



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİYLE
MXENE VE BOR KARBÜR TAKVİYELİ
ALÜMİNYUM METAL MATRİS KOMPOZİT
MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Musa YILMAZ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Musa YILMAZ tarafından hazırlanan “**Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle MXene ve Bor Karbür Takviyeli Alüminyum Metal Matris Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu**” adlı tez çalışması 12/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

.....

Danışman

Prof. Dr. Mürsel EKREM

.....

Üye

Prof. Dr. Necati ATABERK

.....

Üye

Prof. Dr. Yunus TÜREN

.....

Üye

Doç. Dr. Emin SALUR

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Bu çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 24YDR19001 numaralı proje kapsamında sağlanan mali ve teknik destek ile gerçekleştirilmiştir.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

This study was carried out with the financial and technical support provided by the Scientific Research Coordination Unit of Necmettin Erbakan University within the scope of project number 24YDR19001.

Musa YILMAZ

15.10.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİYLE MXENE VE BOR KARBÜR TAKVİYELİ ALÜMİNYUM METAL MATRİS KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Musa YILMAZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mürsel EKREM

2025, 148 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mürsel EKREM
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Prof. Dr. Necati ATABERK
Prof. Dr. Yunus TÜREN
Doç. Dr. Emin SALUR

Bu çalışmada, doğadan ilham alınarak dış kısmı sert, iç kısmı ise daha yumuşak olan böylece yüksek tokluk sergileyen aynı zamanda dış kısmındaki sertlik sayesinde yüksek aşınma dayanımı gösteren hibrit kompozit malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, matris malzeme olarak A7075 alüminyum alaşımı seçilmiş ve takviye fazı olarak B₄C (bor karbür) seramiği ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında ve Ti₃C₂T_x MXene fazı ise ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında kullanılmıştır. Takviye ile matris malzeme, mekanik alaşımlama yöntemiyle üç farklı sürede (1, 2 ve 3 saat) karıştırılmıştır. Elde edilen toz karışımları, fonksiyonel geçişli malzeme (FGM) prensibine uygun olarak üç farklı katman yapısında (3, 5 ve 7 katman) istiflenmiş ve toz metalurjisi yöntemiyle hibrit kompozitler üretilmiştir. Toz metalurjisi sürecinde üç farklı sıkıştırma basıncı (300, 400 ve 500 MPa), üç farklı sinterleme süresi (1, 2 ve 3 saat) ve üç farklı sinterleme sıcaklığı (550 °C, 570 °C ve 590 °C) olmak üzere çeşitli üretim parametreleri kullanılmıştır. Literatürde ayrı ayrı araştırılan tüm bu üretim parametreleri ve değişkenler dikkate alınarak, Minitab yazılımı ve Taguchi yöntemi vasıtasıyla deneysel süreç planlanmıştır. Böylece tek bir çalışmada tüm bu parametrelerin birbiriyle etkileşiminin de değerlendirilebileceği kapsamlı sonuçlar hedeflenmiştir.

Üretilen kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri ASTM E9 standardına göre basma, ASTM G99 standardına göre aşınma, sertlik ve yoğunluk testleri ile değerlendirilmiştir. Mikroyapısal özellikler ise SEM, XRD ve parçacık boyutu analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler Taguchi yöntemiyle analiz edilerek üretim parametrelerinin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri ve önem düzeyleri belirlenmiştir.

Taguchi deney tasarımı ile kurgulanan ilk aşama test ve analizler sonucunda en yüksek basma dayanımı ve tokluğun 3 saat mekanik alaşımlama (MA), 3 katmanlı FGM yapı, 500 MPa sıkıştırma basıncı ve 590 °C'de 3 saat sinterleme ile elde edilebileceği belirlenmiştir. En yüksek sertlik ise 3 saat MA, 7 katman, 400 MPa sıkıştırma basıncı ve 550 °C'de 2 saat sinterleme ile 170 HB olarak ölçülmüştür. Ayrıca basma dayanımı ile sinterlenmiş yoğunluk değerlerinin benzer bir eğilim gösterdiği belirlenmiş ve en yüksek yoğunluk değeri 2,6957 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Kompozit tozların SEM, XRD ve parçacık boyut analizleri sonucunda, mekanik alaşımlamanın başlangıcında aglomerasyon eğiliminin olduğu ancak ilerleyen sürelerde parçacık boyutunun azaldığı ve B₄C fazının matris içerisinde daha homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, Taguchi analizleri ile belirlenen optimum parametreler kullanılarak yeni nesil bir takviye olarak Ti₃C₂T_x MXene fazının etkisi incelenmiştir. 3 katmanlı ağırlıkça %3

MXene içeren numunenin basma dayanımı MXene'siz muadiline kıyasla %38'lik bir artış ile 421 MPa'a ulaşmıştır. Birim şekil değişimi ise %15'ten %35'e çıkmış ve toklukta üç katlık bir artış elde edilmiştir. Yüksek MXene oranları (ağ. %3 ve %5), üretim prosesini zorlaştırarak numunelerin merkez bölgelerinde sertliğin 65 ± 5 HB seviyelerine gerilemesine neden olmuştur. Tribolojik testlerde ise MXene'nin etkisi, hibrit takviye durumuna göre ya da takviyenin miktarına bağlı olarak farklı sonuçlar vermiştir. A7075 matrisine ağ. %1 MXene ilavesi kütle kaybının 61,1 mg'dan 36,6 mg'a düşmesini sağlamıştır. Ancak B_4C +MXene içeren hibrit yapılarda ve ağ. %1 MXene ilavesinin üzerindeki oranlar ise adhezif ve abrazif aşınma mekanizmalarını tetiklenerek kütle kaybını artırmıştır.

Elde edilen sonuçlar, hedeflenen yüksek dayanım, tokluk ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin parametre optimizasyonu, FGM yapı ve MXene ilavesi ile elde edilebileceğini göstermiştir. Bu bulgular ışığında geliştirilen malzeme fren diskleri gibi uygulamalar için değerlendirilebilir. Bununla birlikte çalışma, farklı takviyeler, katkı oranları ve parametrelerle üretilen kompozitlerin kapsamlı analizlerle karakterizasyonu sayesinde gözlenen performans değişkenlikleri ile ileri malzeme geliştirme süreçlerine katkı sunmakta ve ilerleyen çalışmalarda katkıların dağılımı, arayüzey etkileşimleri ve sinterleme davranışı gibi parametrelerin daha detaylı incelenmesi açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum matris kompozit, mekanik alaşımlama, fonksiyonel dereceli malzeme, $Ti_3C_2T_x$ MXene, Taguchi analiz, toz metalurjisi.



ABSTRACT

Ph.D THESIS

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF MXENE AND BORON CARBIDE REINFORCED ALUMINUM MATRIX COMPOSITE MATERIAL USING THE MECHANICAL ALLOYING METHOD

Musa YILMAZ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mürsel EKREM

2025, 148 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mürsel EKREM
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Prof. Dr. Necati ATABERK
Prof. Dr. Yunus TÜREN
Assoc. Prof. Dr. Emin SALUR**

This study aims to develop hybrid composite materials that exhibit high toughness due to their hard outer layer and softer inner layer, while also demonstrating high wear resistance thanks to the hardness of their outer layer. In this regard, A7075 aluminum alloy was selected as the matrix material, and B₄C (boron carbide) ceramic was used as the reinforcement phase at 5%, 10%, and 15% by weight, while the Ti₃C₂T_x MXene phase was used at 1%, 3%, and 5% by weight. The reinforcement and matrix materials were mixed using mechanical alloying for three different durations (1, 2, and 3 hours). The resulting powder mixtures were stacked in three different layer structures (3, 5, and 7 layers) according to the functional gradient material (FGM) principle, and hybrid composites were produced using powder metallurgy. Various production parameters were used in the powder metallurgy process, including three different compaction pressures (300, 400, and 500 MPa), three different sintering times (1, 2, and 3 hours), and three different sintering temperatures (550 °C, 570 °C, and 590 °C). Considering all these production parameters and variables, which have been studied separately in the literature, the experimental process was planned using Minitab software and the Taguchi method. Thus, comprehensive results were targeted in a single study, where the interaction of all these parameters with each other could also be evaluated.

The mechanical and physical properties of the produced composites were evaluated by compression tests according to the ASTM E9 standard, abrasion according to the ASTM G99 standard, hardness, and density tests. Microstructural properties were determined using SEM, XRD, and particle size analysis. The data obtained were analyzed using the Taguchi method to determine the effects and significance levels of production parameters on mechanical and physical properties.

The initial phase tests and analyses designed using Taguchi experimental design determined that the highest compressive strength and toughness could be achieved with 3 hours of mechanical alloying (MA), a 3-layer FGM structure, 500 MPa compression pressure, and 3 hours of sintering at 590°C. The highest hardness was measured as 170 HB with 3 hours of MA, 7 layers, 400 MPa compression pressure, and 2 hours of sintering at 550 °C. It was also determined that the compressive strength and sintered density values showed a similar trend and the highest density value was determined to be 2.6957 g/cm³. As a result of SEM, XRD, and particle size analyses of the composite powders, it was determined that there was a

tendency for agglomeration at the beginning of mechanical alloying, but that the particle size decreased over time and the B₄C phase was distributed more homogeneously within the matrix

In the second stage of the study, the effect of the Ti₃C₂T_x MXene phase as a new generation reinforcement was investigated using the optimum parameters determined by Taguchi analyses. The compressive strength of the sample containing 3% MXene by weight in three layers reached 421 MPa, a 38% increase compared to its MXene-free counterpart. The strain increased from 15% to 35% and a threefold increase in toughness was achieved. High MXene ratios (3% and 5% by weight) complicated the production process and caused the hardness in the central regions of the samples to decrease to 65±5 HB levels. In tribological tests, the effect of MXene yielded different results depending on the hybrid reinforcement condition or the amount of reinforcement. The addition of 1 wt% MXene to the A7075 matrix reduced mass loss from 61.1 mg to 36.6 mg. However, in hybrid structures containing B₄C+MXene and at MXene content levels above 1 wt%, mass loss increased due to the triggering of adhesive and abrasive wear mechanisms.

The results obtained demonstrate that the targeted properties, such as high strength, toughness, and wear resistance, can be achieved through parameter optimization, FGM structure, and MXene addition. In light of these findings, the developed material can be evaluated for applications such as brake discs. Furthermore, the study contributes to advanced material development processes by characterizing composites produced with different reinforcements, additive ratios, and parameters through comprehensive analyses, thereby revealing performance variations. It also serves as an important reference for further studies involving detailed investigations of parameters such as additive distribution, interface interactions, and sintering behavior.

Keywords: Aluminum matrix composite, mechanical alloying, functionally graded material, Ti₃C₂T_x MXene, powder metallurgy, Taguchi analysis

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, doğadan ilham alarak sertlik ve tokluk gibi farklı özellikleri tek bir yapıda kademeli olarak birleştiren hibrit kompozitler tasarladık. Bilyeli öğütme ile ürettiğimiz tozları farklı katmanlarda birleştirerek üretim sürecinin hem mikroyapıya hem de mekanik performansa etkilerini inceledik. Sonuç olarak, çok işlevli malzemeler geliştirerek ileri mühendislik uygulamaları için yenilikçi bir yaklaşım ortaya koyduk.

Tez çalışmam boyunca değerli danışmanlığı ve rehberliği ile bana destek olan kıymetli hocam Prof. Dr. Mürsel EKREM'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez izleme sürecindeki değerli katkıları için hocalarım Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN ve Prof. Dr. Necati ATABERK'e, aşınma testlerindeki teknik desteği için ise Selçuk Üniversitesi'nden Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU'na da içtenlikle teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım, farklı üniversitelerden pek çok değerli ismin katkısı ile zenginleşti. Bu kapsamda, numune üretimi ve test süreçlerindeki değerli yardımlarından dolayı Selçuk Üniversitesi'nden Malz. Yüksek Müh. Bayram ÜNAL'a, Necmettin Erbakan Üniversitesi'nden Arş. Gör. Dr. Muhammed İhsan ÖZGÜN'e, Konya Teknik Üniversitesi'nden Arş. Gör. Ali ÇOBAN'a, Yozgat Bozok Üniversitesi'nden Öğr. Gör. Eyyüp ORHAN'a, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi'nden Öğr. Gör. Ali FEYZULLAH'a ve KTO Karatay Üniversitesi'nden Öğr. Gör. Yasin USLUGİL'e teşekkür ederim.

Sanayi-üniversite iş birliği örneklerinden birini sergileyerek, deneyisel çalışmalarım için tüm altyapı ve imkânları sağlayan TUMOSAN'a ve Fabrika Müdürü Sn. Metin YALÇIN'a, Kalite Mühendisi Sn. Burak BIYIK ile Kalite Teknisyeni Sn. Niyazi ORAL'a teşekkür ederim. Ayrıca süreçte ihtiyaç duyulan donanım desteği için SAYVANA firmasına ve bu süreçte teknik deneyimlerini paylaşan Mühendis Sn. Gökhan YILDIZ'a teşekkür ederim.

Bu süreçte destekleriyle daima yanımda olan, sabır ve dualarını hiçbir zaman eksik etmeyen aileme minnettarım.

Musa YILMAZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Metal Matris Kompozit Malzemeler.....	5
2.2. Toz Metalurjisi Yöntemi.....	8
2.3. Mekanik Alaşımlama Yöntemi	14
2.4. Fonksiyonel Geçişli Malzemeler	19
2.5. Taguchi Analizi ile Optimizasyon	23
2.6. 2 Boyutlu MXene Takviye Tozları	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1. Malzemeler	30
3.2. Taguchi Deney Seti Tasarımı	32
3.3. Hibrit Kompozitlerin Üretimi	34
3.3.1. Bilyeli öğütme ile tozların karıştırılması	35
3.3.2. Tozların istiflenmesi ve geçişli yapının hazırlanması.....	36
3.3.3. Tozların sıkıştırılması ve sinterlenmesi	37
3.4. Karakterizasyon	38
3.4.1. Taguchi deney tasarımı ve istatistiksel analiz yöntemleri	38
3.4.2. Basma testleri.....	39
3.4.3. Aşınma testleri	41
3.4.4. Sertlik testleri.....	42
3.4.5. Yoğunluk testleri.....	42
3.4.6. Mikroyapısal ve morfolojik karakterizasyon.....	43
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	44
4.1. Hibrit Kompozitlerin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi 44	
4.1.1. Basma dayanımı ve istatistiksel analizi	44
4.1.2. Sertlik özelliklerinin deneysel ve istatistiksel incelemesi.....	60
4.1.3. Yoğunluk ölçümleri ve Taguchi yöntemi ile parametrik optimizasyon .	73
4.1.4. Aşınma dayanımı ve istatistiksel yaklaşım	82
4.2. Mikroyapısal Analiz Sonuçları	96
4.2.1. XRD analizleri ile faz yapısının değerlendirilmesi.....	96

4.2.2.	Parçacık boyutu analizleri.....	100
4.2.3.	SEM ile yüzey ve mikro yapı analizleri.....	102
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	122
5.1.	Sonuçlar	122
5.2.	Öneriler	126
6.	KAYNAKLAR	127



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum oksit (Alümina)
Al_4C_3	: Alüminyum karbür
B_4C	: Bor karbür
SiC	: Silisyum karbür
TiC	: Titanyum karbür
Ti_3AlC_2	: Titanyum alüminyum karbür (MAX fazı)
Ti_3C_2Tx	: Fonksiyonel gruplarla kaplanmış Ti_3C_2 MXene (Tx: -O, -OH, -F)
N	: Newton (kuvvet birimi)
MPa	: Gerilme birimi (1 MPa = 10^6 N/m ²)
MPa·√m	: Kırılma tokluğu birimi
S/cm	: Siemens/cm, elektriksel iletkenlik birimi
mg	: Miligram (kütle birimi)
g/cm ³	: Yoğunluk birimi
m/s	: Hız birimi
μm	: Mikrometre (uzunluk birimi)
ε (epsilon)	: Birim şekil değiştirme / gerinim
σ (sigma)	: Gerilme
°C	: Santigrat derece (sıcaklık birimi)
S	: Regresyonun standart hatası
2θ	: X-ışını kırınım açısı
HB	: Brinell Sertliği
HV	: Vickers Sertliği

Kısaltmalar

MMK	: Metal Matris Kompozit
CNT	: Karbon Nanotüp
TM	: Toz Metalurjisi
BÖ	: Bilyeli Öğütme
MA	: Mekanik Alaşımlama
FGM	: Fonksiyonel Geçişli Malzeme
S/N	: Sinyal/Gürültü
ANOVA	: Varyans Analizi
HEA	: Yüksek Entropili Alaşım
IP	: İzostatik Presleme
LPS	: Sıvı Faz Sinterleme
FSP	: Sürtünme Karıştırma İşlemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
BSE	: Geri Saçılımlı Elektron (SEM görüntüleme modu)
EDS / EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
XRD	: X-Işını Kırınımı
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
ANN	: Yapay Sinir Ağı
COF	: Sürtünme Katsayısı
CTE	: Termal Genleşme Katsayısı

1. GİRİŞ

Metal matris kompozitler (MMK), sünek bir metal veya alaşım matrisi içerisine, genellikle seramik veya başka bir metal olan, farklı özelliklere sahip bir veya daha fazla takviye elemanının dağıtılmasıyla oluşturulan gelişmiş mühendislik malzemeleridir (Gupta ve ark., 2024). Bu kompozitler, matris malzemelerin tek başına sahip olamayacağı özellik kombinasyonları sunarak geleneksel malzemelerin performansını aşmayı hedefler. Özellikle yüksek özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk oranı), yüksek özgül sertlik (sertlik/yoğunluk oranı), üstün aşınma direnci, yorulma direnci ve ayarlanabilir termal genleşme katsayısı gibi özelliklerin kritik olduğu uygulamalarda stratejik öneme sahiptirler. Bu nitelikleri sayesinde havacılık, uzay, otomotiv, savunma sanayii, spor malzemeleri ve elektronik gibi yüksek teknoloji ve hafiflik gerektiren sektörlerde artan bir ilgi görmektedirler (Dadkhah ve ark., 2021).

MMK'lerin nihai performansını belirleyen temel unsurlar, matris ve takviye malzemelerinin seçimi ile bu bileşenlerin arayüzey kalitesidir. Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları ($2,7\pm 0,1$ g/cm³), yüksek toklukları ve korozyon dirençleri nedeniyle en çok tercih edilen matris malzemesidir (Thakur ve ark., 2024). Magnezyum alaşımları en düşük yoğunluğa (1,74 g/cm³) sahipken, titanyum alaşımları yüksek sıcaklık mukavemeti ve korozyon direnci sunar (Gummadi ve Alanka, 2023). Bakır alaşımları ise yüksek termal ve elektriksel iletkenlikleriyle öne çıkar (Bharti ve ark., 2021). Takviye fazı, kompozitin omurgası olarak nitelendirilir ve nihai özellikleri belirleyen bir bileşendir. En yaygın takviyeler arasında Silisyum Karbür (SiC), Alüminyum Oksit (Al₂O₃) ve Bor Karbür (B₄C) gibi geleneksel seramikler yer alır (Karabulut ve Ünal, 2022). Bunlar yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci sağlar (Mathew ve Kottur, 2023). Karbon Nanotüpler (CNT) ve grafen gibi nano ölçekli karbon malzemeleri ise yüksek mekanik dayanım, termal iletkenlik ve elektriksel özellikleri sayesinde ileri teknoloji uygulamaları için potansiyel taşımaktadır (Qiu ve ark., 2021).

Toz metalurjisi (TM), metal tozlarının belirli bir geometriye sahip kalıplar içerisinde sıkıştırılması ve ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılma (sinterleme) tabi tutulmasıyla işlevsel parçaların üretildiği bir imalat yöntemidir. Bu süreç temel olarak metal tozu üretimi, tozların karıştırılması, sıkıştırma ve sinterleme olmak üzere dört ana adımdan oluşur. Geleneksel presleme ve sinterleme yönteminde, sinterleme esnasında ortaya çıkan boyutsal değişimler ve kalıntı gözeneklilik gibi yapısal kusurları azaltmak için, tozların tek adımda hem preslenip hem de sinterlendiği sıcak

presleme gibi ileri sıkıştırma tekniklerine başvurulur (Edosa ve ark., 2022). TM'yi diğer imalat yöntemlerinden ayıran en temel özellikler, sürecin büyük ölçüde katı halde gerçekleşmesi ve genellikle ikincil talaşlı imalat operasyonlarına olan ihtiyacı önemli ölçüde azaltmasıdır. İstenen geometriye yakın üretim kabiliyeti, bu yöntemin en belirgin avantajlarından biri olup, özellikle pahalı alaşımlarda yüksek malzeme verimliliği ve maliyet avantajı sağlar (Lv ve ark., 2025). Ayrıca, ergime sıcaklıkları çok farklı olan veya birbirini içinde çözünmeyen metallerin alaşımlanmasına olanak tanıyarak (örneğin metal-seramik kompozitler veya kendinden yağlamalı yataklar) orijinal malzeme kombinasyonlarının geliştirilmesini mümkün kılar (Saxena ve ark., 2023).

Bilyeli öğütme (BÖ), temel olarak dönen bir kap içerisinde bilyeler barındıran ve malzemelerin parçacık boyutunu küçültme, karıştırma ve alaşımlama amacıyla kullanılan bir katı hal işleme tekniğidir (Wei ve ark., 2023). 19. yüzyılın sonlarında Friedrich Fischer tarafından icat edilen bu yöntem, başlangıçta madencilik ve seramik gibi endüstrilerde basit bir parçacık küçültme aracı olarak görülmesine rağmen, 1960'larda John Benjamin ve ekibinin oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş alaşımları sentezlemek için kullanmasıyla mekanik alaşımlama (MA) kavramını doğurmuş ve basit bir öğütme aracından atomik düzeyde alaşımlama yapabilen bir sentez aracına dönüşmüştür (Suryanarayana ve deBarbadillo, 2025). Bu yöntem; nano kristal yapılar, amorf alaşımlar ve yüksek entropili alaşımlar gibi geleneksel ergitme ve döküm yöntemleriyle elde edilmesi termodinamik olarak zor olan dengeden uzak malzemelerin sentezini mümkün kılmıştır (Duan ve ark., 2019). Son yirmi yılda ise, mekanik enerjinin kimyasal reaksiyonları başlatma veya sürdürme yeteneğinin keşfedilmesiyle mekanokimya adı verilen ve tehlikeli çözücü kullanımını azaltması, reaksiyon sürelerini kısaltması ve oda sıcaklığında çalışması nedeniyle yeşil kimya ilkeleriyle uyumlu, hızla büyüyen bir alana temel oluşturmuştur (Do ve Friščić, 2017).

Fonksiyonel geçişli malzemeler (FGM), malzeme bilimindeki yenilikçi yaklaşımlardan biri olarak, geleneksel homojen malzemelerin yetersiz kaldığı mühendislik uygulamalarına çözüm sunar (Alkunte ve ark., 2024). Doğadaki kemik, diş ve bambu gibi yapılar, FGM tasarımına ilham veren örneklerdir çünkü bu doğal yapılar fonksiyonel gereksinimlere en uygun malzeme dağılımını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir (Dubey ve ark., 2022). FGM'lerin geleneksel laminat kompozitlere göre en temel avantajı, farklı termal genleşme katsayıları ve elastik modüllere sahip malzemeler arasındaki keskin arayüzeylerde oluşan kritik gerilme yığılmalarını ortadan kaldırmasıdır. Bu dereceli geçiş bölgesi, kalıntı gerilmeleri ve delaminasyon riskini önemli ölçüde

azaltarak, seramiklerin yüksek sıcaklık direnci ile metallerin tokluğunu tek bir yapıda birleştirmeyi mümkün kılar (Reichardt ve ark., 2021).

Taguchi metodolojisi, ürün ve süreç tasarımını optimize etmeye yönelik istatistiksel bir yaklaşım olup, kaliteyi hedeflenen değerden sapma olarak tanımlar ve süreci gürültü faktörlerine karşı duyarsız hale getirmeyi hedefler. Bu doğrultuda ortogonal diziler ile deney sayısını önemli ölçüde azaltır, sinyal/gürültü (S/N) oranı ile performanstaki değişkenliği değerlendirir ve varyans analizi (ANOVA) ile her bir kontrol faktörünün istatistiksel anlamlılığını belirler (Hisam ve ark., 2024). Örneğin; toz metalurjisi süreçleri, toz hazırlama, karıştırma, presleme ve sinterleme gibi temel adımlardan oluşur ve bu adımlardaki parametrelerin (örneğin, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı, takviye oranı) nihai ürünün mikro yapısını ve performansını etkilemesi nedeniyle optimizasyon kritik öneme sahiptir. Taguchi metodu, geleneksel deneme yanılma yöntemlerine kıyasla daha az kaynak, daha kısa süre ve daha düşük maliyetle optimum proses parametre kombinasyonunu belirlemeye olanak tanır (Lingam ve ark., 2024).

MXene'ler, 2011 yılında Drexel Üniversitesi'nde keşfedilen, MAX fazı adı verilen katmanlı üçlü karbür ve nitrür seramiklerden türetilen iki boyutlu geçiş metali karbürleri, nitrürleri veya karbonitrürleridir (Gokul Eswaran ve ark., 2025). Genel formülleri $M_n+1X_nT_x$ ile ifade edilir; burada 'M' geçiş metalini, 'X' karbon ve/veya azotu, 'n' M katmanlarının sayısını ve T_x ise dağlama işlemi sırasında yüzeyde oluşan fonksiyonel sonlandırma gruplarını (örn. -O, -OH, -F) temsil eder. Bu T_x grupları, MXene'lerin yüzey kimyasını, diğer malzemelerle etkileşimini ve fiziksel özelliklerini kökten değiştirerek onları diğer 2D malzemelerden ayırır. MXene'ler, özellikle $Ti_3C_2T_x$ gibi türleri, yüksek mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik ve ayarlanabilir hidrofilik yüzey kimyası gibi benzersiz özellik kombinasyonlarına sahiptir (Worku ve ark., 2024). Ayrıca MXene'ler kompozit içinde katı bir yağlayıcı gibi davranarak önemli ölçüde sürtünme katsayısını ve aşınma direncini artırabilir (Hu ve ark., 2020). Bu özellikler, MMK'lerde önemli bir takviye elemanı olarak kullanılmalarını sağlar.

Bu çalışmada, ileri mühendislik uygulamalarının gereksinim duyduğu yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk, yüksek aşınma direnci ve termal kararlılık gibi özellikleri aynı anda sunabilen hibrit yapıları alüminyum matris kompozitlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, matris malzeme olarak yüksek mukavemet/ağırlık oranı ile bilinen A7075 alüminyum alaşımı tercih edilmiş, takviye fazı olarak ise yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özellikleri nedeniyle bor karbür (B_4C)

seramiği seçilmiştir. Takviye fazı, matris içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında ilave edilmiştir.

Matris ve takviye tozları, bilyeli öğütme yöntemiyle 1, 2 ve 3 saat sürelerle karıştırılarak öğütülmüştür. Elde edilen toz karışımları, fonksiyonel dereceli malzeme prensibine uygun olarak 3, 5 ve 7 katmanlı yapılar hâlinde istiflenmiş ve soğuk presleme yöntemiyle üç farklı sıkıştırma basıncında (300, 400 ve 500 MPa) şekillendirilmiştir. Presleme sonrası numuneler, farklı sıcaklıklar (550, 570 ve 590 °C) ve sürelerde (1, 2 ve 3 saat) sinterlenmiştir.

Üretim parametrelerinin kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini sistematik bir şekilde değerlendirmek amacıyla Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin basma dayanımı, sertlik ve yoğunluk gibi temel mekanik ve fiziksel özellikleri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, bilyeli öğütme sürecinin özellikle mikroyapı homojenliğini iyileştirdiğini ve bu durumun mekanik performans üzerinde olumlu etkilerini göstermiştir. Ayrıca sinterleme sıcaklığı ve süresi ile sıkıştırma basıncı gibi üretim koşullarının, kompozitlerin nihai özellikleri üzerindeki görece etkileri istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Bununla birlikte, optimizasyon sonrası ağırlıkça %1, %3 ve %5 Ti_3C_2Tx MXene katkısı ile numunelerin mekanik (basma, sertlik, aşınma) ve fiziksel (yoğunluk) özellikler incelenmiş, MXene'in özellikle mikroyapısal bütünlük, yüzey sertliği ve aşınma direnci üzerinde ilave katkı sağladığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, doğadan esinlenilerek geliştirilen FGM istif düzeninin, ileri mühendislik uygulamaları için kullanılan mekanik alaşımlama prosesinin ve Ti_3C_2Tx MXene takviyesinin optimize üretim parametreleriyle birlikte sertliği, aşınma dayanımını ve tokluğu artırdığı sayısal verilerle doğrulanmıştır. Elde edilen bulguların izostatik presleme veya sıcak presleme gibi gelişmiş toz metalurjisi teknikleriyle kullanılması halinde geliştirilecek kompozitin yüksek hızlı tren gibi araçlara uygun seviyede fren diski malzemesi olabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte çalışma, hem ileri malzeme geliştirme süreçlerine katkı sunmakta hem de çok fazlı sistemlerdeki MXene davranışına dair bir referans oluşturmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaynak araştırması kapsamında, tez çalışmasının temelini oluşturan konular ayrı alt başlıklar hâlinde ele alınmış, her bir başlık altında ilgili alanda geçmişten günümüze gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiş ve özellikle güncel literatüre odaklanılarak detaylı bir değerlendirme sunulmuştur. Bu doğrultuda, metal matris kompozit malzemeler, toz metalurjisi prosesi, mekanik alaşımlama yöntemi, fonksiyonel dereceli malzemeler, Taguchi analizi ve MXene takviye tozları tez çalışması kapsamında sistematik bir biçimde irdelenmiştir.

2.1. Metal Matris Kompozit Malzemeler

MMK'ler, sünek bir metal veya alaşım matrisi içine genellikle seramik ya da metal esaslı takviye fazlarının dağıtılmasıyla elde edilen ileri mühendislik malzemeleridir. Bu yapı, bileşenlerin tek başlarına sunamayacağı özellik kombinasyonlarını bir araya getirerek geleneksel malzemelerin sınırlarını aşmayı amaçlar (Sarmah ve Gupta, 2024).

Yüksek özgül mukavemet ve sertlik, aşınma ve yorulma direnci ile termal genişlemenin kontrol edilebilirliği gibi nitelikleri sayesinde MMK'ler; havacılık, uzay, otomotiv, savunma ve elektronik gibi hafifliğin ve performansın kritik olduğu alanlarda stratejik önem kazanmış, bu sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmuştur (Mavhungu ve ark., 2017).

MMK'ler, içerdikleri takviye elemanının geometrisine göre sınıflandırılır ve bu sınıflandırma, malzemenin mekanik özelliklerini ve yönelme davranışını doğrudan etkiler. Parçacık takviyeli MMK'ler, genellikle izotropik özellikler gösterir, üretimleri kolay ve ekonomik olup, SiC veya Al_2O_3 gibi seramik partiküller içerir (Kumaresan ve Kumar, 2023). Visker (whisker) veya kısa fiber takviyeli MMK'ler, parçacıklara göre daha yüksek mukavemet ve sertlik sunar ancak üretimleri daha zordur ve malzemede anizotropik davranışa neden olabilirler (Nan ve ark., 2021). Sürekli fiber takviyeli MMK'ler ise fiberlerin yönü boyunca belirginleşen yüksek mekanik özellikler sağlar ancak üretim süreçleri oldukça karmaşık ve maliyetli olduğu için özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilirler (Bahl, 2021).

MMK'lerin performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri, takviye fazlarını bir arada tutan ve dış yükleri bu fazlara eşit olarak ileten matris malzemesidir. Düşük yoğunluk, korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, biyouyumluluk ya da elektriksel iletkenlik gibi belirli avantajları sayesinde bazı metaller öne çıkmaktadır.

Bu kapsamda, alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları (2.7 ± 0.2 g/cm³), süneklikleri, uygun maliyetleri ve korozyon dirençleri nedeniyle MMK üretiminde en çok tercih edilen matris malzemesidir. Alaşımlanmış alüminyum matrisli kompozitler, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde hafif ve dayanıklı bileşenler üretmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Kar ve ark., 2024).

Magnezyum alaşımları ise yapısal metaller arasında en düşük yoğunluğa (1.74 ± 0.06 g/cm³) sahip olup, hafif uygulamalar için cazip bir seçenek sunar ancak yüksek reaktiviteleri ve korozyon hassasiyetleri üretim aşamasında dikkat gerektirir (Nirala ve ark., 2021). Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıklarda dahi mekanik dayanımlarını koruyabilmeleri ve yüksek biyouyumlulukları sayesinde havacılık motorları ve biyomedikal implantlar gibi özel alanlarda tercih edilirken, yüksek maliyet ve oksijenle reaksiyona girme eğilimleri kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır (Ammisetti ve Kruthiventi, 2021). Bakır alaşımları, sahip oldukları yüksek termal ve elektriksel iletkenlik sayesinde elektronik alanında ısı yutucular ve elektrik kontakları gibi uygulamalarda ön plana çıkar (Kumar ve ark., 2024).

Nikel, demir ve kobalt gibi matrisler, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve kimyasal stabilite gerektiren özel mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (Karmakar ve ark., 2021; Hu ve ark., 2024). Tüm bu farklı matris sistemlerinin özgün avantaj ve sınırlamaları, MMK'lerin uygulama alanlarını doğrudan belirlemektedir. Çizelge 2.1, yaygın matris malzemelerinin temel özelliklerini sunmakta olup seçim kriterleri açısından yol gösterici niteliktedir.

Çizelge 2.1. Yaygın matris malzemelerinin temel özellikleri (Sharma ve ark., 2020; Velmurugan ve ark., 2022)

Temel Matris Alaşımı	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Süneklik (%)
Magnezyum	1,85±0,1	45±3	235±150	11±7
Alüminyum	2,7±0,2	75±5	270±230	23±21
Titanyum	4,6±0,2	105±15	750±500	21±20
Çelikler	7,6±0,3	200±15	450±220	25±6
Nikel	8,2±0,4	200±50	1100±800	30±29
Bakır	8,9±0,1	130±20	400±100	26±23

Takviye fazı, MMK'lerin yapısal bütünlüğünü sağlayan ve mekanik, termal veya tribolojik özelliklerini doğrudan belirleyen en kritik bileşendir. Takviye seçimi, hedeflenen uygulama alanına ve istenen performans kriterlerine bağlı olarak yapılır. Geleneksel seramik takviyeler arasında yer alan SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC ve TiB₂ gibi seramikler (Çizelge 2.2); yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve yüksek aşınma direnci ile

kompozitlerin özelliklerini belirgin şekilde değiştirir. SiC, alüminyum matrisle kimyasal uyumu ve uygun maliyeti sayesinde en yaygın kullanılan takviyedir (Surya ve Gugulothu, 2022). Karbon bazlı takviyeler ise farklı fonksiyonel katkılar sunar. Grafit (Saravanakumar ve ark., 2021), kendinden yağlamalı özellik kazandırırken, karbon nanotüpler ve grafen gibi nano-yapılar (Sheinerman, 2022), yüksek elastisite modülleri ve iletkenlik özellikleri ile MMK'lerde ileri mühendislik uygulamaları için potansiyel taşımaktadır. Seramik takviyelerin neden olduğu süneklik kaybına çözüm olarak metalik takviyeler ve özellikle yüksek entropili alaşımlar (HEA) öne çıkmaktadır (Verma ve Singh, 2024). Çoklu ana element içeren HEA partikülleri, hem yüksek mukavemet ve süneklığe sahip olmaları hem de metal matrislerle daha yüksek arayüzey etkileşimi sağlamaları sayesinde, MMK'lere yüksek performans sunmaktadır.

Çizelge 2.2. Yaygın takviye malzemelerinin temel özellikleri (Gupta ve Srivastava, 2018; Sohag ve ark., 2020; Alam ve ark., 2023)

Takviye Malzemesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV)	Başlıca Avantajlar
Silisyum Karbür (SiC)	3,1±0,1	410±10	2500	Yüksek sertlik, aşınma direnci, matris uyumu
Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	3,9±0,1	380±10	2000±100	Aşınma direnci, ısı kararlılık
Bor Karbür (B ₄ C)	2,52±0,03	460±10	3100	Sert, hafif, aşınma direnci
Titanyum Karbür (TiC)	4,93±0,05	440±10	3000±200	Yüksek sertlik, sıcaklık dayanımı
Titanyum Diborür (TiB ₂)	4,52±0,05	530±20	3000±200	Sert, termal iletkenlik
Grafen	2,2 (teorik)	1000±100	–	Hafif, yüksek mekanik etki ve iletkenlik
CNT	1,7±0,4	1000±100	–	Hafif, yüksek mekanik etki ve iletkenlik

Metal matrisli kompozitler, geleneksel alaşımların sınırlarını aşan, özellikleri uyarlanabilir, yüksek performanslı ve geniş potansiyele sahip bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Matris ve takviye seçimi, hacim oranı, şekil ve üretim yöntemi gibi parametrelerin dikkatli optimizasyonu ile uygulamaya özel nitelikler elde edilebilmekte ancak homojen takviye dağılımı, güçlü ve kararlı arayüzey oluşumu ile üretim maliyetlerinin düşürülmesi hâlen temel zorluklar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, araştırmalar, yüksek entropili alaşımlar, grafen ve diğer iki boyutlu malzemeler gibi yeni nesil takviyelerin tek başına veya hibrit kombinasyonlarla kullanıldığı yenilikçi kompozit sistemlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Ayrıca, proses izleme ve optimizasyonu ile akıllı üretim yaklaşımlarına, atomik ölçekte yüzey modifikasyonu ve matris kimyası optimizasyonu ile arayüz mühendisliğine, fonksiyonel derecelendirilmiş yapılar

aracılığıyla bölgesel özelliklerin hedeflendiği tasarım stratejileri yürütülmektedir. Bu sayede, metal matrisli kompozitlerin savunma, havacılık, otomotiv ve enerji gibi stratejik sektörlerde daha geniş çapta benimsenmesi ve endüstriyel ölçekte yüksek katma değerli çözümler sunması beklenmektedir.

2.2. Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz metalurjisi (TM), metal tozlarının belirli bir geometriye sahip kalıplar içerisinde sıkıştırılması ve ardından ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılma işlemi (sinterleme) tabii tutulmasıyla katı, işlevsel parçaların üretildiği bir imalat yöntemidir. Bu süreç, temel olarak metal tozu üretimi, tozların karıştırılması veya harmanlanması, sıkıştırma ve sinterleme olmak üzere dört ana adımdan oluşur. Nihai parçanın özelliklerini ihtiyaca göre değiştirmek amacıyla boyutlandırma, ikincil presleme, infiltrasyon, ısıtılma işlemi veya kaplama gibi ek ikincil işlemler de uygulanabilir (Edosa ve ark., 2022).

Toz metalurjisini diğer imalat yöntemlerinden ayıran en temel özellikler, sürecin büyük ölçüde katı halde gerçekleşmesi ve genellikle ikincil talaşlı imalat operasyonlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırması veya önemli ölçüde azaltmasıdır. Net veya nete yakın şekil üretim kabiliyeti, TM'nin en belirgin avantajlarından biridir ve yüksek malzeme verimliliği sağlar. Ayrıca, bu teknoloji, ergime sıcaklıkları çok farklı olan veya birbirinde çözünmeyen metallerin alaşımlanmasına olanak tanıyarak, geleneksel döküm veya dövme yöntemleriyle üretilmeyen malzeme kombinasyonlarının (örneğin metal-seramik kompozitler, kendinden yağlamalı yataklar) geliştirilmesini mümkün kılar. Kontrol edilebilir gözeneklilik, TM'nin bir diğer benzersiz özelliğidir. Bu sayede filtreler veya yağ emdirilmiş yataklar gibi özel fonksiyonel ürünler üretilir (Araoynbo ve ark., 2022).

Toz metalurjisi; yüksek başlangıç maliyeti, porozitenin tamamen önlenememesi ve büyük/karmaşık parçaların üretimindeki zorluklar gibi sınırlamalara sahiptir. Porozite, çatlak başlangıç için kusur noktaları oluşturarak özellikle yorulma ömrünü düşürür ve bu durum bu üretim yönteminin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeldir (Thümmel ve Oberacker, 2024). Bu temel sorunu aşmak amacıyla izostatik presleme (IP) (Attia, 2021) ve yüksek hızlı sıkıştırma (Bai ve ark., 2021) gibi daha etkili sıkıştırma yöntemleri ile sıvı faz sinterleme (de Oro Calderon ve ark., 2022) veya kıvılcım plazma sinterleme (SPS) (Manohar ve ark., 2022) gibi gelişmiş sinterleme teknikleri kullanılmaktadır.

TM'de kullanılan tozlar, sıkıştırma ve sinterleme davranışlarını, dolayısıyla da nihai parçanın performansını doğrudan belirler (Thümmel ve Oberacker, 2024). Partikül

boyutu; sinterleme kinetiği, yoğunluk ve mikroyapı üzerinde belirleyici bir rol oynar. İnce tozlar, sahip oldukları geniş yüzey alanı sayesinde daha hızlı sinterlenirken geniş boyut dağılımına sahip karışımlar, küçük partiküllerin büyük partiküller arasındaki boşlukları doldurmasıyla daha yüksek paketlenme yoğunluğu sağlayabilir. Küresel partiküller yüksek akışkanlık sunarken, düzensiz veya süngerimsi partiküller sıkıştırma sırasında daha iyi mekanik kenetlenme sağlayarak yüksek mukavemet elde edilmesine katkıda bulunur.

Toz kütlesi bir kalıp içinde basınca maruz kaldığında, yoğunlaşma birkaç ardışık mekanizma ile gerçekleşir. Uygulanan basınç arttıkça bu mekanizmalar sırayla veya eş zamanlı olarak devreye girer (Pan ve ark., 2022):

- **Partikül Yeniden Düzenlenmesi:** Düşük basınçlarda, partiküller kayarak ve dönerek daha yoğun bir paketlenme düzenine geçerler. Bu aşamada partiküller arasındaki büyük boşluklar dolar ve tozun yığın yoğunluğu artar.
- **Elastik Deformasyon:** Basınç arttıkça, partikül temas noktalarında elastik deformasyon başlar. Bu deformasyon, basınç kaldırıldığında geri döner.
- **Plastik Deformasyon:** Sünek metal tozlarında, akma gerilmesi aşıldığında partiküller kalıcı olarak şekil değiştirir. Temas alanları genişler, partiküller birbirine daha sıkı kenetlenir ve boşluklar daha da küçülür. Bu, ham yoğunluktaki en önemli artışın sağlandığı aşamadır.
- **Soğuk Kaynaklanma ve Mekanik Kenetlenme:** Yüksek basınç altında, partikül yüzeylerindeki oksit filmleri kırılır ve temiz metal yüzeyleri birbiriyle temas ederek atomik bağlar (soğuk kaynak) oluşturur. Düzensiz şekilli partiküllerin mekanik olarak birbirine kilitlenmesiyle birlikte bu bağlar, ham parçaya sinterleme öncesi taşıma ve işlemler için gerekli olan ham mukavemeti kazandırır.

Toz metalurjisinde presleme, toz partiküllerinin istenen yoğunluk ve geometrik formda şekillendirilmesini sağlayan temel aşamalardan biridir. Seçilecek presleme yöntemi, yalnızca ham parça yoğunluğunu ve homojenliğini değil, aynı zamanda sinterleme sonrası boyutsal kararlılığı, mikroyapı bütünlüğünü ve mekanik özellikleri de doğrudan etkiler. Üretilcek parçanın boyutu, geometrik karmaşıklığı, hedeflenen toleranslar ve üretim maliyetleri göz önünde bulundurularak uygun yöntem belirlenmelidir. Bu bağlamda, toz metalurjisinde yaygın olarak kullanılan başlıca presleme teknikleri şunlardır (Angelo ve ark., 2022):

- **Tek eksenli presleme;** toz metalurjisinde en yaygın kullanılan sıkıştırma yöntemidir. Bu yöntemde toz malzeme, rijit bir çelik veya sement karbür kalıp boşluğuna

doldurulur ve üst ile alt zımbaların hareketiyle tek bir eksen boyunca sıkıştırılır. Yüksek üretim hızı, otomasyona uygunluk ve iyi boyutsal tekrarlanabilirlik sağlaması, onu özellikle otomotiv gibi yüksek hacimli üretimler için tercih edilen bir yöntem haline getirir. Ancak, zımbalardan iletilen basınç, partiküller arası iç sürtünme ve kalıp duvarıyla temas nedeniyle derinlik boyunca azalır. Bu durum, özellikle yüksek veya karmaşık geometrili parçalarda yoğunluk gradyanlarının oluşmasına ve boyutsal sapma riskinin artmasına neden olur.

- Soğuk izostatik presleme yönteminde metal tozları esnek bir kalıba doldurulur, kalıp sızdırmaz şekilde kapatılır ve yüksek basınçlı bir sıvı (su veya yağ) ortamına yerleştirilerek her yönden eşit basınç uygulanır. Tek eksenli preslemede görülen sürtünme kaynaklı yoğunluk farklılıklarını ortadan kaldırması sayesinde son derece homojen bir ham yoğunluk dağılımı sağlar. Bu özellik, büyük boyutlu, uzun ve karmaşık geometrili parçaların üretimini mümkün kılar. Ayrıca homojen yoğunluk, sinterleme sırasında eşit çekme sağlayarak boyutsal çarpılma riskini önemli ölçüde azaltır. Ancak esnek kalıp kullanımı, boyutsal hassasiyeti tek eksenli preslemeye kıyasla düşürür ve genellikle sinterleme sonrasında ek işlem gerektirir.
- Sıcak izostatik presleme (SIP); sıkıştırma ve sinterleme işlemlerini tek adımda birleştiren yüksek performanslı bir yöntemdir. Metal tozları, metalden yapılmış sızdırmaz bir kapsül içine doldurulur, vakum altında gazı alınarak kapatılır ve ardından yüksek sıcaklık ile yüksek basınçlı inert gaz (genellikle argon) ortamında preslenir. Bu sayede gözenekler büyük oranda kapanır ve yüksek mekanik özellikler elde edilir. Havacılık, türbin diskleri, biyomedikal implantlar, takım çelikleri ve yüksek performanslı süper alaşımlar gibi kritik uygulamalarda standart bir yöntemdir. Ancak, ekipman ve işletme maliyetlerinin yüksek olması ve çevrim süresinin diğer yöntemlere kıyasla daha uzun olması başlıca dezavantajlarıdır.

Sinterleme, termodinamik olarak sistemin toplam serbest enerjisini minimize etme eğilimiyle ilerleyen bir yoğunlaştırma sürecidir. Toz kompaktlarında yüksek yüzey alanı, yüksek yüzey enerjisi anlamına gelir. Süreç boyunca partiküller, bu enerjiyi azaltmak için birleşir ve aradaki gözenekler kütle transferiyle ortadan kalkar. Atomlar, yüksek kimyasal potansiyelden (yüzeyler) düşük kimyasal potansiyele (boyun bölgeleri) doğru hareket eder. Kütle transferi; yüzey difüzyonu, tane sınırı difüzyonu ve hacimsel difüzyon mekanizmalarıyla gerçekleşir. Süreç, başlangıç (boyun oluşumu), orta (gözeneklerin izole hale gelmesi) ve son (tane büyümesi ve kalan gözeneklerin kapanması) aşamalarından oluşur (Manohar ve ark., 2021a).

Bu temel mekanizmalarla birlikte, sinterleme süreci kullanılan yöntemle göre farklı yollarla uygulanabilir ve her yöntem yoğunlaşma hızı, mikroyapı kontrolü ve nihai özellikler açısından farklı avantajlar sunar.

- Katı Hal Sinterleme: Tüm bileşenler katı halde kalır, kütle transferi tamamen katı hal difüzyonuyla gerçekleşir. Tek bileşenli veya tam alaşımlı tozlarda tercih edilir (Angelo ve ark., 2022).
- Sıvı Faz Sinterleme (LPS): Sıcaklık, bileşenlerden birinin ergime noktasının üzerine çıkarılarak sıvı faz oluşturulur. Bu faz, partiküllerin yeniden düzenlenmesini ve gözenek doldurmayı kolaylaştırarak yoğunlaşmayı hızlandırır. Sement karpürler, ağır alaşımlar ve bazı çok bileşenli sistemlerde kullanılır (de Oro Calderon ve ark., 2022).

Sinterleme yönteminden bağımsız olarak, işlem sırasında kullanılan sıcaklık, süre ve atmosfer koşulları nihai parçanın yoğunluğu, mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynar (Avcı ve Güleç, 2021; Kumar ve ark., 2021).

- Sıcaklık: Difüzyon hızını üssel olarak artırır, yoğunluğu yükseltir ancak aşırı sıcaklık tane irileşmesine yol açarak mukavemeti düşürür.
- Süre: Yoğunlaşmayı destekler fakat uzun süreler tane büyümesini artırabilir.
- Atmosfer: Oksidasyonu önlemek ve kimyasal bileşimi kontrol etmek için kullanılır. İnert gazlar (Ar, N₂), redükleyici atmosferler (H₂, ayrıştırılmış amonyak) ve çelikler için karbon potansiyeli ayarlanmış ortamlar en yaygın seçeneklerdir.

Vairamuthu ve ark. (2020) çalışmalarında, Al matrisine B₄C ve TiC takviyelerinin entegre edildiği hibrit kompozitlerin (Al+TiC+B₄C) yoğunluk, sertlik ve basma mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemiştir. Üç temel TM parametresi; sinterleme süresi (1,75, 2, 2,25 saat), sıcaklık (600, 615, 630 °C) ve sıkıştırma basıncı (250, 300, 350 MPa) üç seviyede değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, yoğunluk için en uygun koşullar; 2 saat, 615 °C, 250 MPa olup, basınç %71,53 ile en baskın etkidir. En yüksek sertlik (29,78 HV); 2,25 saat, 615 °C, 350 MPa'da elde edilmiş, sertlik üzerinde basınç %57,09 ile en etkili parametre olmuştur. Maksimum basma mukavemeti (313,94 MPa) ise 1,75 saat, 600 °C, 250 MPa'da elde edilmiş, bu özellik %56,22 oranında sinterleme süresinden etkilenmiştir. Genel olarak sıcaklık ve basınç yoğunluk ile sertlikte, süre ve sıcaklık ise basma mukavemetinde belirleyici bulunmuştur.

Bharathi ve Kumar (2024), SiC ve B₄C parçacıklarıyla güçlendirilmiş hibrit alüminyum matris kompozitlerini toz metalurjisi yöntemiyle üretmiş ve bu takviyelerin

mikroyapı, mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerine etkilerini incelemiştir. En yüksek sertlik 54 HV ile Al+SiC (ağ. %4)+B₄C (ağ. %2) kompozitinde elde edilmiş ve Al + SiC (ağ. %5) + B₄C (ağ. %2)'ye (33 HV) göre %38 artış elde edilmiştir. SiC takviyesi, Al+SiC (ağ. %6) kompozitinde ortalama 6,07 µm ile daha ince tane yapısı sağlamıştır. Termal iletkenlik en yüksek 86.04 W/mK ile Al+SiC (ağ. %2) kompozitinde, korozyon direnci ise 0,706 mpy ile Al+SiC (ağ. %2)+B₄C (ağ. %2) kompozitinde ölçülmüştür.

Akçamlı ve Şenyurt (2021), toz metalurjisi ile B₄C takviyeli Al-8.5Si-3.5Cu matris kompozitlerinin mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada mekanik alaşımlama (0, 3, 5, 7 saat), soğuk presleme ve basınçsız sinterleme uygulanmış, B₄C oranı ağırlıkça %0, 5, 7,5 ve 10 olarak değiştirilmiştir. En yüksek performans, 5 saat MA ile üretilen Al-8.5Si-3.5Cu-10B₄C kompozitinde elde edilmiştir. Sertlik 167 HV, akma dayanımı 362 MPa, basma dayanımı 454 MPa, aşınma oranı 5.82×10^{-5} mm³/m.N'dur. Bu aşınma değeri, 5 saat MA uygulanmış takviyesiz numuneye göre 17 kat, MA uygulanmadan karıştırılmış numuneye göre ise 10 kat daha düşüktür. Yaşlandırma sonrası sertlik 231 HV'ye, basma dayanımı 475 MPa'ya yükselmiştir. Yüksek yoğunluk (%94,49–%99,37) ve ince taneli homojen yapı, mekanik ve tribolojik performansın artmasında temel sebepler olmuştur.

Çelik ve Seçilmiş (2017), toz metalurjisi ile üretilen B₄C takviyeli Al matris kompozitlerde takviye oranı ve sinterleme sıcaklığının sertlik ve aşınma davranışına etkilerini incelemiştir. Saf Al ve ağırlıkça %4, %8, %12, %16 B₄C/Al karışımları 350 MPa'da preslenip 580°C'de 90 dk sinterlenmiştir. B₄C oranı arttıkça sertlik 48,5 HV'den (%0 B₄C) 68,1 HV'ye (ağ. %16 B₄C) yükselmiş, aşınma ile kütle kaybı ise 138,2 mg'den (saf Al, 15 N, 1000 m) 14,8 mg'a (ağ. %16 B₄C, 5 N, 250 m) düşmüştür. Sürtünme katsayısı 0,577'den 0,375'e gerilemiş, temas yüzeyi sıcaklığı 105,6–227,3 °C aralığında ölçülmüş ve takviye oranı arttıkça sıcaklık düşme eğilimi göstermiştir. Sonuçlar, B₄C ilavesinin Al matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik performansını belirgin şekilde artırdığını ortaya koymuştur.

Alihosseini ve ark. (2017), Al-xB₄C (x = 0–5 ağırlıkça %) nanokompozit tozlarını yüksek enerjili bilyeli öğütme ile hazırlayarak sinterleme davranışlarını incelemiştir. Mekanik alaşımlamanın nanoparçacıkları homojen dağıtarak aglomerasyonu ve istenmeyen reaksiyonları önlediği vurgulanmıştır. Presleme davranışı Heckel, Panelli-Filho ve Ge modelleriyle analiz edilmiş, Heckel denklemi tüm numuneler için $R^2 > 0.99$ ile en doğru sonuçları vermiştir. B₄C oranı arttıkça sıkıştırılabilirlik ve sinterlenebilirlik

azalmıştır. 16 saat öğütme ve 600 °C’de sinterleme sonrası ağ. %5 B₄C’li numunede 265 MPa basma mukavemeti ve 165 HV sertlik elde edilmiştir. Bu sertlik, takviyesiz Al’a göre 30 HV daha yüksektir. Ayrıca kristalit boyutu, başlangıçta 90 nm iken ağ. %5 B₄C ilavesi ve 16 saat öğütme sonunda 20 nm’ye düşmüştür.

Toz metalurjisi yöntemi kapsamında literatürdeki çalışmalar Çizelge 2.3’te özetlenmiş olup, söz konusu tablo proses parametrelerinin belirlenmesinde kaynak olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 2.3. Alüminyum matrisli kompozitlerde B₄C takviyesi ve toz metalurjisi parametrelerinin kısa bir literatür özeti

Matris – Takviye	Takviye Miktarı	Basınç (MPa)	Sıcaklık – Süre	Önemli Bulgular	Ref.
A7075 – B ₄ C	%6	600	620°C–150 dk (geleneksel), 500°C–30 dk (mikrodalga)	Mikrodalga sinterleme daha yüksek mekanik özellikler sağladı	(Manohar ve ark., 2021a)
Al – SiC – B ₄ C	%2–8 çift takviye	150	610°C’ye 20°C/dk ısıtma, 15 dk bekletme	B ₄ C yüzdesi azaldıkça sertlik düştü	(Bodukuri ve ark., 2016)
Al – B ₄ C – TiC	%1,5 TiC + %0,5 B ₄ C	250, 300, 350	600, 615, 630°C; 1,75–2,25 saat	Yoğunluk için 250 MPa, 2sa ve 615°C sertlik için ise 350MPa, 2,25sa–615°C	(Vairamuthu ve ark., 2020)
Al – SiC + B ₄ C	%2–6 SiC + %2 B ₄ C	735	400°C–3 sa. (ön işlem) + 550°C–3sa.	B ₄ C sertliği artırır, yüksek SiC kristal kusurları artırır	(Bharathi ve Kumar, 2024)
Al – B ₄ C – Cu – Si	8,5 Si–3,5 Cu–%0,5–10 B ₄ C	650	420°C–2sa. + 530°C–3 sa. + 500°C–3sa., 170°C–20sa. (yaşlandırma)	B ₄ C artışı yaşlandırma ile daha iyi özellik sağladı	(Akçamlı ve Şenyurt, 2021)
Al – B ₄ C	%4, 8, 12, 16	350	560, 580, 600°C – 90 dk	En yüksek sertlik 580°C’de elde edildi	(Çelik ve Seçilmiş, 2017)
Al – B ₄ C	%1–5	100–900	500, 550, 600°C	Takviye arttıkça porozite artar	(Alihosseini ve ark., 2017)
A7075 – B ₄ C	%10	400–500	600°C – 3sa	Yoğunluk basınç azalmasıyla düştü	(Canakci ve ark., 2014)
601AC/201AC – B ₄ C (FGM)	%0–20	325	470, 570°C	570°C’de daha yüksek sertlik	(Vijay ve CH, 2020)

Çizelge 2.3’te sunulan literatür derlemesi, A7075 gibi alüminyum matrisli kompozitlerin B₄C ve diğer seramiklerle katkılanarak mukavemet ve sertliklerinin artırılması üzerine yoğun çalışmalar yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmalar, takviye oranının, sıkıştırma basıncının ve sinterleme sıcaklığının nihai ürünün sertlik ve yoğunluk gibi özellikleri üzerinde kritik bir rol oynadığını ve genellikle optimum bir proses değeri bulunduğunu göstermektedir. Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı tek tip takviyelere veya geleneksel hibrit sistemlere odaklanırken, son yıllarda geliştirilen ve hem yağlayıcı

hem de güçlendirici potansiyeli bulunan 2-boyutlu $Ti_3C_2T_x$ MXene fazının, B_4C ile fonksiyonel derecelendirilmiş bir yapıda kullanımına dair bir boşluk olduğu görülmektedir. Bu çalışmada; A7075 matrisli, B_4C ve MXene hibrit takviyeli tozlar mekanik alaşımlanarak FGM istif düzeninde toz metalurjisi vasıtasıyla üretilmiştir. Çalışmanın temel amacı, Taguchi optimizasyon metodunu kullanarak TM proses parametrelerinin (sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi), malzeme biliminin temelini oluşturan işlem, yapı, özellik ve performans ilişkilerini nasıl etkilediğini aydınlatmaktır.

2.3. Mekanik Alaşımlama Yöntemi

Bilyeli öğütme, dönen bir kap içerisindeki öğütücü bilyeler vasıtasıyla malzeme parçacıklarını küçülten, karıştıran ve/veya mekanik olarak alaşımlayan bir katı hal işleme yöntemidir. 19. yüzyılda Friedrich Fischer tarafından geliştirilen bu yöntem, başlangıçta yalnızca öğütme amaçlı kullanılmış ancak zamanla ölçeklenebilirliği ve yapısal uyarlanabilirliği sayesinde malzeme biliminin vazgeçilmez bir aracı haline gelmiştir. Mekanik alaşımlama kavramı, 1960'larda John Benjamin'in bu yöntemi oksit dağılımıyla güçlendirilmiş alaşımlar üretmesiyle doğmuştur. Bu gelişme ile bilyeli öğütme, geleneksel ergitme yöntemleriyle sentezlenmesi mümkün olmayan yarı kararlı yapıları üretebilen gelişmiş bir yöntem dönüşmüştür.

Öğütme prosesinin temelinde, sürekli rekabet hâlinde bulunan iki ana mekanizma yer alır (Shuai ve ark., 2021):

- Soğuk kaynak ve
- Kırılma.

Gevrek malzemelerde ve iş sertleşmesiyle sünekliğini yitirmiş metallerde kırılma baskınken sünek metallerde, özellikle alüminyum ve bakır gibi, soğuk kaynak mekanizması öne çıkar. Yüksek enerjili çarpışmalar, yerel gerilim yığılmaları oluşturarak çatlak başlatır ve parçacıklar küçük parçalara ayrılır. Öte yandan, sünek metal tozları plastik deformasyona uğrayarak yassılaşır, yüzeydeki oksit tabakaları kırılır ve temiz yüzeylerin temasıyla metalik bağ oluşarak parçacıklar birleşir.

Öğütme süresi uzadıkça bu iki mekanizma bir dengeye ulaşır, kırılma ile birleşme hızları eşitlenerek ortalama parçacık boyutu sabitlenir. Bu denge malzemenin süneklik, sertlik gibi içsel özelliklerine ve proses kontrolü için kullanılan katkıların varlığına bağlıdır (Chandrasekaran ve Xia, 2005).

Mekanik alaşımlama, farklı element tozlarının veya ön alaşımlı tozların bilyeli öğütme yoluyla atomik düzeyde karıştırılarak katı halde alaşımlanması sürecidir. Bu işlem, öncelikle toz parçacıklarının deformasyonu ile başlar, sünek yapılı parçacıklar darbe etkisiyle yassılaşıp pulsu bir morfoloji kazanır. Farklı elementlere ait bu pulsu parçacıklar soğuk kaynak yoluyla birleşerek katmanlı kompozit yapılar oluşturur. Süreç ilerledikçe bu yapılar kırılıp yeniden kaynaklanarak katman kalınlıkları inceler ve difüzyon mesafesi azalır. Öğütmenin devamıyla birlikte, bu katmanlı yapı atomik düzeyde karışarak homojen katı çözeltiler ya da intermetalik fazlar oluşturur. MA'nın en belirgin özelliği, geleneksel yöntemlerle alaşım oluşturulamayan sistemlerde bile genişletilmiş katı çözünürlük sağlayabilmesidir. Bu başarı, mekanik enerjinin sistemi denge dışı bir hâle getirerek termodinamik engelleri aşmasından kaynaklanır ve MA'yı yeni nesil alaşımların üretiminde vazgeçilmez bir yöntem hâline getirir (Suryanarayana, 2022).

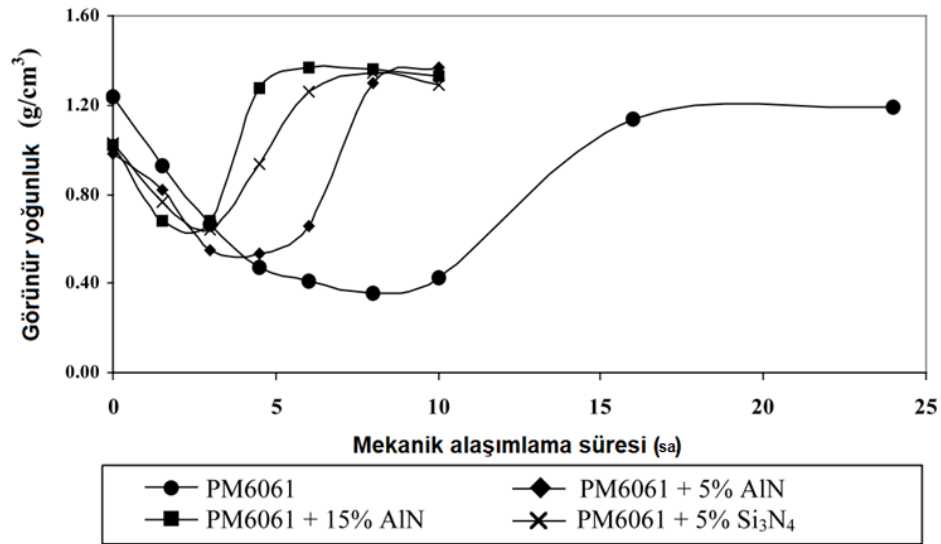
Salur ve ark. (2021) çalışmasında, MA yöntemiyle A7075 matrisli TiC_{NP} takviyeli metal matris kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiş ve farklı öğütme sürelerinin (15 dk–10 saat) morfolojik, kristalografik ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Öğütme süresi arttıkça parçacık boyutunda azalma, yüzey alanında artış ve TiC_{NP} 'nin homojen dağılımı gözlenmiştir. 2 saat öğütme ile homojen dağılım elde edilirken, 10 saatlik sürede tam uniformite sağlanmıştır. Kristalit boyutu başlangıçta artmış, ardından 10 saatte 25,33 nm'ye düşmüştür. Sertlik, öğütme süresiyle artarak 277,55 HB'ye ulaşmıştır. Ancak en yüksek çekme mukavemeti (284,46 MPa), 1 saatlik öğütmede elde edilmiş; uzun öğütme sürelerinin sinterlenebilirliği düşürerek poroziteye yol açtığı ve çekme mukavemetini azalttığı belirlenmiştir. Sonuçlar, optimum mekanik özellikler için öğütme süresinin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2.1. Mekanik alaşımlama parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi (Dwivedi ve ark., 2021)

Dwivedi ve ark. (2021) çalışmasında, alüminyum matrisli kompozit üretiminde MA yönteminin etkinliği istatistiksel olarak değerlendirilmiştir (Şekil 2.1). Krom içeren deri atıklarından elde edilen kolajen tozu ile Al_2O_3 parçacıkları, bilyeli öğütme ile hibrit takviye olarak birleştirilmiştir. Yanıt yüzey metodolojisi ile optimize edilen parametreler 5:1 BPR (bilye/toz oranı), 178 rpm ve 93 saat öğütme süresi olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda hazırlanan hibrit takviyeler, matrisle iyi bir arayüzey oluşturmuş ve homojen dağılım sağlamıştır. Elde edilen Al/%5Kolajen/%5 Al_2O_3 kompozitin çekme mukavemeti %38,25, sertliği ise %45 artmıştır. Çalışma, farklı takviyelerin MA ile etkili biçimde entegre edilerek kompozitlerin performansının artırılabilirliğini göstermiştir.

Siheng ve ark. (2020), Ti-44Al-2Cr-4Nb-0.2W-0.2B alaşımının toz metalurjisi ile üretiminde bilyeli öğütme hızının etkisini incelemiştir. Farklı hızlarda (160, 300, 400 rpm) 2 saat öğütülen tozlar arasında, yüksek hızın aglomerasyon, soğuk kaynak ve iri taneler oluşturduğu, düşük hızın ise homojen karışım, düşük aglomerasyon ve 13 μm partikül boyutu sağladığı belirlenmiştir. Yüksek hızda tane incilmesi (örneğin Al için 19.2 nm) ve artan kafes gerinimi gözlenirse de büyük partikül oluşumu ve düşük verim sinterleme için elverişsiz bulunmuştur. Sonuç olarak, ince ve homojen kompozit tozlar elde etmek amacıyla düşük öğütme hızlarının tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 2.2. Mekanik alaşımlamanın görünür yoğunluğa etkisi (Fogagnolo ve ark., 2003)

Fogagnolo ve ark. (2003), PM6061 alüminyum alaşımına AlN ve Si₃N₄ takviyesi ile MA sürecinin mikroyapı, yoğunluk ve parçacık morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Şekil 2.2'de öğütmenin başında yoğunluk azalmış, süreç ilerledikçe parçacıkların yığılması ve kırılmasıyla yeniden artarak kararlı bir düzeye ulaşmıştır.

Kırılğan takviye fazlarının sünek matrise ilavesi, deformasyonu artırarak öğütme süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Özellikle Si_3N_4 , AlN 'e kıyasla daha etkili olmuştur. Sünek/kırılğan sistemler için üç aşamalı bir mekanizma önerilmiştir. Bu mekanizma; parçacıkların yassılaşması, takviyelerin yerleşimi ve denge durumunda eş eksenli kompozit oluşumunu içermektedir. Çalışma, MA'nın takviye dağılımını iyileştirdiğini ve matrisin mikrosertliğini artırdığını göstermiştir.

Karabulut ve ark. (2013), $\text{Al} + \text{ağ. \%10 Al}_2\text{O}_3$ kompozitleri üzerine yaptığı çalışmada, mekanik alaşımlama süresinin toz morfolojisi, yoğunluk, gözeneklilik ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Sadece karıştırılmış tozların ortalama tane boyutu $69,17 \mu\text{m}$ iken, 10 saatlik öğütme süresi sonunda bu değer $\%50$ 'den fazla azalarak $27,78 \mu\text{m}$ 'ye düşmüştür. 2 saatlik öğütmede ise soğuk kaynaklanma nedeniyle $70,45 \mu\text{m}$ 'ye yükselmiştir. MA uygulanmamış numunelerin gözeneklilik oranı $\%2,8$ iken, 10 saatlik MA sonrası bu oran $\%7,4$ 'e çıkmıştır. MA uygulanmamış ve 10 sa, MA sonrası numunelerin yoğunluğu ise $\%95$ 'ten $\%92$ 'ye düşmüştür. Tüm numunelerde sinterleme sonrası yaklaşık $\%1,5$ oranında yoğunluk artışı gözlenmiştir. Mekanik özellikler açısından, saf Al 'in sertliği 26 HB iken, 10 saat öğütülmüş numunelerde bu değer iki katından fazla artış gösterdiği ve eğme dayanımının da benzer şekilde yaklaşık iki katına ulaştığı bildirilmiştir. Bu bulgular, uzun süreli mekanik alaşımlamanın, homojen takviye dağılımı ve ince tane yapısıyla birlikte malzemenin mukavemetini ve sertliğini anlamlı biçimde artırdığını ortaya koymuştur.

Mekanik alaşımlama yöntemiyle kompozit malzeme üretiminde, nihai ürünün mikroyapısal ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen birçok proses parametresi bulunmaktadır. Özellikle mekanik alaşımlama süresi, öğütme devri, takviye elemanın türü ve miktarı ile toz/bilye oranı gibi değişkenler, farklı araştırmacılar tarafından kendi hedefleri doğrultusunda optimize edilmiştir. Literatürdeki bu çeşitliliği ve genel eğilimleri daha net bir şekilde ortaya koymak amacıyla, alüminyum matrisli kompozitlerin üretimine odaklanan çeşitli çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan temel parametreler Çizelge 2.4'te sunulmuştur.

Literatürdeki çalışmalara göre, mekanik alaşımlama süresi ve hızı nihai malzemenin özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Sürenin artırılması, toz boyutlarını küçülterek tane yapısını inceltse de aynı zamanda tozlarda pekleşmeye yol açarak sünekliği azaltır ve gevrek bir yapıya neden olur. Bu durum, tane sınırı alanını genişleterek korozyon dayanımını da olumsuz etkiler. Benzer şekilde, öğütme hızının artırılması daha ince tane boyutu eldesi için gerekli olsa da bu durum kompozit tozlarda

soğuk kaynak ve aglomerasyon riskini de beraberinde getirmektedir. Ayrıca uzun sürelerde ısınmanın da etkisiyle meydana gelebilecek oksitlenme gibi durumların önüne geçmek için süreci argon gibi koruyucu bir atmosfer altında yürütmek tercih edilir.

Çizelge 2.4. Alüminyum matrisli kompozitler için mekanik alaşımlama parametrelerinin literatür özeti

Matris - Takviye	Takviye Miktarı	MA Süresi	Devir (rpm)	Toz – Bilye Oranı (ağırlıkça)	Bilye Malzemesi	Ref.
AA6061 – AlN, Si ₃ N ₄	%5-15 AlN, %5 Si ₃ N ₄	1,5 saat	700	1/6	20mm AISI 420 paslanmaz çelik	(Fogagnolo ve ark., 2003)
AA7075 - TiC	%5 TiC (nano)	15 dk - 10 saat arası	400	1/10	10mm çaplı Tungsten karbür	(Salur ve ark., 2021)
Al – a-Si ₃ N ₄	%5, 10, 15	5 saat	450	1/10	Çelik bilye	(Arik, 2008)
Al – B ₄ C	%5, 7,5, 10	0, 3, 5, 7 saat	500	1/7	1mm çaplı Tungsten karbür	(Akçamlı ve Şenyurt, 2021)
Al- B ₄ C	%8	20 dk	300	-	5mm çaplı çelik bilye	(Çelik ve Seçilmiş, 2017)
AA2024 – B ₄ C	-	5 saat	250 – 420	1/20	AISI 304L bilyeler	(Nie ve ark., 2007)
A 6061 – B ₄ C	%0,5, 10	0-110 saat (14 değer)	320	1/20	6mm çapında çelik bilyeler	(Khakbiz ve Akhlaghi, 2009)
Al – B ₄ C	%10	0-12 saat arası	600	1/10	-	(Abenojar ve ark., 2007)
AA7075 – B ₄ C	%6	4 saat	300	1/12	Paslanmaz çelik	(Manohar ve ark., 2021a)
Al-SiC- B ₄ C	%2-8 (2 değer)	2 saat	200	1/5	Çelik bilye	(Bodukuri ve ark., 2016)
Al – B ₄ C	%1-5 (5 değer)	16 saate kadar	500	1/10	6mm çaplı çelik bilye	(Alihosseini ve ark., 2017)

Literatür taramasından elde edilen, özellikle uzun işlem sürelerinin yol açtığı gevrekleşme, kirlenme ve aglomerasyon gibi olumsuzluklar göz önünde bulundurularak deneysel çalışma planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, A7075 matrisi, bor karbür (B₄C) ve Ti₃C₂Tx MXene ile takviye edilmiştir. Literatürde gözlemlenen riskleri en aza indirmek amacıyla, her 3 dakikalık öğütmeyi 3 dakikalık bekleme periyodunun izleyeceği ve bilinçli olarak kısa tutulmuş 1, 2 ve 3 saatlik mekanik alaşımlama süreleri çalışılmıştır. Bu süreçte, B₄C takviyesinin ağırlıkça %5, %10, %15 oranları ile MXene takviyesinin ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarının kompozit yapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2.4. Fonksiyonel Geçişli Malzemeler

Fonksiyonel dereceli/geçişli malzemeler (FGM), malzeme özelliklerinin (mikroyapı, gözeneklilik veya diğer fiziksel nitelikler), malzemenin hacmi boyunca bir veya daha fazla yönde sürekli veya kademeli olarak değiştiği kompozit malzeme sınıfı olarak tanımlanır. Bu yapısal değişkenlik, malzemenin farklı bölgelerinde farklı özellikler sergilemesini sağlayarak, geleneksel homojen malzemelerin yetersiz kaldığı karmaşık çalışma koşullarında istenen performansı göstermesine olanak tanır (Li ve ark., 2020).

Doğal yapılar, fonksiyonel gereksinimlere en uygun malzeme dağılımını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Örneğin; insan kemiği, dış kısmında yoğun ve sert kortikal bir yapıya sahipken, iç kısmında daha hafif ve gözenekli bir trabeküler yapıya sahiptir. Bu geçişli yapı, minimum ağırlıkla maksimum dayanım ve tokluk sağlar. Benzer şekilde, insan dişleri de dışta sert ve aşınmaya dayanıklı mine tabakası ile içte daha tok ve esnek dentin tabakası arasında geçişli bir yapıya sahiptir. Bambu gibi bitkilerde ise lif yoğunluğunun dış yüzeye doğru artması, eğilme direncini optimize eder. Bu örnekler, FGM'lerin tasarımında mühendislere ilham kaynağı olmuştur (Sun ve Guo, 2019).

Geleneksel tabakalı kompozit malzemelerin en kritik zayıflığı, farklı özelliklere sahip malzemeler arasında oluşan keskin arayüzeylerdir. Yüksek sıcaklık veya mekanik yükleme altında, tabakaların farklı termal genleşme katsayıları ve elastik modülleri, bu arayüzeylerde ciddi gerilme yığılmalarına neden olarak çatlakların başlaması ve ilerlemesi için zayıf bölgeler oluşturur. Sonuçta delaminasyon olarak bilinen katmanlar arası ayrılmaya yol açarak malzemenin hasar görmesine neden olur (Khan ve Kim, 2022).

FGM'lerin en temel avantajı, bu zayıf ve keskin arayüzeyleri ortadan kaldırmasıdır. FGM'lerde, malzeme özellikleri sürekli bir geçişle değiştiği için, gerilme dağılımı da malzeme boyunca daha homojen bir şekilde yayılır. Bu dereceli geçiş bölgesi, termal ve elastik uyumsuzluklardan kaynaklanan gerilme yığılmalarını önemli ölçüde azaltır. Bu sayede, seramiklerin yüksek sıcaklık direnci, korozyon dayanımı ve sertliği gibi özellikleri ile metallerin yüksek tokluğu, sünekliği ve işlenebilirliği gibi avantajlı özellikleri, arayüzey kaynaklı hasar riski olmaksızın tek bir yapıda birleştirilebilir. Örneğin; bir gaz türbini kanadının yüksek merkezkaç kuvvetlerine maruz kalan kök kısmında yüksek mukavemet, sıcak gazlarla temas eden uç kısmında ise yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci gereklidir. FGM yapısı, bu zıt gereksinimleri tek bir parçada, arayüzey zayıflığı olmadan, en verimli şekilde karşılamayı hedefler (Mahamood ve Akinlabi, 2017).

Toz metalurjisi, fonksiyonel dereceli malzemelerin kütleli üretimi için, farklı bileşimlerdeki tozların katmanlar halinde preslenip sinterlenerek geçişli bir yapı oluşturulmasına dayanan temel bir yöntemdir. Bu yöntem, maliyet etkinliği gibi avantajlar sunsa da en temel dezavantajı sinterleme sonrası yapıda kalan ve malzemenin dayanımını düşüren porozitedir. Bu kritik sorunu aşmak amacıyla, sinterleme sırasında eş zamanlı olarak basınç uygulayan ve tane büyümesini sınırlayan spark plazma sinterlemesi veya sıcak presleme gibi gelişmiş üretim tekniklerinden yararlanılmaktadır (Nemat-Alla ve ark., 2011).

Metal matrisli fonksiyonel geçişli malzemeler, metal bir matris ile seramik bir takviyenin oranını kademeli olarak değiştirerek, tek bir yapıda seramiğin sertlik ve ısı direnci gibi özellikleriyle metalin tokluk ve dayanımını birleştiren hibrit kompozitlerdir. Bu durum, bir yüzeyin aşınmaya veya yüksek sıcaklığa dayanıklı, diğer yüzeyin ise darbelere karşı tok olmasını sağlayarak havacılık ve uzay (termal kalkanlar), savunma sanayii (zırh plakaları), otomotiv (fren sistemleri), biyomedikal (kemik implantları) ve kesici takımlar gibi en zorlu ve yüksek teknoloji mühendislik uygulamaları için ideal çözümler sunar (Manohar ve ark., 2018).

Alüminyum ve alaşımları, metal matris FGM'ler için en popüler matris malzemelerinden biridir. Bunun temel nedenleri arasında düşük yoğunlukları, yüksek mukavemet/ağırlık oranları, yüksek korozyon dirençleri, termal ve elektriksel iletkenlikleri ve nispeten düşük maliyetleri bulunmaktadır. Bu özellikler, alüminyum matrisli FGM'leri özellikle ağırlığın kritik olduğu otomotiv, havacılık ve savunma sanayileri için son derece cazip kılmaktadır. FGM yapısı, alüminyumun doğal tokluğunu ve hafifliğini, seramik takviyelerin sertliği ve aşınma direnciyle birleştirerek, her iki malzemenin de kullanım yerine göre avantajlı yönlerini tek bir parçada toplama imkânı sunar (Erdemir ve ark., 2015).

Alüminyum/Bor Karbür (Al/B_4C) kompozitleri, B_4C 'nin sertliği ve hafifliği sayesinde özellikle zırh uygulamaları için büyük potansiyel taşısada bu sistemin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel, üretim sırasında alüminyum ile reaksiyona girerek zayıf ve gevrek arayüzeyler oluşturmalarıdır. Bu kritik arayüzey sorununu çözmek için en etkili strateji, matrise Titanyum (Ti) gibi aktif elementler eklemektir. Bu elementler, B_4C parçacıklarının etrafında reaksiyona girerek, hem istenmeyen reaksiyonları engelleyen koruyucu bir tabaka oluşturur hem de matris ile takviye arasındaki bağı güçlendirerek kompozitin mekanik bütünlüğünü önemli ölçüde artırır (Wang ve ark., 2023).

Çinici ve ark. (2017), sıcak presleme ile üretilen ağ. %10–60 B₄C takviyeli A7075 FGM’lerin çapraz kırılma dayanımını incelemiştir. Numuneler 250, 350 ve 450 °C sıcaklıklarda; 200, 300 ve 400 MPa basınçlarda üretilmiştir. Sertlik ölçümlerinde, partikül oranı ve presleme basıncı arttıkça değerlerin yükseldiği, 450 °C’de yaklaşık %20 artış sağlandığı görülmüştür. Çapraz kırılma dayanımı ise 250 °C’de 500 MPa iken, 350°C’de 1300 MPa’a, 450 °C’de ise 1800 MPa’a ulaşmıştır. Kırılma dayanımındaki artışın, yüksek sıcaklık ve basınçla arayüzey uyumunun artması ve mikro boşlukların azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Vijay ve CH (2020), nikel kaplı B₄C partikülleri ile takviye edilmiş 601AC ve 201AC matrisli seçici katmanlı FGM’lerin sertlik ve basma dayanımlarını karşılaştırmıştır. Sertlik, iki katmanlı FGM’lerde 55 HV’dan, üç katmanlılarda 73 HV’ye yükselmiştir. En yüksek sertlik değeri (121 HV), 601AC matrisli, 20 µm B₄C içeren ve 570 °C’de sinterlenmiş üç katmanlı numunede elde edilmiştir. Basma dayanımı, nikel kaplama ile 613 MPa’dan 732 MPa’a çıkmıştır. En yüksek basma dayanımı (738 MPa), 201AC matrisli, 570 °C’de sinterlenmiş üç katmanlı nikel kaplı numunelerde kaydedilmiştir. Bulgular, 201AC matrisli numunelerin yüksek sertlik ve basma dayanımı gerektiren uygulamalara daha uygun olduğunu göstermektedir.

Nemat-Alla ve ark. (2011), alüminyum/çelik elektrik geçiş birleşimlerinde (ETJ) görülen çatlama ve ayrılma sorunlarını gidermek amacıyla, bileşimi %100 Al’dan %100 çeliğe kademeli değişen fonksiyonel dereceli malzemeleri toz metalurjisi ile üretmiştir. %95,07 saflıkta Al ve %99,01 saflıkta çelik tozları kullanılarak 2–21 katmanlı altı silindirik numune 990,7 MPa basınçla preslenmiştir. 800 °C’de sinterleme başarısız olurken, 600 °C’de 2 saat sinterleme uygun bulunmuştur. Mikroyapı analizlerinde, 2 katmanlı numunede (S1) büyük çatlaklar gözlenmiş, 3 ve üzeri katmanlarda (S2, S6, S9, S15, S21) çatlak oluşmamış ve bileşim geçişi daha az pürüzlü hale gelmiştir. Katman sayısının artması, arayüz keskinliğini ve termal gerilim yoğunlaşmasını azaltmıştır. Sonuçlar, TM ile üretilen FGM’lerin ETJ’ler için çatlak içermeyen etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Karakoç ve ark. (2024), A6061 matrisli fonksiyonel geçişli kompozitleri sıcak presleme ile üretmiş ve ağ. %5–%50 arasında kademeli Al₂O₃ takviyesi ile 8, 16 ve 32 µm partikül boyutunun etkilerini incelemiştir. 8 µm partiküllü FGM’ler %85,5 daha yüksek aşınma direnci göstermiş ve minimum 0,55 mm³/µNm aşınma oranına ulaşmıştır. Sertlik açısından, 8 µm partiküllü FGM’nin 7. katmanı 92 HB ile en yüksek değeri elde ederek 32 µm partiküllü eşdeğerinden %24,8 daha fazla bir sertliğe ulaşmıştır.

Mikroyapıda, 16 μm partiküllü FGM'ler homojen dağılım göstererek 476,04 MPa maksimum basma dayanımına ulaşmıştır. Sonuçlar, partikül boyutu ve dağılımının mekanik özelliklerde kritik etkisini ortaya koymuştur.

Çizelge 2.5'te verilen kısa literatür taraması, farklı matris/takviye kombinasyonları ve üretim parametreleri kullanılarak üretilmiş FGM'lerin geniş bir yelpazede araştırıldığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 2.5. Toz metalurjisi ile üretilen alüminyum matrisli FGM kompozitlerde takviye ve işlem parametreleri

Matris	Takviye	FGM Tipi	Gözlemler	Ref.
Al-Zn-Mg-Cu	B ₄ C	Güç kanunu ile 5 katmanlı 3 tip FGM	Balistik performans incelendi; en iyi sonuç seramik katkısıyla, 400 MPa, 475 °C, 75 dk	(Sharma ve ark., 2022)
601AC/201AC	B ₄ C	2, 3, 5 katmanlı; %0–5–10–15–20	4 s bilyalı öğütme; 325 MPa; 470–570 °C sinterleme	(Vijay ve CH, 2020)
Al7075	SiC	%0–15–30–45–60 oranlarda 5 katmanlı	300–500 °C, 200–400 MPa	(Kırmızı ve ark., 2019)
601AC	B ₄ C	%5 artışlarla 2, 3, 5 katmanlı	4 s mekanik alaşımlama; 325 MPa; 430–530 °C kademeli sinterleme	(Vijay ve Rao, 2020)
Al	Çelik	2–21 katmanlı	Katman sayısı arttıkça iç gerilme azaldı, sıkıştırma yöntemi katman ayrılmasını önledi	(Nemat-Alla ve ark., 2011)
Al	B ₄ C	%5–10 ağırlıkça	400–500 MPa, 600 °C, 3 s	(Canakci ve ark., 2014)
Al	B ₄ C	%2–12	620 °C sıcak pres	(Brillon ve ark., 2022)
Al6061 (50 μm)	Al ₂ O ₃ (8–16–32 μm)	7 katmanlı (%0–5–10–20–30–40–50)	10:1 oran; 550 °C, 200 MPa sıcak pres	(Karakoç ve ark., 2024)
AA5083	Al ₂ O ₃	7 katmanlı, %0–60	500 °C, 300 MPa sıcak pres	(Ardıçoğlu ve ark., 2023)
Al7075	Al ₂ O ₃	3, 4, 6 katmanlı, %10–60	450 °C, 325 MPa sıcak pres; %30'a kadar homojen dağılım	(YILDIZ ve SURa)
AA7075	B ₄ C	%10–60, 5 katmanlı	250–450 °C, 200–400 MPa	(Çinici ve ark., 2017)

Çalışmalar incelendiğinde, Al-Zn-Mg-Cu, 601AC/201AC, Al7075, Al6061, AA5083 ve saf Al gibi farklı alüminyum alaşımlarının matris olarak tercih edildiği; takviye malzemesi olarak ise B₄C, SiC, Al₂O₃ ve çelik partiküllerinin öne çıktığı görülmektedir. Katman sayısı ve takviye oranının değişimi, çoğu çalışmada mikroyapı homojenliği, sertlik, basma dayanımı, balistik performans ve tribolojik özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır.

Literatür taraması sonrası elde edilen bulgular genel olarak aşağıdaki gibidir:

- Takviye oranı arttıkça sertlik ve aşınma direncinde artış görülmektedir ancak yüksek oranlarda ise porozite ve aglomerasyon artmaktadır.

- Katman sayısının artmasıyla arayüzey gerilmeleri ve delaminasyon riski azalmakta, mukavemet ise artmaktadır.
- Üretim parametrelerinin (sıcaklık, basınç, mekanik alaşımlama süresi) optimize edilmesi, arayüzey bağ kuvveti ve yoğunluk üzerinde kritik öneme sahiptir.
- B₄C ve Al₂O₃ gibi seramik takviyeler, yüksek sertlik ve balistik performans sağlarken, nikel kaplama, partikül/matris arayüz uyumunu ve yük transferini artırarak basma dayanımını artırmaktadır.

Yapılan literatür taraması ve elde edilen bulgular, FGM kompozitlerin performansının büyük ölçüde takviye türü, katman yapısı ve üretim parametrelerinin hassas kontrolüne dayandığını göstermektedir. Ancak mevcut literatürün genellikle geleneksel seramik takviyelere odaklandığı ve parametre etkilerini nitel olarak ele aldığı görülmektedir. Bu çalışma, hem B₄C ve yeni nesil 2D Ti₃C₂T_X MXene'i hibrit bir FGM yapısında birleştirmesi hem de üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini istatistiksel olarak sunan Taguchi deney tasarımı ile modelleyerek nicel olarak ortaya koyması yönünden literatürü katkı sunmayı amaçlamıştır.

2.5. Taguchi Analizi ile Optimizasyon

Japon sanayisinde başarıyla uygulanarak ortaya çıkan Taguchi metodu, 1980'lerde Ford, Boeing ve Xerox gibi Amerikan şirketleri tarafından benimsenmiş ve imalattan Ar-Ge süreçlerine kadar yayılmıştır. 1983'ten itibaren Amerikan Tedarikçi Enstitüsü'nün yıllık sempozyumlarıyla uluslararası ölçekte kurumsallaşmıştır (Mori ve Tsai, 2011).

Taguchi'nin kalite felsefesi, kontrol edilemeyen gürültü faktörleri altında bile performansı tutarlı kılmayı hedefleyen sağlam tasarım ilkesine dayanır. Kaliteyi sonradan kontrol etmek yerine tasarım aşamasında sağlamayı amaçlar. Bu yaklaşım, üç aşamalı bir süreç izler (Dehnad, 2012):

- Sistem tasarımı (malzeme, parça ve süreç mimarisinin belirlenmesi),
- Parametre tasarımı (kontrol edilebilir parametrelerin ayarlarının optimize edilerek gürültüye karşı duyarsızlaştırılması) ve
- Tolerans tasarımı (kritik parametre toleranslarının sıkılaştırılması).

Ekonomik verimlilik prensibiyle, önce maliyetsiz optimizasyon (parametre tasarımı) hedeflenir, yalnızca gerekli olduğunda maliyetli tolerans ayarlamalarına başvurulur.

Taguchi deney tasarımında faktör, incelenmek istenen ve deneyin sonucunu etkileyebilecek değişkeni ifade eder. Örneğin, bir üretim sürecinde sıcaklık, basınç veya

sinterleme süresi ayrı birer faktördür. Seviye ise her faktörün alabileceği farklı ayar veya değerleri temsil eder. Örneğin, sıcaklık faktörü için 450 °C, 500 °C ve 550 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık ayarı varsa, bu faktör 3 seviyeli kabul edilir. Ortogonal diziler, bu faktörleri ve seviyelerini öyle bir düzenler ki her seviyenin diğer faktörlerin seviyeleriyle eşit sayıda kombinasyon oluşturması sağlanır. Bu sayede her faktörün etkisi, diğer faktörlerden bağımsız olarak ölçülebilir (Chen ve ark., 2022).

Ortogonal dizi seçimi, deneyde yer alan faktörlerin sayısı ve bu faktörlerin sahip olduğu seviye sayısına göre yapılır. Örneğin, her biri 3 seviyeli (örneğin, A, B, C) dört farklı faktörün (örneğin, 1, 2, 3, 4) etkisini araştırmak istediğimizi varsayalım. Bu durumda, en az dört adet 3 seviyeli faktörü test edebileceğimiz bir ortogonal diziye ihtiyacımız vardır. Taguchi'nin standart ortogonal dizi tablolarından bu koşulu sağlayan L9 dizisi (3^4) seçilir. L9 dizisi, 9 deneyden oluşur ve her bir faktörün her bir seviyesinin (A, B, C), diğer faktörlerin tüm seviyeleriyle dengeli bir şekilde (bu durumda her biri üçer kez) bir araya geldiği bir deney matrisi sunar. Bu yapı, toplamda 81 olası kombinasyonu sadece 9 deneye indirgeyerek zaman ve maliyetten büyük tasarruf sağlarken, faktör etkilerini güvenilir bir şekilde analiz etme olanağı tanır. Bu tür karmaşık deney tasarımlarının ve uygun ortogonal dizinin seçiminin pratik bir şekilde yapılması için istatistiksel yazılımlardan faydalanılabilir ve bu alanda Minitab programı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sinyal/Gürültü (S/N) oranı, Taguchi analizinde performansı değerlendirmek için kullanılan temel ölçüttür. Hem ortalamayı (sinyal) hem de değişkenlikleri (gürültü) tek bir değerde birleştiren logaritmik bir fonksiyondur. Kalite karakteristiği ne olursa olsun, evrensel amaç S/N oranını maksimize etmektir. Daha yüksek bir S/N oranı, gürültü faktörlerinin etkilerine daha az duyarlı olan, yani daha sağlam bir tasarıma karşılık gelir. S/N oranı, birleşik bir varyans stabilizasyonu ve optimizasyon dönüşümüdür (Turan ve ark., 2025).

Bu yöntem, belirlenen kalite amacına uygun en iyi parametre kombinasyonlarını seçmeyi sağlar. Genel olarak üç temel kullanım alanı vardır:

- **Daha Büyük Daha İyidir:** Ölçülen değer mümkün olduğunca yüksek olması istendiğinde kullanılır. Özellikle mukavemet, verimlilik veya enerji çıktısının artırılması hedeflenen durumlarda tercih edilir. Örneğin, bir malzemenin çekme dayanımını ya da bir motorun güç çıkışını artırmak isteyen çalışmalarda uygundur.
- **Daha Küçük Daha İyidir:** Ölçülen değer mümkün olduğunca düşük olması gerektiğinde uygulanır. Aşınma miktarını azaltmak, hata oranını düşürmek, yüzey

pürüzlülüğünü en aza indirmek veya emisyon değerlerini azaltmak gibi kalite hedeflerinde kullanılır. Özellikle üretim hatalarını, kirliliği ya da istenmeyen kayıpları minimize etmeyi amaçlayan proseslerde etkilidir.

- Nominal En İyisidir: Ölçülen değerin belirli bir hedef değere en yakın olmasının istendiği durumlarda uygulanır. Bu yaklaşımda hem hedefe yakınlık hem de değişkenliğin düşük olması önemlidir. Örneğin, bir mil çapının tam istenen ölçüde üretilmesi, elektriksel direnç değerinin belirli bir standarda ulaşması veya bir karışımın belirli bir kimyasal oranda olması gereken durumlarda tercih edilir.

Sinyal/Gürültü (S/N) analizi, her bir faktörün en uygun seviyesini belirleyerek maksimum performans veya minimum varyasyonu hedeflerken; Varyans Analizi (ANOVA), bu faktörlerin istatistiksel önemini ortaya koyar. ANOVA, toplam varyasyonu faktörler ve deneysel hata bileşenlerine ayırarak hangi faktörün ne kadar etkili olduğunu ölçer. Bu süreçte serbestlik derecesi, kareler toplamı, ortalama kare, F-değeri ve yüzde katkı gibi istatistiksel değerler hesaplanır. Özellikle yüzde katkı (%P) değeri, hangi faktörlerin sonuç üzerindeki etkisinin baskın olduğunu göstererek, maliyetli tolerans iyileştirme çalışmalarında yalnızca en kritik parametrelere odaklanılmasını sağlar (Karna ve Sahai, 2012).

Optimum parametrelerin belirlenmesinde ise S/N analizinden elde edilen ana etki grafikleri kullanılır. Her faktör için en yüksek S/N oranına sahip seviye seçilerek optimum kombinasyon oluşturulur. Daha sonra, bu kombinasyonda beklenen S/N oranı, faktörlerin bireysel etkilerinin toplamına dayanan bir modelle tahmin edilir. Böylece deney sonuçlarına dayalı olarak hem istatistiksel olarak anlamlı hem de gerçek uygulamalarda yüksek performans sağlayacak parametre ayarları belirlenmiş olur.

Doğrulama deneyi, analizden elde edilen optimum parametre ayarlarının geçerliliğini test eden son ve kritik adımdır. Bu aşamada, tahmin edilen en uygun parametre kombinasyonu kullanılarak yeni deneyler gerçekleştirilir ve elde edilen gerçek performans değeri, toplamsal modelden hesaplanan tahmini performans ile karşılaştırılır. Gerçek sonuç tahmine yakınsa hem deneyin hem de etkileşimlerin ihmal edilebileceğini varsayan toplamsallık yaklaşımının doğru olduğu kabul edilir (Naik ve Reddy, 2018).

Alrebdı ve ark. (2022), nano B₄C (ağ. %1) ve mikron TiC (ağ. %3) takviyeli A4015 matrisli kompozitlerin toz metalurjisi proses parametrelerini Taguchi L9 ortogonal dizisi ve ANOVA ile optimize etmiştir. Çalışma, A4015 matrisli kompozitlerin yoğunluk, Vickers sertliği ve basma mukavemeti üzerindeki en etkili parametreleri belirlemiştir. Bulgulara göre, düşük yoğunluk için optimum koşullar 2,25 saat sinterleme

süresi, 640 °C sıcaklık ve 300 MPa sıkıştırma basıncı olup, en etkili faktör %75,68 katkı ile sıkıştırma basıncıdır. Yüksek sertlik için 2,5 saat, 640 °C ve 400 MPa optimum değerler olup, sıkıştırma basıncı (%56,78) ve sinterleme süresi (%23,82) en etkili faktörlerdir. Maksimum basma dayanımı ise 2 saat, 620 °C ve 300 MPa ile elde edilmiş; sinterleme süresi (%52,76) ve sıcaklığı (%27,62) en yüksek etkiyi göstermiştir.

Al Njjar ve ark. (2024) çalışması, A7075/SiC kompozitlerinin TM parametrelerini Taguchi L9 ve ANOVA ile optimize ederek havacılık uygulamaları için yoğunluk, sertlik ve basma mukavemetini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Optimum değerler, düşük yoğunluk için ağ. %3 SiC, 450 MPa, 600 °C ve 60 dk; yüksek sertlik ve mukavemet için ağ. %9 SiC, 650 MPa, 620 °C ve 120 dk olarak belirlenmiştir. ANOVA sonuçlarına göre en etkili faktör sıkıştırma basıncı olup, yoğunlukta %82,99, sertlikte %45,14 ve mukavemette %41,24 katkı sağlamıştır. Ağırlıkça %7,5 SiC takviyesi, önceki çalışmalara kıyasla basma mukavemetini %51,25 artırarak 363,7 MPa'a ulaştırmış ve yoğunluğu %7,12 azaltarak 2,61 g/cm³'e düşürmüştür. Geliştirilen modellerinin %5'ten düşük hata payı ile deneysel sonuçlara uyum göstermesi, maliyetli deneme ihtiyacını azaltmıştır.

Surya ve ark. (2021), toz metalurjisiyle üretilen A7075/SiC kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini optimize etmek amacıyla ANOVA ve yapay sinir ağı (ANN) tekniklerini birlikte kullanmıştır. Pin-on-disk testleri, 10–30 N yük, 500–1500 m kayma mesafesi, 1 m/s hız ve L27 ortogonal dizisinde gerçekleştirilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, yük (%77,16), ardından kayma mesafesi (%16,35) ve SiC oranı (%6,49) hacim kaybına en büyük etkiyi yapmıştır. En düşük hacim kaybı 10 N, 500 m ve ağ. %6 SiC koşullarında elde edilmiştir.

Literatürde etkinliği kanıtlanmış olan Taguchi metodu, toz metalurjisi vasıtasıyla FGM kompozitlerin üretiminde çok sayıda ve birbiriyle etkileşimli proses parametresinin, en az deney sayısı ile en verimli şekilde optimize edilmesi ve en etkili faktörlerin belirlenmesi amacıyla bu çalışmanın temel stratejisi olarak benimsenmiştir.

2.6. 2 Boyutlu MXene Takviye Tozları

MXene, MAX fazı olarak bilinen katmanlı karbür ve nitrür seramiklerden türetilen iki boyutlu geçiş metali karbürleri, nitrürleri veya karbonitrürleridir. Sentezlerinde, üç boyutlu MAX fazı kristalinin yapısındaki belirli bir atom katmanı, seçici bir kimyasal dağılama prosesi ile uzaklaştırılır. Bu işlem sonucunda, geriye grafen benzeri atomik kalınlıkta, katmanlı bir yapı kalır (Lei ve Lin, 2022).

MXene'lerin kimyasal ve yapısal çeşitliliği, genel formülleri olan $M_{n+1}X_nT_x$ ile ifade edilir. Bu formüldeki her bir bileşen, malzemenin nihai özelliklerini belirleyen kritik bir rol oynar (Downes ve ark., 2024):

- M: Bir veya daha fazla erken geçiş metalini temsil eder. Titanyum (Ti), Vanadyum (V), Niyobyum (Nb), Molibden (Mo) ve Krom (Cr) en yaygın kullanılan M elementleridir.
- X: Karbon (C) ve/veya Azot (N) atomunu ifade eder.
- n: Bu indis, M katmanlarının sayısını belirler ve genellikle 1, 2 veya 3 değerini alır. Bu değer, MXene yaprağının kalınlığını doğrudan etkiler (örneğin, Ti_2CT_x , $Ti_3C_2T_x$, $Ti_4C_3T_x$).
- T_x : Dağlama işlemi sırasında, öncül MAX fazındaki aşındırılan katmanının ayrıldığı yüzeylerde oluşan fonksiyonel sonlandırma gruplarını temsil eder. Bu gruplar genellikle Oksijen (-O), Hidroksil (-OH), Florür (-F) veya Klorür (-Cl) gibi gruplardır. Bu yüzey grupları, MXene'lerin yüzey kimyasını, diğer malzemelerle etkileşimini ve fiziksel özelliklerini kökten değiştirir ve onları diğer 2 boyutlu malzemelerden ayıran en önemli özelliklerden biridir.

Çoğu 2 boyutlu malzeme yalıtkan veya yarı iletken karakter gösterirken, MXene'ler doğal olarak metalik iletkenlik sergiler ve özellikle $Ti_3C_2T_x$ tipi, tek katmanda 10.000 S/cm'yi aşan elektriksel iletkenliğe ulaşarak elektromanyetik girişim kalkanlama, şeffaf iletken filmler, antenler ve yüksek güçlü enerji depolama sistemleri için ideal hale gelir. Yüksek sertlik ve mukavemetleri, onları polimer ve metal matrisli kompozitlerde etkili takviye malzemesi yaparken yüzeylerindeki T_x fonksiyonel grupları kararlı dağılım (zamanla aglomere olmaz) imkânı sunar. Bu fonksiyonel gruplar aynı zamanda sensör, katalizör ve biyomedikal cihazlarda aktif bölgeler oluşturarak güçlü arayüzey bağları kurmalarına katkı sağlar. Atomik kalınlıktaki katmanlı yapılarından kaynaklanan yüksek özgül yüzey alanı ise iyon ve molekül etkileşimleri için geniş aktif bölgeler sunarak süperkapasitör, batarya ve kataliz gibi yüzey alanına duyarlı uygulamalarda kritik bir avantaj sağlar (Lei ve ark., 2015).

MXene'lerin sentezinde birçok çalışmada dağlayıcı olarak yüksek konsantrasyonlu hidroflorik asit (HF) kullanılmıştır. Süreç, aşağıdaki reaksiyonlarla ifade edilir (Alhabeb ve ark., 2017):



2. Yüzey Fonksiyonelleşmesi: $Ti_3C_2 + 2H_2O \rightarrow Ti_3C_2(OH)_2 + H_2$ veya $Ti_3C_2 + 2HF \rightarrow Ti_3C_2F_2 + H_2$

HF ile aşındırma yöntemi etkili olsa da önemli sınırlamalara sahiptir:

- Tehlikeli toksit özellik: HF son derece korozif ve zehirli olup, insan sağlığı ve çevre açısından ciddi riskler taşır. Bu durum, kullanım, depolama ve atık yönetimini hem tehlikeli hem de maliyetli hale getirir.
- Yapısal kusurlar: Yüksek HF konsantrasyonu veya uzun dağlama süreleri, MXene yapraklarında istenmeyen kusurlar oluşturabilir, pul boyutunu küçültebilir ve yapının bütünlüğünü bozabilir.
- Performans düşürücü yüzey grupları: Yöntem, MXene yüzeylerinde kaçınılmaz olarak florür (-F) grupları bırakır. Bu gruplar, özellikle lityum-iyon piller gibi elektrokimyasal uygulamalarda iyon taşınımını kısıtlayarak performansı olumsuz etkileyebilir.

Ti_3C_2Tx MXene, öncül malzemesi olan Ti_3AlC_2 MAX fazının kimyasal olarak seçici aşındırma ile sentezlenir. Sentez sonrası malzemenin karakterizasyonu, yapının ve özelliklerin doğrulanması için kritik öneme sahiptir. Başlıca karakterizasyon teknikleri şunlardır (Alhabeab ve ark., 2017):

- X-Işını Kırınımı (XRD): Ti_3AlC_2 'nin (002) kırınım pikinin kaybolması ve daha düşük bir açıda yeni bir Ti_3C_2Tx (002) pikinin ortaya çıkması, Al katmanının başarıyla uzaklaştırıldığını ve katmanlar arası mesafenin (c-kafes parametresi) arttığını teyit eder.
- Taramalı/Geçirimli Elektron Mikroskobu (SEM/TEM): Bu teknikler, malzemenin morfolojisini görselleştirir. Dağlama sonrası elde edilen çok katmanlı tozların akordeon benzeri karakteristik yapısı ve delaminasyon sonrası elde edilen ince, 2 boyutlu yapraklar bu mikroskoplarla gözlemlenir.
- X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS): MXene yüzeyindeki T_x fonksiyonel gruplarının (-O, -OH, -F) varlığını ve kimyasal bağ durumlarını tespit etmek için kullanılır.

Desai ve ark. (2025), çalışmalarında, A7075 alaşımının tribolojik performansını artırmak amacıyla Ti_3AlC_2 partikülleri ilavesi ve sürtünme karıştırma işleminin mikro yapı, mikrosertlik ve aşınma özelliklerine etkilerini incelemiştir. Mikroyapı analizleri hem saf A7075 hem de Al- Ti_3AlC_2 kompozitlerinde belirgin tane incelmeleri olduğunu göstermiştir. Alan haritalama sonuçlarına göre Ti_3AlC_2 partikülleri işlenmiş bölgede

homojen olarak dağılmıştır. Mikrosertlik değerleri saf A7075'te 100 HV_{0.2} iken, FSP uygulanmış saf metalde 180 HV_{0.2}'ye, Al–Ti₃AlC₂ kompozitinde ise 350 HV_{0.2}'ye yükselmiştir; bu artış esas olarak tane incelmeye bağlanmıştır. Mikroyapıdaki bu gelişim, işlenmemiş ana metale kıyasla aşınma direncini de yaklaşık 5 kat artırmıştır. SEM görüntüleri, ana aşınma mekanizmasının değişken şiddette abrazyon aşınma olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, MXene kökenli Ti₃AlC₂ fazının, A7075 matrisinde FSP ile homojen dağılım sağlayarak hem sertlik hem de tribolojik dayanımı artırdığını göstermektedir.

Cygan ve ark. (2021) ,Ti₃C₂ MXene fazlarının Al₂O₃ seramik kompozitlere eklenmesinin yapı ve mekanik performansa etkilerini incelemiş, yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeyi önlemek amacıyla Ti₃C₂ yüzeyine titanyum veya molibden kaplama uygulamıştır. Toz metalürjisi ve kıvılcım plazma sinterleme (SPS) ile üretilen numunelerde, kaplama yapılmamış Ti₃C₂ eklenmesi gözenekli bölgeler ve çatlaklar oluştururken, Ti/Mo kaplama gözeneksiz arayüz oluşumu sağlayarak sorunları gidermiştir. Sertlik, Ti ve Mo kaplamalı örneklerde yaklaşık 2017 HV ve 2020 HV'ye (%10 artış) çıkmıştır. Kırılma dayanımı ise %0,5 Ti₃C₂–Mo katkılı numunede 4,59 MPa·√m değerine (%15 artış) artmıştır. Ayrıca, kırılma modu taneler arasındaki kırılmadan, taneler arası ve taneler içi kırılmanın birlikte görüldüğü daha karmaşık bir yapıya dönüşmüştür.

Literatürdeki durum incelendiğinde, alüminyum matrisli kompozitlerin B₄C gibi seramiklerle takviye edilmesi üzerine kapsamlı bir bilgi birikimi mevcut olsa da Ti₃C₂T_x MXene'nin metal matrisler içindeki davranışını inceleyen çalışmaların son derece sınırlı olduğu görülmektedir. Bu alandaki boşluk, özellikle MXene'nin B₄C ile hibrit olarak ve fonksiyonel derecelendirilmiş (FGM) bir yapıda kullanıldığı sistemlerde daha da belirgindir. Bu çalışma, literatürde henüz araştırılmamış hibrit FGM kompozitlerini hem üretmekte hem de basma, sertlik, yoğunluk ve aşınma gibi temel performans testleri ile SEM, XRD ve EDS gibi detaylı mikroyapısal analizlerini bütüncül bir yaklaşımla yürüterek kapsamlı bir temel karakterizasyon sunmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel sürecin tüm adımlarını sistematik ve tekrarlanabilir şekilde sunmak amacıyla çalışmada kullanılan malzemeler, numune hazırlık süreci, uygulanan üretim yöntemleri ve karakterizasyon teknikleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1. Malzemeler

Bu çalışmada matris malzeme olarak A7075 alüminyum alaşımı, takviye fazı olarak ise bor karbür (B_4C) seramiği ve $Ti_3C_2T_x$ MXene fazı kullanılmıştır. A7075 tozu $70\ \mu m$, B_4C tozu $40\ \mu m$ ve MXene elde etmek için kullanılan Ti_3AlC_2 tozu $44\ \mu m$ ortalama parçacık boyutuna sahiptir. Belirtilen tozlar ticari saflıkta olup ISM Dış Ticaret Pazarlama Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. $Ti_3C_2T_x$ MXene fazı ise doğrudan satın alınmamış, Ti_3AlC_2 MAX fazından sentezlenerek elde edilmiştir. Kullanılan tozların fiziksel ve kimyasal özellikleri, temin edilen firma verilerine göre Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Satın alınan toz malzemelerin temel özellikleri

Özellik	A7075	B_4C	Ti_3AlC_2
Ortalama Parçacık Boyutu (μm)	70	40	44
Yoğunluk (g/cm^3)	2,81	2,52	4,2
Erime Noktası ($^{\circ}C$)	630	2450	1580
Sertlik	170 (HB)	3000 (HV)	450 (HB)
Kristal Yapı	Yüzey Merkezli Kübik	Ortorombik / Hekzagonal	Hekzagonal (MAX faz)
Renk	Gri Metalik	Siyah	Gri-siyah

Çalışma kapsamında referans oluşturma için temin edilen tozlarının ve MAX fazından elde edilen MXene fazının mikro yapısal karakterizasyonları yapılmıştır. Bu amaçla SEM görüntüleri (Şekil 4.42 ve Şekil 4.44), XRD grafikleri (Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39) ve parçacık boyut analizleri (Şekil 4.40 ve Şekil 4.41) elde edilmiştir. Bu karakterizasyon sonuçlarına, “Araştırma Sonuçları ve Tartışma” bölümünde ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

A7075, çinko (Zn) esaslı yapısıyla dikkat çeker ve ısı ile sertleştirilebilir. Bu alaşım, tüm alüminyum grupları içinde en yüksek çekme ve akma mukavemetine ulaşarak havacılık ve savunma gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. T6 temperinde maksimum dayanım elde edilebilirken T73 temperinde ise korozyon direnci ve tokluk gibi özellikler optimize edilebilir. Böylece, aynı kimyasal kompozisyonla farklı mühendislik ihtiyaçlarına cevap verilebilir. A7075’in bu özellikleri, alüminyum matrisinde bulunan

alaşım elementlerinin (Çizelge 3.2) mikroyapısal etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Her bir element, malzemenin nihai performansına yön veren kritik bir rol üstlenir.

Çizelge 3.2. A7075 alaşımının standart kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %)

Element	Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Mn	Ti	Al
Ağırlıkça (%)	5,6±0,5	2,5±0,4	1,6±0,4	0,23 ±0,05	0,2 ±0,2	0,2 ±0,2	0,3 (Maks)	0,2 (Maks)	Kalan

Alaşımındaki çinko, en yüksek oranda bulunan element olarak çökeltme sertleşmesini başlatır ve mukavemeti belirleyen temel fazların oluşumuna öncülük eder. Magnezyum, çinko ile bu fazların oluşumunu destekleyerek sertleşmeyi etkin hale getirir. Bakır ilavesiyle birlikte, alaşımın çekme ve akma dayanımı daha da artar ancak bu kazanım, korozyon direnci açısından dikkatle sınırlandırılmış bir orandadır. Krom, yeniden kristalleşmeyi engelleyerek tane yapısını kontrol altında tutar ve özellikle gerilme korozyonu çatlamasına karşı yapısal denge sağlar. Böylece alaşım hem mekanik olarak hem de çevresel etkilere karşı uzun ömürlü bir yapıya kavuşur. Düşük oranlarda bulunan mangan, titanyum, demir ve silisyum gibi elementler ise alaşımın mikro düzeydeki bütünlüğünü etkiler. Manganez, tane inceliğine katkı sağlayarak yapısal homojenliği artırırken, titanyum döküm sırasında başlangıç yapısının kontrolüne yardımcı olur. Demir ve silisyum gibi empüriteler, istenmeyen intermetalik fazlara neden olabileceğinden minimum seviyede tutulur.

A7075 alaşımının yüksek performanslı bir mühendislik malzemesine dönüşüm süreci, iki aşamalı hassas bir ısıtma işlemi dizisine dayanır. İlk aşamada alaşım, yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak çinko, magnezyum ve bakır gibi elementlerin alüminyum matrisi içinde homojen bir şekilde çözünmesi sağlanır ardından hızla soğutulularak bu yapı oda sıcaklığında sabitlenir. Bu işlemi takip eden yaşlandırma aşamasında ise mikroyapıdaki çökeltiler kontrollü olarak oluşturulur ve bu çökeltiler, malzemenin sertlik ve mukavemetini önemli ölçüde artırır. Uygulanan bu temel işlemlerin süre ve sıcaklık varyasyonlarına göre O, T6, T651, T73 ve T7351 gibi farklı temperler elde edilir. Bu temperler; süneklik, işlenebilirlik, korozyon direnci ve iç gerilme azaltımı gibi performans parametrelerinde belirgin farklılıklar oluşturarak A7075'in uygulama alanlarını çeşitlendirir.

Bor karbür (B_4C), sahip olduğu nitelikleriyle yüksek teknoloji dünyasında kritik bir yapı taşıdır. Yüksek sertliğinin yanı sıra düşük yoğunluğu, yüksek termal kararlılığı ve nötron soğurma kapasitesi gibi çok yönlü özellikleri (Çizelge 3.3), B_4C 'yi savunma

sanayisinden nükleer enerjiye kadar pek çok stratejik alanda vazgeçilmez hale getirmiştir. Hafifliğine rağmen sunduğu balistik direnç, onu zırh sistemlerinin temel bileşeni yaparken, nükleer reaktörlerdeki nötron kontrolünde oynadığı rol, enerji güvenliğinde belirleyici bir unsur olarak öne çıkarır.

Çizelge 3.3. Bor karbür (B_4C) malzemesinin temel fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Yoğunluk (g/cm^3)	Erime Noktası ($^{\circ}C$)	Sertlik (HV)	Elastisite (GPa)	Bulk Modülü (GPa)	Termal Kararlılık ($^{\circ}C$)
Değer	$2,50 \pm 0,05$	2450	3300 ± 300	440 ± 20	250 ± 20	1200

Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %73'üne sahip olan Türkiye, sahip olduğu doğal kaynak üstünlüğünü katma değeri yüksek ürünlere dönüştürme hedefiyle son yıllarda önemli adımlar atmıştır. Eti Maden'in endüstriyel üretim kapasitesinin artırılması, Nurol Teknoloji gibi özel sektör aktörlerinin küresel savunma pazarındaki yükselişi ve TÜBİTAK ile üniversitelerin ortak yürüttüğü ileri malzeme Ar-Ge projeleri, Türkiye'nin bor karbürü sadece bir ham madde değil, stratejik bir ürün haline getirme vizyonunun somut göstergeleridir.

$Ti_3C_2T_x$ MXene, geçiş metali karbürlerinden türetilen ve 2 boyutlu yapısıyla yüksek elektriksel, termal ve mekanik özellikler sunan yenilikçi bir nanomalzemedir. MAX fazı öncülünden seçici dağlama yoluyla elde edilen bu yapı, yüksek yüzey alanı, iyi iletkenlik, katmanlı morfoloji ve ayarlanabilir yüzey kimyası gibi özellikleriyle malzeme biliminde dikkat çekmektedir. Tek katmanlı formlarda 0,48 TPa Young modülü ve 15,4 GPa'lık çekme mukavemetiyle $Ti_3C_2T_x$, yalnızca elektronik ve enerji uygulamalarında değil, aynı zamanda yapısal mühendislik çözümlerinde de önemli bir potansiyele sahiptir.

Metal matrisli kompozitlerde $Ti_3C_2T_x$ 'in takviye olarak kullanımı, birden fazla özelliği eş zamanlı geliştirme yeteneğinden dolayı büyük önem taşımaktadır. MXene'ler, yüksek elastisite modülleri sayesinde yük transferini kolaylaştırırken, 2 boyutlu yapılarının sunduğu bariyer etkisiyle dislokasyon yoğunluğunu artırmaya olanak tanır. Ayrıca, yüzeylerinde bulunan fonksiyonel gruplar sayesinde metal matrislerle güçlü arayüzey bağları oluşturabilir.

3.2. Taguchi Deney Seti Tasarımı

Deneysel parametrelerin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu kapsamda belirlenen kontrol faktörleri ve seviyeleri Çizelge 3.4'te verilmiş olup, deneysel

çalışmalar bu parametre kombinasyonlarına göre yürütülmüştür. Kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviyeler, literatürdeki çeşitli çalışmaların derlenmesiyle belirlenmiş olup tüm faktörlerin eş zamanlı etkilerinin incelenmesiyle kapsamlı bir analiz hedeflenmiştir.

Çizelge 3.4. Taguchi deney tasarımında kullanılan faktör ve seviyeleri

Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (sa.)	Bilyeli Öğütme Süresi (sa.)	Katman Adedi
300	550	1	1	3
400	570	2	2	5
500	590	3	3	7

Belirlenen faktör ve seviyeler doğrultusunda oluşturulan Taguchi L27 ortogonal dizi Çizelge 3.5'te verilmiş olup numune üretimleri ve testler bu deneysel tasarım ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.5. Üretimi ve testleri gerçekleştirilen numune tipleri

Bilyeli Öğütme (sa.)	Katman Adedi	Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Sinterleme Süresi (sa.)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Kod
1	3	300	1	550	13a-1a
1	5	300	1	550	15a-1a
1	7	300	1	550	17a-1a
2	3	300	2	570	23a-2b
2	5	300	2	570	25a-2b
2	7	300	2	570	27a-2b
3	3	300	3	590	33a-3c
3	5	300	3	590	35a-3c
3	7	300	3	590	37a-3c
3	3	400	2	550	33b-2a
3	5	400	2	550	35b-2a
3	7	400	2	550	37b-2a
1	3	400	3	570	13b-3b
1	5	400	3	570	15b-3b
1	7	400	3	570	17b-3b
2	3	400	1	590	23b-1c
2	5	400	1	590	25b-1c
2	7	400	1	590	27b-1c
2	3	500	3	550	23c-3a
2	5	500	3	550	25c-3a
2	7	500	3	550	27c-3a
3	3	500	1	570	33c-1b
3	5	500	1	570	35c-1b
3	7	500	1	570	37c-1b
1	3	500	2	590	13c-2c
1	5	500	2	590	15c-2c
1	7	500	2	590	17c-2c

Her bir deney koşulunda gözlemlenen tepkiler, optimize edilmek istenen performans ölçütleri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları ve buna karşılık gelen S/N oranları “Araştırma Sonuçları ve Tartışma” bölümünde sunulmuştur.

Deneyisel çalışmalarda elde edilen verilerin sistematik bir şekilde analiz edilebilmesi amacıyla, her numune için belirli bir kodlama sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, numunelerin üretim parametrelerine (sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, mekanik alaşımlama süresi ve katman sayısı) göre tanımlanarak deney sonuçlarının takibini ve karşılaştırmasını kolaylaştırmaktadır. Bu kapsamda örnek kodlamalar ve açıklamaları aşağıdaki gibidir;

Örnek Kodlamalar:

- **13a-1a:** 1 saat MA - 3 katmanlı - 300 MPa basınç - 1 saat / 550 °C sinterleme
- **25b-2b:** 2 saat MA - 5 katmanlı - 400 MPa basınç - 2 saat / 570 °C sinterleme
- **37c-3c:** 3 saat MA - 7 katmanlı - 500 MPa basınç - 3 saat / 590 °C sinterleme

3.3. Hibrit Kompozitlerin Üretimi

Bu çalışmada, mekanik alaşımlanmış FGM istif düzenindeki hibrit kompozitler toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilmiştir. TM, özellikle geleneksel döküm yöntemleriyle üretimi zor olan malzemelerin imalatında sunduğu esneklik ve nihai ürün üzerinde sağladığı mikroyapısal kontrol nedeniyle tercih edilmiştir.



Şekil 3.1. Hibrit kompozitlerin üretimi

Üretim sürecinin ilk ve en kritik adımı, matris ve takviye elemanı tozlarının homojen bir şekilde karıştırılması ve mikroyapısal olarak bütünleşmesini sağlayan mekanik alaşımlama (MA) işlemidir. Mekanik olarak alaşımlanmış kompozit tozların kalıp içerisinde tek eksenli preslenerek sıkıştırılması (soğuk presleme) ve argon atmosferinde sinterlenmesiyle numuneler nihai yoğunluğa ve mekanik bütünlüğe

ulaşmıştır. Tüm bu üretim aşamaları Şekil 3.1'deki akış şemasında görsel olarak özetlenmekte olup, her bir aşamanın detayları ilgili alt başlıklarda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.3.1. Bilyeli öğütme ile tozların karıştırılması

Toz karışımları, homojen bir dağılım ve mikroyapısal bütünleşme sağlamak amacıyla Retsch PM100 gezegen tipi bilyeli öğütme cihazında mekanik alaşımlamaya tabi tutulmuştur (Şekil 3.2).

İşlem parametreleri literatür taraması ve ön testler doğrultusunda aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- Toz/bilye oranı: 1/10,
- Bilye çapı ve malzemesi: 10 mm çapında tungsten karbür bilyeler,
- Kullanılan tozlar: A7075, B₄C ve Ti₃C₂T_x MXene
- Atmosfer: Argon (Oksidasyonu önlemek amacıyla öğütme işlemi argon atmosferi altında gerçekleştirilmiştir.)
- Kontrol Ajanı: %1,5 Stearik Asit (Tozların aglomerasyonunu önlemek ve yüzey etkileşimlerini düzenlemek amacıyla ilave edilmiştir.)
- Öğütme hızı: 300 rpm (her 3 dakika öğütmeden sonra 3 dakika bekleme ile ısınmanın aşırı artması önlenmiştir.)



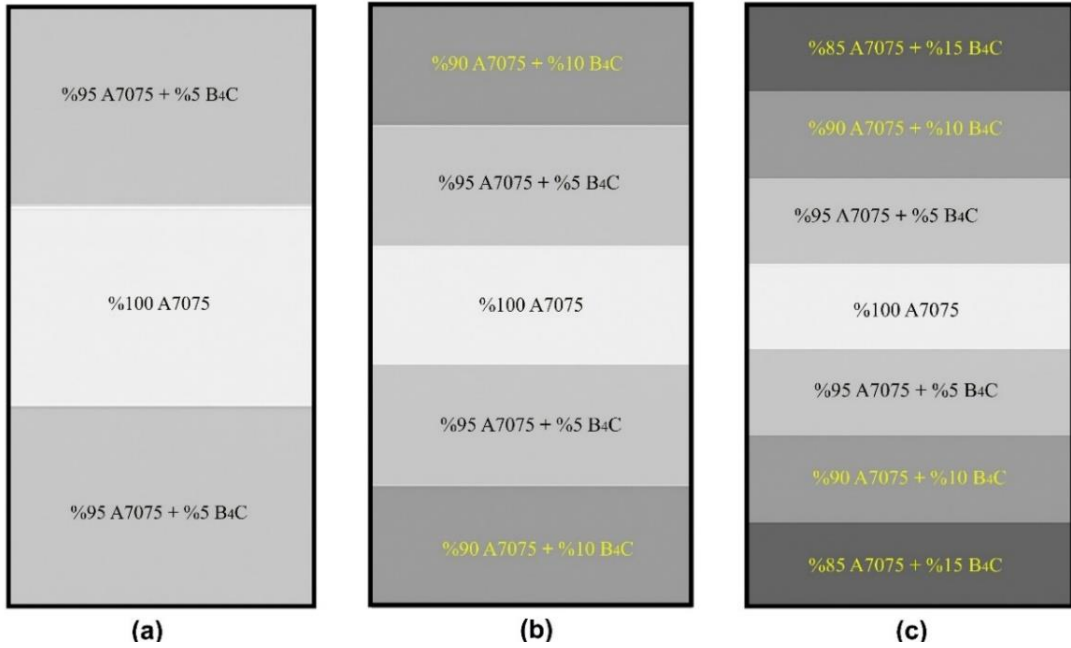
Şekil 3.2. Bilyeli öğütme işlemi a) Hassas tartım, b) Bilye ve tozların karıştırma kovanına alınması, c) Mekanik alaşımlama cihazı

Mekanik alaşımlama süresinin, elde edilen kompozit tozların nihai özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, öğütme işlemi farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Süreye bağlı olarak tozların morfolojik değişimini, parçacıkların şekil ve boyutunu gözlemlemek için SEM (Şekil 4.43 ve Şekil 4.45), kristal yapısındaki

değişimleri, faz oluşumlarını ve iç gerilmeleri tespit etmek için XRD analizi (Şekil 4.37) ile tozların tane boyutu dağılımını nicel olarak belirlemek için parçacık boyutu analizi (Şekil 4.40 ve Şekil 4.41) yapılmıştır. Bu karakterizasyon çalışmaları neticesinde elde edilen bulgular ve sonuçların detaylı değerlendirmesine "Araştırma Sonuçları ve Tartışma" bölümünde yer verilmiştir.

3.3.2. Tozların istiflenmesi ve geçişli yapının hazırlanması

Mekanik olarak alaşımlanmış tozlar, pres kalıplarına belirlenen katman dizilimine uygun şekilde elle istiflenmiştir. Bu işlem, her bir katmanın toz karışımının ayrı ayrı tartılması ve üst üste sırayla istiflenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Her katman sonrası arayüz bağıni zayıflatığı (Hamamcı ve ark., 2023) için ek bir sıkıştırma yapılmamış sadece katman yüzeyinin düzleşmesi için ufak bir titreşim verilmiştir. Hazırlanan numuneler, FGM yaklaşımıyla, merkezden dışa doğru değişen takviye oranlarıyla tasarlanmıştır. İstifleme düzenleri Şekil 3.3'te şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3.3. Hibrit kompozitlerin FGM istif düzeni a) 3 katmanlı, b) 5 katmanlı ve c) 7 katmanlı

Şekil 3.3.(a) numunesi üç katmanlı olup, merkezde %100 A7075 matris, dış katmanlarda ise ağ. %5 B₄C içeren kompozit yapılar bulunmaktadır. Şekil 3.3.(b) numunesi beş katmanlı bir FGM yapısıdır ve B₄C oranı merkezden uzaklaştıkça sırasıyla ağ. %5 ve %10'a çıkmaktadır. Şekil 3.3.(c) numunesi ise yedi katmanlı bir yapı olup, her katmanda %5 artışlarla en dış katmanlarda ağ. %15 B₄C takviyesi kullanılmıştır. Bu düzenlemeler ile farklı katman adetlerinde kademeli özellik geçişi hedeflenmiştir.

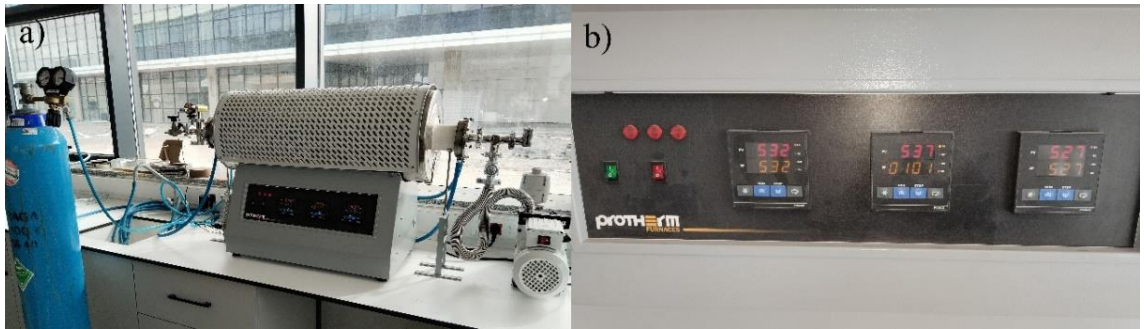
3.3.3. Tozların sıkıştırılması ve sinterlenmesi

Kalıba istiflenen toz karışımları, şekil kazandırmak ve sinterleme öncesi dayanım sağlamak amacıyla tek eksenli soğuk presleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, hidrolik pres kullanılarak 300 MPa, 400 MPa ve 500 MPa olmak üzere üç farklı sıkıştırma basıncında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Presleme sonucunda, toz partikülleri arasında mekanik kilitlenme sağlanarak yeşil numuneler elde edilmiştir. İşlem sırasında yükleme hızı sabit tutulmuş, kalıp duvarları ile tozlar arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve daha homojen yoğunluk dağılımı sağlamak amacıyla toz karışımlarına önceden ağ. %1,5 stearik asit ilave edilmiştir.



Şekil 3.4. Tozların sıkıştırılması a) Hidrolik pres, b) Sıkıştırma kalıbı, c) Presleme işlemi d) Hibrit kompozitler

Soğuk presleme sonrası elde edilen yeşil numuneler, nihai yoğunluk ve mikroyapısal bütünlüğün sağlanması amacıyla argon atmosferinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Sinterleme işlemi a) Tüplü ve atmosfer kontrollü fırın, b) Fırının kontrol paneli

Bu işlem, tüplü ve atmosfer kontrollü bir fırın olan PZF serisi Protherm Furnaces cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleminde 3 farklı sıcaklık (550 °C, 570 °C ve 590 °C) ile 3 farklı süre (1, 2 ve 3 saat) kullanılmıştır. Isıtma işlemi, 10 °C/dakika artış hızıyla gerçekleştirilmiş, sinterleme sonrasında ise numunelerin kontrollü bir şekilde soğuması amacıyla fırın içerisinde kendi halinde soğumaya

bırakılmıştır. Ayrıca tüm sinterleme işlemleri, oksidasyonu önlemek amacıyla argon atmosferi altında yürütülmüştür.

3.4. Karakterizasyon

Bu bölümde, çalışmada elde edilen hibrit kompozit numunelere uygulanan karakterizasyon ve mekanik test süreçlerine ilişkin cihaz bilgileri, deney koşulları ve uygulama detayları sunulmuştur. Ayrıca analizlerin bilimsel temeli ve yönetime özgü değerlendirme yaklaşımlarına değinilmiştir.

Kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik olarak basma, aşınma, sertlik ve yoğunluk testleri gerçekleştirilmiş ve Taguchi analizleri ile parametre optimizasyonları yapılmıştır. Mikroyapısal analizler için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve faz tanımlamaları için X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri kullanılmıştır. Ayrıca matris ve takviye fazlarının boyutları mekanik alaşımlama öncesi ve sonrası için parçacık boyut analizleri ile değerlendirilmiştir.

3.4.1. Taguchi deney tasarımı ve istatistiksel analiz yöntemleri

Deneysel süreçlerin ve ürünlerin performansını artırmak amacıyla kullanılan güçlü bir istatistiksel araç olan Taguchi metodu, kaliteyi artırırken maliyetleri ve değişkenliği azaltmayı hedefler. Bu yöntemin temelini, kontrol edilebilir faktörlerin (parametrelerin) gürültü faktörlerinin (kontrol edilemeyen değişkenlerin) olumsuz etkilerine karşı en az duyarlı olduğu seviyelerini bulma felsefesi oluşturur. Bu amaçla, performans ölçütü olarak Sinyal-Gürültü (S/N) oranı kullanılır. S/N oranı, istenen sinyalin (ortalama performans) istenmeyen gürültüye (performanstaki değişkenlik) oranını logaritmik bir ölçekte ifade eder. İstenen kalite özelliğine göre üç temel S/N yaklaşımı bulunmaktadır.

Mekanik özelliklerden aşınma direnci, mukavemet veya bir sistemin verimliliği gibi performans karakteristiklerinin maksimize edilmesinin hedeflendiği durumlarda "Daha Büyük Daha İyidir" yaklaşımı benimsenir. Bu yaklaşımda amaç, yanıt değerini mümkün olan en yüksek seviyeye çıkarmaktır. İlgili sinyal-gürültü (S/N) oranı, Taguchi yöntemi çerçevesinde aşağıdaki formül (3.1) ile hesaplanmaktadır:

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Burada n tekrar sayısını, y_i ise her bir tekrar için elde edilen yanıt değerini temsil eder. Deneysel verilerin analizinde ve S/N oranlarının hesaplanmasında Minitab yazılımı

kullanılmıştır. Böylece tasarlanan yapı doğrultusunda faktörlerin etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve optimum parametre kombinasyonları belirlenmiştir.

Aşınma miktarı, yüzey pürüzlülüğü, kirlilik oranı veya üretim hataları gibi minimize edilmesi istenen performans karakteristikleri için "Daha Küçük Daha İyidir" yaklaşımı kullanılır. Amaç, yanıt değerini sıfıra olabildiğince yaklaştırmaktır. Bu analiz için S/N oranı aşağıdaki denklemle (3.2) belirlenir:

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.2)$$

Bu denklemde y_i her bir deneydeki yanıt değerini (örneğin, aşınma miktarı) ve n tekrar sayısını gösterir. Yanıtların karelerinin ortalaması (ortalama karesel hata) ne kadar küçükse, S/N oranı o kadar büyük olur. Dolayısıyla, bu yaklaşımda da en yüksek S/N oranını veren faktör seviyesi kombinasyonu optimum olarak kabul edilir.

Ayrıca, her bir faktörün ve etkileşimlerinin istatistiksel anlamlılık düzeyi ve toplam varyans üzerindeki etkisi, Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi ile detaylandırılmıştır. ANOVA sonuçları, faktörlerin yüzde katkı oranlarını ortaya koyarak hangi parametrelerin sistem çıktısı üzerinde baskın rol oynadığını belirlemiştir. Bu kapsamda, F-değeri ve p-değeri istatistiksel anlamlılık için temel ölçütler olarak kullanılmış; %95 güven düzeyinde ($\alpha=0.05$) anlamlı bulunan faktörler, performans çıktıları açısından kritik olarak değerlendirilmiştir. Böylece yalnızca optimum parametre kombinasyonları değil, aynı zamanda sürecin en çok etkileyen değişkenleri de bilimsel olarak ortaya konmuştur.

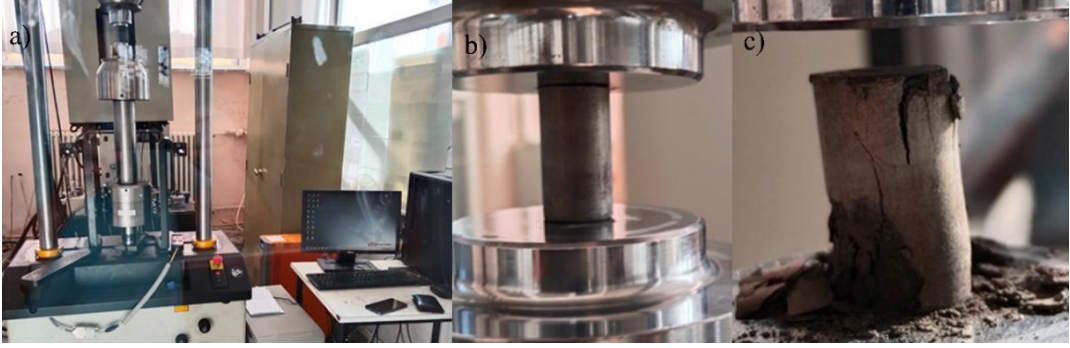
Sonuç olarak, bu analiz yaklaşımı hem hedeflenen performans kriterine göre uygun kalite karakteristiklerinin değerlendirilmesini, hem de faktörlerin etkilerinin istatistiksel güvenle açıklanmasını sağlamıştır.

3.4.2. Basma testleri

Basma testleri, Konya Teknik Üniversitesi Mekanik Test Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Deneyler, Instron 8801 model çekme/basma test cihazı kullanılarak ve Bluehill 2 yazılımı aracılığıyla yürütülmüştür. Tüm testler, ASTM E9 standardına uygun şekilde, oda sıcaklığında ve 1 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Her bir numune tipi için üçer tekrar yapılmış olup, testler numuneler tamamen tahrip oluncaya kadar sürdürülmüştür.

Basma testlerinde ASTM E9 standardına uygun şekilde 3 parçalı ve parçaların aşınmasını önlemek içinde 2 küçük parçalı (alt ve üst zımba) bir kalıp imal edilmiştir (Şekil 3.7). Ayrıca tel erozyon ile kesilen orta kısım sıkıştırma sonrası ayırma aparatı

olarak saklanmıştır. Kalıbın sıkıştırma öncesi iç hacmi sıkışmamış toz malzeme için yeterli genişlikte olup gerekli toz tartılıp doldurulduğunda çapı 13mm ve uzunluğu 25 mm olan numuneler elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Basma testi a)Basma test cihazı, b)Test öncesi numune, c)Test sonrası numune

Basma testleri sonucunda elde edilen kuvvet ve yer değişirme verileri, cihazdan çıktı olarak alınmış ve ilk olarak Microsoft Excel yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Bu veriler, numunelerin başlangıç boyutları dikkate alınarak basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrilerine dönüştürülmüştür. Oluşturulan bu eğriler üzerinden malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiş, değerlendirmeler aşağıda sunulan formüller yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Basma numunelerinin üretiminde kullanılan sıkıştırma kalıbı

Gerilme (σ), birim kesit alanına düşen kuvvet miktarı olarak hesaplanmış ve aşağıdaki eşitlik (3.3) kullanılmaktadır:

$$\sigma = F/A \quad (3.3)$$

Burada; σ : Gerilme (MPa), F: Uygulanan kuvvet (N), A: Numunenin başlangıç kesit alanıdır.

Gerinim (ϵ), numunenin orijinal boyuna göre gösterdiği boyutsal değişim oranı olup, aşağıdaki denklem ile (3.4) ifade edilmektedir:

$$\epsilon = \Delta L/L_0 \quad (3.4)$$

Burada: ε : Gerinim (mm/mm), ΔL : Boy değişimi (mm), L_0 : Başlangıç uzunluğu (mm)

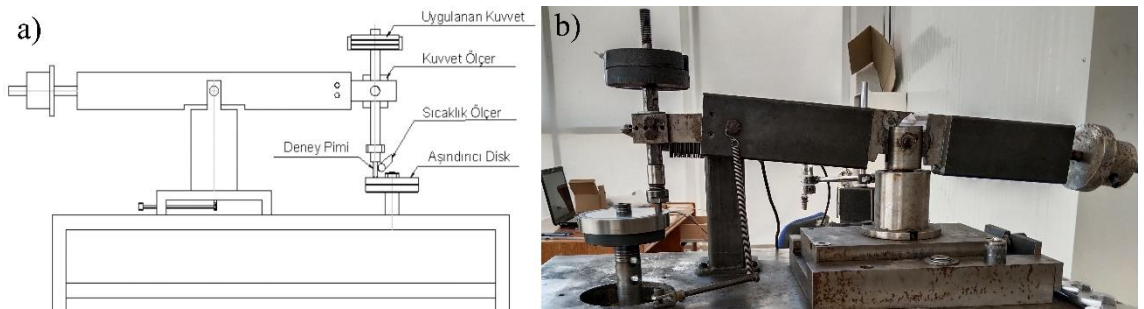
Malzemelerin enerji absorbe etme kapasitesini gösteren tokluk değeri, basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrisinin altında kalan alanın hesaplanması ile elde edilmiştir. Sayısal entegrasyon yöntemi kullanılarak hesaplanan bu alan, aşağıdaki matematiksel ifade (3.5) ile tanımlanmaktadır:

$$Tokluk = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (3.5)$$

Burada: σ : Gerilme (MPa), ε : Gerinim (birimsiz), ε_f : Kırılma anındaki gerinimdir.

3.4.3. Aşınma testleri

Aşınma testleri, Selçuk Üniversitesi bünyesindeki kuru tip Pin-on Disk (Düzcükoğlu ve ark., 2015; Ekrem ve ark., 2018) yöntemi ile ASTM G99 standardına uygun olarak Şekil 3.8'de verilen cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, 8620 çeliğinden imal edilmiş ve yüzeyi sertleştirilmiş, 60 HRC sertliğe sahip olan diskler aşındırıcı yüzey olarak kullanılmıştır. Aşındırıcı diskler 120 mm çapında ve 20 mm kalınlığında olup 10 mm çap ve 15 mm uzunluğundaki test numuneleri ise uygun geometri için basma testi için kullanılan kalıptan farklı bir sıkıştırma kalıbı ile üretilmiştir. Aşınma testleri için uygulanan normal yükler 10 N, 20 N ve 30 N olarak, çevresel hızlar ise 1 m/s, 1,5 m/s ve 2 m/s olarak literatür taraması ve ön testler sonrası belirlenmiştir. Her testte 2500 metre aşındırma mesafesi sabit tutulmuş ve numunelerin sürtünme katsayısı (COF) ile yüzey aşınma miktarları (kütle kaybı) belirlenmiştir. Kompozitlerin, test öncesi ve sonrası hassas terazi (0,1 mg hassasiyetli) ile kütlesi ölçülerek aşınma miktarları belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Aşınma test cihazı a) Şematik görünüm, b) Kullanılan cihaz

Aşınma testleri için üretilen numunelerde; ilk aşama basma, sertlik ve yoğunluk testlerinin optimizasyonu ile belirlenen üretim parametreleri kullanılmıştır. Optimize edilmiş parametreler ile üretilen ağ. %5 B₄C takviyeli numune belirlenen farklı aşınma

hızı ve yük şartlarında test edilerek tekrar Taguchi analizi ile optimizasyon yapılmıştır. Aşınma testi için yapılan optimizasyon ile ikinci aşama üretimle elde edilen tüm farklı içerikteki numuneler için ortak bir test prosedürü belirlenmiştir. Böylece belirlenen en uygun üretim ve test parametrelerine göre hem MXene katkılı hem de katkısız numuneler üretilmiş ve aşınma testleriyle karakterizasyonları yapılmıştır.

3.4.4. Sertlik testleri

Sertlik testleri, Portable Leeb Hardness Tester HARTIP 3000 serisi cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9).

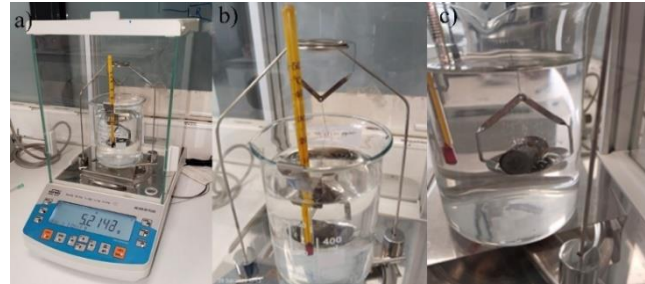


Şekil 3.9. Sertlik testi a,b)Sertlik test cihazı, c)Sertlik test numunesi

Testler oda sıcaklığında yürütülmüş olup, her bir ölçüm için numunenin farklı yüzey ve noktalarından beşer tekrar alınmıştır. Silindirik hibrit kompozitler, 10×10 mm kare kesitte işlenmiş ve düzleştirilmiş yüzeyler üzerinden sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik, 25 mm uzunluk boyunca 5 farklı noktadan ölçülmüştür. İlk ölçüm, uçtan 2,5 mm sonra alınmış, ardından kalan 4 ölçüm ise 5 mm aralıklarla yapılmıştır. 5 farklı kısmın tümü için ilgili mesafe korunarak 5 farklı noktadan ölçüm yapılmıştır.

3.4.5. Yoğunluk testleri

Yoğunluk testleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM Laboratuvarı'nda (Şekil 3.10) Arşimet yöntemi kullanılarak ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Yoğunluk analizi a)Arşimet yöntemiyle hassas tartım, b,c) Numunenin sudaki durumu

Arşimet yöntemi, katı bir cismin bir sıvı içerisinde yerini değiştirdiği sıvının hacmini ölçerek, o cismin gerçek yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan temel bir tekniktir. Testler sırasında, hassas terazi yardımıyla numunelerin hem hava ortamındaki kuru kütlesi hem de saf su içerisinde askıdaki kütlesi ölçülmüş, elde edilen veriler doğrultusunda numunelerin gerçek yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu kapsamda, sinterleme işlemleri tamamlanmış tüm numunelere ait yoğunluk değerleri belirlenmiş ve üretim parametrelerinin (sinterleme sıcaklığı, süresi ve sıkıştırma basıncı gibi) yoğunluk üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

3.4.6. Mikroyapısal ve morfolojik karakterizasyon

Mekanik alaşımlama ile elde edilen tozların ve toz metalurjisiyle üretilen fonksiyonel dereceli kompozit numunelerin mikroyapısal analizleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) laboratuvarında bulunan ZEISS marka Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM laboratuvarlarında, 2.00 kV'luk elektron yüksek gerilimi altında, farklı büyütme oranlarında yapılmıştır. Elde edilen görüntüler üzerinden tozların parçacık şekli, aglomerasyon durumu, matris–takviye arayüzü ve katmanlar arası geçiş bölgeleri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Mekanik alaşımlama yöntemiyle hazırlanan toz kompozitlerin faz bileşenlerini, kristal yapılarını ve olası ara faz oluşumlarını belirlemek amacıyla, Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM bünyesinde bulunan PANalytical Empyrean marka X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı kullanılarak faz analizi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) kaynağı ile, 10° – 90° aralığında, 0.02° /adım çözünürlükle ve sabit tarama hızıyla yapılmıştır. Analizler toz formdaki numuneler üzerinde, refleksiyon (Bragg–Brentano) geometrisi esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Numunenin partikül boyutu dağılımı, CILAS 1190 DRY lazer kırınım cihazı kullanılarak kuru yöntemle belirlenmiştir. Cihaz, $0.10 \mu\text{m}$ ile $2500.00 \mu\text{m}$ arasında geniş bir ölçüm aralığına sahip olup, analiz sırasında 500 mb basınç altında ve %0,25 ışık kapanması değerinde ölçüm yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, mekanik alaşımlama yöntemiyle hazırlanan tozların ve toz metalurjisi ile üretilen numunelerin mikroyapısal, mekanik ve fiziksel özelliklerine ilişkin elde edilen deneysel bulgular ile bu bulgulara dayalı değerlendirmeler sunulmaktadır. İlk olarak üretilen kompozit numunelerin mekanik performansına yönelik basma dayanımı, sertlik ve aşınma özellikleri deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar istatistiksel analizlerle desteklenmiştir. Ardından, numunelerin yoğunlukları belirlenmiş ve bu değerlere etki eden üretim parametreleri, Taguchi yöntemi ile analiz edilerek optimizasyon önerileri sunulmuştur. Son olarak SEM ve XRD analizleri ile numunelerin yüzey morfolojisi, faz yapısı ve kristal karakteristikleri detaylı şekilde incelenmiş ayrıca bilyeli öğütme işlemi sonrası elde edilen tozların parçacık boyutu dağılımları değerlendirilmiştir. Bu bölümde sunulan veriler, malzemenin yapısal bütünlüğü ile mekanik performansı arasındaki ilişkiyi ortaya koymakta ve geliştirilen hibrit kompozitlerin mühendislik uygulamaları açısından potansiyelini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

4.1. Hibrit Kompozitlerin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi

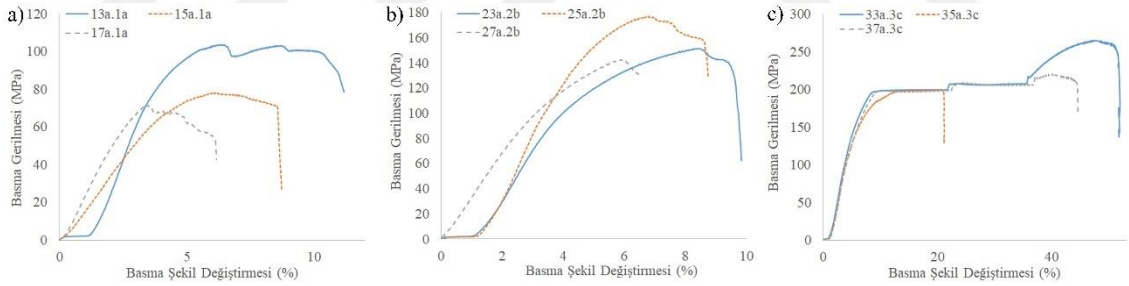
Bu bölümde, üretilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Basma dayanımı, sertlik, aşınma direnci ve yoğunluk gibi temel performans göstergeleri hem deneysel veriler ışığında hem de istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiş ayrıca üretim parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi analizi yapılmıştır. Elde edilen bulgular, malzemenin yapısal davranışı ile proses değişkenleri arasındaki ilişkilerin ortaya konmasına ve ideal üretim koşullarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

4.1.1. Basma dayanımı ve istatistiksel analizi

Bu kısımda, hibrit kompozitlerin basma dayanımı deneysel olarak belirlenmiş ve elde edilen veriler Taguchi yöntemiyle analiz edilerek, farklı üretim parametrelerinin basma dayanımı üzerindeki etkileri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, istatistiksel analiz sonucunda belirlenen optimum parametrelerle ikinci aşama üretimler gerçekleştirilmiştir. Bu ek üretimlerde ise ağırlık %1, %3 ve %5 oranlarında Ti_3C_2Tx MXene ilavesinin etkisi incelenmiştir.

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te, sırasıyla 300 MPa, 400 MPa ve 500 MPa sabit toz sıkıştırma basıncı altında üretilen hibrit kompozit numunelere ait basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri verilmiş olup mekanik alaşımlama süresi, sinterleme koşulları (süre ile sıcaklık) ve katman sayısı gibi parametrelere bağlı olarak basma dayanımı ve süneklikte belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir.

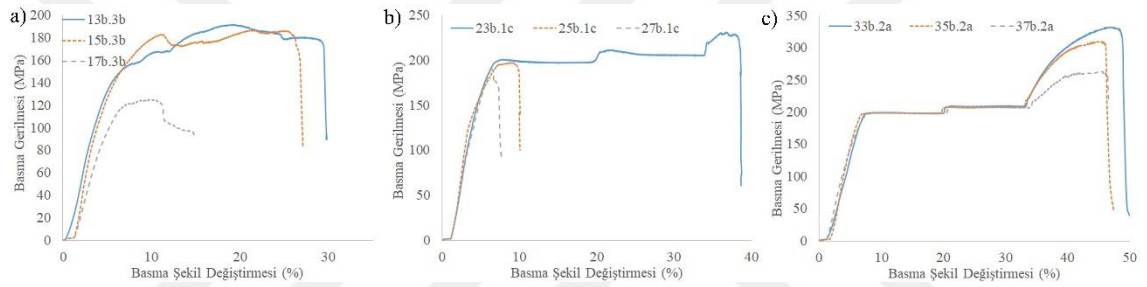
Şekil 4.1 incelendiğinde, grafiklerde mekanik alaşımlama süresi arttıkça genel olarak basma dayanımı ve süneklikte belirgin artışlar görülmüştür. İncelenen gruplar arasında en düşük basma dayanımı ve süneklikler, 1 saat mekanik alaşımlama ve 550°C'de 1 saat sinterleme uygulanan Şekil 4.1.a'da elde edilmiştir. Bu şartlarda üretilen 13a.1a numunesi, 105 MPa maksimum basma dayanımı ve %12 şekil değişimi göstermiştir. MA süresi ile sinterleme süresi 2 saate ve sıcaklık 570°C'ye artırıldığında (Şekil 4.1.b), 25a.2b numunesinde basma dayanımı 175 MPa'a kadar yükselmiştir. Bu serideki en yüksek basma dayanımı ve sünekliğe ise 3 saat MA ve 590°C'de 3 saat sinterleme sonucunda Şekil 4.1.c'de ulaşılmıştır. 33a.3c numunesinde 250 MPa basma dayanımı ve %45 şekil değişimi elde edilmiştir. Şekilden elde edilen bulgulara göre, katman sayısı arttıkça malzemenin basma dayanımı düşmektedir. Buna karşın, sinterleme süresi ve sıcaklığının artırılması hem sünekliği hem de basma dayanımını artırmaktadır.



Şekil 4.1. 300 MPa toz sıkıştırma basıncında üretilen hibrit kompozitlerin basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri a)1 saat MA, b)2 saat MA, c) 3 saat MA

Bilyeli öğütme süresinin artması ile basma dayanımı ve sünekliğin artması, nanokristal yapı oluşumu ile takviye fazlarının homojen dağılmasının dayanım açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Tane boyutu küçüldükçe, tane sınırları dislokasyon hareketlerini engelleyerek akma dayanımını belirgin şekilde yükseltir. Al/B₄C kompozitlerinde bilyeli öğütme, hem matrisin nanokristal bir yapıya dönüşmesine hem de B₄C takviyesinin matrise homojen şekilde dağılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum yalnızca tane sınırı kaynaklı mukavemeti artırmakla kalmaz, aynı zamanda öğütme sürecinde biriken yüksek dislokasyon yoğunluğunun neden olduğu içsel gerilimler vasıtasıyla basma dayanımını daha da artırır (Cabeza ve ark., 2017).

Şekil 4.2 incelendiğinde ise genel olarak 400 MPa ile sıkıştırılan numunelerin, 300 MPa'da sıkıştırılan emsallerine kıyasla daha yüksek basma dayanımı ve genellikle daha yüksek süneklik kabiliyeti sergilediği görülmektedir. 300 MPa'da sıkıştırılan 33a.3c numunesi (Şekil 4.1.c) 260 MPa basma dayanımı gösterirken, 400 MPa'da sıkıştırılan 33b.2a numunesi (Şekil 4.2.c) ise 310 MPa basma dayanımı ile %20'ye yakın bir artış göstermiştir. Üstelik 590°C'de 3 saat sinterlenen 33a.3c numunesine, 550°C'de 2 saat sinterlenen 33b.2a numunesine kıyasla daha fazla sinterleme enerjisi verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.2'de yine en düşük basma dayanımı ve sünekliği 7 katmanlı numuneler göstermektedir. Bu durum 400 MPa ile elde edilen daha yüksek sıkıştırmanın, 7 katmanlı yapının zayıf arayüzey sorununu tam olarak çözemediğini gösterir. Ek olarak bu grupta sinterleme süresi ve sıcaklığındaki artış ile sünekliğin arttığı daha net anlaşılmaktadır.

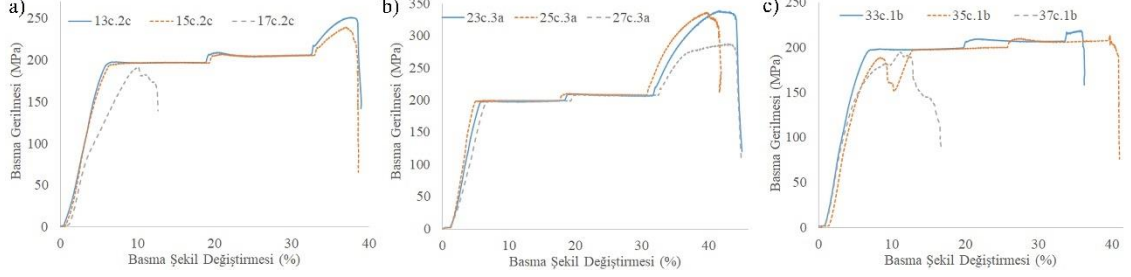


Şekil 4.2. 400 MPa toz sıkıştırma basıncında üretilen hibrit kompozitlerin basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri a) 1 saat MA, b) 2 saat MA, c) 3 saat MA

Sıkıştırma basıncının artmasıyla basma dayanımı da yükselmektedir. Bu durum, artan basıncın gözenekliliği azaltarak daha yoğun bir yapı oluşturmasıyla açıklanır (Manohar ve ark., 2021c).

Sinterleme sıcaklığının ve süresinin artmasıyla basma dayanımı ve sünekliğin artması, atomik difüzyona dayalı yoğunlaşma ve parçacıklar arası metalurjik bağların güçlenmesinden kaynaklanır. Yüksek sıcaklıklarda, atomlar enerji yüklenerek komşu parçacıkların temas noktalarına doğru difüze olur. Bu süreçte ilk olarak parçacıklar arasında boyun olarak adlandırılan köprüler oluşur. Sinterleme sıcaklığı ve/veya süresi artırıldıkça, bu boyunlar giderek genişler ve parçacıklar arasındaki temas alanı büyür. Eş zamanlı olarak, atomların parçacık sınırlarına taşınmasıyla gözenekler küçülmeye ve kapanmaya başlar. Sonuç olarak, malzemedeki porozite azalır ve yoğunluk artar. Azalan porozite, gerilim altında çatlakların başlayabileceği zayıf noktaları ortadan kaldırarak basma dayanımını artırır. Aynı şekilde, parçacıkların birbiriyle bütünleşik, güçlü bağlar oluşturması, malzemenin kırılgan bir şekilde ayrılmak yerine, bir bütün olarak plastik deformasyona uğramasına olanak tanır, bu da sünekliği artırır (German, 2005).

Şekil 4.3'te 500 MPa sıkıştırma basıncında üretilen numunelerin basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri görülmekte olup basma dayanımları, önceki serilerden daha fazladır. Özellikle 4.3.b'deki 23c.3a numunesi, 340 MPa'lık basma dayanımına ulaşarak ilk aşamada üretilen tüm basma numuneleri arasında gözlemlenen en yüksek değeri sergilemiştir.



Şekil 4.3. 500 MPa toz sıkıştırma basıncında üretilen hibrit kompozitlerin basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri a)1 saat MA, b)2 saat MA, c) 3 saat MA

Şekil 4.3'te 1 Saat MA grubundaki (Şekil 4.3.a) numuneler (13c.2c ve 15c.2c), sadece 1 saatlik MA ile hazırlanmış olmalarına rağmen, yüksek basınç (500 MPa) ve etkin sinterleme (2saat, 590°C) sayesinde 240 MPa basma dayanımı ve %40 şekil değişimi göstermiştir. 2 saat MA grubu (Şekil 4.3.b) ise bu ve önceki seriler arasında en yüksek dayanım ve süneklik verilerini içermekte olup 23c.3a numunesi (2sa MA, 3 katman, 500 MPa, 3sa/550°C), 340 MPa basma dayanımı ve %40 şekil değiştirme kabiliyeti ile öne çıkmaktadır. Son olarak 3 saat MA grubunda (Şekil 4.3.c) en yüksek MA süresi ve en yüksek sıkıştırma basıncı (500 MPa) bir araya gelse bile en yüksek basma dayanımı veya süneklik elde edilememiştir. Bunun sebebinin, sinterleme şartlarından (1saat, 570°C) kaynaklandığı özellikle sürenin yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Ek olarak bu grupta da katman adedi arttıkça basma dayanımı ve süneklikte düşüş görülmektedir ve bu durum tüm serilerde ortak bir karakterizasyon sergilemektedir

Daha az katman sayısına (örneğin 3 katman) sahip numunelerin basma dayanımı açısından daha yüksek değerlere ulaşması, çok katmanlı yapının beraberinde getirdiği yapısal karmaşıklık ve arayüzey sayısındaki artışla doğrudan ilişkilidir. Literatürde, her bir katman geçişinin yeni bir arayüzey oluşturduğu ve bu bölgelerin potansiyel kusur alanları hâline gelerek malzemenin genel mekanik bütünlüğünü olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir. Arayüzeylerde meydana gelen mikro boşluklar, takviye fazının düzensiz geçişleri, zayıf bağ oluşumu ya da farklı termomekanik genleşme davranışları, özellikle basma gibi homojen yük altında çatlak başlatıcıları olarak görev yapabilir. Bu tür kusurlar, gerilme yığılmalarına neden olarak malzemenin basma dayanımının düşmesine

neden olur (Zhang ve ark., 2021). Bu bağlamda, BSE-SEM analizleri (Şekil 4.47) de bu durumu destekler niteliktedir (“Mikroyapısal Analiz Sonuçları” kısmında değinilmiştir). Katman adedinin artmasıyla birlikte, B₄C oranının artmasına bağlı olarak sıkıştırmanın etkisinin zayıfladığı ve porozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle katman geçişlerinin bulunduğu bölgelerdeki gözenekli yapılar, mikroyapıda süreksizlikler oluşturarak yük taşıma kapasitesini düşürmekte ve dayanım performansını olumsuz etkilemektedir. Tüm bu gözlemler doğrultusunda katman artışı ile mekanik özelliklerde artış sağlamak için takviyeler arası seramik takviye değişim oranının en aza indirilmesi önerilebilir. Bu çalışmada kullanılan ağırlıkça %5, %10 ve %15 B₄C seramik takviyesinin FGM yapı tasarımı için yüksek değerler olduğu ve optimize edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

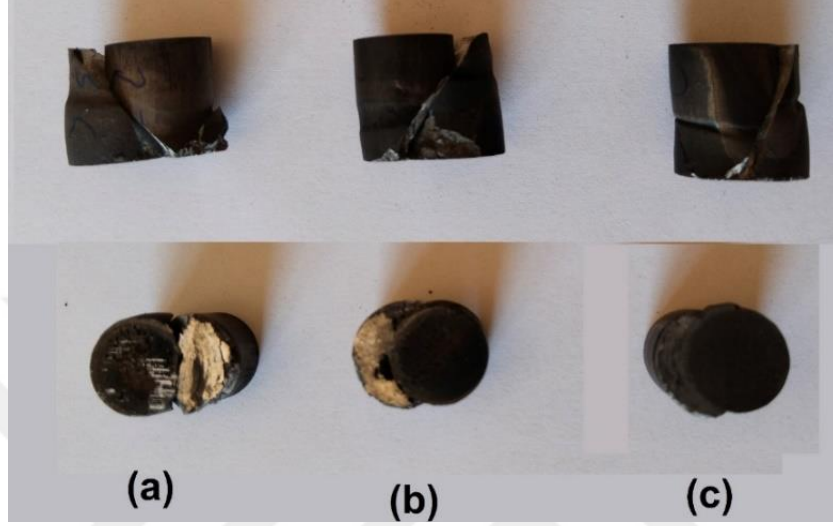
Basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrilerinde gözlemlenen platolar (düzlükler), malzemenin tek seferde ve homojen bir şekilde deforme olmadığını aksine bir dizi ardışık iç hasar mekanizmasıyla enerji sönümlendiğini gösterir. Bu davranışın temel nedenleri; toz metalurjisi üretiminden kalan gözeneklerin kademeli olarak ezilip çökmesi (Ashby ve Gibson, 1997; Thümmeler ve Oberacker, 2024), kompozit yapıdaki gevrek takviye elemanlarının kırılması (Lloyd, 1994), matris ile takviye arasındaki arayüzey bağının zayıflayarak ayrılması (Clyne ve Withers, 1993) ve deformasyonun dar kayma bantlarında yoğunlaşmasıdır (Bai ve Wierzbicki, 2008). Her bir düzlük, bu mekanizmalardan birinin veya birkaçının belirli bir gerilme seviyesinde aktif hale gelerek malzemenin dayanımını geçici olarak sabit tuttuğu bir hasar aşamasını temsil eder.

Basma yüklemesi esnasında, farklı mekanik özelliklere sahip komşu katmanların yanal yönde farklı deformasyon eğilimleri (Poisson etkisi), katmanlar arası arayüzeylerde belirgin kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Bu durum, basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrilerinde gözlemlenen plato bölgelerinin, yalnızca katman içi gözenek çökmesi veya takviye kırılması gibi mekanizmalarla değil, aynı zamanda bu arayüzeylerde meydana gelen mikro kaymalar veya bağ zayıflaması (delaminasyon başlangıcı) gibi enerji sönümleyici olaylarla da ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Test sonrası hasarlı numuneler (Şekil 4.4) incelendiğinde, numune boyunca ilerleyen 45°'lik makroskobik kayma kırılması hasarın nedenini belirlemek için yol göstericidir. Test sırasında katmanlar arası arayüzeylerde biriken ön hasar, malzemenin bünyesinde en zayıf yolu takip ederek, nihai kırılma çatlağının bu zayıflamış bölgeleri birleştirerek ilerlemesine zemin hazırlar.

Yük altında, tabakalar arasındaki kayma gerilmeleri arayüzün dayanımını aştığında, arayüzde bir ayrılma meydana gelir. Bu olay, yükün etkin bir şekilde

aktarılmasını engeller ve ayrılan bölgeyi bir mikro çatlak başlangıç noktasına dönüştürür. Silindirik veya prizmatik bir MMK numunesi tek eksenli basma yüküne maruz kaldığında, genellikle yükleme eksenine yaklaşık 45 derecelik bir açıyla yönlenmiş belirgin bir düzlem boyunca hasara uğradığı deneysel olarak gözlemlenmiştir (Fan, 2019).



Şekil 4.4. Basma testi sonrası hasar gören parçalar a)23c, b)25c, c)27c kodlu numune

Şekil 4.4 (a) ve (b)'de gözlemlenen pürüzlü ve basamaklı kırılma yüzeyi morfolojisi, çatlakların homojen bir malzemede düz bir düzlemde ilerlemesinden ziyade, farklı mekanik tepkilere sahip katmanlardan oluşan heterojen ve gerilme yığılmalarına sahip ön hasarlı bir yapı içerisinde geçtiği fikrini desteklemektedir. Bu bulgular neticesinde, katmanlı kompozitlerde gözlemlenen platoların temel sebebinin, farklı mekanik özelliklere sahip katmanlar arasındaki arayüzey bağlarının zayıf olduğu anlaşılmaktadır. Bu kritik soruna çözüm olarak, üretimin en önemli adımı olan sinterleme prosesinin optimize edilmesi öne çıkmaktadır. Özellikle, tane büyümesi gibi olumsuzluklara yol açmayacak şekilde difüzyon süresinin kontrollü olarak artırılması, komşu katmanlardaki atomların birbirine daha etkin bir şekilde kenetlenmesini sağlayacaktır. Bu durum, zayıf arayüzeyler yerine güçlü ve sürekli metalurjik bağlar oluşturarak yapının delaminasyona karşı direncini artıracak ve sonuç olarak malzemenin hem genel dayanımını hem de tokluğunu artıracaktır.

Çizelge 4.1'de farklı üretim parametreleriyle üretilmiş 27 farklı hibrit kompozit numunenin temel mekanik ve fiziksel özellikleri sunulmuştur. Tabloda yer alan yoğunluk ve sertlik kısımları ayrı bölümlerde ele alınıp değerlendirilecek olup bu kısımda bir karşılaştırma yapılabilmesi için toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hibrit kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri

Kod	Maks. Basma Dayanımı (MPa)	Maks. Basma Şekil Değişimi (%)	Tokluk (J/cm ³)	Sinterlenmiş Yoğunluk (g/cm ³)	Maks. Sertlik (HB)
13a-1a	103,9±4,2	11,88±0,49	8,33	2,42764	100±7
15a-1a	78,2±3,4	9,53±0,42	4,79	2,41337	87±6
17a-1a	71,6±3,1	6,26±0,26	3,08	2,40507	93±7
23a-2b	151,9±6,2	11,78±0,48	9,33	2,4692	117±9
25a-2b	177,3±6,7	10,73±0,41	9,42	2,4493	106±5
27a-2b	142,7±6,1	6,70±0,29	5,93	2,43901	89±7
33a-3c	265,4±10,4	52,92±2,06	104,40	2,57501	134±2
35a-3c	199,5±9,6	22,98±1,1	32,85	2,5348	115±5
37a-3c	221,1±10,8	46,75±2,29	82,26	2,5187	147±6
33b-2a	331,9±12,6	50,46±1,92	106,99	2,62423	157±5
35b-2a	309,7±14,2	49,69±2,29	97,35	2,60967	160±3
37b-2a	262,9±10,8	48,86±2,0	92,32	2,56576	170±5
13b-3b	191,8±7,9	30,49±1,25	46,85	2,4702	120±3
15b-3b	186,7±9,1	27,76±1,36	41,29	2,4574	94±6
17b-3b	130,9±4,1	31,74±0,98	31,47	2,4129	117±3
23b-1c	230,8±7,4	41,38±1,32	72,29	2,5235	139±7
25b-1c	197,5±5,9	11,77±0,35	13,27	2,4894	106±3
27b-1c	191,2±8,8	9,90±0,47	7,78	2,4321	102±5
23c-3a	339,1±15,6	48,08±2,21	96,67	2,6957	114±3
25c-3a	336,4±15,8	44,92±2,11	89,41	2,6923	142±3
27c-3a	287,7±14,4	49,09±2,45	90,73	2,5992	133±6
33c-1b	218,9±10,1	37,69±1,73	66,86	2,56204	126±5
35c-1b	214,1±8,4	38,46±1,5	73,20	2,52204	129±5
37c-1b	194,9±8,9	18,91±0,87	28,67	2,46794	108±4
13c-2c	251,2±8,2	39,01±1,25	74,21	2,53576	116±6
15c-2c	239,6±10,3	38,66±1,66	72,33	2,48888	102±5
17c-2c	191,4±6,3	12,69±0,42	15,10	2,45698	128±3

Tablodaki tokluk verileri, FGM kompozitlerin, üretim parametrelerine bağlı olarak enerji sönümlene kapasitelerinin ne denli değişebildiğini göstermektedir. Tokluk, bir malzemenin hem dayanımını hem de şekil değiştirme kabiliyetini birleştiren, eğri altında kalan alanla temsil edilen kritik bir mekanik özelliktir. Yapılan analizler FGM kompozitlerin, üretim parametrelerine bağlı olarak oldukça yüksek tokluk sergileyebildiğini göstermiştir. Özellikle 33b-2a (106,99 J/cm³) ve 33a-3c (104,40 J/cm³) numuneleri, en düşük tokluğa sahip numunelere kıyasla 30 kattan fazla bir artış ortaya koymuştur.

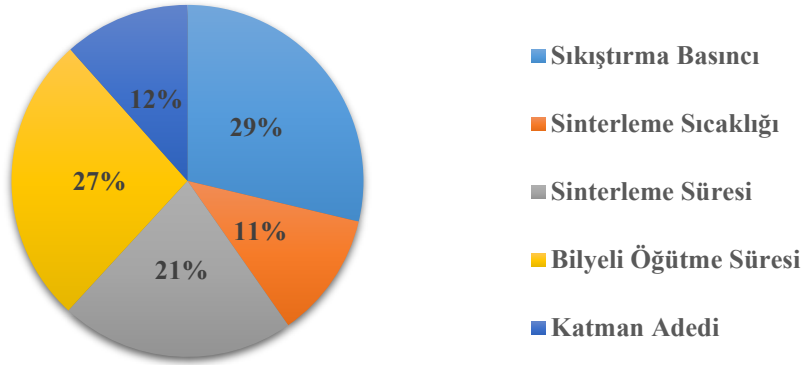
Çizelge 4.2 beş farklı üretim faktörünün (sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, MA süresi, katman adedi), nihai ürünün basma dayanımı üzerindeki etkisini istatistiksel olarak analiz etmektedir. Analiz, sinyal/gürültü (S/N) oranlarına

dayanmaktadır. Büyük olan iyidir kriterine göre, daha yüksek bir S/N oranı, o faktör seviyesinin daha yüksek ve daha tutarlı bir basma dayanımı sağladığı anlamına gelir. Her faktörün üç seviyesi için ortalama S/N oranları verilmiştir. Tablodaki delta değerleri en yüksek ve en düşük seviye arasındaki fark olup faktörün etkisini göstermektedir. Delta ne kadar büyükse, etki o kadar büyüktür. Sıra ise delta değerlerine göre sıralama olup 1 numara en etkili faktördür. Tabloya göre sıkıştırma basıncı, analizde en etkili parametredir. 47,86 değeri ile 3. seviye (500 MPa) en yüksek basma dayanımını için optimum seviyedir. En düşük delta değerine sahip olan sinterleme sıcaklığı, basma dayanımı üzerinde etkisi en az olan parametredir ve en yüksek basma dayanımı 3. seviyede (590°C) elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Basma dayanımı verileri için sinyal/gürültü (S/N) oranlarına dayalı yanıt değerleri (Büyük olan iyidir)

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Delta	Sıra
Sıkıştırma Basıncı	43,15	46,76	47,86	4,71	1
Sinterleme Sıcaklığı	46,03	44,93	46,82	1,9	5
Sinterleme Süresi	43,7	46,84	47,23	3,53	3
Bilyeli Öğütme Süresi	43,33	46,76	47,69	4,36	2
Katman Adedi	46,8	46,08	44,9	1,9	4

Şekil 4.5. Taguchi analizine dayalı olarak üretim parametrelerinin A7075/B₄C hibrit kompozitlerinin basma dayanımı üzerindeki göreceli etkilerini yüzde olarak gösteren bir pasta grafiğidir.

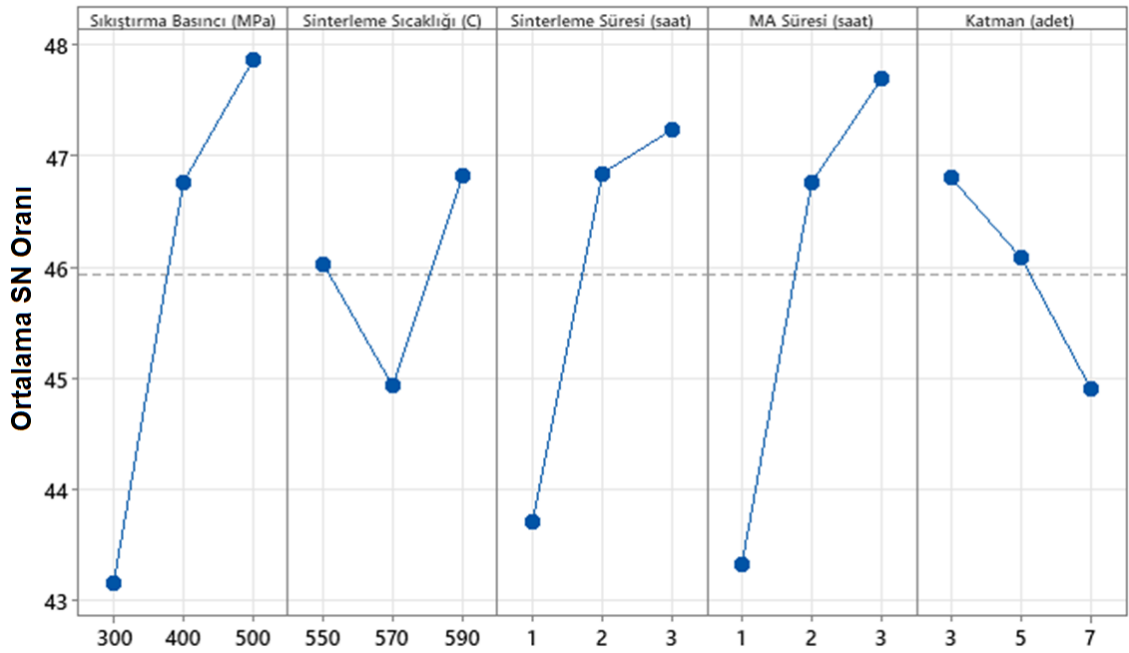


Şekil 4.5. S/N oranlarına dayalı üretim parametrelerinin basma dayanımı üzerindeki etkileri

Grafik, özellikle sıkıştırma basıncı (%29) ve bilyeli öğütme süresi (%27) gibi iki parametrenin toplam etkinin %56'sını oluşturduğunu ortaya koyarak bu faktörlerin dayanımı belirlemede kritik rol oynadığını vurgulamaktadır. Sinterleme süresi %21 ile orta düzeyde etkili bir faktör olarak öne çıkarken, katman adedi (%12) ve sinterleme

sıcaklığı (%11) daha düşük etkiye sahiptir. Bu bulgular, basma dayanımını artırmak için proses optimizasyonunda hangi parametrelere öncelik verilmesi gerektiğini açıkça göstererek, üreticilerin özellikle sıkıştırma basıncı ve öğütme süresi üzerine odaklanmalarının en etkili strateji olacağını ortaya koymaktadır. Nitekim öne çıkan sıkıştırma basıncı ve mekanik alaşımlama parametreleri basma testi verilerinin incelenmesi esnasında da dikkat çekmiş olup Taguchi analizi ile diğer parametrelere kıyasla etki oranları da istatistiksel olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.6, basma dayanımına etki eden beş farklı üretim parametresinin her bir seviyesi için ortalama S/N oranlarını gösteren ana etkiler grafiğidir.



Şekil 4.6. Sinyal/Gürültü oranlarına göre daha yüksek basma dayanımı için proses optimizasyonu

Taguchi analizinde bu grafik, her bir faktörün performansı nasıl etkilediğini ve hangi seviyenin daha iyi sonuç (bu durumda daha yüksek basma dayanımı) verdiğini görsel olarak anlamak için kullanılır. Yatay kesikli çizgi, tüm deneylerin genel ortalama S/N oranını temsil eder. Bir faktörün çizgisinin eğimi ne kadar dikse, o faktörün seviyeleri arasında geçiş yapmanın sonuç üzerindeki etkisi o kadar büyüktür. Şekle göre sıkıştırma basıncı ve mekanik alaşımlama süresi faktörlerinde gözlemlenen belirgin artış, bu parametrelerin hem ortalama değeri artırdığını hem de süreci daha kararlı hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Optimum sonuçlar; 500 MPa sıkıştırma basıncı, 590 °C sinterleme sıcaklığı, 3 saat sinterleme süresi, 3 saat bilyeli öğütme süresi ve 3 katman sayısı ile elde edilmiştir. Bu kombinasyon hem yüksek basma dayanımı hem de düşük değişkenlik hedefi için ideal parametre setini temsil etmektedir.

Çizelge 4.3, Taguchi metodu ile basma dayanımı sonuçlarını analiz etmek için oluşturulan istatistiksel modelin performansını ve güvenilirliğini özetleyen temel doğrulama metriklerini sunmaktadır. Bu değerler, önceki analizlerde faktörlerin etkileri ve optimum seviyeler hakkında yaptığımız yorumların ne kadar sağlam bir istatistiksel temele dayandığını gösterir.

Çizelge 4.3. Basma dayanımı optimizasyonu için kullanılan modelin doğruluk ve güvenilirlik özeti

İstatistik	Değer
S	0,777685
R ²	%96,92
R ² (ayarlanmış)	%95,00
R ² (tahmin)	%91,24

Tablodaki R² değeri, modeldeki bağımsız değişkenlerin (yani 5 üretim parametresinin), bağımlı değişkendeki (basma dayanımı sonuçlarındaki) değişimin ne kadarını açıklayabildiğini yüzde olarak ifade eder. %96,92 gibi yüksek bir R² değeri, basma dayanımında gözlemlenen değişkenliğin neredeyse tamamının, seçilen beş üretim parametresindeki değişikliklerden kaynaklandığını göstermektedir. Bu, kurulan modelin deney verilerine uyum sağladığını ve seçilen faktörlerin sonuçları açıklamakta son derece başarılı olduğunu kanıtlar.

Ayarlanmış R² değerinin (%95,00), standart R² değerine (%96,92) çok yakın olması, modele dahil edilen tüm faktörlerin sonuca anlamlı bir katkı sağladığını ve modelde gereksiz bir değişken bulunmadığını doğrular. Model hem güçlü hem de verimlidir.

Tahmin edilen R², modelin öngörü kabiliyetidir. %91,24 gibi yüksek bir tahmin edilen R² değeri, modelin sadece mevcut verileri açıklamakla kalmayıp, aynı zamanda farklı parametre kombinasyonları için gelecekteki sonuçları da yüksek bir doğrulukla tahmin etme yeteneğine sahip olduğunu gösterir. Standart R² ile arasındaki farkın küçük olması, modelin aşırı uyum sorunu yaşamadığını ve güvenilir bir öngörü aracı olduğunu kanıtlar.

S değeri, modelin tahminlerinin gerçek deney sonuçlarından ortalama olarak ne kadar saptığını, yani modelin hata payını ifade eder. Daha düşük bir S değeri, daha hassas bir model anlamına gelir. 0,78 gibi düşük bir S değeri, modelin tahminlerinin gerçek verilere çok yakın olduğunu ve model tarafından açıklanamayan gürültü veya hatanın çok az olduğunu gösterir.

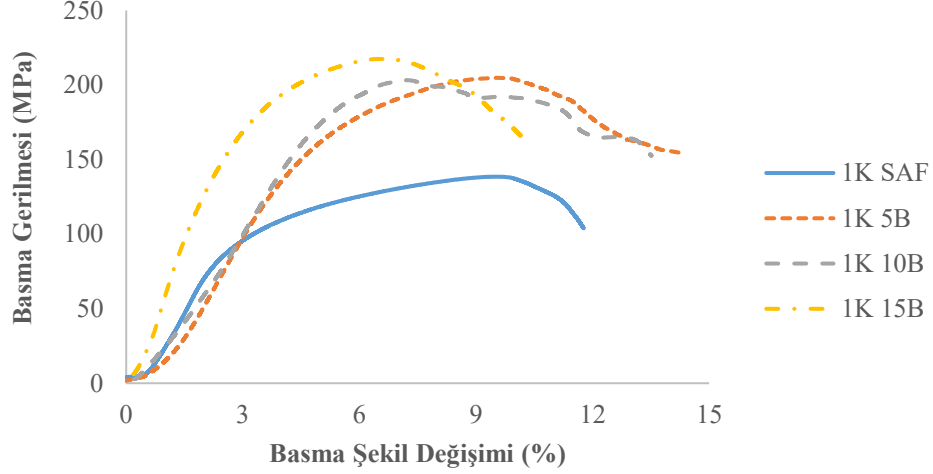
Bu doğrulama verileri, bir önceki Taguchi analizinden elde edilen sonuçların istatistiksel olarak anlamlı ve geçerli olduğunu kanıtlamaktadır. Deney sonuçları ile

üretim parametreleri arasındaki güçlü ilişki, rastlantısal değil, sistemattiktir. Dolayısıyla, bu model kullanılarak yapılan optimum üretim reçetesi tahmini bilimsel bir temele dayanmaktadır ve bu reçetenin uygulanması durumunda, yüksek basma dayanımına sahip bir ürün elde etme olasılığı çok yüksektir.

Taguchi analizleri ve gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saat mekanik alaşımlama ve 590 °C’de 3 saatlik sinterleme koşulları en uygun üretim parametreleri olarak belirlenmiştir. Ancak yapılan testlerde gözlemlenen düzlükler ve hasar görmüş numunelerdeki bulgular sinterleme koşullarının tabakalar arası birleşme için yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu nedenle 590°C sıcaklığa çıkılmadan önce 400°C’de 2 saat beklenmiş ardından 590°C’de 3 saat sinterleme ve fırında soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda ikinci aşama numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yeni üretimlerde, $Ti_3C_2T_x$ MXene katkısının malzeme üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında takviyeler yapılmıştır. Üretilen numunelere yönelik elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

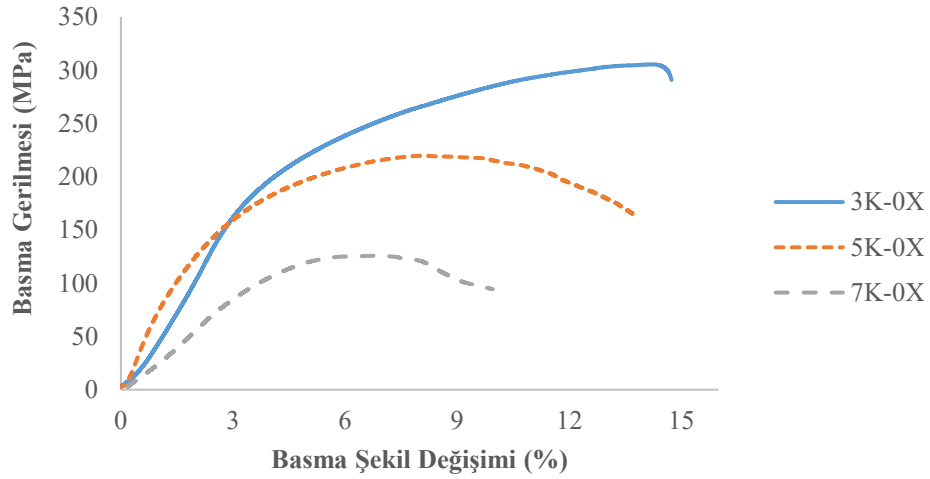
Şekil 4.7’de, ağırlıkça %5, %10 ve %15 B_4C takviyeli numuneler ile referans saf matris A7075 numunesinin basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. 1K SAF (saf matris) numunesi, 138,54 MPa ile en düşük basma dayanımına ve 12,39 J/cm³ ile en düşük tokluk değerine sahiptir. B_4C takviye oranı arttıkça basma dayanımı kademeli olarak yükselirken tokluk %5 B_4C takviyesinde 21,11 J/cm³ ile maksimuma ulaşmaktadır. 1K 15B numunesi ise yaklaşık 217,54 MPa ile en yüksek basma dayanımına ulaşmış ancak bu kazanım sünekliğin düşmesiyle tokluğun 17,31 J/cm³ değerine gerilemesine neden olmuştur.

Literatürdeki bulgular, artan B_4C takviyesi ile elde edilen mekanik davranışların temel malzeme bilimi mekanizmalarıyla tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Dayanım ve tokluktaki artış, uygulanan yükün A7075 matrisinden, daha sert ve rijit olan B_4C parçacıklarına etkin şekilde aktarılmasıyla (yük transferi) ve dislokasyon hareketinin bu parçacıklar tarafından engellenmesiyle açıklanmaktadır. Buna karşın, süneklik ve özellikle yüksek takviye oranlarında toklukta gözlenen azalma, gevrek B_4C parçacıkları ile matris arasındaki arayüzeylerde oluşan gerilme yığılmalarına bağlanmakta, bu lokal gerilmeler mikro çatlakların oluşmasına ve kompozitin daha gevrek bir kırılma davranışı sergilemesine neden olmaktadır (Manohar ve ark., 2021b).



Şekil 4.7. A7075 matrisine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında B₄C takviyesinin etkisi

Şekil 4.8’de, farklı katman sayısına (3, 5 ve 7 katman) ve her katmanda artan B₄C takviyesine sahip hibrit kompozitlerin basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrileri verilmiştir. 3K-0X numunesi 305,43 MPa basma dayanımı ve 33,19 J/cm³ tokluk ile bu grupta en yüksek değerlere ulaşmıştır. Katman sayısı 5’e ve en dış katman takviyesi ağırlıkça %10 B₄C’ye çıktığında (5K-0X), basma dayanımı 219,59 MPa’a, tokluk ise 24,39 J/cm³e gerilemiştir. 7 katmanlı ve en dış katmanında ağırlıkça %15 B₄C barındıran 7K-0X numunesinin basma dayanımı 125,8 MPa’a ve tokluğu 9,12 J/cm³e kadar düşmüştür.



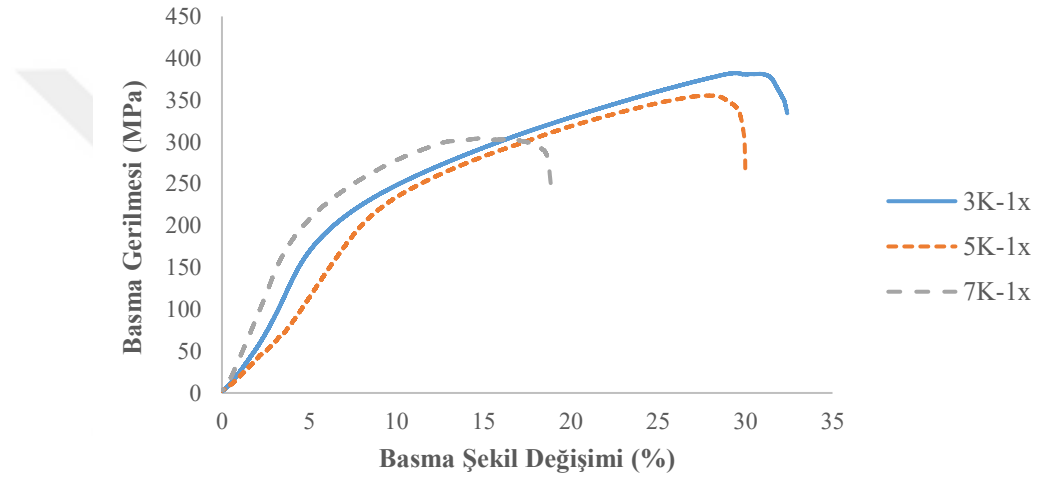
Şekil 4.8. Hibrit kompozitlerde katman adedinin etkisi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 birlikte incelendiğinde, katmanlı yapının hem basma dayanımı hem de tokluğu artırdığı görülmektedir. Basma dayanımı açısından, 1K-15B numunesi (217,57 MPa) ile 3K-0X numunesi (305,43 MPa) karşılaştırıldığında %40,3 oranında bir artış elde edilmiştir. Benzer şekilde, tokluk bakımından 1K-5B numunesi (21,11 J/cm³) ile 3K-0X numunesi arasında %57,2’lik kayda değer bir artış gözlenmiştir.

Bu sonuçlar, fonksiyonel derecelendirme yaklaşımının kompozit yapının basma dayanımı ve tokluğunu artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

FGM yapıda katman adedinin artışı ile gözlemlenen mekanik düşüşler, daha önce yapılan gözlemlerle analiz edilmiş ve takviye oranının artmasına bağlı olarak porozitenin artmasına ve özellikle geçiş bölgelerinde arayüz hatalarının oluşmasına bağlanmıştır. Bu durumun daha düşük takviyelerle geçişler yapılarak ve maksimum B_4C takviyesinin %10'da tutulması ile aşılabileceği değerlendirilmektedir.

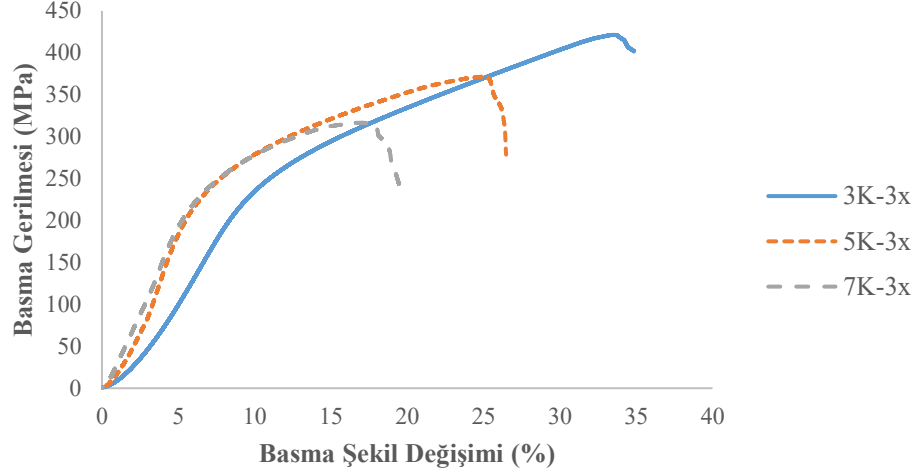
Şekil 4.9'da tüm katmanlara ağırlıkça %1 $Ti_3C_2T_x$ MXene ilavesinin farklı katman adetlerine sahip numunelerde basma dayanımına etkisi verilmiştir.



Şekil 4.9. Hibrit kompozitlerde katman adedi ve %1 $Ti_3C_2T_x$ MXene katkısının etkisi

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 karşılaştırıldığında, tüm katmanlara %1 $Ti_3C_2T_x$ MXene ilavesinin basma dayanımı ve tokluğu artırdığı görülmektedir. Özellikle 3K-1X numunesinde, katkısız eşdeğeri olan 3K-0X'e kıyasla basma dayanımı %25 artarak 382,32 MPa'a, süneklik iki katından fazla artışla %32,4'e ve tokluk ise neredeyse üç kat artışla 88,71 J/cm³'e ulaşmıştır. Ayrıca katkısız haliyle en düşük mekanik değerlere (basma dayanımı ve tokluk) sahip olan 7K-0X numunesi, MXene katkısıyla 304,21 MPa basma dayanımı ve 44,39 J/cm³ tokluk değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, MXene'nin katmanlar arası ve matris/takviye arayüzündeki bağları güçlendirerek çatlak oluşumunu baskıladığını ve malzemenin dayanım ile sünekliğini eş zamanlı artırdığını göstermektedir. (Şekil 4.45'te verilen MXene takviyeli tozların MA sonrası SEM analizlerine göre MXene takviyesinin soğuk kaynağı önleyerek daha küçük parçacıkların elde edilmesini sağladığı ayrıca A7075 parçacık yüzeylerinin pulsu MXene ile kaplandığı belirlenmiştir)

Şekil 4.10'da hibrit kompozitlere ağırlıkça %3 $Ti_3C_2T_x$ MXene ilavesinin ve farklı katman adetlerinin basma dayanımına etkisi verilmiştir.

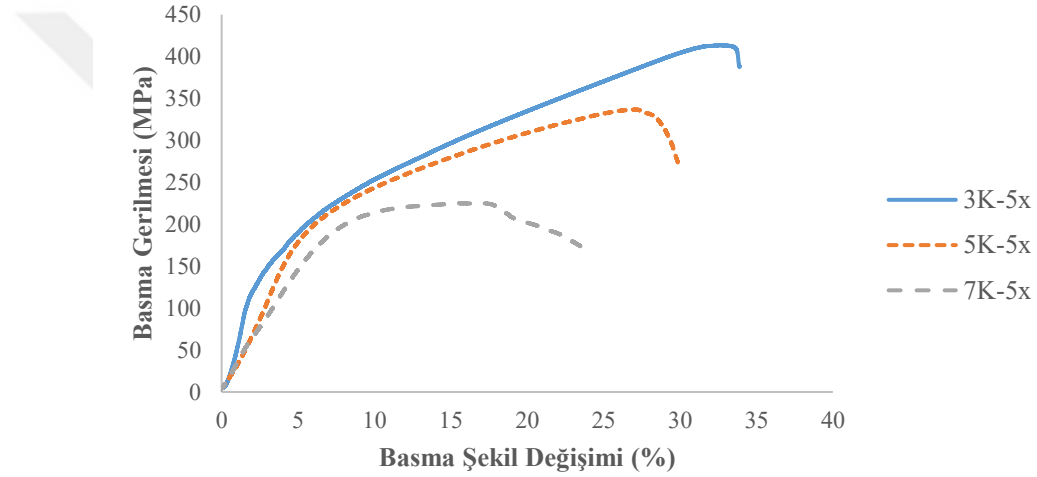


Şekil 4.10. Hibrit kompozitlerde katman adedi ve %3 $Ti_3C_2T_x$ MXene katkısının etkisi

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 birlikte değerlendirildiğinde, MXene katkısının ağırlıkça %1'den ağırlıkça %3'e çıkarılmasının genel olarak basma dayanımı ve tokluğu artırdığı ancak bu etkinin katman yapısına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir. 3K-3X numunesinde, 3K-1X'e kıyasla basma dayanımı 382,32 MPa'dan 421,43 MPa'a, süneklik %32,4'ten %34,9'a ve tokluk 88,71'ten 96,91 MJ/m³'e yükselmiştir. Bu artış, 3 katmanlı yapıda ağırlıkça %3 MXene oranının hâlâ faydalı olduğunu göstermektedir. Ancak, katman adedinin artması bu etkiyi sınırlamıştır. Örneğin, 5K-3X numunesinde basma dayanımı 355,44 MPa'dan 371,60 MPa'a artsa da sünekliği (%30,0'dan %26,5'e) ve tokluğu (73,93'ten 71,11 J/cm³'e) %1 MXene içeren numuneye göre azalmıştır. Benzer şekilde, 7K-3X numunesindeki artışlar da oldukça sınırlıdır. Elde edilen bulgular, MXene katkısı için optimum bir oran olduğunu ve bu oranın aşılmasının, özellikle hibrit takviyeli ve gevrek numunelerde, süneklik ve tokluğu düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Bu olumsuz etkinin altında yatan mekanizma, sertlik ve yoğunluk testleriyle de doğrulanmıştır. Gözlemlere göre, yüksek miktardaki MXene, B₄C parçacıklarıyla birleşerek mekanik bir kilitlenme oluşturmaktadır. Bu kilitlenme, tabakalar arası heterojenliği artırmakta ve sonuç olarak yüksek takviye oranlarında kompozitin genel yapısını bozmaktadır. (Şekil 4.45'te MXene takviyesinin A7075 matrisi üzerinde pulsu tabakalar oluşturmaları bu kilitlenme mekanizmasını doğrulamaktadır. Ayrıca MXene oranı arttıkça boyutsal artışın gözlenmesi optimum seviyeden uzaklaşıldığını göstermektedir)

Şekil 4.11'de hibrit kompozitlerde farklı katman adetlerine sahip numunelere ağırlıkça %5 $Ti_3C_2T_x$ MXene ilavesinin basma dayanımına etkisi görülmektedir. MXene

oranının ağırlıkça %5'e çıkarılması, %3 takviyeli analizde öne sürülen optimum seviye hipotezini güçlü bir şekilde doğrulamakta ve bu noktanın aşıldığını net bir şekilde göstermektedir. Verilere göre basma dayanımı ve süneklikte düşüşler başlamıştır. Örneğin 3K3X numunesi ile 3K5X numunesi kıyaslandığında basma dayanımı 421,43 MPa'dan 413,42 MPa'a, süneklik ise %34,9'dan %33,9'a gerilemiştir. 7K-5x numunesinin basma dayanımı, ağırlıkça %3 MXene'li versiyonuna kıyasla 316,57 MPa'dan 224,99 MPa'a düşerek %29'luk bir düşüş göstermiştir. Benzer şekilde 5K-5x numunesinin dayanımı da 371,60 MPa'dan 336,86 MPa'a gerilemiştir. Ancak 5K-5X ve 7K-5X numunelerinde ciddi dayanım kaybına karşın 5K-3X ve 7K-3X numunelerine kıyasla süneklikte sırasıyla %11,4 ve %16,9'luk artış görülmüştür.



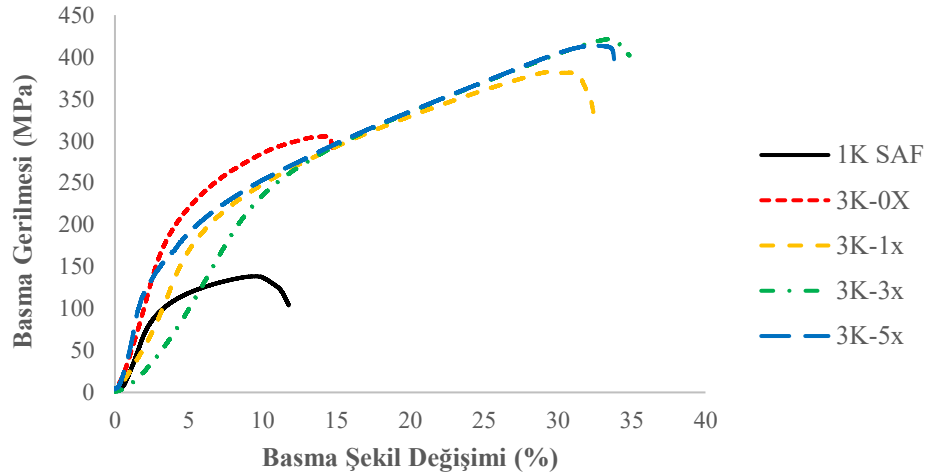
Şekil 4.11. Hibrit kompozitlerde katman adedi ve %5 $Ti_3C_2T_x$ MXene katkısının etkisi

Bu durum, ağırlıkça %5 gibi yüksek bir oranda $Ti_3C_2T_x$ MXene takviyesinin yapı içinde homojen dağılmak yerine topaklanarak (aglomerasyon) kusurlar oluşturduğu teorisini desteklemektedir (Şekil 4.45'te verilen SEM görüntüsü MXene artışı ile partikül boyutunun artışı göstermesi açısından bu yaklaşımı doğrulamaktadır). Bu MXene topakları, yükü etkin bir şekilde taşıyamadığı için malzemenin genel dayanımını düşürmekte aynı zamanda zayıf bölgeler oluşturarak malzemenin daha düşük bir gerilmede daha fazla deforme olmasına (süneklik artışına) izin vermektedir. Özetle, ağırlıkça %5 MXene katkısı basma dayanımı ve tokluk değerlerinde düşmeye neden olarak, MXene katkısı için bir optimum değer varlığını ve bu optimum seviyenin aşıldığını göstermektedir.

Şekil 4.12'te en yüksek basma dayanımı ve tokluk değerlerine ulaşan 3K hibrit kompozitler ile referans numune (1K SAF) birlikte verilmiştir. Grafiğin başlangıçtaki eğimi, malzemelerin elastisite modülünü temsil eder. Grafiğe göre 1K SAF numunesinin

başlangıç eğimi katmanlama ile elde edilen 3K-0X'e kıyasla daha düşüktür yani 3K-0X numunesi daha yüksek bir modüle ve rijitliğe sahiptir. Ağırlıkça %1 ve %3 MXene eklenmesi, malzemenin elastisite modülünü düşürmüştür. Özellikle 3K-3x numunesinin başlangıç eğimi takviyesiz 1K SAF numunesi ile benzer başlangıç tepkisi vermektedir. Ağırlıkça %5 MXene takviyesi ise elastisite modülünü artırarak, 3K-0X'e benzer bir eğim sergilemektedir.

Bu durum, düşük orandaki (ağ. %1, %3) MXene'nin, tozların ilk sinterlenmesi sırasında parçacıklar arası bağın tam oluşmasını engelleyerek veya arayüzeylerde bir tür kaydırıcı etki oluşturarak malzemenin düşük gerilmeler altında daha kolay deforme olmasına neden olabileceğini düşündürmektedir. Ancak yüksek oranda (ağ. %5) MXene eklendiğinde ise, MXene'nin kendisi bir ağ yapısı oluşturarak yükü en baştan itibaren etkin bir şekilde taşımaya başlar ve yüksek rijitlik tekrar sağlanır.



Şekil 4.12. 3 katmanlı hibrit kompozitlerde Ti_3C_2Tx MXene katkılı numunelerin referans numuneleri ile karşılaştırılması

Elastisite modülü en düşük olan 3K-3x numunesi, akma sonrası en yüksek basma dayanımına ulaşmıştır. Düşük gerilmelerde kolayca deforme olmaya başlayan malzeme, şekil değiştirdikçe pekleşir ve tüm numuneler içinde en yüksek basma dayanımına (421 MPa) ulaşır. Benzer şekilde, yine düşük bir başlangıç eğimine (elastisite modülü) sahip 3K-1x de yüksek bir pekleşme sergiler. Buna karşın, elastisite modülü yüksek olan 3K-0X, MXene katkılı numunelere kıyasla en düşük basma dayanımına ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre, MXene'nin başarısı, malzemeyi başlangıçta daha rijit yapmasından değil, tam tersine deformasyon mekanizmasını tamamen değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Malzeme, düşük başlangıç modülü sayesinde gelen enerjiyi ve deformasyonu kırılmadan

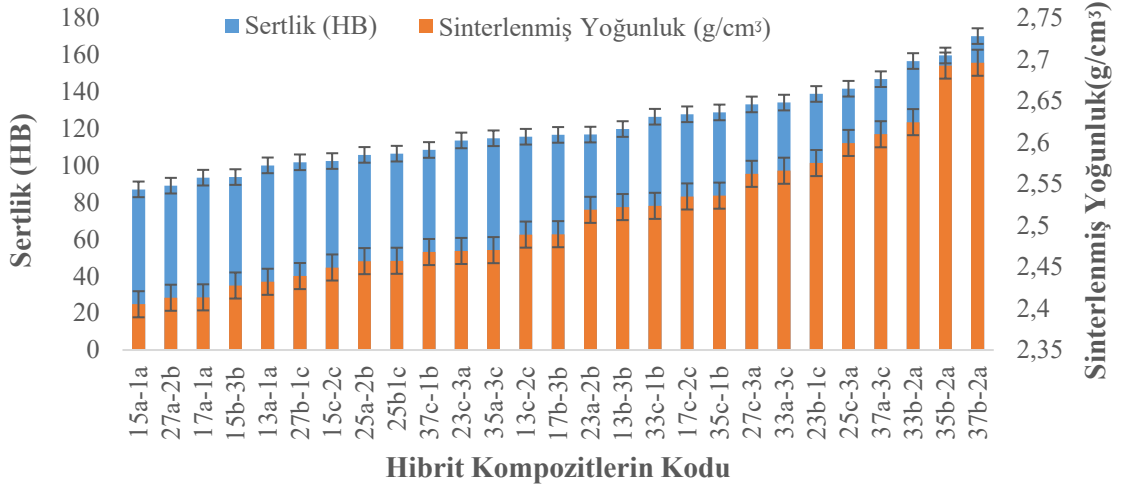
sönümleyebilmekte, aynı zamanda gösterdiği pekleşme kabiliyeti sayesinde yüksek dayanım seviyelerine ulaşabilmektedir.

Ek olarak basma testlerinin ikinci aşamasında basma dayanımı ve birim şekil değişimi eğrilerinde görülen düzlüklerin kaybolduğu belirlenmiştir. Böylece bu düzlükler için önerilen tabakalar arası arayüzey ayrılması hipotezi doğrulanmakta ve bu duruma reçete olarak sunulan 2 aşamalı sinterleme prosesinin çözüm olarak kullanılabilirliği kanıtlanmaktadır.

4.1.2. Sertlik özelliklerinin deneysel ve istatistiksel incelemesi

Bu kısımda, üretilen A7075/B₄C kompozit numunelerin sertlik özellikleri hem deneysel veriler hem de istatistiksel analizler ışığında değerlendirilmiş ve üretim parametrelerinin sertlik üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Ayrıca optimizasyon sonrası ikinci aşama numune üretimlerinde Ti₃C₂T_x MXene ilavelisinin yapıdaki sertlik üzerine etkisi belirlenmiştir.

Şekil 4.13, üretilen 27 farklı hibrit kompozitin sinterlenmiş yoğunluk ve Brinell sertlik değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Grafikteki numuneler, iki özellik arasındaki ilişkinin daha net görülmesi için artan sertlik değerlerine göre sıralanmıştır.



Şekil 4.13. Hibrit kompozitlerin sinterlenmiş yoğunluğunun ve sertliğinin karşılaştırmalı analizi

Numuneler artan sertliğe göre sıralandığında, yoğunluk değerlerinin de neredeyse paralel bir şekilde arttığı görülmektedir. Sertlik, bir malzemenin lokalize plastik deformasyona karşı direncidir. Malzeme içindeki poroziteler hem gerilme yığılma noktaları oluşturur hem de malzemenin yüke direnen etkin kesit alanını azaltır. Dolayısıyla, gözenekliliğin azalması (yani yoğunluğun artması), malzemenin batmaya karşı direncini doğrudan artırır. Bu ilişki, birçok metal ve seramik sistem için literatürde

yaygın olarak rapor edilmiştir ve genellikle aşağıdaki denklem ile (Denklem 4.1) ifade edilir (German, 1984);

$$H = H_0 \cdot e^{-kp} \quad (4.1)$$

Burada; H: malzemenin ölçülen sertliğidir, H_0 : teorik olarak tam yoğun olan aynı malzemenin sertliğidir, p: gözeneklilik oranı olup 0-1 arası bir değerdir, k: malzemeye özgü bir katsayıdır ve gözeneklerin etkisini belirler.

Şekil 4.13 dikkatle incelendiğinde, yoğunluğun tek başına sertliği belirleyen asıl faktör olmadığı ve genel eğilimden sapmalar olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek sertliğe (170 HB) sahip olan 37b-2a numunesi (2,56 g/cm³), kendisinden daha yoğun olan 33b-2a (157 HB, 2,62 g/cm³) ve 35b-2a (160 HB, 2,61 g/cm³) gibi birçok numuneden daha serttir. Benzer şekilde, en yoğun numunelerden biri olan 23c-3a (2,69 g/cm³) nispeten düşük bir sertlik (114 HB) göstermektedir. Bu farklılıklar, sertlik üzerinde farklı mekanizmaların varlığına işaret eder.

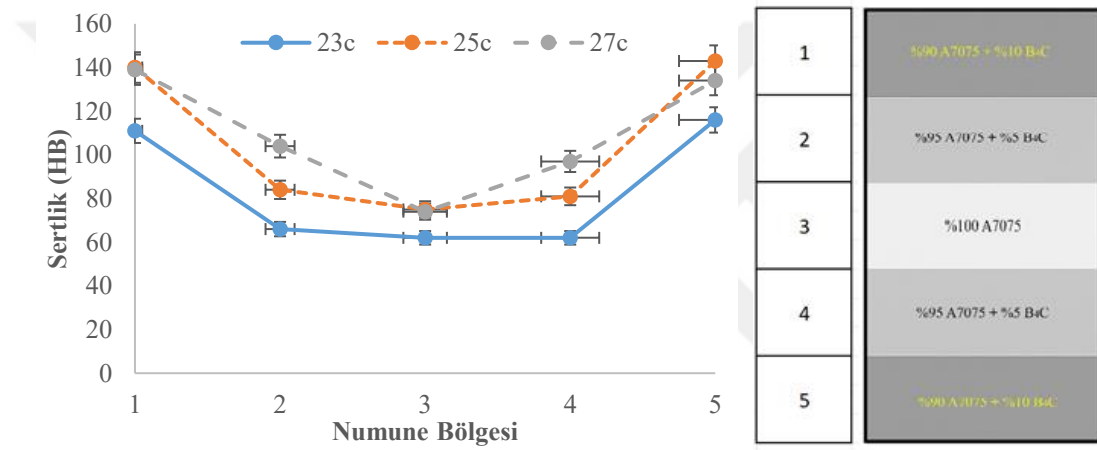
Sertlik verilerinde özellikle 3 saat mekanik alaşımlanmış numunelerdeki sertliğin daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bunun sebebi;

- Nanokristal Yapı: Uzun MA süreleri, A7075 matrisinin tane boyutunu nanometre seviyelerine indirir. Tane sınırları, dislokasyon hareketine karşı birer engel teşkil ettiğinden, tane boyutu küçüldükçe malzemenin sertliği ve dayanımı artar (Rao, 2021). (Artan mekanik alaşımlama süresi ile kristalit boyutunun küçüldüğü Şekil 4.37'de XRD analizi ile teyit edilmiştir.)
- Dispersiyon Sertleşmesi: Uzun MA süreleri, sert B₄C partiküllerinin matris içinde çok daha ince ve homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu ince ve sert partiküller, dislokasyon hareketini bloke ederek malzemenin sertliğini artırır (Ajithkumar ve Xavier, 2022). (Artan mekanik alaşımlama süresi ile daha homojen karışımların elde edildiği Şekil 4.43'te SEM görüntüleri ile teyit edilmiştir.)

Ayrıca sertlik verilerine göre en yüksek sertlik gösteren 3 kompozitin (33b-2a, 35b-2a ve 37b-2a) sinterleme şartlarının 550 °C'de 2 saat olduğu görülmektedir. Aynı grafikte daha yüksek sinterleme süresi (3saat) ve daha yüksek sıcaklıklar (570°C ve 590°C) daha düşük sertlik verileri göstermektedir ve bu durum yüksek basma dayanımından (basma dayanımında 590 °C'de 3 saat sinterlemenin en yüksek basma dayanımı sağlayacağı belirlenmişti) farklı optimum parametrelere işaret etmektedir. Sinterleme sıcaklığının ve süresinin artırılması, gözenekleri azaltıp yoğunluğu ve

dayanımı artırırken aynı zamanda tane büyümesine neden olarak nanokristal yapının bozulmasına yol açar ve tane boyutu büyüdüğünde ise sertlik düşer. Bu nedenle, yüksek sertlik için en düşük sinterleme sıcaklığının (550°C) ve 2 saatlik bir sürenin en iyi sonucu vermesi, daha yüksek değerlere kıyasla tane büyümesini engelleyerek nanokristal yapıyı koruduğunun işaretidir (Nayak ve ark., 2022).

Şekil 4.14, en yüksek basma dayanımı sonuçlarını veren 23c, 25c ve 27c kodlu hibrit kompozitlerin enine kesitleri boyunca (bir kenardan diğerine) ölçülen bölgesel sertlik değerlerini göstermektedir. Bu grafik, malzemenin sertlik açısından fonksiyonel geçişlere sahip olduğunu göstermektedir. Grafikteki her üç numunenin (23c, 25c, 27c) sertlik profili de karakteristik bir U şekli sergilemektedir.



Şekil 4.14. En yüksek basma dayanımına sahip numunelerin bölgesel sertlik verileri

Grafikteki en yüksek sertlik değerleri bölge 1 ve 5'te (dış kenarlar) ölçülmüştür. Şemaya göre bu bölgeler, numune içerisinde en yüksek seramik takviye oranına (ağ. %10 B₄C) sahip olan katmanlardır. Sert B₄C partiküllerinin varlığı, beklendiği gibi, malzemenin batmaya karşı direncini, yani sertliğini artırmıştır. Grafikteki en düşük sertlik değerleri tutarlı bir şekilde numunelerin merkezinde ölçülmüştür. Bu bölge, şemada gösterildiği gibi, içinde hiç seramik takviyesi bulunmayan saf A7075 metal matrisine karşılık gelir. Saf metalin sünek doğası, en düşük sertlik değerlerini açıklamaktadır. Bölge 2 ve 4'teki (ara bölgeler) sertlik değerleri, dış kenarlar ile merkez arasında bir geçiş sergilemektedir. Bu da yine şemadaki ağ. %5 B₄C içeren ara katmanların varlığı ile tutarlıdır.

Bölgesel sertlik verilerinde kullanılan üç numune de aynı MA süresi (2 saat), aynı sıkıştırma basıncı (500 MPa) ve aynı sinterleme koşullarında üretilmiş olup, aralarındaki tek fark katman sayısıdır (23c: 3 katman, 25c: 5 katman, 27c: 7 katman). 5 katmanlı (25c)

ve 7 katmanlı (27c) numuneler, 3 katmanlı (23c) numuneye kıyasla, daha fazla B₄C içeren dış katmanlarda (Bölge 1, 2, 4, 5) belirgin şekilde daha yüksek sertlik değerleri sergilemektedir. Örneğin, dış kenarlarda (1-5. bölge) 25c (143 HB) ve 27c (139 HB) numuneleri, 23c numunesine (116 HB) kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca tüm numunelerin saf A7075 içeren merkez bölgelerindeki sertlik değerleri 65 ± 5 HB ile birbirine oldukça yakındır. Ancak özellikle dikkat edilmelidir ki 25c numunesinin dış kenarlarındaki sertlik 27c numunesine kıyasla daha yüksektir. Bu durum, seramik takviye miktarı arttıkça sertliğinde sürekli artmayacağını göstermektedir.

Artan takviye miktarına bağlı olarak sertliğin artması, uygulanan dış yükün daha yumuşak ve sünek olan A7075 matrisinden, daha sert ve yüksek elastisite modülüne sahip B₄C takviye parçacıklarına etkin bir şekilde aktarılması prensibine dayanır. Yükün büyük bir kısmını B₄C parçacıkları taşıdığı için kompozitin bütünü, deformasyona karşı daha yüksek bir direnç gösterir. Yük transferinin etkinliği; takviye parçacıklarının hacim oranına, boyutuna, şekline, dağılım homojenliğine ve en önemlisi matris ile takviye arasındaki arayüzey bağının kalitesine bağlıdır. Güçlü bir arayüzey bağı, yükün kesintisiz transferini sağlarken, zayıf bir bağ arayüzeyde ayrılmaya yol açarak bu mekanizmayı etkisiz kılar (Guo ve Zhang, 2018).

Bu mekanizma ve elde edilen sertlik verileri ışığında ağ. %15 B₄C takviyesinin malzeme içerisinde güçlü bir arayüzey bağından yoksun olduğu söylenebilir. Bu yaklaşım, ileri bölümlerde aşınma testleri ve aşınma sonrası SEM-EDS analizleri ile doğrulanmıştır.

Elde edilen sertlik profili, fonksiyonel dereceli malzemelerin temel tasarım amacını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Dış katmanlarda elde edilen yüksek sertlik değerlerinin (140 ± 3 HB), malzemenin yüzeyinde yüksek aşınma direnci oluşturarak kütle kaybına karşı etkili bir koruma sağlaması beklenmektedir (Aşınma testleri ile detaylıca analiz edilmiş ve SEM-EDS analizleri ile desteklenmiştir). Buna karşılık, çekirdek bölgede ölçülen daha düşük sertlik (65 ± 5 HB), malzemenin sünekliğini ve tokluğunu artırmakta (basma testlerinde belirlenmişti), böylece ani kırılmaları önlemektedir. Yüzeyde oluşabilecek bir çatlak, sünek ve tok iç katmanlara ulaştığında ilerleme eğilimi zayıflamakta ya da tamamen durmaktadır. Bu durum, malzemenin yapısal bütünlüğünü koruması açısından kritik öneme sahiptir.

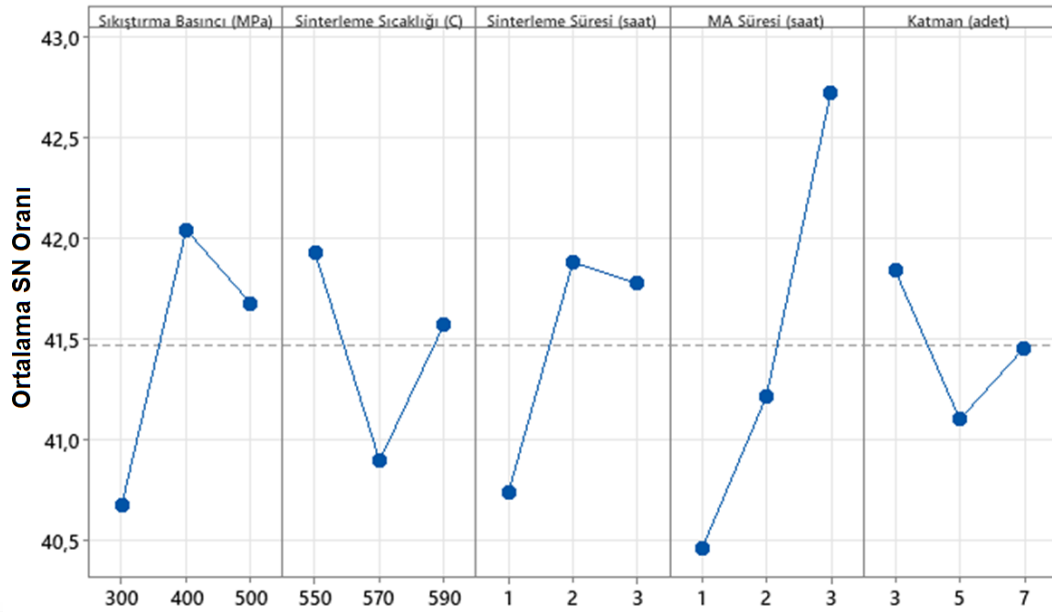
Çizelge 4.4, beş farklı üretim faktörünün, hibrit kompozitlerin nihai Brinell Sertliği (HB) üzerindeki etkisini istatistiksel olarak analiz etmektedir.

Çizelge 4.4. Sinyal-gürültü oranlarına dayalı yüksek sertlik için parametre etkilerinin analizi

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Delta	Sıra
Sıkıştırma Basıncı	40,67	42,04	41,68	1,37	2
Sinterleme Sıcaklığı	41,93	40,89	41,57	1,03	4
Sinterleme Süresi	40,74	41,88	41,77	1,15	3
Bilyeli Öğütme Süresi	40,45	41,21	42,73	2,27	1
Katman Adedi	41,84	41,10	41,45	0,74	5

Basma dayanımında olduğu gibi, daha büyük daha iyidir kalite karakteristiği kullanılmıştır. Daha yüksek bir S/N oranı, daha yüksek ve daha tutarlı bir sertlik değerine işaret etmektedir. Veriler, sertlik üzerinde en baskın etkiye sahip faktörün bilyeli öğütme süresi (Delta = 2.27) olduğunu göstermektedir. Sıkıştırma basıncı (Delta = 1.37) ise ikinci en etkili faktördür. Sinterleme süresi, sinterleme sıcaklığı ve katman adedi daha az etkiye sahiptir. Bu sıralama, basma dayanımı analiziyle karşılaştırıldığında çok önemli bir fark ortaya koymaktadır. Basma dayanımında en etkili faktör sıkıştırma basıncı iken sertlikte en etkili faktör bilyeli öğütme süresi olmuştur. Basma dayanımı, malzemenin bütününe ilgilendiren makro bir özelliktir ve büyük ölçüde içindeki gözenekler gibi hacimsel kusurlara duyarlıdır. Bu nedenle, gözenekliliği en çok etkileyen sıkıştırma basıncı, dayanım için en kritik faktördür. Sertlik ise, malzemenin yüzeyinin lokal bir plastik deformasyona (batmaya) karşı gösterdiği dirençtir ve mikroyapısal özelliklere çok daha duyarlıdır. Uzun bilyeli öğütme süreleri, nanokristal bir yapı oluşturur ve sert B₄C partiküllerinin çok daha ince ve homojen dağılmasını sağlar. Bu iki mikroyapısal özellik (Hall-Petch güçlenmesi ve dispersiyon sertleşmesi), malzemenin lokal deformasyona direncini, yani sertliğini doğrudan ve güçlü bir şekilde artırır. Bu nedenle MA süresinin sertlik için en baskın faktör olması beklen bir durumdur (Sankhla ve ark., 2022).

Şekil 4.15, sertlik verileri için yapılan Taguchi S/N oranı analizinin sonuçlarını görselleştiren ana etkiler grafiğidir. Bu grafik, her bir üretim faktörünün farklı seviyelerinin, nihai ürünün sertliği üzerindeki ortalama etkisini gösterir. Büyük olan iyidir kriterine göre, her bir çizginin üzerindeki en yüksek tepe noktası, o faktör için sertliği maksimize eden optimum seviyeyi temsil eder. Çizginin eğimi ise o faktörün etki gücünü yansıtır. Grafik MA parametresi için incelendiğinde optimum seviyenin 3 saat olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum testlerin yorumlanması esnasında da belirlenmiştir.



Şekil 4.15. S/N oranı analizine dayalı olarak sertliğin artırılmasına yönelik proses optimizasyonu

Optimizasyon verileri (Şekil 4.15) kapsamlı şekilde incelendiğinde ise SN oranındaki eğimin gelişimine bakarak daha uzun öğütmenin (3 saat üzeri) nanokristal bir yapı ve daha ince takviye dağılımı sağlayarak sertliği daha da artıracakı söylenebilir (Roy, 2001; Witharamage ve ark., 2021). Sıkıştırma basıncı parametresinde ise optimum seviyenin 400 MPa olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum 300 MPa'nın yetersiz yoğunluk sağladığını (Solay Anand ve Mohan, 2012) ve porozitelerin varlığı nedeniyle sertliğin düşük çıkabileceğini ortaya koyar. Ancak tozları 500 MPa'da sıkıştırmanın yoğunluk analizlerinde (ileri bölümde incelenecektir) poroziteyi azalttığı tespit edilmiştir ayrıca sıkıştırma basıncı ile genel olarak porozitenin düştüğü ve mekanik özelliklerin geliştiği raporlanmaktadır (Al-Qureshi ve ark., 2005). Taguchi analizi ile belirlenen bu durum literatür ile tam bir uyum göstermemekte ve istatistiksel yaklaşımın doğruluğunun da gözden geçirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda sertlik optimizasyonu için kullanılan modelin doğruluk ve güvenilirlik özeti Çizelge 4.5'te ile analiz edildiğinde durum netlik kazanmıştır. Ek olarak optimum seviye olarak sinterleme süresi 2 saat, sıcaklık 550°C ve katman adedi 3 olarak belirlenmiştir. Optimum sinterleme şartlarının düşük değerlerde kalmasının sebebi sertlik testi sonrası yorumlamalarda da ifade edildiği üzere mekanik alaşımlama ile elde edilen nanokristal yapıyı koruma stratejisiyle ilişkilendirilmiştir. Son olarak sertlik için takviye oranı daha düşük (ağ. %5 B₄C) olan 3 katmanlı FGM yapının yüksek sertlik için optimum olarak öne çıkması yine test sonrası yorumlamalarda da ifade edildiği gibi takviye miktarı arttıkça matris takviye arayüz bağının zayıflaması olarak belirtilmiştir.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.15, A7075/B₄C kompozitlerinde sertlik ve basma dayanımı arasında optimum parametrelerin tayini için bir farklılaşmayı ortaya koymaktadır. Bu şekiller, farklı üretim parametrelerinin bu iki mekanik özellik üzerindeki etkilerini sunarken, aynı zamanda optimizasyon sürecinde hangi özelliğin önceliklendirildiğine bağlı olarak diğerinde yaşanabilecek olası kayıplara dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.5'te sunulan istatistiksel veriler, sertlik optimizasyonu için kurulan modelin, basma dayanımı için kurulan modele kıyasla önemli ölçüde daha zayıf ve daha az güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Modelin, sertlik verilerindeki değişkenliğin yaklaşık %75'ini açıklayabilen ($R^2=75,11\%$) bir açıklama gücü olmasına rağmen, %29,12 gibi kritik derecede düşük bir tahmin edilen R^2 değerine sahip olması, modelin yeni deney sonuçlarını öngörme yeteneğinin çok zayıf olduğunu göstermektedir. Bu durum, seçilen üretim parametrelerinin sertlik üzerindeki genel eğilimi belirlediğini, ancak hassas ve güvenilir tahminler yapmak için yetersiz kalacağını gösterir.

Çizelge 4.5. Sertlik optimizasyonu için kullanılan modelin doğruluk ve güvenilirlik özeti

İstatistik	Değer
S	0,994710
R^2	%75,11
R^2 (ayarlanmış)	%59,55
R^2 (tahmin)	%29,12

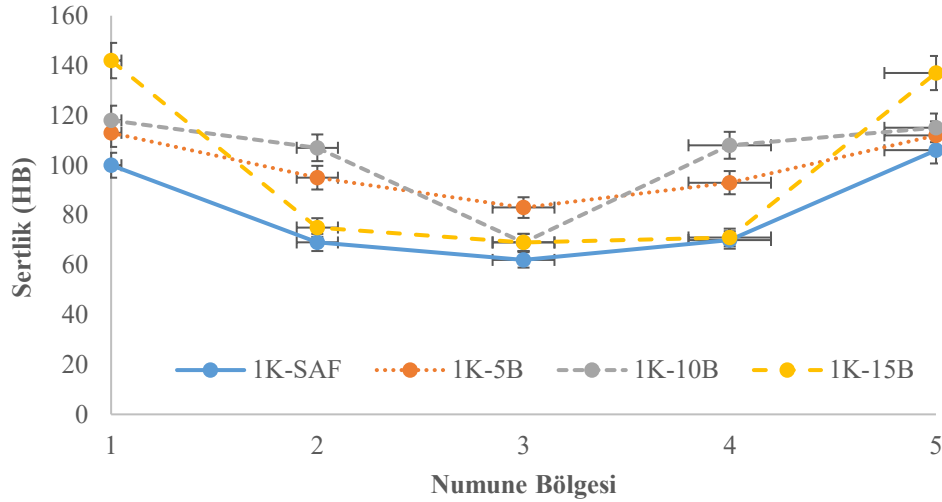
Bu istatistiksel zayıflığın temelinde, sertlik ve basma dayanımının doğası arasındaki temel fark yatmaktadır. Basma dayanımı, numunenin bütününe temsil eden ve gözeneklilik gibi makro faktörlere duyarlı bir kütsel özelliktir. Sertlik ise, indenterin ucunun denk geldiği mikroskobik bölgeye (sert bir B₄C partikülü mü, yumuşak A7075 matrisi mi, yoksa bir mikro-gözenek mi olduğuna) aşırı derecede duyarlı olan yerel (lokal) bir özelliktir. Bu mikroyapısal heterojenlik, sertlik ölçümlerinde doğal bir değişkenlik oluşturur. Dolayısıyla, modelin bu zayıflığı aslında malzemenin kendisi hakkında önemli bir çıkarım sunar. Üretim prosesi malzemenin ortalama sertliğini kontrol edebilse de nihai FGM yapısı, doğası gereği, noktadan noktaya belirgin sertlik farklılıkları gösteren heterojen bir yapıdadır ve bu da hassas tahminler yapmayı zorlaştırır.

Çalışmanın ikinci aşamasında basma, sertlik ve yoğunluk verilerinden elde edilen Taguchi analizi, optimizasyonlar ve bulgular doğrultusunda 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saat mekanik alaşımlama ile 400°C'de 2 saat ardından 590 °C'de 3 saatlik sinterleme ve fırında soğutma koşullarında yeni numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşama üretimlerde, Ti₃C₂T_x MXene katkısının malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini

incelemek amacıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında takviyeler yapılmıştır. Üretilen yeni numunelere yönelik elde edilen sertlik bulguları aşağıda sunulmuştur.

Şekil 4.16 referans olması amacıyla üretilen tek katmanlı numunelerde B₄C takviyesinin miktarına bağlı olarak sertlikteki değişimi göstermektedir. Grafik incelendiğinde iki temel eğilim açıkça görülmektedir:

- U-Şekli Dağılım: Tüm numuneler, istisnasız bir şekilde, sertliğin numunenin uçlarında (Bölge 1 ve 5) en yüksek, numunenin tam ortasında (Bölge 3) ise en düşük olduğu karakteristik bir U şeklinde dağılım sergilemektedir. Bu, üretilen parçaların hiçbirinin boylu boyunca homojen bir sertliğe sahip olmadığını göstermektedir.
- B₄C Takviyesinin Etkisi: Genel olarak, kompozit malzemeye B₄C takviyesi eklenmesi sertliği artırmaktadır. Ancak en yüksek takviye oranına sahip 1K-15B numunesi bu eğilime kısmen uymakta ve önemli bir farklılık göstermektedir. Uçlarda en yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen, merkezdeki sertliği 10B ve 5B numunelerinden bile daha düşüktür.

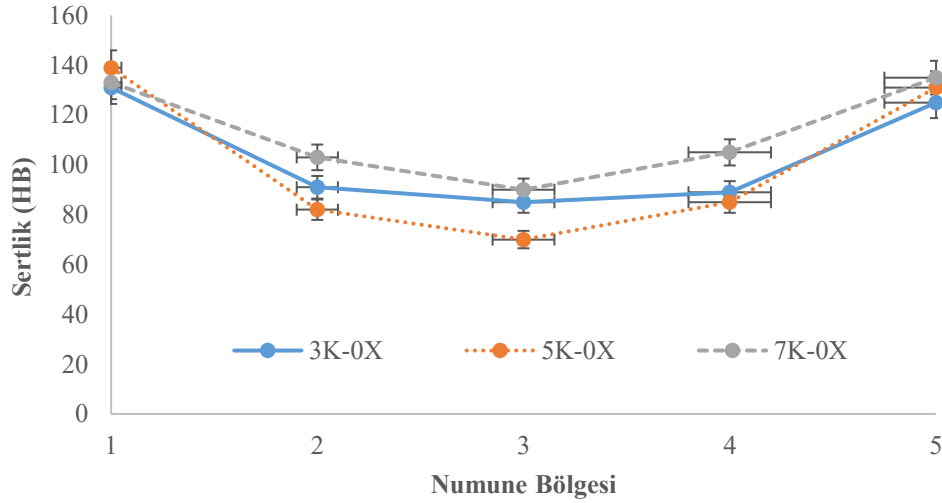


Şekil 4.16. Tek katmanlı (1K serisi) numunelerde B₄C takviyesinin sertlik dağılımına etkisi

Literatürdeki çalışmalar, tek eksenli presleme sırasında kalıp içerisindeki tozların homojen bir şekilde sıkıştırılamadığını göstermektedir. Presleme pistonlarından (zımbalardan) uygulanan kuvvet, toz ile kalıp duvarları arasındaki sürtünme kuvvetleri nedeniyle numunenin merkezine doğru ilerledikçe azalır. Bu durum, numunenin uç kısımlarının daha yüksek basınca maruz kalarak daha yoğun (daha az gözenekli), orta kısımlarının ise daha düşük basınç altında kalarak daha gevşek ve gözenekli bir yapıya sahip olmasına neden olur. Sinterleme sırasında daha yoğun olan uç bölgeler daha etkin bir şekilde birbirine kaynaşırken, daha gözenekli olan orta bölgedeki parçacıklar arası

bağlar daha zayıf kalır. Daha düşük yoğunluk ve daha zayıf bağlar, doğrudan daha düşük sertlik anlamına gelir (Araoyinbo ve ark., 2022). Bu mekanizma ve referans numunelerimizin sertlik verileri doğrultusunda geleneksel toz metalurjisi prosesindeki tek eksenli soğuk sıkıştırmanın kronik bir sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu durumun mekanik özellikleri doğrudan etkilediği çalışma kapsamındaki testlerle de doğrulanmış ve çalışmanın özgünlüğü olarak öne çıkan $Ti_3C_2T_x$ katkısı ile FGM istif düzeninin ileri proseslerle (izostatik presleme, sıcak presleme, gibi) araştırılmasına öneriler kısmında değinilmiştir.

Şekil 4.17 MXene katkısız (0X), farklı katman adetlerine sahip hibrit kompozitlerin sertlik dağılımını göstermektedir. Grafik incelendiğinde, numunelerin sertlik davranışında referans numunelerden (1K-SAF, 1K-5B, gibi) farklı olarak önemli bir karakteristik ortaya çıkmaktadır. Tüm bu numunelerin merkez katmanı takviyesiz saf A7075 olmasına rağmen, merkezdeki (Bölge 3) sertlik değerleri birbirinden farklıdır (3K: 85 HB, 5K: 70 HB, 7K: 90 HB). Bu, merkezdeki bir katmanın sertliğinin, komşu katmanların varlığından ve özelliklerinden etkilendiğini göstermektedir.

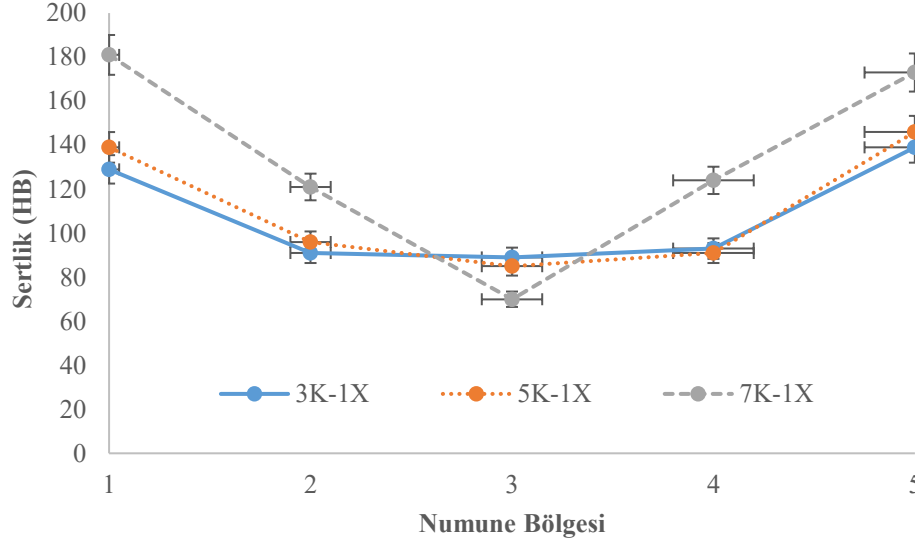


Şekil 4.17. Hibrit kompozitlerde katman sayısının sertlik dağılımı üzerindeki etkisi

Sinterleme sonrası soğuma sırasında, farklı B_4C oranlarına sahip katmanlar, farklı termal genleşme katsayılarına (CTE) sahip oldukları için farklı oranlarda büzülürler. B_4C takviyeli dış katmanların CTE'si, saf alüminyum merkez katmanın CTE'sinden daha düşüktür. Bu uyumsuzluk, soğuma sonunda malzeme içinde artık gerilmeler oluşturur. Dış katmanlar çekme gerilmesi altına girerken, merkezdeki saf katman sıkıştırma (basma) gerilmesi altına girer (Tayebi ve ark., 2019). Bir malzemenin yüzeyine sertlik ölçümü için batıcı bir uç bastırıldığında, halihazırda sıkıştırma gerilmesi altında olan bir bölge

batmaya karşı daha fazla direnç gösterir ve olduğundan daha sert ölçülür. 7K-0X numunesindeki CTE uyumsuzluğu (dışta %15 B₄C), 3K-0X'e (dışta %5 B₄C) göre çok daha fazladır. Bu nedenle merkezinde daha yüksek bir sıkıştırma gerilmesi oluşur ve bu da merkezdeki sertliğinin (90 HB) 3K-0X'in merkezinden (85 HB) daha yüksek ölçülmesini sağlar. Bu durum, fonksiyonel dereceli malzemelerde performansı belirleyen sadece katman sayısı veya en dış katmanın takviye oranı değil, katmanların birbiriyle olan etkileşimi ve bunun üretim sürecindeki sonuçları olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.18, ağırlıkça %1 Ti₃C₂T_x MXene katkılı hibrit kompozitlerin sertlik dağılımını göstermektedir.

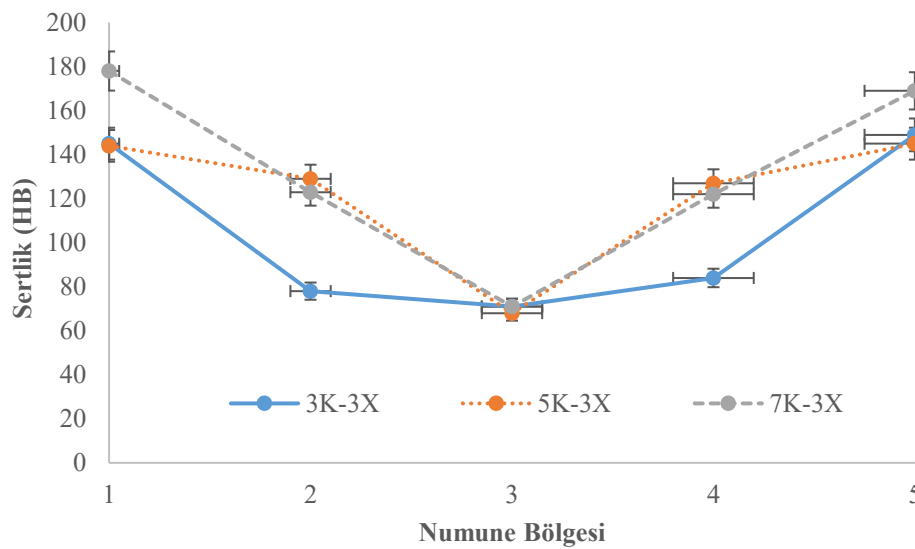


Şekil 4.18. %1 Ti₃C₂T_x MXene katkılı hibrit kompozitlerde sertlik dağılımı

Şekil 4.18'e göre, 3K-1X numunesi, 3K-0X'e kıyasla genel olarak benzer bir profil çizerken, merkezdeki sertliği 85 HB'den 89 HB'ye artırmıştır. 5K-1X numunesinin merkezindeki sertlik, 70 HB'den 85 HB'ye çıkarak %20'nin üzerinde bir artış göstermiştir. Bu, yağlayıcı özelliği ile öne çıkan MXene'nin matris takviye arasında arayüzey etkileşimini artıran bir rol oynadığını göstermektedir (Desai ve ark., 2025). 7K-1X numunesinde uçlarındaki sertlik, 135 HB'den 181 HB (Bölge 1) ve 173 HB (Bölge 5) seviyesine ulaşmıştır. Bu, ağırlıkça %15 B₄C ile ağırlıkça %1 MXene'nin hibrit takviyesinin bu bölgelerde sert bir kabuk oluşturduğunu gösterir. Buna karşın, numunenin merkezindeki (Bölge 3) sertlik, 70 HB'ye düşerek grubun en yumuşağı haline gelmiştir. Bu durum, numunenin sertlik heterojenliğini (uçlar ve merkez arasındaki farkı) artırmıştır.

3K ve 5K numunelerindeki sertlik artışı, MXene'nin beklendiği gibi davranarak katmanlar arası difüzyonu ve sinterlemeyi teşvik etmesi, böylece daha yoğun ve mekanik olarak daha bütüncül bir yapı oluşturmasıyla açıklanabilir. Ancak 7K-1X numunesindeki heterojenliğin artışı farklı bir duruma işaret etmektedir. Literatürdeki çalışmalar, örneğin hibrit Al-B₄C-Grafen kompozitleri üzerine yapılan araştırmalar, birden fazla takviye elemanının, özellikle farklı morfolojilere sahiplerse (parçacık şeklindeki B₄C ve levha şeklindeki MXene gibi), tozların paketlenme yoğunluğunu ve presleme sırasında basınç iletimini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir (Manohar ve ark., 2021c). Yüksek orandaki (ağ. %15) B₄C parçacıkları ile ağ. %1 oranındaki 2 boyutlu MXene katkısının bir arada bulunması, toz karışımının akışkanlığını ve sıkıştırılabilirliğini ciddi şekilde azaltır. Presleme sırasında, bu kilitlenmiş toz yapısı, basıncın merkez bölgeye etkin bir şekilde iletilmesini engeller. Basınç, büyük ölçüde numunenin uçlarında sönümlenir. Sonuç olarak, 7K-1X numunesinin merkezi, 7K-0X'e göre çok daha düşük bir yoğunluğa ve daha yüksek bir gözenekliliğe sahip olur. Uçlar ise çok yüksek sıkıştırma basıncı altında hem B₄C hem de MXene içerdiği için sertliği daha da artar.

Şekil 4.19, ağırlıkça %3 Ti₃C₂T_x MXene katkılı FGM kompozitlerin sertlik dağılımını göstermektedir.

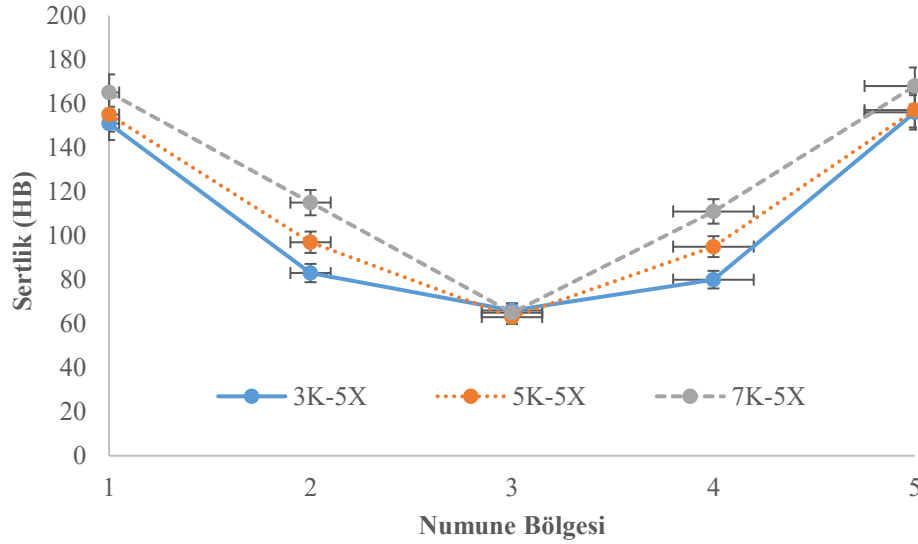


Şekil 4.19. %3 Ti₃C₂T_x MXene katkılı hibrit kompozitlerde sertlik dağılımı

Ağırlıkça %1 MXene takviyeli seriye kıyasla, 3K numunesinin merkez sertliği 89 HB'den 71 HB'ye, 5K numunesinin merkez sertliği ise 85 HB'den 68 HB'ye gerilemiştir. Ayrıca ağ. %3 MXene seviyesinde, farklı katman yapılarına sahip olan tüm numunelerin merkez sertlikleri, birbirine 70±5 HB seviyesinde yaklaşmıştır. Bu, katman tasarımının

(3K, 5K veya 7K) merkez bölgenin nihai sertliği üzerindeki etkisinin neredeyse ortadan kalktığını gösterir. Tüm numunelerde, uçlardaki yüksek sertlik (örn: 7K-3X'te 178 HB) ile merkezdeki düşük sertlik (71 HB) arasında heterojenlik dahada artmıştır. Bu durum MXene oranı arttıkça malzemenin iç homojenliğinin daha da bozulduğunu göstermektedir. Tüm numunelerde heterojenliğin ağırlıkça %3 MXene ile artması hibrit takviyenin (B_4C + ağı. %3 MXene), tozların sıkıştırılabilirliğini ve basınç iletimini zorlaştırarak baskın mekanizma haline geldiğini göstermektedir. Bu durum üretim prosesinden kaynaklanan artık gerilmeler veya katman tasarımı gibi diğer daha hassas etkileri geçersiz kılarak, tüm numunelerin merkezini benzer şekilde gözenekli ve zayıf bir duruma getirmektedir.

Şekil 4.20, ağırlıkça %5 oranında $Ti_3C_2T_x$ MXene katkısı içeren hibrit kompozitlerde elde edilen sertlik dağılımını göstermektedir.

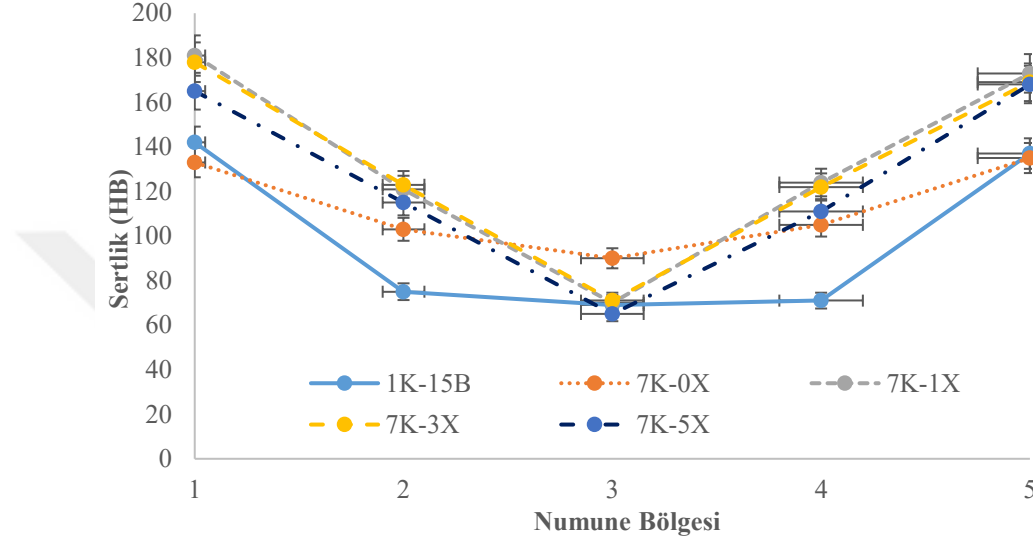


Şekil 4.20. %5 $Ti_3C_2T_x$ MXene katkılı hibrit kompozitlerde sertlik dağılımı

Şekil 4.20'ye göre MXene oranının ağı. %3'ten ağı. %5'e çıkarılmasıyla tüm numunelerin merkez bölgelerindeki sertliğin daha da düştüğü görülmektedir. 3K-5X'in merkezi 66 HB'ye, 5K-5X'in merkezi 63 HB'ye ve 7K-5X'in merkezi ise 65 HB'ye gerilemiştir. Bu, tüm farklı katmanlı yapıların merkezlerinin, ortak sertlik seviyesine düştüğünü göstermektedir. Uç bölgelerdeki sertlik değerleri genel olarak yüksek kalmaya devam ederken (örneğin 5K-5X'te 157 HB), merkezdeki bu düşüş, sertlik profillerindeki heterojenliği dahada artırmıştır. 3K ve 5K numunelerinin uç bölge sertlikleri ağı. %3 MXene ilaveli seriye kıyasla bir miktar daha artarken, 7K numunesinin uç bölge sertliğinde hafif bir düşüş gözlenmesi, ağı. %15 B_4C gibi çok yüksek bir takviye oranına

ağ. %5 MXene eklenmesinin artık uç bölgelerde bile aşırı takviye kaynaklı kusurlara yol açmaya başladığını göstermektedir.

Şekil 4.21, en yüksek B₄C oranına sahip tek katmanlı numune (1K-15B) ile 7K serisi numunelerin sertlik profillerini karşılaştırmalı olarak sunmakta ve uygulanan takviye stratejisinin malzemenin iç homojenliği üzerindeki etkisini bütüncül bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.21. Yüksek takviye oranlarının ve MXene takviyesinin sertlik dağılımı üzerindeki etkisi

Grafikte (Şekil 4.21) yer alan tüm numunelerin istisnasız olarak sergilediği U-şekilli sertlik profili, toz metalurjisiyle presleme sürecinde kalıp duvarları ile olan sürtünmeden kaynaklanan basınç değişimi ve merkez bölgede oluşan yoğunluk düşüşünün, malzeme tasarımından bağımsız olarak üretim prosesinin bir sorunu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, 7K-0X numunesinin merkez sertliğinin (90 HB), tek katmanlı ve daha yüksek takviye oranına sahip 1K-15B numunesine kıyasla (69 HB) daha yüksek olması dikkat çekicidir. Bu durum, fonksiyonel dereceli yapının sinterleme sonrası soğuma aşamasında oluşan artık gerilmeler sayesinde merkezdeki gözenekliliği kısmen bastırarak daha sert bir çekirdek bölgesi oluşmasına katkı sağladığı hipotezini desteklemektedir. Katmanlara ağ. %1 oranında MXene ilavesi katkısız versiyonu ile kıyaslandığında uç bölgelerdeki sertliğin yaklaşık 135 HB'den 177 HB'ye yükseldiği, buna karşın merkez sertliğinin 90 HB'den 70 HB'ye gerilediği görülmektedir. Bu durum, 1K-15B ile 7K-0X numunelerinin kıyasında ortaya konan aşırı takviyenin üretim prosesini olumsuz etkilemesi mekanizmasını dahada belirginleştirmektedir.

B₄C partikülleriyle hibrit kullanılan 2 boyutlu MXene takviyesi, toz karışımının sıkıştırılabilirliğini ciddi şekilde düşürmekte bu da özellikle merkez bölgede basınç kaybına ve artan gözenekliliğe neden olarak artık gerilmelerin sağladığı katkıyı geçersiz kılmaktadır. Nitekim MXene oranının ağ. %3 ve ağ. %5'e çıkarıldığı 7K-3X ve 7K-5X numunelerinde de merkez sertliğinin 65–71 HB aralığında sabitlenmesi, bu olumsuz etkinin yüksek takviye oranlarında daha da baskın hale geldiğini göstermektedir.

4.1.3. Yoğunluk ölçümleri ve Taguchi yöntemi ile parametrik optimizasyon

Bu kısımda, üretilen numunelerin yoğunluk özellikleri değerlendirilmiş ve deneysel parametrelerin nihai yoğunluk üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılarak parametrik optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen en uygun parametrelerle, ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında MXene ilaveli/ilavesiz numuneler üretilmiş ve MXene katkısının yoğunluk üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.6'da üretimde kullanılan üretim parametrelerinin hibrit kompozitlerin sinterlenmiş yoğunluğu üzerindeki etkisinin istatistiksel analizi verilmiştir.

Çizelge 4.6. Sinterlenmiş yoğunluk verileri için sinyal/gürültü (S/N) oranlarına dayalı yanıt değerleri (Büyük olan iyidir)

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Delta	Sıra
Sıkıştırma Basıncı	7,853	7,988	8,153	0,300	2
Sinterleme Sıcaklığı	8,154	7,861	7,979	0,294	3
Sinterleme Süresi	7,857	8,009	8,127	0,270	4
Bilyeli Öğütme Süresi	7,789	8,063	8,141	0,352	1
Katman Adedi	8,101	8,015	7,877	0,224	5

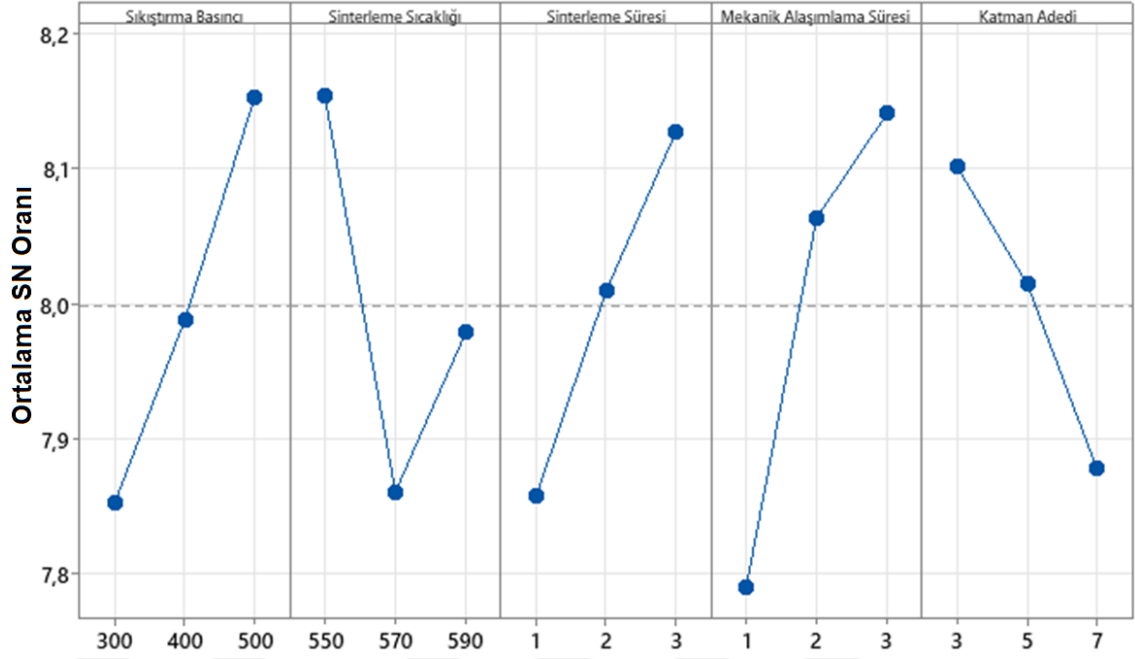
Analiz sonuçları, yoğunluk üzerinde en belirgin etkiye sahip faktörün bilyeli öğütme süresi (Delta = 0.352) olduğunu ortaya koymuştur. Bu faktörü, ikinci sırada sıkıştırma basıncı (Delta = 0.300) izlemektedir. Buna karşılık, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve katman adedi gibi diğer üç parametrenin etkileri birbirine oldukça yakın düzeyde olup, ilk iki faktöre kıyasla daha sınırlı bir etkiye sahiptir. Bu durum, üretim parametreleri arasında yoğunluk kontrolü açısından önceliklendirilmesi gereken faktörlerin açık bir göstergesidir.

Mekanik alaşımlama sürecinin temel mekanizması, toz partiküllerinin bilyeler arasında sıkışarak tekrarlanan soğuk kaynak, kırılma ve yeniden kaynaklanma döngülerine maruz kalmasıdır. MA ile alüminyum matrisin tane yapısı nanokristal veya daha küçük boyutlara kadar inceltir ve daha büyük olan takviye partikülleri de kırılarak

alüminyum matrisin içine gömülür. Bu durum takviye fazının matris içinde homojen dağılımını ve matris üzerindeki yükün daha dengeli bir şekilde takviyeye aktarılmasını sağlar (Zhang ve ark., 2017). Ayrıca MA süresi arttıkça, toz partikülleri nanometre boyutlarına kadar küçültmekte ve yüzey alanlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Aynı zamanda partikül yapısı içerisinde yüksek miktarda kusur ve depolanmış enerji birikmesine neden olmaktadır. Bu iki etki bir araya geldiğinde, tozların sinterlenebilirliği artmakta ve yüksek yüzey enerjisi ile içsel gerinim, sinterleme sürecini yönlendiren güçlü bir etki oluşturmaktadır. Sonuç olarak MA etkisi ile atomlar daha düşük sıcaklıklarda daha hızlı şekilde hareket ederek gözeneklerin kapanmasını sağlar (Suryanarayana, 2001).

Düşük sıkıştırma basınçlarda, partiküller birbirleri üzerinden kayarak büyük boşlukları doldurur. Basınç arttıkça, sünek alüminyum partikülleri temas noktalarında plastik olarak deforme olur, bu da temas alanını artırır ve gözenekliliği azaltır. Yüksek basınçlarda ise alüminyum matris pekleşir ve daha fazla sıkıştırma ve yoğunlaşma zorlaşır (Dixit ve Srivastava, 2018). Ayrıca sert ve kırılğan takviyeler, bu süreçte rijit engeller olarak davranır ve plastik olarak deforme olmadıkları için alüminyum matrisin akışını kısıtlayarak poroziteye ve ham yoğunluğun düşmesine neden olurlar. Takviye miktarı ne kadar çok olursa bu etki daha belirgin hale gelir (Erdemir ve ark., 2015). Nitekim yoğunluk optimizasyonunda (Şekil 4.22) belirlenen 3 katmanlı hibrit kompozitlerin daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşması bu durumla ilişkilidir çünkü katman adedi arttıkça B₄C takviye miktarı artmakta ve 7 katmanda ağırlık %15'e kadar çıkmaktadır.

Şekil 4.22, A7075/B₄C kompozitlerinin sinterlenmiş yoğunluğu üzerinde etkili olan üretim parametrelerini, Taguchi S/N oranı analiziyle değerlendiren ana etkiler grafiğini sunmakta ve proses optimizasyonuna yönelik önemli çıkarımlar sağlamaktadır. Grafik özellikle MA süresi ve sıkıştırma basıncının yoğunluk üzerindeki etkisinin belirgin şekilde (eğim ne kadar yüksekse etki o kadar yüksek) yüksek olduğunu görsel olarak ortaya koymaktadır. Grafiğe göre sinterleme sıcaklığı, süresi ve katman adedinin etkileri daha yatay eğimlerle temsil edilmekte, bu da söz konusu parametrelerin yoğunluk üzerindeki görece düşük etkisini göstermektedir. Grafik aynı zamanda, her faktörün optimum seviyesini de vermektedir. En yüksek yoğunluk için MA süresi 3 saat, sıkıştırma basıncı 500 MPa, sinterleme süresi 3 saat, sinterleme sıcaklığı 550°C ve katman adedi 3 katman olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.22. S/N oranı analizine dayalı olarak yoğunluğun artırılmasına yönelik proses optimizasyonu

Katılaşma (solidus) sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, yoğunlaşma katı hal difüzyonu yoluyla ilerler. Atomlar, yüksek kimyasal potansiyele sahip bölgelerden (partikül yüzeyleri, tane sınırları) düşük potansiyele sahip bölgelere (partiküller arası boyunların içbükey yüzeyleri) hareket eder. Bu atom transferi, boyunların büyümesine ve partiküller arasındaki gözeneklerin küçülerek daha küresel bir şekil almasına neden olur. Sinterleme sıcaklığı, yoğunlaşma kinetiğini etkileyen en kritik parametredir. Atomik difüzyon mekanizmalarını aktive etmek için gerekli termal enerjiyi sağlar. Daha yüksek sıcaklıklar, difüzyon hızlarını üstel olarak artırır, bu da daha hızlı boyun büyümesi ve gözenek büzülmesi ile sonuçlanır (Konieczny, 2012). Ancak, aşırı termal etkinin istenmeyen sonuçları da de vardır. Yüksek sıcaklıklar ve/veya uzun süreler, matriste tane büyümesini teşvik eder. Tane sınırları hızlı difüzyon yolları olduğundan, taneler büyüdükçe bu yolların toplam uzunluğu azalır bu da porozitenin azaltılmasını yavaşlatabilir (Ngai ve ark., 2013). Ayrıca bazı çok bileşenli sistemlerde, çok yüksek sıcaklıklarda veya çok uzun süre sinterleme, hacim artışına yol açabilir. Bu durum, farklı elementler arasında dengesiz difüzyon hızları veya hapsolmuş gazların genişlemesinden kaynaklanabilir ve net bir yoğunluk azalmasına neden olur (Tiwari ve ark., 2012).

AA7075 alüminyum alaşımlarının katılaşma (solidus) sıcaklığı 477°C ve sıvılaşma (likidus) sıcaklığı 635°C'dir. Belirlenen 550°C, 570°C ve 590°C'lik sinterleme sıcaklıkları, iki fazlı (katı + sıvı) bölgede yer almaktadır ve sinterleme sürecinin sıvı faz sinterlemesi ile gerçekleşeceğini göstermektedir. Oluşacak sıvı faz, A7075 alaşımlarının

mikroyapısındaki daha düşük erime noktasına sahip ötektik bileşenlerden (Zn, Mg, Cu) kaynaklanacaktır. Bu sıvı faz, katı alüminyum iskeletinin içine nüfuz ederek yoğunluğun katı faz sinterlemeye kıyasla dahada artmasını sağlayacaktır (Walde ve ark., 2020).

En yüksek yoğunluğun, beklentilerin aksine en düşük sinterleme sıcaklığında (550°C) ve en uzun sürede (3 saat) elde edilmesi daha yüksek sinterleme enerjisinin atomik taşınımı artırarak daha etkin bir yoğunlaşma sağlaması gerektiğini öngören klasik sinterleme modelleriyle tam uyum göstermemektedir. Bu durum, sistemin davranışına etki eden farklı mekanizmaların varlığına işaret etmektedir.

Şekil 4.23'te görülen sinterleme kusurları, düşük sıkıştırma basıncı (300 MPa) ve yüksek sinterleme sıcaklığının (590°C) bir araya gelmesinin olumsuz bir sonucudur.



Şekil 4.23. Ön testlerde 300 MPa sıkıştırma basıncı ve 590°C sinterleme sıcaklığında numunede görülen sinterleme hatası (ön testlerde eğme test kalıbı kullanılmıştır, geometri dikdörtgen formundadır)

Düşük sıkıştırma basıncı, sinterleme öncesi parça içinde yüksek miktarda gözenek ve dolayısıyla hava hapsolmesine neden olarak zayıf bir başlangıç yapısı oluşturur. Aynı zamanda yüksek takviyeli durumda yüksek sıkıştırma bile aynı durumun oluşmasına neden olabilir. Bu zayıf yapı, 590°C gibi yüksek bir sıcaklığa maruz kaldığında, A7075 alaşımında oluşan geçici sıvı faz ile birleşen hapsolmüş gazın şiddetli genleşmesi, kontrolsüz bir iç basınç oluşturur. Yüksek gaz basıncı, akışkan hale gelen metali yüzeye iterek terleme olarak bilinen parlak metal damlacıklarının oluşmasına yol açar. Aynı basınç, parçanın bütününe deforme ederek yoğunlaşma yerine geometrisinin bozulmasına neden olurken, bu süreçte oluşan iç gerilmeler de çatlaklara sebebiyet verir. Dolayısıyla bu görsel, yüksek sıcaklıkların her zaman daha iyi yoğunlaşma sağlamadığını, aksine uygun olmayan başlangıç koşullarıyla birleştğinde malzemenin bütünlüğünü tamamen bozabileceğini gösteren somut bir kanıttır. Ayrıca yüksek sıkıştırma basıncında (500 MPa) bile takviye miktarının artışına (5 katmanlı ağ. %10 B₄C takviye barındıran numune) bağlı olarak yüksek porozitenin dolayısıyla düşük yoğunluğun sebebine

dayanak oluşturan BSE-SEM görüntüsü (Şekil 4.47) ileri bölümde detaylıca irdelenmiştir.

Çizelge 4.7'de özetlenen istatistiksel metrikler, yoğunluk optimizasyonu için kurulan modelin güvenilir ve öngörü kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir. %97,47'lik R^2 değeri, seçilen üretim parametrelerinin sinterlenmiş yoğunluktaki değişkenliğin neredeyse tamamını açıkladığını kanıtlarken, %92,79 gibi çok yüksek bir tahmin edilen R^2 değeri ise modelin gelecekteki üretim sonuçlarını da büyük bir doğrulukla öngörebileceğini teyit eder.

Çizelge 4.7. Yoğunluk optimizasyonu için kullanılan modelin doğruluk ve güvenilirlik özeti

İstatistik	Değer
S	0,056618
R^2	%97,47
R^2 (ayarlanmış)	%95,89
R^2 (tahmin)	%92,79

Modelin bu denli başarılı olması, yoğunluğun, tıpkı basma dayanımı gibi, malzemenin bütününe temsil eden bir kütesel özellik olmasından kaynaklanır. Sertlik ölçümlerini etkileyen mikro-ölçekteki yerel değişkenliklerden (bir B₄C tanesine veya bir mikro-gözeneğe denk gelme gibi) daha az etkilenir. Üretim parametreleri, malzemenin genel gözenekliliğini etkin bir şekilde kontrol ettiği için, sonuçlar tutarlı ve model son derece güvenilirdir.

Şekil 4.24'te sunulan ısı haritaları, A7075/B₄C hibrit kompozitlerinde farklı üretim parametrelerinin sinterlenmiş yoğunluk üzerindeki etkilerini, doğrudan ortalama değerler üzerinden görselleştirmektedir. Bu analiz yaklaşımı, her parametre kombinasyonunun yoğunluk değerini sayısal olarak değerlendirerek en yüksek mutlak değeri arar. Örneğin, bilyeli öğütme süresi ve sıkıştırma basıncı kombinasyonunda en yüksek ortalama yoğunluk 2 saat ve 500 MPa'da 2,6624 g/cm³ olarak kaydedilmiştir. Ancak daha önce yapılan Taguchi S/N oranı analizlerinde 3 saatlik öğütme süresi optimum seviye olarak öne çıkmıştır. Sinterleme süresi ve sıcaklığı kombinasyonunda ise en yüksek yoğunluk, 550°C'de 3 saat sinterleme ile 2,6624 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Katman adedi ve sıkıştırma basıncı kombinasyonunda ise, 3 katman ve 500 MPa'ın 2,5978 g/cm³ ile en yüksek yoğunluğu verdiği tespit edilmiş ve S/N oranı analizinde de aynı parametreler öne çıkmıştır.

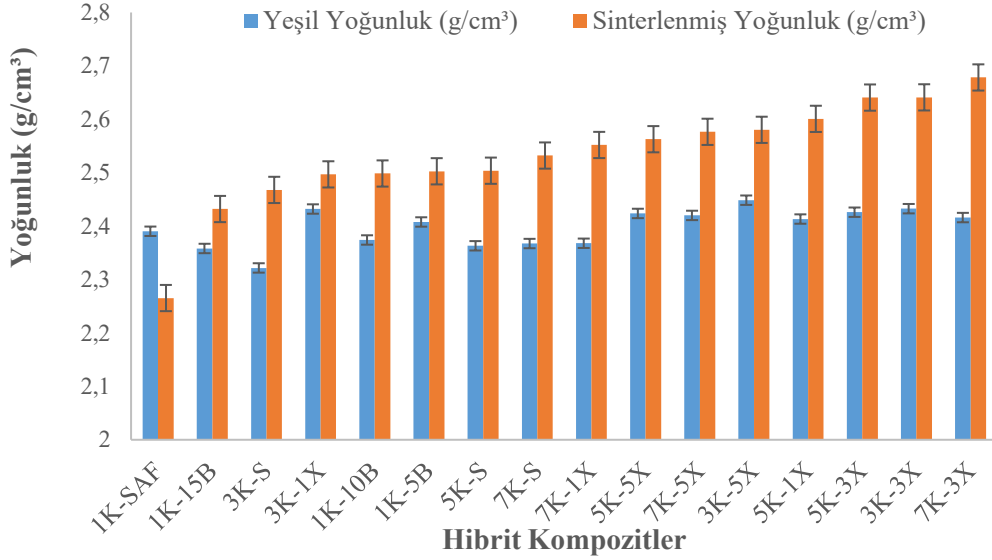
Sıkıştırma Basıncı (MPa)	300	2,41536	2,4525	2,54284	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	550	2,4154	2,5999	2,6624	Sıkıştırma Basıncı (MPa)	300	2,4906	2,4658	2,4543
	400	2,44683	2,48167	2,59989		570	2,5173	2,4525	2,4468		400	2,5393	2,5188	2,4703
	500	2,49387	2,6624	2,51734		590	2,4817	2,4939	2,5173		500	2,5978	2,5677	2,508
		1	2	3			1	2	3			3	5	7
Bilyeli Öğütme Süresi (sa.)					Sinterleme Süresi (sa.)					Katman Adedi				

Şekil 4.24. Ortalama değerlere göre farklı faktörlerin karşılaştırılmasına dayalı olarak yoğunluktaki değişimi gösteren ısı haritaları (birim: g/cm³)

Bu örnekler, bazı parametrelerde S/N ve ortalama analizlerinin örtüştüğünü gösterirken, farklılıklarında ortaya çıkabileceğini göstermektedir. SN oranına göre yaklaşım, ortalamalara göre yaklaşıma kıyasla sonuçların sadece ne kadar yüksek olduğunu değil, aynı zamanda ne kadar tekrarlanabilir ve istikrarlı olduğuna da bakar bu yönüyle değişkenliğin yüksek olduğu durumlarda, ortalama değer yanıltıcı olabilir ve SN oranına göre yaklaşım daha isabetli optimizasyon için tercih sebebidir.

Yoğunluk temelli çalışmanın ikinci aşamasında, basma dayanımı, sertlik ve yoğunluk verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen Taguchi analizi ve elde edilen optimizasyon sonuçları doğrultusunda; 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saatlik mekanik alaşımlama, ardından 400 °C’de 2 saat ve 590 °C’de 3 saat sinterleme ile fırında soğutma koşullarında yeni numuneler üretilmiştir. Bu üretimlerde, MXene katkısının yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında takviyeler uygulanmıştır. Elde edilen numunelere ilişkin yoğunluk verileri Şekil 4.25’te verilmiştir.

MXene'nin ($4,0 \pm 0,2$ g/cm³) matrise eklenmesiyle nihai yoğunluğun artması beklenir. Ayrıca B₄C ($2,52$ g/cm³) gibi A7075'ten ($2,81$ g/cm³) daha az yoğun bir takviyenin eklenmesiyle yoğunluğun düşmesi gerekir. Ancak bu durum gözeneksiz bir yapı için karışım kuralına göre genel bir beklentidir ve grafikteki değişim yoğunlukta farklı mekanizmaların etki ettiğini göstermektedir. Örneğin, en yüksek sinterlemiş yoğunluklardan birine ulaşan 7K-3X ($2,6783$ g/cm³) numunesi, yapısında ağı. %15 B₄C ve ağı. %3 MXene takviye oranına sahiptir ve karışım oranına göre yoğunluğun düşük olması genel beklentidir.



Şekil 4.25. 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saatlik mekanik alaşımlama, ardından 400 °C'de 2 saat ve 590 °C'de 3 saat sinterleme ile fırında soğutma koşullarında üretilen hibrit kompozitlerin yoğunlukları

A7075 alaşımının katılaşmaya başladığı sıcaklık (solidus) yaklaşık 477°C, tamamen eridiği sıcaklık (likidus) ise yaklaşık 635°C'dir. Bu durum, 590°C'de A7075 matrisinin bir kısmının eriyerek bir sıvı faz oluşturduğu anlamına gelir. Oluşan bu sıvı faz;

- Kılcallık Etkisi: Katı toz parçacıkları arasındaki boşluklara sızarak onları bir araya çeken güçlü bir kılcallık kuvveti oluşturur.
- Hızlandırılmış Difüzyon: Atomların katı haldekenden çok daha hızlı hareket etmesini sağlayarak parçacıklar arası bağların (boyunların) hızla oluşmasını ve büyümesini sağlar.
- Parçacık Yeniden Düzenlenmesi: Katı parçacıkların kayarak daha yoğun bir paketlemeye ulaşmasını kolaylaştırır.

B₄C'nin daha düşük yoğunluğu takviye edildiği kompozitte hafif bir düşüş öngörürken, deneysel sonuçlar yoğunluk azalmasının çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. B₄C ilavesi, kompozitte daha yüksek bir gözenek hacmine yol açar ve bu gözeneklilik, nihai yoğunluğu daha da düşürür. Bu gözenekliliğin altında yatan mekanizmalar şunlardır (Abdullah ve Kamarudin, 2012):

- Zayıf Arayüzey Bağlanması: Metalik Al matrisi ile seramik B₄C parçacıkları arasında zayıf kimyasal uyumluluk ve arayüzey bağlanması vardır. Bu durum, sinterleme ile kolayca kapatılamayan B₄C parçacıkları etrafında zayıf arayüzeylerin ve boşlukların oluşmasına yol açar.

- Parçacık Aglomerasyonu: B_4C parçacıkları, karıştırma ve işleme sırasında bir araya toplanma (aglomere olma) eğilimindedir. Bu aglomeralar, parçacıklar arasında Al matrisinin katı hal difüzyonu sırasında etkili bir şekilde dolduramadığı büyük, kararlı boşluklar yaratır ve geride önemli miktarda kalıntı gözeneklilik bırakır.
- Sinterlemenin Engellenmesi: B_4C parçacıkları, Al tane sınırlarını sabitleyerek ve Al matrisinin yoğunlaşması ve büzülmesi için gerekli olan difüzyon yollarını tıkayarak fiziksel engeller olarak hareket eder.

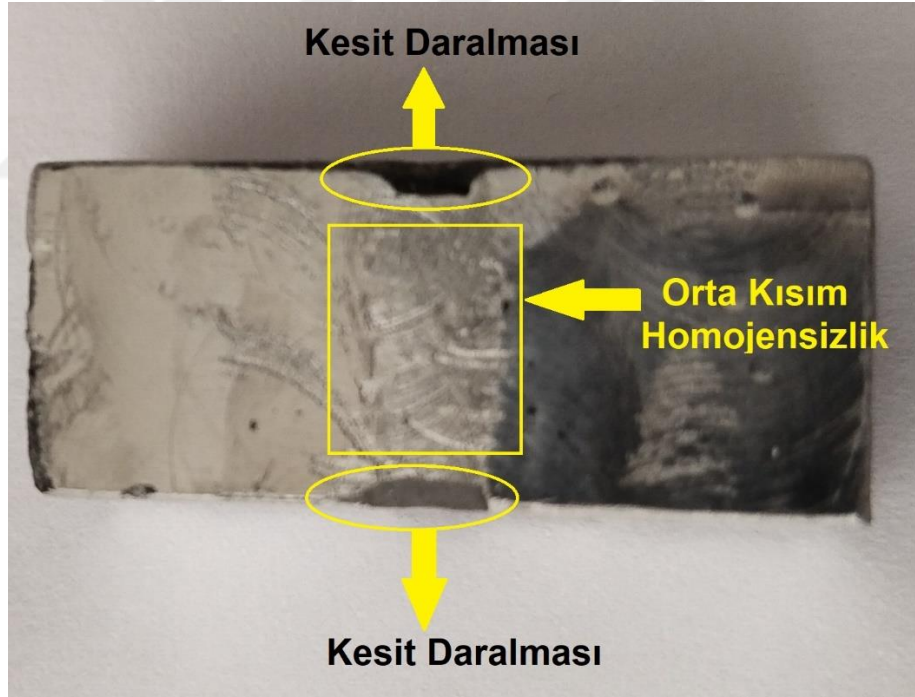
$Ti_3C_2T_x$ MXene ilavesi, nihai yoğunluğu belirleyecek iki güçlü, birbiriyle rekabet eden faktörü ortaya çıkarır.

- Kütle: MXene, Al'den önemli ölçüde daha yoğundur. Varlığı, birim hacim başına toplam kütleyi artıracak ve teorik yoğunluğu yukarı çekecektir (Zang ve ark., 2020).
- Gözeneklilik: Yüksek yüzey alanına sahip bir malzeme olan MXene, yeniden topaklanmaya ve aglomerasyona oldukça yatkındır. Bu durum aglomerasyona neden olabilecek yüksek takviyenin dikkatli belirlenmesi gerektiğini göstermektedir (Protyai ve Rashid, 2024). Benzer çalışmalar MXene içeriği arttıkça kompozitin göreceli yoğunluğunun azaldığını göstermektedir.
- Arayüzey Bağlanması: B_4C 'nin aksine, $Ti_3C_2T_x$ üzerindeki yüzey sonlandırmalarının (-O, -OH, -F) metal matrislerle arayüzey bağlanmasını artırdığı rapor edilmektedir (Chen ve ark., 2024). Bu, Al- B_4C arayüzeyine kıyasla daha iyi arayüzey bağlanması sağlayabilir.
- Isıl iletkenlik: . MXene'nin yüksek yüzey alanı ve termal iletkenliği, ısının daha homojen dağılmasına ve sıvı faz sinterlemenin (LPS) daha verimli çalışmasına yardımcı olabilir.

Sonuç olarak hibrit kompozitin yoğunluğu; sıvı faz sinterlemenin yoğunlaştırıcı etkisine, B_4C 'nin takviye miktarına bağlı olarak sıkıştırılabilirliğine ve MXene'in arayüzey bağlanması, ısı iletkenliği ve aglomerasyon gibi zıt etkileri arasındaki rekabete bağlıdır.

Verilere göre (Şekil 4.25) en yüksek sinterlenmiş yoğunluğa sahip numunelerin MXene katkılı kompozitler olduğu görülmektedir. Bu durum ile MXene katkısının arayüzey bağlanmasını teşvik etmesi, ısı iletkenliği artırarak LPS verimini artırması gibi olumlu katkılarının olası zararlı mekanizmalara baskın geldiği anlaşılmaktadır. Özellikle

ağ. %3 MXene katkısının en yüksek üç sinterlenmiş yoğunluğa (7K-3X: 2,6783 g/cm³, 3k-3X: 2,6411 g/cm³) sahip numunede bulunması dikkat çekicidir. MXene katkısı daha az (ağ. %1) ve daha yüksek (ağ. %5) kompozitlerdeki yoğunluğun düşmesi optimum bir seviyenin varlığına ve ağ. %5 MXene ilavesinde olası aglomerasyona işaret etmektedir. Verilere göre B₄C takviye miktarının kompozitlerdeki yoğunluğu düşürdüğü (1K-5B: 2,5026 g/cm³, 1K-15B: 2,4320 g/cm³), MXene ilavesinin ise bu olumsuz mekanizmaları baskılayabildiği görülmektedir. Yine grafikte dikkat çeken bir diğer durum tabakalı yapıların sinterlenmiş yoğunluğunun tek tabakalıları (5KS: 2,5037 g/cm³, 1K-10B: 2,4985 g/cm³) veya seramik katkılı yapıların saf matrisli yapıya (1K-15B: 2,432 g/cm³, 1K-SAF: 2,3903 g/cm³) kıyasla daha yüksek çıkmasıdır. Bu durumun ise LPS nedeniyle meydana gelen ve daha önceki testlerde gözlemlenen terleme sorununun ne kadar baskılandığı ile ilgisinin olduğu düşünülmektedir. Yapıdaki seramik varlığının terlemeyi zorlaştırdığı tabakalı yapının ise daha zorlaştırdığı dolayısıyla yoğunluğunda buna paralel değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.26. A7075 saf matrisli numunede sinterleme sonrası terlemeyi gösteren orta bölgedeki kesit daralması

Yeşil yoğunluk verileri (Şekil 4.25) incelendiğinde ise en dikkat çekici gözlem 1K-SAF numunesinin yeşil yoğunluk ve sinterlenmiş yoğunluk değerleri arasındaki çelişkidir çünkü sinterlenmiş yoğunluğun yeşil yoğunluğa kıyasla artması beklenir ancak düştüğü görülmüştür. Bunun sebebinin ise daha önce de üzerinde durulan ve terleme

olarak ifade edilen sinterleme kusurundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun sebebinin ise toz metalurjisi prosesinde tek eksenli sıkıştırma işleminin homojen bir sıkıştırma sağlayamayıp orta kısımdaki poroziteyi engelleyemediği ve bu bölgede kalan hava boşluklarının ise yüksek sıcaklıkla birleşmesi sonucu terleme ile malzeme kaybına neden olduğu öngörülmektedir. Nitekim sinterleme sonrası 1K-SAF numunesi incelendiğinde (Şekil 4.26) orta kısmındaki kesit daralması bu öngörüğü doğrulamaktadır. Ayrıca takviye miktarına bağlı olarak sıkıştırılabilirlik, olası aglomerasyonlar, MXene ve B₄C takviyelerinin yoğunluk etkileri gibi karmaşık mekanizmalar nedeniyle yeşil yoğunlukların çok fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

4.1.4. Aşınma dayanımı ve istatistiksel yaklaşım

Taguchi analizi ve elde edilen optimizasyon sonuçları doğrultusunda; 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saat mekanik alaşımlama, ardından 400 °C’de 2 saat ve 590 °C’de 3 saat sinterleme ile fırında soğutma koşullarında ikinci aşama numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşama üretimlerde, Ti₃C₂T_x MXene katkısının yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla ağ. %1, %3 ve %5 oranlarında takviyeler kullanılmıştır.

Üretilen numunelerin tribolojik performansını incelemek amacıyla aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri, kuru pin-on-disk yöntemi kullanılarak yürütülmüş ve bu kapsamda üç farklı hız (1, 1,5 ve 2 m/s) ile üç farklı yük (10, 20 ve 30 N) belirlenmiştir. Sürtünme mesafesi ise sabit 2500 metre olarak tutulmuştur. Aşınma testlerinde sistematik bir değerlendirme için numunelerin kütle kayıpları belirlenmiş ve zamana göre sürtünme katsayısının değişimi belirlenerek grafiklerle görselleştirilmiştir. Ayrıca optimum test koşullarını belirlemek amacıyla Taguchi analizi yapılmıştır.

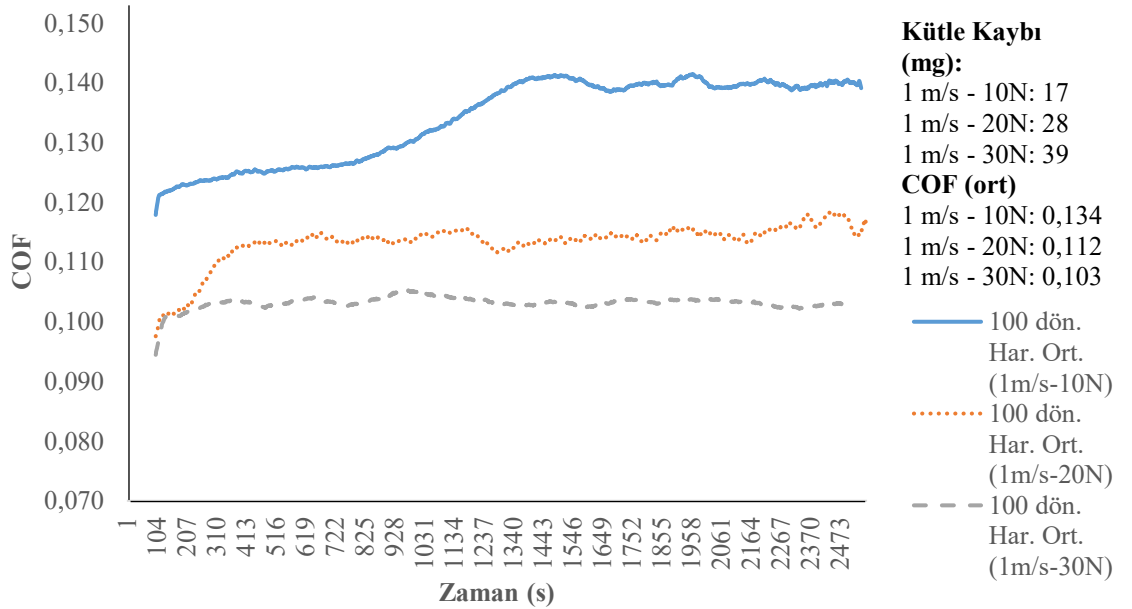
Test sırasında sürekli olarak kaydedilen sürtünme katsayısı (COF), yüzeyde meydana gelen dinamik olaylar hakkında zengin bilgi içeren bir tanı aracıdır. COF'un zamana göre çizilen grafiği tipik olarak iki ana bölge gösterir:

- **Alışma Bölgesi:** Grafiğin başlangıcında yer alan, genellikle yüksek ve dalgalı COF değerlerinin gözlemlendiği bölgedir. Bu bölge, yüzey pürüzlerinin ilk teması, yüzeydeki doğal oksit katmanlarının kırılması ve ilk aşınma döküntülerinin oluşumu gibi geçici olayları temsil eder.

- Kararlı Durum Bölgesi: COF'un dengeye ulaştığı ve daha az dalgalanma gösterdiği plato bölgesidir. Bu durum, yüzeylerin birbirine adapte olduğunu ve genellikle yüzeyde oluşan bir tribo tabaka ile dengelenmiş bir aşınmanın başladığını gösterir.

Ayrıca kararlı durum bölgesindeki COF değerlerinin dalgalanma genliği de önemlidir. Düşük ve kararlı bir COF, verimli bir tribo tabakanın varlığını ve dengeli bir aşınma sürecini işaret ederken yüksek ve düzensiz dalgalanmalar, tribo tabakanın sürekli olarak oluşup parçalandığını, yüzeyden büyük parçacıkların koptuğunu (delaminasyon) veya şiddetli adhezif yapışma/kopma olaylarının yaşandığını gösterebilir.

Şekil 4.27'de %5 B₄C takviyeli A7075 kompozitinin zamana bağlı aşınma davranışı görülmektedir. Grafik, 1 m/s sabit hız ve 2500 m sabit sürtünme mesafesi altında, artan normal yükün (10 N, 20 N, 30 N) sürtünme katsayısı (COF) ve kütle kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekle göre, uygulanan yük arttıkça, kütle kaybı da beklendiği gibi artmaktadır. Kütle kaybı 10 N yük altında 17 mg iken, 20 N'da 28 mg'a ve 30 N'da 39 mg'a yükselmiştir. Buna karşın, yük arttıkça ortalama sürtünme katsayısı (COF) azalmaktadır. Ortalama COF, 10 N yükte 0,134 ile en yüksek değerdeyken, 20 N'da 0,112'ye ve 30 N'da 0,103'e düşmüştür. Ayrıca, grafikteki eğrilerin kararlılığı da yüklerle birlikte artmaktadır. 10N yük altında eğrideki dalgalanmalar daha fazlayken yük 30 N'a artırıldığında sürtünme davranışı, daha düz ve kararlı bir değişim sergilemektedir.



Şekil 4.27. %5 B₄C takviyeli hibrit kompozitlere, 10 N, 20 N ve 30 N'luk üç farklı yük koşulunun sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (1 m/s sabit hız ve 2500 m sabit sürtünme mesafesi)

Aşınma miktarı, uygulanan yüklerle genellikle artar ancak bu artış her zaman lineer değildir. Birçok kompozit malzemede, aşınma mekanizmasının hafif abrasif/oksidatif

aşınmadan, şiddetli adhezif veya delaminasyon aşınmasına geçtiği kritik bir yük değeri mevcuttur.

Archard'ın Aşınma Yasası (Denklem 4.2) kütle kaybının uygulanan yük ile doğru orantılı olduğunu öngörür (Kumar ve ark., 2023). Yüksek yük, yüzeyde daha fazla gerilme oluşturarak malzemenin daha hızlı kopmasına ve aşınmasına neden olur.

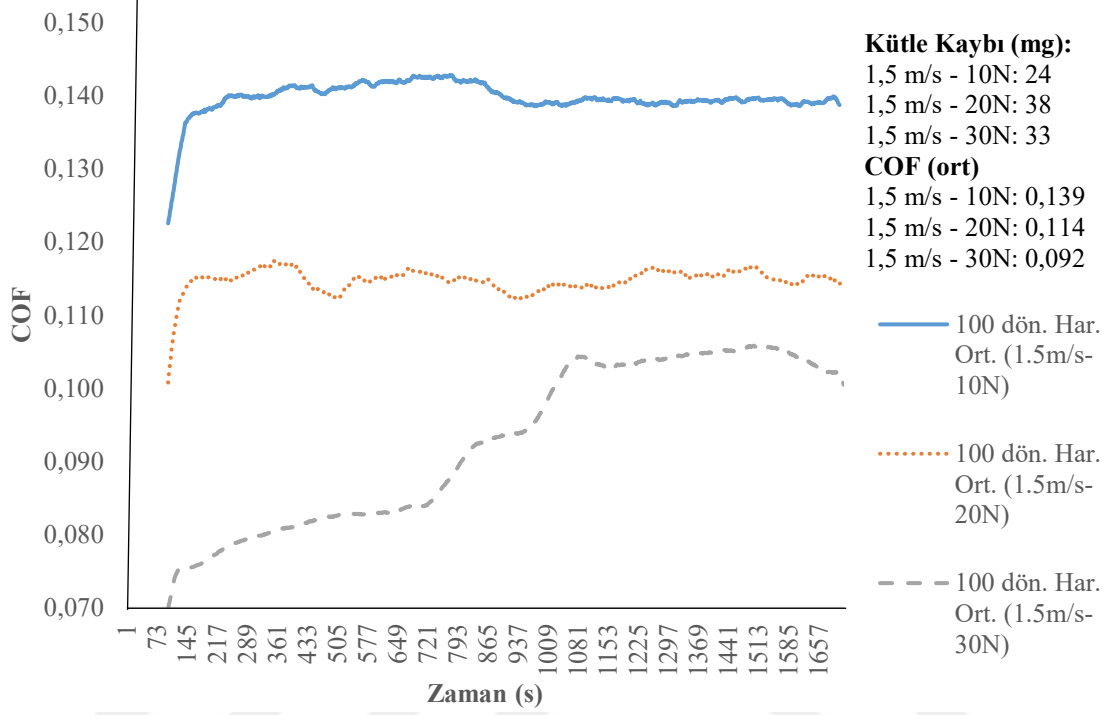
Archard Aşınma Yasası Denklemi (Archard, 1953):

$$V = \frac{K.F.L}{H} \quad (4.2)$$

Burada; V: Aşınan hacim (m³), K: Aşınma katsayısı (boyutsuz, deneysel bir sabittir), F: Normal kuvvet (N), L: Kayma mesafesi (m) ve H: Malzemenin sertliği (Pa veya N/m²) dir. Yani; daha büyük yükler (F) veya daha uzun mesafeler (L) daha fazla aşınma, daha sert malzeme (H) ise daha az aşınma anlamına gelir. K katsayısı, malzeme çiftine, yüzey pürüzlülüğüne, yağlamaya, çevre koşullarına göre değişir.

Sürtünme katsayısının (COF) artan yük ile birlikte düşmesi ise daha karmaşık bir mekanizma olan tribo tabakanın oluşumunu işaret etmektedir. Tribolojik çalışmalar, aşınma sırasında temas yüzeyinde mekanik olarak karışmış tabaka (Mechanically Mixed Layer - MML) veya tribo tabaka olarak adlandırılan yeni bir katmanın oluştuğunu rapor etmektedir (Ravikumar, 2025). Aşınmanın ilk aşamaları, A7075 matrisinden ve B₄C parçacıklarının kırılmasından kaynaklanan ince aşınma kalıntıları üretir. Bu kalıntılar, temas eden yüzeyler arasında sıkışır ve yüksek temas basıncı ve kesme kuvvetlerinin etkisi altında tekrar tekrar öğütülür, sıkıştırılır ve kompozitin yüzeyine birikir. Bu pürüzlü ve düzensiz temas, yüksek ve dalgalı bir sürtünme katsayısına yol açar. Yük arttıkça, temas noktasındaki basınç ve sürtünme ısı artar ve yüksek enerji ile aşınma yüzeyinde yeni bir tabaka oluşturur. MML'nin bileşimi oldukça karmaşıktır ve mekanik olarak alaşımlanmış bir malzeme karakteri gösterir. Bu katman; oksitlenmiş alüminyum, kırılmış B₄C parçacıkları, matris alaşımından gelen elementler (Zn, Mg, Cu) ve karşı yüzeyden transfer edilen malzemeleri (demir ve demir oksitler) içerir. Bu heterojen yapı, kendine özgü mekanik ve tribolojik özelliklere sahiptir (Riahi ve Alpas, 2001). Tribo tabaka, genellikle sert, yoğun ve daha az pürüzlü bir yapıya sahiptir. Bu tabaka, yüzeyde katı yağlayıcı görevi görerek koruyucu bir film oluşturur ve metalik yapışmayı (adhezif aşınma) engeller. Sürtünme artık karşı disk ve pürüzlü kompozit yüzeyi arasında değil, karşı disk ile daha az pürüzlü tribo tabaka arasında gerçekleşir. Bu tribo tabaka, sürtünme katsayısının (COF) önemli ölçüde düşmesini ve kararlı hale gelmesini sağlar.

Şekil 4.28, 1,5 m/s sabit hız ve 2500 m sabit sürtünme mesafesi altında, artan normal yükün (10 N, 20 N, 30 N) sürtünme katsayısı (COF) ve kütle kaybı üzerindeki etkisini göstermektedir.



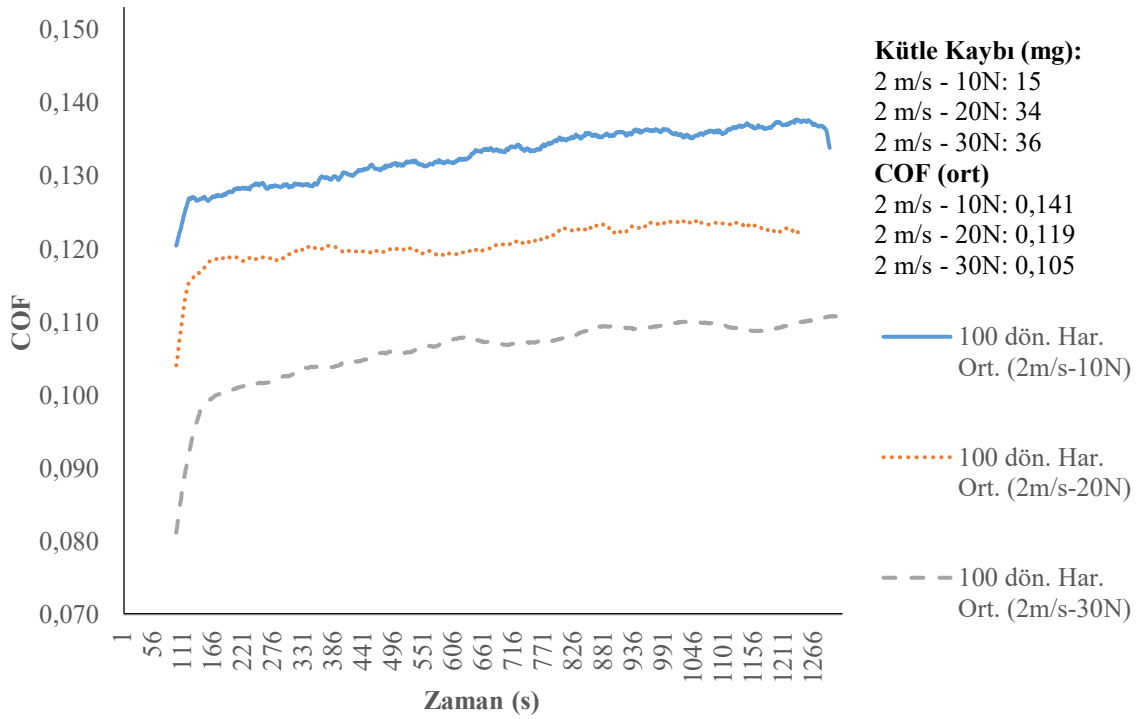
Şekil 4.28. %5 B₄C takviyeli hibrit kompozitlere, 10 N, 20 N ve 30 N'luk üç farklı yük koşulunun sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (1,5 m/s sabit hız ve 2500 m sabit sürtünme mesafesi)

Hız 1,5 m/s'ye çıktığında, 10N ve 20N yükler altındaki ortalama COF değerleri sırasıyla 0,139 ve 0,114 olarak ölçülmüştür. 30N yük altındaki ortalama COF, 1 m/s'deki 0,103 değerinden 0,092'ye düşmüştür. 10N ve 20N yükler altında kütle kaybı, hız artışıyla birlikte beklendiği gibi artmıştır (10N'da 17 mg'dan 24 mg'a; 20N'da 28 mg'dan 38 mg'a). Bu durum, artan hız ve yükün birleşik etkisiyle daha da artan sıcaklığın matrisi yumuşatması ve kütle kaybını artırmasıyla açıklanabilir. Ancak en dikkat çekici sonuç, 30N yük altındaki kütle kaybının, hız artışıyla birlikte 39 mg'dan 33 mg'a düşerek Archard'ın Aşınma Yasası ile çelişiyor gibi görünmesidir. Bu durum, aşınma mekanizmasında bir değişiklik olduğunu göstermektedir.

Artan hızın (1 m/s - 1,5 m/s) getirdiği sıcaklık artışı, matriste termal yumuşamaya neden olur. Bu yumuşama, aşınma direncini düşürür ve kütle kaybının 1 m/s'ye göre daha yüksek olmasına yol açar. Hem yüksek yük hem de yüksek hızın birleşik etkisiyle (1,5 m/s – 30N) arayüzeydeki sıcaklık ve basınç eşik bir değeri aşar ve tribo tabakanın oluşumunu tetikler (Nagaraju ve ark., 2023). Bu tabaka, kompozitin aşındırıcı yüzeyle

temasını keserek katı bir yağlayıcı görevi görür ve sürtünmeyi (COF:0,092) düşürerek kompoziti aşınmadan korur. Bu durum, aşınmayı abrazif (çizici) veya adezif (yapışkan) mekanizmadan oksidatif (tribo tabaka) mekanizmaya geçirir. Aşınma oranındaki bu düşüş aslında bu yönüyle yine Archard Yasası ile çelişmez çünkü tribo tabaka katı bir yağlayıcı gibi davranarak "K" katsayısını düşürür ve artan yüke rağmen toplam kütle kaybının (33 mg) bir önceki adımdaki (39 mg) değerden daha az olmasını sağlar.

Şekil 4.29, %5 B₄C takviyeli A7075 kompozitinin 2 m/s sabit hız, 2500 m sabit sürtünme mesafesi ve farklı yükler (10 N, 20 N ve 30 N) altında zamana bağlı COF değişimini ve kütle kayıplarını göstermektedir.



Şekil 4.29. %5 B₄C takviyeli hibrit kompozitlere, 10 N, 20 N ve 30 N'luk üç farklı yük koşulunun sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (2 m/s sabit hız ve 2500 m sabit sürtünme mesafesi)

Veriler (Şekil 4.29), önceki hızlarla (1 ve 1,5 m/s) yapılan testlerle karşılaştırıldığında, aşınma davranışındaki mekanizma geçişlerini daha belirgin ortaya koymaktadır. Özellikle düşük yükte elde edilen kütle kaybının (2m/s-10N-15 mg), 1 m/s (10N-17 mg) ve 1,5 m/s (10N-24 mg) hızlardaki emsallerinden daha düşük olması, yüksek hızın düşük yük altında aşınmayı azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Buna karşın, yük arttıkça (20N ve 30 N) kütle kaybı da belirgin şekilde artmış (34 mg ve 36 mg), bu da Archard yasasına uygun şekilde temas basıncının aşınma üzerinde belirleyici olduğunu doğrulamıştır. COF değerleri ise, tüm hızlarda olduğu gibi 2 m/s'de de yük arttıkça azalma eğilimi göstermiştir (10 N: 0,141, 20N: 0,119 ve 30 N: 0,105). Bu

durum ise yüzeyde oluşan tribo tabakaya bağlanabilir. Aşınma verilerinde varlığına işaret edilen tribo tabaka, abrazif aşınma veya adhezif aşınma gibi mekanizmaların varlığı aşınma sonrası yapılan SEM-EDS analizleri ile teyit edilmiştir.

Çizelge 4.8'de sunulan Taguchi S/N (Sinyal/Gürültü) oranı analizi sonuçları, aşınma davranışını etkileyen faktörlerin önem sırasını istatistiksel olarak ortaya koymaktadır.

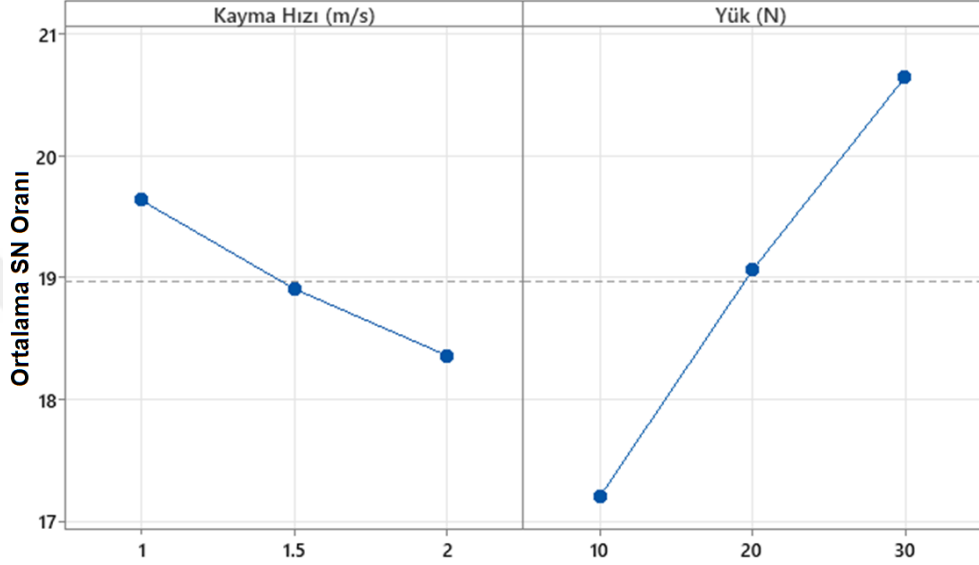
Çizelge 4.8. Aşınma testi parametrelerinin (kayma hızı ve yük) sürtünme katsayısı (COF) ve kütle kaybı üzerindeki etkileri için S/N oranına göre Taguchi analizi (daha küçük daha iyidir kriteri kullanılmıştır)

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Delta	Sıra
Kayma Hızı (m/s) - COF	19,63	18,91	18,36	1,27	2
Yük (N) - COF	17,2	19,06	20,64	3,44	1
Kayma Hızı (m/s) – Kütle Kaybı	-28,46	-29,86	-28,43	1,43	2
Yük (N) – Kütle Kaybı	-25,25	-30,39	-31,11	5,86	1

Analize göre, hem sürtünme katsayısı (COF) hem de kütle kaybı üzerinde uygulanan yükün, kayma hızından çok daha baskın bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle kütle kaybı için yük faktörünün Delta değeri (5,86), hızın Delta değerinden (1,43) yaklaşık dört kat daha büyüktür. Bu durum, malzemenin tribolojik performansını kontrol etmede en kritik parametrenin maruz kaldığı normal kuvvet olduğunu, hızın ise ikincil bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Optimizasyon verilerine göre kütle kaybını azaltmak için ideal yük değerinin 10N olduğu ancak, sürtünme katsayısını en aza indirmek için ise tam tersi bir durumla yükün 30 N için optimum olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek yüklerin yüzeyde bir tribo tabaka oluşturarak daha düşük bir sürtünme katsayısı (COF) oluşturmaya ancak kütle kaybının artması ise Archard'ın Aşınma Yasasına ve tribo tabakanın ne kadar kararlı olduğu ile açıklanabilir. Nitekim grafikler genel olarak incelendiğinde yük artışı (10, 20 ve 30N) ile COF değerleri düşmekte ancak zamana göre genel olarak dalgalı bir seyir izlediği (eğriler her 100 noktanın otalması 1 nokta olacak şekilde düzenlenmiştir) görülmektedir. Bu durumun ise oluşan tribo tabakanın kararsız olduğunu yani oluşup aşınma nedeniyle tekrar parçalandığı ve tekrar oluştuğu duruma işaret etmektedir. Bu durumun teyidi ve kapsamlı analizi için aşınma sonrası SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

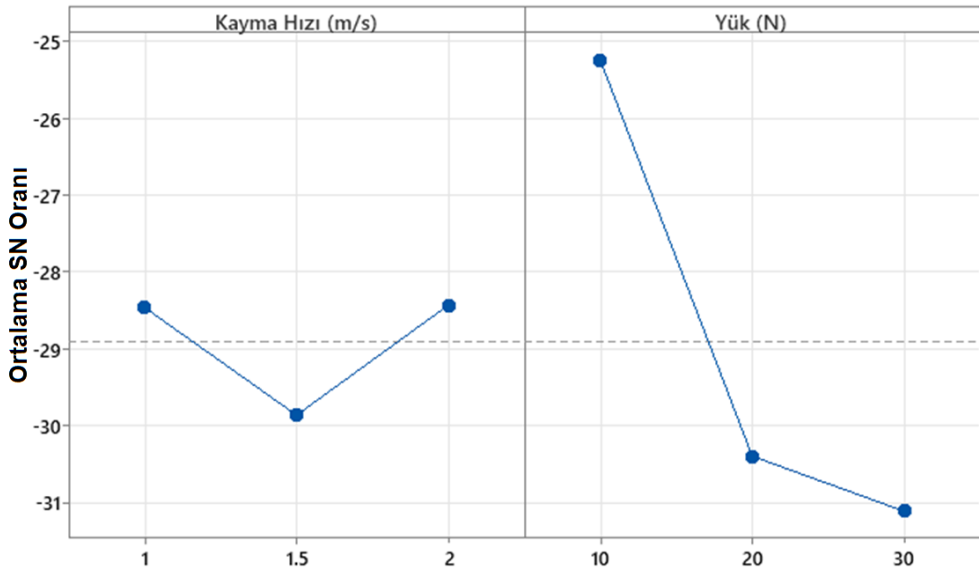
Şekil 4.30'da sunulan sürtünme katsayısı (COF) için ana etkiler grafiği, aşınma parametrelerinin önem sırasını ve optimum seviyelerini görsel olarak vermektedir. Şekilde çizgilerin eğiminden de anlaşıldığı üzere, uygulanan yükün COF üzerindeki etkisi, kayma hızının etkisinden çok daha baskın ve belirleyicidir. Yük 10N'dan 30N'a

arttıkça S/N oranının keskin bir şekilde yükselmesi, en düşük ve kararlı sürtünme katsayısının (COF) en yüksek yük olan 30N'da elde edildiğini göstermektedir. Buna karşın, kayma hızı arttıkça S/N oranının düşmesi, ortalama olarak en düşük sürtünme katsayısının en düşük hız olan 1 m/s'de sağlandığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak bu analiz, en düşük sürtünme katsayısı için optimum parametre kombinasyonunun 1 m/s kayma hızı ve 30N yük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.30. Sürtünme katsayısı için Sinyal/Gürültü (SN) oranları ana etkiler grafiği (daha küçük daha iyidir kriterine göre)

Şekil 4.31’de sunulan kütle kaybı için ana etkiler grafiği, aşınma miktarını kontrol eden parametrelerin göreceli etkisini ve optimum seviyelerini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.31. Kütle kaybı için SN oranları ana etkiler grafiği (daha küçük daha iyidir kriterine göre)

Grafikteki çizgilerin eğiminden de anlaşıldığı üzere, uygulanan yükün kütle kaybı üzerindeki etkisi, kayma hızının etkisinden çok daha baskın ve belirleyicidir. Yükün 10N'dan 30N'a çıkarılması, "daha küçük daha iyidir" mantığına göre hesaplanan S/N oranını (-25,25'ten -31,11'e) keskin bir şekilde düşürerek kütle kaybının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Kayma hızının etkisi ise doğrusal olmayıp, en yüksek kütle kaybının 1,5 m/s'de elde edildiğini göstermektedir. Bu analiz doğrultusunda aşınmayı (kütle kaybını) azaltmaya yönelik en optimum parametre kombinasyonunun 10N yük ile 1 m/s veya 2 m/s kayma hızı olduğu sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 4.9. aşınma testleri için oluşturulan Taguchi analizlerinin istatistiksel geçerlilik metrikleri arasında önemli farklar olduğunu ortaya koymaktadır. Sürtünme katsayısı (COF) için oluşturulan model, %96,64 gibi yüksek bir R^2 değerine ve daha da önemlisi, %82,97 gibi güçlü bir tahmin değerine (R^2 (tahmin)) sahip olmasıyla, hem mevcut veriyi yüksek bir oranda açıkladığını hem de gelecekteki farklı koşullar için güvenilir tahminler yapma potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Buna karşın, kütle kaybı modeli mevcut veriyi %87,20 gibi yüksek bir oranla açıklayabilmesine rağmen, R^2 (tahmin) değerinin %35,19 gibi düşük bir seviyeye gerilemesi, modelin aşırı uyum sorunu yaşadığını ve yeni veriler için güvenilir bir tahmin aracı olmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.9. Aşınma testi sonuçlarına dayalı olarak geliştirilen sürtünme katsayısı ve kütle kaybı modellerinin istatistiksel geçerlilik metrikleri

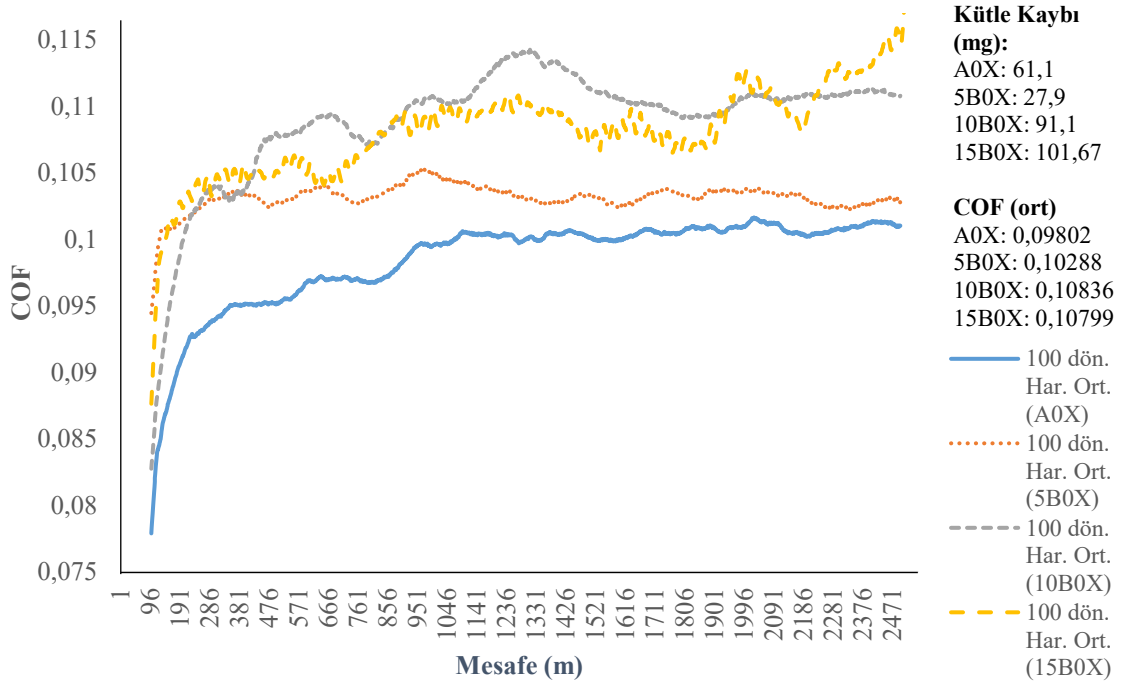
İstatistik	Değer (COF)	Değer (Kütle Kaybı)
S	0,419204	1,54855
R^2	%96,64	%87,20
R^2 (ayarlanmış)	%93,27	%74,40
R^2 (tahmin)	%82,97	%35,19

Bu istatistiksel sonuçlar, aşınma verilerinin analizinde de belirtildiği gibi, kütle kaybının termal yumuşama ve koruyucu tabaka oluşumu gibi doğrusal olmayan ve karmaşık olgular içermesi nedeniyle bir istatistiksel model ile öngörülemediğini, daha kararlı bir davranış sergileyen sürtünme katsayısının ise daha başarılı bir şekilde modellenebildiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında, hem sertleştirici etkisiyle bilinen B₄C hem de yağlayıcı özellik gösteren Ti₃C₂T_x MXene takviyesini birlikte içeren hibrit kompozitlerin aşınma dayanımı incelenecektir. Bu kapsamda, B₄C'nin yüzey çizilmelerine karşı direnç sağlayarak yapısal bütünlüğü koruması, MXene'nin ise temas yüzeyinde kaygan bir tabaka oluşturarak sürtünmeyi azaltması beklenmektedir. Farklı içeriğe sahip hibrit kompozitlerin tribolojik özelliklerini belirleyebilmek için aşınma testlerinde sabit test

koşulları seçilmiştir. Test koşulları, Taguchi analizlerinde güçlü tahmin yeteneği ile öne geçen ve sürtünme katsayısını (COF) en aza indiren optimizasyon verilerine göre belirlenmiştir. Bu analizler, yüzeyde en kararlı sürtünme ortamının 1 m/s kayma hızı ve 30 N yük altında sağlandığını göstermiştir. Bu doğrultuda tüm hibrit kompozitler, bu parametreler altında ve 2500 metre boyunca aşındırılarak test edilmiştir.

Şekil 4.32, sabit test koşulları (1 m/s hız, 30N yük ve 2500 m aşınma mesafesi) altında, artan B₄C takviye oranının A7075 kompozitlerinin aşınma davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir.



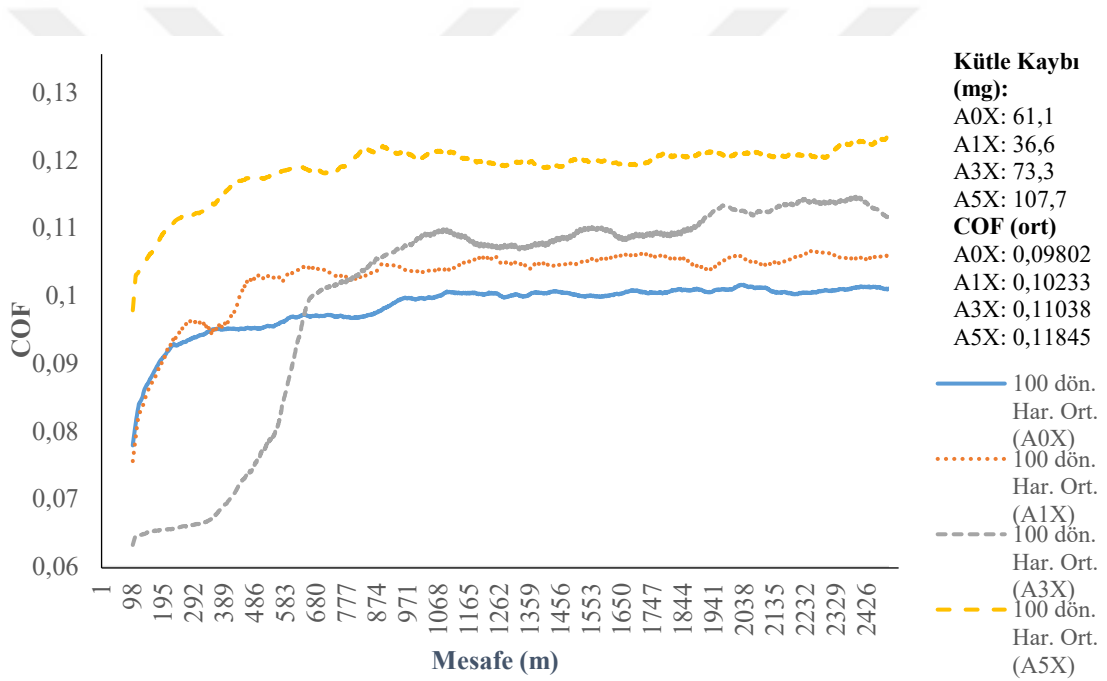
Şekil 4.32. A7075 matrisli hibrit kompozitlere ağırlıkça artan oranda B₄C takviyesinin sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (sabit 1 m/s hız, 30N yük ve 2500m mesafede)

Analiz, takviye oranının aşınma direncine etkisinin doğrusal olmadığını ve optimum bir seviyesinin olduğunu göstermektedir. Takviyesiz A0X numunesi 61,1 mg kütle kaybederken, ağırlıkça %5 B₄C içeren 5B0X numunesinin kütle kaybı 27,9 mg'a düştüğü ve aşınma direncinin arttığı görülmüştür. Ancak, takviye oranı ağırlıkça %10 (10B0X) ve ağırlıkça %15'e (15B0X) çıkarıldığında, kütle kaybı sırasıyla 91,1 mg ve 101,67 mg artarak, takviyesiz numuneden bile daha yüksek aşınma sergilemiştir. Sürtünme katsayısı ise genel olarak B₄C oranıyla doğru orantılı olarak artmış hatta zamana göre daha dalgalı ve dengesiz bir seyir göstermiştir.

B₄C takviye miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısı ve kütle kaybındaki artışın temel nedeni, aşınma mekanizmasındaki değişimdir. Ağırlıkça %5 gibi optimum bir

oranda B₄C parçacıkları matris tarafından sıkıca tutularak yüzeyi korurken, ağ. %10 ve üzeri oranlarda matris ile takviye arayüzey bağı zayıflamaktadır. Yüksek yük altında bu zayıf bağlı parçacıklar yüzeyden sökülerek, numune ile disk arasına sıkışan serbest ve sert tanecikler haline gelmektedir. Serbest haldeki bu sert parçacıklar bir tribo tabakanın oluşumunu engelleyerek bir zımpara etkisi göstermiş ve yüzeyi sürekli aşındırarak kütle kaybını artırmıştır. Bu durum, aşınma mekanizmasının abrasif (üçüncü-cisim aşınması) aşınmaya dönüştüğünü göstermektedir (Cerit ve ark., 2008; Valizade ve Farhat, 2024). Bu mekanizma Şekil 4.49 ve Şekil 4.52'de verilen SEM ve EDS analizleri ile teyit edilmiştir.

Şekil 4.33, A7075 kompozitlerinde artan Ti₃C₂T_x MXene oranının aşınma davranışına etkisini göstermektedir.



Şekil 4.33. A7075 matrisli hibrit kompozitlere ağırlıkça artan oranda Ti₃C₂T_x MXene ilavesinin sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (sabit 1 m/s hız, 30N yük ve 2500m aşınma mesafesi)

Grafik (Şekil 4.33), Ti₃C₂T_x MXenen takviyesi içinde optimum bir seviyenin olduğunu ortaya koymaktadır. A0X (Saf A7075 matris) numunesinin kütle kaybı 61,1 mg iken A1X numunesinde (ağ. %1 MXene takviyeli) 36,6 mg'a gerilediği ve aşınma dayanımında artış olduğu görülmüştür. Ancak bu oranın üzerine çıkıldığında, A3X ve A5X numunelerinde kütle kaybı sırasıyla 73,3 mg ve 107,7 mg'a artarak aşınma dayanımında ciddi düşüşler yaşanmıştır. Ortalama sürtünme katsayısı da benzer şekilde MXene oranı ile doğru orantılı olarak artmış ve A0X numunesindeki 0,09802 değeri A5X numunesinde 0,11845 değerine yükselmiştir.

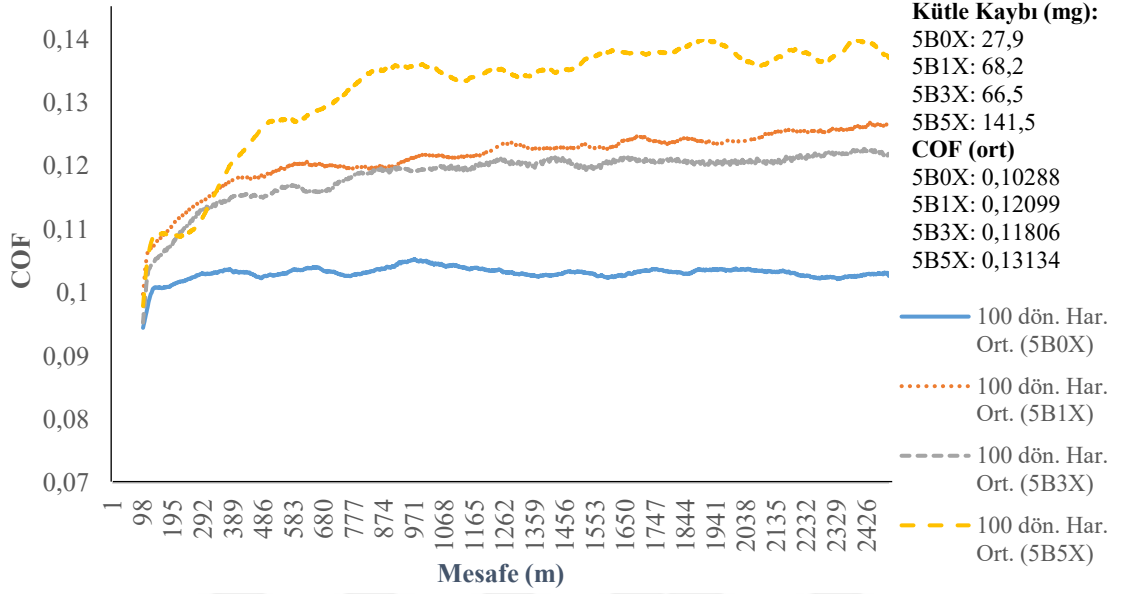
Bu davranışın arkasındaki mekanizmalar, MXene'nin matris içindeki dağılımına ve rolüne bağlıdır. %1 gibi optimum bir oranda, iyi dağılmış MXene takviyesi, yüzeyde katı yağlayıcı tribo tabaka oluşturarak aşınmayı azaltır (Hu ve ark., 2020). Aşınma sırasındaki mekanizmaları daha da derinleştiren önemli bir faktör, MXene'nin yüksek arayüzey sıcaklıkları altında oksitlenmesidir. Literatür, $Ti_3C_2T_x$ gibi MXene'lerin, sürtünme ısısı etkisiyle oksitlenerek titanyum dioksit (TiO_2) ve amorf karbon gibi fazlara dönüşebildiğini göstermektedir. Oluşan bu ince, sert TiO_2 parçacıkları ile yağlayıcı özellik gösterebilen karbon, aşınma döküntüleriyle birleşerek son derece kararlı ve yoğun bir tribo tabaka oluşturur. Dolayısıyla, MXene'nin bilinen katı yağlayıcı etkisine ek olarak oluşan bu seramik-karbon hibrit yüzey, özellikle A1X gibi optimum koşullarda gözlemlenen yüksek aşınma direncinin arkasındaki bir diğer önemli bilimsel neden olarak kabul edilebilir (Han ve ark., 2025) (Bu mekanizmalar Şekil 4.53.b'de EDS analizi ile doğrulanmıştır).

Optimum bir seviyenin üzerindeki takviye oranlarında 2 boyutlu MXene tabakaları (akordeon benzeri yapı MA sonrası nano kalınlıklı plakalara dönüşür) topaklanma (aglomerasyon) eğilimindedir (Garg, 2025). Aglomerasyonlar ise kompozitin homojenliğini bozarak gerilim yığılmalarına ve çatlak başlatıcı bir etkiyle optimum takviyeli kompozitlere kıyasla daha erken kırılmaya yol açar (Giménez ve ark., 2022).

Oksidasyon, MXene yüzeyinin -OH/-O/-F sonlandırılmalı yapısını TiO_2 'ye dönüştürür ve yüzey kimyasını temelden değiştirir. Oksitlenmiş TiO_2 yüzeyi ise arayüzey bağını ve yük transferini zayıflatır. Bu durum optimum seviyeyi aşan ve aglomerasyona sebep olan takviye miktarları ile daha zararlıdır. Bir aglomerasyon, zayıf matris arayüzey bağı ve çevresel maruziyet yoluyla üretim esnasında nem ve oksijeni hapsedebilir. Bu durum ise şartlar oluştuğunda aglomere olmuş kısmın hızla oksitlenmesine ve aşındırıcı bir mikro ortamın oluşmasına neden olur (Wei ve ark., 2018). Oluşan bu mikro aşındırıcı yapının arayüzey bağının da zayıf oluşu zorlayıcı bir etkiye maruz kalması durumunda yüzeyden kolayca kopmasına hatta aşınma mekanizmalarında abrazif (üçüncü cisim aşınması) aşınmayı başlatmasına neden olur. (Bu mekanizmalar, Şekil 4.53'te ağ. %1'den fazla MXene takviyeli numunelerin aşınma yüzeylerinin EDS analizi ile uyumludur.)

Şekil 4.34, %5 B_4C içeriğine artan oranlarda (ağ. %1, %3 ve %5) MXene ilavesinin aşınma dayanımında hibrit takviyenin etkisini göstermektedir. Referans 5B0X numunesi 0,10288 ile en düşük ve en kararlı sürtünme katsayısını sergilerken, yapıya MXene eklendikçe COF değeri sürekli artarak 5B5X numunesinde 0,13134 ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Referans 5B0X numunesi, 27,9 mg gibi düşük bir kütle kaybıyla

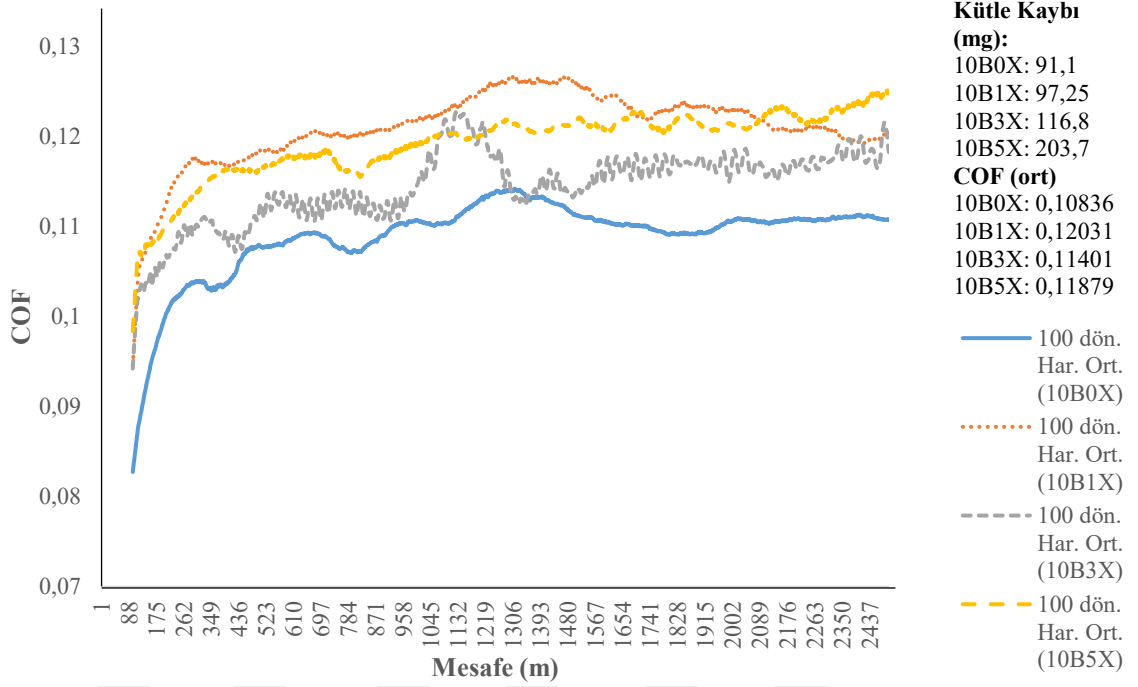
yüksek bir aşınma direnci gösterirken, yapıya sadece %1 MXene eklenmesi bile (5B1X) kütle kaybını 68,2 mg'a çıkarmıştır. Kütle kaybındaki artış, MXene oranı arttıkça devam etmiş ve 5B5X numunesinde (%5 B₄C + %5 MXene) kütle kaybı 141,5 mg ile bu gruptaki en yüksek değere ulaşmıştır.



Şekil 4.34. %5 B₄C takviyeli hibrit kompozitlere artan oranda Ti₃C₂T_x MXene ilavesinin sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (sabit 1 m/s hız, 30N yük ve 2500m aşınma mesafesi)

A1X (A7075 + ağ.%1 MXene) numunesinde Ti₃C₂T_x MXene yüzeyde koruyucu bir tribo tabaka oluşturarak aşınma dayanımını artırmıştır. Ancak, hibrit takviye içerisinde artan MXene katkısı ile zamana bağlı COF değişiminde gözlemlenen yüksek dalgalanmalar, tribo tabakanın sürekli olarak bozulup yeniden kurulduğuna işaretler ve bu durum B₄C gibi seramik takviyelerin varlığında abrasif aşınmayı tetikler. Hibrit takviyeli yüzeylerde (ağ. %5 B₄C + ağ. %x MXene, x=1, 3 ve 5) sürekli olarak devam eden üçüncü-cisim aşınması, MXene'nin kararlı ve sürekli bir yağlayıcı film oluşturmasını engeller. Faydalı olabilecek yağlama mekanizması, abrasif mekanizma tarafından tamamen baskılanır. Ayrı ayrı faydalı olan iki takviye (B₄C ve MXene), bir araya geldiklerinde üretim zorlukları ve zayıflayan arayüzeyler nedeniyle birbirlerinin etkisini yok ederek, aşınma dayanımını tek takviyeli durumdan bile daha düşük bir seviyeye getirmiştir.

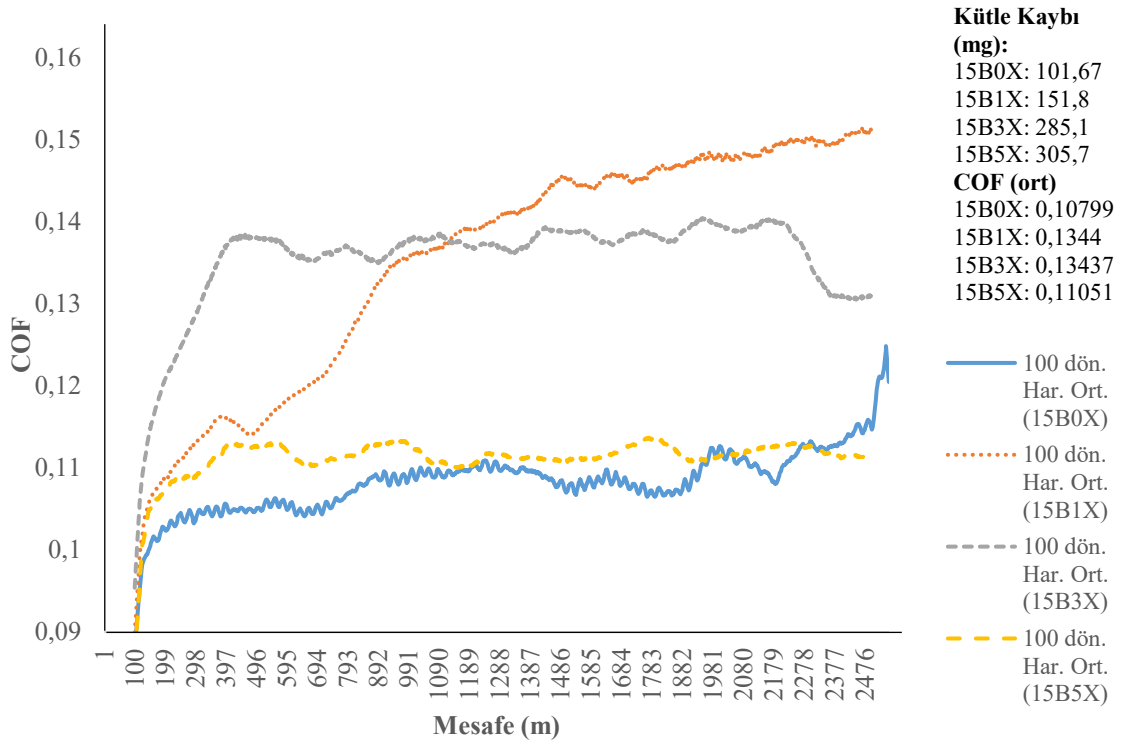
Şekil 4.35, ağ. %10 B₄C içeren MXene katkısız kompozitin (10B0X) ve hibrit takviyeli (ağ. %10 B₄C + ağ. %x MXene, x=1, 3 ve 5) kompozitlerin aşınma testi sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.35. %10 B₄C takviyeli hibrit kompozitlere artan oranda Ti₃C₂T_x MXene ilavesinin sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (sabit 1 m/s hız, 30N yük ve 2500m aşınma mesafesi)

Kütle kaybı verileri incelendiğinde, referans 10B0X numunesinin 91,1 mg olan aşınma miktarının, yapıya %1 MXene eklenmesiyle 97,25 mg'a, %3 MXene ile 116,8 mg'a ve %5 MXene ile 203,7 mg ulaştığı görülmektedir. Referans numunenin ortalama COF değeri 0,10836 iken, MXene içeren tüm hibrit kompozitler daha yüksek sürtünme katsayıları sergilemiş ve en yüksek COF değeri 0,12031 ile 10B1X numunesinde ölçülmüştür.

Şekil 4.36, ağ. %15 B₄C oranına sahip referans kompozit (15B0X) ile hibrit takviyeli (ağ. %15 B₄C + ağ. %x MXene, x=1, 3 ve 5) kompozitlerin aşınma verilerini sunmaktadır. Kütle kaybı verileri, halihazırda yüksek aşınma gösteren 15B0X referans numunesinin (101,67 mg), yapıya MXene eklendikçe aşınma dayanımının daha da düştüğünü göstermektedir. Aşınma miktarı, ağ. %1 MXene ilavesi ile 151,8 mg'a, %3 MXene ilavesi ile 285,1 mg'a ve son olarak %5 MXene ilavesi ile ise 305,7 mg'a yükselerek grubun en yüksek değerine ulaşmıştır. Sürtünme katsayısında (COF) ise 15B0X numunesinin 0,10799 olan ortalama COF değeri, ağ. %1 ve %3 MXene eklenmesiyle sırasıyla 0,1344 ve 0,1343 seviyelerine çıkarak en yüksek değerleri görmüş ancak ağ. %5 MXene eklendiğinde ise 0,11051'e tekrar gerilemiştir. Genel olarak veriler, yüksek takviyeli (%15 B₄C) bir yapıya eklenen MXene'nin, aşınmayı her seviyede daha da artırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.36. %15 B₄C takviyeli hibrit kompozitlere artan oranda Ti₃C₂T_x MXene ilavesinin sürtünme katsayısı ve kütle kaybına etkisi (sabit 1 m/s hız, 30N yük ve 2500m aşınma mesafesi)

Aşınma testleri, takviye stratejisinin malzemenin tribolojik performansı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Malzemenin aşınma davranışı, takviyenin tipi veya miktarından ziyade hangi aşınma mekanizmasının etkin olduğuna bağlıdır. Optimum miktarlarda (ağ. %5 B₄C veya ağ. %1 MXene) kullanılan takviyeler, ya matris içinde sağlam bir tutunma sağlayarak yüzeyi iki cisimli aşınmadan korumuş ya da katı bir yağlayıcı rolü oynamıştır. Ancak, takviye oranı optimum seviyeyi aştığında veya farklı tip takviyeler bir araya geldiğinde (hibrit kompozitler), zayıflayan arayüzey bağları nedeniyle kütle kaybı artmıştır. Bu durum, aşınan takviyelerin birer zımpara tanesi gibi davranarak üçüncü cisim aşınmasına neden olduğunu ve optimum olamayan takviyelerle kompozitlerin aşınma dayanımının dahada düşük seviyelere gelebileceğini göstermiştir.

Basma, sertlik, yoğunluk ve aşınma analizlerinin tümü, kompozit sistemlerin performansını belirleyen ana temanın, malzeme bileşimi ile üretim prosesi arasındaki etkileşim olduğunu göstermektedir. Yoğunluk ve sertlik analizleri, yüksek takviye oranlarının (ağ. %10 B₄C üzeri veya hibrit takviyeler) toz metalurjisi prosesini zorlaştırarak, özellikle merkezde gözenekli, düşük yoğunluklu ve zayıf, dolayısıyla heterojen bir iç yapıya neden olduğunu sayısal verilerle göstermiştir. Aşınma testleri, bu zayıf iç yapının doğrudan bir sonucu olarak, takviye parçacıklarının yüzeyden kolayca sökülerek üçüncü-cisim aşınması başlattığını ve malzemenin ömrünü kısalttığını

göstermiştir. Basma testlerinde gözlemlenen yüksek dayanım ise, malzemenin bir bütün olarak davrandığı ve yükün büyük ölçüde sağlam ve yoğun dış kabuk tarafından taşındığı yapısal bir yanıttır. Buna karşın, aşınma gibi yüzey hassasiyeti gerektiren bir uygulamada, aynı malzemenin zayıf arayüzey bağları nedeniyle başarısız olması, bir malzemenin farklı yükleme koşulları altındaki davranışının ne kadar değişebileceğini göstermektedir.

4.2. Mikroyapısal Analiz Sonuçları

Bilyeli öğütme ile hazırlanan tozlar ile referans tozlar ve toz metalurjisi kullanılarak üretilen hibrit kompozit numunelere ait mikroyapısal karakterizasyon sonuçları bu kısımda ele alınmıştır. Malzemelerin iç yapı özelliklerini ortaya koymak amacıyla FE-SEM görüntüleme teknikleriyle yüzey morfolojisi, parçacık şekli ve matris–takviye fazları arayüzleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, malzemenin kimyasal bileşimi ve faz dağılımı, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile detaylıca karakterize edilmiştir. Kristal yapı ve faz bileşimlerini belirlemek üzere X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiş ve mekanik alaşımlama sürecinin faz dönüşümlerine etkisi değerlendirilmiştir. Öğütme sürecinin partikül inceliğine etkisini belirlemek amacıyla parçacık boyutu analizleri yapılmış ve bilyeli öğütme sonrası elde edilen tozların boyutsal dağılımları analiz edilmiştir.

4.2.1. XRD analizleri ile faz yapısının değerlendirilmesi

Bu kısımda ağ. %15 B₄C takviyeli karışımın farklı sürelerde (1, 2 ve 3 saat) mekanik alaşımlama sonrası yapısında meydana gelen değişimler referans tozlarla (işlemsiz A7075 ve B₄C) kıyaslanarak incelenecektir.

Mekanik olarak alaşımlanmış tozlarda en önemli bilgi, piklerin profilinden (özellikle genişliğinden) elde edilir. İdeal, kusursuz bir kristal keskin ve dar pikler verirken, MA işlemi sırasında meydana gelen şiddetli plastik deformasyon, XRD piklerinde karakteristik değişikliklere neden olur:

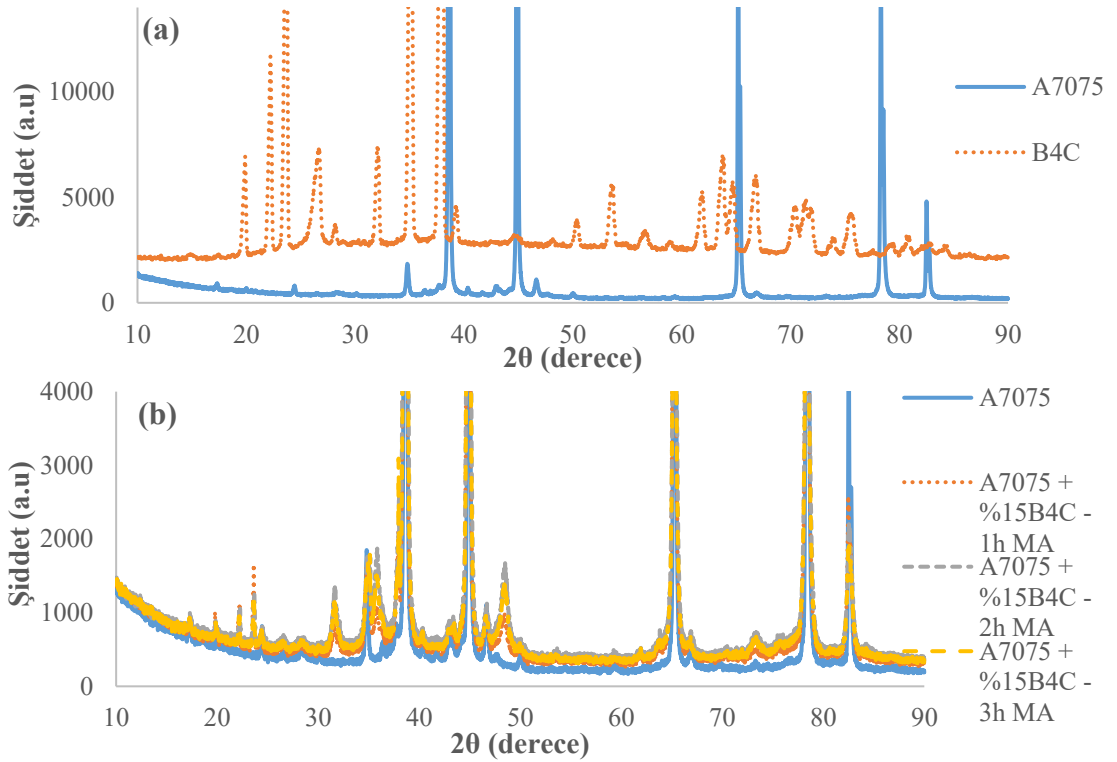
- Pik genişlemesi: Kristalit boyutunun küçülmesi ve kafes içi mikro gerinimlerin birikmesiyle pik tabanlarında gözlemlenen genişleme, MA'nın en belirgin etkisidir (Carreño-Gallardo ve ark., 2018).
- Pik şiddetinin azalması: Kristal yapıdaki düzenliliğin azalması, kusurların artması ve kristalitlerin amorf bölgelerle çevrelenmesi gibi nedenlerle piklerin tepe şiddetleri düşer (Ghods ve ark., 2015).

- Pik kayması: Kafes parametrelerindeki değişiklikler (örneğin, katı çözelti oluşumu veya yoğun iç gerilmeler) piklerin beklenen 2θ pozisyonlarından hafifçe kaymasına neden olabilir (Suryanarayana, 2022).

Pik genişlemesinin ardındaki fiziksel mekanizmalar şunlardır;

- Kristalit boyutunun küçülmesi: MA sırasındaki şiddetli plastik deformasyon, başlangıçta mikron boyutunda olan taneleri parçalayarak çok sayıda alt tane ve kristalit oluşturur. Kristalitler, X-ışınlarının uyumlu bir şekilde saçıldığı kusursuz kristal bölgeleridir. Öğütme süresi arttıkça, bu kristalitlerin boyutu sürekli olarak küçülür ve genellikle nanometre mertebesine iner (Waje ve ark., 2010).
- Mikro gerinim artışı: Sürekli deformasyon, kristal kafesi içinde çok yüksek yoğunlukta kusurlar, özellikle de dislokasyonlar oluşturur. Bu dislokasyonlar ve diğer kafes kusurları (boşluklar, istif hataları), atomların ideal pozisyonlarından sapmasına neden olarak kafes içinde homojen olmayan bir gerinim alanı (mikro gerinim) oluşturur (Giallonardo ve ark., 2013).

Şekil 4.37’de, işlemsiz A7075 ile B₄C referans tozlarına (4.37.a) ve %15 B₄C içeren A7075 kompozit tozlarının 1, 2 ve 3 saatlik bilyeli öğütme sonrası elde edilen tozların (4.37.b) XRD grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.37. Referans tozların ve A7075 + %15 B₄C karışımının bilyeli öğütme sonrası XRD analizi
a)Referans tozlar (A7075 ve B₄C), b) Bilyeli öğütme süresinin etkisi (1, 2 ve 3 saat)

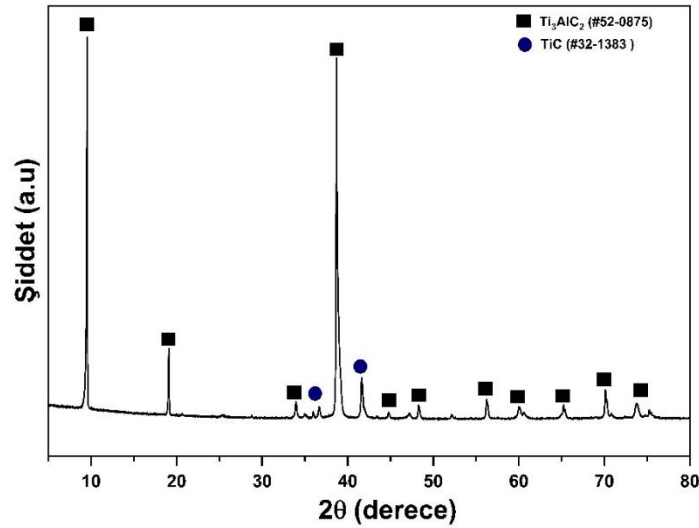
İşlemsiz A7075'te (Şekil 4.37.a), yüzey merkezli kübik yapıya ait Al pikleri (yaklaşık 38,5°, 44,7°, 65,1°, 78,2° ve 82,4°) dar ve yüksek şiddetli olup yüksek kristaliniteyi ve büyük kristal boyutunu yansıtırken, işlemsiz B₄C tozunda rombohedral yapıya ait çok sayıda düşük şiddetli pik (yaklaşık 26°, 31°, 37°, 43°, 53°, 66°, 70–75°) gözlemlenmektedir.

Mekanik alaşımlanmış kompozitlerde (Şekil 4.37.b) öğütme süresi arttıkça Al piklerinde belirgin genişleme ve şiddet azalışı meydana gelmiştir.

Al piklerindeki genişleme, kristalit boyutunun azaldığını ve/veya kafes geriniminin arttığını gösterirken şiddet azalması, kristalinite kaybına ve kusur yoğunluğundaki artışa işaret etmektedir (Mobasherpour ve ark., 2013). B₄C'ye ait karakteristik pikler ise neredeyse tamamen kaybolarak arka plana karışmıştır. Bu durum, mekanik alaşımlamayla kristal yapıların ciddi deformasyona uğradığını ve B₄C'nin sinyal şiddetinin farklı nedenlerle (düşük hacim oranı, parçalanma, amorflaşma, matris içine gömülme) azaldığını göstermektedir (İsfahani ve ark., 2019).

XRD analizleri, mekanik alaşımlama yoluyla A7075/B₄C kompozitlerinde kristalit boyutunun küçüldüğünü ve iç gerilimlerin arttığını dolayısıyla toz metalurjisinde kullanılacak tozların sıkıştırılabilirliğini ve sinterlemeye daha yatkın hale geldiğini göstermektedir. Mekanik alaşımlama süresinin artışı ile gözlemlenen basma, sertlik ve yoğunluk gibi özelliklerdeki değer artışı bu mekanizmanın gözlenmesiyle somutluk kazanmıştır.

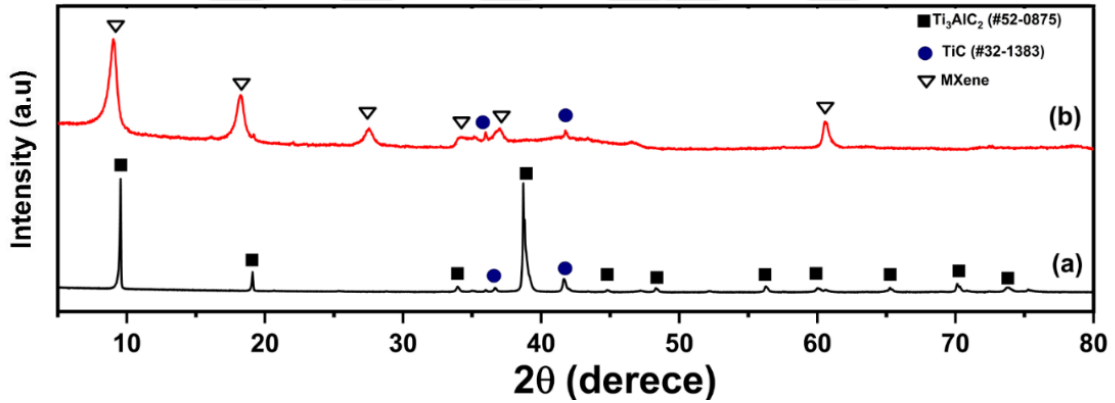
Şekil 4.38'de sunulan XRD analizi, ticari olarak temin edilen Ti₃AlC₂ MAX fazının kristal yapısını ve faz saflığını göstermektedir.



Şekil 4.38. Ticari Ti₃AlC₂ fazının XRD analizi

Desende, JCPDS #52-0875 referansına uygun olarak tanımlanan dar ve şiddetli pikler, yüksek kristaliniteye sahip Ti_3AlC_2 'nin ana faz olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yaklaşık $9,5^\circ$ açısında görülen belirgin pik, bu fazın katmanlı yapısının karakteristik bir göstergesidir. Bununla birlikte, JCPDS #32-1383'e ait ek pikler, yapıda ikincil bir faz olarak TiC safsızlığının da bulunduğunu göstermektedir. Bu tür safsızlıklar, MAX fazlarının sentez sürecinde sıkça karşılaşılan, termodinamik kararlılık veya reaksiyon eksikliği gibi nedenlere dayanan yaygın bir durumdur. TiC safsızlığı, son üründe kalıntı olarak bulunabilir ve bu durum MXene'in saflığına, verimine ve bazı özelliklerine etki edebilir. Ancak bu çalışmada mekanik dayanımın artırılmasına odaklanıldığı için ve yapı içerisinde seramik takviyeler kullanıldığından, TiC'nin seramik karakterli yapısının nihai ürün üzerinde olumsuz bir etki oluşturması beklenmemektedir.

Şekil 4.39, MAX fazından MXene'e dönüşüm sürecinin kristal yapıdaki değişimlerini XRD ile karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Grafik (a) başlangıç malzemesi olan Ti_3AlC_2 MAX fazını, grafik (b) ise bu malzemeden sentezlenen $Ti_3C_2T_x$ MXene ürününü temsil etmektedir.



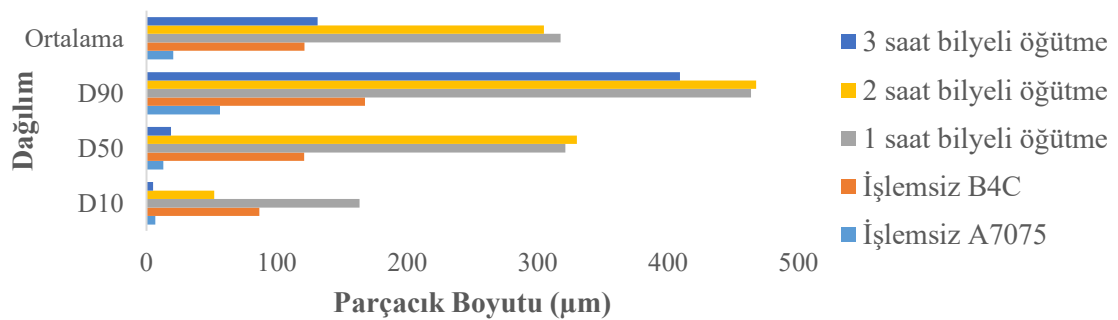
Şekil 4.39. Sentezlenen $Ti_3C_2T_x$ MXene fazının XRD analizi

Sentezlenen $Ti_3C_2T_x$ MXene ürününe ait XRD grafiğinde, başarılı bir kimyasal aşındırma (etching) işleminin gerçekleştiğini doğrulayan bir dizi önemli değişiklik tespit edilmiştir. Öncelikle, MAX fazının karakteristik (002) pikinin yaklaşık $9,5^\circ$ 'den daha düşük bir açığa ($6-7^\circ$ aralığına) kayması, Bragg yasası gereği katmanlar arası mesafenin arttığını ortaya koymaktadır. Bu kayma, Al katmanlarının seçici olarak uzaklaştırıldığını ve yerine su molekülleri ile -O-, -OH-, -F gibi sonlanma gruplarının yerleştiğini göstermektedir. Yani, kimyasal aşındırma işlemi sonucu, MXene yapısının oluşması için gerekli olan temel yapısal değişim başarıyla sağlanmıştır. Pik pozisyonundaki bu kayma, literatürde MXene oluşumunun en ayırt edici kanıtı olarak tanımlanmaktadır (Naguib ve

ark., 2011). Bununla birlikte, yeni MXene (002) pikinin önceki MAX fazındaki pike göre daha geniş olması, kristalinite boyutunun küçüldüğünü, yani katmanlar arası uzun menzilli düzenin bozulduğunu göstermektedir. Bu durum, aşındırma işleminin sadece Al katmanlarını uzaklaştırmakla kalmayıp aynı zamanda katmanlı yapının daha düzensiz hale gelmesine ve daha az istiflenmiş katmanlardan oluşan bir morfolojiye dönüşmesine yol açtığını göstermektedir. Bu da MXene'in 2 boyutlu özelliği ile uyumludur (Shuck ve ark., 2019).

4.2.2. Parçacık boyutu analizleri

Bu kısımda öğütülen tozların ortalama partikül boyutları üzerine öğütme süresinin etkisi incelenmiştir. A7075 ve B₄C tozlarının ve A7075 + ağ. %15 B₄C karışımının 1, 2 ve 3 saat bilyeli öğütülmüş hallerinin parçacık boyut dağılımı Şekil 4.40'ta verilmiştir. Grafikte D10, D50 ve D90 değerleri sırasıyla, partiküllerin hacimce %10'unun, %50'sinin (medyan boyut) ve %90'ının altında kaldığı boyutu temsil ederken, ortalama ise genel ortalama parçacık boyutunu ifade etmektedir. İşlemsiz A7075, yaklaşık 20 µm'lik D50 medyan boyutu ve 60 µm'lik D90 değeriyle nispeten ince yapılı bir toz olup, bu özellikleri SEM görüntülerinde (Şekil 4.42) gözlemlenen küçük ve küresel morfolojiyi nicel olarak desteklemektedir. Buna karşılık, işlemsiz B₄C ise A7075'e kıyasla belirgin şekilde daha iri taneli bir toz olup, 125 µm'lik D50 ve 170 µm D90 değerleriyle, SEM analizlerinde görülen büyük ve köşeli partikül yapısını doğrulamaktadır.

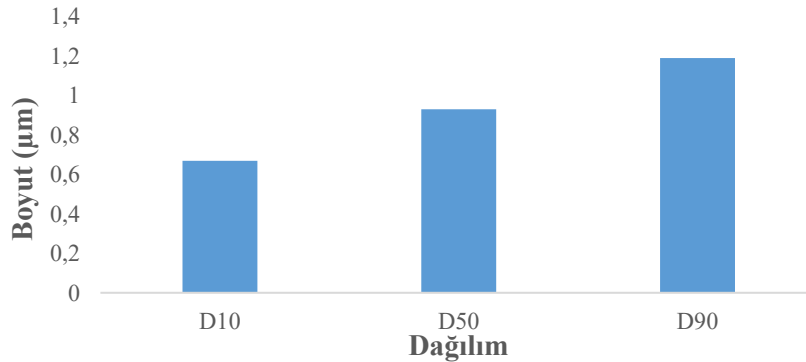


Şekil 4.40. Referans tozların ve A7075 + %15 B₄C toz karışımının farklı bilyeli öğütme süreleri sonrası parçacık boyut analizleri

Boyut analizine göre öğütme işleminin ilk iki saatinde kompozit tozun ortalama parçacık boyutu başlangıçtaki her iki tozun (A7075 ve B₄C) boyutunu da aşarak belirgin şekilde artmıştır. 2 saat bilyeli öğütme sonrası D90 değeri 450 µm ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Yani toz karışımının hacimce %90'ının boyutu 450 µm'den küçük ancak

%10'luk kısmı 450 μm 'den daha büyük topaklanmalardır. Bu durum, mekanik alaşımlama sürecinin ilk aşamalarında sünek A7075 ve gevrek B₄C tozları arasında baskın olan soğuk kaynağın tipik bir sonucudur. Bilyelerin yüksek enerjili çarpmasıyla A7075 parçacıkları yassılaşılarak birbirine ve çevredeki B₄C partiküllerine yapışır bu da katmanlı, düzensiz ve oldukça büyük topaklanmaların (aglomerasyon) oluşmasına yol açar (Sudhakar ve ark., 2025). 3 saatlik öğütme sürecinde ise parçacık boyutundaki artış tersine dönmekte ve özellikle D90 ile ortalama boyutta belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir. Ortalama boyut 300 μm 'nin üzerinden yaklaşık 125 μm 'ye kadar gerilemiştir. Bu değişim, mekanik alaşımlama sürecinde soğuk kaynakla büyüyen topaklanmaların, tekrarlanan deformasyonlar sonucu pekleşerek sertliğinin artması ve sünekliğinin azalmasıyla açıklanır. Yeterince sertleşen bu yapılar, artık yeni parçacıklara yapışmak yerine bilye çarpımlarıyla kırılmaya başlar. Bu aşamada, kırılma mekanizması soğuk kaynaklanmaya baskın gelir ve büyük topaklanmalar daha küçük parçacıklara ayrılır. Parçacık boyutundaki bu düşüş, sistemin mekanik alaşımlamada kararlı duruma yaklaşmakta olduğunu gösterir yani kaynaklanma ve kırılma hızları bir dengeye ulaşır ve boyutlar stabil hale gelir (Wei ve ark., 2023).

XRD ve SEM analizleriyle sentezi doğrulanan Ti₃C₂T_x MXene tozunun fiziksel karakterizasyonu için Şekil 4.41'de parçacık boyutu analizi verilmiştir.



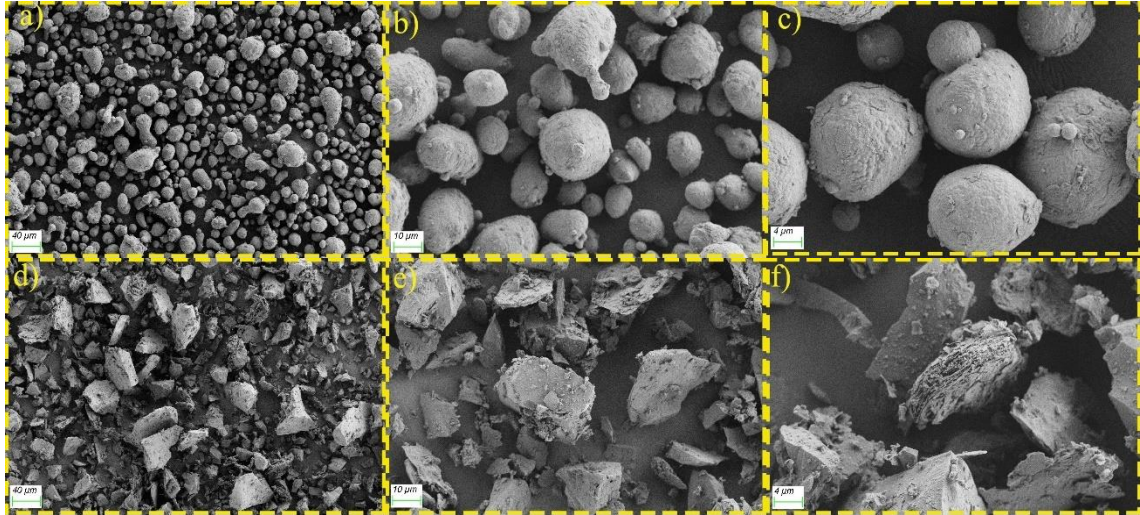
Şekil 4.41. Sentezlenen Ti₃C₂T_x MXene fazının parçacık boyut dağılımı

Şekil 4.41'e göre, Ti₃C₂T_x MXene fazının mikron altı bir parçacık boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Dağılımın medyan (D50) değeri 0,93 μm iken, alt ve üst sınırlarını tanımlayan D10 ve D90 değerleri sırasıyla 0,67 μm ve 1,20 μm olarak belirlenmiştir. Bu üç parametrenin birbirine yakınlığı, fazın oldukça dar bir boyut dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Başlangıçtaki Ti₃AlC₂ MAX fazının mikron altı boyutlarının büyük ölçüde koruduğunu ve uygulanan kimyasal aşındırma ile mekanik saflaştırma adımlarının partiküllerde aşırı kırılmaya yol açmadan kontrollü bir boyut

dağılımı sağladığını göstermektedir. MXene malzemesinin yanal boyut aralığı uygulama alanlarını doğrudan etkilemektedir. Daha büyük parçacıklar daha yüksek elektriksel iletkenlik sağlarken, daha küçük boyutlar dispersiyon stabilitesi ve yüzey etkileşimleri açısından avantaj sunmaktadır (Murali ve ark., 2022).

4.2.3. SEM ile yüzey ve mikro yapı analizleri

Bu kısımda bilyeli öğütölmüş tozlarda öğütme süresinin etkisi SEM analizleri ile incelenmiştir. Şekil 4.42'de, ticari olarak temin edilen A7075 alüminyum alaşımı ve B₄C seramik tozlarının farklı büyütme oranlarında elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. A7075 toz malzeme için; 500 X büyütmede (Şekil 4.42.a) partiküllerin genel olarak küresel ve yarı-küresel formda olduğu ve geniş bir boyut dağılımı sergilediği görülmüştür. 2 kX büyütmede (Şekil 4.42.b), büyük partiküllerin yüzeyine yapışmış uydu yapıları küçük parçacıklar dikkat çekmekte olup, bu yapı gaz atomizasyonu yönteminin tipik bir göstergesidir (Sabard ve ark., 2018). 5 kX büyütmede (Şekil 4.42.c) ise, partikül yüzeylerinin tamamen pürüzsüz olmadığı, aksine hızlı katılaşmanın etkisiyle hafif pürüzlü ve granüler bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir (Molnárová ve ark., 2016). Bu morfolojik özellikler, A7075 tozlarının toz metalurjisi için uygun akışkanlık ve yoğun paketlenabilirlik potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakta ve mekanik alaşımlama sonrası durum için referans oluşturmaktadır.

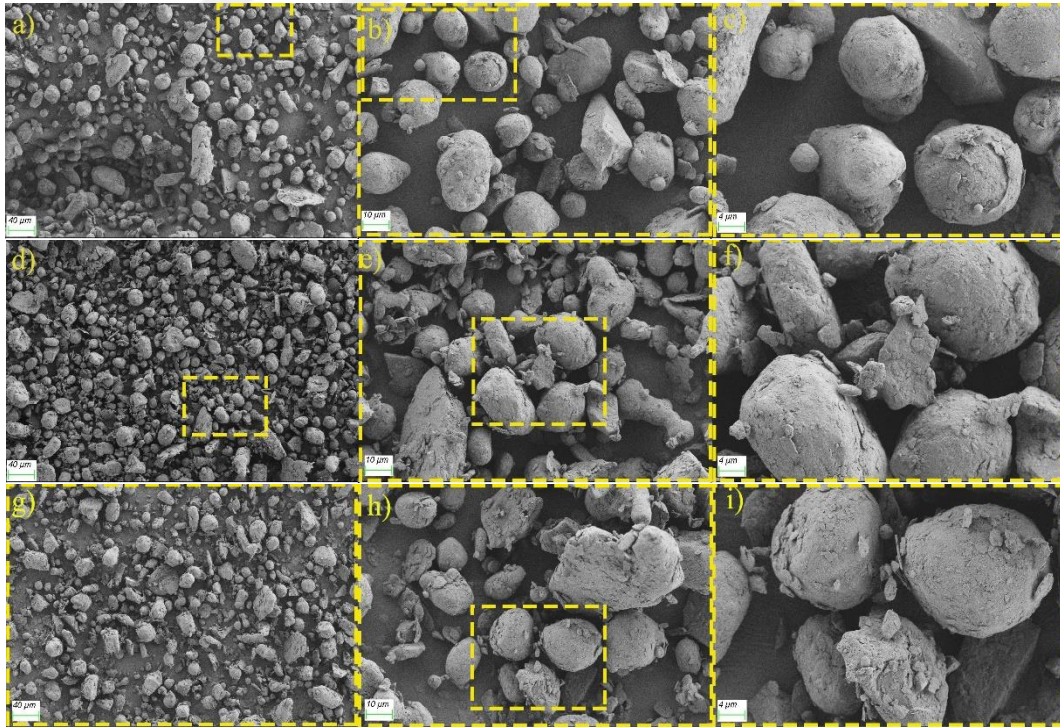


Şekil 4.42. Satın alınan toz malzemelerin işlem görmemiş 500 X, 2 kX ve 5 kX büyütmeli SEM görüntüleri a,b,c)A7075 ve d,e,f)B₄C

B₄C seramik tozu için; 500 X büyütmede (4.1.d), partiküllerin keskin kenarlı, köşeli ve düzensiz morfolojide olduğu ve geniş bir boyut dağılımı sergilediği görülmektedir. 2 kX büyütmede (4.1.e), B₄C'nin kırılğan yapısına bağlı olarak düzlemsel

kırık yüzeyler ve basamaklı yapılar dikkat çekmektedir. 5 kX büyütmede (4.1.f) ise partiküllerin belirgin keskin kenarları, tozun mekanik öğütme veya kırma yöntemiyle elde edildiğini göstermektedir (Kuliiev, 2020). Bu morfoloji, tozun mekanik kilitlemeye elverişli olduğunu böylece sertlik, dayanım ve aşınma direncini artırma potansiyeli aynı zamanda yüksek oranlarda kullanımının ise akışkanlığı zorlaştırarak sıkıştırılabilirliği azaltma ve poroziteyi artırma mekanizmasındaki etkisinin sebebini göstermektedir.

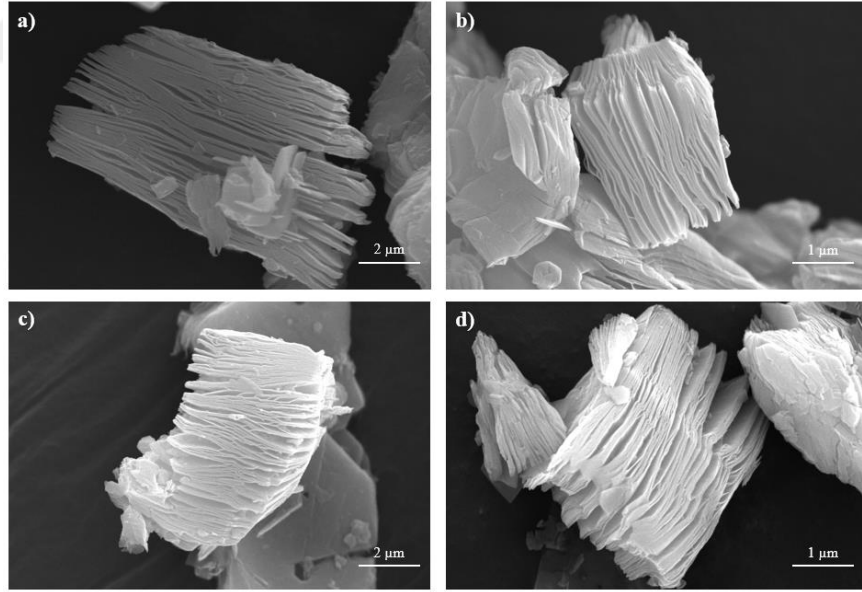
Şekil 4.43'te, A7075 matrisli ve ağırlık %15 B₄C takviyeli tozların, 1, 2 ve 3 saatlik bilyeli öğütme sonrası elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Bir saatlik öğütme sonunda (Şekil 4.43.a,b ve c), A7075 partiküllerinin küresel formunun deforme olmaya başladığı (c) görülmektedir. 500X (a) büyütmede aglomere olmuş iri parçacıklar dikkat çekmekte olup parçacık analizindeki sayısal verileri görsel olarak doğrulamaktadır. Ayrıca 2 kX (b) büyütmede B₄C takviyesi seçilebilmekte homojen bir karışımın henüz oluşmadığı anlaşılmaktadır. İki saatlik öğütmede (Şekil 4.43.d, e ve f) ise daha deforme olmuş geometriler (e, f) ve daha homojen bir dağılım dikkat çekmektedir. 500 X (d) büyütmede aglomere parçacıkların varlığı azalmış olsa da varlığını sürdürdüğü görülmektedir. Ayrıca 5 kX büyütmede (f) takviye fazı öğütme etkisiyle daha küçük boyutlara ayrılmış ve matris yüzeylere tutunarak daha dikkat çekici hale gelmiştir.



Şekil 4.43. A7075 matris ve %15 B₄C takviyeli karışımın bilyeli öğütme sonrası 500 X, 2 kX ve 5 kX SEM görüntüleri a,b,c) 1 saat bilyeli öğütme, d,e,f) 2 saat, g,h,i) 3 saat

Üç saatlik öğütme sonrasında (Şekil 4.43.g, h ve i), B₄C takviyesi matris içerisinde ince ve homojen bir şekilde dağılmış olup, ayırt edilebilir saf fazlar yerine bütünleşmiş kompozit partiküller (i) elde edilmiştir. Genel olarak, öğütme süresi arttıkça toz metalurjisi işlemleri için uygunluk sağlayan daha kararlı ve iyi dağılmış kompozit tozlar elde edilmektedir (Suryanarayana, 2022).

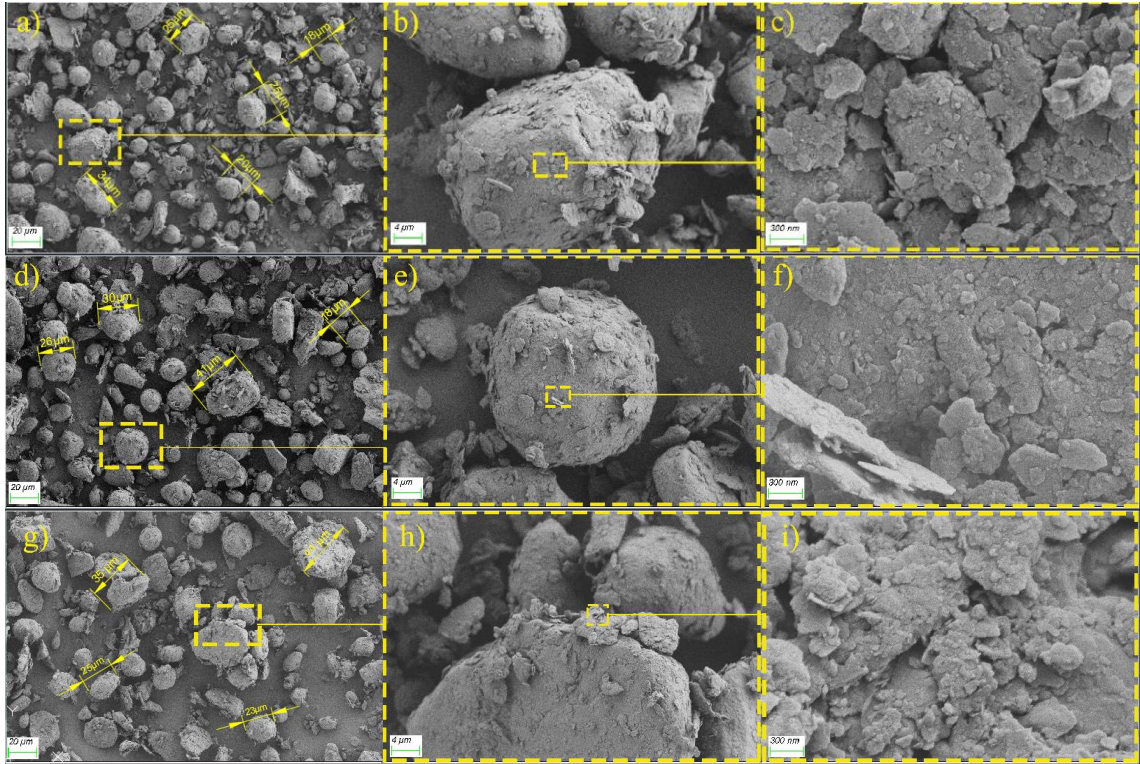
Ti₃AlC₂ MAX fazından sentezlenen Ti₃C₂T_x MXene tozuna ait farklı partiküllerin SEM görüntüleri Şekil 4.44'te verilmiş olup, bu görüntüler MXene'in karakteristik akordeon benzeri, çok katmanlı lamelli yapısını açıkça ortaya koymaktadır. Bu morfoloji, MAX fazındaki Al katmanlarının seçici aşındırma (etching) işlemiyle yapıdan uzaklaştırılması sonucu, Ti₃C₂ katmanları arasında boşluklar oluşarak gevşek şekilde istiflenmiş, zayıf van der Waals kuvvetleriyle tutunan çok katmanlı bir yapı meydana gelmesiyle açıklanmaktadır. Görseller, bu özgün yapının hem genel görünümünü hem de katmanlar arası ayrılmayı detaylı şekilde yansıtmaktadır. Özellikle bazı partiküllerin bükülmüş yapısı, MXene tozlarının Al uzaklaştırımı sonrası kazandığı esnekliği de göstermektedir. Bu görsel kanıtlar, MXene'in başarılı bir şekilde sentezlendiğini teyit etmektedir.



Şekil 4.44. Ti₃AlC₂ MAX fazından sentezlenen Ti₃C₂T_x MXene tozunun farklı partiküllerden alınmış SEM görüntüleri a, b, c ve d) farklı Ti₃C₂T_x MXene partikülleri

A7075 + ağı. %15 B₄C kompozit tozuna ağı. %1, %3 ve %5 Ti₃C₂T_x MXene ilavesi ve 3 saat bilyeli öğütme sonrası elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.45'te, verilmiştir. Ayrıca MXene takviyesinin etkisini kıyaslamak amacıyla görsel üzerinde bazı

partiküllerin boyut ölçümleri yapılmıştır. Bu işlem için görsel AutoCAD programına aktarılmış ve görsel üzerindeki ölçekten faydalanılmıştır.



Şekil 4.45. A7075+ağ.%15B₄C ve MXene toz karışımının 3 saat bilyeli öğütme sonrası 1 kX, 5 kX ve 80 kX SEM görüntüleri a,b,c)ağ.%1MXene, d,e,f)ağ.%3 MXene ve g,h,i)ağ.%5 MXene

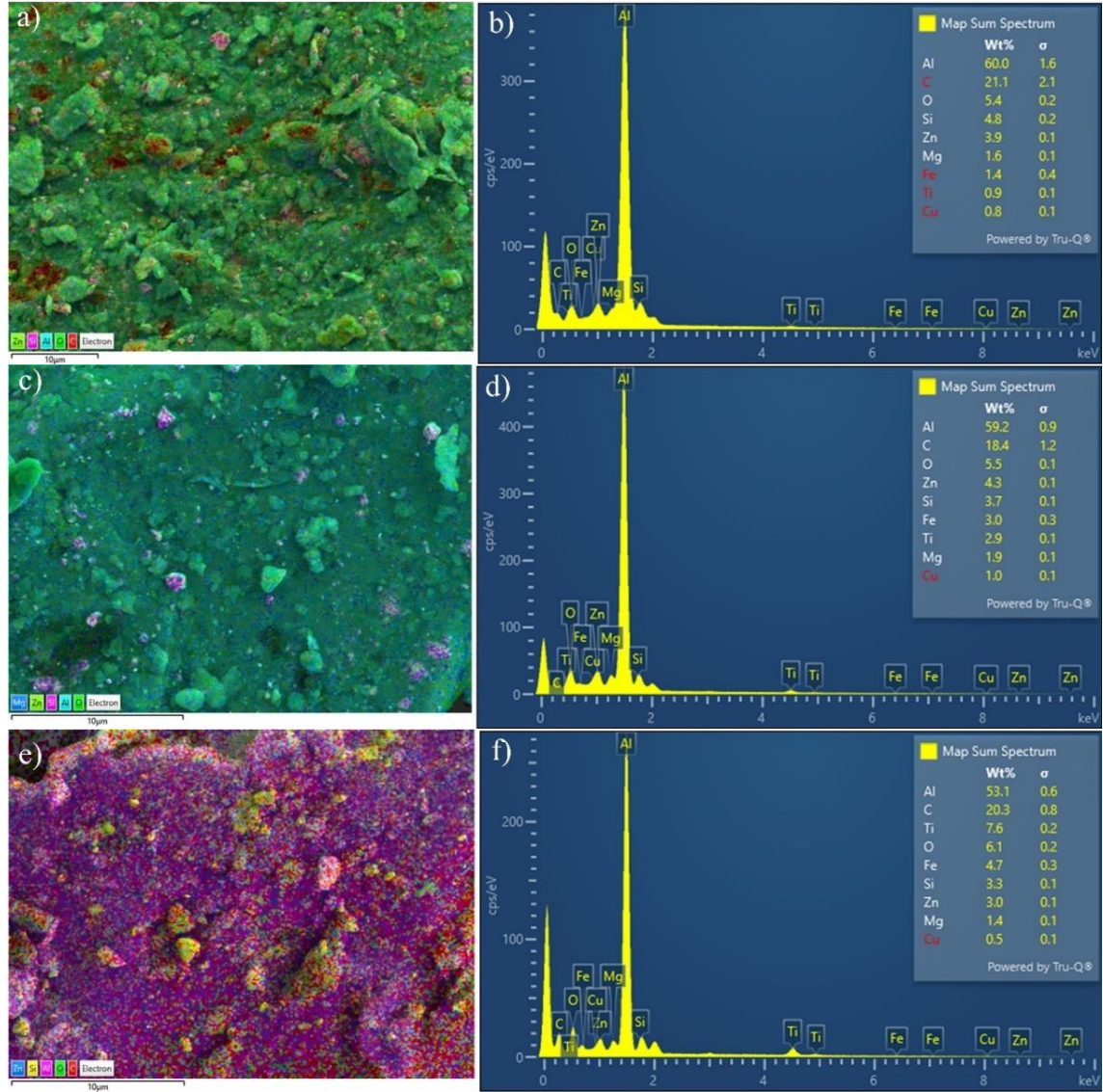
A7075 + ağ.%15 B₄C içeriğine ağırlıkça %1 Ti₃C₂T_x MXene eklenmesiyle MXene ilavesiz karışıma (Şekil 4.43.g,h,i) kıyasla yapıdaki A7075 parçacıklarının yüzeyinin küçük parçacıklarla kaplı olduğu görülmektedir. Özellikle 80 kX büyütme görüntüde (c) A7075/B₄C partiküllerinin yüzeylerinin ince, kırışık ve tül benzeri 2 boyutlu MXene yapraklarıyla kaplandığı tespit edilmiştir. Bu oran, MXene'in daha çok yüzey kaplayıcı olarak davrandığı bir aşamayı temsil etmektedir. Ayrıca SEM görüntüsü üzerinden AutoCAD programı vasıtasıyla yapılan boyut ölçümlerine göre ortalama parçacık boyutunun 25µm olduğu belirlenmiştir. Bu değer MXene katkısız karışımda partikül boyut analizinde 125µm olarak belirlenmiş olup ağ. %1 MXene ilavesi ile boyutun düştüğü anlaşılmıştır. Bu durum ise MXene'nin literatürde rapor edilen katı yağlayıcı özelliğini teyit etmektedir. Bu özellik hem soğuk kaynak mekanizmasını baskılayarak boyutun küçülmesine imkân tanımış hem de daha homojen bir karışımın oluşmasını sağlamıştır. Bu morfoloji basma dayanımı, sertlik ve yoğunluk değerlerindeki artışın ardında yatan temel mekanizmayı da netleştirmektedir. Ağ. %3 MXene ilavesiyle (Şekil 4.45.d, e ve f) birlikte ortalama partikül boyutunun 29µm ile bir miktar arttığı

belirlenmiştir. 80 kX büyütme görselde (f) MXene'in yüzey kaplayıcı özelliğinin devam ettiği ve kaplayıcı malzemenin boyutunun daha da küçüldüğü görülmektedir. Ağırlıkça %5 MXene içeren karışımda ise pulsu ve aglomere olmuş partiküller hâkim yapı haline gelmiştir. Nitekim görsel üzerinden yapılan boyut ölçümlerinde ortalama parçacık boyutunun 33µm ile dahada arttığı belirlenmiştir. 80 kX büyütme görüntü (i), MXene nano yapraklarının A7075/B₄C parçacıklarıyla iç içe geçtiğini, MXene katkısının artık bir kaplama olmayıp yapıya dahil olduğu bir kompozit toz sistemi oluşturduğu göstermektedir. Ayrıca MXene ilavesi arttıkça artan boyut miktarı ve homojen toz karışımından uzaklaşılması optimum bir takviye miktarına işaret etmektedir. Nitekim basma, sertlik, yoğunluk ve aşınma testlerinde elde edilen sayısal bulgulara bu duruma işaret etmiş olup sağlanan bu görseller test (basma, sertlik, aşınma, yoğunluk) sonuçlarında kapsamlı şekilde değinilen mekanizmalara dayanak oluşturmaktadır.

MXene, mekanik alaşımlama sürecinde katı bir yağlayıcı görevi üstlenerek sünek A7075 partikülleri arasındaki soğuk kaynak mekanizmasını engellemekte ya da belirgin biçimde yavaşlatmaktadır. Yüksek enerjili öğütme koşullarında, akordeon benzeri MXene yapısının katmanlarına ayrılması ve bu nano yaprakların kompozit partiküllerin yüzeyini kaplaması, bu morfolojinin oluşmasında etkilidir (Shi ve ark., 2024). Elde edilen bulgular, literatürde MXene'in etkilerine ilişkin önceki çalışmalarla da uyumlu şekilde, katı yağlayıcı etkisi sayesinde soğuk kaynak mekanizmasını baskıladığını ve ilave miktarına bağlı olarak partikül boyutunun küçüldüğünü ortaya koymaktadır.

A7075 + ağ. %15 B₄C kompozit tozuna %1, %3 ve %5 oranlarında Ti₃C₂T_x MXene ilavesi ve 3 saat mekanik alaşımlama sonrası elde edilen EDS haritaları ve spektrum analizleri Şekil 4.46'da verilmiştir. EDS spektrumlarına göre (Şekil 4.46.b, d ve f), tüm numunelerde baskın pik Al'dir ve A7075 alaşımının karakteristik elementleri olan Zn, Mg ve Cu tüm spektrumlarda mevcuttur (Yildirim ve ark., 2016). Yüksek C sinyali hem ağ. %15'lik B₄C'den hem de MXene (Ti₃C₂) yapısından kaynaklanmaktadır. Oksijenin tespit edilmesi hem MXene'in yüzey fonksiyonel gruplarına hem de öğütme sırasında oluşan yüzey oksidasyonuna bağlanmaktadır (Kościelniak ve ark., 2024). Özellikle Ti miktarının %1, %3 ve %5 MXene ilavelerinde sırasıyla yaklaşık %0,9, %2,9 ve %7,6 olarak ölçülmesi, MXene miktarlarıyla yüksek düzeyde uyumluluk göstermekte ve ilavelerin başarıyla kompozit yapıya entegre edildiğini sayısal olarak doğrulamaktadır. MXene ilavesine bağlı olarak yapıdaki oksijen miktarının arttığı (ağ.%1MXene: %5,4 O, ağ.%3 MXene: %5,5 O ve ağ. %5 MXene: %6,1 O) belirlenmiş olup MXenenin literatürde (Sunderiya ve ark., 2024) rapor edildiği gibi oksitlenebilirliğinin yüksek

olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca dikkat çekici bir bulgu olarak yapıda silisyumun varlığıdır. Si, özellikle A7075 alaşım içeriğinde en aza indirilmek istenen ve alaşımın kalitesini düşüren bir elementtir. Bu elementin varlığı bir kirlenmeyi göstermekte olup mekanik alaşımlama öncesinde kovan temizliğinde kullanılan SiO_2 tozundan geldiği tahmin edilmektedir.

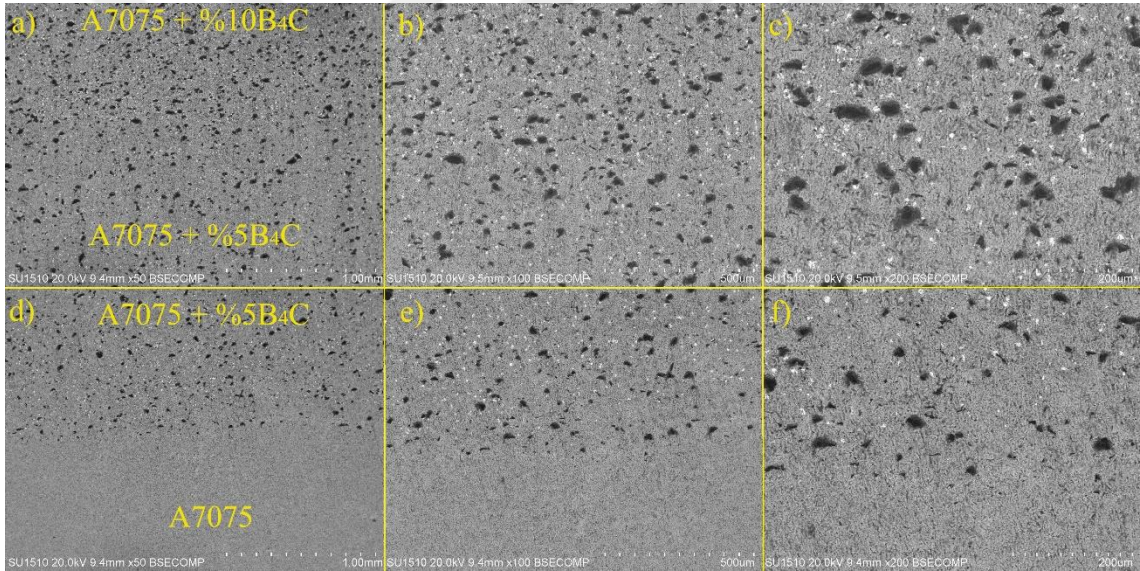


Şekil 4.46. A7075+%15B₄C ve Ti₃C₂ MXene toz karışımının 3 saat bilyeli öğütmeli sonrası EDS analizleri a,b)%1 MXene, c,d)%3 MXene ve e,f)%5 MXene

EDS haritaları (Şekil 4.46.a, c ve e), elementlerin toz içerisindeki dağılımını görsel olarak ortaya koymaktadır. EDS haritalarında en dikkat çekici bulgu yapıdaki silisyumun aglomere olmasıdır. Üst kısımda da bahsedilen bu kirlilik üretim sürecinden kaynaklanmış ve aglomere olmasından dolayı bir heterojenlik oluşturarak mekanik özelliklerin düşmesinde etkili bir faktör olarak öne çıkmıştır. Ayrıca, EDS haritalarında

takviye fazları olan B_4C ve Ti_3C_2 'den gelen elementler (B ve Ti) karbon (C) piki ile çakıştığı için arka planda kalarak tespit edilemese de takviyelerin yapısında bulunan C ile oluşturdukları bileşikler sayesinde bölgesel C yoğunluğunun tespiti, takviyelerin varlığına dair dolaylı bir kanıt sunmaktadır. Görseller (a, c ve e) incelendiğinde C elementinin belirgin varlığı ağ. %1 ve ağ. %5 MXene takviyeli karışımlarda gözlemlenirken ağ.%3 MXene takviyeli karışımda ise kimyasal bileşimde görünmesine rağmen EDS haritasında belirgin değildir. Bu durum ağ. %3 MXene ilaveli karışımda daha homojen bir karışımın varlığına işaret etmekte olup basma dayanımında daha yüksek seviyelere ulaşılmasına bir dayanaktır.

A7075/ B_4C hibrit kompozitin (sinterleme sonrası yanal yüzeyi parlatılmış numune) geçiş bölgelerine ait BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.47. FGM yapıdaki 25c kodlu sinterlenmiş hibrit kompozitin geçiş bölgelerinin BSE modunda çekilmiş SEM görüntüleri (soldan sağa doğru 50 X, 100 X ve 200 X büyütme) a,b,c) %5'ten %10'a geçiş ve d,e,f) Saftan %5'e geçiş

BSE (Geri Saçılımlı Elektron) modunda elde edilen SEM görüntüleri, atom numarası kontrastına dayalı olarak farklı fazların ayırt edilmesini sağlar ve bu sayede hibrit kompozit yapının mikroyapısal bileşenleri net bir şekilde gözlemlenebilir. Bu görüntülerde, ana yapı olan A7075 matrisi, alüminyum ve alaşım elementleri (Zn, Mg, Cu) içermesi nedeniyle orta tonlu gri renkte görünmektedir. Takviye fazı olan B_4C , düşük atom numarasına sahip bor ve karbon elementlerinden oluştuğu için koyu gri ile siyah arasında değişen bir tonda izlenir. Sıkıştırma sonrası yapıda kalan boşluklar ise elektron saçılımı gerçekleşmediğinden tamamen siyah olarak belirir. Ayrıca, Zn ve Cu gibi ağır

elementlerce zengin intermetalik fazlar (örneğin $MgZn_2$, Al_2CuMg) ile olası Fe içeren kalıntılar, yüksek atom numaraları nedeniyle parlak beyaz noktacıklar şeklinde ayırt edilmektedir. Bu kontrast farklılıkları sayesinde kompozit yapıdaki tüm ana fazlar görsel olarak güvenilir şekilde tanımlanabilmektedir.

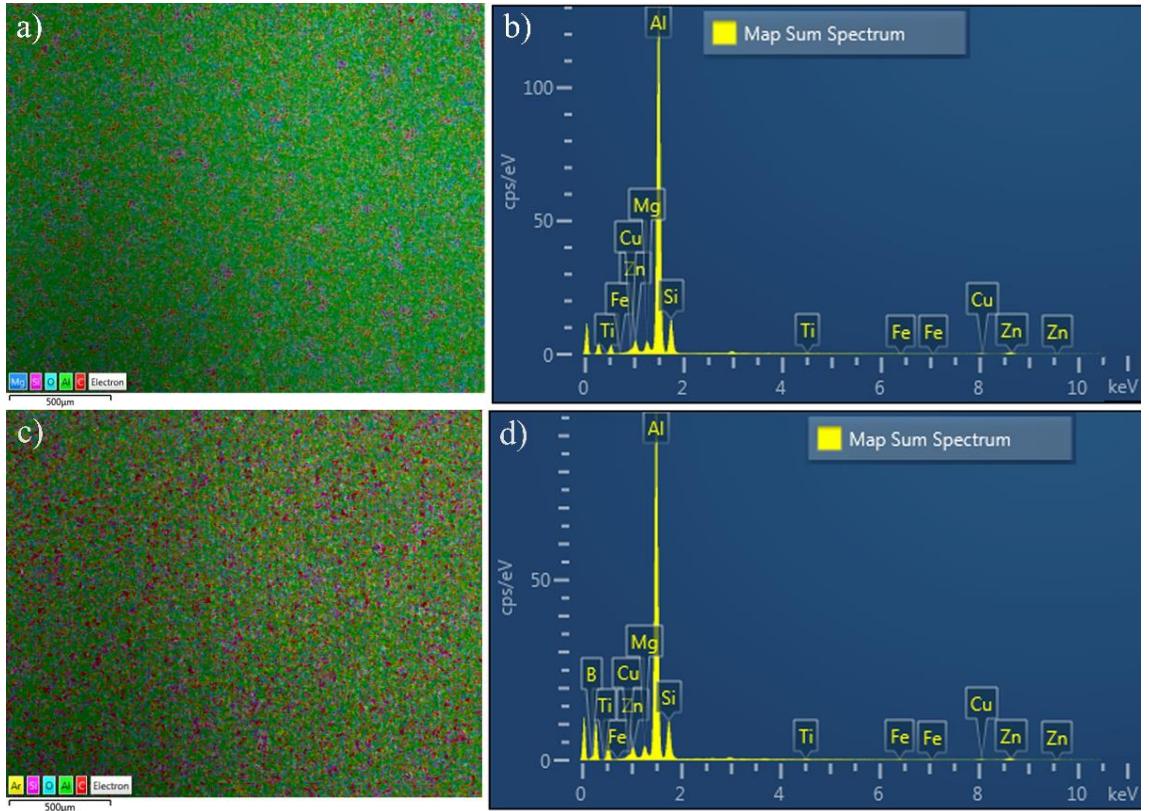
Ağırlıkça %5 B_4C içeren katmandan ağ. %10 B_4C içeren katmana geçiş bölgesinde (Şekil 4.47.a, b, c), koyu renkli B_4C partiküllerinin hacimsel oranının belirgin biçimde arttığı görülerek FGM yapının tasarımına uygun bir derecelendirme başarıyla doğrulanmıştır. Bununla birlikte, takviye oranının artması ile gözenekliliğin de gözle görülür biçimde arttığı belirlenmiştir. Her katmanda B_4C dağılımının homojen olduğu, geçiş arayüzeylerinde porozitenin varlığı görülmekle birlikte bütünlüğün korunduğu belirlenmiştir.

Saf A7075'ten ağ. %5 B_4C içeren katmana geçiş bölgesinde (Şekil 4.47.d, e, f), tabakalaşmaya bağlı net bir faz sınırı gözlemlenmekte ve bu geçişin keskin ama sağlam bir yapıda olduğu görülmektedir. Delaminasyon, çatlak veya büyük boşlukların gözlenmemesi, uygulanan 500 MPa sıkıştırma basıncının katmanlar arası mekanik kenetlenmeyi yeterince sağladığını göstermektedir. Matris içerisinde B_4C takviyesi başarılı şekilde dağılmış olup, intermetalik fazlar (parlak alanlar) ve gözenek yapısı da yüksek büyütme görüntülerde net olarak seçilebilmektedir.

Genel olarak elde edilen BSE-SEM görüntüleri, mekanik alaşımlama ve katmanlı sıkıştırma yöntemiyle üretilen FGM yapının tasarıma uygun şekilde başarıyla oluşturulduğunu ortaya koymaktadır. Ancak en dikkat çekici bulgu ağ. %10 B_4C içeren katmanda gözlemlenen gözeneklilik oranının, ağ. %5 B_4C içeren katmana kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olmasıdır. Bu durum, metal matrisli kompozitlerde sıklıkla karşılaşılan bir duruma işaret etmektedir. Sert ve plastik deformasyona uğramayan B_4C partikülleri, sıkıştırma sırasında sünek alüminyum matrisin plastik akışını sınırlandırmakta bu da tozlar arası boşlukların yeterince kapanmasını engellemektedir (Javdani ve Daei-Sorkhabi, 2018). Takviye oranı arttıkça bu etki daha da belirginleşmekte ve porozite artmaktadır. Artan porozite, sadece mikroyapısal bir gözlem olmanın ötesinde, malzemenin mekanik özelliklerini (özellikle dayanım ve süneklik) olumsuz yönde etkileyebilecek önemli bir faktör olup, tabakalı tasarımında dikkatle kontrol edilmesi gereken önemli bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle belirlenen takviye miktarlarında (ağ. %5, %10 ve %15 B_4C) oluşturulan FGM yapıda, katman adedinin artışı ile mekanik özelliklerin (basma dayanımı ve tokluk) neden azaldığı bu

görsel ile netlik kazanmakta ve takviye miktarının ileri seviye optimizasyonunun gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

FGM yapıdaki 25c kodlu numunenin merkez (a, b) ve kenar (c, d) bölgelerine ait EDS haritaları ve spektrum analizleri Şekil 4.48’de, verilmiştir. Merkez bölgeye ait harita (a), genel olarak homojen bir görünüm sergilemekle birlikte daha önce de ifade edilen ve MA prosesinde meydana gelen Si kirlenmesinin varlığını (a,b) göstermektedir. Sinterleme sonrası Si elementinin tüm yapıya dağılmış aglomere yapısı dikkat çekicidir. Kenar bölgeye ait EDS analizi (c ve d), matris içerisinde yaygın ve homojen bir şekilde dağılmış karbon zengin bölgeleriyle bu katmanın A7075 + ağı.%10 B₄C içeren bir kompozit yapı olduğunu kimyasal olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4.48. FGM yapıdaki 25c kolu numunenin geçiş bölgelerindeki EDS analizi a,b) orta bölge ve c,d) kenar bölge

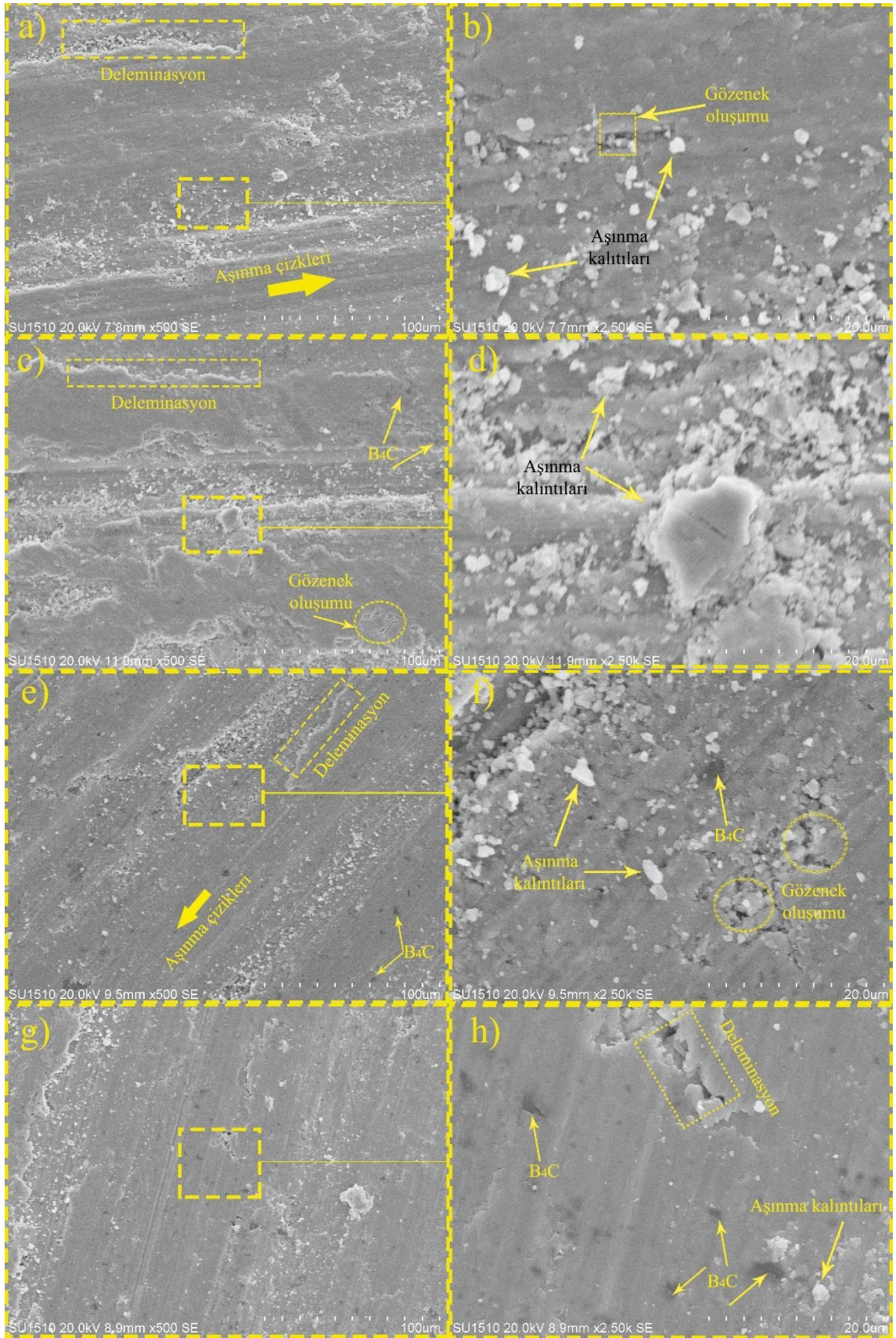
SEM/EDS analizleri, aşağıdaki temel aşınma mekanizmalarının karakteristik izlerini ortaya çıkarabilir.

- **Abrasif Aşınma:** Aşınma yüzeyinde kayma yönüne paralel, sürekli veya kesikli çizikler mevcuttur. Bu izler, karşı yüzeyin sert pürüzleri (iki-cisim abrazyonu) veya arayüze sıkışan sert parçacıklar (üç-cisim abrazyonu) tarafından oluşturulur. Seramik takviyeli metal matris kompozitlerde, matristen kopan sert partiküller üçüncü cisim

aşındırıcısı olarak davranarak aşınmayı artırabilir. SEM'de, çiziklerin içinde veya sonunda aşınma kalıntılarının görülmesi bu mekanizmanın aktif olduğuna kanıttır (Şenel ve ark., 2022).

- **Adhezif (Yapışkan) Aşınma:** İki yüzeyin teması sırasında oluşan mikro kaynakların, kayma hareketiyle kırılması sonucu malzeme bir yüzeyden diğerine transfer olur. SEM'de, yüzeyde sıvanmış ve plastik deformasyona uğramış malzeme tabakaları, pürüzlü ve yırtılmış görünen alanlar olarak gözlemlenir. Bu mekanizma, EDS analizleri ile doğrulanabilen malzeme transferi ile kanıtlanır. Genellikle daha yüksek yükler ve daha düşük hızlarda, özellikle metal/metal temasının yoğun olduğu durumlarda baskındır (Ozay ve ark., 2021).
- **Delaminasyon Aşınması:** Tekrarlayan döngüsel gerilmeler altında, yüzeyin hemen altında çatlaklar oluşur ve yüzeye paralel olarak ilerler. Bu çatlaklar birleşip yüzeye ulaştığında, ince, pul benzeri tabakalar halinde malzeme yüzeyinden kopar. SEM'de bu mekanizma, geride bıraktığı kraterler ve yüzeyden kalkmak üzere olan malzeme katmanları ile tanımlanır. Bu mekanizma, genellikle yüksek yükler altında ve gözenekli veya zayıf arayüzey bağına sahip malzemelerde baskın hale gelir (Canute ve Majumder, 2018).
- **Oksidatif Aşınma ve Tribo-Katman Oluşumu:** Sürtünme sırasında oluşan ısı, yüzeydeki alüminyumun ve diğer elementlerin atmosferdeki oksijenle reaksiyona girerek bir oksit tabakası oluşturmaya neden olur (Ballupete Nagaraju ve ark., 2022). Bu oksit tabakası, aşınma döküntülerinin (Al ve karşı diskten gelen Fe) mekanik olarak ezilmesi ve karıştırılmasıyla yoğun bir tribo tabaka oluşturabilir. EDS analizi, bu katmanın Al, O, C (B₄C'den) ve Fe (diskten) gibi elementleri içerdiğini gösterir. Eğer bu katman dengede ve yüzeye iyi yapışmışsa doğrudan metal/metal temasını engelleyerek koruyucu bir rol oynayabilir ve aşınmayı azaltabilir. Ancak kırılırsa ve kolayca parçalanıyorsa, kendisi de bir aşındırıcı döküntü kaynağı haline gelebilir (Fıçıcı, 2012).

Takviyesiz AA7075 matrisli ve ağ. %5, %10 ve %15 oranlarında bor karbür (B₄C) takviyeli kompozit malzemelerin aşınma testleri sonrası yüzey morfolojileri Şekil 4.49'da verilmiştir. Bu görüntüler, daha önce değerlendirilen aşınma verilerinin ardında yatan mekanizmaları netleştirmek için analiz edilmiştir.



Şekil 4.49. Aşınma yüzeylerinin B₄C ilavesi ile değişen 500 X ve 2,5 kX büyütmeli SEM görüntüleri
a,b)Saf-A, c,d)5B, e,f)10B ve g,h)15B

Şekil 4.49'a göre saf A7075 matrisli (Saf-A) numunenin aşınma yüzeylerinde (a,b), belirgin ve uzun aşınma izleri ile çizikler ve aşınma kalıntıları görülmektedir. Bu morfoloji, esas olarak yüzeyden kopan veya karşı diskten transfer olan küçük, sert partiküllerin abrasif aşınma mekanizmasını göstermektedir. Ayrıca gözenekli veya zayıf arayüzey bağına sahip malzemelerde baskın hale gelen delaminasyon aşınması ve gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Saf alüminyum gibi sünek metallerde, sürtünme sırasında iki yüzey arasında lokal mikro kaynaklanmalar meydana gelir. Bu kaynak noktaları koparken malzeme transferi ve yüzeyden ince tabakaların kopması (delaminasyon) görülür. Bu bakımdan delaminasyon aşınması ayrıca adhezif aşınmaya işaret etmekte olup bu aşınmanın varlığı EDS analizi ile teyit edilecektir. Sonuç olarak saf matrisli alüminyum kompozitin aşınma yüzeyi genel olarak tüm aşındırıcı mekanizmaları barındırmaktadır.

Ağırlıkça %5 B₄C takviyeli (5B) (Şekil 4.49.c ve d) aşınma yüzeyleri incelendiğinde Saf-A'ya kıyasla, aşınma çizikleri, aşınma kalıntıları ve delaminasyon hala mevcuttur hatta aşınma kalıntısı daha fazladır. Özellikle aşınma kalıntısının fazla oluşu, aşınma testlerinde en düşük kütle kaybına sahip olan 5B numunesinin aşınma direnci verileri ile değerlendirildiğinde yüzeyi koruyucu bir tribo tabakanın varlığını kuvvetlendirmektedir. Ek olarak yüzeyde B₄C'nin varlığını teyit eden siyah noktalar mevcuttur ve bu noktaların etrafının nispeten çizik ve kalıntılardan temiz oluşu yüzeyi koruduğu izlenimini oluşturmaktadır. Nitekim matris ile uyumlu (optimum takviyeli) B₄C partiküllerinin alüminyum matrisi, karşı diskin çizmesi ve oymasına karşı koruduğu (Tjong ve Ma, 2000) rapor edilmiştir.

Ağırlıkça %10 B₄C takviyeli (10B) numunenin aşınma yüzeylerinde (Şekil 4.49.e ve f) ise Saf-A ve 5B kodlu numunelerden daha belirgin aşınma çizikleri ve yer yer aşınma artığı görülmektedir. Bu morfoloji, malzemenin abrasif aşınmaya maruz kaldığını göstermekte ve kütle kaybının yüksek olmasının ardındaki önemli bir mekanizmayı ortaya koymaktadır. Ayrıca delaminasyon ve gözenek oluşumları dikkat çekmekte ve 5B numunesine kıyasla daha gözenekli ve bütünlüğünü daha az muhafaza edebilen bir yapı gözlenmektedir. Ek olarak 5B numunesine kıyasla daha çok noktada B₄C izlerine rastlanmaktadır. Genel olarak bu morfoloji, aşınma testleri de dikkate alındığında kütle kaybının ardında yatan mekanizmanın üçüncü-cisim abrasif aşınması olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi ise literatürde yüksek (ağ.%10) B₄C oranı nedeniyle zayıflayan matris/takviye arayüzey bağına bağlanmaktadır. Aşınma sırasındaki gerilmeler altında, yüzeye yeterince tutunamayan B₄C partikülleri kolayca matristen

sökülebilir. Sökülen bu sert partiküller, iki yüzey arasına sıkışarak birer zımpara tanesi gibi davranır ve yüzeyi çok daha şiddetli bir şekilde aşındırır (Lee ve ark., 2020).

Ağırlıkça %15 B₄C takviyeli (15B) numunelerin aşınma yüzeyleri (Şekil 4.49.g ve h) incelendiğinde ise ilgili yüzeyin daha büyük ölçekli oyulma ve delaminasyon (katman soyulması) mekanizmalarına maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, yüzeyde yanıltıcı bir temizlik görüntüsü oluşturabilir ama aşınma artık küçük döküntüler halinde yüzeye sıvanmak yerine, büyük parçalar halinde koparak sistemden uzaklaşmaktadır. Aşınma testlerinde ölçülen ve bu gruptaki en yüksek kütle kaybı (101,67 mg) da bu temiz görünen yüzeyin aslında en fazla hasara uğradığının nihai kanıtıdır.

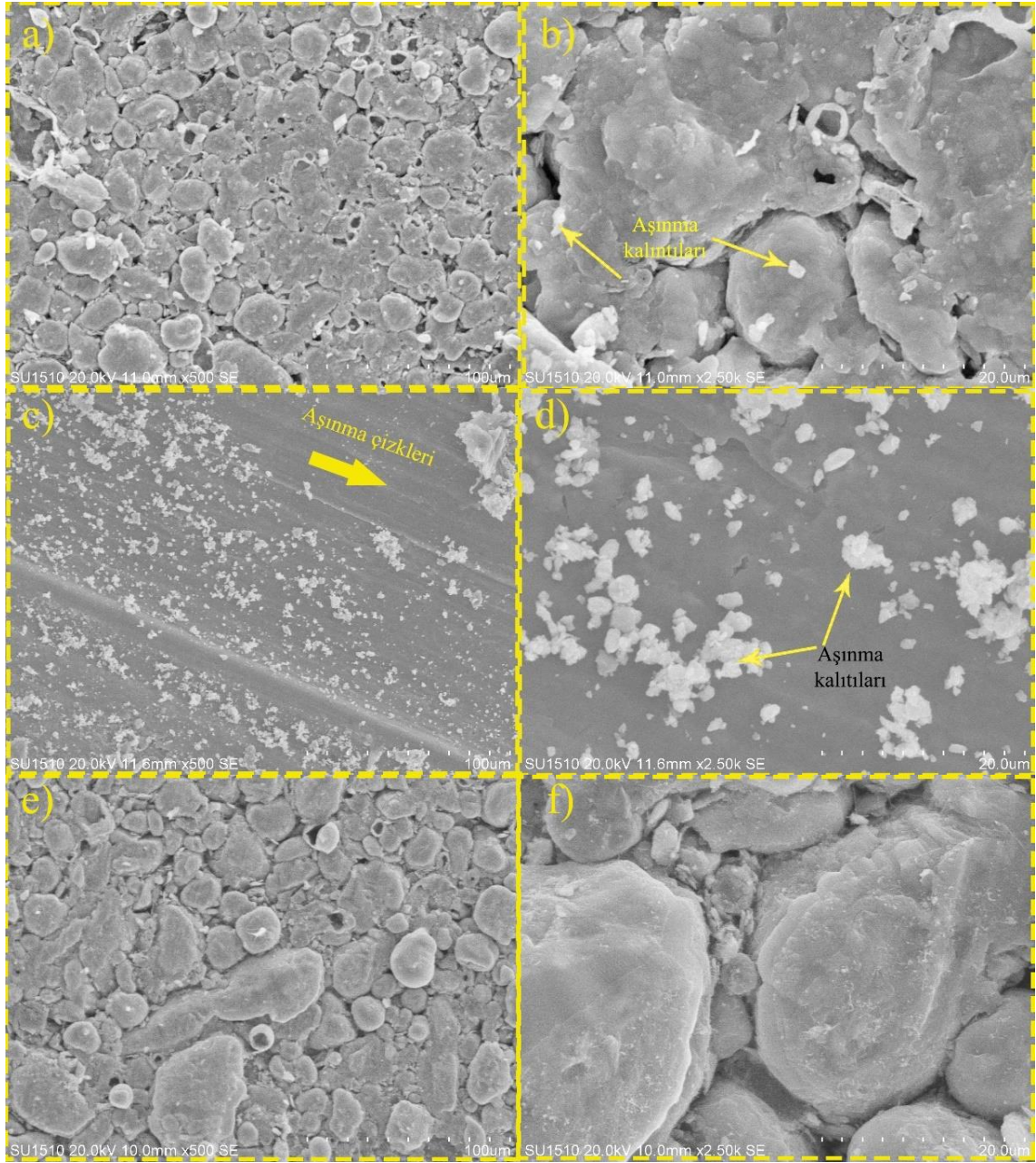
AA7075 matrise ağ. %1, %3 ve %5 oranlarında Ti₃C₂T_x MXene takviyeli kompozit malzemelerin aşınma testleri sonrası yüzey morfolojileri Şekil 4.50'de verilmiştir. Bu SEM görüntüleri, aşınma testlerinde MXene oranına bağlı olarak aşınma direncinde önce bir artış, ardından takviyenin artışı ile düşüş gösteren sayısal verileri desteklemek için analiz edilmiştir.

En düşük kütle kaybına sahip A-1X numunesinin yüzeyi (Şekil 4.50.a ve b), diğerlerine (Saf-A ve B₄C katkılı numuneler) kıyasla dikkat çekici derecede aşınma çizikleri ve kalıntıları barındırmayan bir görünüm sergilemekte ve koruyucu bir tabaka ile kaplı izlenimi oluşturmaktadır. Bu morfoloji, MXene'nin bu oranda yüzeyde kararlı bir katı yağlayıcı film oluşturarak kompoziti başarıyla koruduğunun kanıtıdır ilerleyen kısımda ayrıca incelenen EDS analizleri de bu öngörüğü doğrulamaktadır.

Buna karşın, MXene oranı ağ. %3'e çıktığında bu koruyucu tabaka ortadan kalkmaktadır. A-3X yüzeyi (Şekil 4.50.c ve d); aşınma çizikleri ve aşınma kalıntıları ile kaplanmakta ve abrazif aşınma mekanizmasının izlerini taşımaktadır. Ayrıca aşınma kalıntıları önceki B₄C takviyeli kompozitlerden farklı olarak beyaz bir görünüm sergilemekte ve MXene'nin oksitlenmesi ile oluşan aşınma artıkları olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak MXene takviyesi ağ. %1'den ağ. %3'e çıktığında yağlayıcı etkinin ortadan kalkarak aşınma mekanizmalarının devreye girmeye başladığı anlaşılmıştır.

MXene oranı ağ. %5'e çıktığında (e ve f) ise tıpkı A-1X numunesinde olduğu gibi yüzeyde aşınma mekanizmalarının varlığını gösteren aşınma çizgisi, aşınma artığı, delaminasyon veya tribo tabaka gibi işaretlere rastlanılmamaktadır. Ancak genel olarak iri ve aglomere olmuş aşırı gözenekli bir yapı görülmektedir. Bu durum aşınma testlerinde belirlenen yüksek kütle kaybı ile değerlendirildiğinde, bu aglomere parçaların

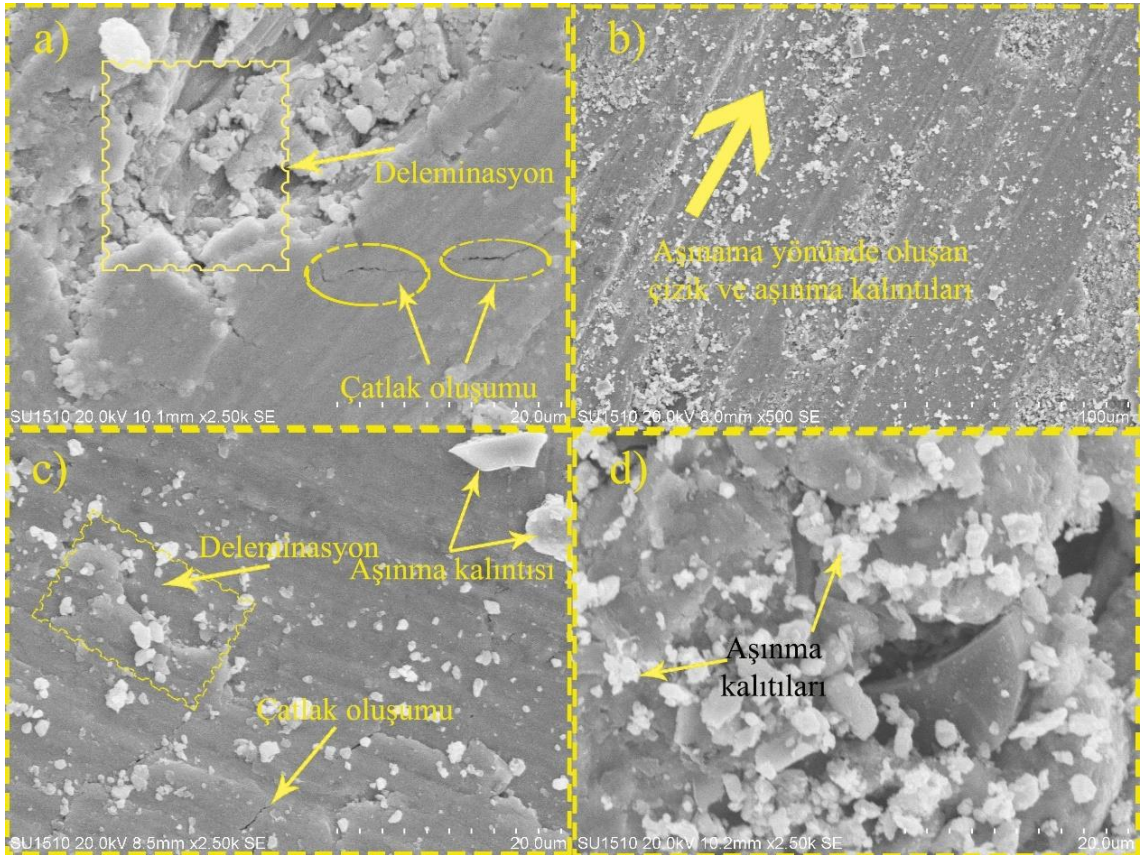
bütün şekilde yüzeyden koptuğunu bunun sebebinin ise matris takviye arayüzey bağının zayıf olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.50. Aşınma yüzeylerinin MXene ilavesi ile değişen 500 X ve 2,5 kX büyütmeli SEM görüntüleri a,b)A-1X, c,d)A-3X ve e,f)A-5X

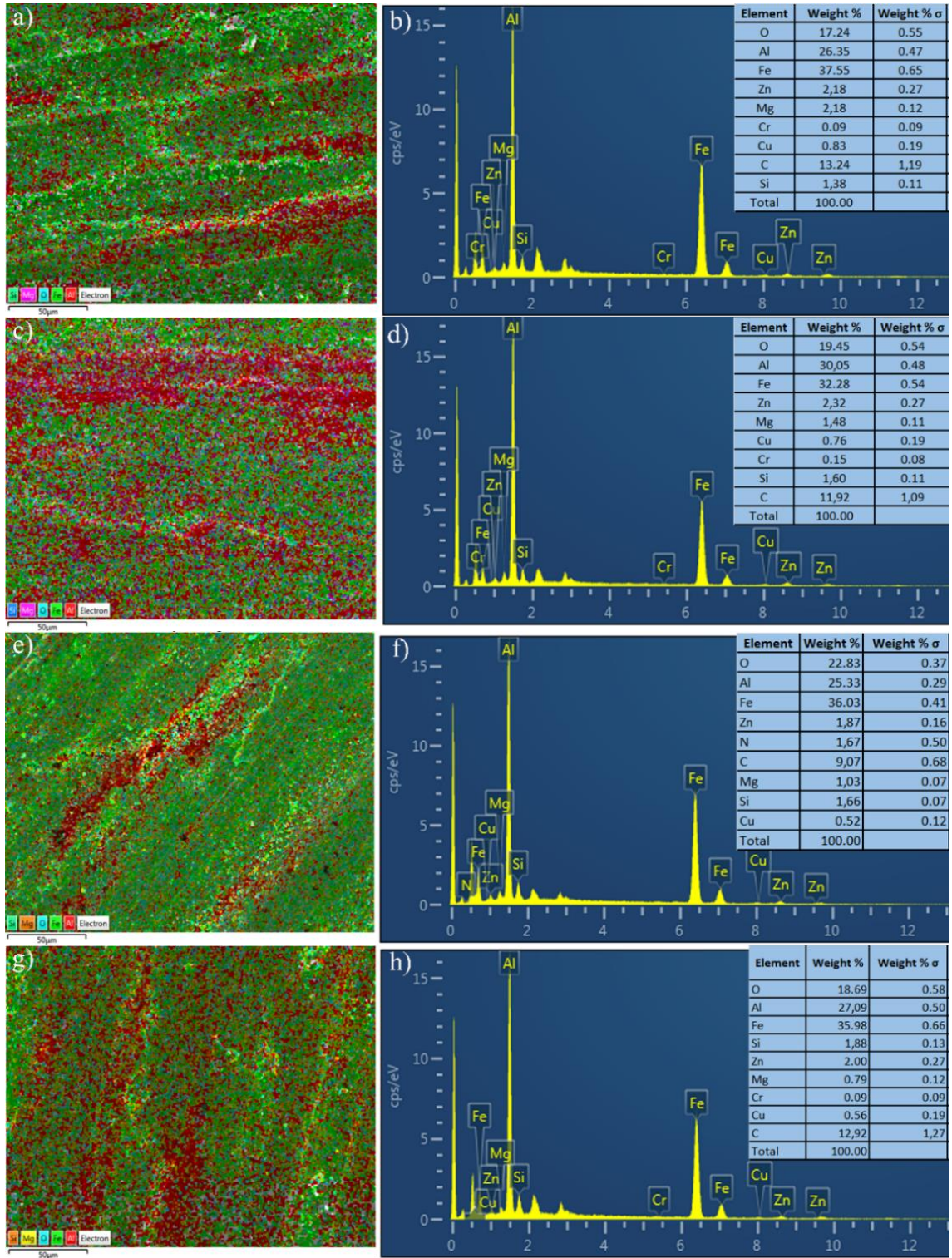
AA7075 matrise B₄C ve MXene hibrit takviyeli kompozit malzemelerin aşınma testleri sonrası yüzey morfolojileri Şekil 4.51'de verilmiştir. Şekilde verilen SEM analizlerinde; 5B-1X (ağ.%5 B₄C + ağ.%1 Ti₃C₂T_x MXene), 5B-3X (ağ.%5 B₄C + ağ.%3 Ti₃C₂T_x MXene), 5B-5X (ağ.%5 B₄C + ağ.%5 Ti₃C₂T_x MXene) ve 15B-3X (ağ.%15 B₄C + ağ.%3 Ti₃C₂T_x MXene) hibrit kompozitleri incelenmiştir. Verilen görseller genel olarak incelendiğinde belirgin şekilde delaminasyon, çatlak oluşumu, aşınma çizikleri,

aşınma kalıntıları gözlenmekte ve hemen hemen tümünde aşınmayı artırıcı tüm mekanizmalar yer almaktadır. Bu durum aşırı takviye nedeniyle önceki testlerde de anlaşıldığı üzere matris/takviye arayüzeyinin oldukça zayıfladığını bu zayıflama neticesinde yüzeye tutunamayan sert parçacıkların hem yüzeyi daha fazla aşındırdığını hem de yüzeyin artık bütünlüğünü koruyamayarak bütün parçalar şeklinde döküldüğünü göstermektedir. Bu tahribat en yüksek takviye oranına sahip 15B-3X numunesinde (d) en üst seviyeye çıkarak yüzeydeki yapısal bütünlüğün kaybolduğu, döküntülerin hâkim olduğu bir görünüm sergilemiştir. Bu durum aşınma testlerinde elde edilen yüksek kütle kayıplarını doğrulamaktadır.



Şekil 4.51. Aşınma yüzeylerinin B₄C ve MXene ilavesi ile değişen 100 X 500 X ve 2,5 kX büyütmeli SEM görüntüleri a)5B-1X, b)5B-3X, c)5B-5X ve d)15B-3X

Takviyesiz AA7075 matrisli ve ağı. %5, %10 ve %15 oranlarında bor karbür (B₄C) takviyeli kompozit malzemelerin aşınma testleri sonrası yüzeylerinin EDS analizi Şekil 4.52'de verilmiştir. EDS analizleri, artan B₄C takviyesinin aşınma yüzeyinin yapısını nasıl değiştirdiğini ortaya koymakta ve daha önce analiz ettiğimiz kütle kaybı verileri ile SEM görüntülerindeki morfolojik bulguları kimyasal olarak doğrulamaktadır.



Şekil 4.52. Aşınma yüzeylerinin B₄C ilavesi ile değişen EDS analizi a,b)Saf-A, c,d)5B, e,f)10B ve g,h)15B

Şekil 4.52'ye göre tüm numunelerin (a'dan h'ye) EDS spektrumlarındaki en çarpıcı ortak bulgu, yüzeyde A7075 alaşımının kendi elementleri (Al, Zn, Mg, Cu) dışında, çok yüksek oranlarda demir (Fe) ve oksijen (O) bulunmasıdır. %32 ile %38 arasında değişen demirin varlığı, kuru pin-on disk aşınma testi sırasında disk olarak

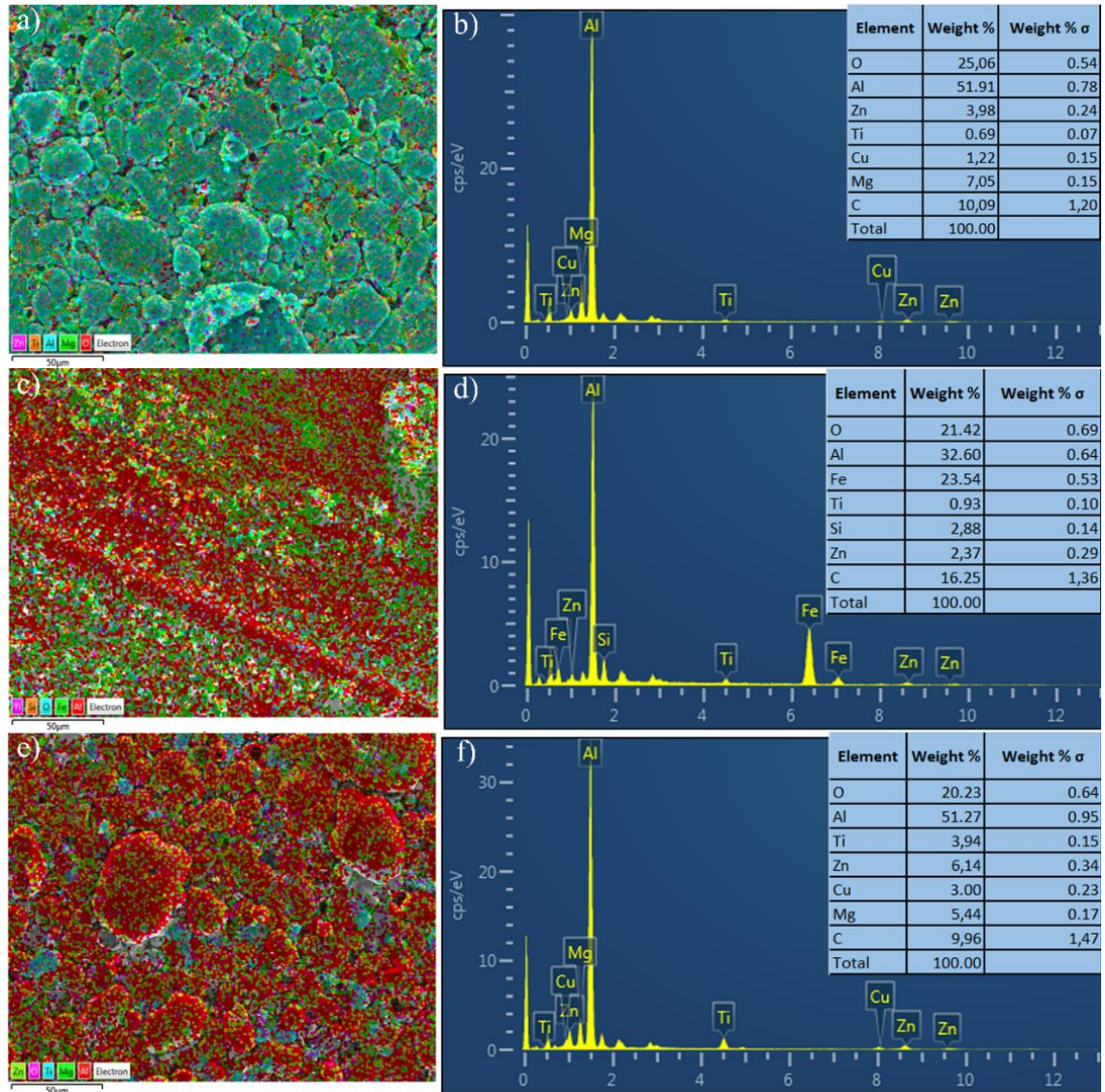
kullanılan çelik parçadan kompozit yüzeyine yoğun bir malzeme transferi olduğunu kesin olarak kanıtlar. Bu, adhezif aşınma mekanizmasının tüm testlerde aktif olduğunu bir göstergesidir. %17 ile %23 arasında değişen oksijenin varlığı ise, sürtünme ısısının etkisiyle yüzeyde şiddetli bir oksidasyon meydana geldiğini doğrular. Bu durum tüm numunelerin yüzeyinde, literatürde mekanik olarak karışmış tabaka (MML-tribo tabaka) olarak adlandırılan, ana malzeme döküntüleri, karşı diskten transfer olan malzeme ve ortamdaki oksijenin reaksiyonuyla oluşan oksitlerin bir karışımından oluşan yeni bir katmanın oluştuğu kimyasal olarak kanıtlanmıştır. MML'nin kalitesi ve kararlılığı, numunelerin aşınma performansındaki farkı meydana getiren ana faktördür. En düşük kütle kaybına (27,9 mg) sahip olan 5B (c,d) numunesinin EDS spektrumunda, en yüksek oksijen oranlarından birinin (%19,45) ölçülmesi kritik bir bulgudur. 5B numunesinin yüzeyinde son derece kararlı, yoğun ve koruyucu bir oksitli tribo-tabaka oluşturabildiğini gösterir. Bu seramik benzeri, sert oksit tabakası, alttaki malzemeyi koruyarak aşınmayı en aza indirir (Idusuyi ve Olayinka, 2019). Ayrıca SEM görüntülerinde gözlemlediğimiz üçüncü-cisim aşınması mekanizması matrinden sökülen B₄C parçacıkları ile MML tabakası oluşurken onu sürekli olarak bozar, parçalar ve yeniden karıştırır. Bu yıkıcı etki, kararlı ve sürekli bir koruyucu tabakanın oluşmasını engeller (Deuis ve ark., 1996).

AA7075 matrise ağ. %1, %3 ve %5 oranlarında Ti₃C₂T_x MXene takviyeli kompozit malzemelerin aşınma testleri sonrası yüzeylerinin EDS analizleri Şekil 4.53'te verilmiştir. En yüksek aşınma dayanımı gösteren A-1X numunesinin EDS spektrumu (b), iki kritik bulgu sunar: Birincisi, yüzeydeki çok yüksek oksijen oranıdır (%25,06). Bu durum, MXene'nin sürtünme ısısıyla dönüşerek oluşturduğu, son derece kararlı ve seramik benzeri oksitli bir tribo tabakanın varlığına kimyasal kanıttır. İkincisi ise, spektrumda demir bulunmamasıdır. Bu, koruyucu tabakanın çelik karşı disk ile doğrudan teması ve yapışkan (adhezif) aşınmayı tamamen engellediğini ispatlar.

Buna karşılık, aşınma dayanımı düşen A-3X numunesinin spektrumunda (d), %23,54 gibi çok yüksek bir oranda demir tespit edilmesi, koruyucu filmin artık işlevini yitirdiğini ve şiddetli adhezif aşınmanın başladığının kesin bir göstergesidir.

Son olarak, bu grupta en düşük aşınma dayanımını gösteren A-5X numunesinin EDS analizi (e ve f) incelendiğinde, yüzeyde tıpkı A-1X numunesinde olduğu gibi demir olmaması önemli bir bulgudur. Bu durum bu numunede de adhezif aşınmanın olmadığını gösterir aynı zamanda ilgili yüzeyde aşınma izleri (EDS haritasında bir yönelim söz konusu değil) ve aşınma artığının da olmadığını göz önüne alırsak bu yüzeyde gerçekleşen kütle kaybının kütsel ayrılmalar şeklinde olduğu çıkarımına varmamızı

sağlar. Bu durum ise matris-takviye arayüzey bağının son derece zayıf olduğunu ve A7075 matrise ağı. %5 $Ti_3C_2T_X$ takviyesinin olumsuz etkisini gösterir.

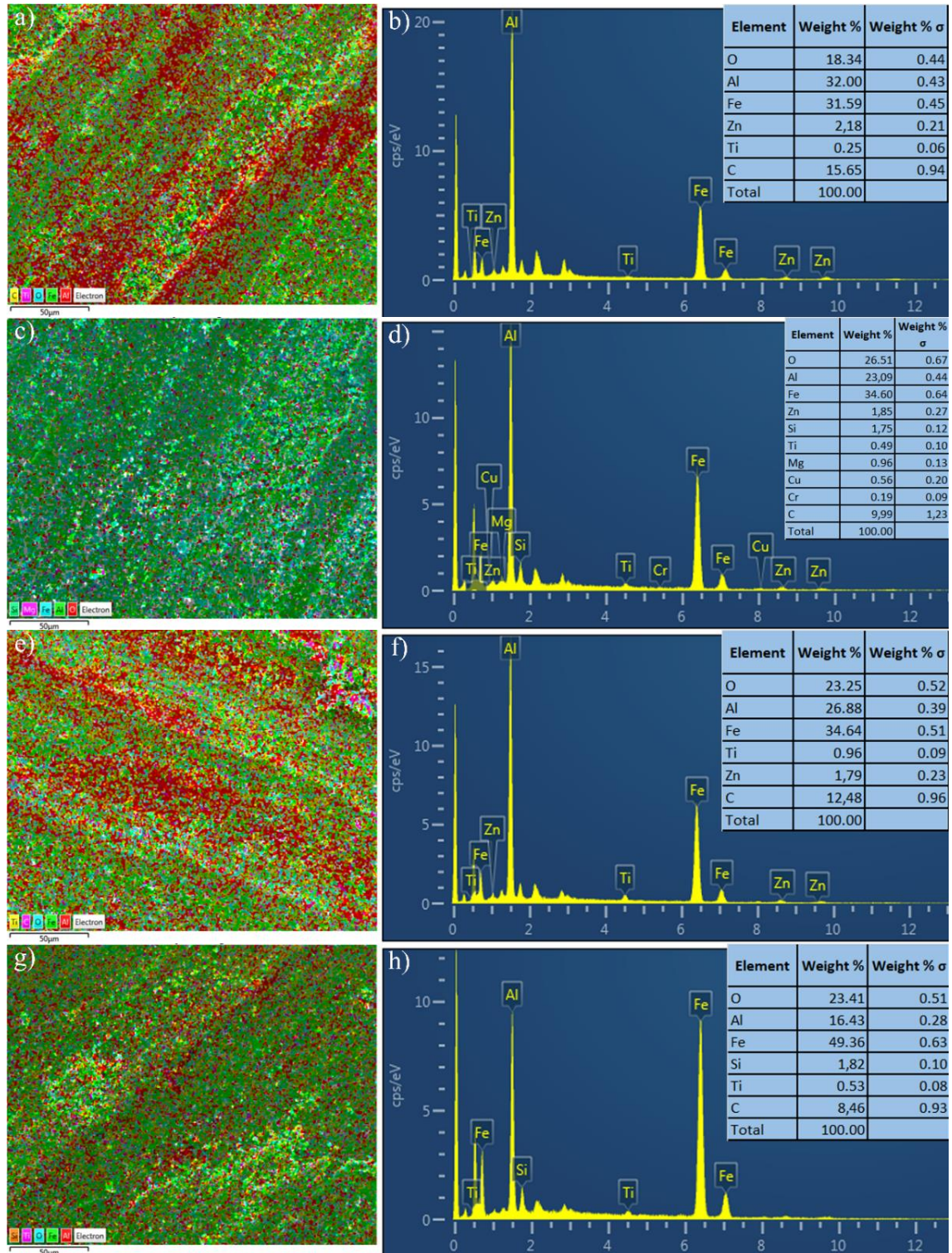


Şekil 4.53. Aşınma yüzeylerinin MXene ilavesi ile değişen EDS analizi a,b) A-1X, c,d) A-3X ve e,f) A-5X

Hibrit takviyeli kompozitlerin aşınma testleri sonrasında aşınma yüzeylerinin EDS analizleri ve kimyasal yapısı Şekil 4.54'te verilmiştir.

Tüm hibrit numunelerin aşınma yüzeylerinde istisnasız bir şekilde çok yüksek oranlarda demir ve oksijen tespit edilmiştir. Yüzeydeki demir oranının %31'den başlayıp %49'a kadar çıkması, koruyucu mekanizmaların tamamen başarısız olduğunu ve çelik karşı disk ile kompozit arasında şiddetli bir yapışma (adhezyon) ve malzeme transferi yaşandığını kesin olarak kanıtlar. Yüksek oksijen oranları ise bu yıkıcı etkileşim sırasında yüksek sürtünme ısısının oluştuğunu ve yoğun bir oksidasyonun gerçekleştiğini doğrular.

Ayrıca EDS haritalarında aşınma izlerinin (renklerin belli bir yönde yönelimi) ve aşınma kalıntılarının (yer yer renk yoğunlukları) varlığı tüm numunelerde görülmektedir.



Şekil 4.54. Aşınma yüzeylerinin B₄C ve MXene ilavesi ile değişen EDS analizleri a,b)5B-1X, c,d)5B-3X, e,f)5B-5X ve g,h)15B-3X

En düşük aşınma dayanımını göstererek en yüksek kütle kaybına maruz kalan 15B-3X numunesinin yüzey kimyası (h), takviye miktarı artmasına rağmen aşınma dayanımındaki düşüşü en net şekilde göstermektedir. Yüzeyin neredeyse yarısı (%49,36) karşı diskten transfer olan demirden oluşurken, orijinal matris metali olan alüminyumun oranı %16,43'e kadar düşmüştür. Bu, aşınma yüzeyinin artık orijinal bir kompozit olmaktan çıkıp, kendi takviyeleri tarafından parçalanan ve karşı diskin malzemesiyle kaplanan, kararsız bir tribo tabaka haline geldiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın aşınma analizlerinden elde edilen en temel sonuç B_4C ve/veya $Ti_3C_2T_x$ MXene takviyeleri optimum oranda kullanıldığında yüzeyi koruyan birer kalkan veya katı yağlayıcı görevi üstlenirken optimum eşik aşıldığında veya hibrit sistemlerde bir araya geldiklerinde, üretim zorluklarının zayıflatıldığı arayüzeylerden koparak sert bir zımpara gibi yıkıcı üçüncü-cisim aşındırıcılarına dönüşmesidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ve farklı üretim parametreleri kullanılarak, A7075 alüminyum matrisli, B₄C ve MXene takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş hibrit kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiş; proses-yapı-özellik ilişkileri sistematik olarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen temel bulgular ve önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- Basma testleri ve Taguchi analizleri, hibrit kompozitlerin basma dayanımının üretim parametreleri ile hassas bir şekilde kontrol edilebildiğini nicel olarak kanıtlamıştır. Optimizasyon çalışmalarında, 340 MPa basma dayanımına ve 107 J/cm³ tokluğa ulaşılmıştır. İstatistiksel optimizasyonla en yüksek basma dayanımı için ideal koşulların 3 saat mekanik alaşımlama, 3 katman, 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saat sinterleme süresi ve 590°C sinterleme sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Taguchi analizi ile basma dayanımı üzerinde en etkili faktörlerin sıkıştırma basıncı (%29) ve mekanik alaşımlama süresi (%27) olduğunu tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek basma dayanımına ulaşmanın öncelikle malzemenin yoğunluğunu artıran sıkıştırma basıncına, ardından da mikroyapıyı düzenleyerek içsel dayanımı artıran etkin bir mekanik alaşımlama sürecine dayandığını doğrulamaktadır.
- Ağırlıkça %3 oranında Ti₃C₂T_x MXene takviyesinin (3K-3X), MXene içermeyen referans numuneye (3K-0X) kıyasla basma dayanımı 305 MPa'dan 421 MPa'a, birim şekil değişimi ise %15'ten %35'e çıkmıştır. Ayrıca hem dayanım hem de süneklikte aynı andaki artış malzemenin tokluğunu da artırmış ve 3K-3X numunesinin tokluğu (97 J/cm³) referans numunesinin yaklaşık üç katına ulaşmıştır. Bu durumun ardındaki temel mekanizma ise MXene'nin, malzemenin deformasyon karakterini değiştirmesidir. Düşük oranlardaki MXene, başlangıçtaki elastisite modülünü düşürerek malzemeye yumuşak bir başlangıç yaptırmış ardından güçlü bir pekleşme kabiliyeti kazandırarak, dayanıklı ve tok bir yapıya dönüştürmüştür. Bu etki ağı. %3 MXene oranında zirveye ulaşmış, ağı. %5'e çıkıldığında ise optimum seviyenin aşıldığı anlaşılmıştır.
- Sertlik ölçümleri ve Taguchi analizleri, üretimi yapılan kompozitlerin yüzey özelliklerinin de üretim parametreleriyle etkin bir şekilde şekillendirilebildiğini ortaya koymuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda, 170 HB sertlik değerine ulaşılmıştır. Sertliği artırmak için en ideal üretim reçetesinin; 3 saat mekanik

alaşımlama, 3 katman, 400 MPa sıkıştırma basıncı, 2 saat sinterleme süresi ve 550°C sinterleme sıcaklığı olduğunu belirlenmiştir. Taguchi analizi, sertlik üzerinde en baskın faktörün mekanik alaşımlama süresi (%34) olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, malzemenin yüzey sertliğinin, öncelikle nanokristal bir yapı oluşturarak ve sert B₄C partiküllerini homojen dağıtarak elde edilen mikroyapısal inceliğe dayandığını doğrulamaktadır. Basma dayanımının optimizasyonundan farklı olarak, en yüksek sertliğe daha düşük bir sıcaklık ve sürede (550°C, 2 saat) ulaşılması, tane büyümesini sınırlandırarak bilyeli öğütülmüş mikroyapıyı korumanın kritik önemini göstermektedir.

- Ti₃C₂T_x MXene takviyesi, malzemenin genel sertliğini artırmaktan ziyade, içsel homojenliğini temelden değiştiren karmaşık bir sonuç doğurmuştur. MXene oranı arttıkça, numunelerin sıkıştırma anında yüksek basınç gören dış kabuklarındaki (uç bölgeler) sertlik değerleri korunmuş veya artmışken, merkez bölgelerindeki sertlikte ise düşüş gözlemlenmiştir. Bu etki, ağ. %3 ve ağ. %5 gibi yüksek oranlarda o kadar baskın hale gelmiştir ki, farklı katman tasarımlarına sahip tüm numunelerin merkez sertlikleri, 65±5 HB gibi ortak ve düşük bir değerde birleşmiştir. Bu durumun temel nedeni, hibrit takviyenin (B₄C+MXene) toz metalurjisi prosesini (sıkıştırmayı ve sinterlemeyi) zorlaştırarak merkezde yüksek gözenekli ve zayıf bir yapı oluşturmasıdır. Sonuç olarak, MXene takviyesi, hibrit takviyeli kompozitlerde homojen bir sertlik artışı sağlamak yerine, proses kaynaklı heterojenliği artırarak çok sert bir kabuğa ancak mekanik olarak zayıf bir çekirdeğe sahip, yapısal bütünlüğü sorunlu malzemeler üretmiştir.
- Sinterlenmiş yoğunluk analizleri ve Taguchi optimizasyonu, hibrit kompozitlerin fiziksel bütünlüğünü belirleyen temel parametreleri ortaya koymuştur. Deneysel çalışmalar neticesinde, teorik yoğunluğa oldukça yakın olan 2.69 g/cm³ gibi yüksek bir sinterlenmiş yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Taguchi analizi ile en yüksek yoğunluğa ulaşmak için en ideal parametrelerin; 3 saat mekanik alaşımlama, 3 katman, 500 MPa sıkıştırma basıncı, 3 saat sinterleme süresi ve 550°C sinterleme sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Taguchi analizi, yoğunluk üzerinde en etkili faktörün, mekanik alaşımlama süresi (%24) olduğunu, bunu %21 ile sıkıştırma basıncının takip ettiğini göstermiştir. Uzun MA süresi tozun sinterleme kabiliyetini artırırken, optimum çıkan en düşük seviye sinterleme sıcaklığı (550°C), A7075 alaşımında daha yüksek sıcaklıklarda oluşabilecek ve yoğunluğu düşürebilecek kontrolsüz sıvı faz sinterlemesi risklerinden kaçınarak, kararlı bir katı hal sinterlemesinin önemini vurgulamaktadır.

- Yeşil yoğunluk verileri, B₄C ve MXene gibi hibrit takviyelerin tozların homojen bir şekilde sıkıştırılmasını zorlaştırdığını ortaya koymuştur. Buna karşın, sinterlenmiş yoğunluk değerlerinin genel olarak MXene katkısıyla artması, MXene'nin sıvı faz sinterlemesini teşvik ederek sıkıştırma sorunlarının üstesinden gelmeye yardımcı olduğunu ve daha yoğun, daha az gözenekli bir nihai ürün elde edilmesini sağladığını göstermiştir.
- Aşınma testleri ve Taguchi optimizasyonu, kompozitlerin tribolojik performansı üzerinde en belirleyici etkenin uygulanan yük olduğunu ortaya koymuştur. Aşınma testlerinde ağ. %5 B₄C takviyesinin tribo tabaka oluşumunu teşvik ederek kütle kaybını azalttığı, B₄C oranı artmaya devam ettiğinde ise abrazif aşınma (üçüncü cisim aşınması) mekanizmalarının devreye girdiği anlaşılmıştır. Ağırlıkça %1 Ti₃C₂T_x MXene takviyesinin ise yüzeyde yine bir tribo tabaka oluşturduğu ve yağlayıcı etki göstererek adhezif (yapışma) aşınmayı önlediği anlaşılmıştır. Ancak yine bu oran aşıldığında adhezif aşınma ve abrazif aşınma mekanizmalarının devreye girerek kütle kaybının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca B₄C ve MXene takviyelerinin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerde ise aşınma mekanizmalarının daha şiddetli olduğu ve kütle kaybının dahada arttığı belirlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak ise SEM analizlerinde abrazif aşınmayı gösteren aşınma çizikleri ve aşınma artıkları, delaminasyon, çatlak oluşumu gibi gözlemler yapılmıştır. Ayrıca EDS analizlerinde yüksek oranda oksijen ve demirin varlığı ile adhezif aşınmanın varlığı teyit edilmiştir.
- XRD analizleri sonucunda hem A7075 hem de B₄C tozlarının yüksek kristal yapıya ve düşük iç gerilime sahip olduğu belirlenmiş, bilyeli öğütme sonrası B₄C fazının yapıda kararlı şekilde korunduğu, Al matrisinde ise belirgin bir faz dönüşümünün gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, öğütme süresine bağlı olarak bazı piklerde oluşan genişlemeler, yapıda sınırlı düzeyde mikroyapısal gerilme oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca ticari Ti₃AlC₂ MAX fazında ana fazın yanı sıra bir miktar TiC safsızlığı içerdiği tespit edilmiştir. MXene sentezi sonrası yapılan analizde ise, Ti₃AlC₂'nin karakteristik (104) pikinin (39°) tamamen kaybolması ve en önemlisi (002) pikinin 9.5°'den 6-7° aralığına kayması, Al katmanlarının başarılı bir şekilde sökülerek katmanlar arası mesafenin arttığını ve Ti₃C₂T_x MXene fazının başarıyla sentezlendiğini kanıtlamıştır.
- Parçacık boyut analizleri, MA'nın ilk 2 saatinde soğuk kaynak mekanizmasının baskınlığıyla ortalama parçacık boyutu 300 µm'nin üzerine çıktığını göstermiştir. 3

saatlik öğütme sonunda pekleşme ve kırılma mekanizmalarının devreye girmesiyle ortalama boyut $125\ \mu\text{m}$ 'ye düşmüştür. Buna ek olarak, kimyasal yöntemle sentezlenen MXene fazının ortalama $0,93\ \mu\text{m}$ 'lik yanal bir boyutta başarıyla üretildiği belirlenmiştir.

- SEM analizleri, işlemsiz A7075 (küresel geometri) ve B₄C (köşeli geometri) tozlarının, mekanik alaşımlama süreciyle morfolojik değişimini ortaya koymuştur. Ti₃AlC₂ MAX fazından Ti₃C₂T_x MXene sentezi, katmanlı yapının akordeon benzeri bir morfolojiye dönüşümüyle kanıtlanmıştır. Ayrıca MXene takviyesinin kompozit tozlara eklenmesiyle partiküller arası soğuk kaynağın engellenerek morfolojinin değiştiği tespit edilmiştir.
- Sıkıştırılıp sinterlenmiş hibrit kompozitlerin enine kesitlerinin BSE-SEM görüntüleri, farklı B₄C oranlarına sahip katmanların, arada belirgin bir ayrılma olmaksızın, başarılı bir şekilde birleştirildiğini göstermiştir. Bu incelemeler, her bir katman içindeki B₄C dağılımının homojenliğini ve artan takviye oranıyla gözenekliliğin artması gibi prosesin temel zorluklarını da gözler önüne sermiştir.
- EDS analizleri, mekanik alaşımlama ile homojen bir karışım elde edildiğini görsel olarak kanıtlamıştır. Sinterlenmiş FGM numunelerinin bölgesel analizlerinde ise, numunenin merkez bölgesinin saf A7075 alaşım elementlerini (Al, Zn, Mg, Cu) içerdiği, kenar bölgelere doğru gidildikçe ise karbon (C) sinyalinin belirgin bir şekilde artması, B₄C takviyesinin hedeflendiği gibi dış katmanlarda yoğunlaştığını kimyasal olarak teyit etmiştir.
- Aşınma sonrası EDS analizleri, SEM'de gözlemlenen morfolojik yapıların kimyasal kimliğini ortaya koyarak mekanizmalara dair nihai kanıtları sunmuştur. Tüm aşınma yüzeylerinde yüksek oranda oksijen (O) ve çoğu durumda demir (Fe) tespit edilmesi, sürtünme sırasında oksidasyonun ve çelik karşı diskten malzeme transferinin (adhezif aşınma) gerçekleştiği bir tribo tabaka oluşumunu doğrulamıştır. Bu tabakanın koruyuculuğu ise numuneden numuneye değişmiştir. En yüksek aşınma dayanımı gösteren A1X numunesinin yüzeyinde hiç demir tespit edilmemesi, oluşan oksitli tribo-filmin yapışmayı tamamen engellediğini kanıtlamıştır. Buna karşılık, yüksek aşınma gösteren tüm hibrit ve aşırı takviyeli numunelerde, demir oranının %30'ları aşması ve hatta %49'a ulaşması, koruyucu bir tabakanın oluşmadığını ve yüzeyin hem üçüncü cisim aşınmasına hem de şiddetli adhezif aşınmaya aynı anda maruz kaldığını kimyasal olarak ispatlamıştır.

5.2. Öneriler

Yapılan kapsamlı mikroyapısal, mekanik ve istatistiksel analizler sonucunda, A7075/B₄C/MXene esaslı fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin üretim prosesini optimize etmek ve gelecekteki çalışmalara yön vermek amacıyla bir dizi öneri geliştirilmiştir. Bu öneriler, hedeflenen nihai özelliğe göre proses optimizasyonu ve ileri araştırma konuları olarak aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- FGM yapısının, sert dış katmanlar ile sünek bir çekirdeği birleştirerek hem basma dayanımını hem de özellikle tokluğu artırmada son derece etkili olduğu kanıtlanmıştır. Ancak, test ve analizler toz metalurjisi prosesinde seramik takviye oranı arttıkça (ağ. %5'ten %15'e çıkıldığında), porozite miktarının da belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Bu nedenle, FGM yapısının avantajlarından faydalanırken porozite sorununu en aza indirmek için daha düşük takviye oranlarına sahip yeni bir FGM tasarımı araştırılabilir. Örneğin, ağ. %0-%5-%10-%15'lik bir geçiş yerine, ağ. %0-%2,5-%5-%7,5 gibi daha dar bir gradyana sahip bir FGM üretilmesi denenebilir.
- Sıvı faz sinterlemesinin yoğunluk, basma dayanımı ve sertlik üzerinde kritik bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Farklı sinterleme sıcaklıkları ve süreleri ile arayüzey bağlarını artıran ancak tane büyümesi gibi olumsuzluklara yol açmayan optimum bir sinterleme döngüsü için çalışılabilir.
- Tek eksenli preslemedeki basınç dağılımı sorununu çözmek için sıcak izostatik presleme veya izostatik presleme gibi yöntemler ile FGM yapısı araştırılabilir.
- Gelecekteki A7075 matrisli kompozitlerde, %10'dan fazla B₄C veya %1'ten fazla MXene içeren veya bu ikisini bir arada bulunduran hibrit yapılar yerine daha düşük takviye oranlarının ince ayarı üzerine odaklanılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Abdullah, Y. ve Kamarudin, N., 2012, Al/B₄C composites with 5 and 10 wt% reinforcement content prepared by powder metallurgy, *Journal of Nuclear and related Technologies*, 9 (01), 43-48.
- Abenojar, J., Velasco, F. ve Martinez, M., 2007, Optimization of processing parameters for the Al+ 10% B₄C system obtained by mechanical alloying, *Journal of Materials Processing Technology*, 184 (1-3), 441-446.
- Ajithkumar, J. ve Xavior, M. A., 2022, Mechanical, microstructural and electrical properties of Al7075/SiC based hybrid composites with nano B₄C, Graphene and CNT reinforcements, *Journal of Physics: Conference Series*, 012049.
- Akçamlı, N. ve Şenyurt, B., 2021, B₄C particulate-reinforced Al-8.5 wt% Si-3.5 wt% Cu matrix composites: powder metallurgical fabrication, age hardening, and characterization, *Ceramics International*, 47 (5), 6813-6826.
- Al-Qureshi, H., Galiotto, A. ve Klein, A., 2005, On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy, *Journal of Materials Processing Technology*, 166 (1), 135-143.
- Al Njjar, A., Mazloun, K. ve Sata, A., 2024, Optimization of powder metallurgy parameters for improving the major properties of AA7075/SiC composites for aerospace applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-14.
- Alam, M. A., Ya, H. B., Azeem, M., Mustapha, M., Yusuf, M., Masood, F., Marode, R. V., Sapuan, S. M. ve Ansari, A. H., 2023, Advancements in aluminum matrix composites reinforced with carbides and graphene: A comprehensive review, *Nanotechnology Reviews*, 12 (1), 20230111.
- Alhabeib, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S. ve Gogotsi, Y., 2017, Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂T_x MXene), *Chemistry of Materials*, 29 (18), 7633-7644.
- Alihosseini, H., Dehghani, K. ve Kamali, J., 2017, Microstructure characterization, mechanical properties, compressibility and sintering behavior of Al-B₄C nanocomposite powders, *Advanced Powder Technology*, 28 (9), 2126-2134.
- Alkunte, S., Fidan, I., Naikwadi, V., Gudavasov, S., Ali, M. A., Mahmudov, M., Hasanov, S. ve Cheepu, M., 2024, Advancements and challenges in additively manufactured functionally graded materials: A comprehensive review, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (1), 23.
- Alrebdi, T. A., Gopinathan, R., Sunagar, P., Prabu, R. T., Kivade, R., Gous, M. Z., Alodhayb, A. ve Tesemma, B. G., 2022, Optimization on powder metallurgy process parameters on nano boron carbide and micron titanium carbide particles reinforced AA 4015 composites by taguchi technique, *Journal of Nanomaterials*, 2022 (1), 3577793.
- Ammisetti, D. K. ve Kruthiventi, S. H., 2021, Recent trends on titanium metal matrix composites: A review, *Materials Today: Proceedings*, 46, 9730-9735.
- Angelo, P., Subramanian, R. ve Ravisankar, B., 2022, Powder metallurgy: science, technology and applications, PHI Learning Pvt. Ltd., p.
- Araoyinbo, A., Ishola, F., Salawu, E., Biodun, M. ve Samuel, A., 2022, Overview of powder metallurgy process and its advantages, *AIP Conference Proceedings*, 020153.
- Archard, J., 1953, Contact and rubbing of flat surfaces, *Journal of applied physics*, 24 (8), 981-988.
- Ardıçoğlu, H., Karakoç, H. ve Çinici, H., 2023, Microstructural properties and impact behavior of AA5083/Al₂O₃ functionally graded composite material with surface

- foam layer produced through powder metallurgy, *Materials Today Communications*, 35, 106144.
- Arik, H., 2008, Effect of mechanical alloying process on mechanical properties of α -Si₃N₄ reinforced aluminum-based composite materials, *Materials & Design*, 29 (9), 1856-1861.
- Ashby, M. F. ve Gibson, L. J., 1997, Cellular solids: structure and properties, *Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK*, 175-231.
- Attia, U. M., 2021, Cold-isostatic pressing of metal powders: A review of the technology and recent developments, *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 46 (6), 587-610.
- Avcı, U. ve Güleç, A., 2021, Effect of different sintering temperatures on microstructure and mechanical properties for pure Al material produced by powder metallurgy, *El-Cezeri*, 8 (1), 462-470.
- Bahl, S., 2021, Fiber reinforced metal matrix composites-a review, *Materials Today: Proceedings*, 39, 317-323.
- Bai, Y. ve Wierzbicki, T., 2008, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, *International journal of plasticity*, 24 (6), 1071-1096.
- Bai, Y., Li, L., Fu, L. ve Wang, Q., 2021, A review on high velocity compaction mechanism of powder metallurgy, *Science Progress*, 104 (2), 00368504211016945.
- Ballupete Nagaraju, S., Kodigarahalli Somashekara, M., Puttegowda, M., Manjulaiah, H., Kini, C. R. ve Channarayapattana Venkataramaiah, V., 2022, Effect of B₄C/Gr on hardness and wear behavior of Al₂618 based hybrid composites through Taguchi and artificial neural network analysis, *Catalysts*, 12 (12), 1654.
- Bharathi, P. ve Kumar, T. S., 2024, Microstructure and Corrosion Characteristics of Dual Reinforced (SiC–B₄C) Al Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy Process, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-16.
- Bharti, A., Prasad, D., Kumar, N. ve Saxena, K. K., 2021, A Re-investigation: Effect of various parameter on mechanical properties of copper matrix composite fabricated by powder metallurgy, *Materials Today: Proceedings*, 45, 4595-4600.
- Bodukuri, A. K., Eswaraiah, K., Rajendar, K. ve Sampath, V., 2016, Fabrication of Al–SiC–B₄C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties, *Perspectives in Science*, 8, 428-431.
- Brillon, A., Garcia, J., Riallant, F., Garnier, C., Joulain, A., Lu, Y. ve Silvain, J.-F., 2022, Characterization of Al/B₄C composite materials fabricated by powder metallurgy process technique for nuclear applications, *Journal of Nuclear Materials*, 565, 153724.
- Cabeza, M., Feijoo, I., Merino, P., Pena, G., Pérez, M., Cruz, S. ve Rey, P., 2017, Effect of high energy ball milling on the morphology, microstructure and properties of nano-sized TiC particle-reinforced 6005A aluminium alloy matrix composite, *Powder Technology*, 321, 31-43.
- Canakci, A., Varol, T., Özkaya, S. ve Erdemir, F., 2014, Microstructure and properties of Al-B₄C functionally graded materials produced by powder metallurgy method, *Universal Journal of Materials Science*, 2 (5), 90-95.
- Canute, X. ve Majumder, M., 2018, Mechanical and tribological behaviour of stir cast aluminium/boron carbide/fly ash composites, *Journal of Engineering Science and Technology*, 13 (3), 755-777.
- Carreño-Gallardo, C., Estrada-Guel, I., López-Meléndez, C., Ledezma-Sillas, E., Castañeda-Balderas, R., Pérez-Bustamante, R. ve Herrera-Ramírez, J. M., 2018,

- B4C particles reinforced Al2024 composites via mechanical milling, *Metals*, 8 (8), 647.
- Cerit, A. A., Karamis, B. M., Fehmi, N. ve Kemal, Y., 2008, Effect of reinforcement particle size and volume fraction on wear behavior of metal matrix composites, *Tribology in industry*, 30 (3&4), 31.
- Chandrasekaran, M. ve Xia, Z. S., 2005, Effect of alloying time and composition on the mechanical properties of Ti alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 394 (1-2), 220-228.
- Chen, W.-H., Uribe, M. C., Kwon, E. E., Lin, K.-Y. A., Park, Y.-K., Ding, L. ve Saw, L. H., 2022, A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112917.
- Chen, X.-H., Wang, F., Zhang, Z. ve Zhang, F., 2024, Enhanced mechanical properties of Ti3C2Tx MXene/Al composites with nacre-inspired laminated architecture, *Journal of Alloys and Compounds*, 987, 174180.
- Clyne, T. W. ve Withers, P. J., 1993, An introduction to metal matrix composites, Cambridge university press, p.
- Cygan, T., Wozniak, J., Petrus, M., Lachowski, A., Pawlak, W., Adamczyk-Cieślak, B., Jastrzębska, A., Rozmysłowska-Wojciechowska, A., Wojciechowski, T. ve Ziemkowska, W., 2021, Microstructure and mechanical properties of alumina composites with addition of structurally modified 2D Ti3C2 (MXene) phase, *Materials*, 14 (4), 829.
- Çelik, Y. H. ve Seçilmiş, K., 2017, Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B4C rate produced by powder metallurgy method, *Advanced Powder Technology*, 28 (9), 2218-2224.
- Çinici, H., Gökmen, U., Kırmızı, G. ve Çamkerten, R., 2017, Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmiş B4C Takviyeli AA 7xxx Matrisli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımının Belirlenmesi, *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (1), 383-386.
- Dadkhah, M., Mosallanejad, M. H., Iuliano, L. ve Saboori, A., 2021, A comprehensive overview on the latest progress in the additive manufacturing of metal matrix composites: potential, challenges, and feasible solutions, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 34 (9), 1173-1200.
- de Oro Calderon, R., Gierl-Mayer, C. ve Danninger, H., 2022, Fundamentals of sintering: liquid phase sintering, *Encyclopedia of materials: metals and alloys*, 3, 481-492.
- Dehnad, K., 2012, Quality control, robust design, and the Taguchi method, Springer Science & Business Media, p.
- Desai, V., Badheka, V., Zala, A., Parekh, T. ve Jamnapara, N., 2025, Al7075/Ti3AlC2 MAX-phase surface composite generated by friction stir processing: Microstructure, microhardness, and tribological characteristics, *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 17515831251358689.
- Deuis, R., Subramanian, C. ve Yellup, J., 1996, Abrasive wear of aluminium composites—a review, *wear*, 201 (1-2), 132-144.
- Dixit, M. ve Srivastava, R., 2018, Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of Copper prepared by Powder Metallurgy route, *IOP conference series: materials science and engineering*, 012209.
- Do, J.-L. ve Friščić, T., 2017, Mechanochemistry: a force of synthesis, *ACS central science*, 3 (1), 13-19.

- Downes, M., Shuck, C. E., McBride, B., Busa, J. ve Gogotsi, Y., 2024, Comprehensive synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ from MAX phase to MXene, *Nature protocols*, 19 (6), 1807-1834.
- Duan, Y., Cui, Y., Zhang, B., Ma, G. ve Tongmin, W., 2019, A novel microwave absorber of FeCoNiCuAl high-entropy alloy powders: adjusting electromagnetic performance by ball milling time and annealing, *Journal of Alloys and Compounds*, 773, 194-201.
- Dubey, A., Jaiswal, S. ve Lahiri, D., 2022, Promises of functionally graded material in bone regeneration: Current trends, properties, and challenges, *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 8 (3), 1001-1027.
- Düzçükoğlu, H., Ekinci, Ş., Şahin, Ö. S., Avcı, A., Ekrem, M. ve Ünalı, M., 2015, Enhancement of wear and friction characteristics of epoxy resin by multiwalled carbon nanotube and boron nitride nanoparticles, *Tribology Transactions*, 58 (4), 635-642.
- Dwivedi, S. P., Saxena, A., Sharma, S., Singh, G., Singh, J., Mia, M., Chattopadhyaya, S., Pramanik, A., Pimenov, D. Y. ve Wojciechowski, S., 2021, Effect of ball-milling process parameters on mechanical properties of Al/ Al_2O_3 /collagen powder composite using statistical approach, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 2918-2932.
- Edosa, O. O., Tekweme, F. K. ve Gupta, K., 2022, A review on the influence of process parameters on powder metallurgy parts, *Engineering and Applied Science Research*, 49 (3), 433-443.
- Ekrem, M., Düzçükoğlu, H., Ali Şenyurt, M., Sinan Şahin, Ö. ve Avcı, A., 2018, Friction and wear performance of epoxy resin reinforced with boron nitride nanoplatelets, *Journal of Tribology*, 140 (2), 022001.
- Erdemir, F., Canakci, A. ve Varol, T., 2015, Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded $\text{Al}_{2024}/\text{SiC}$ composites prepared by powder metallurgy techniques, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (11), 3569-3577.
- Fan, J., 2019, Evaluating the material strength from fracture angle under uniaxial loading, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13 (2), 288-293.
- Fıçıcı, F., 2012, Al/ AlB_2 kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi (Turkey)*.
- Fogagnolo, J., Velasco, F., Robert, M. ve Torralba, J., 2003, Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders, *Materials Science and Engineering: A*, 342 (1-2), 131-143.
- Garg, R., 2025, A review on MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) composites with varied sizes of carbon for supercapacitor applications, *Energy Storage and Conversion*, 3 (1), 1920-1920.
- German, R. M., 1984, Powder metallurgy science, (No Title).
- German, R. M., 2005, Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties, and applications, (No Title).
- Ghods, H., Manafi, S. ve Borhani, E., 2015, Effect of particle size on the structural and mechanical properties of Al-AlN nanocomposites fabricated by mechanical alloying, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 2 (2), 73-78.
- Giallonardo, J., Avramovic-Cingara, G., Palumbo, G. ve Erb, U., 2013, Microstrain and growth fault structures in electrodeposited nanocrystalline Ni and Ni-Fe alloys, *Journal of Materials Science*, 48 (19), 6689-6699.
- Giménez, R., Serrano, B., San-Miguel, V. ve Cabanelas, J. C., 2022, Recent advances in MXene/epoxy composites: trends and prospects, *Polymers*, 14 (6), 1170.

- Gokul Eswaran, S., Rashad, M., Santhana Krishna Kumar, A. ve EL-Mahdy, A. F., 2025, A Comprehensive Review of Mxene-Based Emerging Materials for Energy Storage Applications and Future Perspectives, *Chemistry–An Asian Journal*, 20 (4), e202401181.
- Gummadi, J. ve Alanka, S., 2023, A review on titanium and titanium alloys with other metals for biomedical applications prepared by powder metallurgy techniques, *Materials Today: Proceedings*.
- Guo, H. ve Zhang, Z., 2018, Processing and strengthening mechanisms of boron-carbide-reinforced aluminum matrix composites, *Metal Powder Report*, 73 (2), 62-67.
- Gupta, P., Trivedi, A. K., Gupta, M. ve Dixit, M., 2024, Metal matrix composites for sustainable products: A review on current development, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 238 (10), 1827-1864.
- Gupta, P. K. ve Srivastava, R., 2018, Fabrication of ceramic reinforcement aluminium and its alloys metal matrix composite materials: A review, *Materials Today: Proceedings*, 5 (9), 18761-18775.
- Hamamcı, M., Nair, F. ve Cerit, A. A., 2023, Microstructural and mechanical characterization of functionally graded Fe/Fe₂B (Fe/B₄C) materials fabricated by in-situ powder metallurgy method, *Ceramics International*, 49 (11), 18786-18799.
- Han, N., Wu, Y. ve Zhao, W., 2025, Oxidation of Ti₃C₂T_x nanosheets: Beneficial or harmful to corrosion prevention and wear resistance?, *Carbon*, 120624.
- Hisam, M. W., Dar, A. A., Elrasheed, M. O., Khan, M. S., Gera, R. ve Azad, I., 2024, The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines, *Journal of Statistical Theory and Applications*, 23 (4), 365-389.
- Hu, J., Li, S., Zhang, J., Chang, Q., Yu, W. ve Zhou, Y., 2020, Mechanical properties and frictional resistance of Al composites reinforced with Ti₃C₂T_x MXene, *Chinese Chemical Letters*, 31 (4), 996-999.
- Hu, Z., Yin, H., Li, M., Li, J. ve Zhu, H., 2024, Research and developments of ceramic-reinforced steel matrix composites—a comprehensive review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131 (1), 125-149.
- Idusuyi, N. ve Olayinka, J. I., 2019, Dry sliding wear characteristics of aluminium metal matrix composites: a brief overview, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (3), 3338-3346.
- Isfahani, M. J. N., Payami, F., Asadabad, M. A. ve Shokri, A. A., 2019, Investigation of the effect of boron carbide nanoparticles on the structural, electrical and mechanical properties of Al-B₄C nanocomposites, *Journal of Alloys and Compounds*, 797, 1348-1358.
- Javdani, A. ve Daei-Sorkhabi, A., 2018, Microstructural and mechanical behavior of blended powder semisolid formed Al7075/B₄C composites under different experimental conditions, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28 (7), 1298-1310.
- Kar, A., Sharma, A. ve Kumar, S., 2024, A critical review on recent advancements in aluminium-based metal matrix composites, *Crystals*, 14 (5), 412.
- Karabulut, H., Çıtak, R. ve Çinici, H., 2013, Mekanik alaşımlama süresinin Al+% 10 Al₂O₃ kompozitlerde eğme dayanımına etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (3).
- Karabulut, Y. ve Ünal, R., 2022, Additive manufacturing of ceramic particle-reinforced aluminum-based metal matrix composites: a review, *Journal of Materials Science*, 57 (41), 19212-19242.

- Karakoç, H., Çinici, H., Kumar, M. S., Yılmaz, T., Ovalı, İ., Yang, C.-H. ve Arjunan, A., 2024, Influence of gradation in the reinforcement particles on the interfacial microstructure and mechanical properties of functionally graded composites, *Materials Today Communications*, 38, 107601.
- Karmakar, R., Maji, P. ve Ghosh, S. K., 2021, A review on the nickel based metal matrix composite coating, *Metals and Materials International*, 27 (7), 2134-2145.
- Karna, S. K. ve Sahai, R., 2012, An overview on Taguchi method, *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1 (1), 1-7.
- Khakbiz, M. ve 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.
- Khan, A. ve Kim, H. S., 2022, A brief overview of delamination localization in laminated composites, *Multiscale Science and Engineering*, 4 (3), 102-110.
- Kırmızı, G., Arık, H. ve 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.
- Konieczny, M., 2012, The effect of sintering temperature, sintering time and reinforcement particle size on properties of Al-Al₂O₃ composites, *Composites Theory and Practice*, 12 (1), 39-43.
- Kościelniak, B., Groch, D., Nowak, W. J., Drajewicz, M. ve Kwolek, P., 2024, Microstructure and Corrosion Resistance of 7075 Aluminium Alloy Composite Material Obtained from Chips in the High-Energy Ball Milling Process, *Materials*, 17 (21), 5331.
- Kuliiev, R., 2020, Mechanical properties of boron carbide (B₄C).
- Kumar, G. A., Satheesh, J., Murthy, K. S., Mallikarjuna, H., Puneeth, N. ve Koppad, P. G., 2023, Optimization of wear properties of b₄c nanoparticle-reinforced Al7075 nanocomposites using Taguchi approach, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 104 (1), 329-340.
- Kumar, N., Bharti, A. ve 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, V., Singh, A., Ankit ve Gautam, G., 2024, A comprehensive review of processing techniques, reinforcement effects, and performance characteristics in copper-based metal matrix composites, *Interactions*, 245 (1), 357.
- Kumaresan, G. ve Kumar, B. A., 2023, Investigations on mechanical and wear properties of Al matrix composites reinforced with hybrid SiC and Al₂O₃ micro-particles, *International Journal of Metalcasting*, 17 (2), 980-987.
- Lee, T., Lee, J., Lee, D., Jo, I., Lee, S. K. ve Ryu, H. J., 2020, Effects of particle size and surface modification of SiC on the wear behavior of high volume fraction Al/SiCp composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 831, 154647.
- Lei, J.-C., Zhang, X. ve Zhou, Z., 2015, Recent advances in MXene: Preparation, properties, and applications, *Frontiers of Physics*, 10 (3), 276-286.
- Lei, X. ve Lin, N., 2022, Structure and synthesis of MAX phase materials: a brief review, *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 47 (5), 736-771.
- Li, Y., Feng, Z., Hao, L., Huang, L., Xin, C., Wang, Y., Bilotti, E., Essa, K., Zhang, H. ve Li, Z., 2020, A review on functionally graded materials and structures via additive manufacturing: from multi-scale design to versatile functional properties, *Advanced Materials Technologies*, 5 (6), 1900981.
- Lingam, D., Ananthanarayanan, R., Jeevanantham, A. ve Seenivasagam, D. R., 2024, Optimization methods in powder metallurgy for enhancing the mechanical

- properties: A systematic literature review, *Engineering Research Express*, 6 (2), 022504.
- Lloyd, D., 1994, Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites, *International Materials Reviews*, 39 (1), 1-23.
- Lv, Z., Lu, M., Xiao, G., Ma, Y., Weng, D., Wang, B., Shang, Z., Qi, W., Chen, L. ve Chang, J., 2025, A review of near-net shape forming by hot isostatic pressure technology, *Journal of the American Ceramic Society*, 108 (2), e20196.
- Mahamood, R. M. ve Akinlabi, E. T., 2017, Functionally graded materials, Springer, p.
- Manohar, G., Dey, A., Pandey, K. ve Maity, S., 2018, Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: a review, *AIP conference proceedings*, 020041.
- Manohar, G., Pandey, K. ve Maity, S., 2021a, Effect of sintering mechanisms on mechanical properties of AA7075/B4C composite fabricated by powder metallurgy techniques, *Ceramics International*, 47 (11), 15147-15154.
- Manohar, G., Pandey, K. ve Maity, S., 2021b, Characterization of Boron Carbide (B4C) particle reinforced aluminium metal matrix composites fabricated by powder metallurgy techniques—A review, *Materials Today: Proceedings*, 45, 6882-6888.
- Manohar, G., Pandey, K. M. ve Maity, S. R., 2021c, Effect of compaction pressure on mechanical properties of AA7075/B4C/graphite hybrid composite fabricated by powder metallurgy techniques, *Materials Today: Proceedings*, 38, 2157-2161.
- Manohar, G., Pandey, K. M. ve Maity, S. R., 2022, Effect of spark plasma sintering on microstructure and mechanical properties of AA7075/B4C/ZrC hybrid nanocomposite fabricated by powder metallurgy techniques, *Materials chemistry and physics*, 282, 126000.
- Mathew, G. ve Kottur, V. K. N., 2023, Effect of ceramic reinforcements on the mechanical and tribological properties of aluminium metal matrix composites—A review, *Materials Today: Proceedings*.
- Mavhungu, S., Akinlabi, E., Onitiri, M. ve Varachia, F., 2017, Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends, *Procedia Manufacturing*, 7, 178-182.
- Mobasherpour, I., Tofigh, A. ve Ebrahimi, M., 2013, Effect of nano-size Al₂O₃ reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying, *Materials chemistry and physics*, 138 (2-3), 535-541.
- Molnárová, O., Málek, P., Lukáč, F. ve Chráska, T., 2016, Spark plasma sintering of a gas atomized Al7075 alloy: Microstructure and properties, *Materials*, 9 (12), 1004.
- Mori, T. ve Tsai, S., 2011, Taguchi methods, *Three Park Ave New York, NY: ASME*, 10016-15990.
- Murali, G., Reddy Modigunta, J. K., Park, Y. H., Lee, J.-H., Rawal, J., Lee, S.-Y., In, I. ve Park, S.-J., 2022, A review on MXene synthesis, stability, and photocatalytic applications, *ACS nano*, 16 (9), 13370-13429.
- Nagaraju, S. B., Somashekara, M. K., Govindaswamy, P. D., Puttegowda, M., Shankar, P. B. G. ve Sathyanarayana, K., 2023, Wear behaviour of hybrid (boron carbide-graphite) aluminium matrix composites under high temperature, *Journal of Engineering and Applied Science*, 70 (1), 124.
- Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., Hultman, L., Gogotsi, Y. ve Barsoum, M. W., 2011, Two-dimensional nanocrystals: two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂ (Adv. Mater. 37/2011), *Advanced Materials*, 23 (37), 4207-4207.

- Naik, A. B. ve Reddy, A. C., 2018, Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA), *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 327-339.
- Nan, L., Qian, L., Yihui, J., Yishi, S., Wenting, T. ve Shuhua, L., 2021, Composite structural modeling and mechanical behavior of whisker reinforced Cu matrix composites, *Computational Materials Science*, 195, 110492.
- Nayak, K. C., Rane, K. K., Date, P. P. ve Srivatsan, T., 2022, Synthesis of an aluminum alloy metal matrix composite using powder metallurgy: role of sintering parameters, *Applied Sciences*, 12 (17), 8843.
- Nemat-Alla, M. M., Ata, M. H., Bayoumi, M. R. ve Khair-Eldeen, W., 2011, Powder metallurgical fabrication and microstructural investigations of aluminum/steel functionally graded material, *Materials Sciences and Applications*, 2 (12), 1708-1718.
- Ngai, T. L., Zheng, W. ve Li, Y., 2013, Effect of sintering temperature on the preparation of Cu-Ti₃SiC₂ metal matrix composite, *Progress in Natural Science: Materials International*, 23 (1), 70-76.
- Nie, C.-Z., Gu, J.-J., Liu, J.-L. ve Zhang, D., 2007, Production of boron carbide reinforced 2024 aluminum matrix composites by mechanical alloying, *Materials Transactions*, 48 (5), 990-995.
- Nirala, A., Soren, S., Kumar, N., Garg, R., Sharma, S. K., Shrivastava, A., Singh, D. B., Yadav, D. ve Yadav, J., 2021, Comprehensive study of magnesium based metal matrix composite, *Materials Today: Proceedings*, 46, 6587-6591.
- Ozay, C., Ballikaya, H., Dagdelen, F. ve Karlidag, O., 2021, Microstructural and wear properties of the Al-B₄C composite coating produced by hot-press sintering on AA-2024 alloy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35 (7), 2895-2901.
- Pan, K., Liu, X., Wu, S., Gao, S., Wang, B., Sun, M. ve Li, N., 2022, Formation and evolution mechanisms of micropores in powder metallurgy Ti alloys, *Materials & Design*, 223, 111202.
- Protyai, M. I. H. ve Rashid, A. B., 2024, A comprehensive overview of recent progress in MXene-based polymer composites: Their fabrication processes, advanced applications, and prospects, *Heliyon*, 10 (17).
- Qiu, C., Su, Y., Yang, J., Chen, B., Ouyang, Q. ve Zhang, D., 2021, Structural modelling and mechanical behaviors of graphene/carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via atomic-scale simulations: A review, *Composites Part C: Open Access*, 4, 100120.
- Rao, T. B., 2021, Microstructural, mechanical, and wear properties characterization and strengthening mechanisms of Al7075/SiCnp composites processed through ultrasonic cavitation assisted stir-casting, *Materials Science and Engineering: A*, 805, 140553.
- Ravikumar, M., 2025, Investigation on the tensile strength, hardness and wear properties in nB 4 C reinforced Al7075 composites, *Fracture & Structural Integrity* (73).
- Reichardt, A., Shapiro, A. A., Otis, R., Dillon, R. P., Borgonia, J. P., McEnerney, B. W., Hosemann, P. ve Beese, A. M., 2021, Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials, *International Materials Reviews*, 66 (1), 1-29.
- Riahi, A. ve Alpas, A., 2001, The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites, *wear*, 251 (1-12), 1396-1407.
- Roy, R. K., 2001, Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons, p.

- Sabard, A., de Villiers Lovelock, H. ve Hussain, T., 2018, Microstructural evolution in solution heat treatment of gas-atomized Al alloy (7075) powder for cold spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, 27 (1), 145-158.
- Salur, E., Acarer, M. ve Şavkliydiz, İ., 2021, Improving mechanical properties of nano-sized TiC particle reinforced AA7075 Al alloy composites produced by ball milling and hot pressing, *Materials Today Communications*, 27, 102202.
- Sankhla, A. M., Patel, K. M., Makhesana, M. A., Giasin, K., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S. ve Khanna, N., 2022, Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route, *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 282-292.
- Saravanakumar, A., Ravikanth, D., Rajeshkumar, L., Balaji, D. ve Ramesh, M., 2021, Tribological behaviour of MoS₂ and graphite reinforced aluminium matrix composites, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012021.
- Sarmah, P. ve Gupta, K., 2024, Recent advancements in fabrication of metal matrix composites: A systematic review, *Materials*, 17 (18), 4635.
- Saxena, A., Saxena, K. K., Jain, V. K., Rajput, S. ve Pathak, B., 2023, A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites, *Materials Today: Proceedings*.
- Sharma, A., KV, S. S., Dixit, M., Gupta, A. K. ve 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, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A. ve Rimašauskienė, R., 2020, Matrix materials used in composites: A comprehensive study, *Materials Today: Proceedings*, 21, 1559-1562.
- Sheinerman, A., 2022, Mechanical properties of metal matrix composites with graphene and carbon nanotubes, *Physics of Metals and Metallography*, 123 (1), 57-84.
- Shi, Y., Du, Z. ve Yang, S., 2024, A perspective of fabrication and applications of MXene–metal hybrids, *Advanced Functional Materials*, 34 (42), 2404653.
- Shuai, C., He, C., Peng, S., Qi, F., Wang, G., Min, A., Yang, W. ve Wang, W., 2021, Mechanical alloying of immiscible metallic systems: process, microstructure, and mechanism, *Advanced Engineering Materials*, 23 (4), 2001098.
- Shuck, C. E., Han, M., Maleski, K., Hantanasirisakul, K., Kim, S. J., Choi, J., Reil, W. E. ve Gogotsi, Y., 2019, Effect of Ti₃AlC₂ MAX phase on structure and properties of resultant Ti₃C₂T_x MXene, *ACS Applied Nano Materials*, 2 (6), 3368-3376.
- Siheng, G., Xianjuan, D., Xuan, X. ve Yong, X., 2020, Effect of ball milling speed and sintering temperature on microstructure and properties of TiAl alloy prepared by powder metallurgy, *Procedia Manufacturing*, 50, 355-361.
- Sohag, M. A. Z., Gupta, P., Kondal, N., Kumar, D., Singh, N. ve Jamwal, A., 2020, Effect of ceramic reinforcement on the microstructural, mechanical and tribological behavior of Al-Cu alloy metal matrix composite, *Materials Today: Proceedings*, 21, 1407-1411.
- Solay Anand, S. ve Mohan, B., 2012, Effect of particle size, compaction pressure on density and mechanical properties of elemental 6061Al alloy through powder metallurgical process, *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 3 (3-4), 259-268.
- Sudhakar, U., Raghavulu, K., Jani, S., Shetty, S. K. ve Haile, A., 2025, Mechanical and microstructural analysis of AA7075/B4C/ZrO₂ hybrid composite, *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20 (1), 55.

- Sun, Y. ve Guo, Z., 2019, Recent advances of bioinspired functional materials with specific wettability: from nature and beyond nature, *Nanoscale Horizons*, 4 (1), 52-76.
- Sunderiya, S., Suragtkhuu, S., Purevdorj, S., Ochirkhuyag, T., Bat-Erdene, M., Myagmarsereejid, P., Slattery, A. D., Bati, A. S., Shapter, J. G. ve Odkhuu, D., 2024, Understanding the oxidation chemistry of Ti₃C₂T_x (MXene) sheets and their catalytic performances, *Journal of Energy Chemistry*, 88, 437-445.
- Surya, M. S., Prasanthi, G., Kumar, A. K., Sridhar, V. ve Gugulothu, S., 2021, Optimization of tribological properties of powder metallurgy-processed Aluminum7075/SiC composites using ANOVA and artificial neural networks, *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 7 (4), 161.
- Surya, M. S. ve Gugulothu, S., 2022, Fabrication, mechanical and wear characterization of silicon carbide reinforced aluminium 7075 metal matrix composite, *Silicon*, 14 (5), 2023-2032.
- Suryanarayana, C., 2001, Mechanical alloying and milling, *Progress in materials science*, 46 (1-2), 1-184.
- Suryanarayana, C., 2022, Mechanical alloying: a critical review, *Materials Research Letters*, 10 (10), 619-647.
- Suryanarayana, C. ve deBarbadillo, J. J., 2025, Sixty Years of Mechanical Alloying—Past Achievements, Current Challenges, and Future Prospects, *Advanced Engineering Materials*, 27 (6), 2401625.
- Şenel, M. C., Kanca, Y. ve Gürbüz, M., 2022, Reciprocating sliding wear properties of sintered Al-B₄C composites, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29 (6), 1261-1269.
- Tayebi, M., Jozdani, M. ve Mirhadi, M., 2019, Thermal expansion behavior of Al-B₄C composites by powder metallurgy, *Journal of Alloys and Compounds*, 809, 151753.
- Thakur, A., Khanna, V. ve Murtaza, Q., 2024, A Review on Reinforcement and Its Effect on Aluminium-Based Composites, *Metal Matrix Composites: A Modern Approach to Manufacturing*, 176-199.
- Thümmel, F. ve Oberacker, R., 2024, An introduction to powder metallurgy, CRC Press, P.
- Tiwari, S., Rajput, P. ve Srivastava, S., 2012, Densification Behaviour in the Fabrication of Al-Fe Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy Route, *International Scholarly Research Notices*, 2012 (1), 195654.
- Tjong, S. ve Ma, Z., 2000, Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 29 (3-4), 49-113.
- Turan, İ., Özlü, B., Ulaş, H. B. ve Demir, H., 2025, Prediction and Modelling with Taguchi, ANN and ANFIS of Optimum Machining Parameters in Drilling of Al 6082-T6 Alloy, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9 (3), 92.
- Vairamuthu, J., Senthil Kumar, A., Stalin, B. ve Ravichandran, M., 2020, Optimization of powder metallurgy parameters of TiC-and B₄C-reinforced aluminium composites by Taguchi method, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 45 (2), 249-261.
- Valizade, N. ve Farhat, Z., 2024, A review on abrasive wear of aluminum composites: mechanisms and influencing factors, *Journal of Composites Science*, 8 (4), 149.
- Velmurugan, G., Perumal, A., Sekar, S. ve Uthayakumar, M., 2022, Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: a review, *Materials Today: Proceedings*, 50, 1022-1031.

- Verma, P. K. ve Singh, A., 2024, Microstructure evolution and mechanical properties of aluminium matrix composites reinforced with CoMoMnNiV high-entropy alloy, *International Journal of Metalcasting*, 18 (1), 546-563.
- Vijay, S. ve CH, S. R., 2020, A comparative investigation of hardness and compression strength of Nickel coated B4C reinforced 601AC/201AC selective layered functionally graded materials, *Materials Research Express*, 7 (1), 016527.
- Vijay, S. ve Rao, C. S., 2020, Dry slide wear behavior of 601AC/B4C Selective layered functionally graded material with particulate Ni-P coating, *Materials Research Express*, 6 (12), 1265g1267.
- Waje, S. B., Hashim, M., Yusoff, W. D. W. ve Abbas, Z., 2010, X-ray diffraction studies on crystallite size evolution of CoFe₂O₄ nanoparticles prepared using mechanical alloying and sintering, *Applied Surface Science*, 256 (10), 3122-3127.
- Walde, C., Tsaknopoulos, K., Champagne, V. ve Cote, D., 2020, Phase transformations in thermally treated gas-atomized Al 7075 powder, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9 (3), 419-427.
- Wang, X.-y., Yang, Y., Zhao, Y.-p., Zhang, X.-n., Wang, Y.-w. ve Tian, W., 2023, Effects of B4C particle size and content on microstructure and properties of in-situ TiB₂-TiC composite coatings prepared by plasma spraying, *Surface and Coatings Technology*, 459, 129273.
- Wei, L. K., Abd Rahim, S. Z., Al Bakri Abdullah, M. M., Yin, A. T. M., Ghazali, M. F., Omar, M. F., Nemeş, O., Sandu, A. V., Vizureanu, P. ve Abdellah, A. E.-h., 2023, Producing metal powder from machining chips using ball milling process: A review, *Materials*, 16 (13), 4635.
- Wei, Y., Hu, X., Jiang, Q., Sun, Z., Wang, P., Qiu, Y. ve Liu, W., 2018, Influence of graphene oxide with different oxidation levels on the properties of epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 161, 74-84.
- Witharamage, C., Christudasjustus, J. ve Gupta, R., 2021, The effect of milling time and speed on solid solubility, grain size, and hardness of Al-V alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30 (4), 3144-3158.
- Worku, A. K., Alemu, M. A., Ayele, D. W., Getie, M. Z. ve Teshager, M. A., 2024, Recent advances in MXene-based materials for high-performance metal-air batteries, *Green Chemistry Letters and Reviews*, 17 (1), 2325983.
- Yildirim, M., Özyürek, D. ve Gürü, M., 2016, The effects of precipitate size on the hardness and wear behaviors of aged 7075 aluminum alloys produced by powder metallurgy route, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (11), 4273-4281.
- YILDIZ, T. ve SURa, G., FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ AL7075/Al₂O₃ KOMPOZİTLERİN MİKROYAPISININ İNCELENMESİ.
- Zang, X., Wang, J., Qin, Y., Wang, T., He, C., Shao, Q., Zhu, H. ve Cao, N., 2020, Enhancing capacitance performance of Ti₃C₂T_x MXene as electrode materials of supercapacitor: from controlled preparation to composite structure construction, *Nano-Micro Letters*, 12 (1), 77.
- Zhang, L., Shi, J., Shen, C., Zhou, X., Peng, S. ve Long, X., 2017, B4C-Al composites fabricated by the powder metallurgy process, *Applied Sciences*, 7 (10), 1009.
- Zhang, W., Yang, P., Cao, Y., Li, X., Wei, D., Kato, H. ve Wu, Z., 2021, New Ti/β-Ti alloy laminated composite processed by powder metallurgy: Microstructural evolution and mechanical property, *Materials Science and Engineering: A*, 822, 141702.