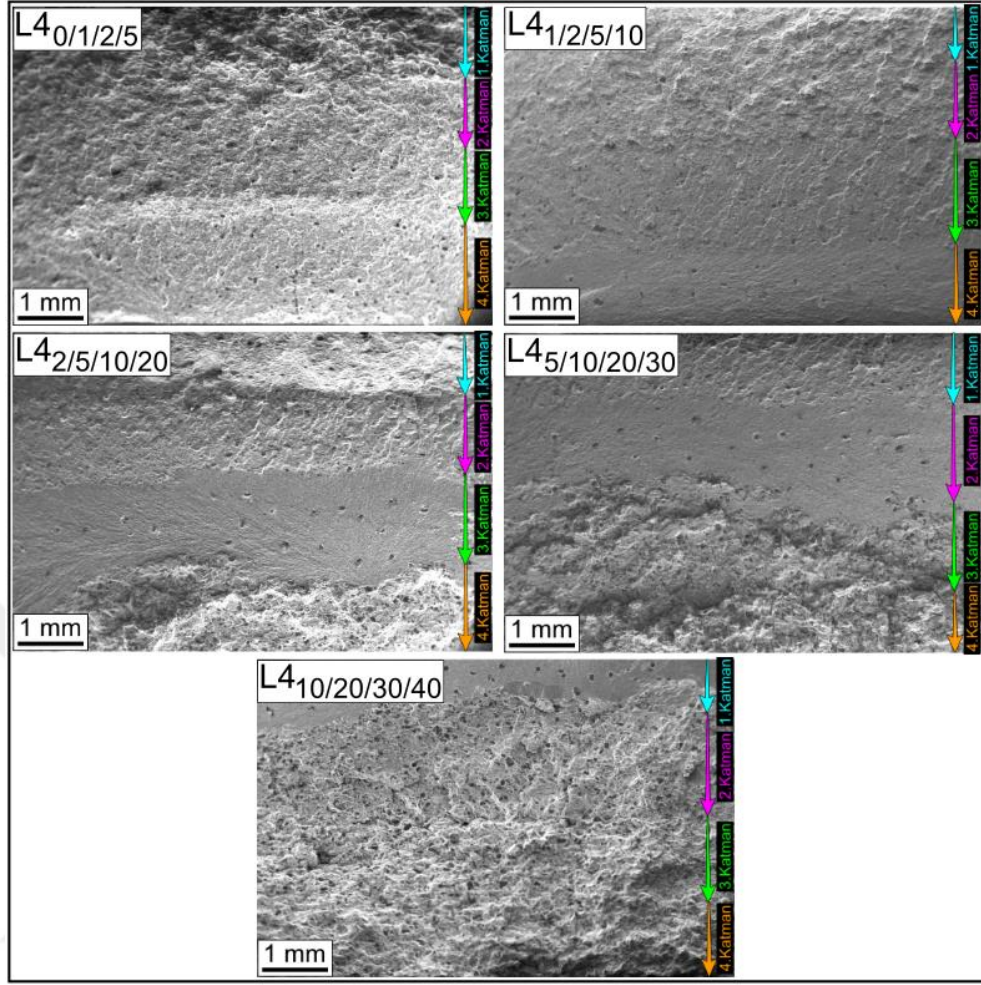
Şekil 3.20. Tek katmanlı AA2024/B₄C kompozitlerin kırılma yüzeyleri



Şekil 3.21. İki katmanlı FDM kompozitlerin kırılma yüzeyleri



Şekil 3.22. Üç katmanlı FDM kompozitlerin kırılma yüzeyleri



Şekil 3.23. Dört katmanlı FDM kompozitlerin kırılma yüzeyleri

3.2.3. AA2024/B₄C FDM'lerin Darbe Mukavemeti (Serbest Ağırlık Düşme) Analizleri

Bu çalışmada 50, 100 ve 150 cm yükseklikten 7.5 kg'lık çelik ağırlığın serbest düşüşü ile gerçekleştirilen temel darbe deneyine ait sonuçlar, dört farklı kompozit seri (L1, L2, L3 ve L4) için zaman eksenini boyunca kaydedilen anlık darbe mukavemeti (kN) değerleri üzerinden incelenmiştir. Her bir grafik, numune numarası ekseninde aynı seri içindeki farklı B₄C takviye oranlarına sahip katman düzenlerini; zaman ekseninde ise darbenin başlamasından numunenin nihai kırılma anına kadar geçen dinamik tepkiyi göstermektedir.

Şekil 3.24 (a-d)'de FDM numunelerin 50cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler verilmiştir. L1₀'dan L1₄₀'a kadar değişen %0-40 B₄C takviye oranına sahip tek katmanlı numunelerde, takviye oranı arttıkça darbe mukavemetinde belirgin bir yükselme gözlenmiştir. Tek katmanlı deneylerde, saf matrise

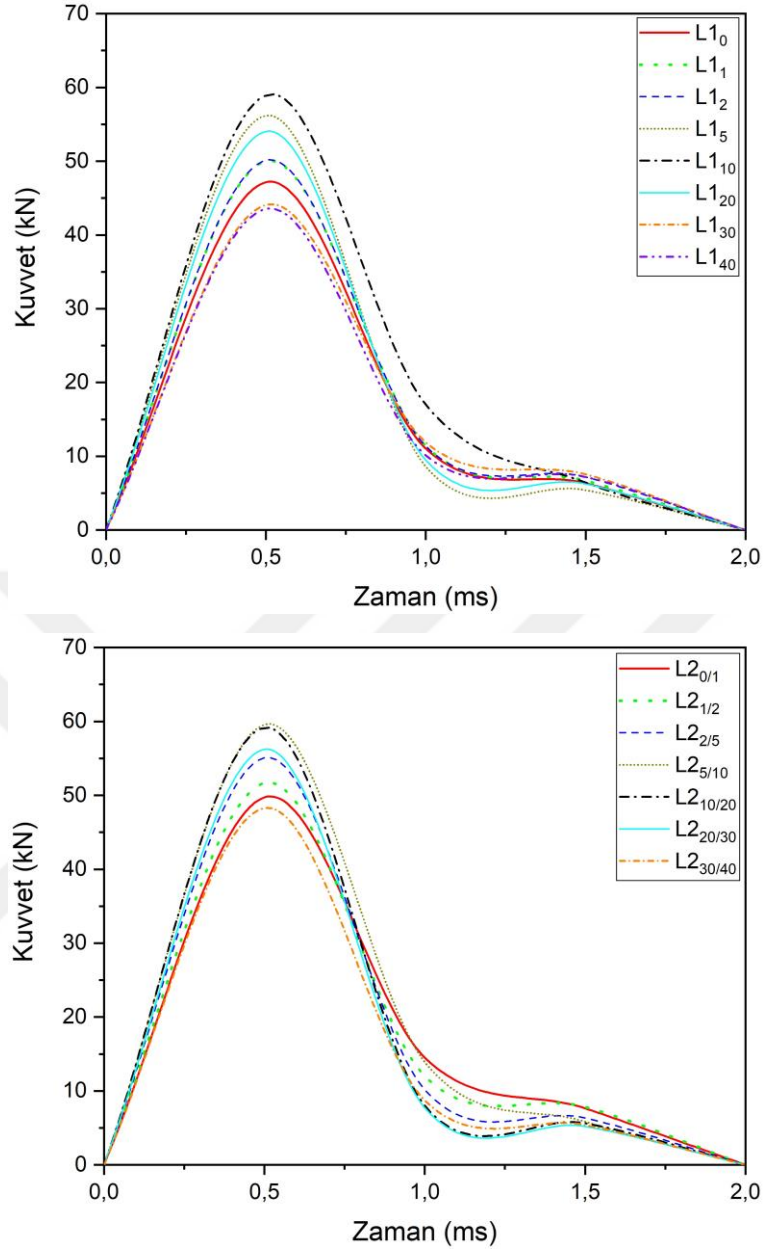
(L1₀) ait 47.1 kN'lik en düşük tepe değeri, kompozite ilave edilen B₄C takviyesinin etkisini vurgulamaktadır. %1 (L1₁, 49.9 kN) ve %2 (L1₂, 50.1 kN) takviye artışı, malzemenin sünekliğini önemli ölçüde koruyarak sınırlı bir mukavemet kazanımı sağlamıştır. Ancak %5 takviye (L1₅, 56.1 kN) ile başlayan güçlü bir artış, %10 B₄C (L1₁₀) ile maksimuma (58.9 kN) ulaşmıştır. Bunun ötesindeki %20 (L1₂₀, 54.0 kN), %30 (L1₃₀, 44.1 kN) ve %40 (L1₄₀, 43.5 kN) oranları, artan gevrek bileşen ve partikül yığılmalarına bağlı olarak kırılma eğilimi öne çıkarıp dayanımda gerilemeye neden olmuştur.

İki katmanlı düzenlemelerde, yüzey ve iç katmandaki farklı B₄C dağılımı darbe mukavemetini daha da iyileştirmiştir. Yüzeyde saf, içte %1 takviye barındıran L2_{0/1} 49.7 kN değerine ulaşırken, L2_{1/2} (51.6 kN) ve L2_{2/5} (55.1 kN) kombinasyonları kademeli artış göstermiştir. L2_{5/10} örneği 59.5 kN ile tek katmandaki en iyi sonucu da aşmış; benzer şekilde L2_{10/20} (59.1 kN) yüksek performansını korumuştur. Bunun aksine, aşırı yüzey takviyesi içeren L2_{30/40} 48.2 kN'ye gerileyerek ideal takviye aralığının yaklaşık %5-%20 olduğunu doğrulamıştır.

Üç katmanda fonksiyonel derecelendirme, en yüksek darbe mukavemetini sunan yapılandırmayı ortaya koymuştur. Düşük oranlı L3₀₋₁₋₂ (51.4 kN), orta kademeli L3₁₋₂₋₅ (57.0 kN) ve L3₂₋₅₋₁₀ (58.7 kN) kombinasyonlarının ardından, L3₅₋₁₀₋₂₀ (62.3 kN) ile tüm serilerdeki en yüksek dayanımı elde etmiştir. Yüksek takviye gradyanlı L3₁₀₋₂₀₋₃₀ (56.6 kN) ve L3₂₀₋₃₀₋₄₀ (50.3 kN) örneklerinde ise gevrek kırılma artışıyla dayanımda azalma gözlenmiştir.

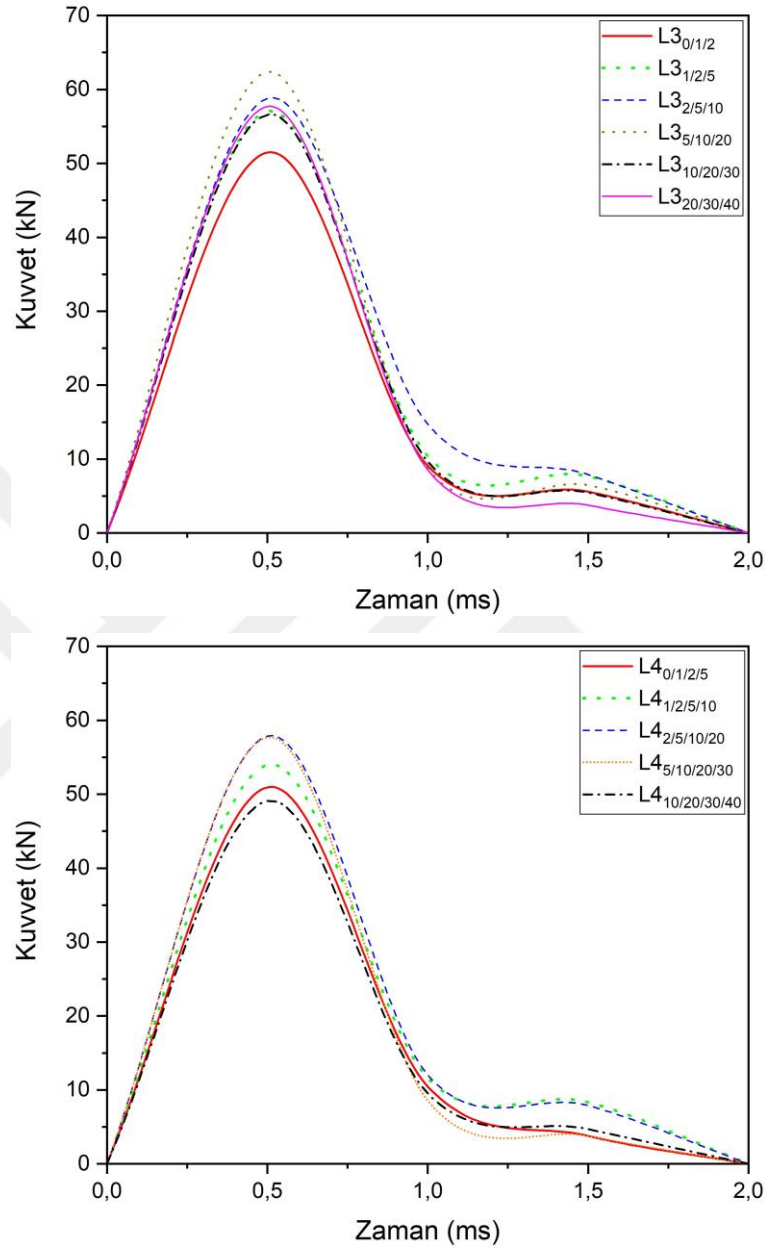
Dört katmanlı tasarımlar, orta kademeli takviye dağılımıyla hâlâ yüksek mukavemet sunarken üç katmanın zirvesine ulaşamamıştır. L4₀₋₁₋₂₋₅ (50.9 kN), L4₁₋₂₋₅₋₁₀ (53.9 kN) değerleriyle başlangıç düzeyinde seyrederken, L4₂₋₅₋₁₀₋₂₀ (57.8 kN); L4₅₋₁₀₋₂₀₋₃₀ (57.6 kN) ile çift katmanlı serilerin üzerindeki orta düzey performansını korumuştur. En yüksek takviye kombinasyonu L4₁₀₋₂₀₋₃₀₋₄₀ (49.1 kN)'ye gerilemiştir.

DeneySEL veriler, serbest düşme darbe testinde fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin (özellikle iki ve üç katmanlı kademelendirmelerin) tek katmanlı referansa göre enerji soğurma ve darbe dayanımını ortalama %10-%15 artırdığını göstermektedir. Dört katmanlı düzenlemeler, artan üretim karmaşıklığına rağmen optimum tasarımda orta takviye kademeleri kullanıldığında yüksek performans sağlarken, aşırı katman sayısı ve yüksek takviye oranları numunenin sünekliğini kısmen düşürmektedir. Bu sonuçlar, zırh ve darbe emici uygulamalarda optimum katman sayısı ve B₄C dağılımının kritik önemini ortaya koymaktadır (Gunes vd., 2014).



Şekil 3.24. FDM numunelerin 50cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.24'ün Devamı



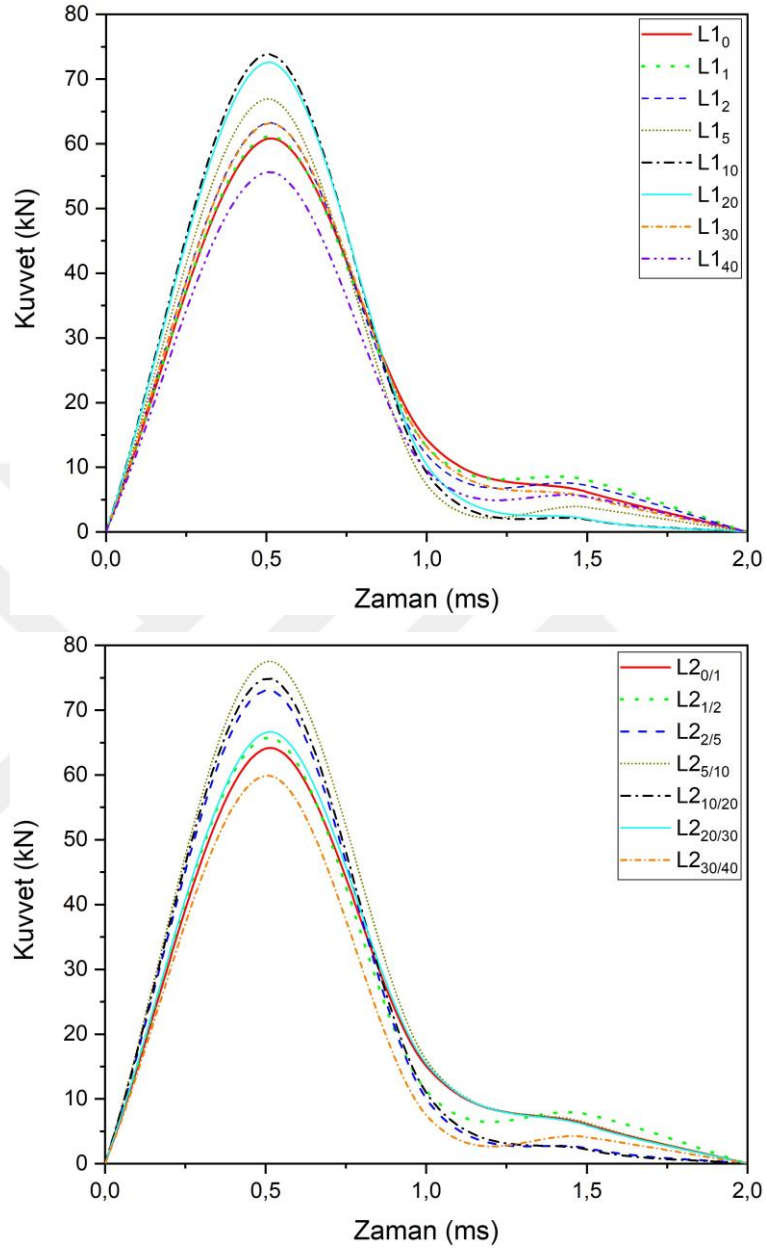
Şekil 3.25 (a-d)'de, 7.5 kg kütleli çeliğe monteli serbest ağırlık düzeneği kullanılarak 100 cm yükseklikten düşürülen yükün AA2024/B₄C kompozit numuneler üzerindeki darbe mukavemeti incelenmiştir. Grafikleri oluşturan her bir eğri, farklı B₄C takviye oranlarına ve fonksiyonel dereceli katman dizilimlerine karşılık gelen numunelerin düşme sonrası zamana bağlı kuvvet tepkisini göstermektedir. Aşağıda, tek katmanlı (L1₀-L1₄₀), iki katmanlı (L2_{0/1}-L2_{30/40}), üç katmanlı (L3_{0/1/2}-L3_{20/30/40}) ve dört katmanlı (L4_{0/1/2/5}-L4_{10/20/30/40}) düzenlemelerin tepki değerleri detaylı olarak değerlendirilmektedir.

Saf AA2024 matrisli (L_{10}) numunesi, ortalama 60.7 kN'lık bir pik kuvvet değeri göstermiştir. B₄C takviye oranı %1 (L_{11}) ve %2 (L_{12}) için değerler sırasıyla 61.1 kN ve 63.1 kN olarak artış eğilimi sergilemiştir. %5 takviyeli L_{15} numunesi 66.9 kN'a ulaşırken, %10 takviye içeren L_{110} 'da en yüksek tek katmanlı değer olan 73.8 kN elde edilmiştir. Takviye oranı artmaya devam ettikçe L_{120} 'de 72.5 kN, L_{130} 'da 63.1 kN ve L_{140} 'ta 55.5 kN değerleri ölçülmüştür. Bu sonuçlar, %10-%20 aralığının tek katmanlı sistemlerde optimum darbe dayanımı sunduğunu, daha yüksek takviye oranlarında ise gevrekleşme ve parçalanma etkisiyle mukavemetin düştüğünü göstermektedir.

İki katmanlı kompozitlerde alt-üst katman $L_{20/1}$ ve $L_{21/2}$ oranlarında sırasıyla 64.1 kN ve 65.7 kN elde edilmiştir. $L_{22/5}$ düzenlemede 73.1 kN, $L_{25/10}$ düzenlemede ise en yüksek tüm iki katmanlı değer olan 77.4 kN'a ulaşılmıştır. Takviye oranı daha da yükseldiğinde $L_{210/20}$ 'de 74.8 kN, $L_{220/30}$ 'da 66.5 kN ve $L_{230/40}$ 'ta 59.8 kN olarak azalma gözlenmiştir. Bu veriler, iki katmanlı FDM'de de orta düzey takviye kombinasyonlarının (özellikle %5/10) darbe performansını maksimize ettiğini doğrulamaktadır.

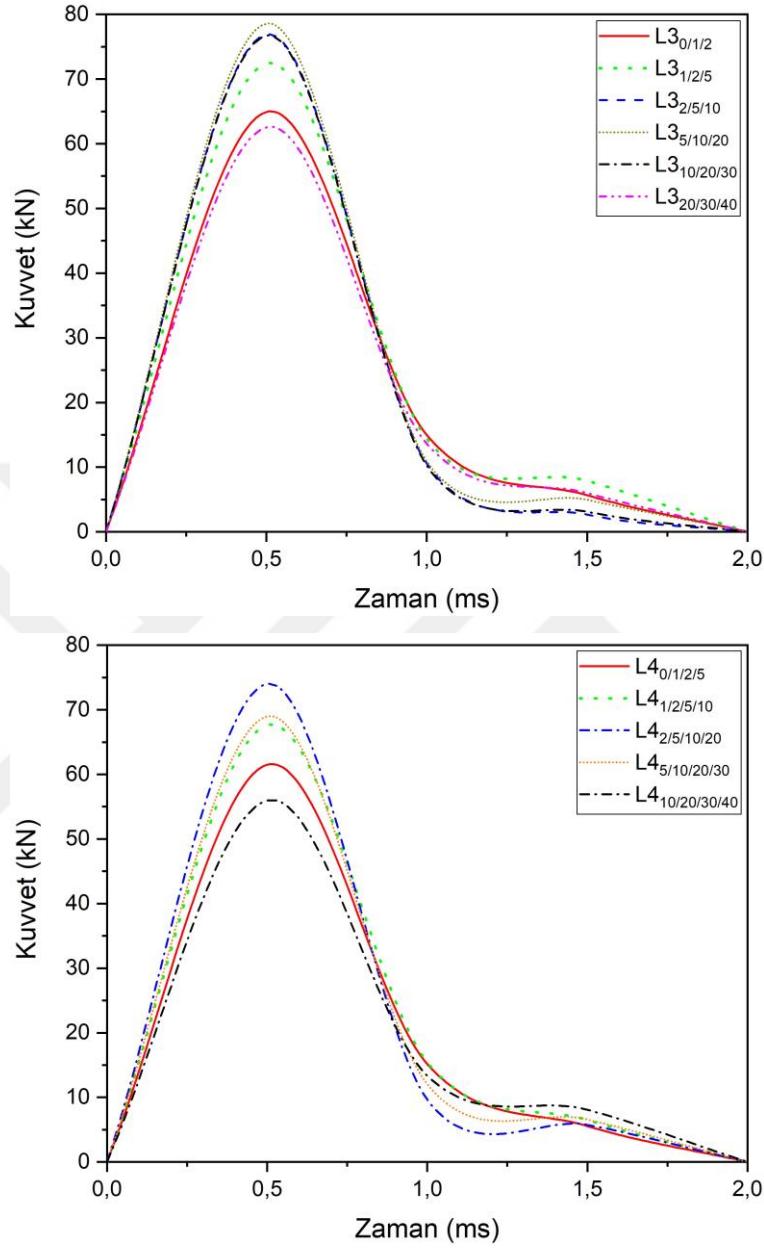
Üç katmanlı numunelerde $L_{30/1/2}$ 'de 64.8 kN, $L_{31/2/5}$ 'te 72.4 kN değerleri ölçülmüştür. $L_{32/5/10}$ düzenlemede 76.9 kN, $L_{35/10/20}$ düzenlemede ise genel deneyde tespit edilen en yüksek darbe mukavemeti olan 78.5 kN kaydedilmiştir. Katman oranı daha fazla B₄C içerikli dizilimlere ($L_{310/20/30}$) geçildiğinde 76.7 kN'a, $L_{320/30/40}$ 'ta ise 62.5 kN'a gerileme olmuştur. Bu sonuç, üç katmanlı FDM'nin, katman sayısını artırarak uygun oranları muhafaza ettiğinde en üst düzey enerji soğurma kapasitesine ulaştığını göstermektedir.

Dört katmanlı düzenlemelerde $L_{40/1/2/5}$ 'te 61.4 kN, $L_{41/2/5/10}$ 'da 67.5 kN, $L_{42/5/10/20}$ 'de 73.9 kN değerleri elde edilmiştir. Ancak $L_{45/10/20/30}$ 'da 68.9 kN ve $L_{410/20/30/40}$ 'ta 55.9 kN'a düşüş gözlenmiştir. Karışık dört katmanlı kombinasyonlar, üç katmanlı sistemlerin sağladığı yüksek darbe mukavemetinin altına inmekte; bu da çok katmanlı yapının kontrol edilmesi zorluklarının artmasından ve katman içi bağların rijitlik farkından kaynaklanan erken çatlak oluşumuna işaret etmektedir. Elde edilen kuvvet değerleri hem tek katmanlı hem de fonksiyonel dereceli kompozitlerde B₄C takviye optimizasyonunun kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Üç katmanlı $L_{35/10/20}$ dizilim, 78.5 kN ile en yüksek darbe mukavemetini sunmuş; iki katmanlı $L_{25/10}$ ise 77.4 kN ile ikinci en iyi sonucu vermiştir. Dört katmanlı sistemler, katman sayısını artırmanın her zaman performansı iyileştirmediğini, ideal katman oranlarına ve sayısına bağlı olarak tasarım dengesinin korunması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 3.25. FDM numunelerin 100cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.25'in Devamı



Şekil 3.26 (a-d)'de 7.5 kg ağırlığındaki düşürücü cisim, 150 cm yükseklikten serbest bırakılarak AA2024/B₄C kompozit numunelerin darbe mukavemetine yönelik tepki profilleri zamana karşı kaydedilmiştir. Aşağıda dört ayrı grup altında tek katmanlı (L1₀-L1₄₀), iki katmanlı (L2_{0/1}-L2_{30/40}), üç katmanlı (L3_{0/1/2}-L3_{20/30/40}) ve dört katmanlı (L4_{0/1/2/5}-L4_{10/20/30/40}) düzenlemeler elde edilen pik kuvvet değerleri (kN) ve eğri karakteristikleri detaylı şekilde incelenmiştir.

Saf matris numunesi L1₀, 76.6 kN ile temel darbe dayanımını vermiştir. B₄C takviyesi %1-%2 (L1₁: 76.8 kN, L1₂: 77.1 kN) aralığında hemen hemen değişmeyen performans

sergilerken, %5'lik takviye (L_{15}) 82.5 kN'a yükselmiştir. Bu artış, parçacıkların matriste yaydığı mikro gerilmeler sayesinde enerjinin daha verimli dağıldığını gösterir. %10 takviyeli L_{110} 'da 86.3 kN ile tek katmanlı sistemde en yüksek değer elde edilmiştir. Ancak %20-%40 (L_{120} : 83.1 kN, L_{130} : 78.1 kN, L_{140} : 67.3 kN) aralığına çıkıldığında, artan gevreklik ve ara yüz gerilmeleri darbe mukavemetini geri çekmiştir. Bu durum, tek katmanda optimum B₄C oranının %10 olduğunu ve aşımının çatlak oluşumunu hızlandığını ortaya koyar.

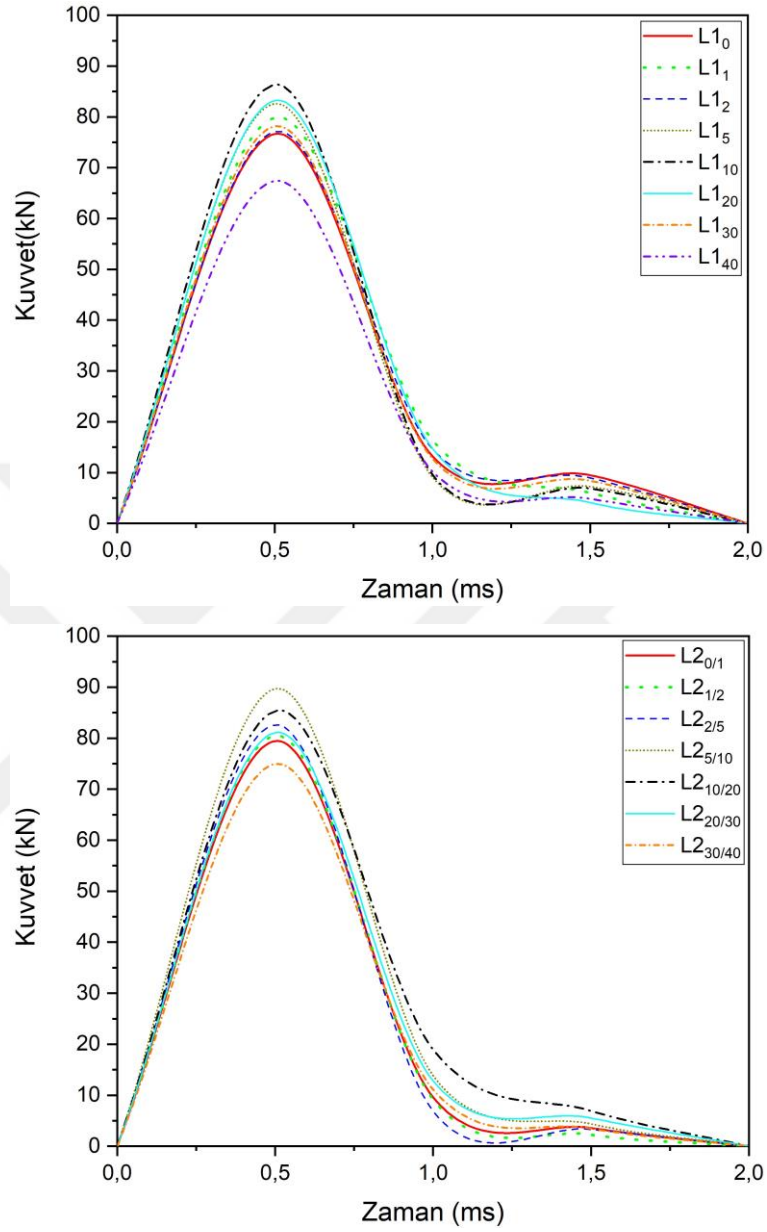
Alt katmanda düşük, üst katmanda yüksek takviye stratejisi, darbe enerjisinin önce matriste yayılmasını, sonra yüzeyde soğurulmasını sağlar. Buna bağlı olarak $L_{20/1}$; 79.4 kN, $L_{21/2}$; 80.4 kN civarında iyileşme göstermiştir. $L_{22/5}$ düzenlemede 82.5 kN, $L_{25/10}$ düzenlemede ise 89.6 kN ile iki katmanlı yapıların en yüksek dayanımı ölçülmüştür. Daha yüksek kombinasyonlar ($L_{210/20}$: 85.3 kN, $L_{220/30}$: 81.1 kN, $L_{230/40}$: 74.9 kN), katman ara yüzlerindeki sertlik farkından kaynaklı erken çatlak başlatma eğilimini artırarak performansı geriletmıştır. İki katmanda %5/10 oranı, katmanlama avantajını en etkin şekilde kullandığını göstermiştir.

Üç katmanlı dizilimde katmanlama etkisi daha belirgin olarak ortaya çıkar. Alt -orta - üst katmanlardaki B₄C oranı kademeli artarken, malzeme yapısının dalga kırınım mekanizması sayesinde darbe enerjisinin matriste yayılması, ara katmanlarda kısmen soğurulması ve üst katmanda yoğunlaşması sağlanır. Bu sayede $L_{30/1/2}$ (80.2 kN) ve $L_{31/2/5}$ (81.7 kN) değerlerinden, $L_{32/5/10}$ 'da (86.6 kN) belirgin bir sıçrama yaşanmış; en üstte $L_{35/10/20}$ 'de 90.8 kN'a ulaşarak en yüksek darbe dayanımı kaydedilmiştir. Ancak $L_{310/20/30}$ (87.7 kN) ve $L_{320/30/40}$ (75.7 kN) kombinasyonlarında, aşırı takviye katmanlarının ara yüz gerilmelerine olumsuz etkisi izlenmiştir. Bu sonuç, üç katmanda %5/10/20 oranının ideal gradyan profili oluşturduğunu teyit eder.

Dört katman, katman ara yüzlerinin sayısını artırarak kompleks gerilme dağılımı yaratır. $L_{40/1/2/5}$ (78.5 kN) ve $L_{41/2/5/10}$ (84.7 kN) değerleri, üç katmana göre başlangıçta iyileşme gösterse de $L_{42/5/10/20}$ 'de 89.1 kN ile zirve yaptıktan sonra $L_{45/10/20/30}$ (83.4 kN) ve $L_{410/20/30/40}$ (69.1 kN) seviyelerinde düşüş yaşamıştır. Dört katmanlı tasarımda, katman sayısının artması ara yüz gerilmelerini ve yapı içi gerilim yoğunlaşmalarını kontrolsüz hale getirerek erken çatlak başlatmayı kolaylaştırmıştır.

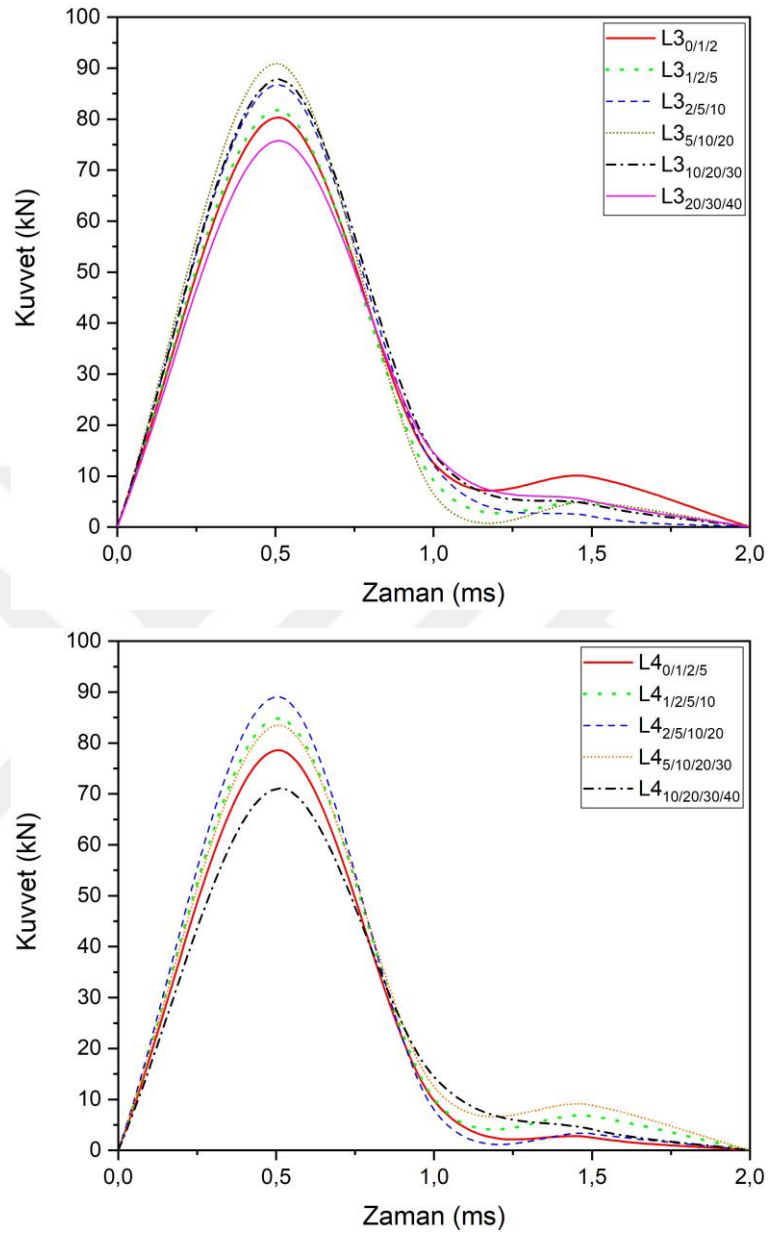
Katmanlama sayısı ve takviye oranı, darbe mukavemetini belirlemede birlikte kritik rol oynar. Tek katmanda %10, iki katmanda %5/10 ve üç katmanda %5/10/20 oranları, en verimli enerji soğurma profilini oluşturmuştur. Dört katmanın ötesi, ara yüz karmaşıklığı ve gevrekliğin artması nedeniyle avantajı azaltmıştır. Fonksiyonel dereceli kompozit

tasarımında katman sayısının ve her katmandaki takviye oranının hassas optimizasyonu, darbe dayanımını maksimize etmek için elzemdir.



Şekil 3.26. FDM numunelerin 150cm yükseklikten yapılan serbest ağırlık düşme deneyi sonucu elde edilen grafikler (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.26'nin Devamı



Farklı yüksekliklerde yapılan serbest düşme deneyleri, düşme yüksekliğinin artışıyla tüm kompozit numunelerin pik darbe mukavemetinde belirgin bir artışa yol açtığını göstermektedir. 50 cm'den elde edilen sonuçlar, tek katmanlı sistemlerin yaklaşık 40-60 kN aralığında; iki katmanlı %5/10 FDM'in 60-70 kN, üç katmanlı %5/10/20 FDM'in 65-75 kN bantlarında performans sergilediğini gösterirken, yükseklik 100 cm'ye yükseldiğinde tek katmanlılar 60-80 kN, iki katmanlılar 75-85 kN ve üç katmanlılar 78-88 kN aralığına taşınmıştır. En yüksek yükseklik olan 150 cm'de ise tek katmanlılar 75-90 kN, iki katmanlı

%5/10 80-90 kN, üç katmanlı %5/10/20 ise 85-91 kN bandında zirve yapmıştır. Bu karşılaştırma, düşme yüksekliğinin artan potansiyel enerjiyi doğrudan numunelere ileterek darbe kuvvetini büyüttüğünü; buna karşın, fonksiyonel dereceli katmanlama stratejisinin tüm yükseklik koşullarında numunenin enerji soğurma kapasitesini en üst düzeye çıkardığını, özellikle üç katmanlı %5/10/20 diziliminin her durumda en üstün darbe dayanımı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 3.27 ve 3.28’de yapılan serbest ağırlık düşürme deneylerinde, 7.5 kg kütle 50 cm, 100 cm ve 150 cm yüksekliklerden bırakılarak AA2024/B₄C kompozit numunelerin ön (Ön), yan (Yan) ve arka (Arka) yüzeylerindeki hasar morfolojisi incelenmiş, aynı zamanda numunelerin iz çapı ve iz derinlikleri ölçülmüştür (Tablo 3.1). Amaç, düşme yüksekliğinin ve takviye dağılımının yüzey deformasyonuna ve çatlak oluşumuna etkisini ortaya koymaktır.

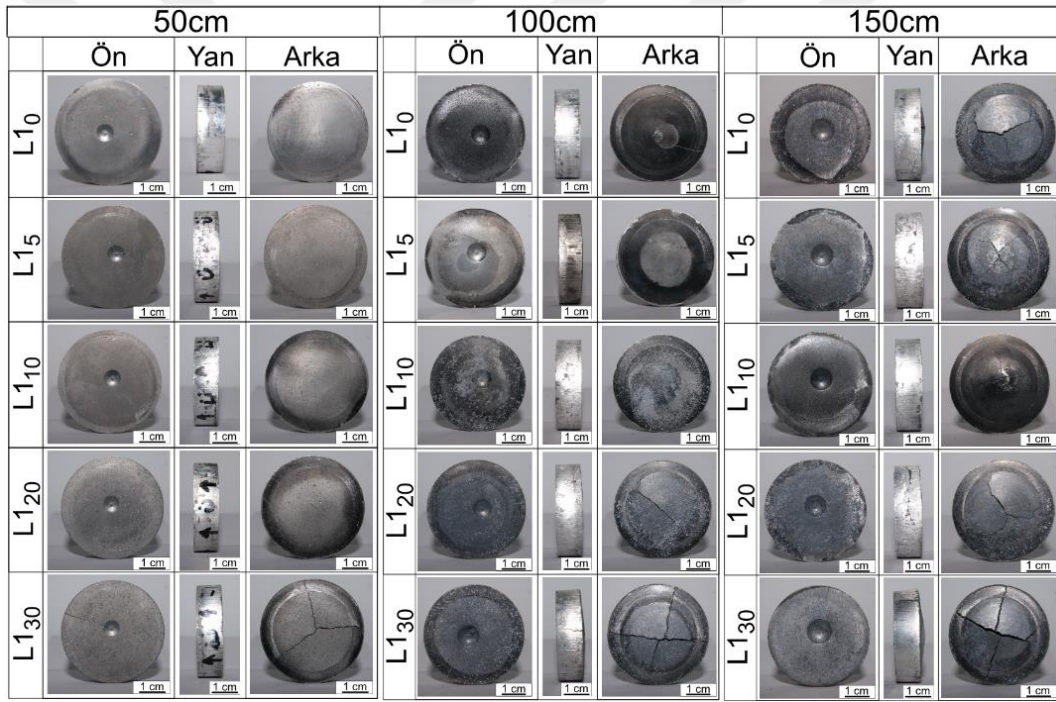
50 cm’lik düşme yüksekliğinde tüm numunelerde nispeten küçük çaplı, görece sığ izler gözlenmiştir. Saf alaşım (L₁₀) için iz çapı 6.60 mm, derinlik 0.64 mm olarak ölçülmüş; takviye içeren tek katmanlı örneklerde (L₁₅, L₁₁₀, L₁₂₀) çap 6.51-6.75 mm, derinlik 0.53-0.61 mm aralığında değişmiştir. Çok katmanlı kompozitlerden özellikle üç katmanlı 5/10/20 % B₄C (L_{35/10/20}) en düşük iz derinliğine (0.51 mm) sahip olarak en az yüzey hasarı sergilemiştir. Görsellerde, 50 cm’de hiçbir numunede arka tarafta çatlak dikkati çekmemektedir; sadece L₁₃₀’da çok ince ağ şeklinde mikroçatlak izlenmiştir.

100 cm yükseklikle indirme, iz çapı ve derinlikte belirgin bir artışa neden olmuştur. L₁₀’un çapı 7.65 mm, derinliği 1.05 mm olurken; en yüksek derinlik L₁₃₀’da 1.42 mm olarak kaydedilmiştir. Görsel incelemede, L₁₃₀’la başlayan numunelerde özellikle arka yüzeyde çatlaklar belirginleşmiş, yan profilde iz girintisi artmıştır. Çok katmanlılardan L_{35/10/20} yine nispeten düzgün bir iz yapısı sergileyip derinliği 0.89 mm ile sınırlarken, L_{20/30}’da derinlik 1.24 mm’ye kadar yükselmiş, arka yüzde çapraz çatlaklar ortaya çıkmıştır.

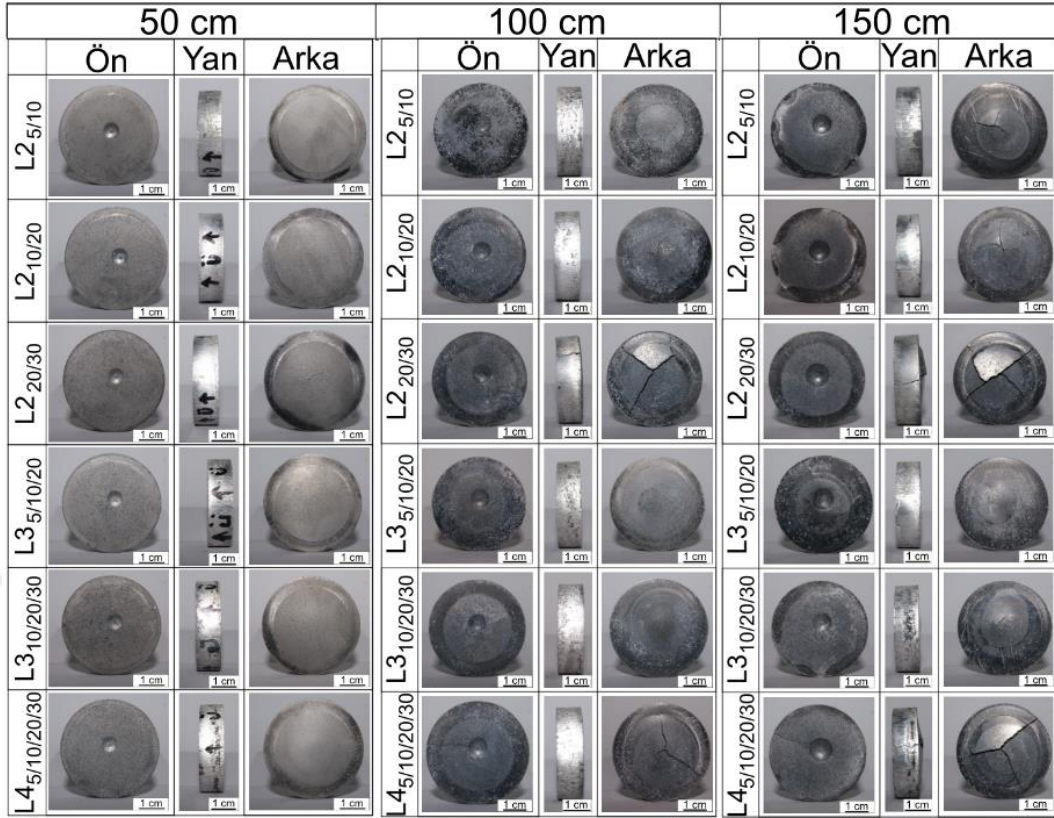
150 cm’de numunelerin dayanımı kritik eşiğe ulaşmış, iz çapı 8.20-9.84 mm; derinlikse 1.20-2.19 mm aralığına çıkmıştır. Tek katmanlılarda en kırılğan performans L₁₃₀’da (9.84 mm/2.19 mm) gözlenirken; L₁₅ ve L₁₁₀ hâlâ iz derinliğini 1.45-1.35 mm’de tutmuştur. Çok katmanlılarda en başarılı enerji dağılımı L_{35/10/20}’de (7.93 mm/1.20 mm) sağlanmış; buna karşın en fazla çatlak L_{45/10/20/30}’da hem ön hem de arka yüzeyde büyük parçalı dökülme oluşturmuştur.

B₄C oranı arttıkça sertlik yükselip ilk etapta iz derinliği azalsa da (%30 B₄C- L₁₃₀), 100 cm ve üzeri yüksekliklerde artan gevrek karakter çatlaklaşmayı tetiklemiş, derinlik

maksimuma ulaşmıştır. Katmanlama düzeni, enerjinin katmanlar arasında dengeli emilimini olanaklı kılmıştır. Özellikle iç katmanda düşük takviye (%5) ve dış katmanda orta takviye (%10-20) kombinasyonu (L3_{5/10/20}), tüm yüksekliklerde hem en küçük iz derinliği hem de çatlak eşiğinde en büyük dayanımı göstermiştir. Düşük yüksekliklerde; tüm numuneler benzer performans verse de yüksek B₄C içeren tek katmanlılar artan gevrekliğe bağlı mikroçatlak riski taşımaktadır. Yüksek yüksekliklerde; fonksiyonel dereceli yapıların enerji dağılımı, homojen tek katmanlılardaki ani kırılmaya kıyasla daha kontrollü olduğundan FDM kompozitler balistik ve darbeye maruz uygulamalar için tercih edilmelidir. Optimum katman kombinasyonu; 5/10/20 % dağılımı hem sertlik hem de darbe dayanımı kriterlerini dengede tutarak bu çalışmada en tutarlı sonuçları vermiştir.



Şekil 3.27. Tek katman kompozitlerden serbest ağırlık düşürme deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler



Şekil 3.28. FDM kompozitlerden serbest ağırlık düşürme deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler

Tablo 3.1. Serbest ağırlık düşürme testi sonrası bazı numunelerden elde edilen veriler

Numune Kodu	50 cm		100 cm		150 cm	
	İz Çapı (mm)	İz Derinliği (mm)	İz Çapı (mm)	İz Derinliği (mm)	İz Çapı (mm)	İz Derinliği (mm)
L1 ₀	6.60	0.64	7.65	1.05	9.50	1.82
L1 ₅	6.75	0.61	7.51	1.00	8.54	1.45
L1 ₁₀	6.55	0.58	7.45	0.91	8.35	1.35
L1 ₂₀	6.51	0.53	7.63	1.01	8.60	1.49
L1 ₃₀	6.52	0.57	8.50	1.42	9.84	2.19
L2 _{5/10}	6.59	0.62	7.87	1.07	8.21	1.22
L2 _{10/20}	6.49	0.58	7.56	0.93	8.52	1.44
L2 _{20/30}	6.43	0.59	8.01	1.24	9.77	2.03
L3 _{5/10/20}	6.27	0.51	7.52	0.89	7.93	1.20
L3 _{10/20/30}	6.31	0.56	7.74	1.00	8.37	1.37
L4 _{5/10/20/30}	6.40	0.61	7.61	1.05	9.80	1.77

3.2.4. AA2024/B₄C FDM'lerin Balistik Analizleri

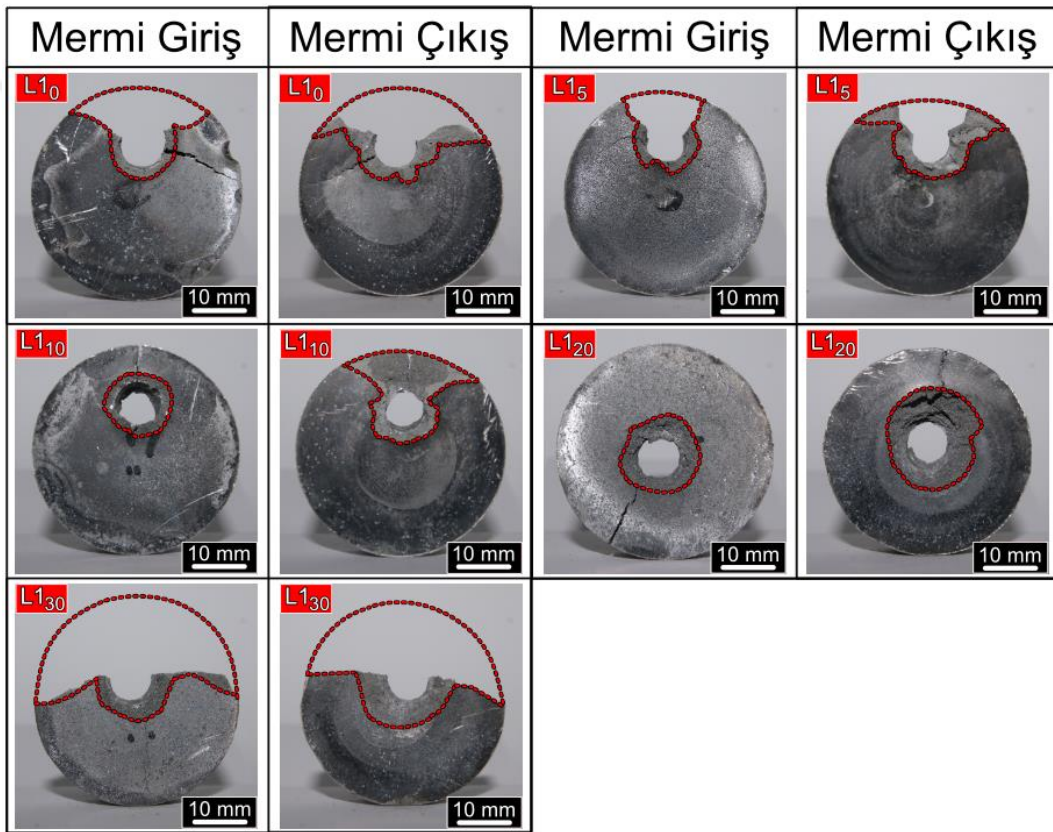
Kale Savunma poligonunda, KCR556 (5.56×45 mm NATO) mühimmatıyla yapılan balistik atışlarda elde edilen görseller hem mermi giriş hem de çıkış yüzeyleri fotoğraflanmış ve ImageJ ile delik alanları ölçülmüştür. Numuneler; saf alaşım (L₁₀), tek katmanlı B₄C takviyeli kompozitler (L₁₅, L₁₀, L₂₀, L₃₀), iki katmanlı (L_{25/10}, L_{210/20}, L_{220/30}), üç katmanlı (L_{35/10/20}, L_{310/20/30}) ve dört katmanlı (L_{45/10/20/30}) fonksiyonel dereceli kompozitler olarak gruplanmıştır.

Şekil 3.29 ve Tablo 3.2'de görüldüğü üzere saf AA2024 (L₁₀) numunesinde mermi giriş krateri 241 mm²'den, çıkış krateri ise 330 mm²'den ölçülmüştür. Homojen matrisin yüksek plastik akışı, adiabatik kayma bantları ve çentik etkisinin birleşimi, geniş krater morfolojisiyle sonuçlanmıştır. %5 B₄C içerikli L₁₅ ve %10 B₄C içerikli L₁₀ kompozitlerde giriş krateri sırasıyla 184 ve 123 mm²'ye, çıkış krateri ise 247 ve 231 mm²'ye gerilemiştir. B₄C parçacıkları, mermi enerjisinin lokal dağılımında “mikro-çekiç” etkisi yaratarak yüzeyde rijitlik artışı sağlamış ve çentik konsantrasyonunu azaltmıştır. Ancak %20 ve %30 takviye (L₂₀, L₃₀) matrisin gevrekliğini yükseltip parçacık -matris arayüzünde erken mikroçatlak oluşumuna yol açarak, özellikle %30'luk L₃₀'da dramatik bir giriş/çıkış artışı (622/570 mm²) göstermiştir.

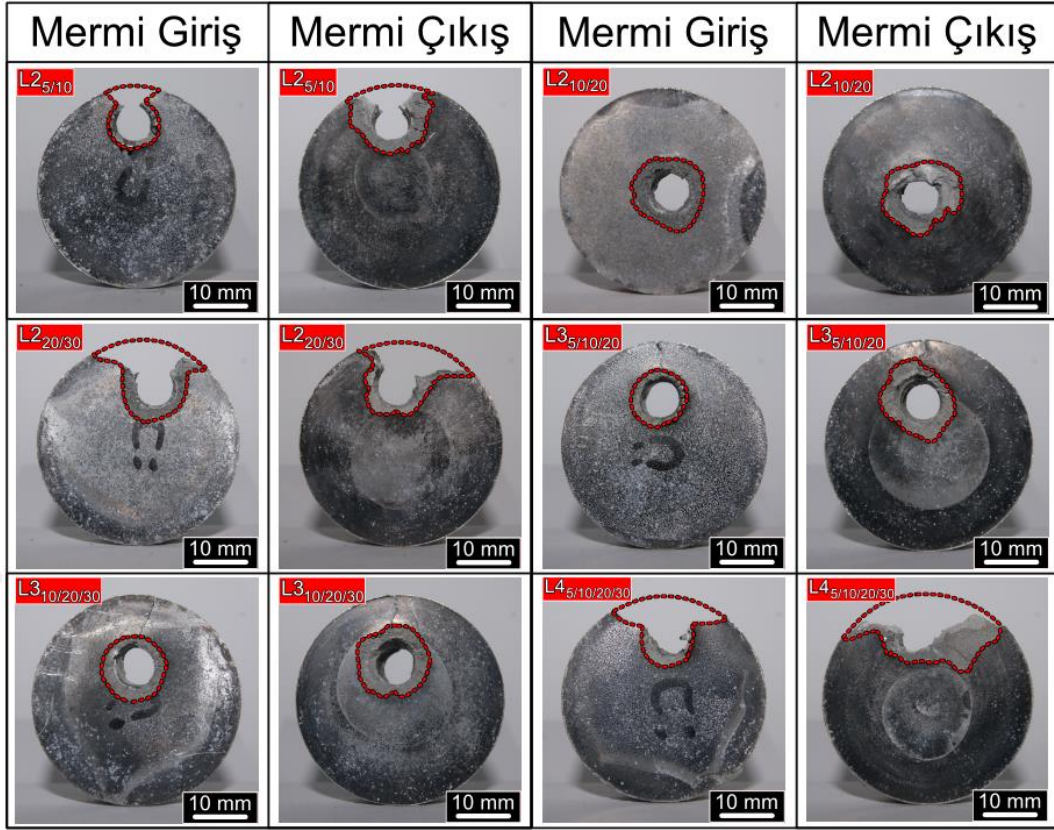
Şekil 3.30'da fonksiyonel dereceli iki katmanlı kompozitler L_{25/10}, L_{210/20} ve L_{220/30}'ta, katmanlar arası B₄C oran geçişi, enerji soğurmayı iyileştirmiştir. En düşük krater alanına sahip L_{25/10} (107/172 mm²) serisinde, üst katmandaki düşük takviye girişte minimal deformasyon; alt katmandaki orta takviye ise çıkışta homojen enerji dağılımı sağlamıştır. Orta-yüksek kombinasyonlar (L_{210/20} ve L_{220/30}) ise ara yüzey sayısının artmasıyla beraber mikroçatlak lokallerini çoğaltmıştır. Üç katmanlı L_{35/10/20} numunesi 91 mm² giriş ve 154 mm² çıkış alanıyla en yüksek balistik performansı sunmuştur. Üst katmandaki %5 B₄C, mermi başlangıç şokunu kısmen soğururken, orta ve alt katmandaki %10-%20 oranlar, enerjinin kademeli zayıflamasını sağlayarak hem yüzeyde hem de malzeme içinde kontrollü mikroçatlak ilerlemesi oluşturmuştur. L_{310/20/30} da 120/151 mm² ile benzer şekilde üstünlük göstermiştir. Dört katmanlı L_{45/10/20/30}'un giriş/çıkış alanları (159/268 mm²), ara yüzey sayısının fazla olması nedeniyle iç gerilmelerin düzensiz dağılımı ve erken debonding (bağ ayrılması) sonucunda üç katmanlıların gerisinde kalmıştır.

Tüm numunelerde çıkış kraterinin girişten daha geniş olmasının nedeni, merminin malzeme içi dalgalar yoluyla oluşturduğu petal-benzeri çatlak ağlarının yüzeyi daha geniş

parçalarla koparmasıdır. Mikroçatlak ilerlemesi ve adiabatik kayma bantları, özellikle takviyesiz ve aşırı takviyeli bölgelerde baskın mekanizmalar olarak gözlenmiştir. Orta düzeyde takviye içeren katmanlı yapılar ise hem çentik etkisini minimize etmiş hem de malzeme içi enerji dispersiyonunu maksimize ederek optimum gevreklik süpür volüm dengesi kurmuştur. Bu bulgular, zırh tasarımında fonksiyonel derecelemenin kritik önemini vurgulamaktadır: Katman sayısını ve B₄C oranlarını dikkatle optimize etmek hem çarpma enerjisinin sorunsuz soğurulmasını hem de malzeme bütünlüğünün korunmasını sağlar (Chao et al., 2019). Özellikle üç katmanlı 5/10/20 % B₄C kompozit, balistik dayanım ve enerji yalıtımı açısından ideal bir denge sunmaktadır.



Şekil 3.29. Tek katman kompozitlerden balistik atış deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler



Şekil 3.30. FDM kompozitlerden balistik atış deneyleri sonrası elde edilen yüzeyler

Tablo 3.2. Balistik atış testleri sonrası numunelerin mermi giriş ve çıkış alan verileri

Numune Kodu	Mermi Giriş Alanı (mm ²)	Mermi Çıkış Alanı (mm ²)
L1 ₀	241.26	330.08
L1 ₅	183.59	247.02
L1 ₁₀	123.28	230.79
L1 ₂₀	162.81	272.65
L1 ₃₀	622.30	569.96
L2 _{5/10}	106.96	171.80
L2 _{10/20}	154.57	156.91
L2 _{20/30}	199.44	195.43
L3 _{5/10/20}	91.10	153.71
L3 _{10/20/30}	119.58	151.47
L4 _{5/10/20/30}	158.59	268.32

3.3. AA2024/B₄C FDM'lerin Radyasyon Absorblama Testleri

3.3.1. AA2024/B₄C FDM'lerin Doğrusal ve Kütle Zayıflatma Katsayıları

Şekil 3.31 (a-d), incelenen numuneler için hesaplanan LAC değerlerinin foton enerjisine bağlı değişimini göstermektedir. 121.8 keV'de tüm numuneler için en yüksek μ_1 değerleri gözlenmekte, bu enerji aralığında fotoelektrik etkileşimin baskın olması nedeniyle düşük enerjili foton soğurumu maksimuma ulaşmaktadır. Tek katmanlı kompozitler arasında en yüksek lineer zayıflatma katsayısı yaklaşık 0.50 cm^{-1} ile %30 B₄C içeren L₁₃₀ kompozitte görülür. %5 ve %10 takviyeli örnekler (L₁₅ ve L₁₁₀) de 121.8 keV'de $0.24\text{-}0.27 \text{ cm}^{-1}$ aralığında iyi soğurma performansı sergiler. Enerji 344.3 keV'ye çıktığında Compton saçılmanın artmasıyla μ_1 değerleri tüm numunelerde düşüş gösterir; bu noktada L₁₃₀ yine en yüksek değere (0.55 cm^{-1}) ulaşırken, en düşük değerler %0 ve %2'lik takviyeli örneklerde (0.26 cm^{-1}) gerçekleşir. 778.9 keV'den itibaren tüm eğriler birbirine yaklaşır ve $0.12\text{-}0.27 \text{ cm}^{-1}$ arasında stabilize olur; yüksek enerjili fotonlarda zayıflatmanın büyük ölçüde Compton saçılma mekanizmasına bağlı olduğu bu bölgeye karşılaşıldığında, takviye miktarının etkisi azalır. Saf alaşımla ilk katman arasında gradasyonlu iki katmanlı sistemde (L_{20/1}) 121.8 keV'de μ_1 0.95 cm^{-1} ile en yüksek soğurma elde edilir; ikinci katmanda B₄C miktarının artışı, yüksek enerjilerde Compton etkinliğini destekler. Diğer tüm iki katmanlı örnekler 121.8 keV'de $0.55\text{-}0.62 \text{ cm}^{-1}$ aralığında yakın değerler gösterir; bu da düşük takviye gradyanlarının lineer soğurmadaki farkını nispeten azaltır. Enerji arttıkça, özellikle 344.3 keV'de hepsi $0.27\text{-}0.31 \text{ cm}^{-1}$ 'e düşerek tek katmanlı sistemlere benzer davranış sergiler. 778.9 keV ve sonrası için eğriler arasında sapma oldukça küçüktür ($0.22\text{-}0.29 \text{ cm}^{-1}$), böylece çok katmanlılık Compton bölgesinde lineer zayıflatma heterojenliğini sınırlar.

Üç katmanlı örneklerde 121.8 keV'de μ_1 değerleri $0.57\text{-}0.75 \text{ cm}^{-1}$ arasında değişir; en yüksek soğurma L_{310/20/30}'da (0.75 cm^{-1}) ve L_{35/10/20}'de (0.67 cm^{-1}) elde edilir. Bu, takviye dağılımındaki katman sıralamasının fotoelektrik bölgedeki etkinliği artırdığını gösterir. 344.3 keV'ye geçildiğinde tüm kompozitler $0.31\text{-}0.40 \text{ cm}^{-1}$ aralığında yoğunlaşır; burada B₄C oranı ve katman sayısının etkisi birbirine yakın değerlerle maskelenir. 778.9 keV sonrası bölgeye ($0.24\text{-}0.32 \text{ cm}^{-1}$) kadar μ_1 grafiklerinde paralel eğilim izlenir; üç katmanlı yapıların en kritik enerji aralıklarında heterojen soğurmayı dengeli dağıttığı söylenebilir. Dört katmanlı sistemlerde 121.8 keV'de μ_1 , L_{45/10/20/30} kompozitte 0.60 cm^{-1} ile en yüksek değeri alır; L_{40/1/2/5} de 0.54 cm^{-1} ile güçlü bir soğurma sergiler. Enerji 344.3 keV'ye çıktığında tüm eğriler $0.22\text{-}0.36 \text{ cm}^{-1}$ arasında konumlanır; burada katman sayısının artması

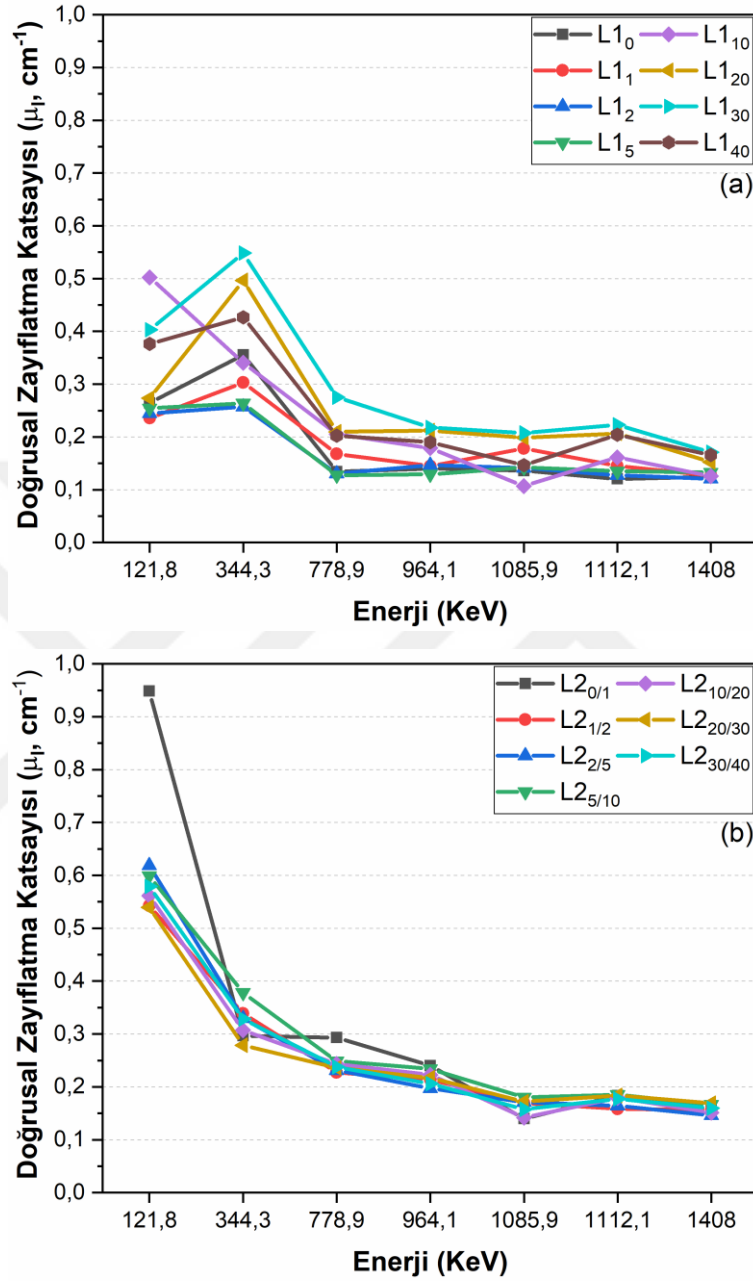
düşük enerjili bölgede avantaj yaratırken, orta enerjide farklılıkları daraltır. 778.9 keV sonrası için $0.15-0.25 \text{ cm}^{-1}$ aralığında stabilize olan μ_1 değerleri, dört katmanlı yapının hem düşük hem de yüksek enerjilerde dengeli soğurma sağladığını ortaya koyar.

Şekil 3.32 (a-d), incelenen numuneler için hesaplanan MAC değerlerinin foton enerjisine bağlı değişimini göstermektedir. μ_m değerleri de lineer katsayılarla paralel değerlendirilir ancak malzeme yoğunluğu etkisiyle normalize edilmiş hali sunar. 121.8 keV'de $0.10-0.23 \text{ cm}^2/\text{g}$ aralığında başlayan eğriler, L_{130} 'da $0.25 \text{ cm}^2/\text{g}$ ile zirve yapar. 344.3 keV'ye gelindiğinde maksimum $0.25 \text{ cm}^2/\text{g}$ (L_{130}) ve minimum $0.11 \text{ cm}^2/\text{g}$ (L_{12}) görülür. 778.9 keV'den sonra tüm örnekler $0.05-0.12 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında birbirine yakınlaşır; bu da kompozit yoğunluğunun normalize edilmiş soğurmadaki etkisinin enerjinin artmasıyla azalması anlamına gelir. Saf katmanlı gradyan ($L_{20/1}$) 121.8 keV'de $0.43 \text{ cm}^2/\text{g}$ ile en yüksek ağırlıkça katsayıyı verirken, diğer tüm iki katmanlı örnekler $0.24-0.28 \text{ cm}^2/\text{g}$ civarında konumlanır. 344.3 keV'de $L_{25/10}$ 'de hafif bir artış ($0.17 \text{ cm}^2/\text{g}$) dikkat çeker; ancak tüm eğriler 778.9 keV itibarıyla $0.11-0.13 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ye düşerek normalize soğurmanın enerjiye duyarlılığının sınırlı olduğunu gösterir.

Üç katmanlı yapılar için 121.8 keV'de μ_m $0.30-0.35 \text{ cm}^2/\text{g}$ aralığında yoğunlaşır; $L_{310/20/30}$ en yüksek değeri ($0.35 \text{ cm}^2/\text{g}$), $L_{320/30/40}$ en düşük değeri ($0.27 \text{ cm}^2/\text{g}$) sergiler. 344.3 keV'de tüm örnekler $0.15-0.18 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında kümelenir; 778.9 keV sonrası bölgedeki $0.11-0.15 \text{ cm}^2/\text{g}$ aralığı ise katmanlı yapıların normalize edilmiş soğurma farklarının enerjinin artışıyla giderek azalacağını ortaya koyar. Dört katmanlı sistemlerde 121.8 keV'de μ_m değerleri $0.15-0.27 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişir; $L_{45/10/20/30}$ $0.27 \text{ cm}^2/\text{g}$ ile en yüksek normalize soğurmayı sunar. 344.3 keV'de $0.10-0.16 \text{ cm}^2/\text{g}$ aralığında çeşitlilik görülse de 778.9 keV sonrası tüm örnekler $0.07-0.12 \text{ cm}^2/\text{g}$ bandında toplanır. Bu durum, dört katmanın hem lineer hem de normalize soğurmayı düşürse de özellikle düşük enerjilerde daha etkin radyasyon zırh performansı sağladığını gösterir.

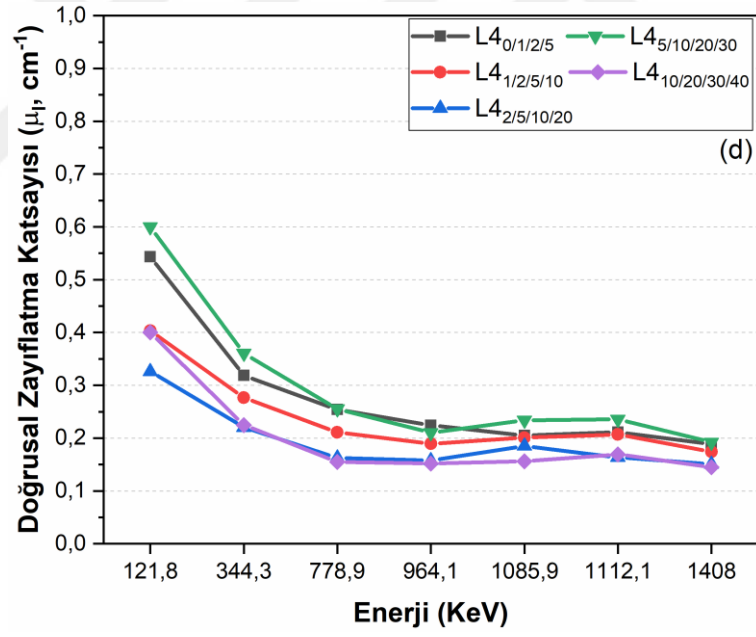
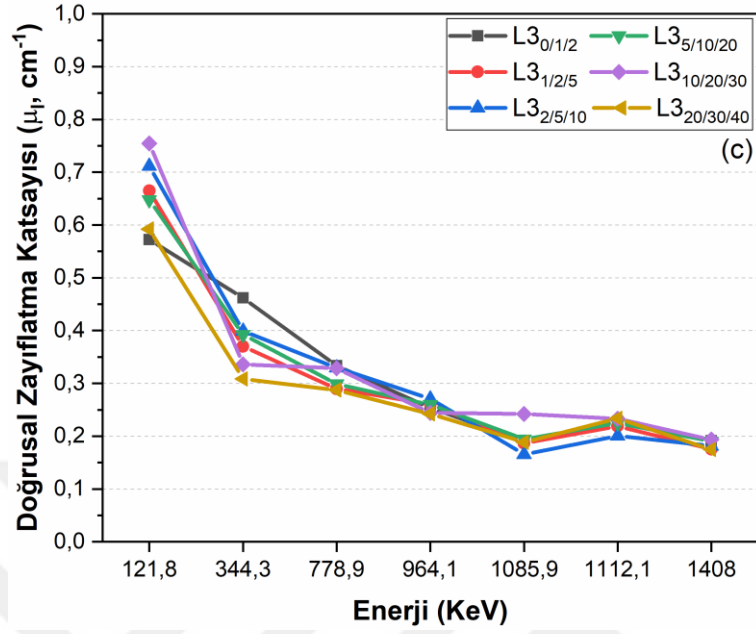
Kompozitlerin düşük enerjili (121.8 keV) zayıflatma katsayıları fotoelektrik etkileşimin baskınlığıyla maksimuma çıkarken, 344.3-1408 keV aralığında Compton saçılma nedeniyle μ_1 $0.12-0.27 \text{ cm}^{-1}$ ve μ_m $0.05-0.15 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında sabitlenir. İki ve üç katmanlı, özellikle %5-10 B₄C takviyeli yapılar hem mekanik hem de radyasyon zırhlamada en iyi performansı sunar. Dört katmanlı dizaynlar düşük enerjide ek soğurma avantajı kazandırsa da ara yüzey kayıpları nedeniyle genel katkısı sınırlı kalır. Katmanlı numunelerin üretiminin, bölgesel olarak değişen B₄C oranlarının sinerjik etkisinden dolayı gama radyasyon zayıflamasını artırdığı sonucuna varılmıştır (Ahmad vd., 2023; Huo vd., 2024)

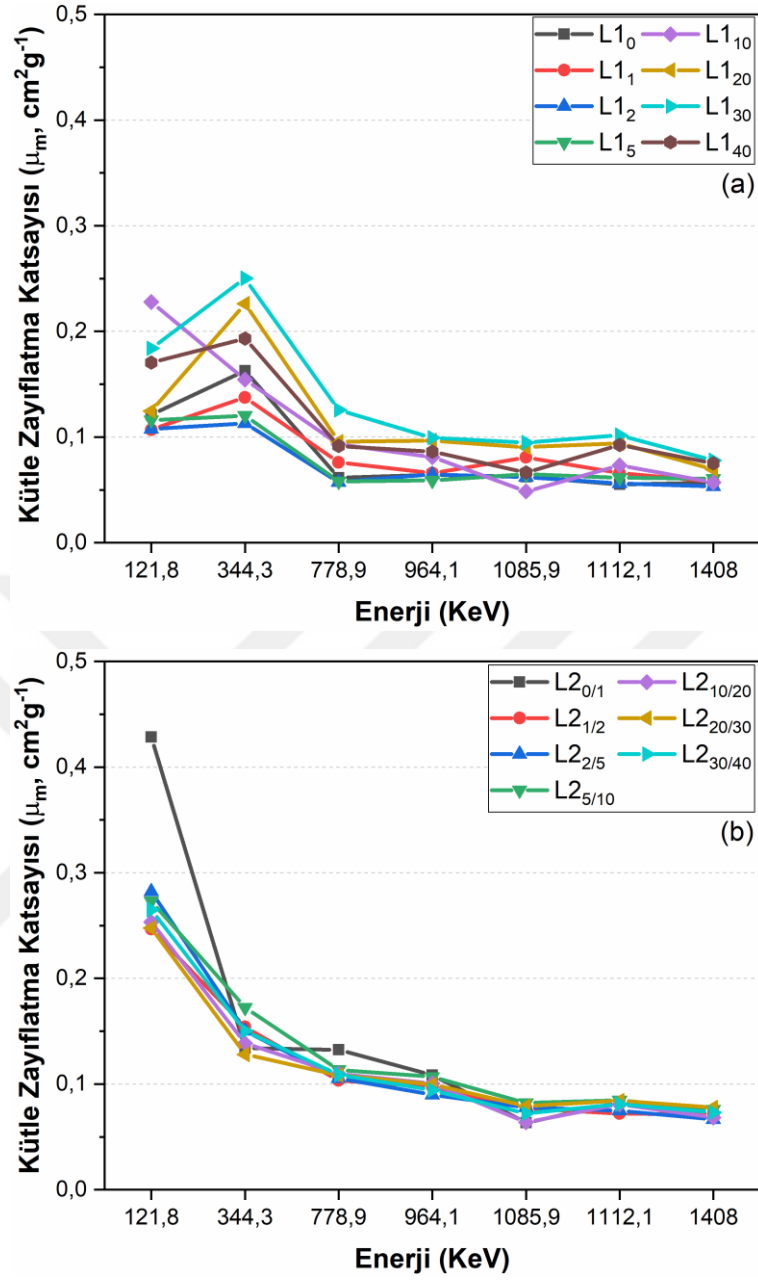
Bulgular, katmanlı yapıların yalnızca MAC açısından değil, aynı zamanda LAC açısından da etkili olduğunu doğrulamaktadır (Kumar vd., 2021)



Şekil 3.31. Gama radyasyon kalkanı testinden sonra numunelerin LAC grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

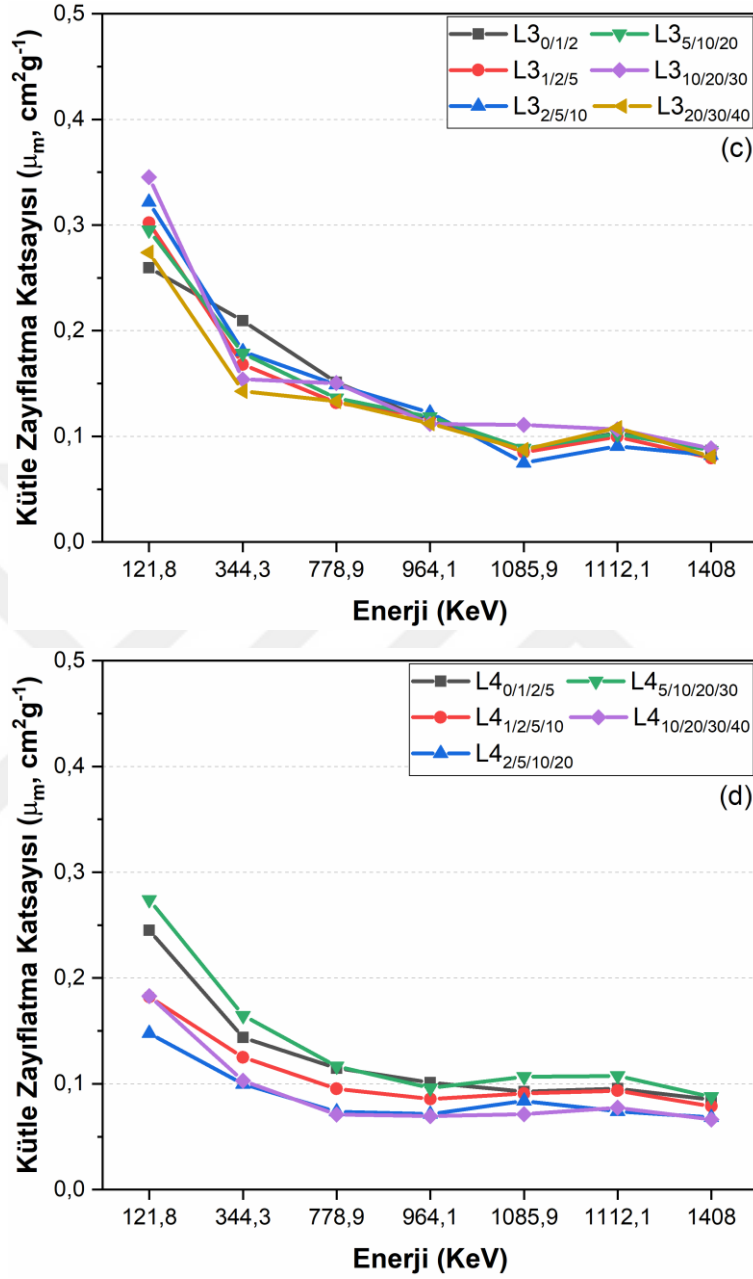
Şekil 3.31'in Devamı





Şekil 3.32. Gama radyasyon kalkanı testinden sonra numunelerin MAC grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.32'nin Devamı



3.3.2. AA2024/B₄C FDM'lerin Yarı ve Ondalık Değer Katsayıları

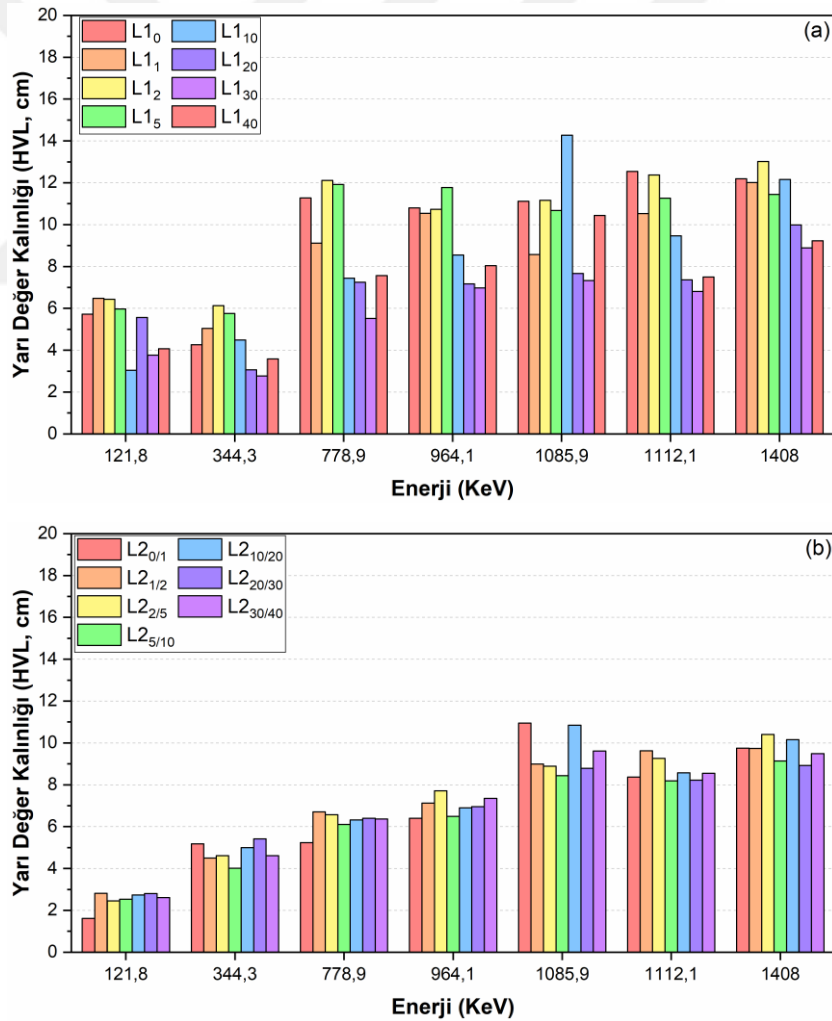
B₄C takviyesinin ve fonksiyonel yapının gama radyasyon kalkanlama özellikleri üzerindeki etkisi çeşitli parametrelerin incelenmesiyle belirlenmiştir. Deneylerde, farklı miktarlarda B₄C içeren AA2024 alaşımlı kompozit malzemeler değerlendirilmiştir. Ölçümler ¹⁵²Eu gama radyasyon kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yarı değer katmanı

(HVL), onuncu değer katmanı (TVL), ortalama serbest yol (MFP) ve bağıl koruma verimliliği (RPE) parametreleri analiz edilmiştir (Vignesh vd., 2023).

Yarı değer kalınlığı (HVL), bir malzeme içinden geçen foton akısını yarıya indirmek için gereken kalınlık değeri olup, zırhlama performansını doğrudan yansıtır. Şekil 3.33 (a - d)'de, tek katmanlı (L1), iki katmanlı (L2), üç katmanlı (L3) ve dört katmanlı (L4) AA2024/B₄C kompozitlerin 121.8 keV ile 1408 keV arasındaki yedi farklı foton enerjisinde ölçülen HVL değerleri gösterilmektedir. B₄C takviye oranları ve katman kombinasyonları arttıkça hem düşük hem yüksek enerjili fotonlara karşı soğurma davranışı önemli ölçüde değişim sergilemektedir.

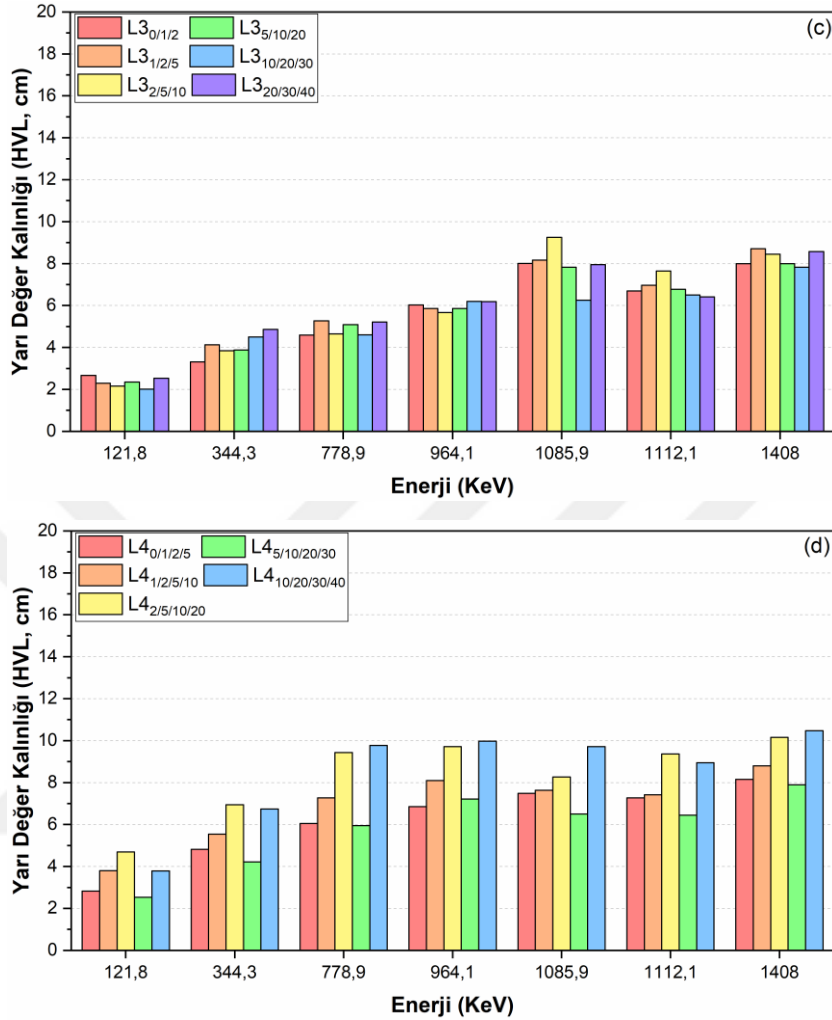
121.8 keV'de tek katmanlı numunelerin HVL değerleri 3 cm (L₁₀, %10 B₄C) ile 6.5 cm (L₁, %1 B₄C) arasında değişmektedir. En düşük HVL, %10 B₄C takviyeli L₁₀ bileşiğinde (3 cm) gözlenmiş olup, fotoelektrik etkileşimin baskın olduğu düşük enerjide optimum çekirdek soğurması sağladığı anlaşılmaktadır. Enerji 344.3 keV'ye yükseldiğinde tüm örneklerde HVL 2.9-6.1 cm aralığına düşer; burada yüksek B₄C oranlı (%30) L₃₀ bileşiği (2.9 cm) yine en iyi korumayı sunar. Orta enerjilerde (778.9-964.1 keV), Compton saçılma etkisinin artmasıyla HVL değerleri genel olarak 7.4-12 cm bandına genişler; bu bölgedeki en düşük HVL (5.5 cm) %20 B₄C takviyeli L₂₀'de ölçülmüştür. Yüksek enerji uç noktası olan 1408 keV'de ise HVL aralığı 10-13.1 cm arasına çıkmakta, %1-%2 B₄C takviyeli örnekler en yüksek değerleri kaydederken, %10-%20 B₄C vakaları daha düşük HVL koruması sağlar. İki katmanlı FDM'lerde 121.8 keV'de HVL değerleri L_{20/1}'de 1.5 cm'den L_{30/40}'e 2.8 cm'ye kadar düşerek, tek katmanlılara kıyasla önemli bir performans artışı sergiler. Bu, farklı B₄C dağılımının iç yapıda daha etkin soğurma zonları oluşturmasındandır. 344.3 keV'de HVL 4.5-5.5 cm bandında iken, 778.9 keV'de 6.1-6.7 cm aralığı gözlenir; özellikle L_{20/1} ve L_{210/20} kombinasyonları, dengeli dağılım sayesinde diğerlerine göre 6.1 cm civarında daha düşük HVL sunar. 1408 keV'de iki katmanlıların HVL değerleri 8.9-10.2 cm aralığındadır; bu da katmanlı yapıların yüksek enerjide de tek katmanlılara kıyasla hafif avantaj sağladığını gösterir. Üç katmanlı numunelerde 121.8 keV'de HVL 2.3-2.7 cm aralığında ölçülmüş, L_{31/2/5} ve L_{35/10/20} en düşük değerleri (2.3 cm) sunarak düşük enerjide başarılı kalkan performansı göstermiştir. 344.3 keV'de HVL 3.2-4.8 cm bandına yükselir; L_{30/1/2} hariç, tüm kombinasyonlar 4 cm'nin altında kalarak tek katmanlılardaki 6 cm'lik değerin belirgin altında kalmıştır. Orta enerji bölgesi (778.9-964.1 keV) için HVL 4.5-6.2 cm aralığındadır ve L_{310/20/30} çeşitleri, 4.6 cm ile en düşük HVL değerlerini sergiler. 1408 keV'ye kadar olan aralıkta HVL 7.8-8.7 cm bandında

dalgalanırken, üç katmanlı tasarım genel olarak hem düşük hem de orta enerji bölgelerinde çok katmanlı yapıların avantajını net biçimde ortaya koyar. Dört katmanlı kompozitlerde 121.8 keV’de HVL değerleri 2.6 cm ($L_{45/10/20/30}$) ile 4.7 cm ($L_{42/5/10/20}$) arasında geniş bir spektrum sunar. Burada $L_{45/10/20/30}$ dengeli takviye dağılımı sayesinde en düşük HVL’i elde ederek düşük enerjide en etkili kalkanı meydana getirir. 344.3 keV’de HVL 5-6.8 cm bandına yerleşir; dört katmanlı örnekler üç katmanlılara benzer veya nispeten biraz daha yüksek HVL değerleri gösterir. 778.9 keV’de ise HVL 5.9-9.8 cm aralığında ölçülürken, $L_{40/1/2/5}$ en düşük (6 cm) ve $L_{410/20/30/40}$ en yüksek (9.7 cm) HVL değerini verir. Yüksek enerjilerde (1085.9-1408 keV) dört katmanlılarda HVL 6.5-10.5 cm bandına yayılır; katman sayısının artışı, malzeme içindeki farklı B₄C yoğunluklarının etkileşimini karmaşıktırarak bazı kombinasyonlarda HVL artışına yol açarken, ideal katman dağılımında soğurma performansı hala tek katmanlılara göre iyileşme gösterir.



Şekil 3.33. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin HVL grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.33'nün Devamı

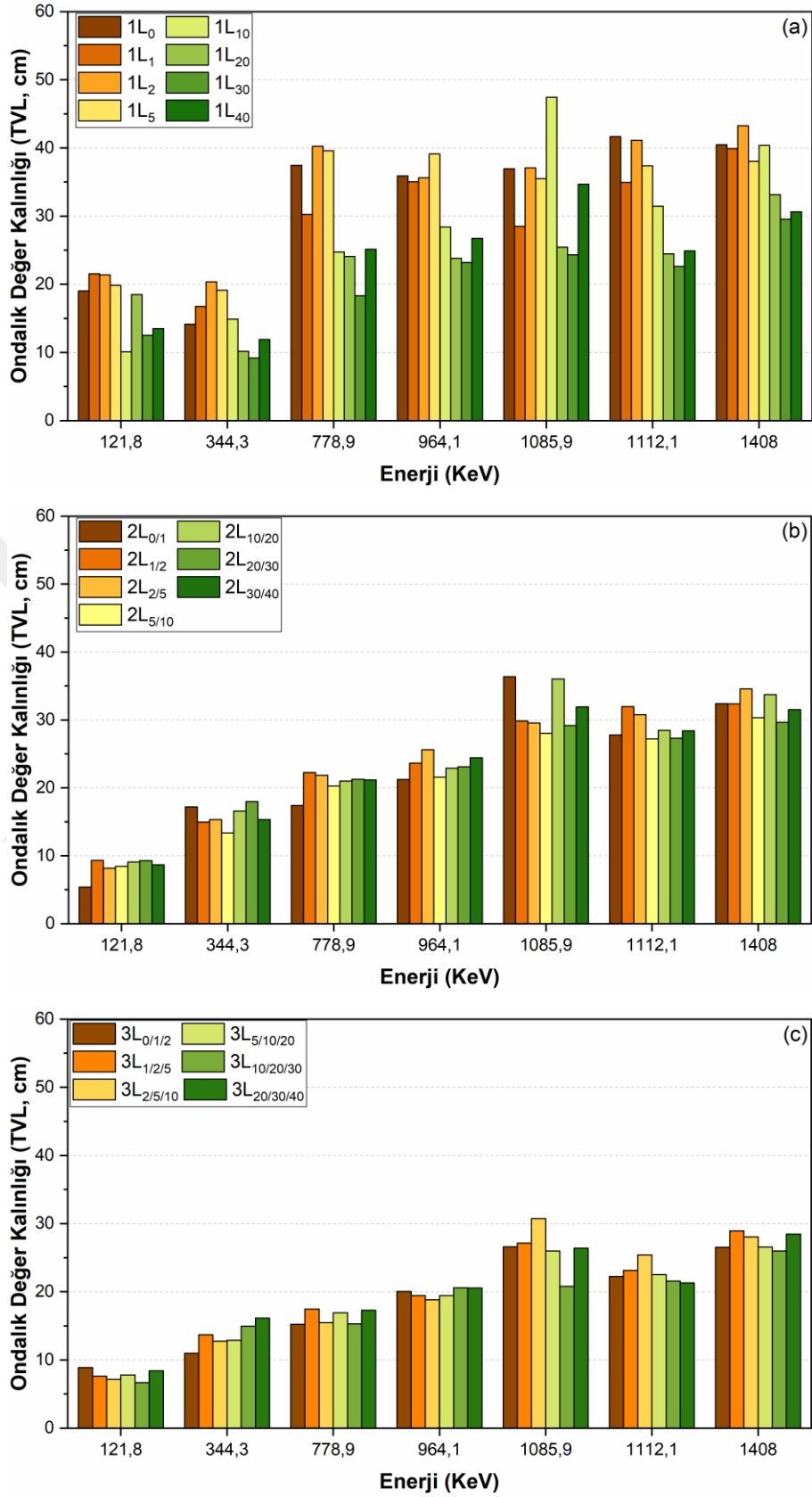


Şekil 3.34 (a-d), AA2024 matrisli ve farklı B₄C takviye profillerine sahip tek katmanlı, iki katmanlı, üç katmanlı ve dört katmanlı fonksiyonel dereceli kompozit numunelerin ondalık değer kalınlığı (TVL, cm) değerlerinin 121.8 keV ile 1408 keV arasındaki yedi enerjideki değişimini göstermektedir. TVL, bir malzemenin giriş enerjili foton akınının %90'ını soğurmak için gereken kalınlık olarak tanımlanır ve yüksek TVL değerleri, zırh performansı açısından malzemenin daha etkin bir radyasyon kalkanı olduğunu işaret eder. Tüm panellerde enerjinin artışıyla TVL değerlerinde genel bir düşüş görülse de panelden panele ve numune konfigürasyonuna göre nispeten farklı davranışlar ortaya çıkmaktadır.

Tek katmanlı numuneler arasında (L₁₀, L₁₁, L₁₂, L₁₅, L₁₁₀, L₁₂₀, L₁₃₀, L₁₄₀) en yüksek TVL değerleri düşük enerjilerde (121.8 keV) ortaya çıkmaktadır; bu durumda fotoelektrik etkisi baskın olup malzeme içindeki yüksek atom numaralı B₄C parçacıkları foton soğurmayı

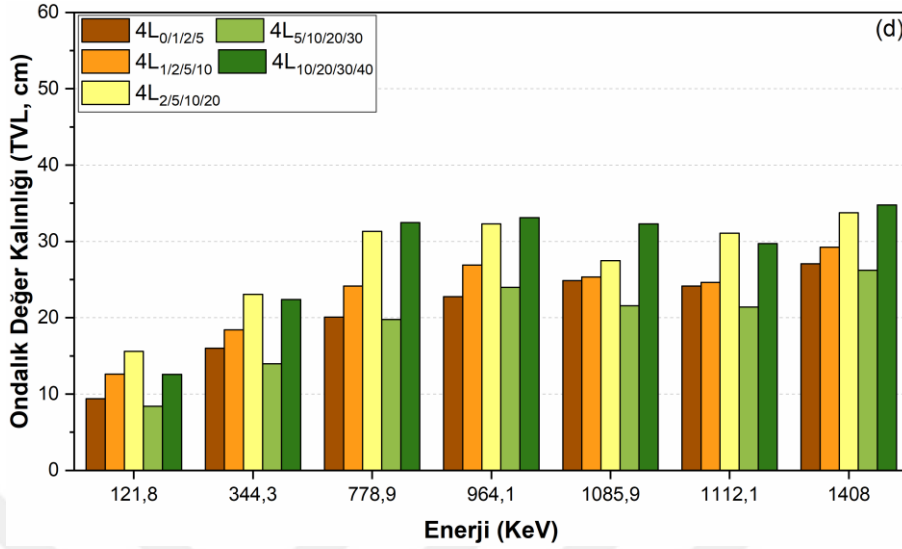
maksimuma taşır. Özellikle %5 B₄C içeren L₁₅ numunesi, 778.9 keV civarında yaklaşık 40 cm ile en yüksek kalınlık gereksinimini gösterirken, enerji 1408 keV'e çıktığında tüm numuneler 30-40 cm aralığına düşmektedir. Takviyesiz (L₁₀) alaşım en düşük TVL'i verirken, %10 ve %20 takviyeli örnekler (L₁₁₀, L₁₂₀) 344.3-964.1 keV aralığında nispeten dengeli ve yüksek soğurma performansı sunmaktadır. İki katmanlı konfigürasyonlarda (L_{20/1}, L_{21/2}, L_{22/5}, L_{25/10}, L_{210/20}, L_{220/30}, L_{230/40}) TVL değerleri, tek katmanlı numunelere kıyasla özellikle orta ve yüksek enerjilerde artış göstermektedir. Örneğin, 1085.9 keV'de L_{20/1} numunesi 36 cm'ye ulaşırken, L_{210/20} konfigürasyonu 35 cm civarında kalmaktadır. Enerji yükseldikçe Compton saçılmanın baskın hale gelmesiyle kalınlık ihtiyaçları geriler; yine de iki katmanlı yapı, farklı B₄C dağılımlarının kombinasyonu sayesinde tek katmanlı versiyonlardan yaklaşık %10-15 daha yüksek TVL değerleri sağlamıştır. 1112.1 keV ve 1408 keV'de tüm numuneler 27-34 cm aralığında yoğunlaşır. Üç katmanlı örneklerde (L_{30/1/2}, L_{31/2/5}, L_{32/5/10}, L_{35/10/20}, L_{310/20/30}, L_{320/30/40}) enerji arttıkça TVL eğrileri daha yatay bir karaktere bürünmektedir. 1085.9 keV'de L_{32/5/10} numunesi yaklaşık 31 cm ile en yüksek değeri kaydeder; buna karşılık %0 takviyeli L_{30/1/2} örneği 26 cm civarındadır. Bu durum, katman sayısının ve dolayısıyla farklı B₄C oranlarının artan foton soğurma etkileşim yollarını çeşitlendirmesiyle açıklanabilir. Yüksek enerjilerde ise üç katmanlıların TVL'i 22-29 cm bandında seyrederek çok katmanlı dizaynın yüksek enerji fotonlarına karşı da avantaj sağladığını göstermektedir. Dört katmanlı düzenlemeler (L_{40/1/2/5}, L_{41/2/5/10}, L_{42/5/10/20}, L_{45/10/20/30}, L_{410/20/30/40}) tüm enerji aralığında en yüksek TVL performansını sergiler. 778.9 keV'de L_{42/5/10/20} konfigürasyonu 32 cm'ye ulaşırken, 1085.9 keV'de L_{410/20/30/40} yaklaşık 33 cm ile en iyisidir. Böylece, dört katmanlı fonksiyonel dereceli yapı hem düşük hem de orta enerjilerde üstün bir kalkanlama sunmakta, yüksek enerjilerde de 25-35 cm aralığında güçlü bir koruma kabiliyeti muhafaza etmektedir.

Genel olarak, katman sayısı ve B₄C takviye profili arttıkça TVL değerleri yükselmekte, zırhın foton etkileşimi açısından etkinliği artmaktadır. Tek katmanlı numunelerde fotoelektrik soğurmanın baskın olduğu düşük enerjilerde avantajlı katmanlar %5-%10 takviye oranlarında gözlenirken, çok katmanlı tasarımlarda hem fotoelektrik hem de Compton mekanizmalarını optimize eden katman geçişleri sayesinde tüm enerji spektrumu boyunca TVL performansı iyileşmektedir. Özellikle dört katmanlı kompozit, savunma uygulamaları için en geniş enerji aralığında yüksek kalkanlama kabiliyeti sağlayan ideal tasarım alternatifi olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 3.34. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin TVL grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.34'ün Devamı

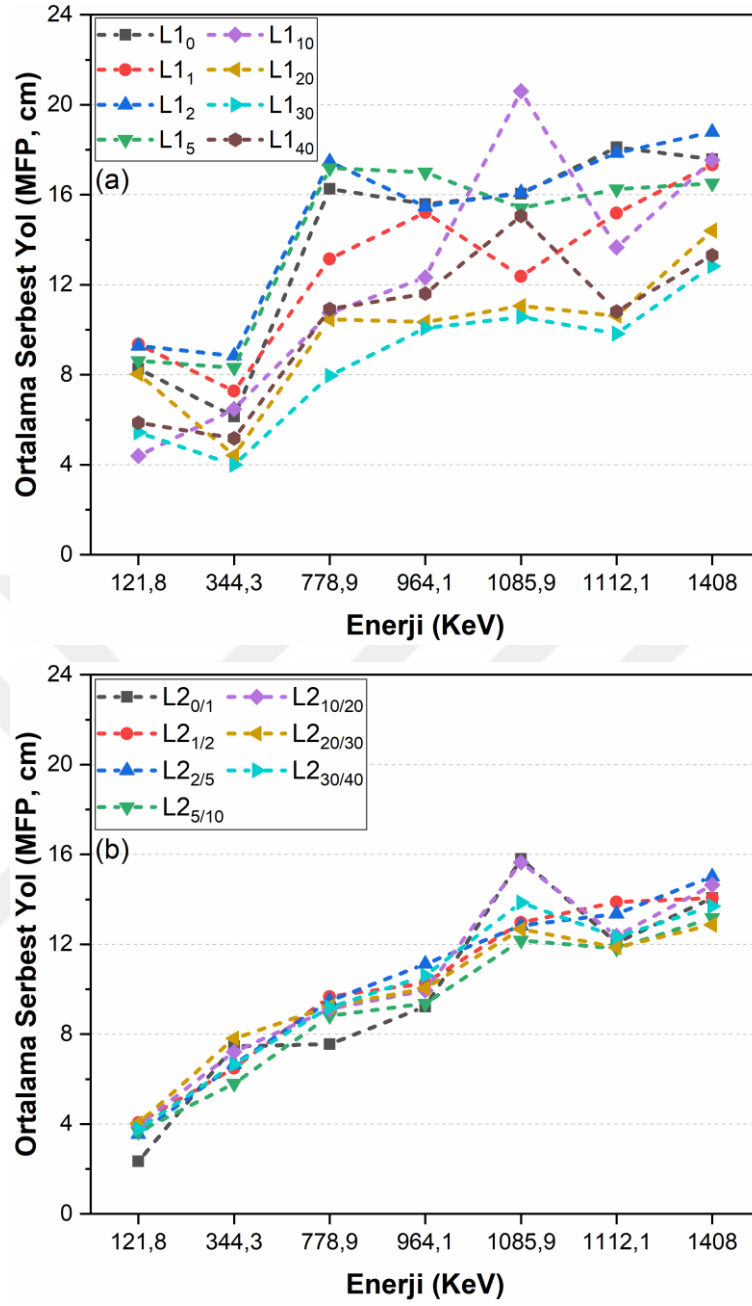


3.3.3. AA2024/B₄C FDM'lerin Ortalama Serbest Yol ve Radyasyon Koruma Verimliliği

Ortalama serbest yol (Mean Free Path, MFP), malzeme içindeki foton etkileşimlerinin ortalama gerçekleşme mesafesini tanımlayan kritik bir parametredir ve radyasyon kalkanlama performansının dolaylı bir göstergesidir. Düşük MFP değerleri, malzemenin fotonlarla etkileşime girme olasılığının yüksek olduğunu; dolayısıyla daha kısa mesafede giriş ışınının %37'sini soğurabildiğini işaret eder. Şekil 3.35 (a-d), tek katmanlı (L1), iki katmanlı (L2), üç katmanlı (L3) ve dört katmanlı (L4) fonksiyonel dereceli kompozitlerin farklı B₄C dağılımlarına göre 121.8 keV'den 1408 keV'e kadar yedi enerji noktasındaki ortalama serbest yol değerlerini göstermektedir. Enerji arttıkça Compton saçılma ve çift üretim mekanizmalarının baskınlaşması sonucu malzeme içindeki etkileşim olasılığı azalır ve bu da MFP değerlerinin genel bir yükseliş trendi izlemesine neden olur.

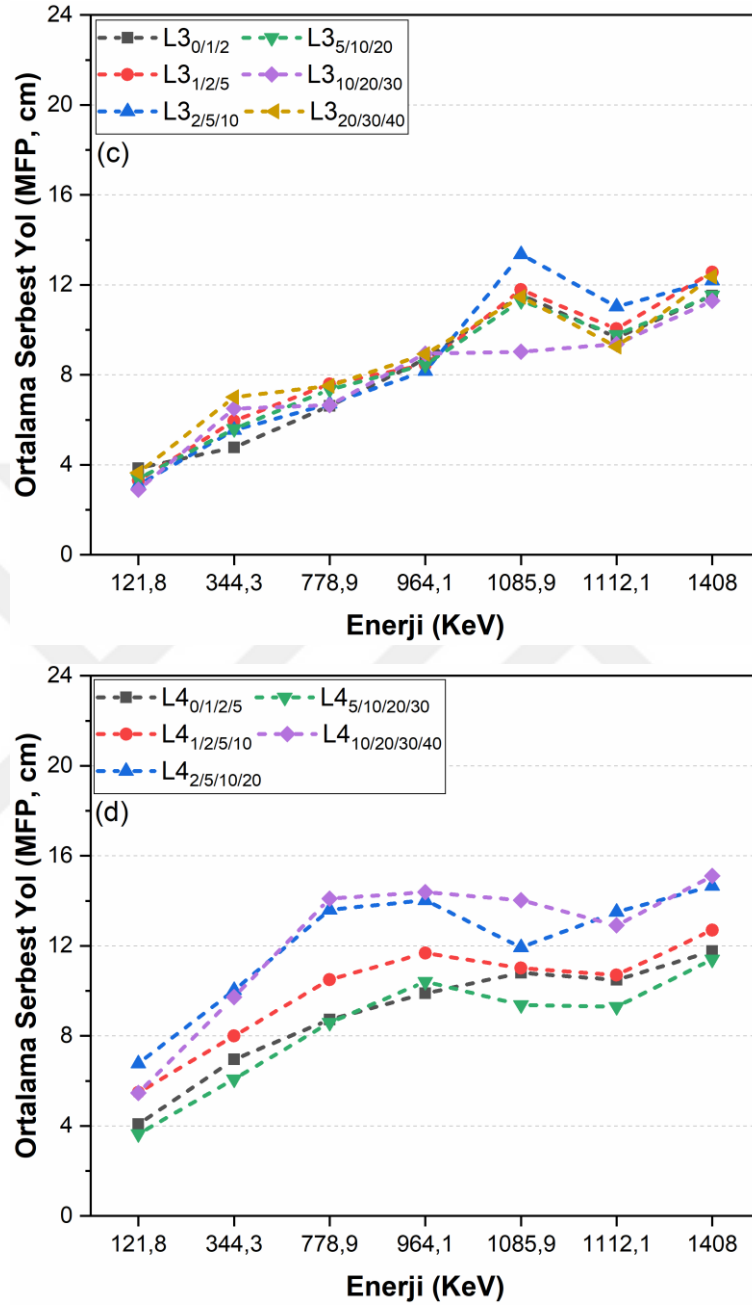
121.8 keV'da tek katmanlı numunelerin MFP değerleri 6-9 cm aralığında değişmekte olup, en düşük değer %10 B₄C takviyeli L1₁₀'da (4.5 cm) gözlenirken, takviyesiz L1₀ yaklaşık 9 cm ile en yüksek MFP'yi sergiler. Enerji 344.3 keV'ye yükseldiğinde tüm numuneler hızla 7-11 cm bandına çıkar; burada da L1₁₀ ve L1₂₀ en düşük MFP'ye (yaklaşık 5-6 cm) sahip olarak optimum soğurma potansiyelini korur. 778.9 ve 964.1 keV'de MFP değerleri 12-17 cm arasında yatay bir plato oluşturur; bu aralıkta %1-%5 takviyeli numuneler (L1₁, L1₂, L1₅) nispeten yüksek MFP ile daha zayıf soğurma gösterirken, %10

ve %20 takviyeli kompozitler en düşük MFP'ye sahiptir. 1085.9 keV'de ölçüm belirsizlikleri sebebiyle küçük dalgalanmalar izlense de enerji 1408 keV'ye çıktığında tüm profiller 16-19 cm'ye ulaşarak malzemenin yüksek enerjili fotonlar karşısındaki etkileşim şansının azaldığını doğrular. İki katmanlı dizaynlar, 121.8 keV'de 3-5 cm arası daha düşük MFP değerleriyle çok katmanlı etkinliğini ilk andan itibaren ortaya koyar; özellikle L2_{0/1} (3 cm) batarya en güçlü soğurma kapasitesini sunar. 344.3 keV'de tüm konfigürasyonlar 6-9 cm bandına yükselirken, 778.9 keV civarında 9-11 cm arasında toplanır. 964.1 keV'de MFP 10-13 cm'ye çıkarak tek katmanlılara kıyasla ortalama %10-15 daha düşük kalınlık ihtiyacı ortaya koyar. 1085.9 keV'de L2_{10/20} 16 cm ile zirve yaparken, diğer konfigürasyonlar 12-14 cm arasındadır. Son enerji noktasında (1408 keV) MFP 13-15 cm aralığında dengelenir; bu da iki katmanlı kompozitlerin tüm spektrum boyunca tek katmanlılardan üstün performans sunduğunu gösterir. Üç katmanlı tasarımlar, 121.8 keV'de 3.5-4.5 cm değerleriyle çok katmanlı soğurmanın avantajını sergiler. 344.3 keV'ye kadar 5-7 cm bandında kademeli artış gözlenirken, 778.9-964.1 keV aralığında MFP 8-10 cm aralığına yükselir; burada L3_{2/5/10} ve L3_{10/20/30} konfigürasyonları hafifçe öne çıkar. 1085.9 keV'de L3_{2/5/10} 13 cm ile en yüksek etkileşimi kaydederken, en yüksek takviye gradyanı içeren L3_{10/20/30} 9 cm ile daha az idealdir; bu durum, katman içindeki B₄C oranlarının ara enerjilerdeki etkileşme mekanizmalarını farklı şekilde etkilediğini işaret eder. 1408 keV'de üç katmanlıların MFP'si 11-12 cm civarında toplanır ve dört katmanlılara göre biraz daha yüksek kalınlık gerektirir. Dört katmanlı numuneler tüm enerji spektrumunda en düşük MFP değerlerini verir. 121.8 keV'de L4_{5/10/20/30} 3.8 cm ile en güçlü soğurmayı sunarken, takviyesiz başlangıç katmanı içeren L4_{0/1/2/5} 5 cm civarındadır. 344.3 keV'de MFP hızla 7-10 cm'ye çıkarken, 778.9 keV'de L4_{10/20/30/40} 14 cm ile en yüksek değeri kaydeder. 964.1 keV'de 13-15 cm bandındaki plato, dört katmanlı yapıların orta enerjilerde bile güçlü etkileşime devam ettiğini gösterir. 1085.9 keV'de MFP 12-16 cm aralığında dalgalanır ve 1408 keV'de 15-17 cm değerlerine ulaşır ki bu da dört katmanlı kompozitlerin yüksek enerjili fotonlara karşı dahi en düşük ortalama serbest yolu sunarak en yüksek maruz kalma azaltımını gerçekleştirdiğini kanıtlar.



Şekil 3.35. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin MFP grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.35'in Devamı



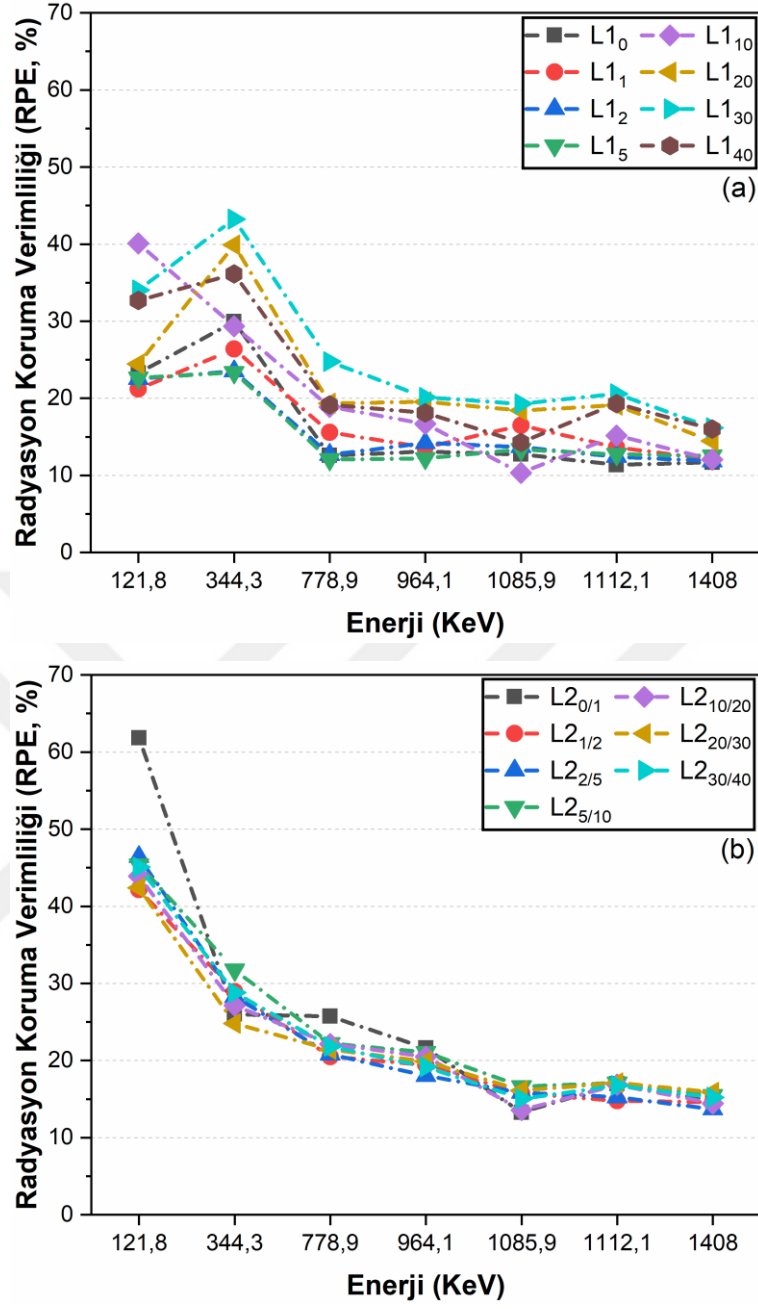
Şekil 3.36 (a-d), AA2024 matrisli ve farklı B₄C takviye dağılımlarına sahip tek, iki, üç ve dört katmanlı fonksiyonel dereceli kompozit numunelerin Radyasyon Koruma Verimliliği (Radiation Protection Efficiency, RPE) yüzdelерinin 121.8 keV'den 1408 keV'e kadar uzanan enerji spektrumunda nasıl değiştiğini göstermektedir. RPE, giriş foton akınının ne kadarının malzeme içinde soğurulduğunu veya sapıtıldığını yüzdelik olarak ifade eden bir performans göstergesidir. Yüksek RPE değerleri, ilgili enerji noktasında kompozitin giriş

ışının önemli bir kısmını etkili biçimde engellediğini, dolayısıyla zırh malzemesi olarak daha yüksek verimlilik sunduğunu gösterir. Enerji arttıkça fotoelektrik etkileşimin geri plâna itilmesi ve Compton saçılma ile çift üretim mekanizmalarının baskınlaşması, tüm numunelerde RPE'nin düşmesine yol açmaktadır.

Tek katmanlı numunelerde en yüksek koruma verimliliği düşük enerjilerde (121.8 keV) görülür; örneğin %10 B₄C içeren L₁₀ örneği yaklaşık %40 RPE ile öne çıkarken, takviyesiz L₀ sadece %33 civarında kalır. 344.3 keV'ye kadar artan RPE trendi, burada fotoelektrik etkileşimin hâlâ belirgin rol oynamasından kaynaklanır ve L₃₀ örneği %43'e kadar yükselir. 778.9 keV'de tüm tek katmanlı profiller birden düşüşe geçerek %18-%21 bandına yerleşir; bu noktada Compton saçılma baskın etkileşim mekanizmasıdır. Orta enerjilerde (964.1-1112.1 keV) RPE değerleri %12-%20 aralığında yatay seyrederek; %20 ve %30 takviyeli konfigürasyonlar nispeten daha yüksek verimlilik sağlar. 1408 keV'de ise tüm örnekler %12-%16 civarına gerileyerek yüksek enerjili fotonlara karşı tek katmanlı dizaynın sınırlı koruma sunduğunu ortaya koyar. İki katmanlı sistemler, 121.8 keV'de %62'ye ulaşan L_{20/1} numunesiyle tek katmanlılardan belirgin biçimde daha yüksek başlangıç verimliliği sergiler. Diğer konfigürasyonlar da 121.8 keV'de %43-%50 bandındadır; bu, katmanlar arası B₄C oran geçişlerinin fotoelektrik soğurma kapasitesini artırdığını gösterir. 344.3 keV'ye kadar hızla düşen RPE, tüm numuneleri %24-%32 aralığına taşır ki bu bile tek katmanlılardaki %29-%43 aralığından daha dardır. 778.9 keV'de %20-%25, 964.1 keV'de ise %17-%22 bandında seyrederek; iki katmanlılar, bu orta enerji bölgelerinde de tek katmanlılara göre yaklaşık %5-%8 daha yüksek RPE'ye sahiptir. 1085.9-1408 keV aralığında RPE %13-%16 aralığında stabil kalır; böylece iki katmanlı tasarımlar, geniş spektrumlu korumada halen avantajını korur. Üç katmanlı dizaynlarda 121.8 keV'de RPE değerleri %44-%54 aralığında yoğunlaşır. Özellikle L_{310/20/30} örneği %54 ile en yüksek başlangıç verimliliğini sergiler; bu, birinci katmanda düşük, ikinci ve üçüncü katmanlarda daha yüksek B₄C oranlarının dengeli kombinasyonundan kaynaklanır. 344.3 keV'de RPE %26-%32 aralığına inerken, orta enerjilerde (778.9-964.1 keV) %23-%28 bandında yataylaşır. Üç katmanlı numuneler, iki katmanlılara kıyasla orta enerjilerde muhtemelen artan katman geçiş etkinliği sayesinde yaklaşık %2-%4 daha iyi koruma sağlar. 1085.9 keV'den sonra RPE %17-%21 arasında stabil kalır ve 1408 keV'de %16-%18 aralığına geriler; bu da üç katmanın çok katmanlı optimizasyonunun tüm spektrumda etkili olduğunu gösterir. Dört katmanlı konfigürasyonlar 121.8 keV'de %29-%45 aralığındaki RPE değerleriyle orta düzeyden yüksek korumaya kadar geniş bir yelpaze sunar; en yüksek değer

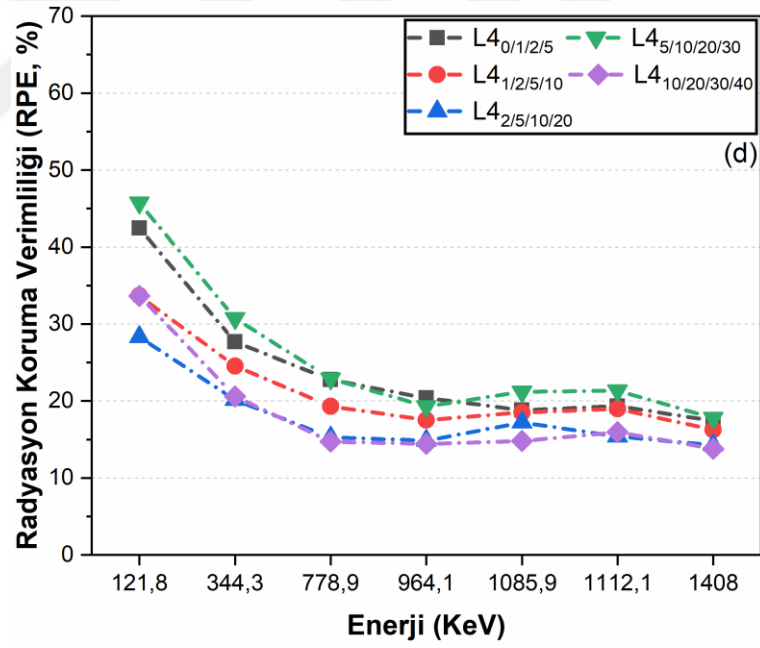
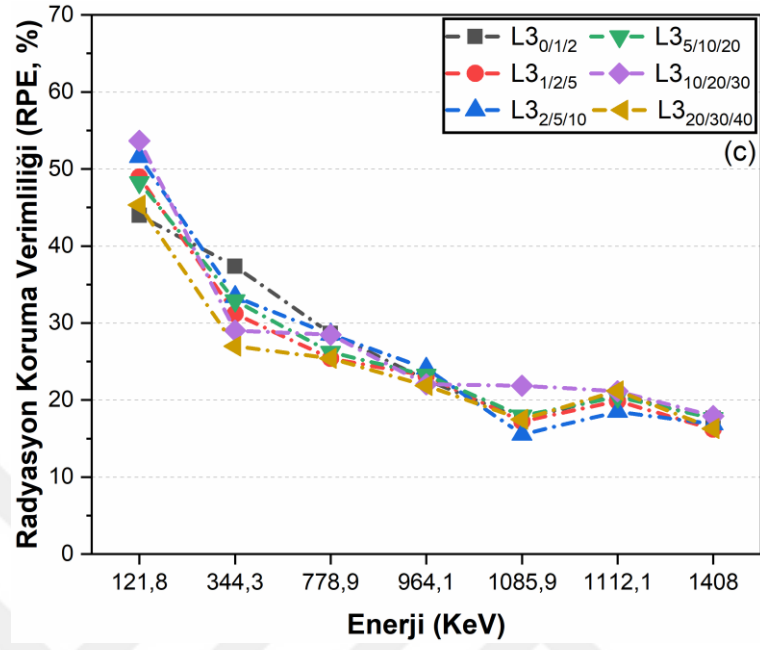
%45 ile $L_{45/10/20/30}$ örneğinde görülür. 344.3 keV’de RPE %20-%30 bandına çekilerek tek ve iki katmanlı ortalamalardan daha konsantre bir dağılım sağlar. Orta enerjilerde (778.9-964.1 keV) %14-%18 aralığında sabit kalarak yüksek katman sayısının Compton etkileşim etkinliğini dengeleme rolünü vurgular. 1085.9-1408 keV’de RPE değerleri %14-%20 arasında hafif dalgalanmalar gösterir; dört katmanlı sistemler, yüksek enerjili fotonlara karşı tek ve iki katmanlı tasarımlara kıyasla %2-%4 ekstra koruma sağlar.

Sonuç olarak, B_4C içeriğindeki artış gama radyasyon emilim kapasitesini artırmaktadır. Ek olarak, fonksiyonel yapıların sağladığı katmanlı yapı etkisi radyasyonun çok katmanlı malzemeler içinde daha etkili bir şekilde zayıflatılmasını sağlamaktadır. Özellikle çok katmanlı numunelerde fonksiyonel yapıların kullanımı kalkanlama performansını daha da artırmaktadır. Bu bulgular havacılık, nükleer enerji ve tıbbi görüntüleme gibi alanlarda daha etkili radyasyon kalkanlama malzemelerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Hem B_4C takviyesini hem de fonksiyonel yapıları birlikte ele alarak, yeni nesil radyasyon kalkanlama çözümlerinin daha etkili hale getirilebileceği söylenebilir (Loknath ve Ravindra Kumar, 2022; Van Doan vd., 2025).



Şekil 3.36. Gama radyasyon kalkanlama testinden sonra numunelerin RPE grafikleri (a) L1 serisi, (b) L2 serisi, (c) L3 serisi ve (d) L4 serisi

Şekil 3.36'nın Devamı

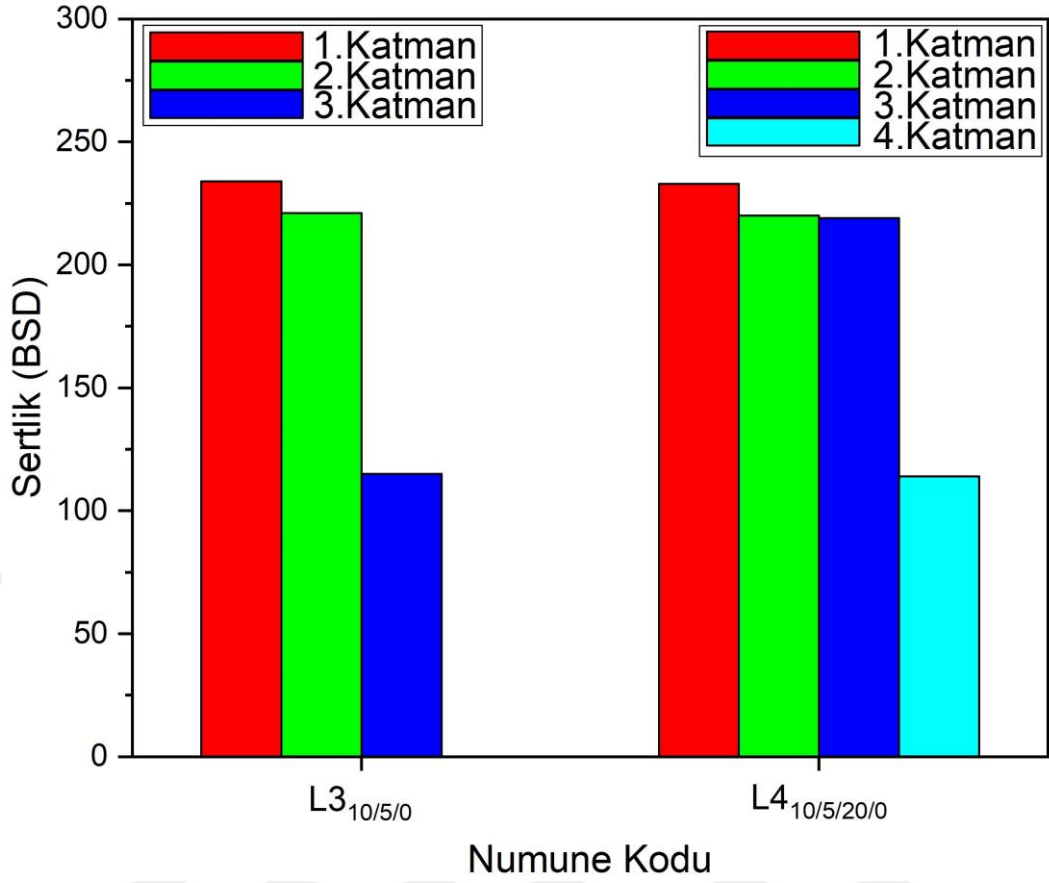


3.4. Optimizasyon Çalışmaları Sonrası Üretilen Fonksiyonel Dereceli Kompozitler

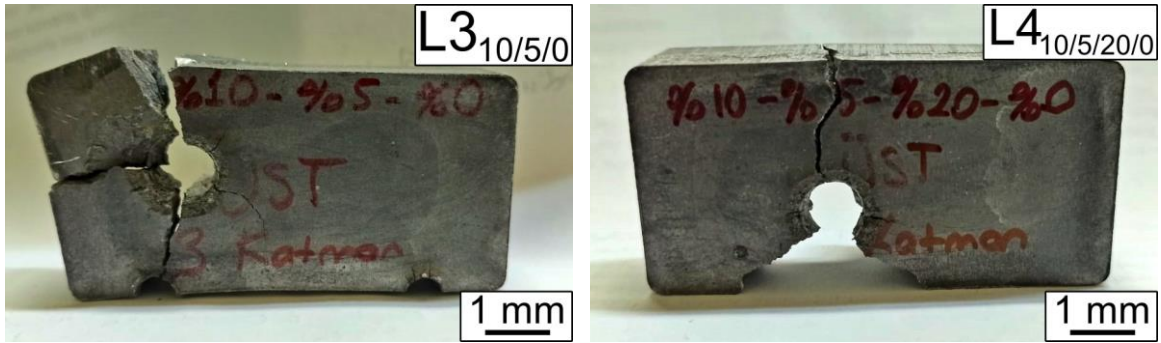
Şekil 3.37’te optimizasyon çalışmaları sonrası üretilen 3 ve 4 katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit numunelerin sertlik değerlerini gösteren grafik mevcutken, Şekil 3.38’de ise bu numunelere balistik atış deneyleri sonrası elde edilen deforme yüzeylerin görüntüleri verilmiştir. Üç katmanlı fonksiyonel dereceli kompozit numunenin balistik performansı incelendiğinde, tabakalar arası sertlik farklarının malzeme davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu numunede üst tabaka %10 B₄C içermekte olup en yüksek sertliğe (234 BSD) sahiptir; altındaki %5 B₄C’li ara tabakanın sertliği 221 BSD olarak ölçülmüştür ve en alttaki takviye içermeyen tabaka ise 115 BSD ile en düşük sertliktedir. Sertlik profilindeki bu kademeli azalma, darbe anında malzemenin her bir katmanda farklı davranış sergilemesine yol açmıştır. Balistik teste tabi tutulan numunede, 5.56×45 mm çapında ve 850 m/s hızındaki mermi çekirdeği ilk olarak en sert üst tabakaya çarpmış, bu yüksek sertlik sayesinde merminin ucu tahrip olarak ciddi şekilde deformasyona uğramıştır. Yüksek sertlikli üst yüzey, darbenin başlangıcında direnci hızla artırarak mermiyi yavaşlatmış; bu esnada hedef tabakanın temas bölgesinde oluşan yoğun basma gerilmelerine mukabil, yansımayla oluşan çekme gerilmeleri üst tabakada radyal ve dairesel çatlakların gelişimine neden olmuştur. %5 B₄C içeren orta tabaka, üst tabakadan kopan seramik parçacıklarıyla birlikte gelen mermi çekirdeğini karşılayarak bir geçiş bölgesi fonksiyonu görmüştür. Bu bölgede merminin hızı, tabakanın daha düşük sertliği ve artan etkileşim alanı nedeniyle keskin biçimde düşmüştür; zira merminin bu kademeli tabakalardan geçerken önemli miktarda enerji harcadığı anlaşılmaktadır. Orta tabakanın sertliği üst tabakaya göre düşük olduğundan (221 BSD), darbe enerjisinin bir kısmını plastik deformasyon ile soğurabilmiş ve üst tabakadan inen çatlakların ilerlemesini kısmen sınırlandırmıştır. Son aşamada mermi çekirdeği en alttaki takviyesiz tok tabakaya ulaşmış; bu tabaka yüksek tokluğu sayesinde belirgin plastik deformasyona uğrayarak kalan enerjiyi emmiştir. Alt tabakada gözlenen kubbeleşme (şişme) ve olası petalleşme biçimli deformasyonlar, malzemenin sünek davranış karakteristiğini yansıtmakta ve darbenin enerjisinin büyük ölçüde emildiğini göstermektedir. Üç katmanlı yapıda çatlak oluşumunun büyük ölçüde üst, seramik takviyeli tabakayla sınırlı kaldığı, ara tabakada ise çatlak ilerlemesi yerine plastik şekil değişimiyle enerji yutma mekanizmasının baskın olduğu görülmüştür. Bu sayede fonksiyonel dereceli tasarımın, çatlak ilerlemesini kontrollü şekilde sınırlandırarak ani ve katastrofik kırılmaları engellediği söylenebilir.

Dört katmanlı numunede ise katman dizilimi üstten alta doğru %10, %5, %20 ve %0 B₄C olacak şekilde optimize edilmiştir. Bu yapıdaki ilk üç tabaka yüksek sertlik değerlerini korumaktadır (ölçülen sertlikler sırasıyla 233, 220 ve 219 BSD) ve en alttaki tabaka 114 BSD ile yine en yumuşak kısmı teşkil etmektedir. Sertlik profilinin bu numunede üstten üçüncü tabakaya dek yüksek seviyede seyretmesi, merminin kademeli ancak sürekliliği sağlanmış sert bir bariyerle karşılaşmasını amaçlamaktadır. Balistik darbe anında mermi çekirdeği önce %10 B₄C'li üst tabakaya çarparak benzer şekilde ucunda aşınma ve biçim değişikliği (mushrooming) meydana getirmiştir. Ardından %5 B₄C içeren ikinci tabaka, bir önceki numunedeki orta katmanla benzer biçimde nispeten daha yumuşak bir geçiş katmanı olarak görev yapmıştır. Bu tabaka, üst katmandaki kısmi kırılma sonucu oluşan seramik parçalarıyla birlikte mermiyi ilave olarak yavaşlatmış ve enerjinin bir kısmını plastik deformasyon yoluyla sönmüştür. Dört katmanlı tasarımın en dikkat çekici farkı, üçüncü katmanda bulunan %20 B₄C takviyeli yüksek sertlikli ara tabakadır. Mermi çekirdeği hızı büyük ölçüde azalmış halde bu sert tabakaya ulaştığında, tabaka içinde yoğun çatlaklar ve seramik parçacık kırılmaları oluşarak ilave enerji yutulması sağlanmıştır. Bu katman adeta ikinci bir bariyer gibi davranarak gerilmelerin bir kısmını kendi bünyesinde karşılamış ve merminin arka tabakaya geçişini daha da zorlaştırmıştır. Sonuç olarak, mermi en alttaki %0 B₄C içerikli tok tabakaya ulaştığında hızı iyice düşmüştü; alt tabaka sünek deformasyon mekanizması ile kalan enerjiyi absorbe ederek yapıda bütünlük sağlamıştır. Balistik test sonrası incelemeler, dört katmanlı numunede çatlakların ağırlıklı olarak üst (%10 B₄C) ve üçüncü (%20 B₄C) tabakalarda yoğunlaştığını, aradaki %5 B₄C'li tabakanın ise bu çatlakların ilerlemesini kısmen engellediğini göstermiştir. Bu tasarım, çok katmanlı dereceli yapının hasarı farklı tabakalara dağıtarak her bir katmanın özgün rolünü (sert tabakalarda mermiyi durdurma, tok tabakalarda enerji emme) verimli bir şekilde yerine getirmesine olanak tanımıştır. Böylelikle dört katmanlı numune, balistik darbe altında hem yüksek sertlikli katmanların kırılma pahasına enerji yutması hem de alt tabakanın büyük plastik deformasyon kapasitesiyle darbe enerjisini sönmemesi sayesinde bütünlük bir koruma performansı sergilemiştir. Her iki fonksiyonel dereceli kompozitin karşılaştırmalı analizi, ek bir yüksek sertlikli katmana sahip olmanın balistik performansa olumlu katkı yaptığını göstermektedir. Dört katmanlı numunede, toplam seramik takviyesi miktarının daha yüksek oluşu ve sert tabaka sayısının fazlalığı, merminin katmanlar içinde daha uzun bir etkileşim süresine sahip olmasına ve dolayısıyla daha fazla enerji kaybetmesine yol açmıştır. Nitekim literatürde de B₄C partikül içeriğinin artırılmasının ve uygun katman kalınlığı tasarımının

FDM'nin balistik dirençlerini yükselttiği belirtilmektedir. Üç katmanlı numunede sertlik farkları daha belirgin olduğu için mermi, ilk iki sert tabakayı geçtikten sonra bir anda yumuşak alt tabakaya ulaşmıştır. Buna karşılık dört katmanlı yapıda, son sert ara tabakanın varlığı alt tabakaya gelen yükü azaltmış ve yumuşak backing bölgesine daha kademeli bir geçiş sağlamıştır. Bu durum, dört katmanlı numunede arka yüzeyde oluşan plastik deformasyon miktarının üç katmanlı numuneye kıyasla daha düşük kalmasına ve arka yüz şişkinliğinin (back-face bulging) daha sınırlı olmasına yardımcı olmuştur. Ayrıca ek ara katman sayesinde gerilme birikimi daha fazla tabakaya yayıldığından, dört katmanlı yapıda hasar dağılımı daha kontrollü gerçekleşmiştir. Yapısal bütünlük açısından bakıldığında, her iki numunede de tabakalar arasında delaminasyon veya ayrılma gözlenmemiş olup bu durum, optimize edilmiş arayüz aderansının ve kademeli yapı tasarımının bir sonucudur. Sonuç olarak dört katmanlı fonksiyonel dereceli kompozit, hem mekanik sertlik profili hem de balistik hasar kontrolü bakımından üç katmanlı kompozite göre daha dengeli ve gelişmiş bir performans sergilemiştir. Bu iyileşme, yüksek sertlikli katmanlar ile sünek katmanlar arasındaki optimize edilmiş kombinasyon sayesinde malzemenin hem penetrasyonu engelleme hem de enerji sönmleme kabiliyetinin artmasıyla mümkün olmuştur. Özellikle B₄C gibi yüksek sertlik (~38 GPa) ve düşük yoğunluklu bir seramiğin takviye olarak kullanılması, kompozitin ağırlığını fazla artırmadan sertlik ve balistik direnç sağlamasına yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla, gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları neticesinde elde edilen katmanlı yapıların, literatürde belirtilen kademeli kompozisyon yaklaşımının avantajlarını doğruladığı ve balistik korunuma yönelik etkin bir malzeme tasarımı ortaya koyduğu söylenebilir.



Şekil 3.37. Optimizasyon çalışmaları sonrası üretilen 3 ve 4 katmanlı fonksiyonel kompozit numunelerin sertlik değerleri



Şekil 3.38 Optimizasyon çalışmaları sonrası üretilen 3 ve 4 katmanlı fonksiyonel kompozit numunelerin balistik testleri sonrası numunelerde oluşan deformasyonlar

4. SONUÇLAR

1. Yüksek enerjili bilyalı öğütme ile elde edilen AA2024/B₄C tozlarının ortalama parçacık boyutu, %1-10 B₄C aralığında belirgin şekilde küçülürken, %20 ve üzeri takviye oranlarında parçacık aglomerasyonu nedeniyle artış göstermiştir

2. AA2024/B₄C kompozit tozların görünür yoğunluğu, %10 B₄C'de yaklaşık 1.81 g/cm³ ile en yüksek değere ulaşmış; daha yüksek takviye oranlarında aglomerasyon ve matris deformasyonunun kısıtlanması nedeniyle yoğunluk azalmıştır.

3. Termogravimetrik analizler, %10 B₄C içeren numunelerde oksit tabakası büyümesinin en hızlı gerçekleştiğini ve en yüksek kütle artışını (%2,2) gösterirken, %20-30 takviyeli örneklerin oksijen difüzyonunu engelleyerek termal stabiliteyi iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

4. XRD analizleri, kompozitlerde yalnızca Al, Al₂Cu intermetalik ve B₄C fazlarının korunduğunu doğrulamış; artan B₄C oranı intermetalik pik yoğunluklarını seyrelterek istenmeyen reaksiyon ürünlerinin oluşmadığını göstermiştir.

5. Toz metalurjisi ile üretilen fonksiyonel dereceli malzemelerde, tek ve iki katmanlı tasarımlarda %98'in üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilirken, katman sayısı ve takviye oranı arttıkça yoğunluk düşüşü gözlenmiştir.

6. SEM/EDS görüntülemeleri, %5-10 B₄C içeren üç katmanlı düzenlemelerde hem homojen dağılım hem de düşük porozite sunduğunu; %30 ve üzeri takviyeli dört katmanlı numunelerde ise parçacık kümelenmesi ve ara yüzey boşluklanmasını ortaya çıkarmıştır.

7. Sertlik testleri, tek katmanlı numunelerde %10 B₄C'de maksimum (222 BSD) sertlik değerine ulaşırken, çok katmanlı kompozitlerde orta katmanlarda (10-20 wt%) benzer yüksek sertlik değerleri (228 BSD) gözlenmiş; dört katmanlı yapılar ise artan ara yüzey gerilmeleri nedeniyle daha düşük sertlik sergilemiştir.

8. Çekme testleri, tek katmanda %10 B₄C ve üç katmanda 5-10-20 ağırlık % bulunan numunelerin en yüksek mukavemet (360 MPa) ve makul uzama değerlerini sağladığını; yüksek takviye oranları ve dörtlü katman sayısının erken gevrek kırılmayı tetiklediğini göstermiştir.

9. Serbest düşme darbe deneylerinde, iki ve üç katmanlı fonksiyonel dereceli kompozitlerin enerji soğurma kapasitesi, tek katmanlı referansa kıyasla ortalama %20 artış göstermiş; en yüksek darbe mukavemeti üç katmanda (5-10-20 ağ. % B₄C) kaydedilmiştir.

10. Balistik testlerden elde edilen hasar görüntülerine göre B₄C miktarı düşük ve çok yüksek olduğu zaman malzeme kopma alanları en fazla olmaktadır. Tek katmanlılarda en düşük hasar alanı ağ. %10 B₄C miktarlı numuneye aitken, fonksiyonel dereceli üç katmanlı numunelerde en düşük hasar alanı oluşan malzemelerdir.

11. Tüm numunelerin radyasyon absorplama özellikleri incelendiğinde yine katman sayısı ve B₄C miktarı arttıkça radyasyon absorplama özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür. En yüksek radyasyon absorplama özelliğine sahip numuneler 3 katmanlı numuneler olurken, B₄C oranı ağ. %30 kadar absorplama özelliğinde iyileşmeler görülmüştür.

10. Genel olarak, AA2024/B₄C zırh benzeri kompozitler için en uygun tasarım, basit üretim için tek katmanda %10 B₄C veya mekanik ve darbe performansını maksimize etmek için üç katmanlı 5-10-20 ağ. % gradyasyon kombinasyonudur.

5. ÖNERİLER

1. Kompozitlerin deniz suyu, nemli hava ve farklı pH değerlerindeki ortamlarda korozyon ve yorulma davranışları incelenerek uzun vadeli yaşlanma performansları değerlendirilebilir.
2. Farklı sıcaklık aralıklarında tekrarlı ısıtma-soğutma döngüleri altında mekanik ve mikroyapısal değişimler takip edilerek yüksek sıcaklık uygulamalarına uygunlukları belirlenebilir.
3. Laboratuvar ölçeğinin ötesinde, farklı kalibre ve hızlarda çoklu atış denemeleri yapılarak zırh uygulamalarında gerçek dünya davranışları test edilebilir.
4. Sadece B_4C yerine, SiC , TiB_2 gibi başka seramik takviyelerle veya bunların kombinasyonlarıyla üretilen kompozitlerin karşılaştırmalı özellikleri araştırılabilir.
5. Numune ölçeğinin dışına çıkarak plakalar veya paneller halinde üretim süreçleri optimize edilebilir; üretim maliyetleri ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından ekonomik fizibilite çalışmaları yapılabilir.
6. Mikro yapı-özellik ilişkilerini atomistik ve sonlu eleman yöntemleri kullanarak modelleyerek deneysel bulguları öngören nümerik çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdullah, M. A. H., Rashid, R. S. M., Amran, M., Hejazii, F., Azreen, N. M., Fediuk, R., & Idris, M. I. (2022). Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties. *Polymers*, 14(14), 2830.
- Adib, M. H., & Abedinzadeh, R. (2023). Study of mechanical properties and wear behavior of hybrid Al/(Al₂O₃+SiC) nanocomposites fabricated by powder technology. *Materials Chemistry and Physics*, 305, 127922.
- Ahmad, S., Chang, B., Lian, C., Raza, S. A., & Wang, M. (2023). Design and development study of gradient composite shielding material for nuclear radiation. *Nuclear Engineering and Design*, 414, 112517.
- Ahmed, B., Shah, G. B., Malik, A. H., Aurangzeb, & Rizwan, M. (2020). Gamma-ray shielding characteristics of flexible silicone tungsten composites. *Applied Radiation and Isotopes*, 155, 108901.
- Akhtar, S., Saad, M., Misbah, M. R., & Sati, M. C. (2018). Recent Advancements in Powder Metallurgy: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18649-18655.
- Alizadeh, A., Maleki, M., & Abdollahi, A. (2017). Preparation of super-high strength nanostructured B₄C reinforced Al-2Cu aluminum alloy matrix composites by mechanical milling and hot press method: Microstructural, mechanical and tribological characterization. *Advanced Powder Technology*, 28(12), 3274-3287.
- Alkunte, S., Fidan, I., Naikwadi, V., Gudavasov, S., Ali, M. A., Mahmudov, M., & Cheepu, M. (2024). Advancements and Challenges in Additively Manufactured Functionally Graded Materials: A Comprehensive Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(1), 23.
- Alshataif, Y. A., Sivasankaran, S., Al-Mufadi, F. A., Alaboodi, A. S., & Ammar, H. R. (2020). Manufacturing Methods, Microstructural and Mechanical Properties Evolutions of High-Entropy Alloys: A Review. *Metals and Materials International*, 26(8), 1099-1133.
- Ambigai, R., & Prabhu, S. (2022). Analyzing the Mechanical Properties and Characterization of Aluminium (ADC-14) Based Functionally Graded Materials (FGM). *Silicon*, 14(6), 2839-2850.
- Ambigai, Rajasekaran, & Prabhu, S. (2021). Optimizing and characterization of Aluminium based functionally graded Silicon Nitride composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(18), 3611-3623.
- Anderson, K., Weritz, J., & Kaufman, J. G. (2019). 2xxx Aluminum Alloy Datasheets. In K. Anderson, J. Weritz, & J. G. Kaufman (Eds.), *Properties and Selection of Aluminum Alloys* (Vol. 2B, pp. 287–289). ASM International.
- Anderson, K., Weritz, J., & Kaufman, J. G. (2019b). 7xxx Aluminum Alloy Datasheets. In K. Anderson, J. Weritz, & J. G. Kaufman (Eds.), *Properties and Selection of Aluminum Alloys* (Vol. 2B, pp. 410–412). ASM International.
- Angelo, P., Subramanian, R., & Ravisankar, B. (2022). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. PHI Learning Pvt. Ltd. Retrieved from.
- Ansari, A. A., Alhoshan, M., Alsalhi, M. S., & Aldwayyan, A. S. (2010). Prospects of Nanotechnology in Clinical Immunodiagnosics. *Sensors*, 10(7), 6535–6581.

- Apte, K., & Bhide, S. (2024). Basics of radiation. In *Advanced Radiation Shielding Materials* (pp. 1–23). Elsevier.
- Arrizubieta, J. I., Ukar, O., Ostolaza, M., & Mugica, A. (2020). Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling. *Metals* 2020, Vol. 10, Page 261, 10(2), 261.
- Arslan, K., Gunes, R., Apalak, M. K., & Reddy, J. N. (2017). Experimental tests and numerical modeling of ballistic impact on honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded plates. *Journal of Composite Materials*, 51(29), 4009–4028.
- Aydin, M., Apalak, M. K., & Gül Apalak, Z. (2020). Experimental study on structure optimization of functionally graded sandwich plates under ballistic impact. *Journal of Composite Materials*, 54(26), 3967–3980.
- Azevedo, J. M. C., CabreraSerrenho, A., & Allwood, J. M. (2018). Energy and material efficiency of steel powder metallurgy. *Powder Technology*, 328, 329–336.
- Baier, V. N., Katkov, V. M., & Strakhovenko, V. M. (1984). Mechanism of electron-positron pair production by high-energy photons in a single crystal. *Physics Letters A*, 104(4), 231–234.
- Balaraman, P., Stephen Joseph Raj, V., & Sreehari, V. M. (2022). Static and Dynamic Analysis of Re-Entry Vehicle Nose Structures Made of Different Functionally Graded Materials. *Aerospace*, 9(12), 812.
- Barhoumi, H., Bhouri, N., Feki, I., Baffoun, A., Hamdaoui, M., & Ben Abdesslem, S. (2023). Review of ballistic protection materials: Properties and performances. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 42(13–14), 685–699.
- Barone, E., Gaujena, B., & Vilnitis, M. (2023). *Literature Review of Applicable Ballistic Materials for Temporary Wooden Building Envelopes*. In *Advances in Science and Technology*, 134, 29–40. Trans Tech Publications Ltd.
- Batienkov, R. V., Bol'shakova, A. N., & Khudnev, A. A. (2022). Microwave Sintering of Metal Powder Materials (Review). *Metallurgist*, 65(9–10), 1163–1173.
- Beder, M. (2025). The effect of high B4C ratio on the improvement of mechanical properties and wear resistance of Al2024/B4C composites fabricated by mechanical milling-assisted hot pressing. *Ceramics International*, 51(7), 9528–9547.
- Benjamin, J. S., & Volin, T. E. (1974). The mechanism of mechanical alloying. *Metall Trans*, 5(8), 1929–1934.
- Campbell F. C. (2012). Aluminum Alloys. In Campbell F. C. (Ed.), *Lightweight Materials* (pp. 33–139). ASM International.
- Campbell, F. C. (2012). Metal-Matrix Composites. In F. C. Campbell (Ed.), *Lightweight Materials* (pp. 457–509). ASM International.
- Can Li, Xu, X., & Yan, X. (2024). Effect of B4Cp Volume Fraction on Microstructure and Properties of B4Cp/SiCp Hybrid Reinforced 2000 Series Aluminum Matrix Composites. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 60(4), 696–707.
- Canakci, A., Arslan, F., & Varol, T. (2013). Effect of volume fraction and size of B4C particles on production and microstructure properties of B4C reinforced aluminium alloy composites. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 29(8), 954–960.
- Çelebi, M., Çanakçı, A., Güler, O., Akgül, B., & Karabacak, A. H. (2023). Study on Effect of Milling Time on the Mechanical and Wear Properties of the ZA40-B4C-Graphene Hybrid Nanocomposites Fabricated by Vacuum Hot-Pressing. *JOM*, 75(9), 3935–3950.

- Çelebi, M., Çanakçı, A., & Özkaya, S. (2025). Effect of mechanical milling time on powder characteristic, microstructure, and mechanical properties of AA2024/B4C/GNPs hybrid nanocomposites. *Powder Technology*, 449, 120439.
- Chandrasekaran, V. (2020, March 17). Advanced Planning and Designing of Multi-Purpose System of Army Trench Base of Concrete Bunker. *Authorea*. Authorea.
- Chang, Q., Guo, S., & Zhang, X. (2023). Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications. *Materials & Design*, 233, 112253.
- Chao, Z. L., Jiang, L. T., Chen, G. Q., Qiao, J., Z, Q., Yu, Z. H., ... Wu, G. H. (2019). The microstructure and ballistic performance of B4C/AA2024 functionally graded composites with wide range B4C volume fraction. *Composites Part B: Engineering*, 161, 627–638.
- Chao, Z. L., Wang, Z. W., Jiang, L. T., Chen, S. P., Pang, B. J., Zhang, R. W., ... Wu, G. H. (2022a). Microstructure and mechanical properties of B4C/2024Al functionally gradient composites. *Materials & Design*, 215, 110449.
- Chao, Z. L., Wang, Z. W., Jiang, L. T., Chen, S. P., Pang, B. J., Zhang, R. W., ... Wu, G. H. (2022b). Microstructure and mechanical properties of B4C/2024Al functionally gradient composites. *Materials & Design*, 215, 110449.
- Chávez-Vásquez, R., Lascano, S., Saucedo, S., Reyes-Valenzuela, M., Salvo, C., Mangalaraja, R. V., ... Torres, Y. (2021). Effect of the Processing Parameters on the Porosity and Mechanical Behavior of Titanium Samples with Bimodal Microstructure Produced via Hot Pressing. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 136, 15(1), 136.
- Chawla, N., & Chawla, K. K. (2013). Applications. In *Metal Matrix Composites* (pp. 325–355). New York, NY: Springer New York.
- Chen, J., Zeng, Y., Liang, X., Hou, Y., Wang, Y., Sun, Z., & Cui, S. (2022). Lightweight Design and Experimental Study of Ceramic Composite Armor. *Processes*, 10(6), 1056.
- Chouhan, M., Kumar, P., Thakur, L., & Verma, S. K. (2024). A Comparative Study on the Ballistic Performance of Multilayered SiC/AA7075 Functionally Graded Armor Materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(13), 6306–6327.
- Cinan, Z. M., Baskan, T., Erol, B., Mutlu, S., Misirlioglu, Y., Yilmaz, S. S., & Yilmaz, A. H. (2021). Gamma irradiation, thermal conductivity, and phase change tests of the cement-hyperbranched poly amino-ester-block-poly cabrolactone-polyurathane plaster-lead oxide and arsenic oxide composite for development of radiation shielding material. *International Journal of Energy Research*, 45(15), 20729–20762.
- Cinan, Z. M., Erol, B., Baskan, T., Mutlu, S., Ortaç, B., Savaskan Yilmaz, S., & Yilmaz, A. H. (2022). Radiation Shielding Tests of Crosslinked Polystyrene-b-Polyethyleneglycol Block Copolymers Blended with Nanostructured Selenium Dioxide and Boron Nitride Particles. *Nanomaterials*, 12(3), 297.
- Clinktan, R., Ramkumar, K. R., & Sivasankaran, S. (2020). Effect of boron carbide addition on strengthening mechanisms, cold workability and instantaneous strain hardening behaviour of Cu4Si14Zn nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 787, 139538.
- Colombo, P., Zordan, F., & Medvedovski, E. (2006). Ceramic-polymer composites for ballistic protection. *Advances in Applied Ceramics*, 105(2), 78–83.

- Crouch, Ian G. (2019). Body armour – New materials, new systems. *Defence Technology*, 15(3), 241–253. doi:10.1016/j.dt.2019.02.002
- Crouch, I.G. (2016). *The science of armour materials*. (I. G. (Ed.) Crouch, Ed.). Woodhead Publishing. Retrieved from
- Cui, C., Hu, B., Zhao, L., & Liu, S. (2011). Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials & Design*, 32(3), 1684–1691.
- Doğan, H., & Mutlu, Y. (2022). Production of AA2024-Matrix B4C-SiC- and B4C-Y2O3-Particle-Reinforced Composites by Powder Metallurgy and Investigation of Their Mechanical Properties. *Celal Bayar University Journal of Science*, 18(3), 321–330.
- El-Galy, I. M., Saleh, B. I., & Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1378.
- Emmy Prema, C., Suresh, S., Ramanan, G., & Sivaraj, M. (2020). Characterization, corrosion and failure strength analysis of Al7075 influenced with B4C and Nano-Al2O3 composite using online acoustic emission. *Materials Research Express*, 7(1), 016524.
- Finfrock, C. B., Exil, A., Carroll, J. D., & Deibler, L. (2018). Effect of Hot Isostatic Pressing and Powder Feedstock on Porosity, Microstructure, and Mechanical Properties of Selective Laser Melted AlSi10Mg. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 7(4), 443–456.
- German, R. M. (2010). Thermodynamics of sintering. *Sintering of Advanced Materials*, 3–32.
- Gilys, L., Griškonis, E., Griškevičius, P., & Adlienė, D. (2022). Lead Free Multilayered Polymer Composites for Radiation Shielding. *Polymers 2022, Vol. 14, Page 1696*, 14(9), 1696.
- Glascok, M. D. (2011). Comparison and Contrast Between XRF and NAA: Used for Characterization Of Obsidian Sources in Central Mexico. In *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology* (pp. 161–192). New York, NY: Springer New York.
- Gunes, R., Aydin, M., Kemal Apalak, M., & Reddy, J. N. (2014). Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates. *Composites Part B: Engineering*, 59, 21–32.
- Guo, Y., Wang, J., Xu, X., Duan, T., Yan, S., Wang, D., ... Li, N. (2023). Ballistic Performance of Protection Structures Using Fiber Composites as Matrix Armor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2460(1), 012126.
- Gusev, V. G., Sobol'kov, A. V., Aborkin, A. V., & Alymov, M. I. (2019). Simulation of the Energy–Force Parameters of Planetary Ball Mill Processing and Estimation of Their Influence on the Particle Size in an AMg2 Alloy/Graphite Composite Powder. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019(1), 24–30.
- Haro, E. E., Szpunar, J. A., & Odeshi, A. G. (2016). Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87, 54–65.
- Hazell, P. J. (2022). *Armour*. Boca Raton: CRC Press.
- HG, P. K., & M, A. X. (2018). Processing of Graphene/CNT-Metal Powder. In *Powder Technology*. InTech.
- Huo, Z., Lu, Y., Zhang, H., & Zhong, G. (2024). Sm2O3 micron plates/B4C/HDPE composites containing high specific surface area fillers for neutron and gamma-ray complex radiation shielding. *Composites Science and Technology*, 251, 110567.

- Ishiguro, T., Makino, A., Araki, N., & Noda, N. (1993). Transient temperature response in functionally gradient materials. *International Journal of Thermophysics*, 14(1), 101–121.
- Ismail, M. A. (2017). Nuclear gauge application in road industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271(1), 012087.
- Jena, P. K., Mishra, B., Siva Kumar, K., & Bhat, T. B. (2010). An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour materials against 7.62mm deformable projectile. *Materials & Design*, 31(7), 3308–3316.
- Jena, P. K., Senthil P., P., & K., S. K. (2016). Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(1), 47–53.
- Jiang, A., Li, Y., Li, D., & Hou, H. (2022). Study on Anti-Penetration Performance of Semi-Cylindrical Ceramic Composite Armor against 12.7 mm API Projectile. *Crystals*, 12(10), 1343.
- Joy, J., Krishnamoorthy, A., Tanna, A., Kamathe, V., Nagar, R., & Srinivasan, S. (2022). Recent Developments on the Synthesis of Nanocomposite Materials via Ball Milling Approach for Energy Storage Applications. *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 9312*, 12(18), 9312.
- Juraku, K., Carson, C., Nagasaki, S., Jensen, M., Ahn, J., & Tanaka, S. (2015). Integrating social-scientific literacy in nuclear engineering education: Approaches developed in the GoNERI program. *Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident: Toward Social-Scientific Literacy and Engineering Resilience*, 1–17.
- Karabacak, A. H., Çanakçı, A., Erdemir, F., Özkaya, S., & Çelebi, M. (2022). Corrosion and Mechanical Properties of Novel AA2024 Matrix Hybrid Nanocomposites Reinforced with B4C and SiC Particles. *Silicon*, 14(14), 8567–8579.
- Karabulut, Ş., Karakoç, H., Bilgin, M., Canpolat, H., Krolczyk, G. M., & Sarıkaya, M. (2023). A comparative study on mechanical and ballistic performance of functionally graded Al6061 composites reinforced with B4C, SiC, and Al2O3. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5050–5065.
- Karpus, P. J., & Reilly, T. D. (2024). Gamma-Ray Interactions with Matter. *Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security, Second Edition*, 27–41.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., & Donner, K. J. (1994). Radiation Mechanisms. In *Fundamental Astronomy* (pp. 107–124). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Khakbiz, M., & Akhlaghi, F. (2009). Synthesis and structural characterization of Al–B4C nano-composite powders by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 479(1–2), 334–341.
- Khalaf, W. A., & Hamzah, M. N. (2024). Experimental and numerical studies of ballistic resistance of hybrid sandwich composite body armor. *Open Engineering*, 14(1).
- Kırmızı, G., Arık, H., & Çinici, H. (2019). Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 345–357.
- Koizumi, M. (1997). FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, 28(1–2), 1–4.
- Korim, N. S., & Hu, L. (2020). Study the densification behavior and cold compaction mechanisms of solid particles-based powder and spongy particles-based powder using a multi-particle finite element method. *Materials Research Express*, 7(5), 056509.

- Kovziridze, Z. D., Mestvirishvili, Z., Tabatadze, G., Nizharadze, N. S., Mshvildadze, M., & Nikoleishvili, E. (2013). Improvement of Boron Carbide Mechanical Properties in B₄C-TiB₂ and B₄C-ZrB₂ Systems. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 03(02), 43–48.
- Kumar, A., Singh, V. P., Singh, R. C., Chaudhary, R., Kumar, D., & Mourad, A.-H. I. (2024). A review of aluminum metal matrix composites: fabrication route, reinforcements, microstructural, mechanical, and corrosion properties. *Journal of Materials Science*, 59(7), 2644–2711.
- Kumar, N., Bharti, A., & Saxena, K. K. (2020). A re-analysis of effect of various process parameters on the mechanical properties of Mg based MMCs fabricated by powder metallurgy technique. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1953–1959.
- Kumar, N., Bharti, A., & Saxena, K. K. (2021). A re-investigation: Effect of powder metallurgy parameters on the physical and mechanical properties of aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2188–2193.
- Kumar, R., & Chandrappa, D. C. N. (2014). Synthesis and Characterization of Al-SiC Functionally Graded Material Composites Using Powder Metallurgy Techniques. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(8), 15464–15471.
- Laible, R. C., & Barron, E. (1980). History of Armor (Vol. 5, pp. 9–40). Elsevier.
- Lakshmikanthan, A., Angadi, S., Malik, V., Saxena, K. K., Prakash, C., Dixit, S., & Mohammed, K. A. (2022). Mechanical and Tribological Properties of Aluminum-Based Metal-Matrix Composites. *Materials*, 15(17), 6111.
- Lässig, T., Nguyen, L., May, M., Riedel, W., Heisserer, U., van der Werff, H., & Hiermaier, S. (2015). A non-linear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 110–122.
- Lee, M., Park, S., Jo, I., & Lee, S. (2017). Analysis of metal matrix composite (MMC) applied armor system. *Procedia Engineering*, 204, 100–107.
- Leu, M. C., Deuser, B. K., Tang, L., Landers, R. G., Hilmas, G. E., & Watts, J. L. (2012). Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded materials. *CIRP Annals*, 61(1), 223–226.
- Li, Y., Liu, S., Qu, X., & Huang, B. (2003). Thermal debinding processing of 316L stainless steel powder injection molding compacts. *Journal of Materials Processing Technology*, 137(1–3), 65–69.
- Lin, F., Ren, M., Wu, H., Lu, Y., Yang, M., Chen, Z., & Jiang, Z. (2023). Characterisation of microstructure, microhardness and tribological properties of Al matrix hybrid nanocomposites reinforced with B₄C and in-situ GNSs. *Wear*, 522, 204691.
- Liu, G. F., & Chen, T. J. (2022). Effect of Ball-Milling Process on Microstructures and Mechanical Properties of Heterostructured 2024Al Alloy Prepared by Powder Thixoforming. *Metals and Materials International*, 28(12), 2919–2933.
- Liu, Y., Li, X., Yin, Y., Li, Z., Yao, H., Li, Z., & Li, H. (2024). Design and Computational Validation of γ -Ray Shielding Effectiveness in Heavy Metal/Rare Earth Oxide–Natural Rubber Composites. *Polymers*, 16(15), 2130.
- Loknath, D., & Ravindra Kumar, V. M. (2022). A review on processing and characterization of bulk functionally graded polymer materials. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1192–1200.
- Lubkowitz, V., Drechsel, K., Schulze, V., & Zanger, F. (2024). Optimization of the layer quality by TiC nanoparticles in the ultrasonic excited recoating process with non-

- spreadable AlSi10Mg matrix B4C particle-powder composites for powder bed based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 126, 348–357.
- Luo, G., Wu, J., Xiong, S., Shen, Q., Wu, C., Zhang, J., & Zhang, L. (2017). Microstructure and mechanical behavior of AA2024/B4C composites with a network reinforcement architecture. *Journal of Alloys and Compounds*, 701, 554–561.
- Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2017). Functionally Graded Materials. On *Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*. Cham: Springer International Publishing.
- Makarenko, O. S., & Hetman, O. I. (2024). Production Techniques and Physical and Technological Properties of Nickel Powders (Review). *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 62(11–12), 633–666.
- Marx, J., Portanova, M., & Rabiei, A. (2020). Performance of Composite Metal Foam Armors against Various Threat Sizes. *Journal of Composites Science*, 4(4), 176.
- McElroy, M. W., Gutkin, R., & Pankow, M. (2017). Interaction of delaminations and matrix cracks in a CFRP plate, Part II: Simulation using an enriched shell finite element model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 103, 252–262.
- Meher, B. S., Saha, R., & Chaira, D. (2021). Fabrication of MWCNTs reinforced iron metal matrix composite by powder metallurgy: Effects of wet and dry milling. *Journal of Alloys and Compounds*, 872, 159688.
- Mohammadi, M., Rajabi, M., & Ghadiri, M. (2021). Functionally graded materials (FGMs): A review of classifications, fabrication methods and their applications. *Processing and Application of Ceramics*, 15(4), 319–343.
- Mohd Tajuddin, M. T., & Jamaludin, S. B. (2016). The Effect of Sintering Temperature to the Microstructure of PM F75 (Co-Cr-Mo) Alloy. *Materials Science Forum*, 857, 242–245.
- Morales, J. R., Landingham, R., Pascall, A. J., Worsley, M. A., & Kuntz, J. D. (2016). Mechanical Properties of Functionally Graded Boron Carbide/Aluminum Cermets Utilizing Electrophoretic Deposition (EPD). *ECS Meeting Abstracts*, MA2016-01(19), 1095.
- Mortensen, A., & Suresh, S. (1995). Functionally graded metals and metal-ceramic composites: Part 1 Processing. *International Materials Reviews*, 40(6), 239–265.
- Murali, P., Chattopadhyay, K., & Jindal, V. (2024). Effect of hot-pressing sintering temperature and pressure on the densification and properties of Ti-TiB composites. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 8, 100132.
- Muraliraja, R., Arunachalam, R., Al-Fori, I., Al-Maharbi, M., & Piya, S. (2019). Development of alumina reinforced aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(3), 307–314.
- Murray, W. A. (2020). The Industrialization of War 1815–1871. In *The Cambridge History of Warfare* (pp. 221–250). Cambridge University Press.
- Muzammil Idris, A., Fakrul Ramli, A., Aini Burok, N., Husnina Mohd Nabil, N., Ab Muis, Z., & Wai Shin, H. (2019). The Integration of Electric Vehicle with Power Generation Sector: A Scenario Analysis Based on Supply and Demand in Malaysia. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1687–1692.
- Naik, N. K. (2016). Analysis of woven fabric composites for ballistic protection. *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*, 217–262.
- Naveen, J., Jawaid, M., Zainudin, E. S., Sultan, M. T. H., & Yahaya, R. B. (2018). Selection of natural fiber for hybrid kevlar/natural fiber reinforced polymer composites for

- personal body armor by using analytical hierarchy process. *Frontiers in Materials*, 5, 396204.
- Neikov, O. D., Naboychenko, S. S., Murashova, I. B., & Yefimov, N. A. (2019). Production of Refractory Metal Powders. *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications, Second Edition*, 685–755.
- Octavian, J., & Simona, L. (2024). Ballistic performance of monolithic rubber-ceramic composite armor. *Journal of Composite Materials*, 58(5), 689–706.
- Oladijo, O. P., Awe, S. A., Akinlabi, E. T., Phiri, R. R., Collieus, L. L., & Phuti, R. E. (2021). High-Temperature Properties of Metal Matrix Composites. In *Encyclopedia of Materials: Composites* (Vol. 1, pp. 360–374). Elsevier.
- Onaizi, A. M., Amran, M., Tang, W., Betoush, N., Alhassan, M., Rashid, R. S. M., ... Onaizi, S. A. (2024). Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties. *Journal of Building Engineering*, 97, 110800.
- Ong, C. W., Boey, C. W., Hixson, R. S., & Sinibaldi, J. O. (2011). Advanced layered personnel armor. *International Journal of Impact Engineering*, 38(5), 369–383.
- Özkan, Z., & Gökmen, U. (2023). Radiation transmittance of aluminum/silicon matrix functionally graded hybrid composites reinforced with B4C/TiO2. *Radiation Physics and Chemistry*, 213, 111250.
- Özkan, Z., Gökmen, U., & Bilge Ocak, S. (2025). Damage analysis caused by 60Co ions in functionally graded materials. *Defence Technology*, 44, 248–256.
- Öztop, H. F., Gürgeç, E., & Gür, M. (2024). Thermophysical properties and enhancement behavior of novel B4C-nanoadditive RT35HC nanocomposite phase change materials: Structural, morphological, thermal energy storage and thermal stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 272, 112909.
- Parihar, R. S., Setti, S. G., & Sahu, R. K. (2018). Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2), 309–336.
- Pereira, A. C., Assis, F. S. de, Filho, F. da C. G., Oliveira, M. S., Demosthenes, L. C. da C., Lopera, H. A. C., & Monteiro, S. N. (2019). Ballistic performance of multilayered armor with intermediate polyester composite reinforced with fique natural fabric and fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4221–4226.
- Perumal, A. B., Nambiar, R. B., Sellamuthu, P. S., & Sadiku, E. R. (2021). Carbon Fiber Composites. In *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications* (Vol. 1, pp. 85–115). Cham: Springer International Publishing.
- Ping, T., & Kuangdi, X. (2024). Powder Metallurgy Porous Materials. *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*, 1–3.
- Pooja, Km., Tarannum, N., & Chaudhary, P. (2025). Metal matrix composites: revolutionary materials for shaping the future. *Discover Materials*, 5(1), 35.
- Popoola, P. A. I., Farotade, G., Fatoba, O. S., & Popoola, O. (2016). Laser Engineering Net Shaping Method in the Area of Development of Functionally Graded Materials (FGMs) for Aero Engine Applications - A Review. In *Fiber Laser*. InTech.
- Prakash, T., Singha, M. K., & Ganapathi, M. (2009). Thermal snapping of functionally graded materials plates. *Materials & Design*, 30(10), 4532–4536.
- Radchenko, A. K. (2004). Mechanical properties of green compacts. II. Effect of powder relative bulk density on the strength of compacts with different forming temperature conditions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 43(11–12), 552–563.

- Radha, A., Suresh, S., Ramanan, G., Mohanavel, V., & Emmy Prema, C. (2020). Processing and characterization of mechanical and wear behavior of Al7075 reinforced with B4C and nano graphene hybrid composite. *Materials Research Express*, 6(12), 1265c5.
- Ramanathan, A., Krishnan, P. K., & Muraliraja, R. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 213–245.
- Rambabu, P., Eswara Prasad, N., Kutumbarao, V. V., & Wanhill, R. J. H. (2017). Aluminium Alloys for Aerospace Applications (pp. 29–52). Springer, Singapore.
- Rao, A. C. U., Ranjith Kumar, U., Bhanu Prakesh Reddy, S., Sanjay, S., & Bhargav, B. N. (2018). Powder Metallurgy Processing-A Review. *Sreyas International Journal of Scientists and Technocrats*, 2(3), 19–23.
- Reddy, P. R. S., Savio, S. G., & Madhu, V. (2019). Ceramic Composite Armour for Ballistic Protection. In *Handbook of Advanced Ceramics and Composites* (pp. 1–46). Cham: Springer International Publishing.
- Rodriguez-Castro, R., & Kelestemur, M. H. (2002). Processing and microstructural characterization of functionally gradient Al A359/SiCp composite. *Journal of Materials Science*, 37(9), 1813–1821.
- Rokkala, U., Dhanunjayarao, B. N., & Kadam, T. (2024). Properties and Novel Applications of Mechanical Alloyed Ferrous Materials. In *Advanced Structured Materials* (Vol. 220, pp. 215–233). Springer, Singapore.
- Rosario, J. D., Ranjithkumar, R., Vidhya, B., Swaminathan, R., Ayyasamy, S., & Nandhakumar, R. (2022). Influence of particle size reduction in ball milled rutile TiO₂ on the properties of PVDF-HFP/ TiO₂ nanocomposite films as dielectric layers for electro adhesive load bearing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(34), 25976–25990.
- Rotkovich, A. A., Tishkevich, D. I., Mahmoud, K. A., Hanfi, M. M., Bondaruk, A. A., German, S. A., ... Trukhanov, A. V. (2025). Gamma radiation shielding capacities of the tungsten-sealant composites: Experimental and theoretical study. *Applied Materials Today*, 44, 102685.
- Ruys, A. J. (2023). Structure and Properties of SiC Ceramics. In *Silicon Carbide Ceramics* (pp. 81–163). Elsevier.
- Sahu, A., Singh, L. K., & Maurya, R. S. (2023). Effect of Milling Parameters and Milling Energy on Amorphization: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(8), 2033–2042.
- Sai Charan, M., Naik, A. K., Kota, N., Laha, T., & Roy, S. (2022). Review on developments of bulk functionally graded composite materials. *International Materials Reviews*, 67(8), 797–863.
- Savio, S. G., Ramanjaneyulu, K., Madhu, V., & Bhat, T. B. (2011). An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 535–541.
- Schade, C. (2015). Chemical and Electrolytic Methods of Powder Production. In *Powder Metallurgy* (pp. 72–76). ASM International.
- Schade, C., & Dunkley, J. J. (2015). Atomization. In *Powder Metallurgy* (Vol. 7, pp. 58–71). ASM International.
- Seikh, Z., Sekh, M., Mandal, G., Sengupta, B., & Sinha, A. (2024). Metal Matrix Composites Processed Through Powder Metallurgy: A Brief Overview. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 106(1), 1–8.

- Selcuk, C., Bond, S., & Woollin, P. (2010). Joining processes for powder metallurgy parts: A review. *Powder Metallurgy*, 53(1), 7–11.
- Seol, Y. J., Kang, T. Y., & Cho, D. W. (2012). Solid freeform fabrication technology applied to tissue engineering with various biomaterials. *Soft Matter*, 8(6), 1730–1735.
- Shahzad, K., Kausar, A., Manzoor, S., Rakha, S. A., Uzair, A., Sajid, M., ... Ahmad, I. (2022). Views on Radiation Shielding Efficiency of Polymeric Composites/Nanocomposites and Multi-Layered Materials: Current State and Advancements. *Radiation*, 3(1), 1–20.
- Sharma, Abhishek, & Mishra, P. (2022). Effect of T6, RRA and nano chromium carbide content on microstructure and mechanical properties of AA7075-Cr₃C₂ nanocomposite. *Particulate Science and Technology*, 40(8), 1017–1032.
- Sharma, Ankit, Srinivasan K V, S., Dixit, M., Gupta, A. K., & Sujith, R. (2022). Ballistic performance of functionally graded boron carbide reinforced Al – Zn – Mg – Cu alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 4042–4059.
- Sharma, P., Chandel, P., Bhardwaj, V., Singh, M., & Mahajan, P. (2018). Ballistic impact response of high strength aluminium alloy 2014-T652 subjected to rigid and deformable projectiles. *Thin-Walled Structures*, 126, 205–219.
- Sheraf, J., & Solomon, D. G. (2023). Effect of SiC on the Properties of 4-Layered Functionally Graded Aluminium MMC. *Silicon*, 15(16), 6867–6877.
- Shetty, R., Hegde, A., Shetty SV, U. K., Nayak, R., Naik, N., & Nayak, M. (2022). Processing and Mechanical Characterisation of Titanium Metal Matrix Composites: A Literature Review. *Journal of Composites Science* 2022, Vol. 6, Page 388, 6(12), 388.
- Siengchin, S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. *Defence Technology*, 24, 1–17.
- Signetti, S., Ryu, S., & Pugno, N. M. (2022). Impact mechanics of multilayer composite armors: Analytical modeling, FEM numerical simulation, and ballistic experiments. *Composite Structures*, 297, 115916.
- Singh, R., Arora, R., & Sharma, J. D. (2022). Effect of Solutionizing Time on Microstructure, Mechanical Properties and Energy Absorption Capacity of Al2024-B4CP Composite Foam. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(7), 1813–1820.
- Skejić, D., Dokšanović, T., Čudina, I., & Mazzolani, F. M. (2021). The Basis for Reliability-Based Mechanical Properties of Structural Aluminium Alloys. *Applied Sciences*, 11(10), 4485.
- Sreedevi, V. V., & Lalwani, K. (2024). Effectiveness of Multi-Layered Radiation Shields Constructed from Polyethylene and Metal Hydrides Using HZETRN and OLTARIS for space applications. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2411.18083>
- Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., ... Bai, J. (2023). A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 138, 1–16.
- Surya, M. S., & Prasanthi, G. (2022). Effect of Silicon Carbide Weight Percentage and Number of Layers on Microstructural and Mechanical Properties of Al7075/SiC Functionally Graded Material. *Silicon*, 14(4), 1339–1348.
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1–2), 1–184.
- Suryanarayana, C., Al-Joubori, A. A., & Wang, Z. (2022). Nanostructured Materials and Nanocomposites by Mechanical Alloying: An Overview. *Metals and Materials International*, 28(1), 41–53.

- Swinhoe, M. T., & Ensslin, N. (2024). The Origin of Neutron Radiation. In *Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security* (pp. 289–306). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Tan, J., & Ramakrishna, S. (2021). Applications of Magnesium and Its Alloys: A Review. *Applied Sciences*, 11(15), 6861.
- Teferi, F. T., & Tsegaw, A. A. (2022). *Metal Injection Molding (MIM) Process and Potential Remedies for Its Defects: A Review*. In *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST* (Vol. 412 LNICST, pp. 309–325). Springer, Cham.
- Toros, S., Ozturk, F., & Kacar, I. (2008). Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 207(1–3), 1–12.
- Toyen, D., Wimolmala, E., Hemvichian, K., Lertsarawut, P., & Saenboonruang, K. (2024). Highly Efficient and Eco-Friendly Thermal-Neutron-Shielding Materials Based on Recycled High-Density Polyethylene and Gadolinium Oxide Composites. *Polymers*, 16(8), 1139.
- Tripathy, A., Kumar Sarangi, S., & Kumar Chaubey, A. (2018). A Review of Solid State Processes in Manufacture of Functionally Graded Materials. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.39), 1–5.
- Tripathy, A., Sarangi, S. K., Chaubey, A. K., & Mohanty, U. K. (2020). Fabrication of Al/Al₂O₃ Functionally Graded Material Using Powder Metallurgy Route. *Learning and Analytics in Intelligent Systems*, 5, 377–387.
- Tsirogiannis, E. Ch., Daskalakis, E., Vogiatzis, C., Psarommatis, F., & Bartolo, P. (2024). Advanced composite armor protection systems for military vehicles: Design methodology, ballistic testing, and comparison. *Composites Science and Technology*, 251, 110486.
- Tunç, S. A., Çanakçı, A., Karabacak, A. H., Çelebi, M., & Türkmen, M. (2024). Effect of different PCA types on morphology, physical, thermal and mechanical properties of AA2024-B4C composites. *Powder Technology*, 434, 119373.
- Turkoglu, T., & Celik, S. (2021). Process optimization for enhanced tribological properties of Al/MWCNT composites produced by powder metallurgy using artificial neural networks. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9(4), 045032.
- Tyagi, G., Singhal, A., Routroy, S., Bhunia, D., & Lahoti, M. (2020). A review on sustainable utilization of industrial wastes in radiation shielding concrete. *Materials Today: Proceedings*, 32, 746–751.
- Uddin, Z., Yasin, T., Shafiq, M., Raza, A., & Zahur, A. (2020). On the physical, chemical, and neutron shielding properties of polyethylene/boron carbide composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 166, 108450.
- Vaidya, M., Muralikrishna, G. M., & Murty, B. S. (2019). High-entropy alloys by mechanical alloying: A review. *Journal of Materials Research* 2019 34:5, 34(5), 664–686.
- Van Doan, D., Van Minh, P., Van Ke, T., Nhung, N. T. C., & Van Thom, D. (2025). An Overview of Functionally Graded Materials: From Civil Applications to Defense and Aerospace Industries. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 2024 13:1, 13(1), 1–20.
- Varol, T., & Canakci, A. (2013). Synthesis and characterization of nanocrystalline Al 2024-B 4C composite powders by mechanical alloying. *Philosophical Magazine Letters*, 93(6), 339–345.
- Varol, Temel, & Canakci, A. (2015). The effect of type and ratio of reinforcement on the synthesis and characterization Cu-based nanocomposites by flake powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 1066–1074.

- Vignesh, S., Winowlin Jappes, J. T., Nagaveena, S., Krishna Sharma, R., Adam Khan, M., & More, C. V. (2023). Preparation of novel in-situ layered B4C and PbO reinforced solution casted layered polymer composites (SCLPC) for augmenting the gamma irradiation shielding capability. *Vacuum*, 207, 111583.
- Wang, C., Jia, H., Wang, A., Wang, X., Guo, Y., & Zhang, J. (2019). Effect of TiO₂ on the crystallization and properties of MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics prepared by an 'one-step' method from laterite ore. *Ceramics International*, 45(4), 5133–5138.
- Wang, H., Zeng, Y., Dai, Y., Li, Y., Zhu, T., & Fu, Z. (2024). Enhanced mechanical properties of boron carbide ceramics prepared by spark plasma sintering with boron nitride nanosheets addition. *Journal of the European Ceramic Society*, 44(15), 116735.
- Wang, Y., Liu, Q., Zhang, B., Wang, H., Hazell, P. J., Han, Z., ... Ye, F. (2023). Ballistic performance of functionally graded B4C/Al composites without abrupt interfaces: experiments and simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1011–1029.
- Watanabe, Y., Miura-Fujiwara, E., & Sato, H. (2011). Fabrication of Functionally Graded Materials by Combination of Centrifugal Force and Sintering Method. *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy*, 58(1), 11–17.
- Xu, G., Yu, Y., Zhang, Y., Li, T., & Wang, T. (2019). Effect of B₄C particle size on the mechanical properties of B₄C reinforced aluminum matrix layered composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 53–61.
- Zahraee, S. M., & Sabet, A. R. (2014). Ballistic Performance of Hybrid Armor with Ceramic Inserts and Polymeric Matrix for Different Threat Levels (TECHNICAL NOTE). *International Journal of Engineering*, 27(6 (C)), 945–950.
- Zhang, C., Chen, F., Huang, Z., Jia, M., Chen, G., Ye, Y., ... Lavernia, E. J. (2019). Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 764, 138209.
- Zhang, R., Jiang, F., Xue, L., & Yu, J. (2022). Review of Additive Manufacturing Techniques for Large-Scale Metal Functionally Graded Materials. *Crystals*, 12(6), 858.
- Zhou, T., Wang, Y., Bao, J., Zhao, P., An, R., Zhang, C., & Zhang, H. (2024). Investigation of the Al alloy armor materials: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2891(16), 162019.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Hasan Karabacak, 2008 yılında Kağıthane Lisesi'nden mezun olduktan sonra, 2009'da Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne başladı. 2014'te lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisansa başladı. Mart 2017'de araştırma görevlisi kadrosuna atandı ve bu görevine devam ederken, Ocak 2018'de doktora programına başladı.

Akademik ve bilimsel çalışmalarının özeti:

- Uluslararası dergilerde 24, ulusal dergilerde 2 makale;
- Uluslararası konferans ve sempozyum kitaplarında yer alan 51 bildiri;
- Web of Science'a göre 11'luk H-indeksi;
- Uluslararası yayınevinde bir adet kitap editörlüğü
- 3 TÜBİTAK, 8 BAP projesinde araştırmacı/bursiyer olarak görev deneyimi;
- Ulusal bir patente sahip;
- 30'un üzerinde uluslararası dergi hakemliği tecrübesi.

İyi düzeyde İngilizce bilen Karabacak, halen Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak akademik çalışmalarını sürdürmektedir.