

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOZ METALURJİSİNDE BOR KARBÜR (B₄C)
TAKVİYELİ ÇİFT FAZLI (DUPEKS) PASLANMAZ
ÇELİK MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİM ARAŞTIRMASI
VE KARAKTERİZASYONU**

Sedat ÖRÜCÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Dr.Öğr. Üyesi Burak BİROL

Eş Danışman

Doç.Dr.Öğr. Üyesi Rıdvan GECÜ

Haziran,2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TOZ METALURJİSİNDE BOR KARBÜR (B₄C)
TAKVİYELİ ÇİFT FAZLI (DUPEKS) PASLANMAZ
ÇELİK MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİM ARAŞTIRMASI
VE KARAKTERİZASYONU**

Sedat ÖRÜCÜ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.06.2023 tarihinde aşağıda belirtilen jüri üyeleri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr.Burak BİROL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç.Dr.Rıdvan Gecü
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Burak BİROL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Alptekin KISASÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Ergün KELEŞOĞLU, Üye
Türk Alman Üniversitesi

Danışmanım Dr. Burak BİROL sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Toz Metalurjisinde Bor Karbür (B_4C) Takviyeli Çift Fazlı (Dupleks) Paslanmaz Çelik Matrisli Kompozit Üretim Araştırması ve Karakterizasyonu başlıklı çalışmada, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya uydurma yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı, bu çalışmadaki tüm bilgilerin etik ilkelere ve bilimsel kurallara uygun olarak ele alındığını ve sunulduğunu, ayrıca bu ilke ve kuralların gerektirdiği şekilde, bu tez çalışmasından esinlenmeyen bütün atıfları yaptığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sedat ÖRÜCÜ

İmza



Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2022-4832” no’lu proje ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının araştırılmasında, planlanmasında, sürecin yürütülmesinde ve meydana gelmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bilgilendirme ve yönlendirmeleri ile çalışmamı bilimsel esaslara dayalı olarak şekillendiren sayın değerli hocalarım Dr.Öğretim Üyesi Burak Birol'a , Doç.Dr.Öğretim Üyesi Rıdvan Gecü'ye,

Laboratuvar ve diğer çalışmalarda imkânlarından faydalandığım Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm başkanlığı, Bölüm Hocalarından, Dr.Öğretim Görevlisi Yahya Bayrak'a, Araştırma Görevlisi Ozan Aydın'a, teknisyenlerden Mehmet Çalışkan'a, YTÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarında tez çalışmalarında önemli sonuçların elde edilmesinde emeği geçen Sn. Dr.Ali Can Zaman ve Dr. Özlem Yağcı'ya, Teknik Torna firma sahibi Sn. İrfan Ekinci ve Aykal Kalıp'ın desteklerine,

Tez çalışmamı hayata geçirirken, deneysel çalışmalarım da çözüm odaklı, ilgisiyle, çabalarıyla desteğini esirgemeyen meslektaşım Tolunay Çalışkan'a ve katkıları olan tüm değerli arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak , beni bugün bulunduğum yerlere getirmek için her zaman desteğini esirgemeyen, fedakar çok değerli aileme ve eşime, çalışmalarım boyunca anlayış ve hoşgörülerine ve her türlü motivasyon desteğine çok teşekkür ederim.

Sedat ÖRÜCÜ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	16
1.1 Literatür Özeti	16
1.2 Tezin Amacı.....	23
1.3 Hipotez	24
2 PASLANMAZ ÇELİKLER	25
2.1 Paslanmaz Çeliklerin Tanımı	25
2.2 Paslanmaz Çeliklerin Toz Metalurjisi İle Üretimi	30
2.3 Sinterleme.....	39
2.4 Paslanmaz Çelik Matrisli Kompozit Malzemeler	45
3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
3.1 Giriş.....	57
3.2 M.Alaşımlamalı Dupleks Paslanmaz Çelik Tozların Hazırlanması	58
3.3 Toz Karışımlarının Preslenmesi	61
3.4 Preslenen Numunelerin Sinterlenmesi	61
3.5 Yoğunluk Ölçümü.....	62
3.6 Sinterlenen Numunelerin Mikroyapı Hazırlığı ve İncelemeleri	63
3.7 Sertlik Testleri.....	64
3.8 Aşınma Mekanizması.....	64
3.9 Elektrokimyasal Korozyon Hızı ve ölçülmesi	68
4 DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	72
4.1 Mikroyapı XRD /SEM/EDS İnceleme ve Sonuçları.....	72
4.2 Toz Metalurjisi ile B ₄ C Takviyeli DPÇ Matrisli Kompozitlerin Üretim Parametrelerinin İncelenmesi.....	73
4.3 Yoğunluk Analizleri ve Sonuçları.....	75
4.4 Sertlik Analizleri ve Sonuçları.....	77

4.5 Mekanik Alaşım ve B ₄ C Takviyeli Toz Malzemelerin SEM Analiz Sonuçları	79
4.6 Mekanik Alaşım ve B ₄ C Takviyeli Toz Malzemelerin Elementel Haritalama Sonuçları.....	80
4.7 B ₄ C takviyeli DPÇ Matrisli Toz Malzemelerin SEM/EDS Görüntü Analizleri.....	81
4.8 B ₄ C'lu, DPÇ Matrisli Kompozitlerin X-Işını Elementel Haritalama Sonuçları	83
4.9 B ₄ C takviyeli DPÇ Matrisli Kompozitlerin Optik Mikroskop Görüntü Analizi.....	86
4.10 B ₄ C takviyeli DPÇ Matrisli Kompozitlerin SEM/EDS Görüntü Analizleri	87
4.11 Sinterli Kompozitlerin XRD Analizleri ve Sonuçları	89
4.12 Aşınma Testleri Analiz ve Sonuçları	90
4.13 Korozyon Testleri Analiz ve Sonuçları.....	95
5 SONUÇ	99
5.1 Sonuç ve Öneriler.....	99
KAYNAKÇA	103
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	108

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
Cu	Bakır
B ₄ C	Bor Karbür
E _{pit}	Çukurcuk Korozyon Potansiyeli
E _{kor}	Korozyon Potansiyeli
E _p	Pasivasyon Potansiyeli
Fe	Demir
I _p	Pasivasyon Akım Yoğunluğu
I _{kor}	Korozyon Akım Yoğunluğu
Cr	Krom
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Ni	Nikel
γ	Östenit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
SiC	Silisyum Karbür
TiC	Titanyum Karbür
TiN	Titanyum Nitrür
TiB ₂	Titanyum Bor
R _p	Polarizasyon Direnci

KISALTMA LİSTESİ

DPC	Dupleks Paslanmaz Çelik
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Yayılımlı Spektroskop)
HIP	Hot Isostatic Pres (Sıcak İzostatik Presleme)
HT-HP	High Temperature – High Pressure (Yüksek Sıcaklık Yüksek Basınç)
M/A	Mekanik Alaşımlama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPS	Spark Plasma Sintering (Kıvılcım Plazma Sinterleme)
TEM	Transmission Electron Microscopy (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
TM	Toz Metalurjisi
XRD	X-Işını kırınımı (X-Ray diffraction)
İKK	İşlem Kontrol Kimyasalı
SWR	Spesifik Aşınma Direnci
COF	Sürtünme Katsayısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Schaeffler Diyagramı	26
Şekil 2.2 Toz Metalurjisi Akış Rotası	30
Şekil 2.3 Çeşitli Metal Tozlarının Sıkışma ve Yoğunluk Özellikleri.....	31
Şekil 2.4 M/A sırasında soğuk kaynaklama ve kırılma mekanizmaları	35
Şekil 2.5 SPEX Tip Çalkalamalı Öğütücü.....	38
Şekil 2.6 Atritör Tipi Öğütücü Değirmenin Hazne İç Görüntüsü	38
Şekil 2.7 Gezegen (Planetary) tipi öğütücü	39
Şekil 2.8 Sinterleme Aşamalarına Göre Gözenek Yapısındaki Değişim	40
Şekil 2.9 Temel Sinterleme Teknikleri.....	41
Şekil 2.10 Toz Boyutu ve Yoğunluk Arasındaki Bağlı Etki	42
Şekil 2.11 Artan Sinterlenmiş Yoğunluğun Mekanik Özelliklere Etkisi	42
Şekil 2.12 Sinterleme Sıcaklık ve Sürenin, Yoğunluk Üzerine Etkisi	43
Şekil 2.13 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	47
Şekil 2.14 Kompozit Malzemelerin Takviye Yapısına Göre Sınıflandırması.....	47
Şekil 2.15 Kompozit Matris -Takviye Arası Bağ Oluşumu	49
Şekil 2.16 Kompozit Üretiminde Metal Matris Malzeme Kullanım oran.....	50
Şekil 2.17 Kompozit Üretiminde Takviye Malzeme Kullanım Oranları	51
Şekil 3.1 B4C Takviyeli DPÇ Matriksli Malzemelerin Üretim Akışı.....	57
Şekil 3.2 Gezegen Bilyalı Öğütücü ile Öğütme ve MA İşlemi	59
Şekil 3.3 100 ton kapasiteli hidrolik presleme cihazı	61
Şekil 3.4 Atmosfer kontrollü tüplü sinterleme fırını, gaz besleme sistemi	62
Şekil 3.5 Sinterleme Sıcaklık-Zaman Grafiği.....	62
Şekil 3.6 Tribolojik Sistemin Şematik Gösterimi.....	65
Şekil 3.7 Disk Üstü Pim ve Bilya Aşınma Mekanizması.....	66
Şekil 3.8 Aşınma Dirençlerinin Karşılaştırması	66
Şekil 3.9 Aşınma Deneyi Test Cihazı ve Aşınma Mekanizması.....	68
Şekil 3.10 Elektrokimyasal Korozyon Ölçme Yöntemleri	69
Şekil 3.11 Tafel Exp. Yöntemi ile Korozyon Akımının bulunması	70
Şekil 4.1 Farklı MA Parametrelili Toz Malzemelerin XRD Analizleri.....	72
Şekil 4.2 Sinterlenmiş Malzemelerin Metalografik Görüntüleri	73
Şekil 4.3 B4C Oranlarına Göre DPÇ Kompozit Yoğunluk Karşılaştırması.....	77
Şekil 4.4 B4C Oranlarına Göre DPÇ Kompozit Sertlik Değişimi	78

Şekil 4.5 MA Sonrası Elde Edilen Kompozit Toz Malzemelerin morfolojik İncelemelerine Ait SEM Görüntüleri.....	79
Şekil 4.6 Farklı B4C takviyesi içeren toz malzemelere ait elementel haritalama görüntüleri.....	81
Şekil 4.7 B4C Takviyeli çift fazlı paslanmaz çelik matrisli toz malzemelerin SEM/EDS görüntü ve analizleri.....	83
Şekil 4.8 % 0-1-3-5 B4C Takviyeli Çift Fazlı Paslanmaz Çelik Matrisli Kompozitin, Elementel Haritalama Görüntüleri.....	85
Şekil 4.9 a),b),c) % 1-3-5 B4C Takviyeli çift fazlı paslanmaz çelik matrisli kompozitin, farklı büyütme ölçeklerinde optik mikroskop görüntü analizi	87
Şekil 4.10 a),b),c),d) % 0-1-3-5 B4C Takviyeli çift fazlı paslanmaz çelik matrisli kompozitlerin sinterlenmiş numune SEM/EDS görüntü ve analizleri.....	89
Şekil 4.11 Sinterlenmiş B4C ‘lü DPÇ kompozitlerin XRD analizi.....	90
Şekil 4.12 Sabit Yük Altında B4C Takviye-Ağırlık Kaybı Değişim	92
Şekil 4.13 B4C ‘ lü, DPÇ Yüzeyinin Aşınma Testi Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri(a)%0B4C(b)%1B4C,(c)%3B4C(d)%5 B4C	93
Şekil 4.14 % 0-1-3-5 B4C ‘ lü,DPÇ Yüzeyi Aşınma Testi SEM Görüntüleri	94
Şekil 4.15 % 0-1-3-5 B4C ‘ lü, Duplex paslanmaz çelik yüzeyinin aşınma testi (Sürtünme katsayısı ve Kayma mesafesi)	94
Şekil 4.16 % 0-1-3-5 B4C Oranlarına Göre Tafel Exp. Yöntemiyle Korozyon Hız Testi Değerleri Karşılaştırma Grafiği	96
Şekil 4.17 Farklı B4C’lü DPÇ Kompozitlerin Polarizasyon Eğrileri.....	98

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Toz malzemelerin sıkıştırma basınçları	32
Tablo 2.2 Toz sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması	33
Tablo 2.3 Sinterleme işleminde koruyucu atmosferler ve malzemeler	43
Tablo 2.4 Metal/metal olmayan malzemelerin sinterleme sıcaklıkları	44
Tablo 2.5 Bor Karbürün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	53
Tablo 2.6 MMK Üretiminde kullanılan takviye malzemelerinin özellikleri	55
Tablo 3.1 Öğütme / mekanik alaşımlama parametreleri	59
Tablo 3.2 B ₄ C takviyeli DPÇ matrisli MA proses parametreleri.....	60
Tablo 3.3 Sinterleme Sıcaklık - Zaman Tablosu.....	62
Tablo 3.4 Aşınma deneyi test parametreleri	67
Tablo 4.1 Kompozit üretiminde kullanılan tozların ağırlık karışım oranları	74
Tablo 4.2 Tozların fiziksel özellikleri.....	74
Tablo 4.3 B ₄ C takviye oranlarına göre yoğunluk değişim sonuçları	75
Tablo 4.4 B ₄ C takviyeli DPÇ matrisli kompozitin yoğunluk/gözeneklilik değeri.....	76
Tablo 4.5 Malzeme sertlik ölçüm çalışması.....	78
Tablo 4.6 Farklı B ₄ C oranlarına göre aşınma testi ağırlık kaybı analizi.....	92
Tablo 4.7 Farklı B ₄ C oranlarına göre korozyon testi sonrası alınan sonuçlar	96

TOZ METALURJİSİNDE BOR KARBÜR (B₄C) TAKVİYELİ ÇİFT FAZLI (DUPEKS) PASLANMAZ ÇELİK MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİM ARAŞTIRMASI VE KARAKTERİZASYONU

Sedat ÖRÜCÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Burak BİROL

Eş Danışman: Doç.Dr.Öğr.Üyesi Rıdvan GECÜ

Toz metalürjisi, çok yönlülük açısından en geniş şekillendirme ve üretim proseslerine sahip teknolojidir. Toz metalürjisinin en gözle görülür avantajı, karmaşık geometrilere sahip yüksek kaliteli parçaları minimum atıkla veya sıfır atıkla ekonomik olarak üretebilme yeteneğidir.

Paslanmaz çelikler, genellikle bileşimlerinde minimum 11% oranında krom içeren çeliklerdir. Bu krom içeriği, yüzeye sıkıca yapışan ince, sünek bir oksit tabakası oluşturur. Bu nedenle kimyasal ortam karşında yüzeyde pasifleşme meydana gelir. Bu oksit tabakası, oksijence zengin bir ortamda oluşan ve dış etkilerle yok edildiğinde kendini yenileyebilen bir tabakadır.

Kompozitler ise ağırlık, dayanıklılık, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi birçok özellik açısından büyük avantajlar sunan malzemelerdir.

Metal matrisli kompozitler (MMK), kompozit malzemelerin bir alt grubu malzemelerdir. MMK, çeşitli işlemler kullanılarak üretilebilir.

Bu yöntemlerden biri de toz metalürjisi ve mekanik alaşımlama işlemidir. Bu çalışmada, kompozit malzemeler ağırlıklı olarak mekanik alaşımlama ve karıştırma ile üretilmiş ve özellikleri incelenmiştir. Matris malzemesi olarak çift fazlı paslanmaz çelik, takviye elemanı olarak ise ağırlıkça % 1-3-5 oranında bor

karbür B₄C parçacıkları sabit süreli mekanik alaşımlama işlemleri uygulandı. Tozların sinterlenmesinden sonra XRD, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

Karakterize edilen tozlar 120 bar basınçta tek yönde sıkıştırılarak blok haline getirildi. Örnek numune bloklar koruyucu argon atmosferinde 1200°C sıcaklık ta 75 dk. sinterlenmiştir.

Elde edilen kompozitlerin mikro yapıları optic ve (SEM) taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve DPÇ'e ait dubleks paslanmazçeliğin ikifazlı yapı oluşumları gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, mekanik alaşımlama ile dubleks paslanmaz çelik matrisli B₄C ilaveli kompozitler üretilmiş ve bunların mikroyapısı, tribolojik , mekanik ve korozyon özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Matris ve takviye, tozlar halinde yüksek enerjili bir bilyalı değirmende mekanik olarak karıştırılmış, ardından tek eksenli soğuk preste sabit basınçta preslenmiş ve koruyucu argon atmosferinde sinterlenmiştir.

B₄C farklı dozlarda eklenmiş ve etkileri test edilmiştir. Artan B₄C takviye oranı ile kompozitlerin gözenekliliğinde artma eğilimi gözlenmiştir. . Yapılan sertlik testleri sonucunda DPÇ'de farklı oranlarda B₄C ilavesi ile sertliğin arttığı gözlenmiştir. Artan B₄C ilaveleri, DÇ'nin aşınma direncini sürekli olarak iyileştirmiştir. B₄C ilavesi, DPÇ'nin oyuk korozyon direncini katkısız kompozit malzemeye göre daha az negatif etkilemiştir.

AnahtarKelimeler: Aşınma,çift fazlı paslanmaz matrisli kompozitler, mekanik özellikler, mikroyapı , paslanmaz çelik.

Production Research & Characterization of Boron Carbide (B₄C) Reinforced Dual Phase (Duplex) Stainless Steel Matrix Composite in Powder Metallurgy

Sedat ÖRÜCÜ

Department of Metallurgy and Material Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof.Dr. Burak BİROL

Co-Supervisor: Assoc.Prof.Dr.Rıdvan Gecü

Powder metallurgy is the technology with the most comprehensive forming and production processes in terms of the diversity it provides. The most prominent advantage of powder metallurgy is that it is suitable for high quality and economical production and complex shaped parts with minimal or no loss.

Stainless steels are generally steels with about 11% chromium in their composition. Thanks to this chromium content, a ductile, thin oxide layer is formed, which is strongly attached to the surfaces. Therefore, they are passivated against chemical environments. This oxide layer is a layer that can renew itself if it is formed in oxygen-containing environments and deteriorated by external factors.

Composites, on the other hand, are materials that offer great advantages in terms of several properties such as strength, weight, wear and corrosion resistance.. Metal matrix composites (MMC) are a group of composite materials. MMC can be manufactured using a variety of processes. One of them is powder metallurgy and mechanical alloying process.

In the first part of the work, the composite material was produced by mechanical mixing and alloying and its properties were examined.

Mechanical alloying processes were applied at constant time to duplex stainless steel as matrix material and 1-3-5% by weight boron carbide B_4C particles as reinforcement element. After sintering, XRD, SEM and EDS analyzes were performed on the powders. The characterized powders were pressed in one direction under 120 bar pressure and formed into blocks. Block samples were sintered for 1 hour in an argon protective atmosphere at 1200 °C. The microstructures of the produced composites were examined by optical and (SEM) electron microscopy. The two phased structure formations of Duplex Stainless Steel belonging to DSS were observed.

In the second part of the research, the duplex stainless steel matrix with B_4C reinforced composites was fabricated by mechanical alloying and their microstructure, tribological mechanical, and corrosion properties were studied in detail.

After the matrix and reinforcement materials were mixed mechanically in a high-energy ball grinding device as powder, they were compressed in a uniaxial cold press at constant pressure and sintered in a fluid argon protective gas environment. B_4C , which is used as a reinforcement element, was added at different rates and its effects were examined. An increasing trend was observed in the porosity of the composites with the increase of B_4C reinforcement ratios.

As a result of the hardness test, it was observed that the addition of boron carbide B_4C to DSS increased the hardness at different rates. The increase in B_4C additives has steadily improved the wear resistance of Duplex Stainless Steel.

The addition of B_4C affected the pitting corrosion resistance of DSS less negatively than the composite material without additives.

Keywords: Stainless steel, sintering, mechanical alloying, duplex stainless steel composites, corrosion, wear.

1.1 Literatür Özeti

Toz metalürjisi (TM) bilinen yeni bir süreç olmasa da, ancak 20. yüzyılın başlarına kadar endüstriyel bir süreç olarak kullanılmamıştır. TM yöntemi, başlangıcından günümüze kadar çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım çelikleri, paslanmaz çelikler, süper alaşımlar, alüminyum ve titanyum alaşımları, bakır ve bakır alaşımları, nükleer malzemeler ve sermetler bunlara örnek gösterilebilir. Bu işlemle üretilen malzemeler, diğer işlemlerle yapılan ürünlere göre daha pürüzsüz bir yüzeye sahiptir ve genellikle nihayi işlem gerektirmez. TM ile seri üretimde kullanılan orijinal malzemelerin yaklaşık %97 sinin kullanıldığı ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda parçaların imalatı daha ucuz, istenen bileşimde, imalatı zor ve başka türlü işlenmesi zor olan parçaları kolaylıkla üretilmektedir. Pres basıncının değeri değiştirilerek farklı şekillere sahip ürünlerin kalitesi iyileştirilebilir ve uygun şekilde üretilebilmektedir. [1]

Endüstri geliştikçe, geleneksel malzemeler artık gelişen teknolojilerin taleplerini tek başına karşılayamaz duruma gelmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin üretimi ve elde edilen malzemelerin özellikleri ile ilgili araştırma ve geliştirme faaliyetleri 20. yüzyılın sonlarından beri devam etmektedir. Özellikle otomotiv, havacılık, askeri, nükleer ve denizcilik endüstrilerinde hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç bu çalışmaların ana itici gücü olmuştur. Bu bağlamda kompozitler, yüksek dayanım, kırılma tokluğu ve esneklik modülü, iyi aşınma ve yorulma direnci, yüksek mukavemet-ağırlık ve esneklik modülü, ağırlık oranları gibi mükemmel mekanik özelliklere sahip, mükemmel Korozyon direnci ve ısı direnci gibi çeşitli özellikler sergiler. rezistans. ve ses yalıtımı/iletim özellikleri ve tasarım yatkınlıklar gibi sebepler, nedeniyle endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla uygulanmaktadır. Ancak bahsedilen tüm bu özellikleri aynı anda elde etmek, her zaman mümkün olmamaktadır.

Geliştirilmiş özelliklere sahip kompozit malzemeler üretmek için metal matrislere seramik takviyelerin dahil edilmesi, son yıllarda yoğun araştırma konusu olmuştur. Metal matris kompozit (MMK) teknolojisi, takviye edilmemiş

metallerin ve alaşımların elastik modülünü, aşınma direncini ve mukavemetini geliştiren bir uygulamadır.[2]

Toz metalurjisi, çelik matrisli kompozitler için çekici bir işleme yöntemidir, çünkü çok çeşitli takviye hacim oranı ve boyutu kullanılabilir ve gömülü parçacıkların dağılımı daha düzenlidir. Çelik matrisli kompozitler, takviyesiz alaşımlarına göre daha yüksek sertlik ve aşınma direnci ortaya koymanın yanında elastik modülleri, işlenebilir ve sertleştirilebilen tüm malzemeler arasında en yüksektir. Öte yandan, tüm metal matrisli kompozitlerde olduğu gibi kırılma özelliklerinde (süneklik, tokluk) azalmalar beklenebilir. Son olarak, bu kompozitlerin korozyon ve oksidasyon özellikleri de dikkate değerdir.[2]

Dupleks paslanmaz çelikler (DPÇ) konusunda ise, paslanmaz çelik ailesinin en yenisidir. Yaklaşık olarak eşit miktarlarda ferrit ve ostenitten oluşan iki fazlı bir yapı ile karakterize edilirler. Östenit tokluk ve daha iyi korozyon direnci sağlarken, ferritik faz mukavemet artışında rol oynar. Dupleks paslanmaz çelikler böylece iki ana sınıfın, östenitik ve ferritik kalitelerin bazı özelliklerini birleştirir. Bu tür özellik bileşimi, dupleks paslanmaz çelikleri çok sayıda uygulama için çok çekici kılar.[3] Ancak yüksek çalışma sıcaklıklarında özel ihtiyaçlar gerektiren malzemelerdir. Bu nedenle, DPÇ'ler, kullanılabilecekleri alanların çeşitliliği nedeniyle birçok çalışmanın konusu olmuştur.[4]

Östenitik türe kıyasla üstün taneler arası ve stres korozyon direncine ek olarak, ferritik ve martensitik türe kıyasla üstün tokluk ve sünekliğe de sahiptirler. Bu uygun özellik kombinasyonu, bu paslanmaz çelik sınıfını petrol ve gaz, petrokimya, kağıt hamuru ve kağıt ve kirlilik kontrol endüstrilerinde yaygın olarak kullanımını sağlamıştır. Sıklıkla klorür içeren sulu çözeltilerde kullanılırlar ve burada stres ve çukurcuk korozyonuna daha duyarlı olan östenitik paslanmaz çeliklere göre avantajlı bir şekilde yerini almıştır.[5]

Genel bir ifadeyle, paslanmaz çelikler, üstün korozyon direnci, yüksek mukavemeti, tokluğu ve iyi kaynaklanabilirliği nedeniyle çeşitli uygulamalar için umut vaat eden malzemelerden biridir. Bununla birlikte, bu malzeme yetersiz aşınma direnci ve radyasyon toleransı konusunda beklentilerin altında kalmaktadır. Bu dezavantajlar, korozyon direncini etkilemeden matris malzemesinin yoğunluk, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerini iyileştirebilen silikon karbür, alümina, titanyum diborür, bor karbür B₄C ve diğerleri gibi

seramik parçacıkların paslanmaz çelik matrislere dahil edilmesiyle aşılabilmektedir. Bu nedenle, seramik takviyeli çelik bazlı kompozitler, endüstriyel uygulama için yoğun çalışmaların odak noktası olmuştur.[6]

Bu seramikler arasında bor karbür B_4C bilinen aşırı sertlikteki malzemelerden biridir, bor karbür, bor nitrür ve elmasın arkasında üçüncü sert malzeme olarak yerini almıştır. Nükleer santrallerde ortaya çıkan nötron radyasyonunu soğurma özelliğine sahiptir. Bor karbürün nükleer uygulamaları arasında ekranlama, kontrol çubuğu ve kapatma peletleri yer alır.[7]

Ek olarak, nötronları absorbe etme kabiliyeti nedeniyle, B_4C ile güçlendirilmiş kompozitler, nükleer endüstrilerdeki uygulamalar için etkili bir şekilde uygulanabilir. Alüminyum- B_4C kompozitleri, aşınmaya dayanıklı ve nötron emici malzemelerin üretiminde son yıllarda büyük ilgi görmüştür, Ancak bu malzemeler bazen yüksek basınçlı çalışma koşullarında karıncalanma ve aşınmaya maruz kalmaktadır. [6]

Yüksek sertlik, yüksek erime sıcaklığı, düşük yoğunluk, yüksek elastik modül, yüksek aşınma direnci ve yüksek nötron absorpsiyonu gibi üstün özelliklere sahip B_4C seramikler, su jeti kesicilerin ve kumlama makinelerinin nozulları, nükleer kontrol çubukları, radyasyon kalkanları, balistik zırh uygulamaları, metal buharlaştırma aspiratörleri gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.[8]

Ancak B_4C seramiklerin bu üstün özellikleri yanında düşük difüzyon katsayısı nedeniyle B_4C seramiklerini teorik yoğunluklarının %80'inin üzerinde sinterlemek çok zordur. B_4C seramiklerin yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi, son derece yüksek basınç uygulaması olan sıcak presleme işlemini gerektirir.[8]

Daha önce bahsedildiği gibi, kompozitler, tek bir malzemenin özelliklerine sahip, kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir. Kompozit imalat, kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin her birinin tek başına kullanılmasıyla elde edilemeyen bazı özelliklerin edilmesini mümkün kılmaktadır.[6] Bu anlamda takviye malzemenin etkisi, ana matrisin fiziksel, tribolojik ve mekanik özelliklerini geliştirmektir.[9] Böylece, hedeflenen uygulama alanı için gerekli özelliklerde yeni bir malzeme tasarlamak ve üretmek mümkündür. [6]

Seramik malzemelerle güçlendirilmiş çelik matrisli kompozitler ile ilgili literatür taramaları dikkate alındığında çok sayıda çalışma yapılmıştır. Literatür taramasında yapılan bazı çalışmalar hakkında özet bilgiler aşağıda verilmiştir;

****Kuforiji, Catherine, Nganbe, Michel, çalışmalarının amacının ağırlıkça %50 SS316 - ağırlıkça %50 Al_2O_3 kompozitlerinin aşınma davranışını üretmek, karakterize etmek ve araştırmak olduğunu bildirdi. Spesifik olarak, Al_2O_3 partiküllerinin yüksek hacimli fraksiyon ilavesinin paslanmaz çelik matris alaşımlarının aşınma direnci üzerindeki etkisi, şimdiye kadar literatürde sıklıkla bildirilen ağırlıkça %20'nin altındaki nispeten düşük seramik ilavelerinin aksine incelenmiştir. Bu amaçla, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak kompozit numuneler üretilmiş ve mikro yapı, sertlik, tokluk ve disk üstü top (ball on disk) aşınma karakterizasyonu ve testi kullanılarak incelenmiştir.**

Sonuç olarak, ağırlıkça %50 alümina partiküllerinin eklenmesi, aşınma oranında yaklaşık %86 azalmaya yol açarak ticari SS316L50 ağırlıkça %50 SS316L - ağırlıkça %50 Al_2O_3 kompozit numunelerine kıyasla hacim kaybında 7,2 kata kadar azalmaya yol açtı, bilyeli öğütme kullanılarak başarıyla üretildi, tek eksenli sıkıştırma ve sinterleme. 720 rpm'de 30 saat öğütme, öğütülmüş tozların havada kurutulması, 794.4 MPa sıkıştırma basıncı ve argon gazı atmosferinde 1 saat 1400°C'de sıvı faz sinterleme ile en yüksek yoğunluk, sertlik ve tokluk ve dolayısıyla en yüksek aşınma direnci elde edilmiştir.[9]

****Tjong, SC Lau, KC ve diğerleri. %20 hacim TiB_2 partikülleri ile güçlendirilmiş AISI 304 paslanmaz çeliğin HIP sıcak izostatik presleme ile hazırlandığını araştırdı. Bu demir esaslı kompozitin kuru kaymalı aşınma davranışı, pin-on-disk tekniği ile incelenmiştir. Sonuçlar, TiB_2 parçacığı ilavesinin yumuşak ve sünek östenitik paslanmaz çeliğin aşınma direncini iyileştirmede çok etkili olduğunu gösterdi.[10]**

****Pagounis, E.Talvitie, M. Lindroos, V. K. ve ark. TiC partiküllerinin yüksek Cr beyaz demir matrisine dahil edilmesinin aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini bildirmiştir. Matris yapısının Fe bazlı MMC'lerin aşınması ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığına dikkat çektiler. Daha yüksek sıcaklıklarda östenitleme işleminin kompozitlerin sertliğini, aşınma direncini ve darbe tokluğunu artırdığını bulmuşlardır.[11]**

****Szklaş, Zbigniew Lekki ve ark. (2018),** SiC takviyesinin kompozitlerin elektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için mekanik alaşımlama yoluyla Fe Co Cr Mn Ni alaşım tozlarına SiC parçacıkları eklemiştir. SiC ilavesi ile kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştiği ve korozyon özelliklerinin bozulduğu bildirilmiştir.[12]

****Abenojar ve ark. (2002, 2003),** demir bazlı 316L paslanmaz çelik kompozitte SiC takviyesini ve üretim sırasında sinterleme ortamının etkilerini araştırdı. Artan SiC içeriği ile kompozitin sertliğinin ve aşınma direncinin arttığını ve korozyon direncinin azaldığını bildirmişlerdir.[13]

****Van Dong, Pham, Phan, et. diğerleri,** nötronları absorbe etme kabiliyeti nedeniyle, B₄C ile güçlendirilmiş kompozitlerin nükleer endüstrilerdeki uygulamalar için etkili bir şekilde uygulanabileceğini bildirdi. Alüminyum-B₄C kompozitleri, aşınmaya dayanıklı ve nötron emici malzemelerin üretimi için son on yılda büyük ilgi kazanmıştır, ancak bu malzemeler bazen yüksek basınçlı çalışma koşullarında tutukluk ve aşınmaya maruz kalmaktadır.[6]

****Sun, Wei Qiang,Hu ve ark.** B₄C içeriğinin genetik algoritma programı aracılığıyla optimize edildiği nötron koruma özelliklerine sahip B₄C ile güçlendirilmiş SS304 kompoziti geliştirdi. Küresel karbür partiküllerin dahil edilmesiyle yoğunluk %33 oranında azaltılmış ve radyasyon toleransında önemli bir artış sağlanmıştır.[14]

Herhangi bir malzemenin sertliğinin aşınma özelliklerini etkilediği Balakrishnan ve Rajesh tarafından bildirilmiştir. Sert takviyeli yumuşak bir matrisin dahil edilmesi, yoğunluk gibi diğer özelliklerin iyileştirilmesiyle birlikte sertliği artırır. %3 takviye ile SS304-B₄C kompozitinin sertliğinde %7,5'e kadar artış sağlandı.[15]

****Pham Van Dong, Nguyen Huu Phan,** Çalışmalarının B₄C takviye yüzdesinin SS304'ün esas olarak yoğunluk, su emme kapasitesi, sertlik, COF ve kompozit malzeme takviyeli kompozitin aşınması üzerindeki etkisini sunduğunu belirtti. Kompozitin aşınması ve COF'u artan sertlik nedeniyle takviye yüzdesi ile ters orantılıdır. B₄C partiküllerinin TM yoluyla düzgün dağılımı ve çalışma sırasında temasta bir oksit tabakasının varlığı, aşınma sürecini stabilize eder, bu nedenle

aşınma ve COF %15'te, farklı kayma hızlarında saf malzemeye göre en düşüktür.[6]

****Silani Sahoo • Bharat B. Jha**, hacimce %2 ve 4 TiB₂ partikülleri içeren sıcak preslenmiş 304 paslanmaz çelik matris kompozitlerin mekanik ve aşınma davranışlarının sıcak presleme yöntemiyle başarılı bir şekilde sentezlendiğini bildirdi. Optimum sıcak presleme sıcaklığında ve TiB₂ partikül içeriğinde %92'nin üzerinde bir yoğunluk elde edildi. Kompozitlerin mikrosertliği ve akma dayanımının, takviyesiz emsallerine kıyasla önemli ölçüde iyileştiği bulundu. Kuru kayma aşınma davranışı ayrıca 0,3 m/s kayma hızında 35 N yük altında da incelenmiştir. Kompozitlerin aşınma direncinin, sert TiB₂ parçacıklarının düzgün dağılımı sayesinde iyileştiği bulundu.[16]

****Pagounis ve ark.** TiC, Al₂O₃ ve Cr₃C₂ ile güçlendirilmiş 316L çelik matrisli kompozitlerin aşınma davranışını araştırdılar. TiC partiküllerinin en yüksek aşınma direncine sahip çelik matrisi sağladığını, ardından Al₂O₃ ve Cr₃C₂'nin geldiğini belirtmişlerdir.[17]

****Tjong ve Lau**, AISI 304 paslanmaz çeliğin ve TiB₂ parçacıklarının çeşitli hacim fraksiyonları ile güçlendirilmiş kompozitlerin özelliklerini araştırdılar. Artan TiB₂ içeriği ile sertlik ve gerilme mukavemetinin arttığını ancak plastisitenin düştüğünü bildirdiler. Östenitik paslanmaz çeliğin aşınma direncini ve sünekliğini iyileştirmek için TiB₂ partiküllerinin eklenmesinin çok etkili olduğu belirtildi. Dört östenitik çelik-TiB₂ kompoziti HP-HT yöntemi ile elde edilmiştir. TiB₂ partiküllerinin eklenmesi, kompozitlerin sertliği ve tribolojik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. TiB₂ içeriğinin artmasıyla birlikte kompozitlerin aşınma hızının azalması, sert TiB₂ ilavesinin kompozitlerin aşınma direncini geliştirdiğini göstermektedir.[10]

****Ahmed, Dler A., Mulapeer, Mohammedtaher M.** farklı sıcaklıklarda AISI 304 ve AISI 2205'in SWR'sini (spesifik aşınma hızı) araştırmayı ve karşılaştırmayı amaçladılar. AISI 304'ün SWR'si, oda sıcaklığında AISI 2205'inkinden biraz daha yüksektir ve sıcaklık arttıkça fark artar. 460 C ve 570 C'de, AISI 304'ün SWR'si AISI 2205'in iki katından fazladır. SEM görüntüleri, AISI 304 numunelerinin AISI 2205 numunelerinden daha fazla aşındığını, aynı aşınma koşullarında, daha derin yivler, daha fazla plastik deformasyon ile göstermiştir. ve peeling. 500 C'ye

kadar yüksek sıcaklıklardaki özel uygulamalar için östenitik paslanmaz çelik AISI 304 yerine AISI 2205 önerildi.[18]

****Sulima, Iwona,Hyjek, Pawel Jaworska,et.al.**Bu çalışmada, ZrB_2 takviye faz içeriğinin kompozitlerin yoğunluğu, mikro yapısı ve mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. Sonuçlar, takviye fazı olmayan 316L östenitik paslanmaz çelik için elde edilen deneysel verilerle karşılaştırıldı. Kompozit mikroyapı incelemeleri, bir çelik matriste ZrB_2 takviye fazının homojen bir dağılımını ortaya çıkardı. Test sonuçları, zirkonyum diborid miktarının kompozitlerin özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. ZrB_2 'nin ağırlık fraksiyonundaki bir artış, Young modülünde ve mikrosertlikte bir artışa neden oldu. %20 ZrB_2 içeren kompozitler için mikrosertlik, takviyesiz 316L çeliğe göre iki kattan fazla yüksekti. Artan ZrB_2 içeriği ile sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı ve özgül aşınma oranı azalıyordu. Mekanik ve tribolojik özelliklerin en iyi kombinasyonu %20 ZrB_2 ile güçlendirilmiş çelik matrisli kompozitlerde elde edilmiştir.[19]

****S.Thirumalai Kumaran, M.Uthayakumar et.al.** 316 SS– B_4C kompoziti toz metalürjisi yöntemiyle hazırlanmış ve incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir: Takviyelerin düzgün dağılımı SEM görüntüleri ile doğrulanmıştır. 316 SS– B_4C 'nin spektrum analizi, kompozitte bulunan bileşenleri ortaya koymaktadır. Hazırlanan kompozit, bir nükleer reaktörün kontrol çubuğuna alternatif olarak önerilmektedir.[20]

****Mariappan, R,Kumaran, S.,Srinivasa Rao, et.al.**Araştırmaları, toz metalürjisi yoluyla dubleks paslanmaz çelikler geliştirmeyi ve sinterleme atmosferlerinin yoğunluk, mekanik özellikler ve mikro yapılar üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlıyor. 316L ve 430L alaşımlı tozların karışımından dubleks paslanmaz çelik bileşimi hazırlandı. Sinterlenmiş dubleks paslanmaz çelikler yoğunluk ölçümü, metalografi muayeneleri ve çekme testlerine tabi tutulmuştur. Kısmi vakumda sinterlenmiş dubleks paslanmaz çelik, diğer atmosferlerde sinterlenmiş paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında %96 teorik, çekme dayanımı ve ferrit içeriği ile en yüksek yoğunluğu göstermiştir. Argon, hidrojen ve kısmi vakumda sinterlenmiş paslanmaz çeliklerin mikro yapısı iki fazlı yapı göstermiştir.[21]

****Patel, Mahaboob,Muthu Vaidyanathan, R.,Sivaramanİlgili çalışma, zirkonya (ZrO_2) ile güçlendirilmiş PM 316L östenitik paslanmaz çelik matris kompozitlerin**

mikro yapısını ve mikro sertliğini incelemektedir. ZrO_2 , ağırlıkça %1 ila ağırlıkça %3 oranında eklendi. Tozlar, 70 kN'de 11 mm çapında ve 2 mm kalınlığında bir disk halinde sıkıştırıldı. Kompaktlar, ortam ve argon atmosferinde 1250 C°'de 30 dakika sinterlendi. Sinterlenmiş kompaktlar daha sonra mikrosertlik açısından analiz edildi. Çalışma, ZrO_2 takviyesinin, düzensiz gözeneklilik ve 316L SS parçacıklarını içine alan zirkonyadan oluşan bir mikro yapıya sahip PM 316L SS matris kompozitlerinin mikro sertliğini önemli ölçüde artırdığını açıklığa kavuşturdu.[22]

****Elayidom, Medha R, Abhishek, A S, Mohan, Akhil, Vijayakumar, et.al.** Bu çalışmada Bor Karbür, yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncini artırmak için 304 paslanmaz çelik alt tabaka ile güçlendirilmiştir. Kompozitler (15 numune) Toz metalürjisi yolu ile hazırlandı. Hacim yüzdesi %15'e kadar Bor karbür içeren paslanmaz çelik kompozitlerin başarılı üretimi üretildi. Toz metalürjisi ile iyi mukavemetli çelik bağlı bor karbür kompozit hazırlandı ve numuneler çeşitli sinterleme sıcaklıklarında sinterlendi. Bor Karbür takviyeli paslanmaz çelik metal matris kompozitler otomobil ve süt ürünleri endüstrileri için potansiyel malzemelerdir.[23]

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada; Toz metalurjisinde Fe-Cr-Ni elementel tozları ile çift fazlı paslanmaz çelik üretimi ve daha sonra bu yapı içerisine farklı oranlardaki bor karbür B_4C parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik alaşımlama ,konvansiyonel sinterleme yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Üretilen malzelerin XRD, SEM/EDS, Elementel haritalama gibi karakterizasyon analizleri, mekanik, tribolojik ve korozyon testleri ile özelliklere olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu tez kapsamında;

- 1) Elementel toz (Fe-Cr-Ni) karışımları ile en uygun çift fazlı çelik üretimi için mekanik alaşımlama ve sinterleme çalışması yaparak uygun parametreleri belirlemek.
- 2) Dupleks Paslanmaz çelik numunelerinin toz metalurjisi yöntemiyle üretiminden sonra, farklı oranlarda Bor karbür ilavesi ile takviyeli Çift fazlı paslanmaz çelik kompozit malzeme üretimini sağlamak,
- 3) Üretilen kompozitlere mekanik ve metalografik testler uygulayarak mekanik ve iç yapısal özelliklerini tayin etmek,

- 4) Kompozit malzemelere aşınma ve korozyon testleri uygulayarak tribolojik ve korozyon ortamında gösterdiği özellikleri belirlemek,
- 5) Hazırlanan kompozit malzemelere optik, SEM analizleri yaparak mikroyapılarının incelemesini yapmak,
- 6) Mevcut kompozitlerin EDS ve XRD analizleri ile yapı içerisindeki elementleri tespit etmek,
- 7) Üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin matris/takviye elemanın iç yapıdaki dağılım morfolojisini incelemek,
- 8) Takviye malzemenin etkisi ile , ana matrisin fiziksel, tribolojik, mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirmek,
- 9) Son kısım olarak çeşitli makale çalışmaları ile elde edilen verilerin karşılaştırarak kazanılan birikimle, gelecekte yapılacak olası çalışmalara ışık tutabilecek önerilerde bulunmak ana hedefler olacaktır.

1.3. Hipotez

Genel ifadeyle, paslanmaz çelikler, üstün korozyon direnci, yüksek mukavemeti, tokluğu ve iyi kaynaklanabilirliği nedeniyle çeşitli uygulamalar için umut vaat eden malzemelerden biridir. Bununla birlikte, bu malzeme yetersiz aşınma direnci ve radyasyon toleransı konusunda beklentilerin altında kalmaktadır. Bu dezavantajlar, korozyon direncini etkilemeden matris malzemesinin yoğunluk, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerini iyileştirebilen bor karbür B_4C ve diğer seramik parçacıkların paslanmaz çelik matrislere dahil edilmesiyle aşılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalarla üretilen bor karbür takviyeli DPÇ matrisli kompozitler, takviyesiz matris alaşımlarının özellikleri ile karşılaştırıldığında, yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci, yüksek sertlik ve yüksek korozyon direnci değerlerine ulaşılması beklenmektedir.

Üretilen kompozitlerin; yüksek erime sıcaklığı , yüksek sertlik, düşük yoğunluk, yüksek aşınma direnci , yüksek elastik modül, ve yüksek nötron emicilik gibi özelliklere sahip B_4C seramiklerinin kullanımı ile aşınmaya dayanıklı makine parçaları, sürtünmeye maruz kalan elemanlar, ısının etkisi altında çalışan parçalar, mukavemet ve korozyon direnci yüksek olması istenen ortamlarda, su jeti kesicileri ve kumlama makinelerinin nozulları ,radyasyon kalkanları nükleer kontrol çubukları, balistik koruyucu zırh uygulamaları, ve metal buharlaştırma aspiratörleri gibi çok geniş alanlarda kullanılması önerilmektedir.

2.1 Paslanmaz Çeliklerin Tanımı

Paslanmaz çelik, iyi korozyon direncine sahip bir demir alaşımı olarak tanımlanabilir. Paslanmaz çeliğin yüksek sıcaklıklarda oksidasyona ve sürünmeye karşı direncinin diğer birçok alaşımdan çok daha üstün olduğu bilinmektedir.

Ancak özellikle düşük oksijenli, yüksek tuzlu ve hatta dolaşımın zayıf olduğu ortamlarda tamamen paslanamayacağı söylenemez. Bu nedenle farklı kalitelerin geliştirilmesi ve belirli ortamlara uygun yüzey kaplamalarının kullanılması geçmişten günümüze bir gereklilik olmuştur.

Paslanmaz çeliğin üstün korozyon direnci, krom (Cr) bakımından zengin mikro yapısından kaynaklanmaktadır.

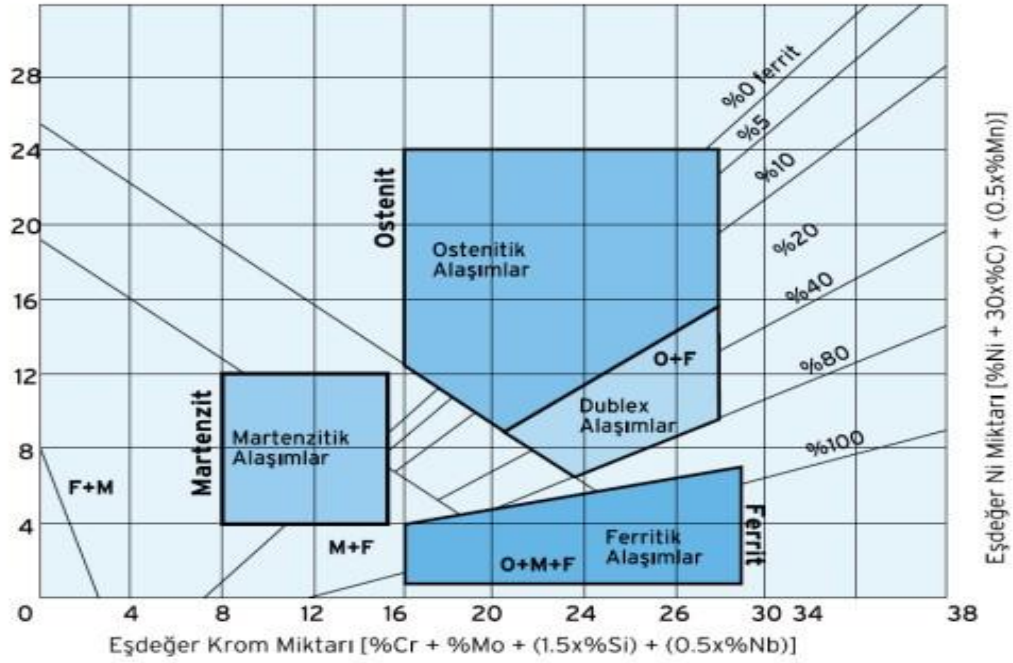
Genel olarak, minimum %11 krom içeriği, özellikle temiz atmosfer ortamlarında korozyon gibi kimyasal etkilerden kaçınmak için gerekli minimum % miktar olarak kabul edilir. Paslanmaz çelik, paslanma önleyici özelliklerini, krom açısından zengin oksitlerden oluşan ultra ince bir yüzey tabakası oluşturarak kazanır. Paslanmaz çelik sadece kromdan değil, aynı zamanda nikel (Ni), molibden (Mo), silikon (Si), manganez (Mn), karbon (C), kükürt (S), titanyum (Ti) ve niyobyum (Nb) gibi diğer alaşım elementlerini de içerebilir.

Paslanmayı önlemek için kromun yanı sıra, elementler arasında çukurlaşma direnci için Mo, çökeltme sertleşmesi için Cu, Ti ve Al, mukavemet için Mn ve N ve taneler arası korozyon azaltma için Nb bulunur.[1]

Paslanmaz çelikler genel olarak iç yapılarına göre 5 farklı gruba ayrılır. Bunlar; ferritik, martensitik, östenitik, çift fazlı, çökeltme sertleşmeli çeliklerden meydana gelir. Çeşitli paslanmaz çelik kalitelerinin kompozisyon açısından yerini belirten, oluşum mekanizmaları Schaeffler diyagramında Şekil 2.1'de gösterilmiştir.[61]

2.1.1 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Farklı alaşım elementleri ve işleme koşulları nedeniyle paslanmaz çelikler özelliklerine göre beş grupta toplanır. Bunlar östenitik, ferritik, martensitik, dubleks (çift fazlı) ve çökeltme sertleştirilmeli paslanmaz çeliklerdir.



Şekil 2.1 Schaeffler diyagramı[61]

2.1.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik çelikler, uygulamalar ve alaşım kaliteleri açısından en bol bulunan gruptur. Bu manyetik olmayan çelikler, hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda merkezi bir kübik kafes ile östenitik bir mikro yapıyı korurlar ve bu nedenle normalleştirme ve sertleştirme ısı işlemlerine tabi tutulamazlar. Tavlanmış durumda, düşük sıcaklıklarda bile iyi süneklik, tokluk ve şekillendirilebilirliğe sahiptir. Dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile artırmak mümkündür. Nikel ve manganez en önemli östenit oluşturunuculardır.[3]

Temel olarak östenitik paslanmaz çelikler krom-demir- nikel üçlü alaşımlarıdır, ve dünya çapında üretilen tüm paslanmaz çeliklerin yaklaşık %70'ini oluşturur. Östenitik kaliteler, AISI tarafından 200 ve 300 serisi olarak adlandırılır. Bileşim değerleri % 16-26 krom, % 10-24 nikel ve % 0,40 karbon max. Molibden, titanyum, niyobyum ve tantal gibi az miktarda alaşım elementleri içerir. Nikel, östenit bölgesini genişletme etkisi nedeniyle östeniti oda sıcaklığında stabilize eder. Molibden korozyon direncini artırır. Östenitik paslanmaz çelik, yüksek tokluk ve mukavemete sahiptir ve korozyon direnci, ferritik ve martensitik paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. Genel özellikleri;

- * Mükemmel plastisite ve form değiştirme kabiliyeti mevcuttur.
- * Düşük sıcaklıklarda yüksek darbe dayanımları vardır.

- * Östenitik yapıları sayesinde manyetik özellikleri yoktur.
- * Kaynaklanabilirliği iyidir.
- * Yenim direnci yüksektir.
- *Östenitik yapının kararlılığından dolayı plastik deformasyonla sertleştirilebilir
- *Düşük termal iletkenliğe ve yüksek ısıl genleşme katsayısına sahiptir.
- * Kafes yapısı, yüzey merkezli bir kübiktir.[24]

2.1.3 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, tüm paslanmaz çeliklerin içerisinde en çok çeşide sahip olandır. Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar.

En temel bileşimi kromolan ferritik çelikler, ferrit dengeleyici olan azmiktarda silisyumve niyobyum içerir.

Ferritik paslanmaz çelikler, %0,12' den az karbon , %12 - 30 arası krom içeren ferritik mikroyapıya sahip çeliklerdir. Ferritik kaliteler , AISI'de 400 serisi olarak anılır. En karakteristik özelliği yüksek korozyon direncidir, ısıl su verme şlem sertleşmesi sırasında herhangi bir martensitik dönüşüm göstermezler.

Büyük miktarda kroma ek olarak, östenitik yapıcı olarak az miktarda nitrojen veya nikel de vardır. Ferritik paslanmaz çelikler, kullanıldığı yere göre değişen krom içeriğine göre 3 türü vardır.Bunlar;[25]

- *Krom miktarı %11-13 arasında olanlar (AISI 409 ve 405 kaliteleri)
- *Krom miktarı yaklaşık %17 olanlar (AISI 434 ve 430 kaliteleri)
- *Krom miktarı %19-30 arası olan ve yüksek kromlu olarak ifade edilenler.

Ferritik paslanmaz çeliklerin genel özellikleri;

- *Korozyona karşı direnci yüksektir.
- *Orta derecede sünekliğe sahiptir.
- *Gerilme sertleşmesi ile mukavemet arttırılır.
- *Nikel içermediği için nispeten ucuzdur.
- * Manyetik özelliklere sahiptir.
- *Dayanıklılıkları düşüktür. Kırılmalığa duyarlılık yüksektir.
- * Kafes yapısı hacim merkezli kübiktir.

1000°C' nin üzerine, özellikle 1200–1300°C'ye ısıtıldıklarında aşırı tane büyümesi nedeniyle çok kırılmalı hale gelirler. Bu durum tane sınırlarında

olağan dışı bir şekilde şiddetlenir, ısıtma işlemi düzeltilemez, ancak haddeleme ve dövme gibi sıcak mekanik işlemlerle düzeltilebilir.

Temiz veya kirli atmosferde çok kararludur. %16-18 Cr ferritik paslanmaz çelik, korozyon direnci için en yaygın olarak kullanılmaktadır. 60-70°C'ye kadar nitrik asitlere karşı, hareketli deniz suyuna, çeşitli sıcaklıklardaki tuzlu sulara, zayıf asitlere karşı sorunsuz kullanılırlar.

2.1.4 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Bu yapıya sahip alaşımlar %0,1-1 C ve -%17 Cr içerir. Martensitik paslanmaz çelikleri diğer paslanmaz çeliklerden ayıran başlıca özellikler şunlardır: Düşük karbon içeriğine sahiptir ve ısıtma işlemi sertleştirilebilir. Bu çelikler, karbon çelikleri gibi su verme sonucunda faz dönüşümlerine uğrayarak çok sert bir yapı oluştururlar. Atmosferik korozyona dayanıklıdır. sertleştirme sonrası martensitik bir yapı elde etmek için Cr ve C oranı dengelenir. Martensitik çelikler manyetiktir ve çoğunlukla ısıtma işlemi direnci gerektiren korozyon tehlikesi olan alanlarda kullanılırlar. 403, 410, 416 ve 420 bu grubu en iyi temsil eden ürünlerdir.[26]

2.1.5 Çift Fazlı (Dupleks) Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler, ferrit ve östenitin mikroyapının birleştiği paslanmaz çeliklerdir ve Latince adı "iki parçadan yapılmış" olarak ifade edilir.

Östenitik yapı süneklik ve genel korozyon direnci sağlarken yapı içindeki ferrit, mekanik dayanım ve gerilimli korozyon çatlamasına karşı direnç sağlar.

Dupleks paslanmaz çeliğin diğer paslanmaz çelik türlerine göre başlıca avantajları:

Yüksek mekanik özellikleri, diğer paslanmaz çeliklere göre ince cidarlı parçaların kullanımına olanak sağlar. Limitleri, kaynak işlemi sonrası ısıdan etkilenen alanda ferritleşme işlemi nedeniyle çukurlaşma direncinde bir azalma ve ısıtma yaşlanma nedeniyle gevrekleşme nedeniyle servis sıcaklıklarının 260-300 °C ile sınırlandırılmasıdır. Dupleks paslanmaz çelikler, %0,03 ila %0,04 arasında değişen bir karbon içeriğine sahiptir ve mükemmel mekanik özellikleri ve korozyon direnci nedeniyle petrokimya ve denizcilik endüstrilerinde ve boru hatlarında kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliğin bileşiminde bulunan bir alaşım elementi olan kromun karbona eğilimi yüksektir. Krom, demir ızgarada çözünmek

yerine Cr_{23}C_6 karbürü karbonla oluşturmaya tercih eder. Bu oluşum sonucunda demir kafes içinde çözünen Cr_{23}C_6 krom miktarı azalır ve malzeme paslanmazlık özelliğini kaybeder. [27] Bu nedenle, paslanmaz çeliğin düşük karbon oranı içermesi arzu edilir. Dupleks paslanmaz çelik, bileşiminde % 6 oranında nikel içerir. Krom, ferrit yapısını stabilize eder ve nikel, östenit oluşumuna öncülük eder. Molibden, malzemedeki ferrit içeriğini artırmakla birlikte malzemenin mekanik mukavemetini de artırır. Azot, korozyon direncine yardımcı olur ve östenit içeriğini artırır. [27]

Dupleks paslanmaz çelikler, gerilimli korozyon çatlamasına ve çukurlaşma yenimine (korozyon) karşı daha dirençlidir ve östenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek mekanik dayanıma sahiptir. Bu nedenle, genellikle nükleer santrallerde, petrol ve gaz boru hatlarında, kimya tesislerinde ve açık deniz alanlarında kullanılırlar. Dupleks paslanmaz çelikler, paslanmaz çelik levhalar, ısı eşanjörleri, kriyojenik kaplar, gemi yapımı, kağıt endüstrisi, tuzlu su ve deniz suyu ortamları için östenitik paslanmaz çeliklere göre daha dayanıklı malzemeler olarak kullanılmaktadır. [28]

2.1.6 Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, sertleştirilebilir paslanmaz çeliklere göre daha yüksek akma dayanımına ve yenim direncine sahiptir. Bu alaşımların mekanik özellikleri, Ti, Nb , Cu, Al, ve Mo elementlerinden bir veya daha fazlasının kullanıldığı çökeltme sertleştirme ısı işlemiyle iyileştirilir. Çökeltme sertleştirme paslanmaz çelikleri martensitik, yarı östenitik ve östenitik çeliklere ayrılır. Östenitik PH çelikleri düşük martenzit başlangıç sıcaklığına sahiptir ve martenzite dönüştürülemez. Yarı östenitik çökelme sertleştirme çeliği, ısı işlem sıcaklığından soğutulduğunda kolaylıkla şekillenebilen bir yapıya sahiptir.

Martenzite ikincil şekillendirme dönüşümü, uygun ısı işlemle karbon ve diğer alaşım elementlerinin çökertilmesiyle elde edilir. [5] 17-4 PH gibi martensitik paslanmaz çelikler, yüksek östenitleme sıcaklıklarından hava soğutmasıyla tamamen martensite dönüştürülebilir ve en yaygın çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerdir. Oda sıcaklığının biraz üzerinde bir martensit bitiş sıcaklığına sahiptirler. Bu nedenle oda sıcaklığında martensitiktirler. [29]

2.2 Paslanmaz Çeliklerin Toz Metalurjisi İle Üretimi

Otomotiv, medikal ve havacılık sanayi ve diğer alanlar gibi geniş uygulama alanlarına sahip çelik bileşenlerin imalatında; toz metalürjisi (TM) yöntemi, karmaşık bir şekle ve net şekle veya ağa yakın şekle sahip küçük bileşenlerin elde edilmesini sağlar. Toz metalürjisi yöntemleri ayrıca yüksek yüzey kalitesi, yüksek mukavemet/tokluk gibi iyi mekanik ve fiziksel özellikler sağlar.[30]



Şekil 2.2 TM/Toz metalurjisi akış rotası

2.2.1 Paslanmaz Çeliklerin Toz Metalurjisi ile Üretiminde Tozların Hazırlanması

Toz üretim süreçleri, üretilen tozların boyutunu, şeklini, saflığını, mikroyapısını, maliyetini ve diğer özelliklerini belirler. Bir toz üretim yönteminin diğer yöntemlere tercih edilmesi, uygulanabilirliği, ekonomik olması, toz özellikleri ve uygulama alanları açısından önemlidir [6]. Toz metalürjisi genellikle toz karışımları kullandığından, tozlar preslemeden önce verimli bir şekilde karıştırılmalıdır. Karıştırma prosesinin asıl amacı toz karışımının homojen olmasını sağlamaktır. Farklı boyut, şekil ve yoğunluktaki tozların tekdüze karıştırılması, üretilen parçaların performansını artırır [7]. Başarılı bir presleme ve sinterleme için başlangıç tozu karıştırılmalıdır. Karıştırma ve harmanlama sırasında dikkate alınması gereken birkaç faktör vardır.

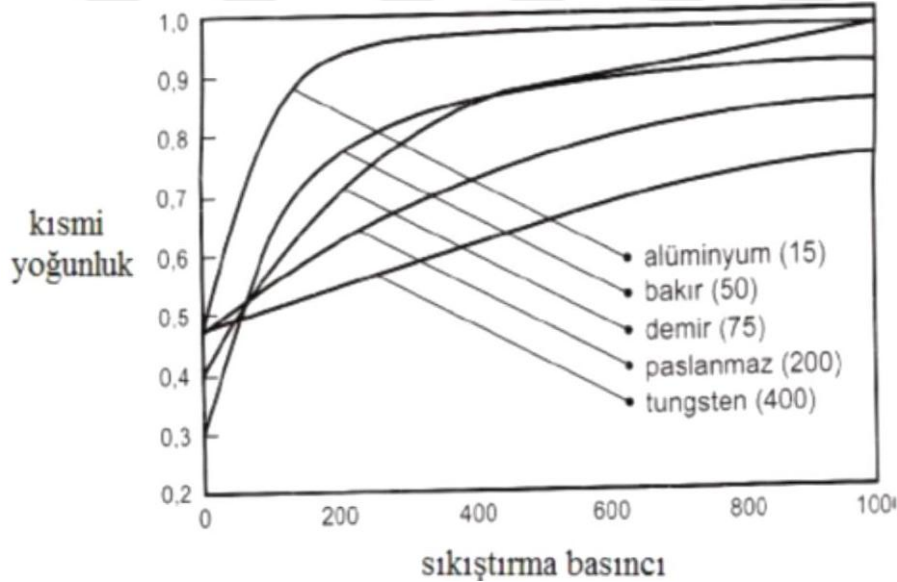
Tozların fiziksel karakteristikleri, Karıştırma süresi, Nemlilik ve atmosfer koşulları, Karıştırıcı boyutları, Karıştırıcıdaki toz hacmi, Dönme hızı, karıştırma hızı.[31] Toz karıştırma işlemine başlamadan önce alaşım tozları, yağlayıcılar, bağlayıcılar, sinterleme yardımcıları vb. tozun kalıptan kolayca ayrılmasını veya kalıba yapışmasını sağlamak için yağlayıcılar ve topaklayıcılar eklenir. [6]

Tozlar arasındaki ve toz kütleleri ile kalıplar arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve preslemeden sonra çatlama olmadan kalıptan çıkarmayı kolaylaştırmak için yağlayıcılar eklenir. Karışıma eklenen kayganlaştırıcılar tipik olarak stearik asit, kalsiyum stearat, çinko stearat ve lityum stearattır. .[32]

2.2.2 Paslanmaz Çeliklerin Toz Metalurjisi ile Üretiminde Tozların Preslenmesi

Metal tozları kalıplanırken, tozun kalıp boşluğunu yeterince doldurması ve tamamen engellenmemiş olması arzu edilir. Toz bir kalıpta soğuk preslenecekse, mümkün olduğunca teorik yoğunluğa yakın olması arzu edilir. Aynı sıkıştırma basıncına rağmen, her bir metal tozunun sıkıştırılması ile elde edilen yoğunluk, o malzemenin teorik yoğunluğundan önemli ölçüde farklıdır. [7]

Preslemenin temel amacı, serbest biçimli toz parçacıklarının yük altında ham yoğunluğu ve mukavemeti elde etmek için istenen şekle sıkıştırılması işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu proses için yaygın olarak, hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılmaktadır. Preste kullanılan basınç 70-700 MPa, pratikte kullanılan basınç ise genellikle 145-450 MPa'dır.



Şekil 2.3 Çeşitli metal tozların sıkışma ve yoğunluk özellikleri[18]

Şekil 2.3’de farklı metallerin sıkışma özellikleri verilmektedir. Görüldüğü gibi, başlangıçta düşük basınçta yoğunluk hızla artar ve gözenekler kapandıkça toz yoğunlaşmaya karşı daha dirençli hale gelir. Tane sertliğinin preslenebilirlik için önemli bir faktör olduğu açıktır. [34]

Toz metalurjisi işlemi ile üretilen bir ürünün sinterleme aşamasına geçebilmesi için tozun kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğun olması gerekmektedir. Bu bağlamda farklı metal toz malzemelerin farklı presleme basınç aralıkları olduğunu dikkate almak gerekir.(Tablo 2.1) Kalıp içerisinde sıkıştırma, toz preslemede en yaygın sıkıştırma tekniğidir.

Kalıptaki toz , sabit basınç altındayken tanecikler birbiri üzerinde kayar, sıkışır ve şekil değiştirir. Bu işlemin bir diğer amacı da istenilen gözenekliliği sağlamaktır. Toz metalurjisinde uygun bir üretim metodu uygulamaya koymak için toz sıkıştırma mekanizmalarının tanınması ve uygun yöntemin belirlenmesi önem arzeder.[35]

Tablo 2.1 Toz malzemelerin sıkıştırma basınçları.[35]

MALZEME	SIKIŞTIRMA BASINCI (MPa)
Pirinç	414-687
Alüminyum	69-276
Alumina	110-138
Karbon	138-165
Ferritler	110-165
Demir (düşük yoğunluk)	345-414
Demir (orta yoğunluk)	414-552
Demir (yüksek yoğunluk)	483-827
Tantal	69-138
Tungsten	69-138

Tablo 2.2 Toz sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması.[35]

Proses	Kalıp Maliyeti	Yoğunluk	Üretim Hızı	Ek İşlem	Malzeme	Boyut	Yatırım Maliyeti
Tek Yönlü Pres	Düşük	Düşük	Hızlı	Yok	Metal	2-D	Düşük
Çift Yönlü Pres	Orta	Orta	Hızlı	Yok	Metal	2-D	Orta
Sıcak İzostatik Şkl.	Yüksek	Yüksek	Yavaş	Yok	Metal/ Seramik	3-D	Yüksek
Soğuk İzostatik Şkl.	Yüksek	Yüksek	Yavaş	Yok	Metal/ Seramik	3-D	Yüksek
Çamur Döküm	Düşük	Orta	Yavaş	Kurutma	Seramik	3-D	Düşük
Şerit Döküm	Düşük	Yüksek	Yavaş	Kurutma	Seramik	2-D	Düşük
Ekstrüzyon	Yüksek	Yüksek	Hızlı	Kesme	Metal/ Seramik	2-D	Orta
Toz Haddeme	Düşük	Yüksek	Hızlı	Kesme	Metal	2-D	Orta
Enjeksiyon	Düşük	Yüksek	Yavaş	Kurutma	Metal/ Seramik	3-D	Orta

2.2.3 Paslanmaz Çeliklerin Toz Metalurjisinde Uygulama Alanları

Sinterlenmiş paslanmaz çelikler, yüksek mekanik özellikleri ve iyi yenim (korozyon) dirençleri nedeniyle birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. Karlılık, yüksek boyutsal tolerans, şekil tekrarlanabilirliği ve enerji tasarrufu açısından toz teknolojisi ile üretilen parçaların ana tedarikçisi otomotiv beyaz eşya endüstrileridir.

Toz metalurji paslanmaz çelikleri, özellikle ferritik kaliteler, dikiz aynaları için montaj braketlerinde, kilitlenmeyen fren sistemleri için ton tekerleklerinde ve ayrıca egzoz flanşları gibi parçalarda uygulama alanı bulmuştur.

Otomotiv pazarı, üretilen arabalarda büyük miktarlarda yeni tasarlanmış sinterlenmiş parçalar sunmaktadır. Yeni araba konstrüksiyonları en az altı toz metal flanş parçası ile donatılmıştır. Paslanmaz çelik, korozyona ve oksidasyona karşı direnci sebebiyle toz metal flanşlar için tercih edilen malzemedir. [3]

2.2.4 Mekanik Alaşımlama M/A

M/A, oksit veya karbürle güçlendirilmiş alaşımlar, inert atmosferde, yüksek enerjili değirmenlerde kuvvetli bir şekilde öğütülmesi ve sürekli deformasyon, kırılma, soğuk kaynak, yeniden kırılma vedahil olmak üzere kaynaklanma işlemlerini içeren homojen dağılımlı, kimyasal ya da ısı işlem gerektirmeyen bir katı hal reaksiyonudur. [14] M/A işlemi, tozların öğütüldüğü ve herhangi bir zamanda paslanmaz çelik bir haznede sertleştirilmiş çelik, tungsten veya sert seramik bilyelerin karıştırıldığı bir alaşımlama işlemidir.

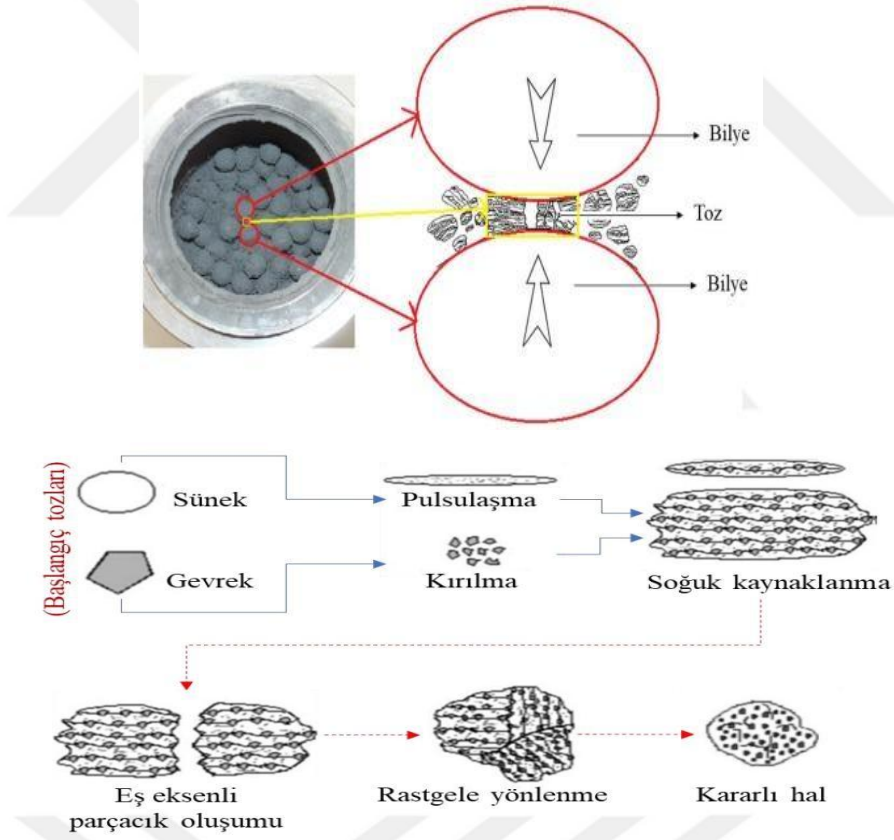
M/A'nın ekonomisi ve geniş uygulaması büyük avantajlar sağlar. İşlem sırasında meydana gelen ergime sorunları, homojensizlikler ve istenmeyen reaksiyonlar M/A yöntemi ile ortadan kaldırılabileceği gibi, birbiriyle karıştırılması zor veya imkansız olan elementlerin karıştırılabilirliği de mümkündür. [36]

2.2.5 Mekanik Alaşımlama M/A Mekanizması

Öğütme sırasında toz partikülleri, bilye duvarları ve karıştırıcı bilyeler arasında çarpışmalar meydana gelir. Bunlardan en etkili olanı bilye bilye çarpışmadır. Sert seramik parçacıklar matrisin içine gömülür ve parçacıklar, çelik bilyelerin çarpışması ve bilyeler arasında bulunan tozun toz haline getirilmesiyle ince bir şekilde ezilir.[36]

Değirmende öğütme sırasında toz tanecikleri arasında yassılaşıma, soğuk kaynaklanma, kırılma ve yeniden kaynaklanma meydana gelir. Darbe kuvveti, toz parçacıkları arasında plastik deformasyona neden olarak gerinim sertleşmesine ve kırılmaya neden olur. Ezilme sonrası oluşan yeni yüzeyde kullanılan tozun özelliklerine bağlı olarak yeniden kaynaklanma gerçekleşebilmekte ve tane boyutu orijinal tane boyutunun neredeyse üç katına çıkabilmektedir. Deformasyon ilerledikçe gerinim sertleşmesi artar. [37]

Öğütme haznesinde iki bilye çarpıştığında aralarında az miktarda toz bırakır (Şekil2.4).Bu işlem sırasında toz parçacıkları iki biçimde değişime uğrar. Toz parçacıkları esnek ise, pul pul olacak ve soğuk kaynak meydana gelecektir. Toz parçacıkları kırılgansa, çabuk kırılma eğilimi gösterecektir. Sonunda, esnek ve kırılgan tozlar bir araya geldiğinde ise esnek olanlar pulsu hale gelecek gevrek olanlar hem kırılacak hem de esnek toz içerisine gömülecektir.[38]



Şekil 2.4 M/A sırasında soğuk kaynaklanma ve kırılma mekanizmaları [38]

2.2.6 Mekanik alaşımlamada işlem parametreleri

1. Öğütme Haznesi, 2. Öğütme hızı, 3. Öğütme zamanı, 4. Öğütücü malzemesi,
5. Bilye-toz ağırlık oranı, 6. Hazne doldurma oranı, 7. Öğütme atmosferi,
8. Öğütme sıcaklığı, 9. İşlem kontrol kimyasalı (İKK)

1.Öğütme Haznesi;

MA uygulanan malzeme için öğütme haznesi çok önemlidir. Öğütme sırasında öğütme elemanları haznenin iç duvarlarına çarparsa, bir miktar malzeme kırılabilir ve toza karışabilir. Bu nedenle hazneden çıkarılabilen parçalar tozu kirletebilir veya kimyasal bileşimini değiştirebilir. Sertleştirilmiş çelikler, takım çelikleri, sertleştirilmiş krom çelikleri, ısıtılmış işlem görmüş çelikler, paslanmaz çelikler, WC-Co çelikleri ve rulman çelikleri öğütme hazne yapımında en çok kullanılan malzemelerdir.

2.Öğütme Hızı; Mekanik alaşımlamada en önemli parametrelerden biri öğütme hızıdır. Öğütücü hızı arttıkça toza daha fazla enerji aktarılır. Öğütücü tasarımına bağlı olarak, elde edilebilecek maksimum hızda belirli sınırlar vardır. Örneğin, geleneksel bir bilyalı değirmende, bilyeler devir sayısı arttıkça haznenin iç duvarına paralel olarak yapışır ve düşmez ve darbe kuvveti oluşturmaz.[37]

3.Öğütme Zamanı; Mekanik alaşımlama işleminde zaman en önemli ve etkili parametredir.Mekanik alaşımlamada süre, öğütücü türüne, öğütme yoğunluğuna, öğütme sıcaklığına ve bilya-toz oranına bağlıdır.Aşırı öğütme, kompozit malzemenin içerisinde kirliliğin artmasına ve istenmeyen safsızlıklara neden olabilir. Bu nedenle, MA'daki öğütme süresi uygun şekilde ayarlanmalıdır.

4.Öğütme Malzemesi; MA'da aşındırıcı olarak sertleştirilmiş çelik, sertleştirilmiş krom çeliği, takım çeliği, ısıtılmış işlem görmüş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co ve rulman çeliğinden yapılmış bilyeler kullanılmaktadır. Özel amaçlar için üretilmiş seramik esaslı bilye kullanımı da yaygındır. Bilye, toz üzerinde yeterli darbe kuvveti sağlamak için uygun bir boyutta olmalıdır. Öğütme haznesi ve öğütme elemanları, alaşım tozunun aşırı kirlenmesini önlemek için tercihen aynı malzemedan yapılır. Bilya küreleri genellikle alaşımlanacak tozun yapısına ve kimyasına göre seçilir. Kullanılan bilyeler aynı tipte veya farklı boyutlarda olabilir. Budurumda bilyeler aynı miktarda enerjiye sahip değildir. [37]

5.Bilye/Toz Oranı; MA'nın dolum derecesi olarak da bilinen bilya-toz oranı, öğütme işlemindeki en önemli diğer parametrelerden biridir. Genel olarak, 1/1

ile 220/1 arasında bilye/toz oranları ile çalışmalar mevcuttur. Ağırlıklı olarak laboratuvar araştırmalarında kullanılan küçük kapasiteli değirmenler için bilye/toz oranı 10/1 civarında olacak şekilde seçilir. Yüksek kapasiteli seri üretim değirmenlerde (örn. 50/1, 100/1) bu oran yükselir, böylece artan enerjiye karşılık alaşımlama süresi kısalabilir. Ancak bilya sayısının artırılması toz kirlenmesi gibi olumsuz etkileri hızlandırabilir.[37]

6.Hazne Doluluk Oranı; Bilyaların ve toz parçacıklarının serbestçe hareket edebilmesi için öğütme haznesinde yeterli boşluk olmalıdır. Bu, toza etki eden darbe kuvvetini artırır ve toz parçacıklarının alaşımlanmasını destekler. Bu nedenle haznenin ve bilye ve toz alma kapasitesi önemlidir.

Çok miktarda bilye ve toz, öğütücü hazne içindeki sirkülasyonu kısıtlar, darbe enerjisini azaltır ve üretim hızını yavaşlatır. Hazne doldurma oranı düşükse, artan enerji kirlenme sorunlarına neden olabilir. Haznede %50'yi geçmeyecek şekilde boş kalması genellikle önerilir.[37]

7.Öğütme Atmosferi; Toz kirliliği, öğütme atmosferinden büyük ölçüde etkilenir. Bu nedenle öğütme sırasında haznenin havasının alınması,ve argon veya helyum gibi inert bir gazla doldurulması gerekir. Oksidasyon ve toz kirlenmesini önlemek için yaygın olarak yüksek saflıkta argon gazı kullanılır.[37]

8.Öğütme Sıcaklığı; Malzemenin cinsine bağlı olarak MA işlemi genellikle oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda gerçekleştirilir. MA sırasında plastik deformasyon nedeniyle artan, sıcaklığı sabit tutmak için hazne çevresinde soğutma sıvısı veya gaz sirkülasyonu sağlanır. Artan sıcaklıklar aşırı aşınmaya ve toza maruz kalmaya neden olabilir. Bu tür sorunları ortadan kaldırmak için öğütme sıcaklığını kontrol etmek gerekir.

9.İşlem Kontrol Kimyasalları (İKK); Mekanik alaşımlama işlemi, deformasyona bağlı kaynaklanma ve kırılma şeklinde meydana gelmektedir. Özellikle sünek tozlar soğuk kaynaklanma ve sıvanma eğilimindedir. Sünek tozların kırılmaya karşı direnci, tozların incelmesini geciktirmektedir. MA sırasında eklenen kimyasallar hem kırılma mekanizmalarını hem de kaynağı aktive eder. Bu kimyasallar sıvı, katı ve gaz hallerini alabilirler. Genel olarak, katkı miktarı yaklaşık %1,5'dur. Bu kimyasalların çoğu sinterleme sırasında ortamdaki atılır. Ancak, bazıları yapıda kalıcı olarak kalır. Proses kontrol kimyasalları elde edilen tozun saflığını doğrudan etkiler. Öğütme sırasında kademeli olarak veya doğrudan sisteme eklenen İKK miktarı, ortalama toz boyutunu ve nihai şekli belirler.

Ayrıca, İKK'nın türü ve miktarı, tozların etkili bir şekilde öğütülmesi veya alaşımlanması için çok önemli parametrelerdir. Bunun nedeni, İKK'nın öğütme sırasında öğütülen tozun yüzeyine yapışarak soğuk kaynak veya topak oluşumunu azaltması ve tozun daha çabuk parçalanmasını sağlar.[37]

2.2.7 Öğütücü Türleri

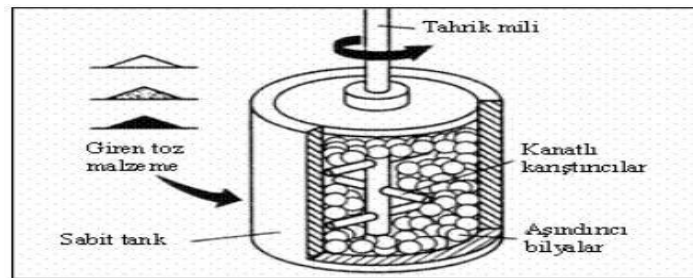
Mekanik alaşımlanmış/öğütülmüş tozlar üretmek için çeşitli yüksek enerjili öğütme ekipmanları kullanılır. Bu cihazların herbiri tasarımları, kapasiteleri, öğütme verimlilikleri ve soğutma, ısıtma vb. gibi etkenler açısından değişiklik gösterirler. Aşağıdaki bölümlerde, MA/MM amaçlı güncel kullanımda olan daha yaygın öğütücülerden bazıları açıklanmaktadır.[37]

A-SPEX tipi öğütücü; (Şekil2.5) Laboratuvar araştırmaları için kullanılır ve bir seferde yaklaşık 10-30 gr toz öğütebilir. Bu ekipmanın haznesi, ileri geri ve yan yana hareketlerle dakikada binlerce kez hareket eder. Hazne her hareket ettiğinde, toplar haznedeki tozlara çarparak onları ezer ve karıştırır.[37]



Şekil 2.5 SPEX tip çalkalamalı öğütücü. .[37]

B-Atritör tipi; İçerisinde metal karıştırma çubuklarına sahip dik bir silindirden oluşur. Birbirine dik olarak yerleştirilmiş çubuklar, bir eksen etrafında dönerek haznedeki bilyelere yüksek enerji aktarır. Bilyeler haznenin duvarlarına çarpıp birbiriyle çarpıştıkça ortalama toz boyutu küçülür. Bir atritor öğütücü, tek seferde büyük miktarda (1 - 50 kg) toz öğütebilen bir öğütücüdür (Şekil 2.6). Haznenin dışında bir soğutma sıvısı dolaşarak öğütme sırasında sıcaklık kontrolü sağlar.[37]



Şekil 2.6 Atritör tipi öğütücü değirmenin hazne iç görüntüsü .[37]

C-Gezegen tipi; (Şekil2.7) Gezegen tip öğütücü, bir seferde 100-200 gr toz öğütebilir. Öğütme haznesi bir gezegen gibi işlev gördüğü için "gezegensel" adı verilmiştir. Bunlar döner alt disk tablasına monte edilir ve özel bir mekanizma ile kendi eksenini etrafındaki hareketi alarak öğütme işini meydana getirir. Gezegensel dönen hazne tarafından oluşan merkezkaç kuvveti ve dönen alttaki diskin oluşturduğu ek kuvvetle birlikte, çanak içindeki toz zemin ve bilyeler üzerinde hareket ederler.

Öğütücü ve öğütücü bilyeler haznede serbestçe dolaşır karşı duvara çarptıkça sürtünme hareketi devam eder. Bir SPEX öğütücünden daha düşük enerjili bir değirmen olarak kabul edilebilir .[37]



Şekil 2.7 Gezegen (planetary) tipi öğütücü.[37]

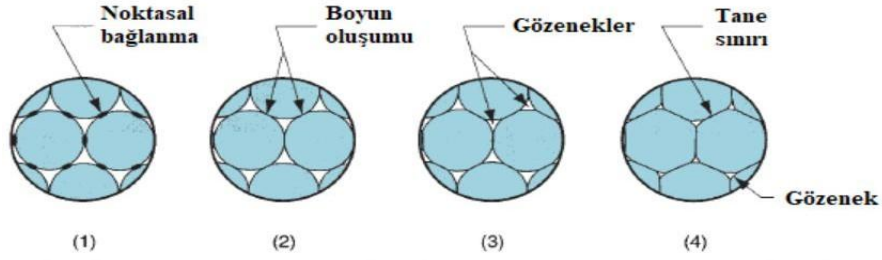
2.3 Sinterleme

Teknik olarak sinterleme, metal ve seramik tozlarına termal enerji uygulayarak kontrollü yoğunlukta malzemeler geliştirme sürecidir. Bu, tozları ergime noktalarının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtma ve tozların biraraya gelerek dayanımı yüksek ürünler elde edilmesi için yapılan bir ısıtma işlemi türüdür. Partikül bağları, katı içindeki atomların hareketinden dolayı malzemenin erime sıcaklığının altında gerçekleşir. Sinterleme işlemi, sıkıştırılmış tozların boyutunu ve gözenekliliğini belirli morfolojilerde değiştirerek tozların güçlü bir şekilde bağlanmasını sağlamak için uygulanır.[39]

Sinterleme işleminde bir toz karışım, tek tür malzemeden oluşuyorsa tek bileşenli sistem, iki veya daha fazla malzemeden oluşuyorsa çok bileşenli sistem olarak tanımlanır. Çok bileşenli tozlar için sinterleme sıcaklığı, bileşenlerden birinin erime sıcaklığının hemen altında veya üzerinde olabilir. Sinterleme sıcaklığının bir fonksiyonu olarak sinterleme işlemi sırasında taneler arası bağ oluşumu hacimsel ve yüzeysel yayılım veya adezyon yoluyla gerçekleşir.

Sinterleme işlemi esnasında sıcaklığın bir fonksiyonu olarak iki büyük değişim meydana gelir. (Şekil 2.8)

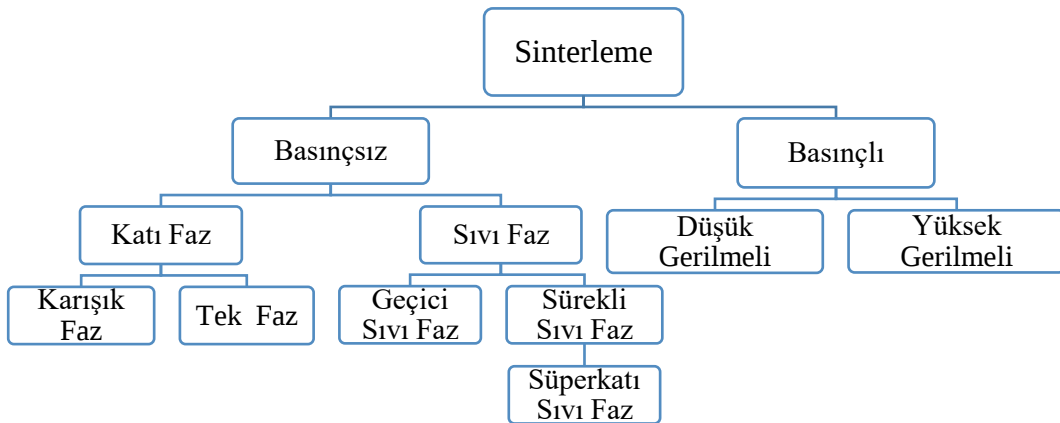
Bunlar;[39] *Gözeneklerin miktarının azalışı, gözeneklilik oranının düşüşü, ve taneler arasındaki temas yüzey alanında artışların meydana gelmesidir. Sinterlemenin başlangıcında, toz partikülleri noktasal temas halindedir.[31]



Şekil 2.8 Sinterleme aşamalarına göre gözenek yapısındaki değişim. [31]

Sinterleme işlemi sırasında, ön presleme işlemine tabi tutulan ve ham parçalara işlenen toz, belirli bir sıcaklıkta (tipik olarak $T > 0,5 T_e (K)$) ısıtılma işlemine tabi tutulur. Sinterlemede temel amaç, presleme sonrası elde edilen ham malzemenin gözenekliliğini azaltmaktır. Sinterleme prosesi sırasında preslenmiş ham malzemede çeşitli değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler ;

- ✓ Sıvı ve gaz geçirgenliği, ✓ Sertlik ve kırılma tokluğu, ✓ Dayanım ve elastiklik modülü, ✓ Elektriksel ve termal iletkenlik, ✓ Parçacık boyutu ve şekil dağılımı
- ✓ Gözenek boyutu ve şekil dağılımı, ✓ Ortalama gözenek boyutu ve şekli
- ✓ Ortalama parçacık boyutu, boyutu ve şekli, ✓ Kimyasal bileşim ve kristal yapı gibi fiziksel özelliklerde görünür.[40] Sinterleme işlemleri aşağıda Şekil 2.9’ da belirtilen tekniklerle gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.9 Temel sinterleme teknikleri [40]

2.3.1 Toz Metalurjisinde Sinterlemeye Etki Eden Malzeme Koşulları

Nihayi ürünün özellikleri doğrudan malzemenin değişkenlerine bağlıdır. Bu değişkenler: parçacık şekli, Parçacık boyutu, yoğunluk parçacık yapısı, alaşım elementleri ve gözeneklilik olarak belirtilebilir.

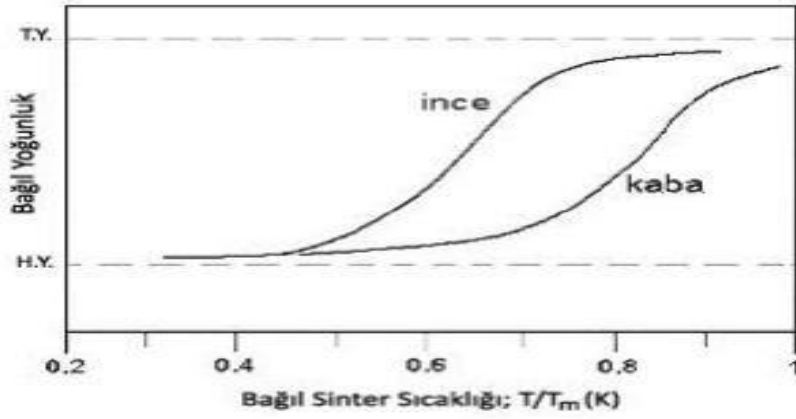
Tane Boyutu; Toz boyutu ne kadar küçük olursa, sinterleme prosesi o kadar etkin olur. Bunun nedeni, ince tozun iri tozdan daha yüksek bir temas noktası oranına ve yüzey enerjisine sahip olmasıdır.

Bu nedenle, daha küçük toz boyutlarının kullanılması sinterlemeyi ve yoğunlaştırmayı daha etkili hale getirir. Toz boyutunun yoğunluk üzerindeki göreceli etkisi Şekil 2.10 'da verilmiştir.[33]

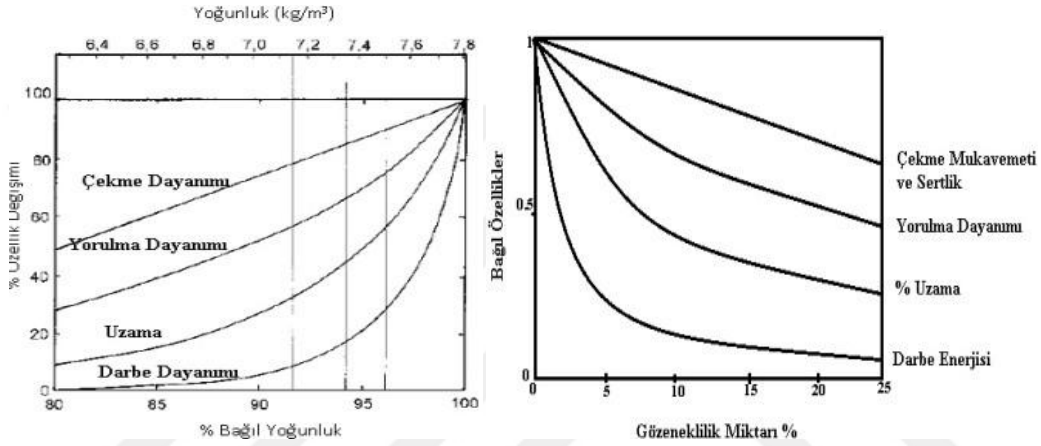
Tane Şekli; Sinterleme kinetiği, parçacık şeklindeki değişikliklerden doğrudan etkilenir. Tane yuvarlaklığının azalması ve/veya tane yüzey pürüzlülüğünün artması sinterleme üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Bu koşullar, geniş bir yüzey alanına ve parçacıklar arasında geniş temas noktalarına sebep olur.[33]

Yoğunluk;Yoğunluk, mekanik özelliklerle ilgili önemli bir parametredir. Yoğunluktaki değişikliklerin boyutsal kararlılık üzerinde doğrudan ve önemli bir etkisi vardır.Sinter yoğunluğundaki bir artış, yorulma ve gerilme dayanımında bir artışa yol açar. Uzama ve darbe dayanımı da artan sinterlenmiş yoğunluk ile beraber artarak yükselir. Şekil 2.11, artan sinterlenmiş yoğunluk ile mekanik özelliklerdeki değişimi göstermektedir.

Gözeneklilik;Aynı kimyasal bileşime sahip malzemeler, farklı mikro yapıları ve yoğunlukları nedeniyle farklı özelliklere sahip olabilir. Gözenek dağılımı ve malzemenin yoğunluğu, mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Gözenekliliğin toz metalurji parçalarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Şekil2.11 'de gösterilmiştir.[33]



Şekil 2.10 Toz boyutu ve yoğunluk arasındaki bağıl etki. [33]

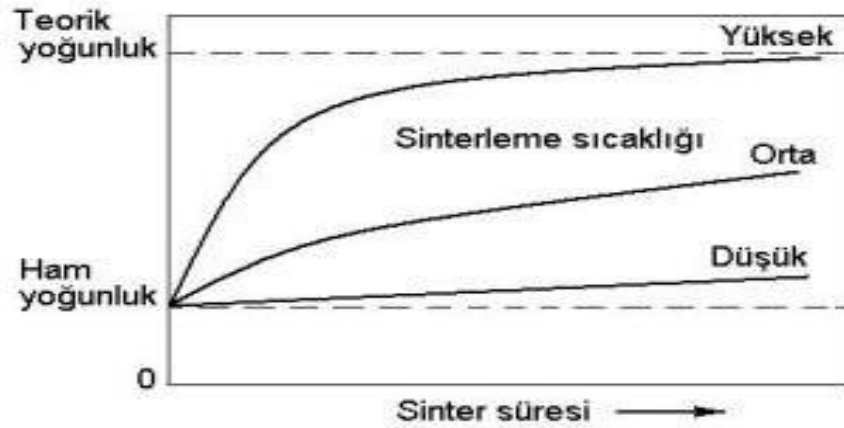


Şekil 2.11 Artan sinterlenmiş yoğunluğun ve gözenekliliğin mekanik özelliklerine etkisi [33]

2.3.2 Tam Yoğunluk Oluşturma İşlemleri

Havacılık, biyomedikal, petrokimya, bilgi işlem, savunma ve elektronik uygulamalarında toz metalürjisi (TM) gözeneksiz mikro yapılar gerektirir. Sinterleme işlemi, gözenek kabul etmeyen yapılar için tek başına yeterli olmayabilir. Bu nedenle, tam yoğunluğa ulaşmak için basınç ve sıcaklık aynı anda uygulanması gerekir..[41]

Tam yoğunluk oluşturma süreçleri, çeşitli stress altında (basınç) ve sıcaklık kombinasyonlarında meydana gelir. Uygun ve hassas yoğunluk işleme, sıcaklık ve basınca ek olarak parçacık boyutu, kütle yoğunluğu ve parça mukavemeti gibi birçok parametre dikkate alınarak belirlenir.[41] Şekil 2.12, sinterleme süresi ve sıcaklığının düşük yoğunluklu preslenmiş tozların yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafikte görülebileceği gibi, sinterleme işleminin ilk aşamalarında yüksek sıcaklıklarda yapısal büzülme meydana gelir.[42]



Şekil 2.12 Sinterleme sıcaklık ve sürenin, yoğunluk üzerine etkisi [42]

2.3.3. Sinterleme Atmosferleri

Sıkıştırılmış toz malzemeler, gözenekli yapılarından dolayı çevredeki atmosferle reaksiyona girme eğilimindedir. Bu nedenle sinterleme atmosferinin sinterleme işlemi üzerinde büyük etkisi vardır. Sinterleme sırasında sıkıştırılmış toz malzemenin oksidasyonunu önlemek veya mevcut oksitleri azaltmak için inert gazın seçimi önemlidir. Bu, sinterleme sırasında partiküller arasındaki teması artırır ve malzeme taşınmasını sağlar. Sinterleme için en yaygın kullanılan koruyucu gazları Tablo 2.3'te listelenmiştir.[43]

Tablo 2.3 Sinterleme işleminde kullanılan koruyucu atmosferler ve malzemeler

Koruyucu Atmosfer Ortamı	Malzemeler
H ₂	Fe,çelik+Bakır,Paslanmaz Çelik, Bakır, Bronz, Pirinç, Mo,W
Ayrıştırılmış NH ₃	Fe,çelik+Bakır,Cr,Mn,Ni,Si,Cu,Bronz,pirinç, W,Sementit Karbürler
Endogaz	Fe,Fe-Bakır alaşımları, Fe-Ni,Fe-C,Cu,Ni,Ag
Exogaz	Fe,Fe-Cu,Bakır alaşımları, Ni alaşımları,Ag
Vakum	Cr,Cr-Ni alaşımları,Reaktif Metaller, Ti,Ta,Al, Karbonil Fe.

Sinterleme sırasındaki atmosfer çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Sinterleme için kullanılan atmosferin temel özellikleri [22].* Fırına hava girmesini önlemek.

*Parçalardaki bağlayıcıları gidermek*Toz parçacıklarının yüzeyindeki oksitlerin azaltılması *Çelik yüzey ve gözeneklerindeki karbon oranını kontrol etmek. *Bazı özel uygulamalarda karbonun uzaklaştırılması. *Bazı özel uygulamalarda soğuma sırasında kontrollü oksidasyon.* Isıyı etkili ve düzenli bir şekilde uzaklaştırılması veya iletilmesini sağlamak.

Tablo 2.4 Metal/metal olmayan malzemelerin sinterleme sıcaklıkları

Malzeme	Sinterleme Sıcaklıkları C ⁰
Al	600 e kadar
Bronz	600-850
Cu	600-900
Ni	1000-1150
Fe-Yapısal Parçalar	1000-1300
Paslanmaz Çelik	1100-1350
Yumuşak ve sert Manyetik Parçalar	1200-1300
Sementit Karbürler	1400-1500
Nitrürler	1400-2000
MoSi ₂	1700
Al ₂ O ₃	1800-1900
Refrakter Malzemeler Mo,W,Ta,	2000-2900

2.3.4 Paslanmaz Çeliklerin T/M ile Üretiminde Tozların Sinterlenmesi

Sinterleme işlemi, verimli paslanmaz çelik malzemelerin üretiminde önemli bir rol oynar ve sinterleme fırınının türü, sinterleme atmosferi, sinterleme sıcaklığı, ve işlem parametrelerinin seçimi gibi birçok önemli faktörü içerir. Tüm bu değişkenler sinterlenmiş parçaların kalitesi üzerinde önemli etkisi vardır. Ticari olarak sinterleme genellikle sürekli bant fırınlarında yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 1150 °C) yapılır. Malzemelerin sinterleme sıcaklık aralıkları Tablo 2.4’te verilmiştir..

Yüksek sıcaklıklarda (1345 °C'ye kadar) sinterleme için yürüyen kırıli, itmeli, vakumlu fırınlar, ve hareketli kırıli fırınlar kullanılır. Yüksek sıcaklıkta sinterleme, korozyon direncini artırır ve mekanik özellikleri iyileştirir.[44]

Paslanmaz çeliğin sinterlenmesi için tipik koruyucu atmosfer ortamları, vakum, hidrojen, ayrıştırılmış amonyak, ve nitrojen -hidrojen karışımlarıdır. Hidrojen-azot karışımları veya hidrojen ortamında sinterleme için çiglenme noktası özelliği çok önemlidir, nitrojen -hidrojen karışımlarında kriyojenik nitrojen kullanıldığında düşük çiglenme noktaları elde edilir. Bununla birlikte, hidrojen ve nitrojen karışımı bir indirgeyici madde olduğundan, saf hidrojen atmosferine kıyasla düşük bir yoğunlaşma noktası gerektirir. Endüstri, paslanmaz çeliğin sinterlenmesi için genellikle düşük maliyetli sinterleme atmosferlerini tercih etmektedir. Sinterleme genellikle çok az hidrojen içeriğine sahip (yaklaşık %3) bir hidrojen- nitrojen atmosferinde yapılır.[44]

2.4 Paslanmaz Çelik Matrisli Kompozit Malzemeler

2.4.1 Kompozit malzemelerin tanımı

Kompozit malzeme, şekil ve kimyasal bileşim ile ayrılan ve esasen birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla mikro veya makro bileşenin bir karışımı veya birleşmesiyle oluşturulan bir malzemedir. Günümüzde, arzu edilen özellikleri sağlamak için gelişmiş teknik malzemelere artan bir ihtiyaç vardır ve tek komponentli malzemeler, gelişmiş mühendislik uygulamalarının gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Bu sebeple gelişmiş, üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere olan talep her geçen gün artmaktadır.[45]

Kompozitler ağırlık, mukavemet, korozyon direnci ve aşınma direnci gibi birçok özellik açısından önemli avantajlar sunan malzemelerdir. Metal Matrisli Kompozitler (MMC), kompozit malzemeyi temsil eden grubun çeşitlerinden bir tanesidir. MMC, toz metalürjisi ve mekanik alaşımlama işlemleri olmak üzere birçok çeşitli yöntemle üretilir.[38]

Üretilen malzemelerde aynı anda yüksek mukavemet, yüksek modül ve düşük yoğunluk özelliklerini elde etmek için bu malzemelerin araştırma ve geliştirme çalışmaları giderek daha fazla yapılmaktadır. Kompozitlerin konvansiyonel malzemelere göre daha düşük yoğunluklara ve daha yüksek mukavemet ve elastiklik modüle sahip olması, bu malzemelerden üretilen mekanik parçaların ağırlığında azalmaya yol açarak daha fazla enerji tasarrufu ve verimlilik sağlar. Bu, başta nakliye araçları olmak üzere tüm hareketli parçalar için çok önemli bir faktördür. Kompozit malzemeler, belirli bir uygulama için gerekli olan fiziksel ve mekanik özellikleri sağlamak üzere, belirli özelliklere sahip malzemelerin farklı fazlarda birleştirilmesiyle yapılan malzemeler oldukları için çok fazlı malzemeler olarak da tanımlanmaktadır. Artık bu çok fazlı kompozitlerin, tek başına monolitik metal alaşımlarının, seramiklerin veya polimerlerin sahip olamayacağı geniş bir özellik kombinasyonu sunabileceği kabul edilmektedir.[40]

Kompozitler iki bileşenden oluşur: matris ve takviye malzemesi. Nispeten düşük mukavemete ve genellikle yüksek sünekliğe sahip olan kompozitin ana yapı malzemesi olarak tanımlanan kısmına matris denir. Kompozit malzemelerdeki sert, yüksek mukavemetli bileşenlere genellikle takviye elemanları denir. Kompozitin yükünü takviye malzemesine aktarmak, takviye elemanlarını bir arada tutmak, kompozitin tokluğunu arttırmak, kompozitin mukavemetini arttırmak ve takviyeyi korumak matris malzemesinin esas görevidir.

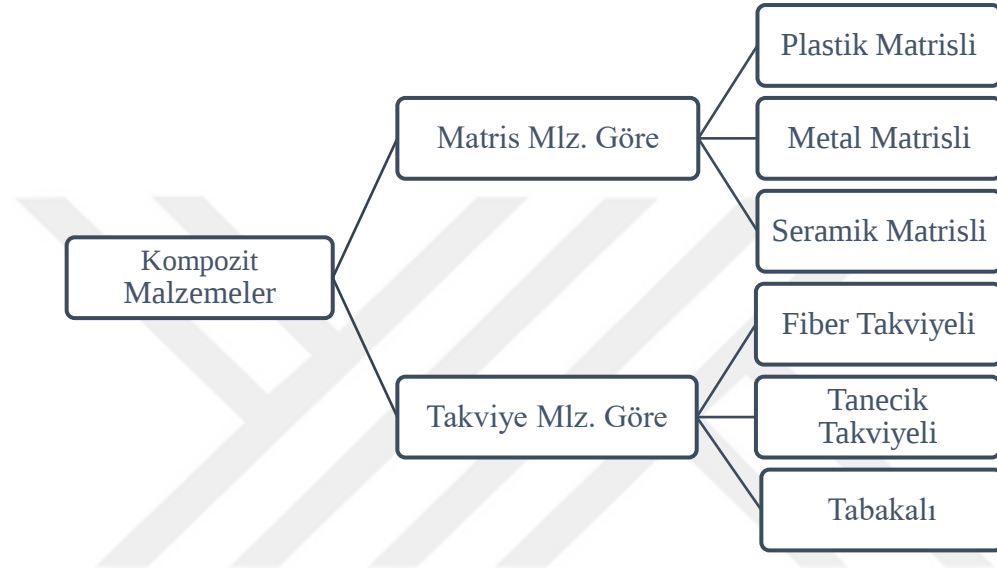
Mekanik özellikler, ana yapı (matris) ve takviye elemanlarının özelliklerinden, ana yapı (matris) ve takviye elemanlarının hacim oranından, matris takviyeleri arasındaki bağın özelliklerinden, takviye elemanlarının biçimi ve yapısından ve bunların yönlenmesinden etkilenir.[36]

2.4.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, üretimleri için kullanılacak olan, anayapı (matris) malzemesinin cinsine göre değişir. Polimer , ana yapı (matris) kompozitler,

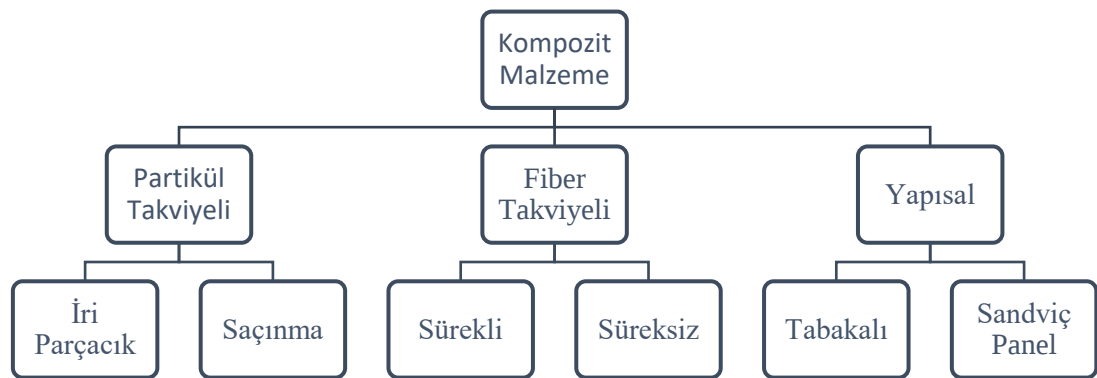
metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler olarak sınıflandırılır.(Şekil 2.13)

Takviyeler morfolojilerine göre; lif (elyaf) takviyeli, partikül (parçacık) takviyeli ve katmanlı (yapısal) kompozitler olarak ayrılırlar. Bu sınıflandırma Şekil 2.14'de gösterilmiştir.[40] Farklı türdeki malzemelerin (metaller, seramikler, polimerler) en iyi özelliklerini kompozitlerde birleştirmek ve en iyi özellikleri tek bir malzemede birleştirmek büyük faydalar sağlar.



Şekil 2.13 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması. [40]

Takviye formuna göre kompozitlerin ayrıntılı bir sınıflandırması Şekil 2.14'de gösterilmektedir.



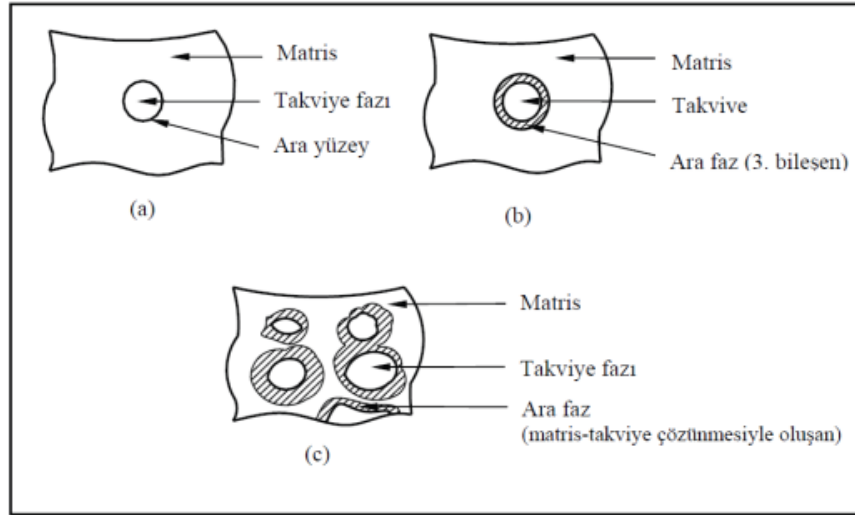
Şekil 2.14 Kompozit malzemelerin takviye yapısına göre sınıflandırılması. [40]

Bu özellikler; ✓ Yüksek mukavemet ✓ Yüksek sertlik ✓ Yüksek yorulma dayanımı ✓ Yüksek aşınma direnci ✓ Yüksek sıcaklığa dayanım ✓ Mükemmel yenim direnci ✓ İyi termal iletkenlik ✓ Düşük ağırlık

Bu tür özellikleri bir araya getirerek elde edilecek avantajlar vardır. Tipik olarak orta ve yüksek yoğunluklara sahip olan, tokluk ve mukavemet özelliklerin birleşimini diğer malzeme gruplarına göre daha uyum içerisinde olan metaller, metalürji ve makine mühendisliğinde en çok kabul edilen malzeme grubunu temsil etmektedir.[40]

2.4.3 Kompozitlerin Yapısı

Kompozit malzemeler genel olarak; matris ve takviye malzemesi olarak iki bölümden meydana gelir. Kompozitlerin daha sert ve kuvvetli bileşenlerine genellikle takviye denir. Kompozitlerde birincil yapı malzemesi olarak da tanımlanan, nispeten düşük mukavemetli ancak genellikle esnekliği yüksek olan bölge matris olarak ifade edilir. Ana yapı (Matris) malzemelerden oluşan bir kompozit sistemde, kompozitten takviye malzemesine stres iletmek, kompozitin tokluğunu arttırmak, kırık liflerden çatlakların yayılmasını önlemek ve mukavemete katkıda bulunmak gibi işlevlere sahiptir. Kompozit malzemeyi, takviye elemanlarını bir arada tutar ve takviye malzemesini çevresel etki ve etkilerden korur. Kompoziti oluşturan matris ve donatının özellikleri, matris ve donatının baskın oranı, matris donatısı arasındaki bağın özellikleri, donatının şekli, yapısı ve kompozit içindeki yönelimi mekanik özellikleri etkiler. Genel bir açıklamaya göre, matris ve takviye fazının birbiri içerisinde çözülmemesi gerekir. Ancak çözünürlüğün çok düşük olması, matris takviyeleri arasında güçlü bağların oluşumu üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. (Şekil 2.15). Matrisle güçlendirilmiş arayüzlerin yapısı ve özellikleri, kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni, matrise etkiyen gerilmelerin ara yüzeyler aracılığıyla takviye elemanlarına iletilmesidir.[45]



Şekil 2.15 Kompozit matris-takviye arası bağ oluşumu.[45]

2.4.4 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozitler (MMK), istenen özellikleri elde etmek için en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı materyalin sistemli olarak birleştirilmesiyle elde edilen yeni malzemelerdir. Metal matrisli kompozitler, tek bileşenli alaşımlarda elde edilemeyen özellikler sağlamak için bir metal matris içinde lifli, ipliksi veya parçacıklar şeklinde sürekli veya kısa takviye fazları içerir. Günümüz imkanlarıyla imal edilebilen metal matriksli kompozitler üç gruba ayrılmaktadır.

*Parçacıkla güçlendirilmiş metal matris kompozitler, bağlayıcı matrise parçacıkla güçlendirilmiş malzemeler eklenerek oluşturulur, buda artan modülve mukavemet sağlar.

*Parçacık takviyeli metal matris kompozitlerden daha fazla kuvvet aktarma kapasitesine sahip yüksek mukavemetli ipliksi veya kısa elyaf takviyeli metal matriksli kompozitler.[25]

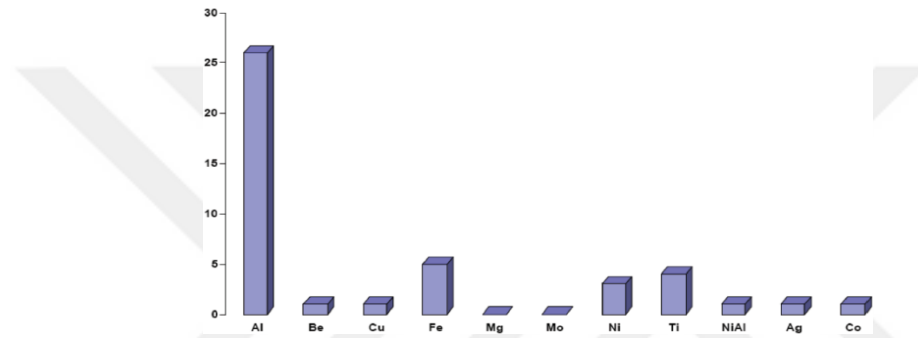
*Fiberin tüm yüksek performans özelliklerine sahip sürekli elyaf bazlı metal matriksli kompozit.

Yukarıda açıklanan her karmaşık sistemin kendi güçlü ve zayıf yönleri vardır. Örneğin, düşük maliyetine ek olarak, parçacık bazlı metal matrisli kompozitler esnemezlik ve izotropik yakın özelliklerde önemli gelişmeler gösterir. Bununla birlikte mukavemetteki gelişme sınırlıdır.

2.4.5 Metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan matrisler

Metal matrisli kompozitlerde en bilinen matris malzemeleri, yüksek toklukları düşük yoğunlukları, ve önemli mekanik özelliklerinden dolayı genellikle hafif metaller ve bunların alaşımlarıdır. Düşük yoğunlukları ve önemli mekanik özellikleri ile bu malzemeler özellikle hafifliğin önemli arz ettiği uygulamalarda tercih sebebidir. Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), çinko (Zn), bakır (Cu), demir (Fe), titanyum (Ti), gümüş (Ag) ve nikel (Ni) gibi metaller, metal matrisli kompozitlerin matrisleridir. (Şekil 2.16)

Bu metallerin alaşımları ve süper alaşımlar geniş olarak kullanılmaktadır.[40]



Şekil 2.16 Kompozit üretiminde metal matris malzeme kullanım oranları.[40]

2.4.6 Metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları

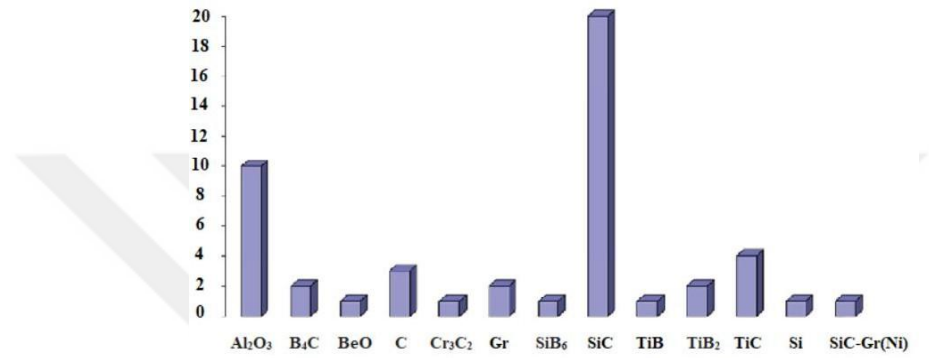
Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanlarının seçimi, üretilen kompozitlerin özelliklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu nedenle takviye elemanlarının uygun seçimi ve özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Metal matrisli kompozit takviye malzemelerinin kullanım yerlerine göre genel olarak beklenen özellikleri yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek modül, yüksek sıcaklıklarda koruma, matris ile uyumluluk ve ekonomiktir. Seramikler, metal matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak takviye malzemesi olarak kullanılır.

Alüminyum oksit (Al_2O_3), silikon dioksit (SiO_2), bor karbür (B_4C), Titanyum karbür (TiC), Silisyum karbür (SiC), gibi karbürler, (AlN), titanyum nitrür (TiN) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) gibi nitrürler en çok tercih edilenlerdir.

Ancak Karbon (C), Silikon (Si), Molibden (Mo), Bor (B), Tungsten (W) gibi diğer elemental malzemeler de takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Tüm bu takviye malzemeleri arasında SiC , alüminyum metal matrisli kompozitler üretilmekte ve en çok tercih edilen takviye olmaktadır.[40]

Metal matrisli kompozitlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen en önemli faktör takviye elemanlarının seçimidir. Takviyenin kimyasal kararlılığı ve matris ile uyumluluğu sadece MMC malzemesinin nihai özellikleri için değil, aynı zamanda malzeme imalat aşamasında da önemlidir. Takviye elemanı seçim aşamasında yüksek çekme dayanımı, yüksek ergime sıcaklığı, düşük yoğunluk, yüksek termal kararlılık, termal genleşme katsayısı, şekil ve boyut, matrisle olan uyum, düşük maliyet gibi etkenlerin dikkate alınması gerekmektedir.[46]



Şekil 2.17 Kompozit üretiminde takviye malzemelerinin kullanım oranları. [40]

2.4.7 Bor Karbür (B₄C)

Borkarbür, (B₄C) metal olmayan en önemli gruba ait olan en sert malzemelerden biridir. Üstün özellikleri arasında aşırı sertlikte, yalnızca elmas ve kübik bor nitrürden sonra üçüncü sıradadır. Birçok kimyasal reaksiyona karşı çok dayanıklıdır. Bir diğer dikkat çekici özelliği ise düşük yoğunluğu ve ısıl direncidir. Bor karbür, yüksek bor içeriği, bileşiğin yüksek erime noktası ve yüksek fiziksel ve kimyasal kararlılığı nedeniyle nötronların soğurulmasında verimli ve ekonomiktir. Borkarbür, 2500°C' de bir boroksit bileşimi ve karbondan, karbo termik indirgeme yöntemiyle elde edilir.[47] Yüksek erime noktasına, mükemmel sertliğe, iyi mekanik özelliklere, düşük özgül ağırlığa, mükemmel kimyasal dirence ve nötron soğurma kesitine sahip olan bor karbür, hafif zırh, termoelektrik dönüşüm gibi özellikleri nedeniyle günümüzde yüksek teknoloji için önemli bir malzemedir.

Ancak Bor Karbür B₄C seramiklerin bu önem arzeden özellikleri maksimum yoğunlaştırılmış ve sıkıştırılmış malzemelerde elde edilebilir. Düşük difüzyon katsayısı nedeniyle, Bor karbür B₄C seramiklerinin teorik yoğunluklarının

%80'nin üzerinde sinterlemek çok zordur. B_4C seramiklerinin yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi, çok yüksek basınçta sıcak presleme işleminin uygulanmasını gerektirir.[8]

Bor karbür önemli özelliklerinden dolayı birçok kullanım alanına sahiptir. Bu özellikler özellikle sert metal endüstrisinde öğütme ve parlatma tozları olarak kullanıldığında belirginleşir. Bunun yanında hafifliği ve sertliği nedeniyle zırhlı muharebe araçlarının zırhını güçlendirmek, askeri helikopter ve uçakların mekanik parçalarını ve personeli korumak için kullanılır. Zırhta geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bor karbürün diğer kullanımları aşağıda listelenmiştir. [47]

a) Makine ve aletlerin yüzey işlemleri: Esas olarak kesme plakası, kesici kalem tıraş, trapez bileme taşı, soğuk çekme aleti, akıcı baskı aletleri, demircilik, matkaplar, kılavuzlar, okçu kesikleri, valfler, valf yataklar, segmanlar, silindir düğmeleri, silindir gömlekleri, silindir yüzeyler, dişliler, rulman yataklar, salmastrakutuları, enjeksiyon pompaları, sertleştirilmiş levhalar, plastik pres kalıpları, tel makaralı manşonlar, ekstruder memeleri, her türlü eğitim alet ve kesici takımların, raybaların, frezelerin, krank millerinin, diferansiyellerin ve diğer alanların yüzey işlemlerinde kullanılır.

b) Seramik ve sert malzemelerin işlenmesi: Oksitlenmiş seramikleri (Al_2O_3 , ZrO_2), oksitlenmemiş seramikleri (Si_3N_4 , SiC), mineralleri, kuvarsı, doğal/yapay taşlar, optik camlar vb. işlemek için kullanılır. Metal matrisli kompozitlerde, alüminyum matrisli kompozitlerde ve düşük yoğunluklu sermetlerde kullanılır.

c) Ateşe dayanıklı uygulamalar: Bağlayıcı olarak karbon içeren refrakterlerde karbonun oksidasyonunu önlemek için kullanılır.

d) Nükleer endüstrideki nötron emiciler: Bor karbür termik nötronların emiciliğinde ve aynı zamanda nükleer kalkan ve kontrol çubukları ve şut daldırma peletlerinde kullanılır.

e) Diğer uygulamalar: Yüzey koruma, uzay mekiği yarı iletken parçalar, tekstil iplik kılavuzları, filtreler, bujiler, yüzey parlatma pastaları, transformatörlerde silika levhaların yerine, yapısal ve seramik parçaların üretimi için hammaddelerde ve metal matrisli kompozitlerde kullanılır.[47]

2.4.8 Bor Karbürün Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özellikleri

Tablo 2.5 Bor karbürün (B_4C) fiziksel ve mekanik özellikleri

Mol Ağırlığı (gr/mol)	55,25
Renk	Siyah
Teorik Yoğunluk gr/cm ³	2,52
Kristal Yapısı	Rhombohedral
Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/^{\circ}C$)	4,78 - 6,53
Sertlik (HV-GPa)	38 - 45
Basma Dayanımı (MPa)	2500-5700
Çekme Dayanımı (MPa)	73
Isıl İletim Katsayısı (W/Mk)	17 - 42
Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	2,9-3,7

2.4.9 Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür; sembol SiC, erime noktası 2730 °C, yoğunluk 3,22 g/cm³, koyu gri, silisyum ve karbür karışımı, oda sıcaklığında katı formunda seramik malzemedir. Doğada göktaşı bazlı demirde bulunmuştur. Yaklaşık 70 kristal formu vardır ve en yaygın kullanılanı 2000°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşan α -SiC'dir. Yüksek aşınma direnci, kolay bulunurluk ve düşük maliyet. Metal matrisler, sürekli lifler, kısa lifler, ipliksi ve parçacıklar şeklinde kompozitlerin üretimi sırasında matrise eklenebilir. Silisyum karbür, metal matrisli kompozitlerin aşınma direncini ve dayanımını önemli ölçüde artırır. Silisyum karbür (SiC), güçlü bir kovalent bağ yapısına sahip mühendislik ürünü bir malzemedir. Al₂O₃'ten daha serttir ve mükemmel ısı direncine sahiptir.

Aynı zamanda mükemmel korozyon direncine sahiptir. Bu nedenle aşındırıcı ve refrakter olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çelik üretiminde metalürjik

katkı maddesi olarak da kullanılır. Elektriksel özelliklerinden dolayı ısıtma elemanlarında ve elektrik devrelerinde kullanılır. .[48]

2.4.10 Alümina (Al_2O_3)

Alümina (Al_2O_3), yapısal uygulamalar için en geniş olarak kullanılan seramik malzemelerden biridir, ve yüksek dayanım yüksek sertlik, yüksek elastikiyet modülü, ısıl ve kimyasal ortamlara karşında yüksek direnç gibi olumlu kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, alüminanın son derece düşük kırılma tokluğu, üretim uygulamaları için kısıtlayıcı bir özelliktir. [49]

2.4.11 Titanyum Karbür (TiC)

Titanyum karbür (TiC) tipik bir geçiş metali karbürüdür. İyonik bağlar, kovalent bağlar ve metalik bağlar bir arada bulunduğu için yüksek erime noktası, yüksek sertlik, yüksek iletkenlik, yüksek kimyasal ve ısıl kararlılık ve aşınma direnci gibi özelliklere sahiptir. TiC genellikle sermet oluşturmak için nikel gibi metallerle birleştirilir. Sermetler, karbür yapının çok yüksek sertliğini ve aşınma direncini metalik bağlayıcı fazın mekanik ve ısıl şok direnciyle birleştirir. Bu özellikler, onları yüksek mekanik ve ısıl yüklerin olduğu birçok uygulamada kullanılmasını sağlar. TiC bazlı sermetler genellikle kesici takımların, taşlama taşlarının ve kaplamalı kesici uçların imalatında kullanılır. .[49]

2.4.12 Diğer takviye malzemeleri

Birçok seramik malzeme SiC ve B₄C gibi metal ve alaşımlarla takviye edilerek kompozitler oluşturulabilir. En çok tercih edilen güçlendirici elemanlar; Borkarbür, tungsten karbür, titanyum karbür, Silisyumkarbür, silikon nitrür, alümina, magnezya, silika, boroksit, zirkonya, bor nitrür, alüminyum nitrür, bor, karbon ve karbon lifleridir. Metal matrisli kompozit imalatında takviye malzemeleri seçilirken, takviye elemanlarının mevcudiyeti, matris malzemesiyle uyumluluğu ve takviye elemanlarının kazandıracığı özellikler dikkate alınmalıdır. Metal matrisli kompozitlerin imalatında kullanılan bazı önemli malzeme özellikleri Tablo 2.6'da verilmiştir.[48]

Tablo 2.6 MMK Üretiminde kullanılan takviye malzemelerinin özellikleri

Parça Takviyeli Malzemeler	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ergime Sıcaklığı (C°)	Mukavemet (MPa)	Elastik Modül (GPa)
Karbürlü Malzemeler				
SiC	3,22	2750	3100	324
B4C	2,52	2420	2579	448
TiC	4,93	3160	55	269
ZrC	6,73	3532	90	359
Oksit Malzemeler				
Al ₂ O ₃	3,98	2100	221	379
MgO	3,58	2852	4100	417
ZrO ₂	5,89	2715	83	132
CeO ₂	6,9	2400	600	200
ThO ₂	9,86	3390	193	200
Nitrür Malzemeler				
AlN	3,26	2375	2069	310
Si ₃ N ₄	3,18	1900	4100	250

2.4.13. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Genel anlamda metal matrisli kompozitlerin, metallere göre avantajlı özellikleri şu şekilde ifade edilir:

- *Yüksek dayanım ve yoğunluk oranı
- *Yüksek elastik modül/yoğunluk oranı,
- *Mükemmel yorulma direnci,
- *Düşük termal genleşme katsayısı,
- *Mükemmel aşınma direnci.[50]
- *Sıfıra yakın atık veya ıskarta,
- *Hızlı üretim hızı,
- *Yüksek sıcaklıklarda dayanımı koruyabilme ve düşük sürünme oranı gibi iyileştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri
- *Tek işlemde karmaşık şekilli ürünler üretilebildiği için daha düşük maliyet
- *Çok düşük maliyetle pürüzsüz yüzey
- *Malzeme talaşlı imalatsız istenilen toleranslarda üretim
- *Konvansiyonel yöntemlerle iki veya daha fazla parçanın üretimi
- *Kütle, hacim ve yoğunluk kontrolü ile nihai yüzey özelliklerinin geliştirilmesi
- * Dövülebilir ve bükülebilir parçaları çatlamadan üretebilme .[51]

Metal matrisli kompozitlerin dezavantajlarını da dikkate almakta fayda vardır:

- *Sürekli elyaf takviyesinin bir seçenek olduğu zor ve karmaşık üretim süreci (döküm işlemi dışında)
- *Metaller ile karşılaştırıldığında düşük süneklik
- *Maliyeti yüksek üretim sistemleri ve ekipmanı
- *Genel olarak boyutların çok büyük olması veya şeklin çok karmaşık olması söz konusu olduğunda malzemeye ve sıkıştırma basıncının miktarına bağlı olarak

sorunların çıkması. * İlk yatırım maliyeti, özellikle kalıp maliyeti yüksekliği. * Düşük erime sıcaklığı olan metallerin (kurşun, çinko, kalay vb.) sinterlenmesi diğer proseslere göre daha zor ve pahalıdır.[51]

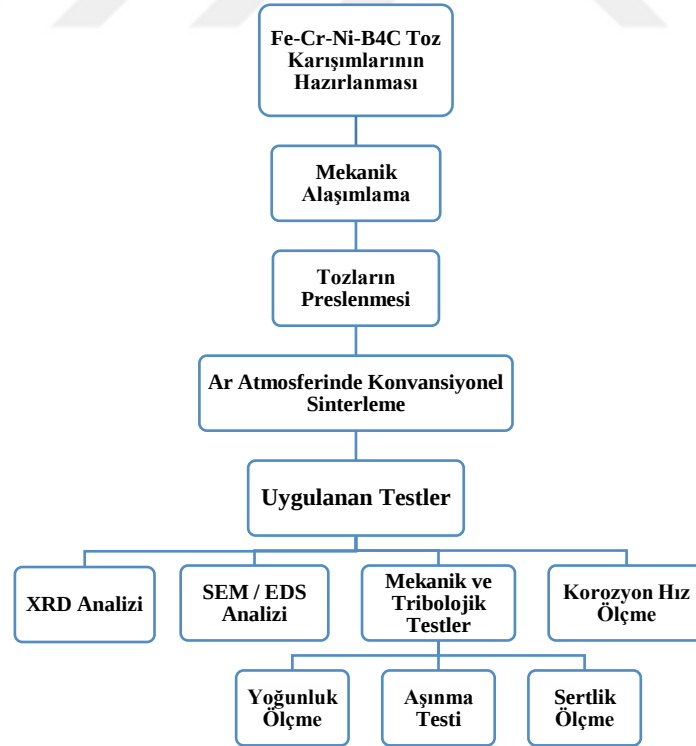


DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Çift fazlı (dupleks) paslanmaz çeliklerin günümüzde petrokimya sanayi, kimya sanayi ve boru hatları gibi pek çok farklı alanda mekanik özelliklerinden özellikle korozyon dayanımlarından ve sertliklerinden dolayı kullanımları mevcuttur. Genellikle döküm yöntemi ile üretilen dupleks paslanmaz çekilerin bu tez çalışmanın ilk aşamasında alternatif bir imalat yöntemi olan toz metalurjisi prosesi kullanılarak elde edilmesi üzerine çalışıldı.

Üretilen mekanik alaşımlı DPÇ ve B4C takviyeli kompozit numunelere , mekanik ve mikroyapı özelliklerini belirlemek için çeşitli testler uygulanmıştır. Bunların içerisinde sertlik ölçümü ve yoğunluk ölçümü gibi mekanik testler ile optik mikroskop, SEM/EDS ile yapılan mikroyapı incelemeleri ve Aşınma/Korozyon testlerinden oluşmaktadır. (Şekil 3.1) Bu testler uygulanmadan önce hazırlanan örnek numunelere çeşitli metalografik numune hazırlama işlemleri ile malzeme yüzeyleri teste uygun hale getirilmiştir.



Şekil 3.1 B4C takviyeli DPÇ matrisli malzemelerin üretim akışı

3.2 Mekanik Alaşımlamalı Dupleks Paslanmaz Çelik Tozların Hazırlanması

Tez çalışmasının ilk aşamasında literatür kaynaklı bilgiler doğrultusunda Dupleks Paslanmaz Çelik'in (DPÇ) üretilmesi için, %75 Fe(demir) %20 Cr(Krom) ve %5 Ni(Nikel) tozları %1'lik işlem kontrol kimyasalı (İKK) Stearik asit olarak belirlendi, bilye toz oranları 6:1 ve 12:1, toplam süreler 10 saat ve 20 saat, öğütücünün dönme hızları 300 RPM ve 500 RPM olarak seçilmiştir ve belirlenen tozlar gezegen tipi bilyeli öğütücü yardımıyla hem karıştırıldı hem de mekanik alaşımlamaları yapılmıştır, çıkan toz malzemeler XRD analizine gönderilip sonuçlar yorumlanmıştır.

Mekanik alaşımlanan toz halindeki malzemeler statik pres ile preslendi. Preslenerek elde edilen dupleks paslanmaz çelik numunelerinin sinterlenmesi kapalı sinter fırınında 550 °C de 60 dk stearik asit giderilmesi ve 1300 °C 60 dk sinterlenme işlemi olmak üzere sürekli argon gazı akışı altında gerçekleştirildi, sinterleme işlemleri biten dupleks paslanmaz çelik numunelerin kimyasal bileşimleri, XRD şemaları ve SEM'e bağlı enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 B₄C Takviyeli Dupleks Paslanmaz Çelik Tozların Hazırlanması.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, Çift fazlı dupleks paslanmaz çelik anayapı matrisli B₄C partikül takviyeli kompozit malzemeler tek eksenli soğuk presleme yöntemi ile üretilerek ve mikroyapı, mekanik, aşınma ve korozyon özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Matris ve takviye malzemeleri elemental toz olarak tedarik edilmiş ve gezegen tip yüksek enerjili bilyalı öğütme cihazında mekanik olarak alaşımlandırıldıktan sonra akışkan argonlu koruyucu atmosferi altında sinterlenmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılan B₄C tozları farklı oranlarda ilave edilerek etkileri incelenmiştir.

Kompozitlerin imalatı için matris elemanı olarak Fe-Cr-Ni tozları (~45-50 µm) kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan B₄C (<10 µm) tozları ile matris Fe-Cr-Ni tozları Tablo 3.1' de verilen % miktarlarda hazırlandıktan sonra gezegen tip yüksek enerjili bilyalı öğütme cihazına yerleştirilmiştir.

Tablo 3.1 Öğütme / mekanik alaşımlama parametreleri

Parametre	Değer
Öğütülecek Toz Malzeme	Fe-20Cr-5Ni wt% (Elementel Toz,Dubleks Paslanmaz Çelik)
Bilya Toz Ağırlık Oranı	6:1 / 12:1
Bilya Çapı	8mm (Paslanmaz Çelik)
Öğütme Malzeme ve Ortamı	Sertleştirilmiş Paslanmaz Hazneli, Kuru Öğütme (Havası alınmış Argon ortamı)
Bilyaların Toplam Ağırlığı	334 gr
Toz Toplam Ağırlığı	28-55 gr
Öğütme Süreleri & Hız	10 sa / 20sa / 40sa 300 RPM ve 500 RPM
Öğütücü Tipi	4 istasyonlu Gezegen tipi Öğütücü
Proses Kontrol Ajanı %	Stearik Asit %1
Sinterleme Sıcaklığı C°	1300 C°
Sinterleme Süresi (Dk)	60 Dk.

Karışıma ek olarak bağlayıcı ve topaklaşmayı önleyici ağırlık %1 oranında stearik asit, eklenmiştir. Ayrıca tozların bulunduğu karıştırma kabında 6:1 oranında (çelik bilye/ toplam toz) 8 mm çapında paslanmaz çelik bilyeler kullanılmıştır. Karıştırma ve alaşımlama işlemi 75dk boyunca 300 rpm hızında gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş tozların kimyasal bileşimleri, SEM'e bağlı enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak incelenmesi yapıldı.

**Şekil 3.2** Gezegen bilyalı öğütücü ile öğütme ve MA işlemi

Tablo 3.2 B₄C takviyeli DPÇ matrisli MA proses parametreleri.

Numune (Toz) %	Uygulanan İşlem	B ₄ C Oranı %	Öğütücünün dönüş hızı (Rpm)	Bilye toz oranı	Mekanik Alaşımlama süresi (Saat)	Sinterleme Sıcaklığı	Sinterleme Süresi (Dk.)
Fe-20Cr- 5Ni (M-B0)	Harmanlı Karışım	0	300	6:1	10	1200	75
Fe-20Cr- 5Ni (MA-B0)	Mekanik Alaşımlama	0	300	6:1	10	1200	75
(Fe-20Cr- 5Ni)-B ₄ C (MA-B1)	Mekanik Alaşımlama	1%	300	6:1	10	1200	75
(Fe-20Cr- 5Ni)-B ₄ C (MA-B3)	Mekanik Alaşımlama	3%	300	6:1	10	1200	75
(Fe-20Cr- 5Ni)-B ₄ C (MA-B5)	Mekanik Alaşımlama	5%	300	6:1	10	1200	75

Toz metalürjisi prosesleri, karmaşık şekilli parçaların üretimini veya yüksek üretilebilirliği konusunda sınırlı kalsa da, ancak yapı içerisinde takviye tozlarının tek tip dağılımını sağlar. Geleneksel soğuk presleme ve sinterleme işlemleri, kompozitlerde gözenek oluşumunu engelleyemediğinden son yıllarda bunların yerini HT-HP (yüksek sıcaklık ve yüksek basınç), HIP (yüksek sıcaklık ve yüksek basınç) gibi daha gelişmiş üretim süreçleri almıştır. Bu problem, imalat prosesleri ile büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır, ancak bu prosesler için gerekli olan ekipmanların maliyeti yüksek ve üretim verimliliğinin düşük olması nedeniyle bu anlamda sanayide yaygın olarak uygulanmamaktadır. [44]

Bu tez çalışmasında laboratuvar imkanları dahilinde kullanılan soğuk pres yöntemiyle malzemeler, tek eksenli soğuk preste 120 bar'lık basınçta 6 dakika boyunca uygulanarak üretilmiştir. Son olarak 20 mm uzunluğunda ve 10 mm çapında sintersiz ham blok numuneler elde edilmiştir.

3.3. Toz Karışımlarının Preslenmesi

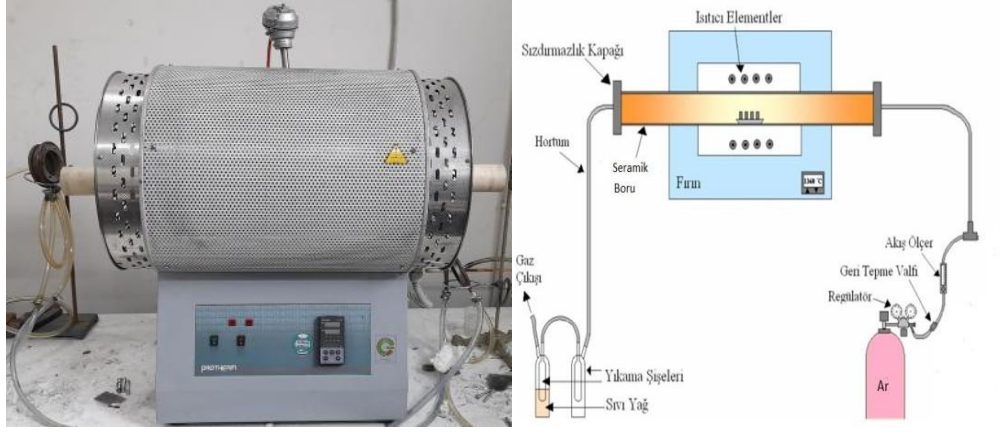
Mekanik alaşımlamalı ve harmanlanmış olarak hazırlanan tozlar YTÜ Malzeme Müh. laboratuvarındaki 100 ton kapasiteli tek eksenli hidrolik presle 120 bar sıkıştırma basıncında preslenmiştir. Silindirik formda üretilen parçalar kalıpta sıkıştırılarak blok haline getirilmiştir.



Şekil 3.3 100Ton kapasiteli hidrolik presleme cihazı

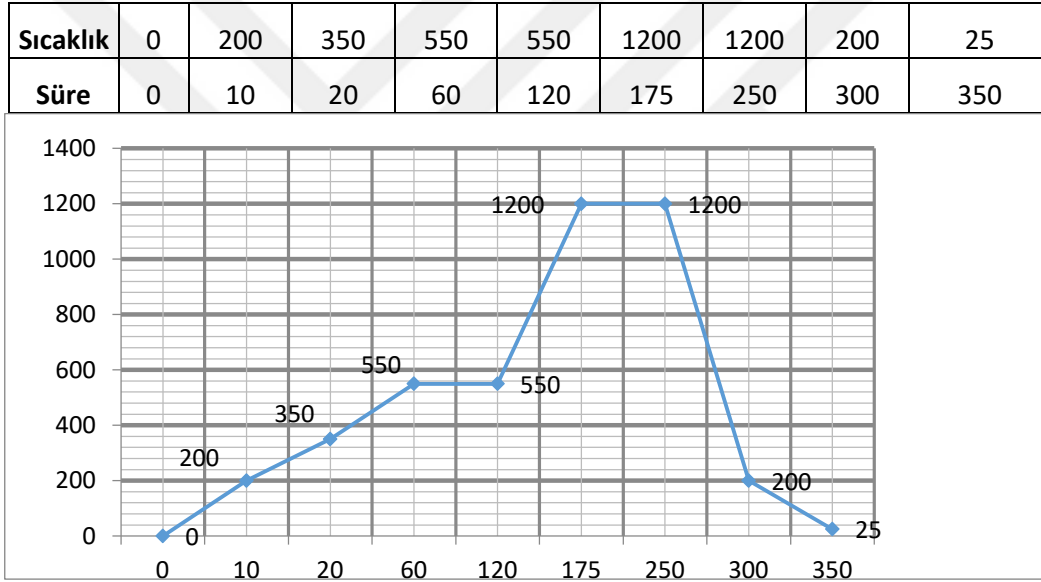
3.4. Preslenen Numunelerin Sinterlenmesi

Presleme ve mekanik alaşımlama işlemleri biten çift fazlı (dupleks) paslanmaz çelik matrisli Bor Karbür B_4C numunelerin sinterleme aşamasında, Şekil 3.3’de verilen Protherm marka atmosfer kontrollü yatay tüp sinterleme fırını ve gaz besleme sistemi kullanılmıştır. Koruyucu atmosfer olarak akışkan argon gazı, akış hızı 0,5 ml/sn. olarak sisteme verilmiştir. Fırın sıcaklıkları öncelikle $10^{\circ}C/dk$ hız ile $550^{\circ}C$ dereceye çıkılarak 60dk süreyle parça içerisindeki stearik asitin giderilmesi sağlanmıştır. Daha sonra yine $10^{\circ}C/dk$ hız ile $1200^{\circ}C$ 75 dk süreyle sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra fırın içerisindeki numunelerin hava da daha hızlı soğutulması için fırın haznesinden çıkarılıp, dış ortamda oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur.



Şekil 3.4 Atmosfer kontrollü yatay tüp sinterleme fırını ve gaz besleme sistemi

Tablo3.3 Sinterleme Sıcaklık - Zaman Tablosu



Şekil 3.5 Sinterleme sıcaklık-zaman grafiği.

3.5 Yoğunluk Ölçümü

Sinterlenen numunelerin yoğunluk ölçüm işlemleri, Arşimet prensibi esas alınarak ölçülmüştür. Kısaca ifade edilirse, deneysel yoğunluk değerleri, numunenin önce havadaki, sonra sudaki ağırlığı ölçülerek, daha sonra havadaki ağırlık, hava ve su arasındaki ağırlık farkına bölünerek suyun yoğunluğu ile çarpılarak hesaplanmıştır. Bunun için 3.1 eşitliği kullanılmıştır. Devamında, numunenin hesaplanan teorik yoğunluğu ve sinterleme sonrası deneysel yoğunluk kullanılarak eşitlik 3.2 ile % gözeneklilik oranı ve eşitlik 3.3 ile yoğunluk yüzdesi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar B₄C oranlarındaki değişime göre daha sonra birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçümlerinde numunelerin ağırlık ve hacim değişimlerinden faydalanılmıştır. Kompozit numunelerinin yoğunlukları, YTÜ Malzeme mühendisliği laboratuvarındaki, maks. 220 g ağırlık ölçebilen 1/10000 gr hassaslığında RADWAG AS-220.R2 marka hassas terazinin yoğunluk ölçme kiti uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

$$\rho_{\text{deneysel}} = \frac{W_{\text{hava}}}{W_{\text{hava}} - W_{\text{su}}} \times \rho_{\text{su}} \quad (3.1)$$

$$\% \text{Gözenek} = \frac{\rho_{\text{teorik}} - \rho_{\text{deneysel}}}{\rho_{\text{teorik}}} * 100 \quad (3.2)$$

$$\% \rho = \frac{\rho_{\text{deneysel}}}{\rho_{\text{teorik}}} * 100 \quad (3.3)$$

ρ_{deneysel} : Deneysel yoğunluk (g/cm³),

ρ_{su} : Su yoğunluğu (g/cm³)

W_{hava} : Havadaki ağırlık (g) ,

W_{su} : Sudaki ağırlık (g)

ρ_{teorik} : Teorik yoğunluk (g/cm³),

% Gözenek: Gözeneklilik yüzdesi

% ρ : Yoğunluk yüzdesi

3.6 Sinterlenen Numunelerin Mikroyapı Hazırlığı ve İncelemeleri

Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları; taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve optik mikroskop, ile incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı incelemelerinden önce numuneler 60, 120, 180 ,240, 400, 600, 800, 1000 ,1200, 1800, 2000 ve 2500 mesh'lik zımpara kağıtları ile zımparalanıp, daha sonra 1 μ m' lik parlatma çözeltisi ile parlatılmışlardır. Numuneler %10 Potasyum Hidroksit çözeltisi kullanılarak elektrolitik 6V , 90 sn. olarak elektrolitik olarak dağlamaları gerçekleştirilmiştir. Nikon ticari marka Eclipse MA100 model ters metal mikroskopa yüzey mikroyapıları 10x/20x/50x büyütmelemlerde incelenmiştir.

Optik mikroskopa yapılan incelemeden ve görüntülemekten sonra, numuneler içindeki her bir alaşım elementinin % oranı ve dağılımını incelemek için SEM ve EDS enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile donatılmış EVO/LS10 Marka taramalı elektron mikroskobu SEM kullanılmıştır. Farklı Borkarbür % oranları B₄C sonrasında, kompozit yapıda içerisinde bulunan fazlar ve faz

kompozisyonlarındaki değişimleri belirlemek için X-ışını kırınım cihazı XPERT Pro ile işlem yapılmıştır.

3.7 Sertlik Testleri

Numune kompozitlerin sertlik değerleri oda sıcaklığında yapılan sertlik testleri (Tablo.4.5) ile belirlenmiştir. Sertlik testi için Rockwell HRC yöntemi uygulanmıştır. 150Kg yükte ölçümler alınmıştır. Her bir numuneden en az 3 adet sertlik ölçümü yapılmıştır. Ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır.

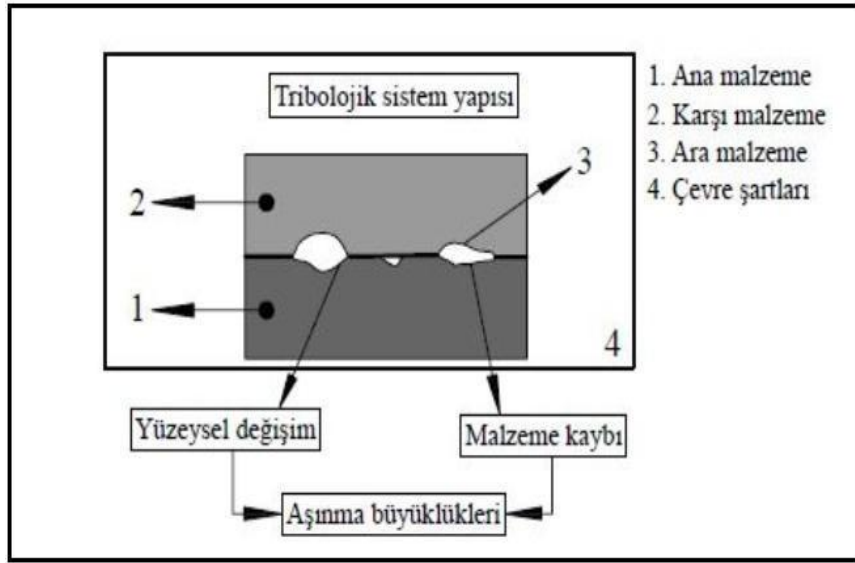
3.8. Aşınma Mekanizması

Aşınma, sürtünme gibi çeşitli faktörler nedeniyle katı bir yüzeyden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Diğer bir ifadeyle, kullanılan malzeme başka bir malzeme ile temas ettikten sonra küçük parçacıkların mekanik etkenlerle yüzeyden uzaklaşması sonucu oluşan istenmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanmaktadır.[48] Başka bir anlatımla aşınma, teknik olarak bilinen şekil veya malzeme değişiklikleri hariç, sürtünmenin neden olduğu katı bir yüzeyi oluşturan bir malzeme alanının kalıcı bir deformasyonu veya malzeme değişikliği olarak tanımlanmaktadır.[52]

Malzeme aşınmasının aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki koşulların karşılanması gerekir: Mekanik bir etkinin olması, sürtünmenin olması (bağlı hareket), yavaş fakat devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi, istenilmediği halde meydana gelmesidir. Bu koşullardan herhangi birini karşılamayan bir aşınma olayı, bir aşınma olayı olarak kabul edilmemelidir.

Genel olarak motor yataklarında, frenlerde, pistonlarda, dişlilerde, kırıcı ve öğütücülerde, tarım makinelerinde, türbin kanatlarında, cevher madenciliği ekipmanları gibi cihazlarda meydana gelmektedir. .[53]

Aşınma olayını belirli bir malzeme özelliği olarak değil, olayı bir sistem olarak ele alınmalı ve bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Bu sisteme teknik olarak tribolojik sistem denir. (Şekil 3.6)



Şekil 3.6 Tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi.

Triboloji, sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını içine alır. Triboloji sistemi karşılıklı etkileşim içerisinde olan elemanlarda (temel malzeme, karşı malzeme, ara ürün) hız, termal koşullar ve gerilimler birleştiğinde meydana gelen aşınma olgusunu ele alır.

Tribolojik sistem elemanları:

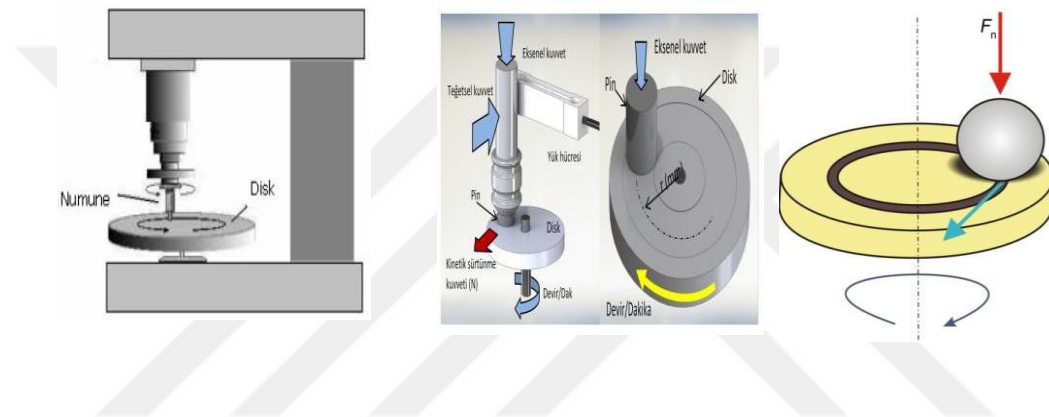
- a- Esas malzeme (aşınan): Kimyasal ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra yüzey şekli, yapısı ve durumu tanımlanmış ve aşınması incelenmiş bir parçadır.
- b- Karşı malzeme (aşındıran): Aşınmanın meydana gelmesinde başlıca öneme sahip olan karşı sürtünme elemanı, katı bir cisim, sıvı veya gaz olabilir. Temel malzeme ve karşı malzeme, aşınmaya eğilimli bir kombinasyon oluşturur.
- c- Ara malzeme: Esas sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar, ya da bunların karışımı şeklinde bulunan maddedir.
- d- Yük: Etki eden kuvvetin büyüklüğü , türü (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmadığı) doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemenin şiddetini belirleyen etmenleri oluşturur.
- e- İzafi hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma veya çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıklı olduğu), büyüklüğü ve doğrultusu ile belirlenir.
- f- Çevre (ortam): Sistemi içine alan ve genellikle sıvı veya gaz halinde bulunan ortamdır. Su, ortam ve gazlar teknikte en sık rastlanan çevre ortamlarıdır.[53]

Aşınma mekanizmaları şunlardır;

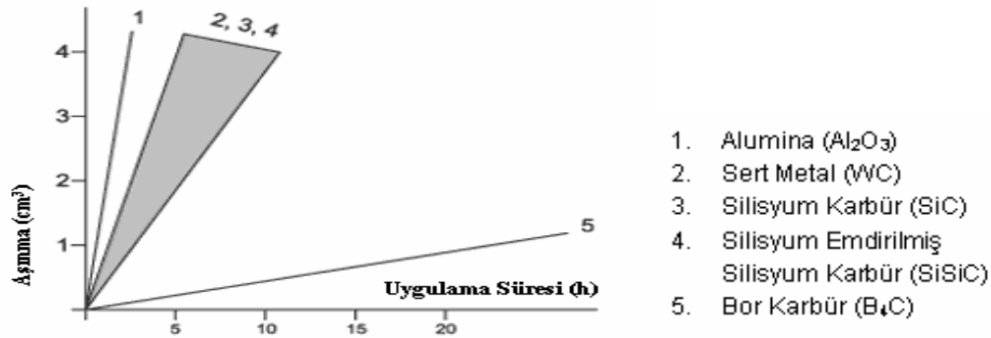
Adhesiv aşınma, Abrasiv aşınma, Ergime ile aşınma, Oksidasyon aşınması, Plastisite aşınması.

Malzeme aşınma özellikleri; aşındırıcı konumu, boyut, şekil, sertlik, uygulanan yük ve aşınma oranı gibi çeşitli çalışma parametrelerinden etkilenir. Malzemeler farklı aşınma türlerine maruz kalabilir.

Disk üzerinde pin aşınma mekanizması yaygın bir aşınma tipidir. Aşınma davranışını incelemek için numuneler, belirli bir hızda dönen bir disk üzerinde belirli bir yük altında aşınmaya tabi tutulur. Disk üzerindeki pim aşınma mekanizmasının genel ifadesi Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Disk üstünde pim ve bilya aşınma mekanizması



Şekil 3.8 Aşınma dirençlerinin karşılaştırması

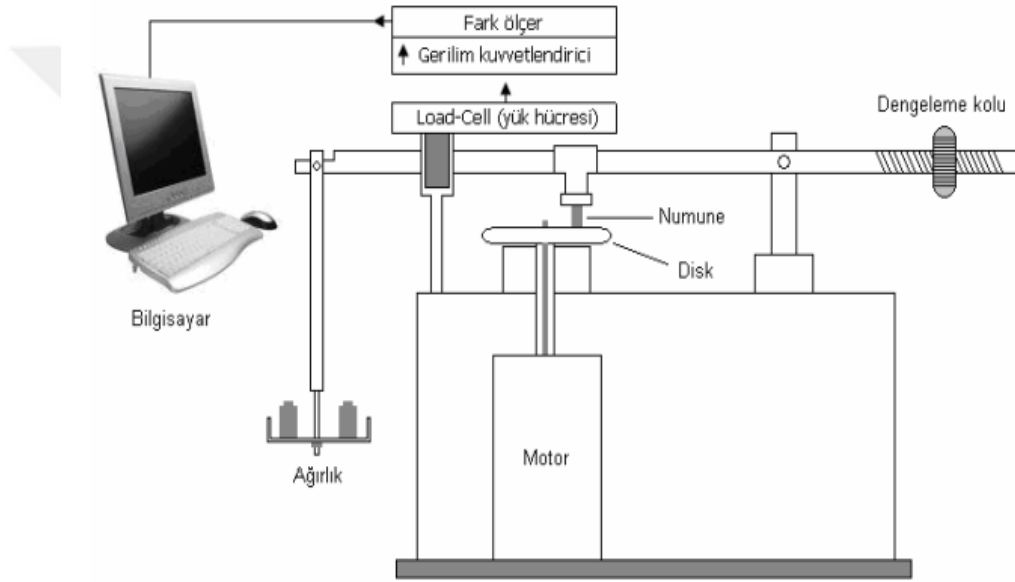
3.8.1 Aşınma Analiz Testleri

Aşınma testleri, Şekil 3.7'de gösterilen DIN 50324 standardına göre dizayn edilmiş ball-on-disk (disk üstünde aşındırıcı küresel seramik bilye) temeline göre çalışan aşınma cihazında yapılmıştır. Ball on disk aşınma cihazı kullanılarak oda sıcaklığında kuru ve yağsız kayma koşulları altında gerçekleştirildi. Ball on disk tipi Tribometer Turkeyus marka test cihazında uygulanmıştır. Bu testler 217 m/s

dönüştürme hızında, 15 N, yükte ve toplamda 102 m kayma uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Karşıt malzeme olarak küresel alümina sert seramik bilye kullanılmıştır. Sürtünme ve aşınma işlemi her bir numune için 30 dk. olarak tutulmuştur. Aşınma testine tabi tutulacak malzemeler, Şekil3.9 'de görüldüğü gibi cihaz üzerinde bulunan dairesel kesitli düz bir zemine sahip olan döner disk üzerine sabitlendi. Cihazın mandrenine bağlanan küresel Alümina seramik aşındırıcı bahsedilen disk üzerinde aşınma yönüne dik şekilde sürekli olarak hareket ettirildi. Aşınma deneyinden önce ve sonra numuneler 0,0001 g hassasiyetinde elektronik terazi ile tartılarak aşınma ile oluşan ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Numunelerin aşınma kayıpları Tablo 3.4'te verilen parametreler doğrultusunda, birim mesafede ve yükte gerçekleşen ağırlık kaybı olarak hesaplanmıştır.(mm³/mN). Aşınma testleri sonrası numunelerin aşınan yüzeyleri optik mikroskopta ve SEM analizi ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 3.7'de Ball On Disk aşınma deneyi mekanizması ve aşınma test cihazı gösterimi verilmiştir.

Tablo 3.4 Aşınma deneyi test parametreleri

Uygulanan Kuvvet N	15
Dönüş Hızı rpm	217
İz Çapı mm	5
Hız m/sn	56,8
Sıcaklık C	26
Süre Sn	1800
Yol mesafe mm	102255,8

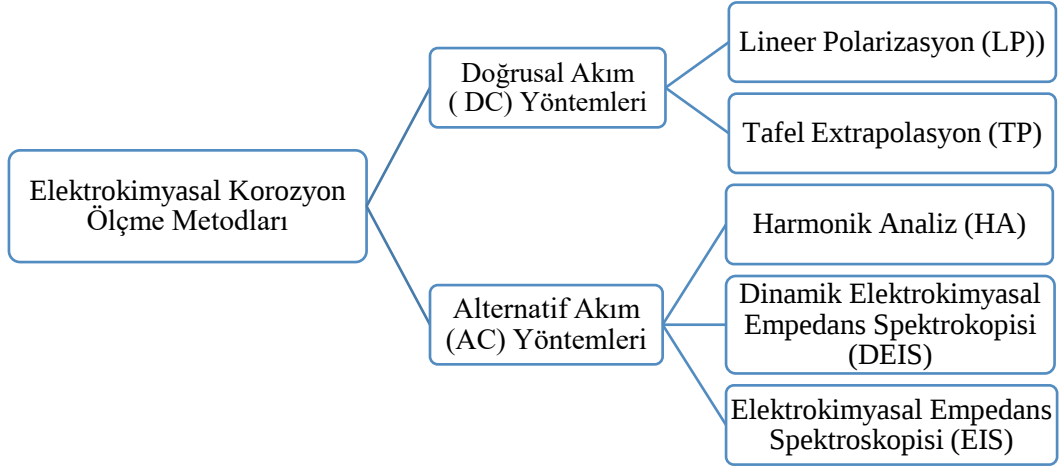


Şekil 3.9 Aşınma deneyi test cihazı ve aşınma mekanizması

3.9 Elektrokimyasal Korozyon Hızı ve ölçülmesi.

Metal ve alaşımların korozyona karşı dayanımlarını birbirleri ile karşılaştırmak için, her birinin korozyon hızı nicel verilerle ifade edilebilmelidir. Literatürde korozyon hızının çeşitli yollardan ifadesi mevcuttur. Sulu ortamlarda gerçekleşen korozyon elektrokimyasal nitelikte olduğu elektrokimyasal korozyon test yöntemlerinin önemi büyüktür.

Elektrokimyasal olarak korozyon hızını ölçmekte kullanılan yöntemler şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10 Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri

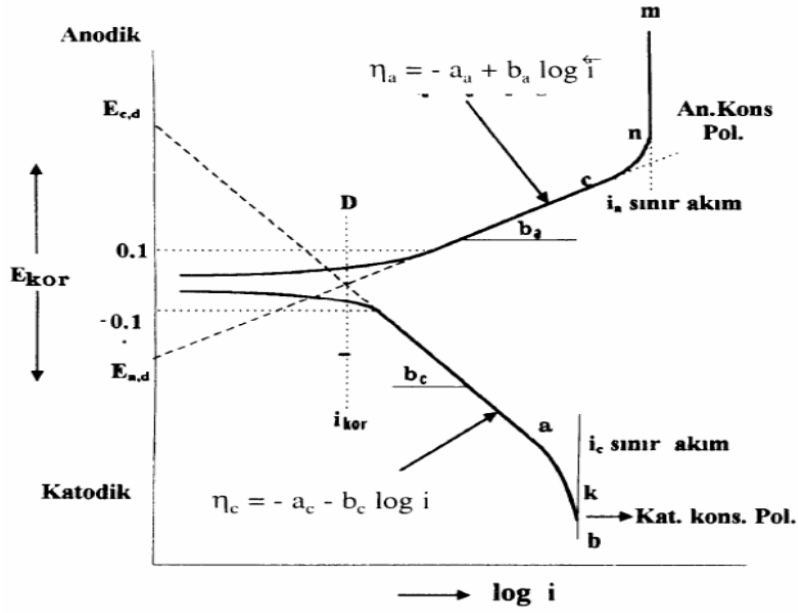
Yeni geliştirilen elektrokimyasal yöntemlerle korozyon hızlarını ölçmek, katodik ve anodik polarizasyon eğrilerinden birini veya her ikisini birden kullanmaya dayanır. Bu yöntemde, korozyon hızı bir akım-potansiyel eğrisi kullanılarak ölçülür.

Akım-potansiyel eğrisi, (Şekil 3.11) yarı logaritmik bir ölçekte çizilen bir eğridir. Çalışan elektrot potansiyeli, ortamın oksitleyici gücünü yansıtır ve akım yoğunluğu, korozyon hızının bir ölçüsüdür. .[54]

Korozyon, metal ve çözelti arasındaki karşılıklı iki elektrokimyasal tepkimenin dengelenmesi sonucu oluşur. Tepkimelerden biri metalin çözünmesi sonucu oluşan anodik tepkime, diğeri ise çözelti ortamındaki O_2 veya H^+ 'nın indirgenmesi sonucu oluşan katodik tepkimedir. Anodik tepkime sonucunda açığa çıkan elektronlar katodik tepkimede indirgenme için kullanılır.

Yenime (korozyon) uğrayan elektrotlar için, elektrot yüzeyinde aynı anda anodik ve katodik reaksiyonlar meydana gelir. Elektrot potansiyeli karışık bir potansiyel değerine (E_{kor} , korozyon potansiyeli) ulaşır. Bu potansiyele karşı ortaya çıkan akıma korozyon akımı (I_{COR}) denir.

Tafel ekstrapolasyonu, korozyona uğramış metalin Tafel anodik ve katodik eğrilerini verir, doğrusal kısımları uzatılır ve kesişme noktasından, sistemin korozyon hızı i_{cor} 'unu ve korozyon potansiyeli E_{cor} 'unu belirler. .[54]



Şekil 3.11 Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile korozyon akımının (I_{kor}) bulunması

Tafel polarizasyon yönteminin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- 1) İdeal koşullar altında, tafel polarizasyon yöntemiyle elde edilen değerin doğruluğu, geleneksel ağırlık kayıp metotlarıyla elde edilen değerlere eşit veya daha fazladır.
- 2) Çok düşük korozyon hızlarının tespitinde dahi, başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.
- 3) Tafel eğrileri ile korozyon akımı ve korozyon hızı kolayca ve az zaman içerisinde bulunabilmektedir. [55]

3.9.1 Korozyon Testleri

İlgili numune parçaların korozyon direnci ve hızı elektrokimyasal korozyon test çalışmaları ile belirlenmiştir. Elektrokimyasal korozyon (yenim) testlerinden önce numunelerin yüzeyleri metalografik olarak farklı numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanıp parlatılmıştır. Elektrokimyasal yenim testleri için Ivium Compactstat marka model potansiyostatik korozyon test cihazı, yazılımı ve korozyon test hücre düzeneği kullanılmıştır. Bu korozyon testleri, bir karşıt elektrot (platin tel), bir kaynak referans elektrot ($Ag/AgCl$), ve bir test elektrotundan (numune) oluşan standart üçlü elektrot içeren korozyon test hücresinde gerçekleştirilmiştir.

Korozyon tarama hızı 1 mV/s olacak şekilde -10 mV ve 1,7 V aralığında tarama yapılmıştır. Korozyon test hücresi olarak 3,5 %lik NaCl ile 300 mL saf su karışımı kullanılmıştır.

Takviyesiz Dupleks Paslanmaz Çelik ve borkarbür B₄C takviyeli kompozitlerinin korozyon özellikleri, oda sıcaklığında 3,5% NaCl karışımında incelenmiştir. Her numune için potansiyostatik polarizasyon eğriler test cihazında deneysel olarak oluşturulmuş ve Tafel extrapolasyon grafikleri (voltaj & logaritmik akım yoğunluğu) karşılaştırmalı olarak çıkarılmıştır.

Kompozit numuneler üzerinde anodik korozyon testleri yapılarak, kompozitlerin pasifleşme davranışı, korozyon akım yoğunluğu ve çukurcuk potansiyeli hakkında karşılaştırmalı detaylı bilgiler elde edilmiştir.



DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

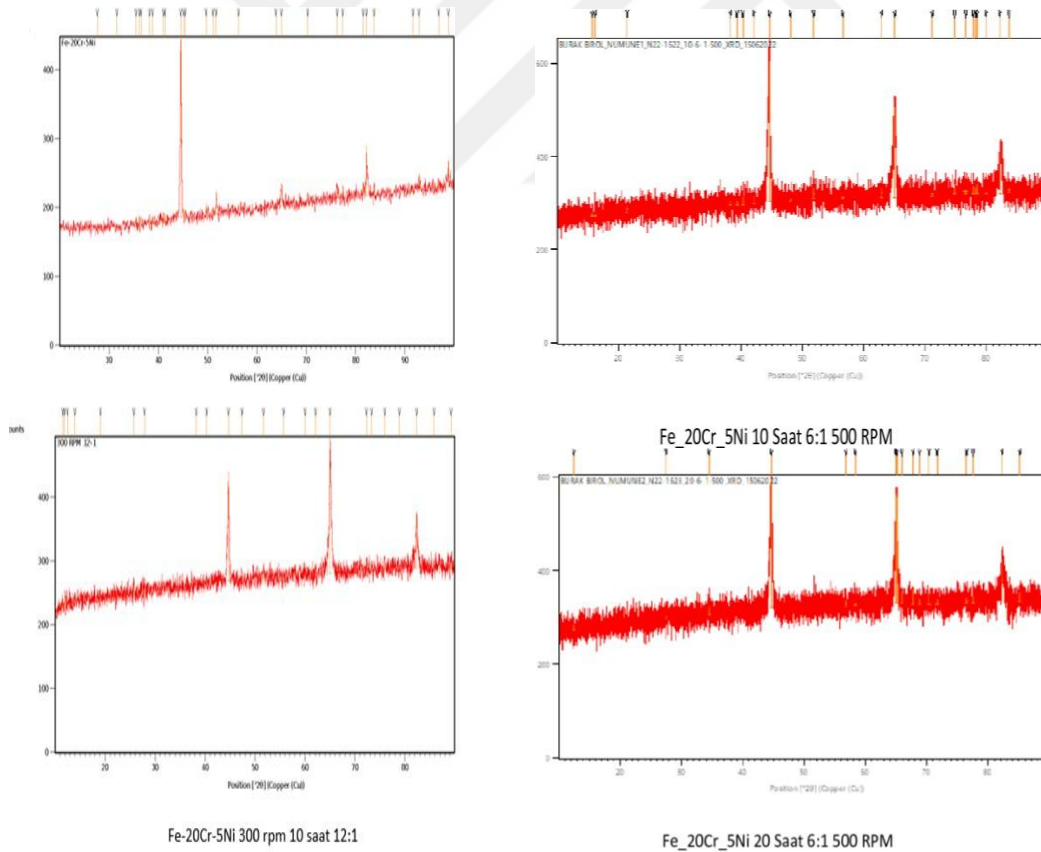
4.1 Mikroyapı XRD /SEM/EDS İnceleme ve Sonuçları

Mikroyapı çalışmalarında , farklı B₄C oranlarındaki numunelerin mikroyapı görüntüleri, optik mikroskopi , XRD ve (SEM) cihazları ile elde edilmiş ve elementel bileşenlerini teyit etmek için enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi ve elementel haritalama analizi gerçekleştirilmiştir.

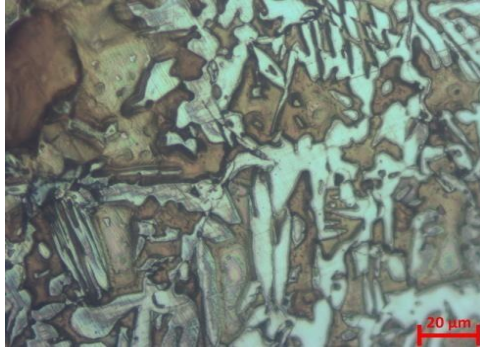
4.1.1 Mekanik Alaşımlamalı M/A , Çift Fazlı (Dupleks) Paslanmaz Çelik

Tozlarının XRD Analiz İnceleme ve Sonuçları

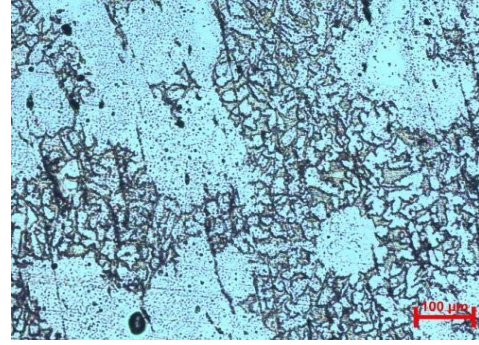
Şekil 4.1’de Mekanik alaşımlama ve öğütme işlemi sonunda elde edilen 75%Fe-20%Cr-5%Ni tozlardan alınan XRD analiz ve Şekil 4.2’de sinterlenmiş numunelerin metalografik görüntü sonuçları verilmiştir.



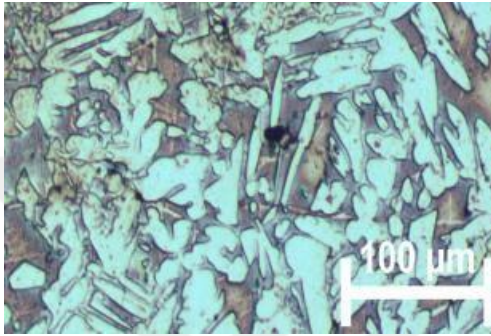
Şekil 4.1 Farklı MA parametrelili toz malzemelerin XRD analizleri



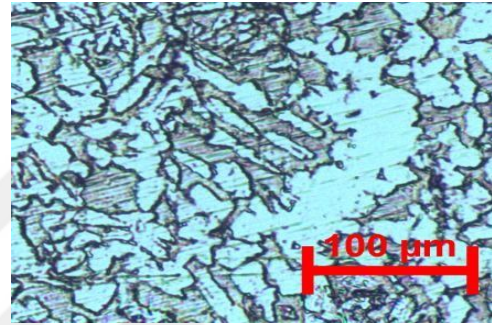
Fe-20Cr-5Ni 300 rpm 10 saat 6:1



Fe-20Cr-5Ni 300 rpm 10 saat 12:1



Fe-20Cr-5Ni 500 rpm 10 saat 6:1



Fe-20Cr-5Ni 500 rpm 20 saat 6:1

Şekil 4.2 Sinterlenmiş malzemelerin metalografik görüntüleri

XRD analizlerinden de görüleceği üzere artan öğütme süresiyle piklerde genişlemeler ve şiddetlerinde düşmeler görülmektedir. Öğütme süresini artmasıyla, kristalin Cr ve Ni piklerinin kaybolmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

4.2 Toz Metalurjisi ile B₄C Takviyeli DPÇ Matrisli Kompozitlerin Üretim Parametrelerinin İncelenmesi.

4.2.1 Matris Malzemeleri

Yapılan deneysel çalışmalarda, toz metalurjisi metoduyla yüksek enerjili öğütme ve alaşımlama ile üretilen Fe, Cr ve Ni elemental toz matrisli ve ağırlıkça %1 ,%3 ve %5 oranlarında B₄C parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Yumuşak bir matrise sert parçacık takviyesi eklemek, malzemenin sertliğini artırır ve aşınma oranını azaltır.[62]

Bu nedenle, Paslanmaz çelik, üstün korozyon direnci ve yüksek mukavemeti nedeniyle su altı nükleer uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Uygulama, bu üstün özelliklerin yanı sıra, dinamik işlemler altında

nötron absorpsiyonu ve yüksek aşınma direnci talep etmektedir. Seramik takviyeler, uygun bir kompozit tasarımıyla metal alaşımın bu özelliklerini geliştirmeye yardımcı olur. [56]

Mevcut deneysel çalışma, yüksek aşınma dirençli ve radyasyona (nükleer) toleranslı bor karbür (B₄C)–DPÇ Fe-20Cr-5Ni kompozit malzemenin üretimi ve karakterizasyonu ile ilgili bir çalışmadır. Ağırlıkça %0–5 B₄C seramik takviyeli DPÇ metal matrisi, Yüksek enerjili öğütme ve alaşımlama toz metalürjisi tekniği ile üretilmiştir. Tablo 4.1 ve 4.2 ‘de kullanılan matris elementlerin ve B₄C takviyesinin fiziksel özellik, yüzde ağırlık oranları verilmiştir.

Tablo 4.1 Kompozit üretiminde kullanılan tozların ağırlık karışım oranları

Mlz. No	Toz Malzemeler (ağırlıkça%)	
	Fe- %20Cr-%5Ni	B ₄ C
1	100	**
2	99	1
3	97	3
4	95	5

Tablo 4.2 Tozların fiziksel özellikleri

Kullanılan Tozlar	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ortalama Toz Tane Boyutu (µm)
Fe	7,87	<50
Cr	7,19	<50
Ni	8,90	<50
B ₄ C	2,52	<10

4.2.2 Takviye Malzemesi

Yüksek erime noktasına, mükemmel sertliğe, iyi mekanik özelliklere, düşük özgül ağırlığa, mükemmel kimyasal dirence ve nötron soğurma kesitine sahip olan bor karbür, hafif zırh, termoelektrik dönüşüm gibi özellikleri nedeniyle günümüzde yüksek teknoloji için önemli bir malzemedir. Bor karbür, yüksek bor içeriği, ve yüksek erime noktası ve yüksek fiziksel ve kimyasal kararlılığı nedeniyle nötronları soğurmada verimli ve ekonomiktir.

Bor Karbür B_4C yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini muhafaza edebilen, yüksek ısı dirençli olup yine yüksek sıcaklıklarda iyi yenim ve oksitlenme direncine ve üstün sürünme ve kopma dayanımına sahip, ayrıca tipik olarak bir düşük yoğunluğa, yüksek erime noktasına ve iyi aşınma direnci olan bir malzemedir. Bu nedenle, bu çalışmada, yüksek sertliği, yüksek modülü, yüksek erime sıcaklığı ve iyi aşınma direnci nedeniyle B_4C takviye olarak kullanılmıştır. Diğer seramiklere göre artan sıcaklıkla birlikte dayanımı ve yenim direnci nedeniyle tercih edilen takviye malzemelerinden biridir. [47]

4.3 Yoğunluk Analizleri ve Sonuçları

Üretilen kompozitler üzerinde gerçekleştirilen yoğunluk ölçüm işlemleri, sinterleme sonrası teorik karışık yoğunluk ve deneysel yoğunluk değerlerinin ölçümleri olarak hesaplanmıştır. Amaç, sinterleme sonrası numunenin yoğunluk değişimini gözlemlemektir. Farklı oranlarda güçlendirilmiş malzemeler belirli bir süre ve sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. B_4C takviyeli DPC matris kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen yoğunluk ölçümlerinin sonuçları Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

Tablo 4.3 B_4C takviye oranlarına göre yoğunluk değişim sonuçları

Malzeme	B_4C %	Uygulanan İşlem	Ölçülen Yoğunluk gr/cm ³
Fe-20Cr--5Ni (M-B0)	0	Harmanlı+Sinterli (1200C-75 dk)	6,448307
Fe-20Cr--5Ni (MA-B0)	0	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	7,399162
(Fe-20Cr--5Ni)- B_4C (MA-B1)	1%	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	6,913500
(Fe-20Cr--5Ni)- B_4C (MA-B3)	3%	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	6,86021
(Fe-20Cr--5Ni)- B_4C (MA-B5)	5%	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	6,784817

Yoğunluk ölçüm sonuçları, B₄C oranı arttıkça örneklerin yoğunluk değerlerinin düştüğünü göstermektedir. Bu durumda bor karbürün yoğunluğu DPÇ'den daha düşüktür, dolayısıyla B₄C yüzdesi arttıkça yoğunluk değerlerinin genel olarak düştüğünü görebiliriz. Sonuç olarak bu durumun takviye oranının artmasından kaynaklandığı, takviye oranı arttıkça sıkıştırılabilirliğin ve yapışmanın zayıfladığı ve gözenekliliğin arttığı şeklinde yorumlanmıştır.

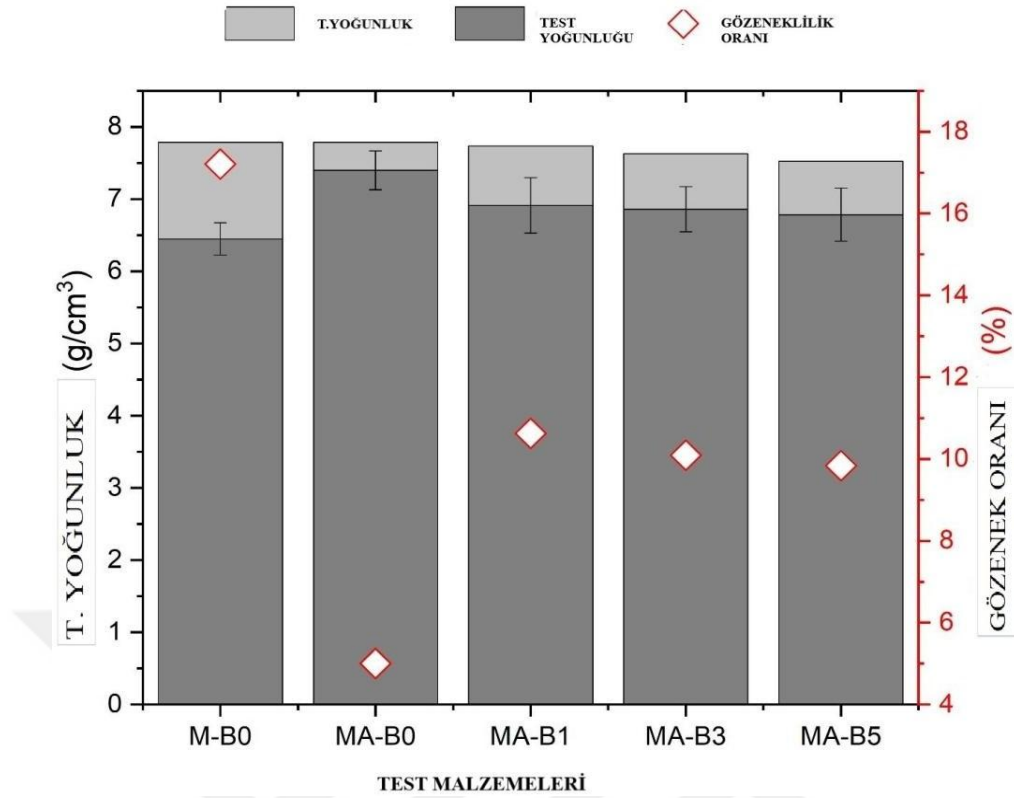
Gözeneklilik değerleri incelendiğinde, % 0 B₄C en düşük gözenekliliği verir ve % 5 B₄C numunesi en yüksek gözenekliliği verir. Bunun nedeni muhtemelen B₄C oranı arttıkça DPÇ'nin yapıda artan B₄C partiküllerinin etrafına yayılmasının zorlaşması ve bu partiküllerin bağlanma olasılığının azalmasıdır.

Ayrıca yapıdaki takviye edici partiküllerin refrakter ve düşük ısı iletkenliği, sinterleme sırasında ısı iletimini engelleyerek güçlendirme oranını artırır, böylece difüzyonu azaltır, böylece sinterleme mekanizmasını ve dolayısıyla büzülmeyi ve boşluk azalmasını engeller.

Artan B₄C takviye oranı ile porozitenin artışı göstermesinin bir diğer nedeni, daha yüksek sertliğe ve dolayısıyla daha az sıkıştırılabilirliğe sahip takviye parçacıklarının miktarı arttıkça, kompozitin genel sıkıştırılabilirliğinin azalmasıdır. Sonuç olarak artan B₄C ilave oranı ile gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla takviye oranı arttıkça gözeneklilik artmıştır, yoğunluğun azaldığı sonucu çıkmıştır. (Tablo 4.4 ve Şekil 4.3)

Tablo 4.4 B₄C takviyeli DPÇ matriksli kompozitin yoğunluk/gözeneklilik değerleri.

Numune	Uygulanan İşlem	Teorik Yoğunluk gr/cm ³	Test Yoğunluk gr/cm ³	Gözeneklilik %	Yoğunluk Yüzdesi %
Fe-20Cr--5Ni (M-B0)	Harmanlı+Sinterli (1200C-75dk)	7,79	6,45	17,18	82,82
Fe-20Cr--5Ni (MA-B0)	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	7,79	7,40	4,96	95,04
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B1)	M/A+Sinterli (1200C-75dk)	7,73	6,91	10,60	89,40
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B3)	M/A+Sinterli (1200C-75dk)	7,68	6,86	10,65	89,35
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B5)	M/A+Sinterli (1200C-75dk)	7,52	6,78	9,80	90,20



Şekil 4.3 B₄C oranlarına göre DPÇ kompozit yoğunluk karşılaştırması

4.4 Sertlik Analizleri ve Sonuçları

Bor karbür B₄C takviyeli kompozit numunelerin sertlik ölçümlerinin sonuç değerlendirilmesinde, sertliğin sürekli borkarbür B₄C takviye oranının artmasıyla artış göstermiştir. Yoğunluk değerlerinin tersine artan B₄C takviye miktarı ile sertlik değerleri de artmıştır. Bunun nedeni birinci olarak deformasyon sertleşmesi, ikinci olarak ise takviye parçacıklarının homojen dağılımı ve bunun sonucunda sertlik izi alanına düşen miktardır.[45]

Tablo 4.5'te ve Şekil 4.4'de verilen sertlik verileri ve grafiği incelendiğinde, özellikle B₄C parçacık ilaveli ve ilavesiz DPÇ alaşımını kıyasladığımızda, bor karbür B₄C ilaveli kompozitin sertliği artmaktadır.

Bu durum sert kırılğan faz olan B₄C parçacıklarının dağılım mukavemetlenmesi yaparak malzemenin sertliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan bu çalışmada da B₄C ilavesinin artması ile sertliğinde önemli derecede arttığı görülmüştür.

Başka bir ifade ile belirtilirse, B₄C Parçacık ilavesi nedeni ile matrisin plastik deformasyon yeteneği azaldığı için, matriste bir sertlik artışı tespit edilmiştir. Yumuşak bir matrisle çevrili olan B₄C parçacıklarının yüksek sertliği yüzünden,

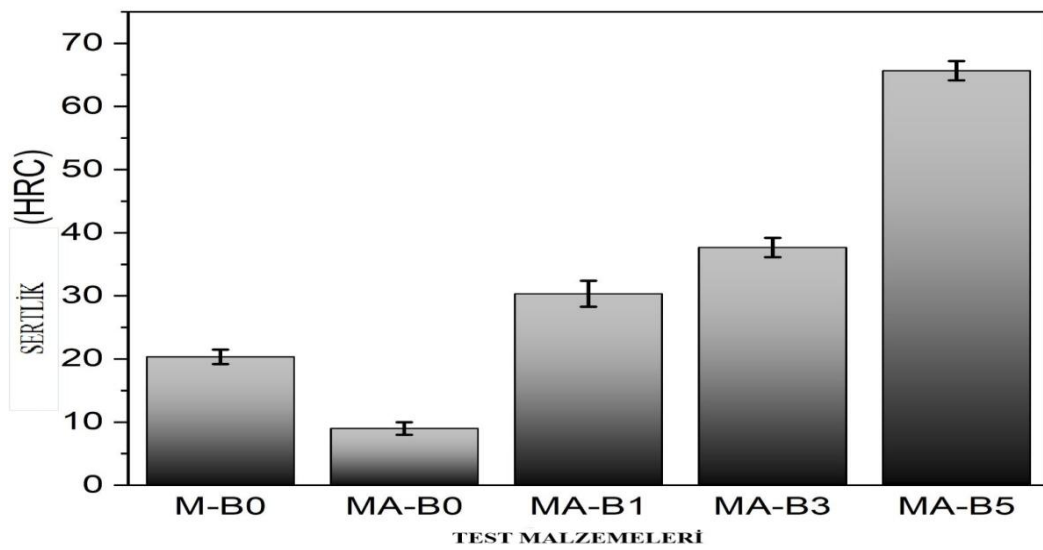
kompozit malzemelerin sertliğinin DPÇ matristen daha yüksek olduğu görülmüştür.[57]

Basıncın artmasıyla birlikte sertlik artmış, görülen sertlik artışı, plastik deformasyondan kaynaklanmaktadır. Sertlik sonuçlarında görüldüğü gibi, <10µm tane boyutuna sahip numunelerin 40-45 µm tane boyutuna sahip numunelere göre daha fazla sertlik sağlaması, bunun parçacık alanına bağlı olduğunu gösterir.[57]

Buradan genel geçer bir ifadeyle kompozit malzemedeki Fe-Cr-Ni matris ve B₄C takviye parçacık boyutlarının birbirine eş değer yakın seçilmesinin sonucuna varılmaktadır.

Tablo 4.5 Malzeme sertlik ölçüm çalışması HRC(150 Kg)

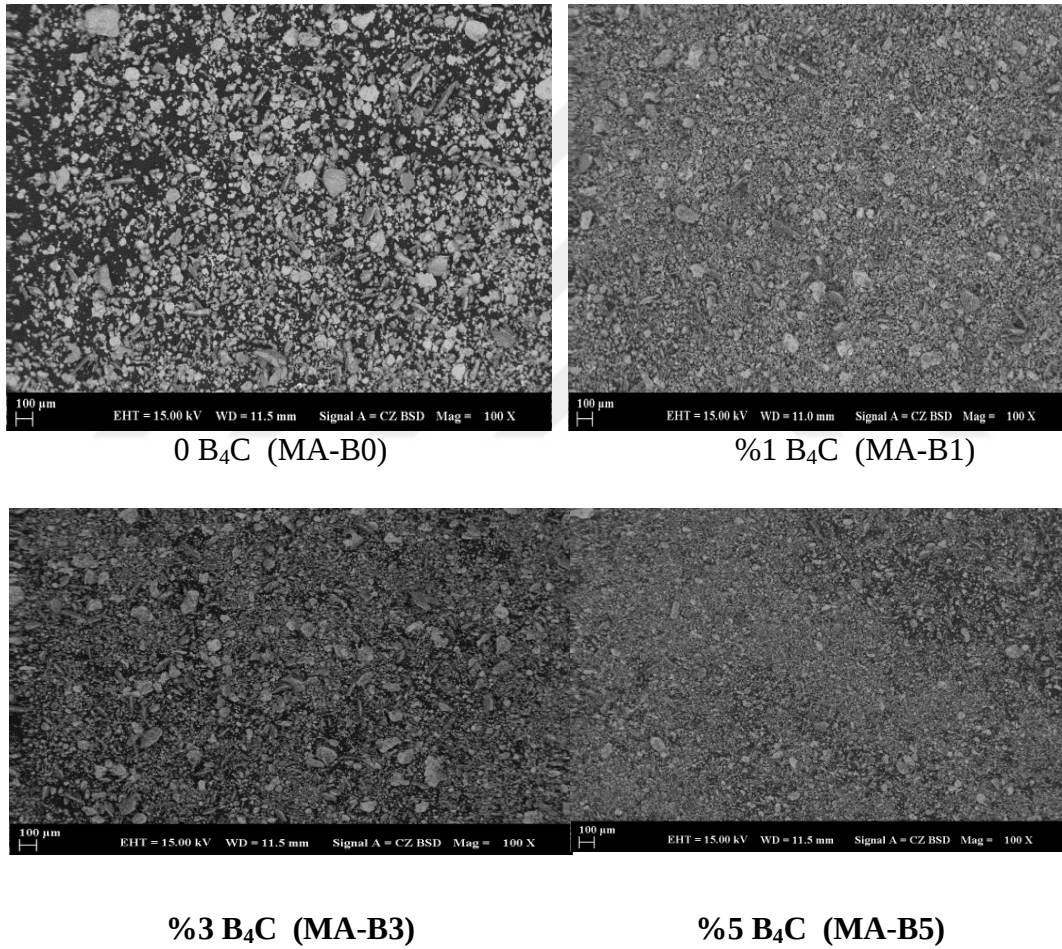
Malzeme	B ₄ C Oranı	Uygulanan İşlem	Sertlik Toplamı HRC	Ortalama Sertlik HRC
Fe-20Cr--5Ni (M-B0)	0	Harmanlı+Sinterli (1200C-75 dk)	61	20,33
Fe-20Cr--5Ni (MA-B0)	0	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	27	9,00
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B1)	1%	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	91	30,33
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B3)	3%	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	113	37,67
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B5)	5%	M/A+Sinterli (1200C-75 dk)	197	65,67



Şekil 4.4 Farklı B₄C oranlarına göre DPÇ matrisli kompozit sertlik değişimi

4.5 MA ve B₄C Takviyeli Toz Malzemelerin SEM Analiz Sonuçları

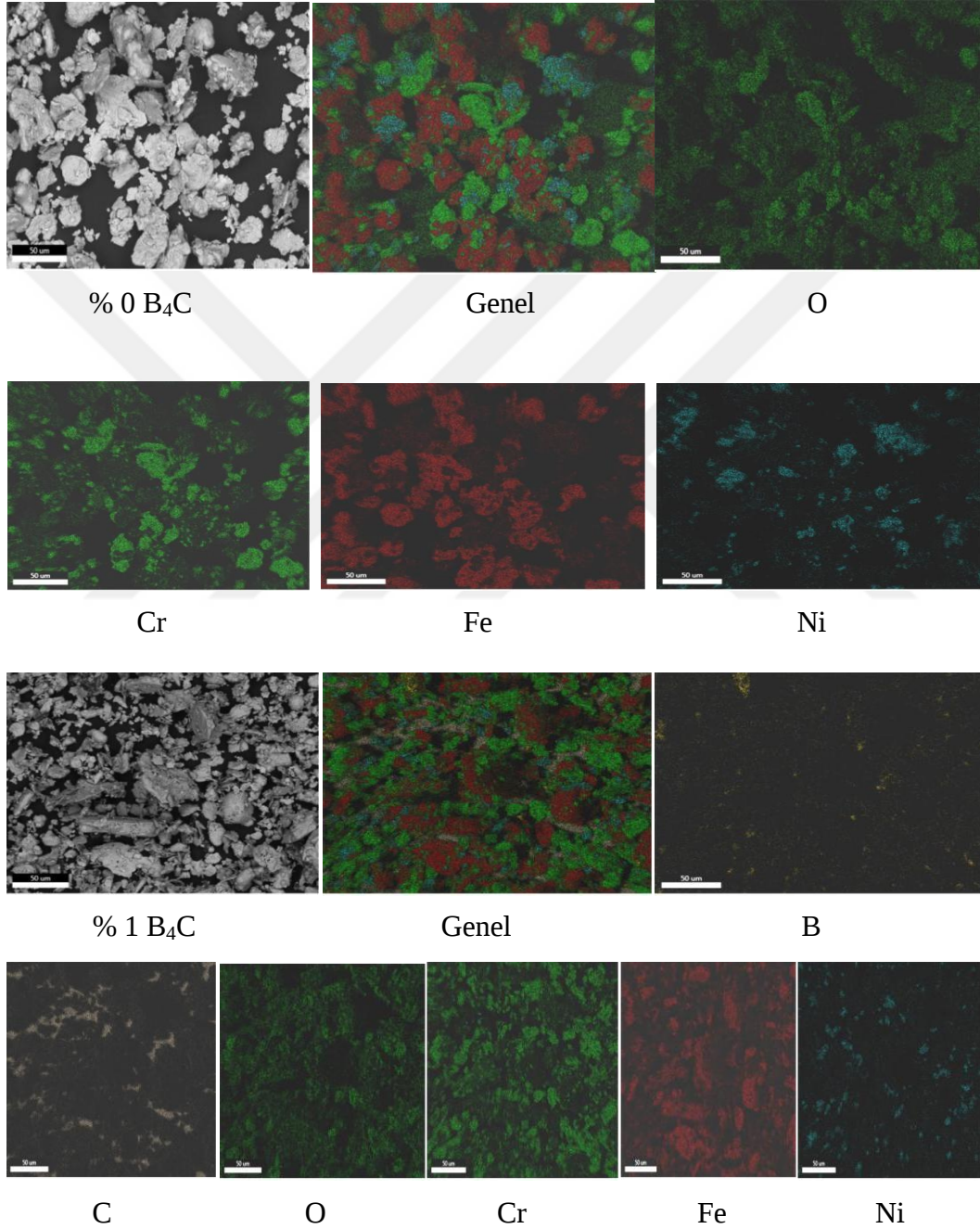
Bu tez çalışması kapsamında, Bor karbür (ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5 B₄C) partikül takviyesi içeren Fe-20Cr-5Ni matrisli MMK'lerin yüksek enerjili öğütme hızı (300 dev/dk) kullanılan mekanik alaşımlama MA yöntemi ve 120 bar basınçta tek yönlü hidrolik presleme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan Fe-Cr-Ni elemental (Saflık %99.9) tozlar (ortalama boyutu <50 µm) ve B₄C (ortalama partikül boyutu <10 µm) Türkiye'deki Nanokar isimli firmadan tedarik edilmiştir. Şekil 4.5 Fe-20Cr-5Ni / B₄C partiküllere ait mekanik alaşımlama sonrası görüntüleri içermektedir.

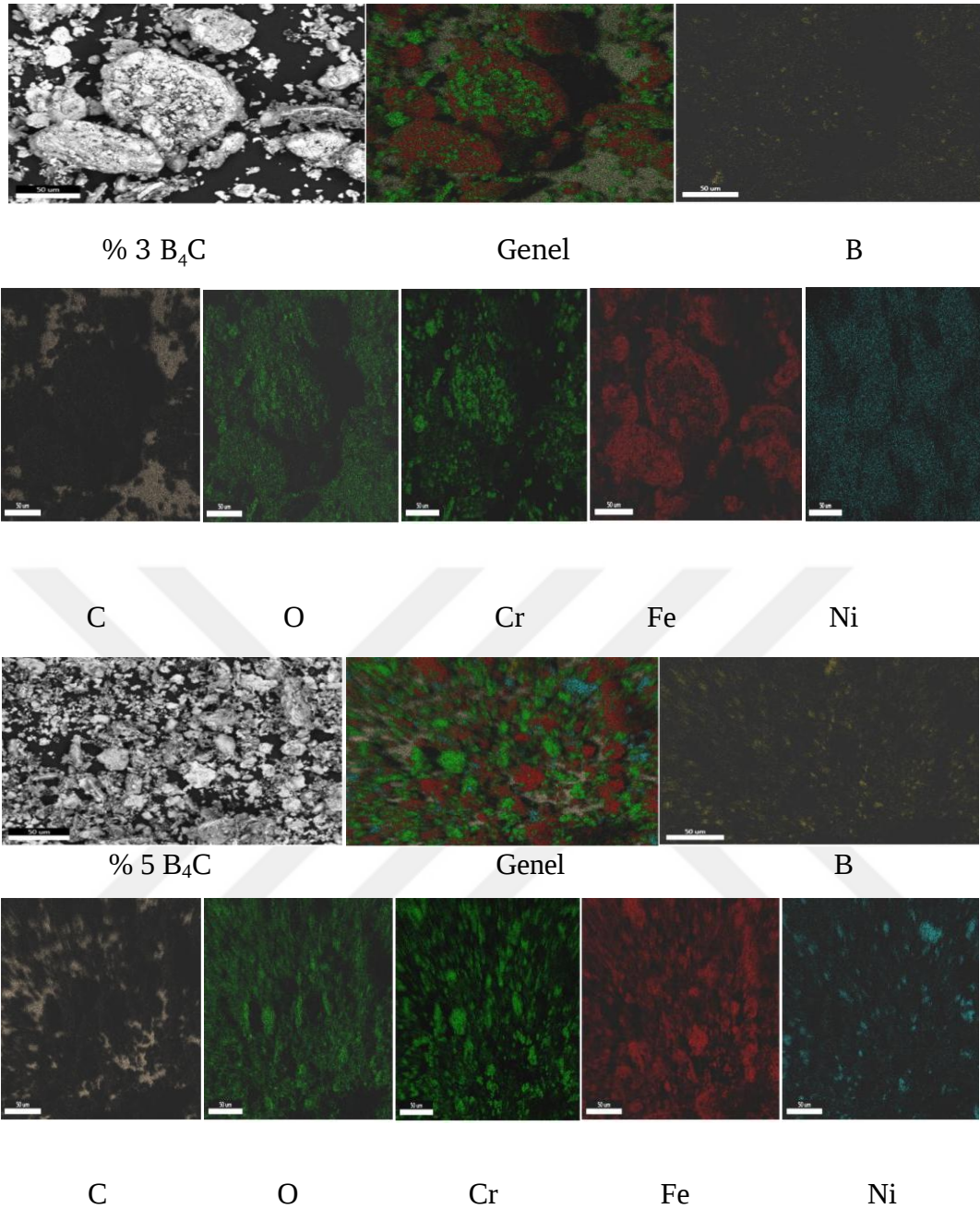


Şekil 4.5 MA sonrası elde edilen kompozit Toz malzemelerin morfolojik incelemelerine ait SEM görüntüleri;(Fe-20Cr-5Ni % 0 -1 -3 -5 B₄C)

4.6 MA ve B₄C Takviyeli Toz Malzemelerin Elementel Haritalama Sonuçları

X-Işını haritalama, imal edilen toz malzemelerin fiziksel varlığı ve kimyasal bileşimlerini belirlemek için kullanılır. 75Fe-20Cr-5Ni-B₄C'e ait toz malzemelerin elementel haritalama analiz sonuçları (Şekil4.6)'de gösterilmektedir.

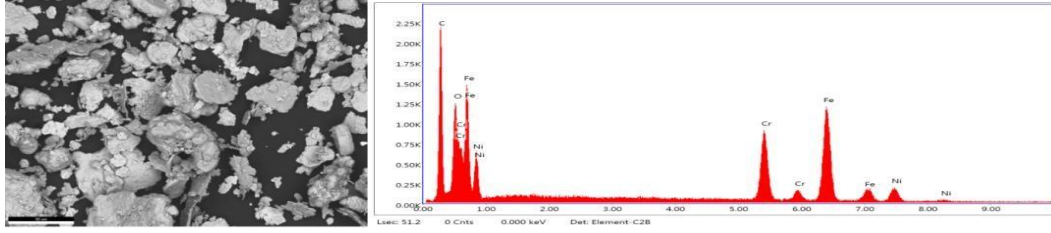




Şekil 4.6 Farklı B₄C takviyesi içeren toz malzemelere ait elementel haritalama görüntüleri; %0 B₄C (a) %1 B₄C, (b) %3 B₄C (c) %5 B₄C

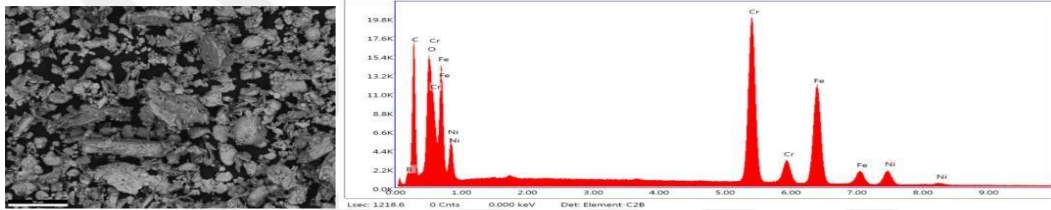
4.7 B₄C takviyeli DPÇ Matrisli Toz Malzemelerin SEM/EDS Görüntü Analizleri

Şekil 4.7’de üretilen 75Fe-20Cr-5Ni-B₄C MA lı toz malzemelerin SEM/EDS görüntüleri, EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizleri incelendiğinde Fe, Cr, Ni, B, C,pikleri tespit edilmiş, kompozitin 75Fe-20Cr-5Ni-B₄C olduğunu doğrulamaktadır. Bu EDS analizleri, toz malzemelerde bulunan çeşitli elementlere ait pikleri ve şiddet değerlerini göstermektedir. Krom, nikel ve demirin varlığı 75Fe-20Cr-5Ni’ in ve B₄C bileşimini doğrular durumdadır.



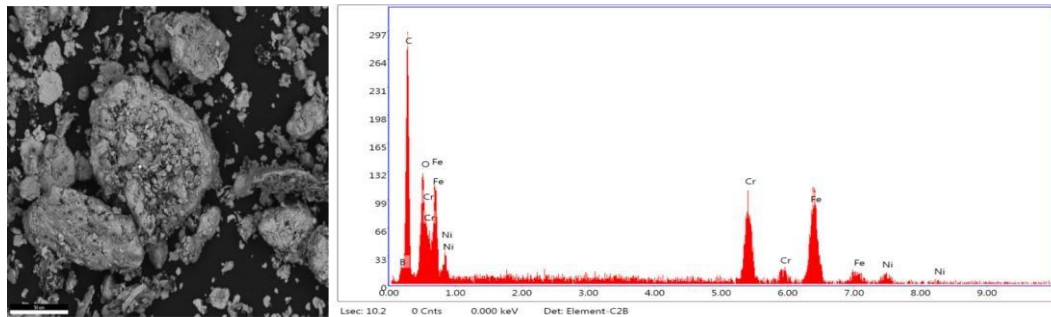
Element	Ağırlık%	Atomik %
C K	20.7	51.0
O K	4.9	9.0
CrK	19.8	11.3
FeK	44.9	23.8
NiK	9.8	5.0

a) 0% B₄C lü



Element	Ağırlık %	Atomik %
B K	2.9	8.7
C K	12.8	35.0
O K	3.7	7.5
CrK	37.0	23.4
FeK	36.0	21.2
NiK	7.6	4.3

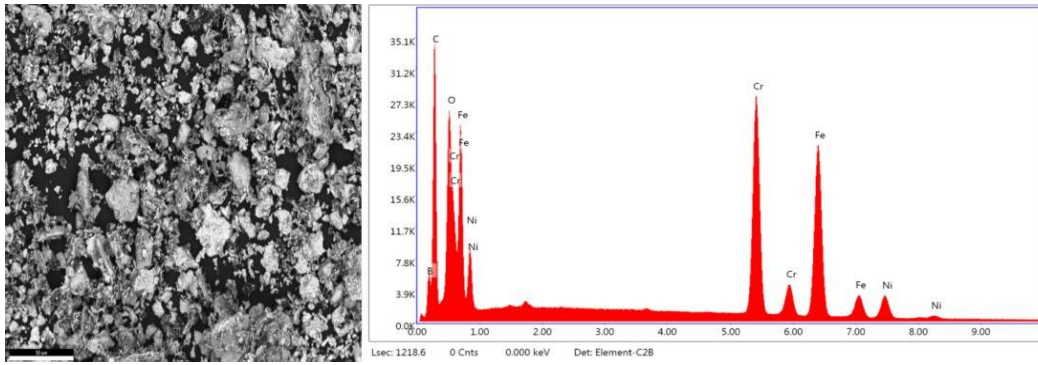
b) 1% B₄C



Element	Ağırlık %	Atomic %
---------	-----------	----------

B K	5.1	11.3
C K	26.9	53.4
O K	5.5	8.1
CrK	19.4	8.9
FeK	37.5	16.0
NiK	5.6	2.3

c) 3 % B₄C lü



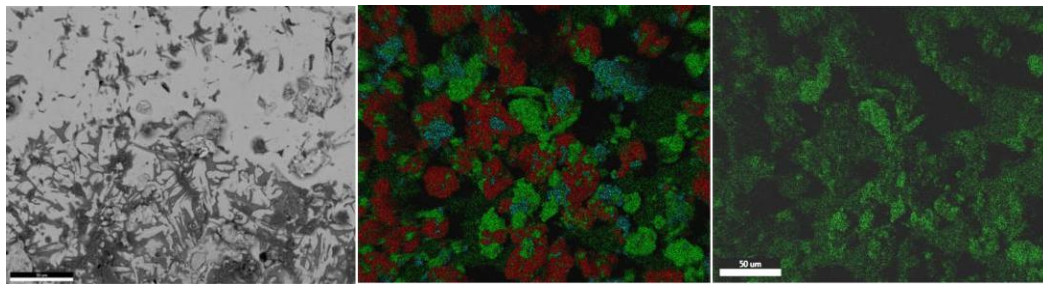
Element	Ağırlık %	Atomic %
K	7.4	19.0
C K	16.3	37.5
O K	4.1	7.0
CrK	28.3	15.0
FeK	36.4	18.0
NiK	7.4	3.5

d) 5% B₄C

Şekil 4.7 a),b),c),d) % 0-1-3-5 B₄C Takviyeli çift fazlı paslanmaz çelik matrisli toz malzemelerin SEM/EDS görüntü ve analizleri.

4.8 B₄C Takviyeli DPÇ Kompozitlerin X-Işını Elementel Haritalama Sonuçları

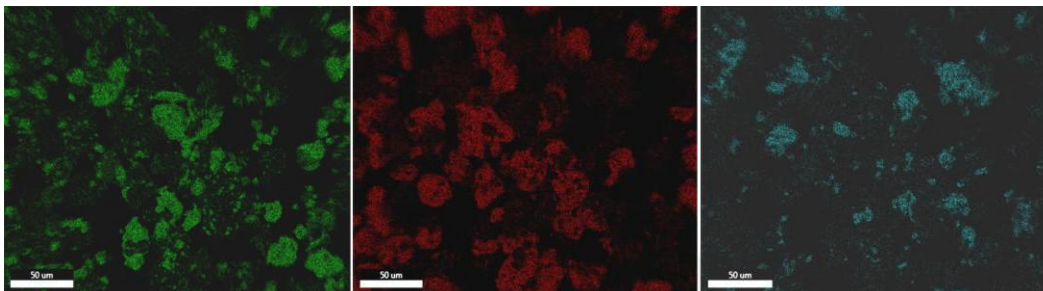
X-Işını haritalama, imal edilen malzemelerin fiziksel varlığı ve kimyasal bileşimlerini belirlemek için kullanılır. 75Fe-20Cr-5Ni-B₄C kompozitinin elementel haritalama analiz sonuçları (Şekil 4.8)'de gösterilmektedir.



% 0 B₄C

Genel

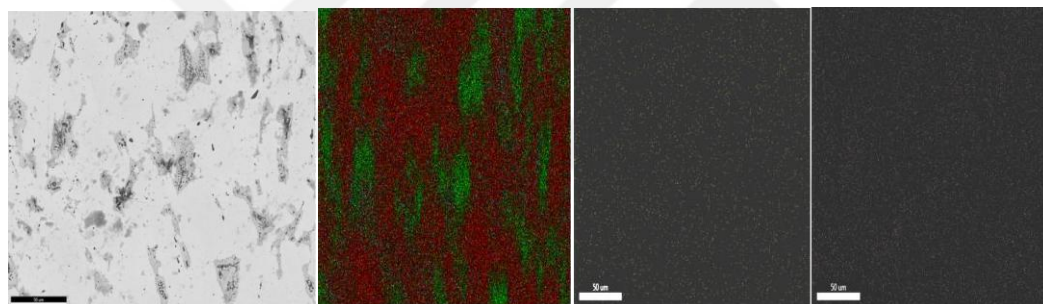
O



Cr

Fe

Ni

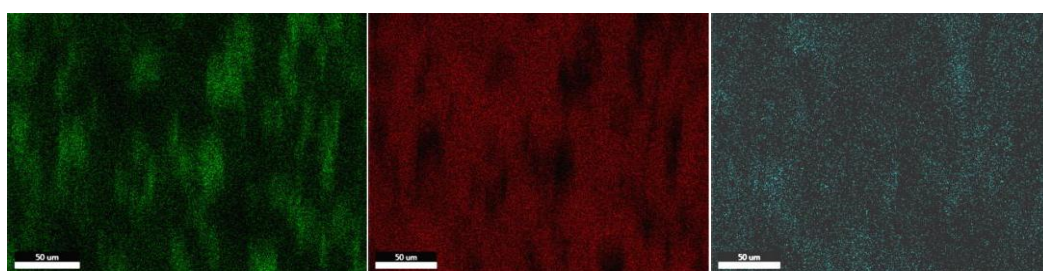


(a) %1 B₄C

Genel

B

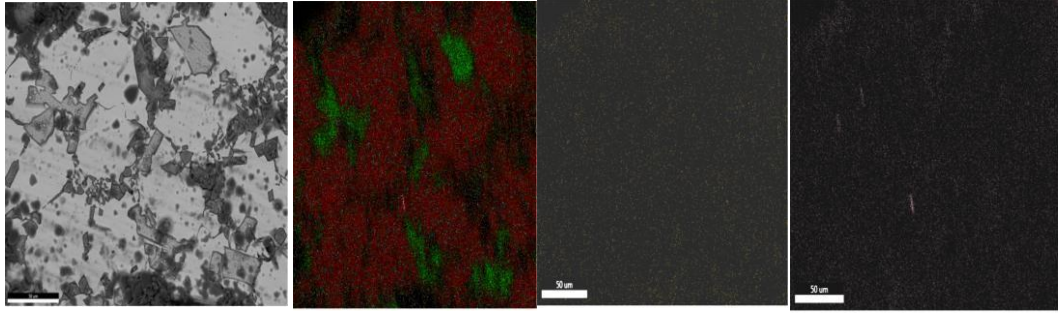
C



Cr

Fe

Ni

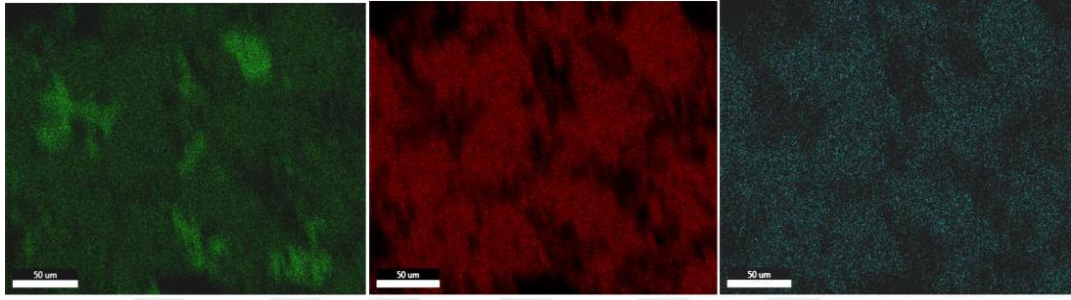


(b) %3 B₄C

Genel

B

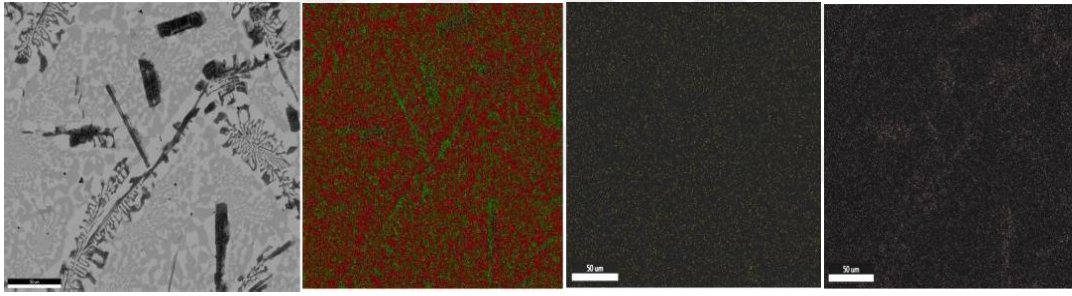
C



Cr

Fe

Ni

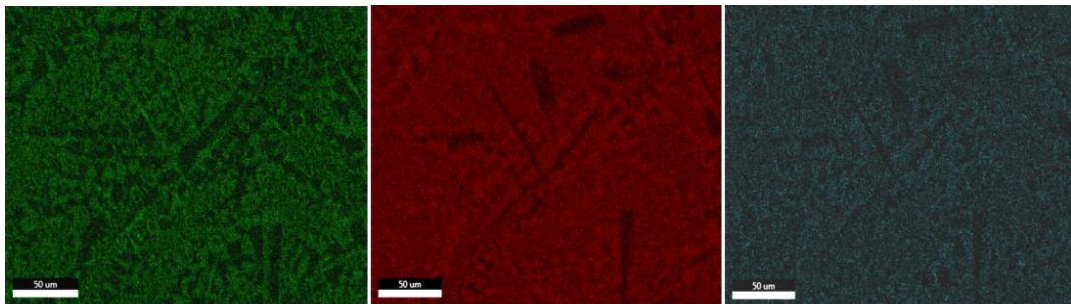


(c) %5 B₄C

Genel

B

C



Cr

Fe

Ni

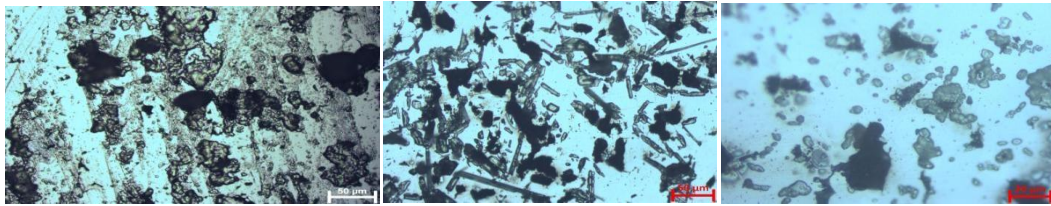
Şekil 4.8 Farklı B₄C takviyesi içeren malzemelere ait elementel haritalama görüntüleri; %0 B₄C (a) %1 B₄C, (b) %3 B₄C (c) %5 B₄C

Şekil 4.8, ağırlıkça farklı oranlarda B₄C takviyesi içeren ve geleneksel sinterleme yöntemleri kullanılarak bir yoğunlaştırma işlemine tabi tutulan kompozit numunelerin (% 0, 1, 3, 5 B₄C) mikroyapısal ve elemental haritalama görüntülerini içerir. B₄C parçacıklarının yapı içinde tekdüze olarak dağılımı, Şekil 4.8 'deki, temel haritalama görüntülerinde verilmektedir.. Mikroyapı ve elemental haritalama görüntülerinden Bor karbür B₄C parçacıkları, MA işleminden sonra yapı içerisinde homojen bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır.

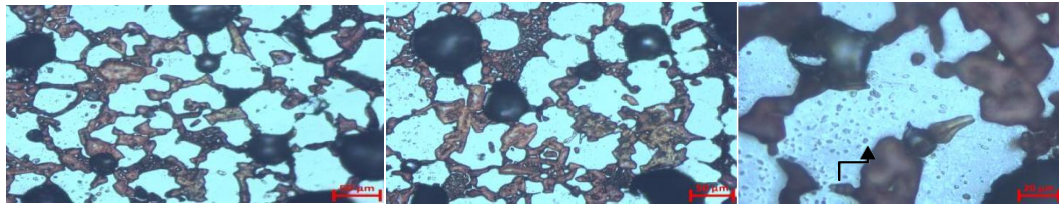
4.9 B₄C takviyeli DPÇ Matrisli Kompozitlerin Optik Mikroskop Görüntü

Analizi

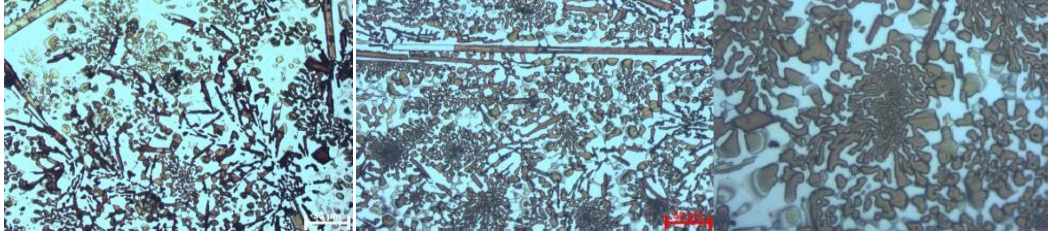
Farklı kütle oranlarına sahip numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde takviye yapılan bazı parçacıkların homojen bir şekilde yapı içerisinde dağıldığı bazı görüntülerde topaklanmış olduğu bazı görüntülerde tane sınırlarına yerleştiği görülmektedir. Takviye elemanları, mikroyapı görüntülerinde koyu siyah renkli parçacıklar şeklinde görülmektedir. Literatür incelendiğinde, kompozit numunelerin mikro yapılarının dağılımına bakıldığında takviye miktarının artmasına bağlı olarak parçacıklar belirli yerlerde toplanma izlenimi vermektedir. Ancak döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde özellikle takviye seramiğinin dağılım problemi, MA yöntemine göre çok daha fazla olmaktadır.



a) %1 B₄C (MA-B1)



b) % 3 B₄C (MA-B3)

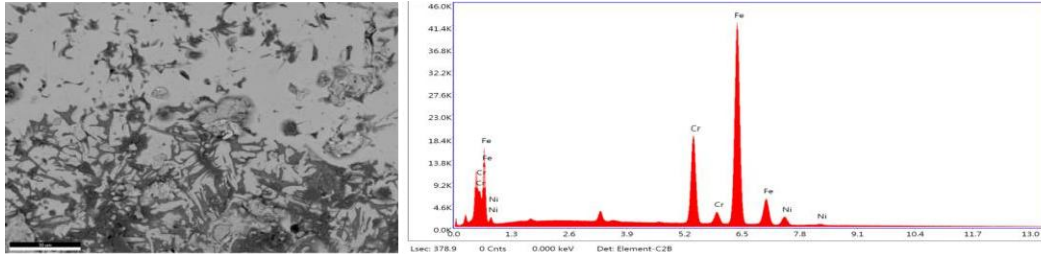


c) % 5B₄C (MA-B5)

Şekil 4.9 a),b),c) % 1-3-5 B₄C Takviyeli çift fazlı paslanmaz çelik matrisli kompozitin, farklı büyütme ölçeklerinde optik mikroskop görüntü analizi

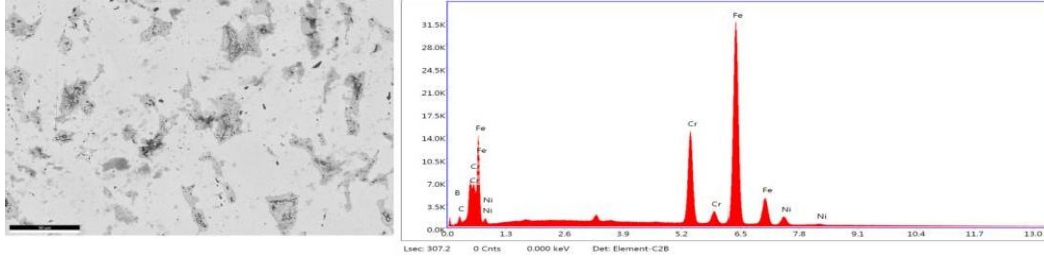
4.10 B₄C takviyeli DPÇ Matrisli Kompozitlerin SEM/EDS Görüntü Analizleri

Şekil 4.10'da üretilen 75Fe-20Cr-5Ni-B₄C kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri, EDS analiz sonuçları verilmiştir. EDS analizleri incelendiğinde Fe, Cr, Ni, B, C, pikleri tespit edilmiş, kompozitin 75Fe-20Cr-5Ni-B₄C olduğunudoğrulamaktadır. Bu EDS analizleri, kompozit malzemelerde bulunan çeşitli elementlere ait pikleri ve şiddetlerini göstermektedir. Krom, nikel ve demirin varlığı 75Fe-20Cr-5Ni' in ve B₄C bileşimini doğrular durumdadır. Ancak üretilen kompozitlerde takviye elemanı olarak bulunan B₄C'ü oluşturan B ve C pikleri atom numaraları düşük olduğundan, B ve C için piklerin şiddeti düşük seviyede gözükmemektedir. Yine de düşük şiddette de olsa B₄C varlığını doğrular niteliktedir.



Element	Ağırlık %	Atomik %
CrK	20.2	21.4
FeK	72.6	71.8
NiK	7.2	6.8

a) 0% B₄C lü



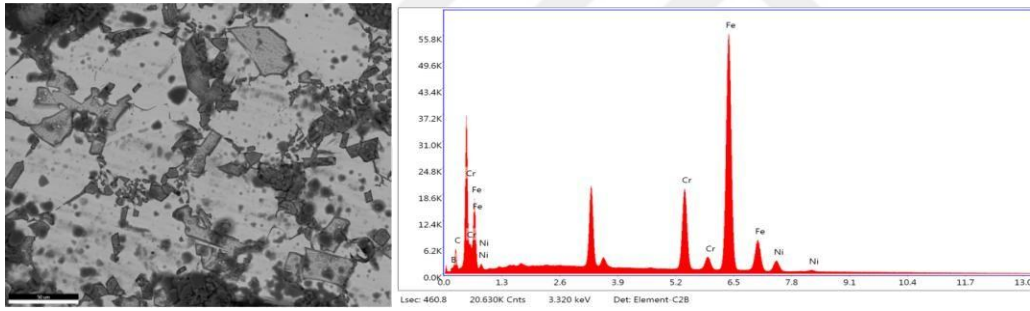
Element

Ağırlık %

Atomik %

B	2.3	10.4
C	1.1	4.3
Cr	20.1	18.8
Fe	72.4	63.1
Ni	4.2	3.4

b) 1% B₄C



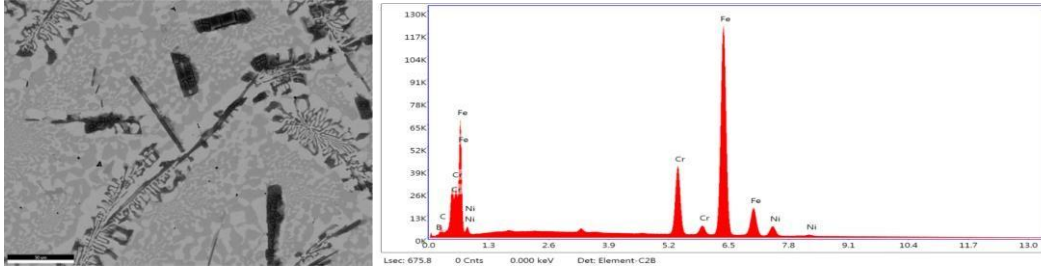
Element

Ağırlık %

Atomik %

B	3.2	12.6
C	4.5	16.0
Cr	14.9	12.2
Fe	72.7	55.7
Ni	4.8	3.5

c) 3 % B₄C lü



Element	Ağırlık %	Atomik %
B K	1.5	6.9
C K	1.9	7.8
CrK	14.6	13.8
FeK	77.0	67.5
NiK	4.9	4.1

d) 5% B₄C

Şekil 4.10 a),b),c),d) % 0-1-3-5 B₄C Takviyeli çift fazlı paslanmaz çelik matrisli kompozitlerin sinterlenmiş numune SEM/EDS görüntü ve analizleri.

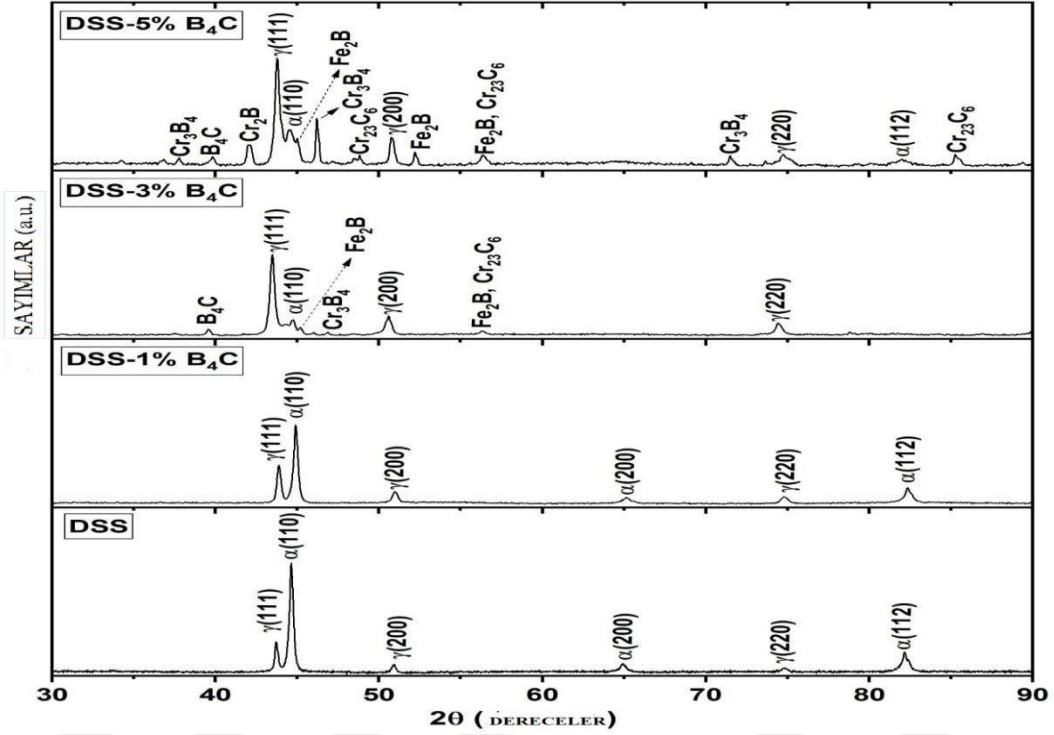
Tüm kompozitlerin EDS analizleri değerlendirildiğinde kompoziti oluşturan ana elementler ve takviye elemanlarını oluşturan elementler açısından fikir vermiş, kompozit malzemelerin varlığı bu EDS analizleri ile ispatlanmıştır.

EDS analizinde C ve B'nin atom numaraları düşük olması sebebi ile bu elementlere ait pik değerleri ya tespit edilmiş ancak çok düşük şiddette kaldığı için çok az pik değerleri gözlenmiştir. Dolayısıyla bu kompozitlerin takviye fazlarının durumunu daha net bir şekilde doğrulamak için XRD analizleri yapılmıştır.

4.11 Sinterli Kompozitlerin XRD Analizleri ve Sonuçları

B₄C takviyeli DPÇ matrisli kompozitlerinin XRD analizleri Şekil 4.11'de verilmektedir. Sinterlenmiş B₄C takviyesiz paslanmaz çelik için elde edilen XRD analiz sonucu sadece östenit ve ferrit fazı için pikler göstermiştir. Bu sonuç takviyesiz DPÇ'te başka faz veya parçacık olmadığı bilgisini vermektedir. B₄C ilavesiyle DPÇ matrisli kompozitlerde yeni piklerin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu sonuç B₄C içerisindeki karbonun demir ve krom ile reaksiyona girerek yeni fazlar oluşturduğunu göstermektedir. Artan B₄C takviyesi ile yapıda bileşik halde olmayan karbon atomlarının serbest ve kolay şekilde demir ve kromla bileşiğe

girerek Fe_3C ve Cr_{23}C_6 gibi karbür intermetalik bileşiklerine ait olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca B_4C varlığını kanıtlayan pikler, düşük B_4C ilavelerinde ve küçük boyutlarda standart sürekli XRD analizi ile kısmen tespit edilmiştir.



Şekil4.11 Sinterlenmiş farklı oranlardaki B_4C 'lü DPÇ kompozitlerin XRDanalizi

4.12 Aşınma Testleri Analiz ve Sonuçları

Toz metalürjisi prosesleri ile üretilen takviyeli ve takviyesiz DPÇ matrisleri içeren kompozitlerin kuru kayma aşınma testlerinde farklı oranlardaki B_4C takviyesinin aşınmaya olan etkisini belirlemek amacıyla araştırması yapılmıştır.

Aşınmanın başlangıcında malzeme yüzeyinin pürüzlülüğü aşındırıcı ile malzeme arasındaki temas bölgesini oluşturduğundan, ilk bozunma malzeme yüzeyinin pürüzlülüğü ile başlar ve artan yüklemle pürüzlülük yüzey alanı genişler ve yeni pürüzler birbirine temas eder, ve malzemede kopmalar meydana gelir. Kuvvet arttıkça, malzeme ile aşındırıcı arasındaki gerçek temas alanı artar, dolayısıyla yük arttıkça malzemenin ağırlık kaybı artar. .[58]

Şekil 4.13 ve 4.14'de B_4C takviyeli DPÇ matrisli kompozitlerin 15N'da aşınması sonucu aşınan yüzeylerden alınan optik mikroskop ve SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde kompozit malzemelerin deforme olan yüzey

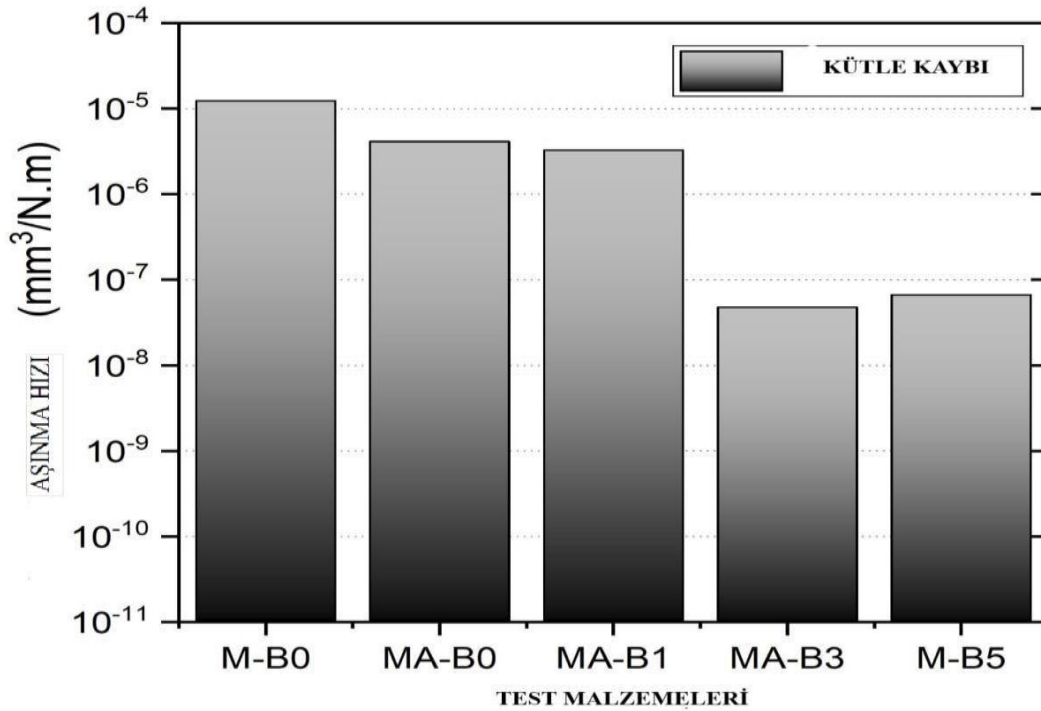
bölgelerinde, sabit kuvvet ve kuru kayma mesafesinde malzeme yüzeyinde oluşan değişiklikler görülmektedir. %1–3–%5 B₄C takviyeli DPÇ matrisli kompozit numuneler, aşınma yüzeyinde az miktarda aşınma gösterirken, ancak kayma yönüne paralel dökülmenin olmadığı artan B₄C ilavesine bağlı olarak aşınan yüzeyde gözeneklerin meydana geldiği görülmektedir. Bu durum aşınma yüzeyinde B₄C partiküllerinin DPÇ matrisinden ayrılmasına bağlanabilir. Diğer bir deyişle, 15 N sabit yük altında yapılan aşınma testleri sonucunda, mikroyapılarda takviyesiz DPÇ özellikle uygulanan sabit 15 N yükte oyuklanma ve delaminasyon formunda yüzeyinde deformasyon çizgi ve izleri, fakat B₄C takviye oranı arttıkça malzemenin fazla deforme olmadığı, dalgalanma ve pulpul dökülmelerin artmadığı görülmüş ve bu sebeple de malzeme kütle kaybı düşük çıkmıştır.

Diğer bir deyişle, malzeme yüzeyindeki plastik gerinim artmadığı için aşınma yüzeylerinde oluşan kraterlerin boyunun ve kraterlerin oranının artmadığı gözlenmiştir. Aşınmış yüzeylerden elde edilen bu görüntüler sabit kuvvet altında malzemenin ağırlık kaybının artmama sebeplerini destekler niteliktedir. Aşınma izi bölgesinde, tribolojik testler sonucunda yüzeydeki çıkıntılar ve düzensizlikler önce kaynaştığı ve daha sonra adeziv aşınma davranış tipini gösteren kesme işlemine tabi tutulduğu izlenmiştir.

Kompozitteki gerilim arttıkça, kırılma dayanımlarına yaklaştıkça parçacıklar kırılmaya başlayabilir. Düşük gerilmede matrise eklenen partikül miktarının artırılması, kompozitin ağırlık kaybını bir dereceye kadar azaltmakta ve aşınma direncini iyileştirmektedir. Ancak yük arttıkça takviye etkisi belirginleşmeye başlar. Diğer bir ifadeyle aşınma sırasındaki yük arttığında matriste yüksek derecede plastik deformasyon meydana gelir, parçacıklar ile matris arasındaki arayüzde çatlaklar oluşur ve parçacıkların ayrılmasına sebebiyet verir. [17]. Bu bağlamda daha belirleyici sonuçlar elde etmek için daha yüksek yükler altında aşınma test çalışmalarının yapılması önerilir.

Tablo 4.6 Farklı B₄C oranlarına göre aşınma testi ağırlık kaybı analizi

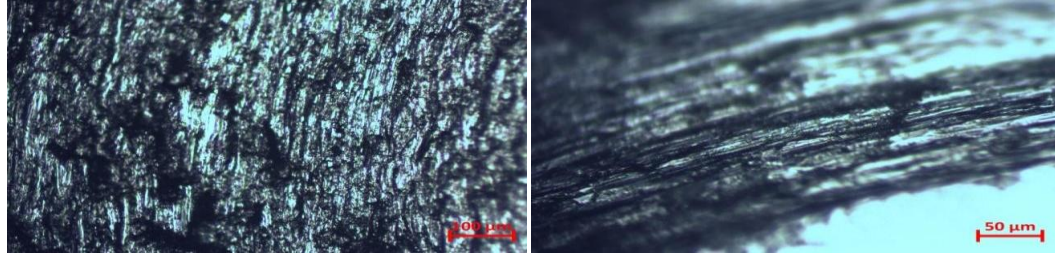
Malzeme	B ₄ C Oranı	İlk Ağırlık (mg)	Son Ağırlık (mg)	Ağırlık Kaybı (mg)	Aşınma Hızı $k_s = \frac{\Delta V}{L \times d} \left(\frac{m^3}{N.m} \right)$
Fe-20Cr--5Ni (M-B0)	0	18,2301	18,1205	0,1096	0,000011
Fe-20Cr--5Ni (MA-B0)	0	12,8072	12,7512	0,056	0,000005
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B1)	1%	18,2174	18,1730	0,0444	0,000004
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B3)	3%	17,2262	17,2254	0,0008	0,000000076
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B5)	5%	11,5300	11,5294	0,0006	0,000000088



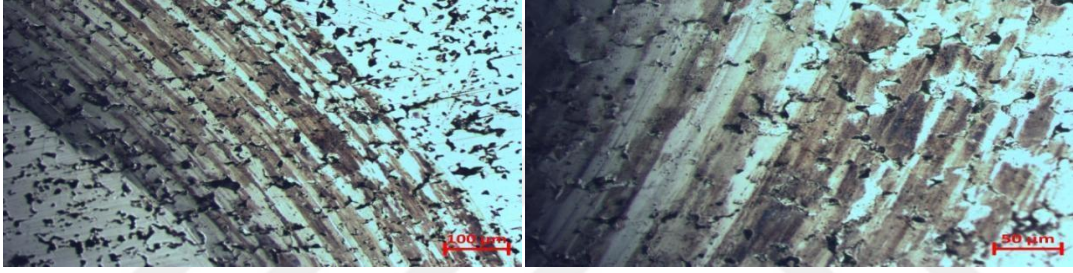
Şekil 4.12 15N Sabit yük altında B₄C takviye-ağırlık kaybı değişimi

Tablo 4.6 ve Şekil 4.12’de takviye ağırlık % oranına karşılık aşınma hızı (kütle kaybı) verileri ve grafiği verilmektedir. Grafikten de görüleceği üzere aşınma oranı en düşük % 3 B₄C (MA-B3) ağırlık takviyeli kompozit malzemesinde görülmüştür. En yüksek ağırlık kaybı ise takviyesiz kompozit Fe-20Cr--5Ni (M-B0) numunesinde görülmüştür.

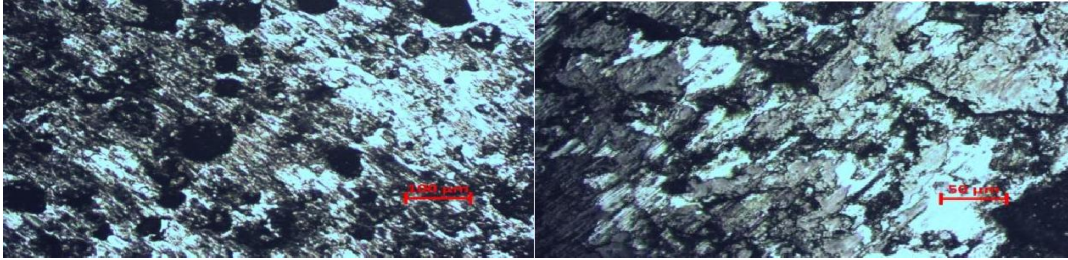
B₄C takviye ağırlık oranı arttıkça aşınma oranı azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi; B₄C takviye elemanın aşınmaya karşı dirençli oluşu aynı zamanda matris takviye arayüzeyin kuvvetli bir bağa sahip olduğundandır. Bu sayede yükün B₄C takviye elemanına iletilmesi sağlanabilir ve yük hem matris hem de takviye elemanı tarafından taşındığı yorumu yapılabilir.



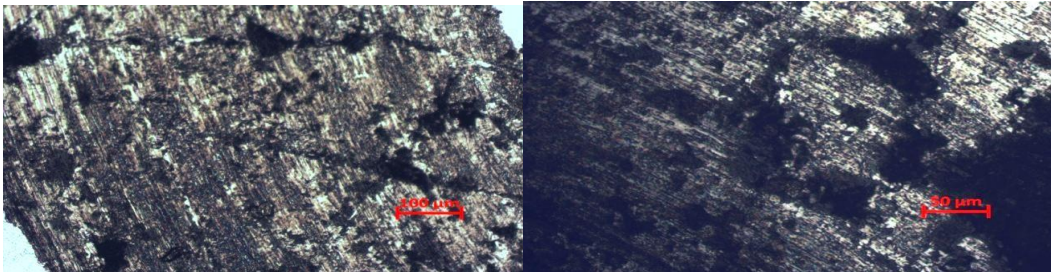
(a) %0 B₄C



(b) %1 B₄C

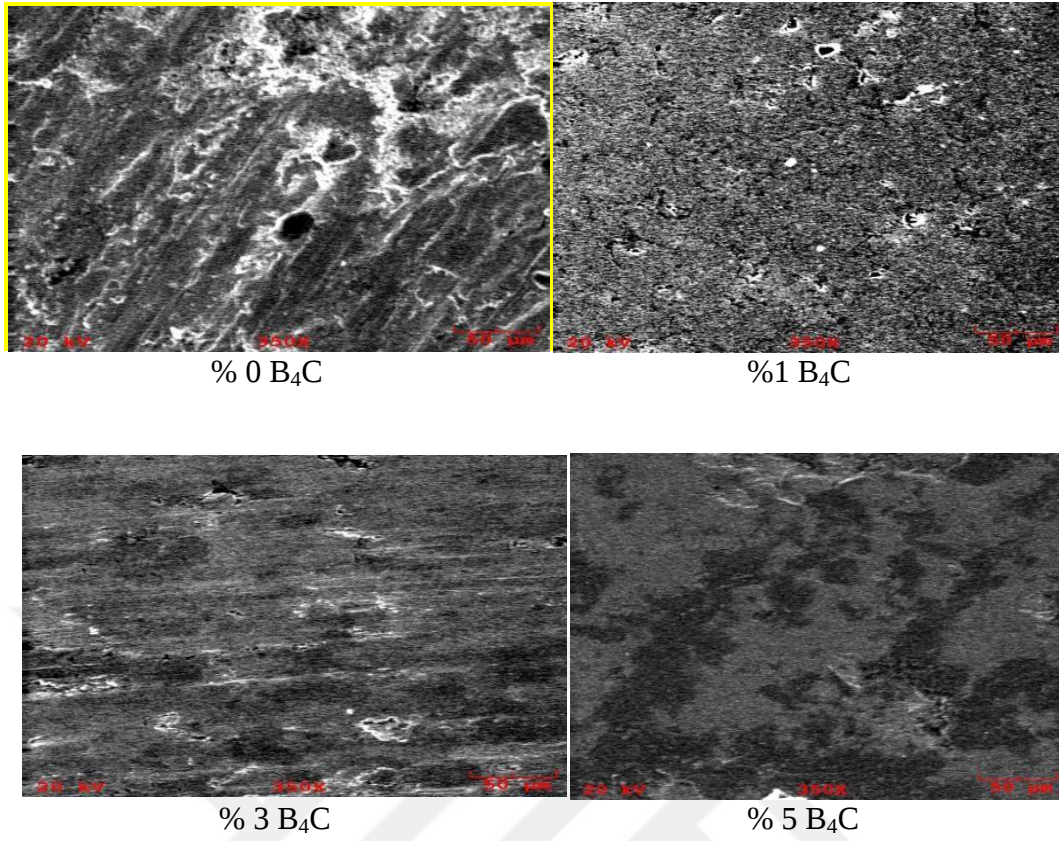


(c) %3 B₄C

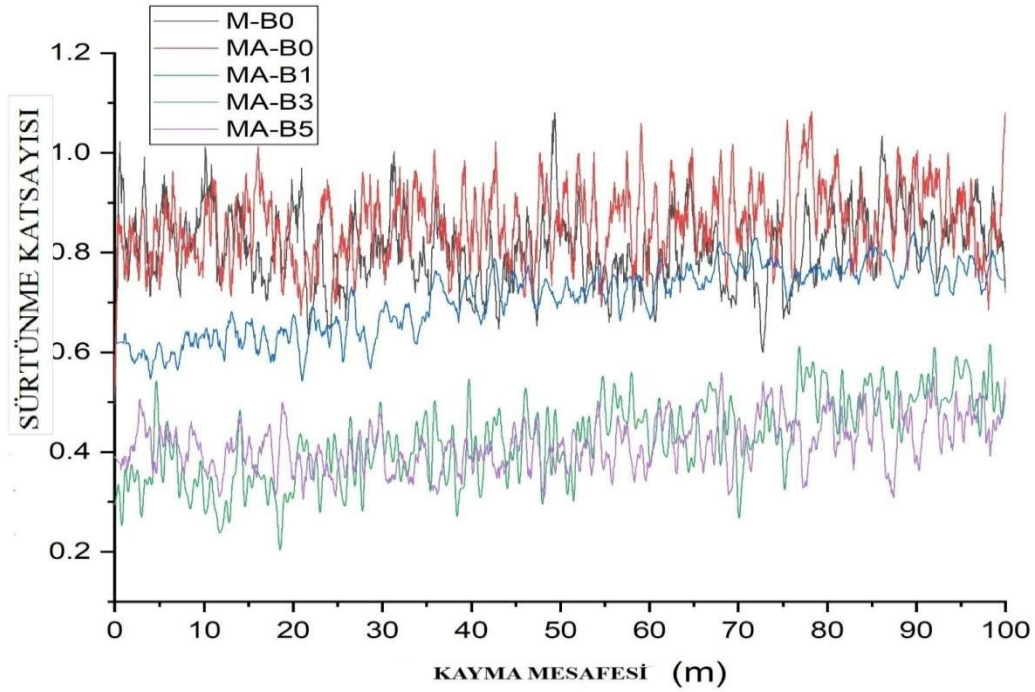


(d) % 5 B₄C

Şekil 4.13 B₄C ‘ lü, Duplex Paslanmaz Çelik Yüzeyinin Aşınma Testi Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri (a)%0B₄C (b)%1B₄C, (c)%3B₄C ,(d)%5 B₄C



Şekil 4.14 % 0-1-3-5 B₄C ' lü, Duplex paslanmaz çelik yüzeyinin aşınma testi SEM görüntüleri



Şekil 4.15 % 0-1-3-5 B₄C ' lü, Duplex paslanmaz çelik yüzeyinin aşınma testi (Sürtünme katsayısı ve Kayma mesafesi)

Şekil 4.15’de aşınma testinden sonra ölçülen sürtünme katsayısı (COF) değerlerini göstermektedir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri MA-B3/B5.alaşım içerisinde elde edilmiştir. Kompozitler incelendiğinde artan B₄C oranı ile sürtünme katsayısının düştüğü gözlenmiştir. Takviyesiz M-B0 alaşımının sürtünme katsayısının takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğunu ancak takviye elemanı %B₄C ağırlık oranı arttıkça sürtünme katsayısının düştüğü görülmektedir. Test edilen malzemelerin sertliğine göre sürtünme katsayısının değiştiği de görülmektedir. DPC alaşımlarının artan sertliği ile sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. Çok sert ve kırılkan olan B₄C partiküllerinin yağlama özellikleri ve aşınma direncinden dolayı sürtünme katsayısı değerini düşürdüğü düşünülmektedir.

4.13 Korozyon Testleri Analiz ve Sonuçları

Tablo 4.7 ve Şekil 4.16’ da tüm numuneler korozyon hızı için Tafel exp. eğrilerinden elde edilen değerler verilmiştir. Polarizasyon eğrilerinde şekil 4.17’de görülen katodik ve anodik kolların göreceli olarak birbirine simetrik olduğu görülmektedir. Bu da hem katodik ve anodik reaksiyonların birbirine benzer olduğunu göstermektedir. Kompozitlerin numunelerin korozyon testlerinden sonra yüzeylerinden, oyuklanma korozyon görüntüsü ve yapısı hakkında bilgi elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, kompozitler üzerinde anodik korozyon testleri yapılarak, kompozitlerin pasivasyon davranışı, korozyon akım yoğunluğu ve oyuklaşma korozyon potansiyeli hakkında karşılaştırmalı bilgiler elde edilmiştir.

4.13.1 Tafel polarizasyon yöntemi (TP) sonuçları

Tafel polarizasyon ölçümleri, Ivium Compactstat model potansiyostat cihazı ve yazılımı kullanılarak, açık devre potansiyelinden itibaren +/-250 mV potansiyel aralığında 1 mV/s tarama hızı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.17’de elde edilen polarizasyon eğrileri görülmektedir.

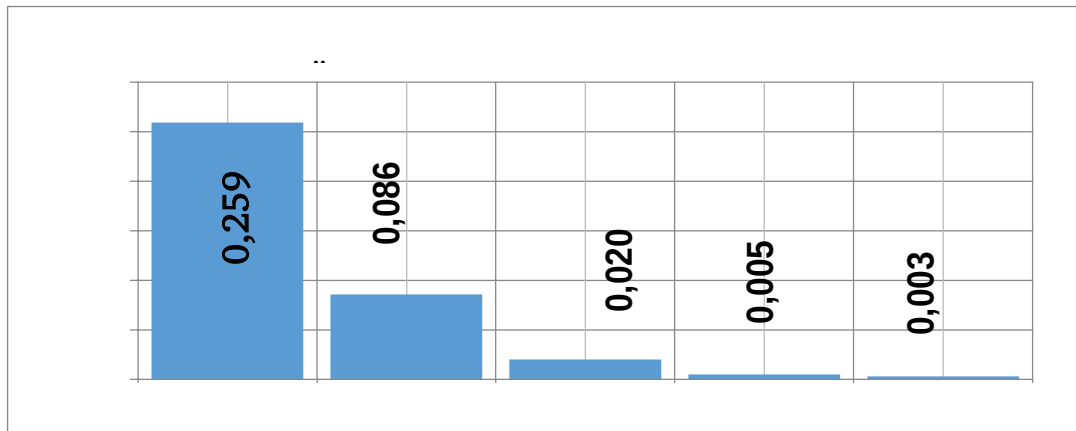
Polarizasyon eğrisinin ekstrapolasyon edilmesinden, korozyon parametreleri ($\beta_a, \beta_c, E_{kor}, I_{kor}$) kullanılarak, polarizasyon direnci (R_p) değeri bulunmuştur. Bulunan bu değerler tablo 4.7’de gösterilmiştir.[55] Elektrokimyasal testler esnasında, sinterlenmiş B₄C takviyeli dubleks çeliklerin hiçbirinde pasivasyonun sağlanamadığı ve normal (Şekil 4.17) aktif - pasif geçişinin oluşumu söz konusu değildir. Sinterlenmiş paslanmaz çeliğin korozyon

direnci,yoğunluk ve gözenek morfolojisi ile yakından ilişkilidir. Bu bağlamda, %3.5 NaCl çözeltisinde çukurlaşma korozyonuna karşı en yüksek direnç, mikroyapısında yaklaşık olarak ferrit ve östenit dengeli , bileşimi (Fe-20Cr--5Ni)-%5 B4C olan kompozit malzeme ile elde edilmiştir.

Cr+3.3(Mo+0.5W)+16N formülü olarak kimyasal bileşimi ile hesaplanan Çukurcuk direnç eşdeğeri PREw değerinin artmasıyla, klorür içeren ortamlarda paslanmaz çeliğin çukur korozyon direncinin arttığı bilinmektedir. Genel ifadeyle duplex paslanmaz çelik, aynı Cr içeriğine sahip östenitik paslanmaz çeliklere göre yüksek klorür içeren ortamlarda gerilimli korozyon çatlamasına karşı daha yüksek bir dirence sahiptir. [59]

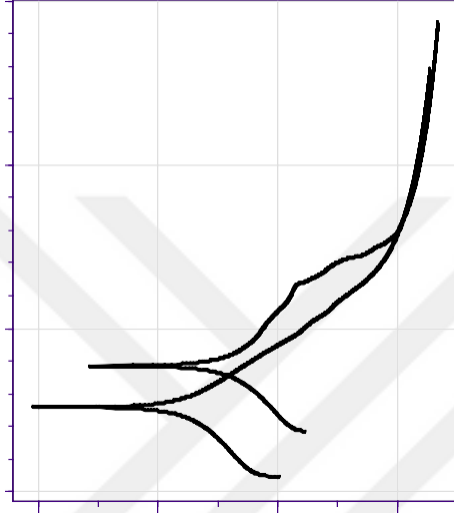
Tablo 4.7 Farklı B₄C oranlarına göre korozyon testi sonrası alınan sonuçlar

Malzeme	B ₄ C Oranı	İlk Ağırlık (mg)	Son Ağırlık (mg)	Ağırlık Kaybı (mg)	Aşınma Hızı $k_s = \frac{\Delta V}{L \times d} \left(\frac{m^3}{N.m} \right)$
Fe-20Cr--5Ni (M-B0)	0	18,2301	18,1205	0,1096	0,000011
Fe-20Cr--5Ni (MA-B0)	0	12,8072	12,7512	0,056	0,000005
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B1)	1%	18,2174	18,1730	0,0444	0,000004
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B3)	3%	17,2262	17,2254	0,0008	0,000000076
(Fe-20Cr--5Ni)-B ₄ C (MA-B5)	5%	11,5300	11,5294	0,0006	0,000000088

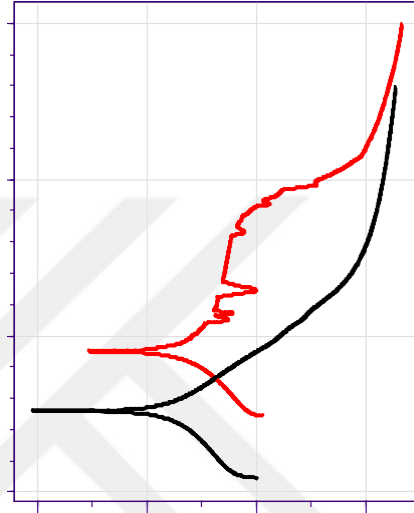


Şekil 4.16 Farklı B₄C oranlarına göre Tafel exp. yöntemiyle korozyon hız testi değerleri karşılaştırma grafiği.

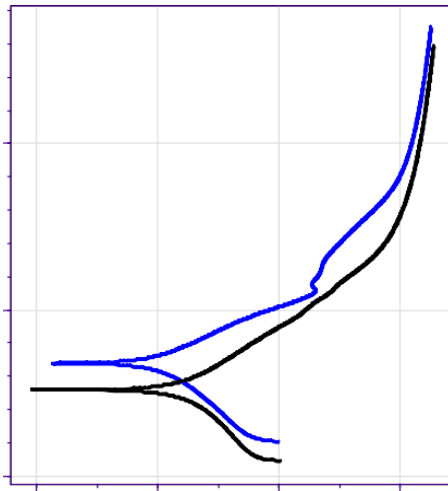
Tablo 4.7 'de görüldüğü gibi kullanılan B_4C oranı arttıkça korozyon akım değeri I_{kor} küçülmekte, polarizasyon direnci (R_p) büyümekte ve korozyon potansiyellerinde E_{kor} değişkenlik görülmektedir. B_4C , takviyeli DPÇ matriksli hazırlanan sistemlerde, her numune için potansiyostatik polarizasyon eğrileri deneysel olarak elde edilmiş ve Tafel grafikleri (voltaj vs logaritmik akım yoğunluğu) Şekil 4.17'de sırasıyla yalnızca B_4C , içeren kompozitler için gösterilmiştir.



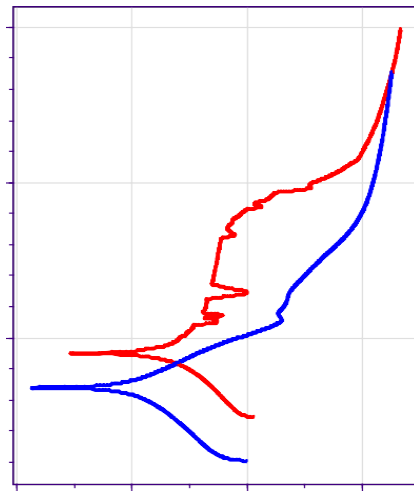
%5 B_4C M/A & %0 B_4C



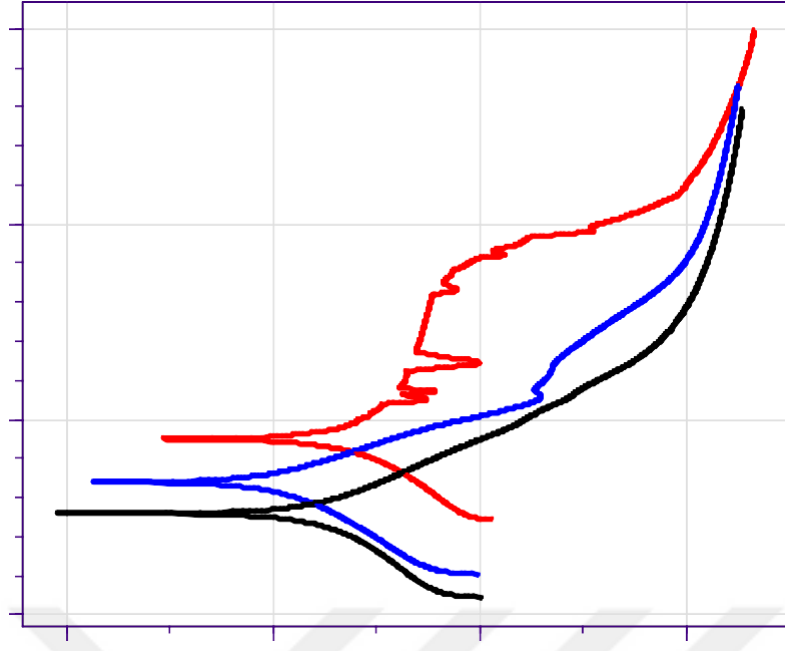
% 5 B_4C M/A & %1 B_4C



%5 B_4C M/A & % 3 B_4C



% 3 B_4C M/A& %1 B_4C



% 5 B4C M/A & %1 B4C & %3B4C

Şekil 4.17 Farklı B4C % 'li DPÇ kompozitlerin polarizasyon eğrileri.
(Potansiyel & Log Akım)

5.1. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ilk aşama kapsamında, Fe-Cr-Ni elemental tozların mekanik alaşımlama işlemi ile Dupleks Paslanmaz çelik DPÇ parçacıkları elde edilmiştir. Elde edilen toz parçacıkların morfolojisi ve parçacık boyutu üzerine yapılan gözlemsel çalışmalar, orijinal morfolojiden farklı bir morfolojiye sahip olduklarını ve parçacık boyutunun önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.

Mekanik alaşımlama, MA ile üretilen, ağırlıkça yapı içerisinde farklı B₄C içeriğine sahip kompozit tozların ortalama tane boyutunun, B₄C takviye oranının ağırlığı arttıkça azaldığı sonucuna varılmıştır. Yapıda B₄C takviyesinin artırılması ile MA uygulaması sonrasında yapılan yoğunluk testleri sonucunda, B₄C takviyesinin artırılması ile deneysel yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Yoğunluk değerindeki bu azalma, B₄C takviyesinin hem düşük yoğunluğa hem de yüksek rijitliğe sahip olması ve takviye miktarının artmasının kompozit numunenin şekillendirilebilirliğinin azalmasına yol açması ile ifade edilebilir. Sertlik ölçümleri sonucunda yapıdaki B₄C takviye oranı arttıkça rijitlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, takviye malzemesi B₄C'nin yüksek sertlik özelliği neticesinde ulaşılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarla elde edilen bulguların değerlendirilmesinden sonra oluşan temel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- 1-)Mekanik alaşımlama MA ve yüksek enerjili gezegensel öğütme ile elementel Fe-Cr-Ni ticari tozları kullanılarak hazırlanmış dupleks paslanmaz çelik malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle sentezlenmiştir.
- 2-)75Fe-20Cr-5Ni tozlarının yüksek enerjili gezegensel öğütme ile 6:1 bilya toz oranında 300rpm hızında planlanan ilk 10 saatlik öğütme sonrasında içyapı çift fazlı (ferrite+östenit) yapıya dönüşmüştür.
- 3-)Mekanik alaşımlama MA sonrası, toz parçacıklarının şeklini ve boyutunu değiştirdiği gözlemlenmiştir. Tozlar kısa öğütme süresinde düz bir yapıya sahipken, öğütme süresi arttıkça soğuk deformasyonun (MA) etkisiyle daha homojen görünümlü bir yapı oluşmuştur.

4-) Mekanik alaşımlama sonrası toz numunelerin X-ışını kırınımı XRD taraması incelendiğinde, tüm XRD taramalarındaki pikler genişlemiş ve piklerin yükseklikleri mekanik alaşımlama süresinin artmasının yanı sıra iç gerilme ve gerinimden dolayı azalmıştır.

5-) Sinterlenmiş numunelerin mikrosertlik değerleri, öğütme süresinin artması ile arttırmaktadır, bunun nedeni mekanik alaşımlama sırasında tozların devamlı olarak kırılıp tekrar soğuk kaynaklanması ile devamlı bir deformasyona uğraması sonucu oluşan deformasyon sertleşmesidir.

6-) Mekanik alaşımlama tekniği, Bor karbür B_4C parçacıklarının çift fazlı paslanmaz çelik matris alaşımı içinde düzgün bir şekilde dağılarak ağırlıkça %1-5 oranında B_4C parçacıklı kompozitlerin üretim için uygun olduğu anlaşılmıştır.

7-) Takviye B_4C parçacık boyutunun, kompozit malzemenin özellikler üzerindeki etkisi, B_4C ağırlık yüzdesi ve öğütme süresi kadar önemli olduğu söylenebilir.

8-) Kompozitlerin artan B_4C oranı ile deneysel yoğunluklarda daha düşük değerler elde edilmiş ve bu sonuçlar literatür ile uyumluluk göstermiştir. Bağlı yoğunluk, dupleks paslanmaz çelik matrisli kompozit numunelerde artan B_4C % oranıyla azalmaktadır. En düşük test yoğunluğuna $6,48 \text{ gr/cm}^3$ (Fe-20Cr-5Ni)- B_4C (MA-B5) numunede ulaşılmıştır.

9-) Takviye miktarının artması ile artan sertlik arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu ve azalan B_4C tane boyutunun sertlikte artışa neden olduğu sonucu çıkmıştır. Ağırlıkça %5 B_4C içeren kompozitin sertliği ve 10 saatlik mekanik alaşımlamadan sonra, takviyesiz DPÇ ten daha yüksek çıkmıştır. % 5 B_4C takviyeli kompozitte sertlik 20HRC den 65 HRC ye kadar çıkmıştır.

10-) Kompozit malzemelerin metalografik incelemesi, takviyelerin üniform dağılımı için, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak DPÇ matrisinde B_4C takviyelerinin varlığı doğrulanmıştır. X-Ray elementel haritalama, kompozit malzemelerin kimyasal dağılımını ve varlığını belirlemek için kullanılmıştır.

11-) Ball-on-disk aşınma testi ile malzemenin aşınma karakteri ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Test neticesinde takviyesiz malzemeye kıyasla, B_4C takviyeli DPÇ matriksli kompozit malzemeler iyi performans sergilemiştir. (Fe-20Cr-5Ni)- B_4C (MA-B5) numnenin ağırlık kaybı $0,0006 \text{ mg}$ olarak en düşük değer çıkmıştır. Aşındırıcı Alümina top yüzeyinin dahi fazla miktarda aşınmaya uğraması malzemenin aşınmaya direncinin nedeni yüksek olduğunu göstermektedir. Yapılan sürtünme ve aşınma yüzeylerin SEM incelemeleriyle B_4C takviyeli

kompozit malzemelerinin aşınma karakterinin abrasif olarak başlayıp adhesif aşınmaya döndüğü kanısı oluşmuştur.

Sonuç olarak aşınma deneylerinde üretilen B₄C takviyeli DPÇ kompozitlerin takviyesiz matriks alaşımından daha az aşındığı ve takviyenin kompozitin aşınma direncini artırdığı sonucuna varılmıştır. Aşınma karakterinin daha da iyi anlaşılması açısından farklı koşullarda testlerin yapılması daha net sonuçlar ortaya koyacaktır.

12-) Matris ve takviyenin tane boyutlarının birbirine yakın olmaması iyi karışmayı engeller ve DPÇ tanecikleri arasındaki boşluklarda B₄C birikebilir. Bunu önlemek için temel malzeme ve takviye malzemenin tane büyüklükleri birbirine yakın seçilmelidir.

13-) SEM incelemelerinde mikroyapılara bakıldığında %3 ve %5 B₄C takviye ilavesinin DPÇ matriks içerisindeki dağılımının homojen dağıldığı görülmüştür. %1 B₄C ilavesi ile kısmen topaklanmaların olduğu görülmüştür.

14-)Artan B₄C ilavesine ile aşınan yüzeylerde gözeneklerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.Gözeneklilik oranı artan takviye ile %11e kadar çıkmıştır.

15-) Farklı sıkıştırma şartlarında mikroyapı ve mekanik, tribolojik özelliklere olan etkisi olduğu anlaşılmıştır.

16-)Yüksek sertlik ve aşınma direnci ile bor karbür B₄C, bir çok teknik uygulamalarda dikkat çeken bir malzemedir. Bu malzemenin tribolojik davranışlarının anlaşılması ve bu konuda yeni proses tekniklerinin ve ürünlerinin geliştirilerek sanayimize önemli bir kalite ve rekabet faydası sağlayacaktır.

5.1.1 Sonraki çalışmalar için öneriler

Mekanik alaşımlama yöntemi için öneriler ;

Farklı İKK türlerinin ve oranlarının (toluen, çinkostearik asit, glikol vb.) toz özellikleri üzerine etkisi araştırılabilir. Farklı takviye malzemesi uygulanarak, karşılaştırmalı karakterizasyon çalışmaları yapılabilir. (SiC, Alümina,Ti₂B vs.).

Mekanik alaşımlamaya etki eden faktörler üzerinde değişiklik yapılarak etkileri incelenebilir. (Bilya toz oranı,öğütme hızı,bilya çapı, öğütme ortamı koruyucu atmosferin değiştirilmesi v.b.)

Toz Sıkıştırma Yöntemi için ;

Sabit basınç ve sıcaklık koşullarında, çeşitli çalışmalarda kullanılanlardan daha düşük sıkıştırma basıncı değerleri uygulayarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Sinterleme için öneriler ;

Sıcak İzostatik veya kıvılcım plazma sinterleme teknikleri maliyeti yüksek olmasına karşın kalite performansı yüksek olacaktır.

Aşınma için Öneriler ;

Daha yüksek yükler, B_4C takviye oranları, kayma mesafeleri veya hız değişimleri uygulanarak daha geniş kapsamlı sonuçlar için malzemenin tribolojik değerlendirmesi daha da genişletilebilir.

Korozyon Hız Ölçümü için Öneriler;

Farklı korozi ortamda, farklı korozyon hız teknikleri uygulayarak karşılaştırmalı sonuçlar elde edilebilir.

Gelecekteki araştırma ve yatırımlar için;

Toz metalürjisi ile üretilen bor karbür takviyeli dubleks paslanmaz çelik matrisli kompozitler ile ilgili literatürde herhangi bir çalışma bulunamamıştır.

Östenitik Paslanmaz çelik matrisler için Alümina Al_2O_3 , Silisyum Karbür SiC ve Titanyumbor TiB_2 takviyeli çalışmalar yaygın olarak kullanılmıştır. Bor karbür B_4C ;yüksek sertliği, mukavemeti, yüksek aşınma ve korozyon direnci, nükleer reaktörlerde nötron emiciliği ve düşük yoğunluğuna rağmen yüksek maliyetinden dolayı kompozitlerde kullanımı hala istenilen düzeye ulaşmamıştır.

Ancak, ülkemiz dünyanın en büyük bor cevheri rezervlerine sahip olduğundan, bor ürünlerinin üretimini ve kullanımını yaygınlaştırmak ve katma değeri daha yüksek ürünler yaratmak ülkemiz için son derece önemlidir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarına ek olarak, üretilen malzemelerin aşınma ve korozyon testlerinde çeşitli varyasyonların uygulanmasının yanı sıra diğer mekanik ve tribolojik testlerin performansı önerilebilir. Daha sonraki araştırmaların özelliklerine önemli bir katkı sağlayacaktır.

Ayrıca bu çalışmanın daha uzun alaşımlama süreleri, farklı öğütme alaşımlama parametreleri, yeni nesil sıkıştırma ve sinterleme prosesleri kullanılarak elde edilebilecek sonuçlara referans olması ve daha verimli araştırmalar yapılmasına olanak sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] M. A. P.Erden, “Presleme basıncının toz metalurjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 6, no. 1, pp. 257–264, 2017.
- [2] E. Pagounis and V. K. Lindroos, “Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 246, no. 1–2, pp. 221–234, 1998, doi: 10.1016/s0921-5093(97)00710-7.
- [3] L. A. Dobrzański, Z. Brytan, M. A. Grande, and M. Rosso, “Properties of duplex stainless steels made by powder metallurgy,” *Arch. Mater. Sci. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 217–223, 2007.
- [4] L. R. da Silveira, M. S. Lamoglia, P. H. Gonçalves, B. H. B. Kuffner, and G. Silva, “Obtainment of a new metal matrix composite from the recycling of UNS S31803 duplex stainless steel by powder metallurgy,” *Rem - Int. eng. J.*, vol.75, no.3, pp.235–244, Sep.2022.
- [5] M. Rosso, I. Peter, and D. Suani, “About heat treatment and properties of duplex stainless steels,” *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 59, no. 1, pp. 26–36, 2013.
- [6] P. Van Dong et al., “Effect of boron carbide reinforcement on properties of stainless-steel metal matrix composite for nuclear applications,” *J. Mech. Behav. Mater.*, vol. 31, no. 1, pp. 390–397, 2022,
- [7] T. K. s, u. m, p. p, S. Skoczypiec, T. J. Ko, and T. Varol, “Fabrication of 316 SS–B₄C composite by powder metallurgical route,” *Ssrn Electron. J.*, pp. 2–6, 2020, doi:10.2139/ssrn.3653948.
- [8] A. Orhan, A.K.Gür, U.Çaligülü, “Al matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi,” *Makine Teknol. Elektron. Derg.* 2007 8-13, vol. 2007, no. 4, pp. 8–13, 2007.
- [9] C. Kuforiji and M.Nganbe, “Powder metallurgy fabrication, characterisation and wear assessment of SS316L-Al₂O₃ composites,” *Tribology Int.*, vol. 130, pp. 339–351, 2019.
- [10] S. . Tjong and K. . Lau, “Sliding wear of stainless steel matrix composite reinforced with TiB₂ particles,” *Mater. Lett.*, vol. 41, no. 4, pp. 153–158, Nov. 1999, doi: 10.1016/S0167-577X(99)00123-8.
- [11] E. Pagounis, M. Talvitie, and V. K. Lindroos, “Influence of reinforcement volume fraction and size on the microstructure and abrasion wear resistance of hot isostatic pressed white iron matrix composites,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 27, no. 12, pp. 4171–4181, 1996.

- [12] Z. Szklarz, J. Lekki, P. Bobrowski, M. B. Szklarz, and Ł. Rogal, "The effect of SiC nanoparticles addition on the electrochemical response of mechanically alloyed CoCrFeMnNi high entropy alloy," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 215, pp. 385–392, Aug. 2018,
- [13] J. Abenojar, F. Velasco, J. M. Torralba, J. A. Bas, J. A. Calero, and R. Marcè, "Reinforcing 316L stainless steel with intermetallic and carbide particles," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 335, no. 1–2, pp. 1–5, 2002,
- [14] W. Q. Sun *et al.*, "Study on a high-boron-content stainless steel composite for nuclear radiation," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2021,
- [15] N. Balakrishnan and R. Rajesh, "Fabrication and analysis of 304 stainless steel boron carbide metal matrix composite," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 33–42, 2018.
- [16] S. Sahoo, B. B. Jha, T. Mahata, J. Sharma, T. S. R. C. Murthy, and A. Mandal, "Mechanical and wear behaviour of hot-pressed 304 stainless steel matrix composites containing TiB₂ particles," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 72, no. 5, pp. 1153–1165, 2019,
- [17] I. Sulima, P. Klimczyk, and P. Malczewski, "Effect of TiB₂ particles on the tribological properties of stainless steel matrix composites," *Acta Metall. Sin. English Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 12–18, 2014,
- [18] D. A. Ahmed and M. M. Mulapeer, "Differentiation of specific wear rates of AISI 304 austenitic and AISI 2205 duplex stainless steels at room and high temperatures," *Heliyon*, vol. 8, no. 11, p. e11807, 2022,
- [19] I. Sulima, P. Hyjek, L. Jaworska, and M. Perek-Nowak, "Influence of ZrB₂ on microstructure and properties of steel matrix composites prepared by spark plasma sintering," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, p. 2459, 2020,
- [20] T. K. s, u. m, p. p, s. Skoczypiec, T. J. Ko, and T. Varol, "Fabrication of 316 Ss–B₄c composite by powder metallurgical route," *Ssrn Electron. J.*, pp. 2–6, 2020.
- [21] R. Mariappan, S. Kumaran, T. Srinivasa Rao, and S. B. Chandrasekar, "Microstructure and mechanical properties of duplex stainless steels sintered in different atmospheres," *Powder Metall.*, vol. 54, no. 3, pp. 236–241, 2011,
- [22] M. Patel, R. Muthu Vaidyanathan, N. Sivaraman, M. Markos, and T. Alemayehu, "Microstructure and microhardness of ZrO₂ reinforced PM 316L austenitic stainless steel composites sintered in ambient and argon atmosphere," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 38–42, 2019,
- [23] M. R. Elayidom, A. S. Abhishek, A. Mohan, A. Vijayakumar, R. Rajesh, and N. Balakrishnan, "Fabrication of stainless steel matrix composites containing up to 15 % boron carbide," *International Journal of Advanced Chemical Science and Applications (IJACSA)* pp. 21–24, 2017.

- [24] C. Özdemir, “Paslanmaz çelikler ve üretim yöntemlerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [25] M.Önen,B.Geyik,and T.Çalışkan,“Mekanik alaşımlama yöntemiyle çift fazlı (Dupleks) paslanmaz çelik üretiminin araştırılması ve karakterizasyonu,” Bitirme Ödevi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul 2022.
- [26] D. Yıldırım, “2205 Dupleks paslanmaz çelik ile S355J2 genel yapı çeliğinin birleştirebilirliğinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2018.
- [27] A. Kısasöz and A. Karaaslan, “Dubleks paslanmaz çeliklerde oluşan yüksek sıcaklık fazlarına genel bir bakış,” *Metallurji*, vol. 162, pp. 57–61, 2012.
- [28] U.Delice,“Dupleks paslanmaz çelik malzemelerin nikel ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, 2021.
- [29] İ. Mutlu,“Toz metalurjisi yöntemiyle elde edilen gözenekli martensitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri,” Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [30] A. N. Acar PhD, “Investigation of physical and mechanical properties of 316l and 410 stainless steels manufactured by powder metallurgy method,” PhD thesis, Çukurova University Institute of Natural And Applied Sciences, Adana, 2019.
- [31] Ö. Özgün,“Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri,” Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
- [32] A. G. Yasin, “Toz metalurjisi deneyi.”
- [33] M. Günen, “Ön alaşımlanmış metal tozlarının mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerinde sinter sertleştirme prosesinin etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi,Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [34] O.Şahin, “TiB₂ ve B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretilebilirliğinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2018.
- [35] E. Kurt, F.Aydemir, and B. Evren, “Çeşitli toz sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 45, pp. 100–106, 2022, doi: 10.31590/ejosat.1219539.
- [36] H. Karabulut, “Toz metalurjisi yöntemiyle Al₂O₃, SiC ve B₄C takviyeli Al matrisli kompozit üretiminde mekanik alaşımlama süresinin kompozit özelliklerine etkisi,” Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2011.
- [37] C. Suryanarayana Marcel, "Mechanical alloying and milling" 2004

- [38] C.Nazik, “*TiC/316L Kompozit tozların mekanik alaşımlama yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu*,” Doktora tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 2019.
- [39] Babayev, “Toz metalurjisi ile parça üretimi toz metalurjisi yöntemi,” pp. 54–62, 2007.
- [40] P.Şanlı, “*Farklı oranlardaki takviye elemanlarıyla katkılanmış metal matrisli kompozit malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi*,” Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2019.
- [41] Dr. Öğr. Üyesi E. Bulucu, “Toz metalurjisi ders notları,” Kayseri, 2020.
- [42] Y. d. d. a. o. Kurt, “Toz üretim yöntemleri ve sinterleme ders notları” [Online] Erişim: <https://silo.tips/downloadFile/toz-retim-yntemleri-ve-sinterleme-4?preview=1>.
- [43] P. Shape and P. Size, “Powder metallurgy,” in Powder Metallurgy Chapter 7 Sintering, pp. 1–39.
- [44] E.Zengin, “*AISI 316L Paslanmaz çelik matrisli, bor karbür ve karbon nanotüp takviyeli nanokompozitlerin toz metalurjisi ile üretimi ve karakterizasyonu*,” Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2021.
- [45] C.Nazik, “*Alüminyum matriksli B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*,” Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2013.
- [46] A. Kabil, “*Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozit malzeme üretimi*,” Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2020.
- [47] İ. S. D. Bilgiler, “Bor karbür- dubleks çelik hk.”
- [48] U.Soy, “*SiC/B₄C Takviyeli metal matriks kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*”Doktora tezi,Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2009.
- [49] T.Kıymaz, “*Sıvı faz sinterleme ile B₄C takviyeli mmk malzeme üretimi ve karakterizasyonu*,” Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2020.
- [50] P. D. A. Akdoğan, “Metal matrisli kompozit malzemeler,”Ders notları, 2008.
- [51] B. Üniversitesi, “Kompozit malzemeler metal matrisli kompozitler ders notları,” 2008.
- [52] M.R.Ekici, “*Alaşım elementleri ve sinterleme sıcaklıklarının TM ile üretilen çelik malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi*,” Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi F.B. Enstitüsü, Sakarya, 2010.

- [53] V. Koç, “Toz metalurjisi tekniği ile üretilen bir paslanmaz çelikte katkı elemanlarının aşınma direncine etkileri,” Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Met. Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 2006.
- [54] A. Asan, “Korozyon hızı ölçüm metotları,” pp. 1–23.
- [55] H.Gerengi, “Tafel polarizasyon (tp), lineer polarizasyon (lp), harmonik analiz (ha) ve dinamik elektrokimyasal impedans spektroskopisi (deis) yöntemleriyle düşük karbon çeliği (aisi 1026), pirinç-mm55 ve nikelium-118 alaşımlarının yapay deniz suyunda korozyon davranışı,” Doktora tezi ,Osmangazi Üniversitesi F.B.Enstitüsü,Eskişehir, 2008.
- [56] P. Van Dong et al., “Effect of boron carbide reinforcement on properties of stainless - steel metal matrix composite for nuclear applications,” *J. Mech. Behav. Mater.* 2022;, no. 31, pp. 390–397, 2022.
- [57] F.Kumdalı,“Alüminyum matrisli B_4C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi,” Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul,2008.
- [58] M.Demirel,“Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen metal matrisli kompozitlerde Ni_3Al metallerarası bileşik takviyesinin aşınma davranışına etkilerinin araştırılması,”Yüksek lisans tezi,Fırat Üniversitesi, Elazığ , 2007.
- [59] B. S. Dr G. Sahni, “To study the characteristics of duplex stainless steel and its performance as corrosion resistant material for industrial use in highly corrosive enviroment,” *Int. Res. J. Manag. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 7, pp. 57–64, 2014.
- [60] R.Gecü, B.Birol, S.Örücü, “Mekanik alaşımlama yöntemiyle dupleks paslanmaz çelik üretiminin araştırılması ve karakterizasyonu,” IMASCON 2022 Güz Özet Bildiri, Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi, Kocaeli, 2022, pp. 25.
- [61] Prof. Dr. A.Aran “Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller, Üretimi-Kullanımı- Standartları” *Bölüm 3, ss 23,2004, İstanbul*

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans ve Proje Bildirileri

- 1- R.Gecü, B.Birol, S.Örücü “Mekanik alaşımlama yöntemiyle dupleks paslanmaz çelik üretiminin araştırılması ve karakterizasyonu” IMASCON 2022 Özet Bildiri, Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi. Kocaeli 2022, pp 25.
- 2- B.Birol(ProjeYürütücüsü),S.Örücü(Araştırmacı) Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ), Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinasyon Birimi tarafından desteklenen “FYL-2022-4832 no’lu proje” ara bildirim raporları.İstanbul, 2022.

