

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Barış DOĞAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Zülküf BALALAN**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Doç Dr. Özgür ÖZGÜN**

BİNGÖL-2024

BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Doç. Dr. Zülküf BALALAN danışmanlığında, Barış DOĞAN tarafından hazırlanan bu çalışma 11/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mehmet YAZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Zülküf BALALAN

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ömer EKİNCİ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 03/10/2024 tarih ve 2024 / 46-25 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresi boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşan, yol gösteren, her türlü yardımı esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Zülküf BALALAN ve ikinci tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Özgür ÖZGÜN'e, laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Ömer EKİNCİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

Bilgisayar ortamındaki çalışmalarımda yardımlarından dolayı iş arkadaşlarım Teknisyen Cemalettin GÜZEL ve Teknisyen Emrah YEŞİL'e, sahadaki ekipman çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen iş arkadaşım Makine Teknikeri Abdullah KOÇ'a, çalışmalarım süresince sabır, anlayış, desteklerinden dolayı sevgili eşim Aylin DOĞAN'a, varlığıyla motivasyon kaynağım olan biricik kızım Beril DOĞAN'a, eğitim hayatım boyunca hep destekçim olan annem Mecbur DOĞAN, babam Abdullah DOĞAN ve kardeşim Çağdaş DOĞAN'a ayrı ayrı teşekkürü borç bilip şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Bakırın Tarihçesi	4
2.2. Bakırın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	4
2.3. Bakırın Elektriksel İletkenliği	7
2.4. Bakırın Mukavemetinin Arttırılması	8
2.5. Bakır Alaşımları	9
2.5.1. Pirinç Alaşımları	9
2.5.2. Kalay-Pirinç Alaşımlar	10
2.5.3. Silikon-Bronz Alaşımlar	10
2.5.4. Nikel-Gümüş Alaşımlar	11
2.5.5. Bakır-Nikel Alaşımları.....	11
2.5.6. Bronz Alaşımlar	11
2.5.7. Bakır-Alüminyum Alaşımları.....	12
2.5.8. Bakır-Berilyum Alaşımları.....	13
2.5.9. Özel Bakır Alaşımları	13
2.5.10. Oksijensiz Bakır Alaşımları	13
2.6. Bakır Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları	14
3. KOMPOZİT MALZEMELER	18
3.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi	18
3.2. Kompozit Malzeme Nedir	21
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22

3.3.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	23
3.3.1.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	23
3.3.1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	24
3.3.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	24
3.3.2. Takviye Çeşidine Göre Kompozit Malzemeler	25
3.3.2.1. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler	25
3.3.2.2. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	26
3.3.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	27
4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	28
4.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması	31
4.2. Metal Matrisli Kompozitler için Takviyeler	31
4.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	33
4.3.1. İnfiltrasyon Yöntemi	33
4.3.2. Vorteks (Girdap) Yöntemi.....	34
4.3.3. In-Situ Yöntemi	34
4.3.4 Toz Metalurjisi Yöntemi	35
5. TOZ METALURJİSİ.....	36
5.1. Toz Metalurjisi Nedir	36
5.2. Toz Metalurjisinin Başlıca Avantaj ve Dezavantajları.....	38
5.3. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları	39
5.4. Toz Metalurji Yönteminin Aşamaları	39
5.4.1. Tozların Üretimi	39
5.4.1.1 Mekanik Yöntemler	40
5.4.1.2. Kimyasal Yöntemler.....	40
5.4.1.3. Elektrolizle Üretim Yöntemleri.....	41
5.4.1.4. Atomizasyon Üretim Yöntemi	42
5.4.2. Tozların Karıştırılması	43
5.4.3. Yağlayıcılar	43
5.4.4. Tozların Preslenmesi.....	43
5.4.4.1 Tek Yönlü Presleme	44
5.4.4.2. Çift Yönlü Presleme	45
5.4.4.3 Sıcak Presleme	45
5.4.4.4 Sıcak İzo-statik Presleme.....	47
5.4.4.5. Spark Plazma Sinterleme (SPS)	48

5.4.5. Sinterleme İşlemi	50
6. MATERYAL VE YÖNTEM	53
6.1. Toz ve Malzemenin Hazırlanması	53
6.1.1 Kullanılan Malzemeler	53
6.1.2. Presleme ve Sinterleme	55
6.1.3. Metalografik Hazırlık	56
6.2. Mikroyapı İncelemeleri	57
6.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS)	57
6.2.2. XRD Analizi	58
6.2.3. Üç Nokta Eğme Testi	58
6.2.4. Mikrosertlik Ölçümü	59
6.2.5. Yoğunluk Ölçümü	60
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

µm	:Mikrometre
CNT	:Karbon Nanotüpler
EDS	:Enerji Dağılımlı X Işını Spektrometresi
GPa	:Gigapaskal
HV	:Vickers Sertliği
IACS	:Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardı
IAEA	:Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
MMK	:Metal Matrisli Kompozitler
Mpa	:Megapaskal
OMK	:Organik Matrisli Kompozitler
PMK	:Polimer Matrisli Kompozitler
Ppm	:Milyonda Bir
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	:Seramik Matrisli Kompozitler
SPS	:Spark Plazma Sinterleme
T/M	Toz Metalurjisi
UNS	:Birleşik Numaralandırma Sistemi
XRD	:X-Işımları Difraktometresi
YMK	:Yüzey Merkezi Kübik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bakıra ait kristal yapı modeli.....	5
Şekil 2.2. Doğal bakır	5
Şekil 2.3. Takviye elementlerin bakır üzerindeki etkileri.....	9
Şekil 2.4. Bor-Karbür ikili denge diyagramı.....	17
Şekil 2.5. Malzemenin sertliğinin mevcut Bor/Karbür oranına göre değişimi	17
Şekil 3.1. Kompozit malzemenin yapısı	21
Şekil 3.2. Kompozitlerin yapı bileşenleri	22
Şekil 3.3. Takviye şekline göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	25
Şekil 3.4. Farklı yapı ve şekillere sahip fiber kompozit malzemeler	26
Şekil 3.5. Tabakalı kompozit örneği.....	27
Şekil 4.1. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler	28
Şekil 4.2. İnfiltrasyon Yönteminin Şematik Gösterimi	33
Şekil 4.3. Vorteks Yöntemi.....	34
Şekil 4.4. Toz metalürji yöntemi üretim prosesi	35
Şekil 5.1. T/M ile imal edilmiş bazı ürünler	36
Şekil 5.2. T/M yöntemini kullanarak parça üretim prosesi.....	37
Şekil 5.3. Mekanik yöntemle toz üretimi.....	40
Şekil 5.4. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi	41
Şekil 5.5. Elektroliz yöntemiyle toz üretimi	42
Şekil 5.6. Atomizasyon yöntemiyle toz üretimi	42
Şekil 5.7. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü	44
Şekil 5.8. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü	45
Şekil 5.9. Sıcak preslemenin şematik görünümü	45
Şekil 5.10. Sıcak izo-statik presleme.....	47
Şekil 5.11. Darbeli akımın SPS sisteminde partikül üzerindeki hareketi	49
Şekil 5.12. SPS sisteminin şematik görünümü.....	50
Şekil 5.13. İki küreli model, sinterleme işlemi sırasında nokta temasından başlayarak parçacıklar arasındaki bağın ilerleyişi	51
Şekil 5.14. Sinterleme çeşitleri.....	52

Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan Bakır ve Krom tozunun SEM görüntüleri	53
Şekil 6.2. Turbula Mixer	54
Şekil 6.3. Homojen karıştırılan metal tozlar	54
Şekil 6.4. Grafit kalıp	55
Şekil 6.5. SPS makinesi	55
Şekil 6.6. SPS’de 40x10x4 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler	56
Şekil 6.7. Zımpara ve parlatma makinesi	56
Şekil 6.8. SEM/EDS Mikroskobu	57
Şekil 6.9. XRD cihazı	58
Şekil 6.10. Üç nokta eğme test cihazı	59
Şekil 6.11. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı	60
Şekil 7.1. Üretilen kompozitlerde ile elde edilen bağıl yoğunluk değerleri	62
Şekil 7.2. Üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenleri	63
Şekil 7.3. CuCr30C4,5 numunesinden dağlama işlemi öncesi alınmış SEM/EDS nokta analizi	64
Şekil 7.4. Cu Cr faz diyagramı	66
Şekil 7.5. Numunelerin SEM görüntüleri	66
Şekil 7.6. CuCr10C1,5 numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler	68
Şekil 7.7. CuCr20C3 numunesine ait SEM/EDS nokta analizi	69
Şekil 7.8. Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri	70
Şekil 7.9. Üretilen kompozit numunelerin	72
Şekil 7.10. CuCr30C4,5 numunesinin kırılma yüzeyinden alınmış EDS nokta analizi	73
Şekil 7.11. Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri	74

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Bakırın önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri	6
Tablo 2.2. Oksijensiz bakır alaşımları	14
Tablo 2.3. Seramik takviye elemanlarının genel özellikleri	15
Tablo 3.1. Havacılıkta kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri.....	19
Tablo 3.2. Otomotiv sanayisinde kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri.....	20
Tablo 6.1. Üretilen kompozitlerin ağırlıkça % olarak kimyasal bileşimleri.....	54
Tablo 7.1. Üretilen kompozitlerin teorik ve ölçülen yoğunluk değerleri	62



BAKIR MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada Sark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak argon atmosferinde 900 °C sıcaklık, 35 MPa basınç altında 4 dakika bekleme süresi boyunca işleme tabi tutularak in-situ Cu matrisli Cr ve C ilaveli kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen bu malzemelerin mikroyapı, mekanik özellikleri ve yoğunlukları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri; XRD, SEM ve SEM/EDS ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellik incelemeleri; üç nokta eğilme testi ve sertlik ölçümü ile yapılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerde Cr ile C SPS işlemi sırasında reaksiyona girmemişlerdir. Cr ayrı bir faz olarak, C ise grafit fazı olarak mikroyapıda kalmıştır. İlave edilen Cr miktarı arttıkça üretilen malzemelerin de sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir, en yüksek sertliğe yüzde 30 Cr ilave edilen malzemede ulaşılmıştır. İlave edilen Cr miktarı arttıkça üretilen malzemelerin eğilme dayanımı azalmıştır. Yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre ölçülmüştür, Cr miktarındaki artışla birlikte elde edilen bağıl yoğunluk değerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek bağıl yoğunluk değerine yüzde 30 Cr ilave edilen malzemede ulaşılmıştır. Tez çalışmasında SPS ile daha düşük Cr-C ilavelerinde bile daha yüksek bağıl yoğunluklara ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: In-situ, Cu Matrisli Kompozit, Spark Plazma Sinterleme, Mikroyapı, Sertlik, Mukavemet.

PRODUCTION AND CHARACTERISATION OF COPPER MATRIX COMPOSITES

ABSTRACT

In this study, in-situ Cu matrix Cr and C added composite materials were produced by using the Spark Plasma Sintering (SPS) method in an argon atmosphere at 900 °C and 35 Mpa pressure for a waiting time of 4 minutes. The microstructure, mechanical properties and densities of these produced materials were examined. Microstructure examinations were carried out with XRD, SEM and SEM/EDS. Mechanical property examinations were carried out with three-point bending test and hardness measurement. In the produced composite materials, Cr and C did not react during the SPS process. Cr remained in the microstructure as a separate phase and C as the graphite phase. It was observed that the hardness of the produced materials increased as the amount of added Cr increased, the highest hardness was reached in the material to which 30 percent Cr was added. The bending strength of the produced materials decreased as the amount of added Cr increased. The density values were measured according to the Archimedes principle, and it is seen that the relative density value obtained increases with the increase in the amount of Cr. The highest relative density value was reached in the material with 30 percent Cr added. In the thesis study, higher relative densities were achieved even with lower Cr-C additions with SPS.

Keywords: In-situ, Cu Matrix Composite, Spark Plasma Sintering, Microstructure, Hardness, Resistance.

1. GİRİŞ

İnsanların bulduğu en eski metallere biri olan bakır, yaklaşık 10.000 yıldır kullanılmaktadır. Bronz ve pirinç gibi bakır ve bakır alaşımları Yunanlılar, Mısırlılar, Çinliler, Romalılar ve Sümerler de dahil olmak üzere çeşitli eski medeniyetlerde hem dekoratif hem de pratik gayelerle kullanılmıştır. Antik çağlardan günümüze kadar tarih boyunca bakır, askeri uygulamalar, çan ve heykel gibi sanatsal yaratımlar, aletler ve çok sayıda işlevsel nesne gibi çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Sanayi devrimi, bakır ve alaşımlarının üretim ve kullanımında önemli bir dönüşüme yol açmış olmasına rağmen günümüzde bakır, mühendislik uygulamalarında modern malzemelerin temel unsuru olmaya devam etmektedir (ASM, 2001).

Bakırın 20.-21. yüzyılların sanayi çağındaki yeri, diğer metallerle kolayca birleşebilme yeteneğiyle önemli hale gelmiştir. Çinko ve kalay ana alaşım elementlerdir fakat kadmiyum, berilyum, manganez, nikel, alüminyum, krom gibi pek çok başka element fiziksel, mekanik özelliklerin ve mükemmel korozyon, aşınma direncinin benzersiz kombinasyonlarına sahip alaşımlar oluşturur. Bu özellikler bakır ve alaşımlarını bina inşaatı için tercih edilen malzemeler haline getirmiştir, ancak aynı zamanda elektronik, kimya, otomotiv ve denizcilik endüstrileri gibi mühendislik alanlarında da yer bulmuştur. Süper iletkenlerin, elektrikli araçların, güneş enerjisiyle ısıtma sistemlerinin ve büyük ölçekli su tuzdan arındırma sistemlerinin geliştirilmesiyle bakırın önümüzdeki yıllarda önemli bir malzeme olmaya devam etmesi beklenmektedir (ASM, 2001).

Bakır matrisine seramik parçacıkları eklenerek bakırın mukavemeti artırılabilir. Bu nedenle bakır matris içerisine farklı seramik parçacıkları dahil edilmiştir. Bu seramik toz örnekleri arasında B_4C , Al_2O_3 , SiC , TiB_2 , TiC ve WC bulunur (Xu, 2003). Kompozit sistemlerin özelliklerini anlamak, Maxwell ve Einstein gibi ünlü bilim insanlarının ilgisini çekmiş ve bu konu, bilim ve mühendislikte temel bir problem haline gelmiştir (Torquato, 2000). 20. yüzyılın ilk yarısında başlayan modern kompozitler üzerindeki çalışmalar, geleneksel malzemelerin sunduğu özelliklerin yetersiz kalmasıyla artan teknoloji talepleri nedeniyle günümüze kadar sürekli büyümüştür ve teknolojinin gelişen ihtiyaçlarını

karşlamak için günümüzde de hızla ilerlemektedir. Kompozit malzemeler, amaçlanan uygulama için istenen özelliklere sahip yeni bir malzeme üretmek üzere iki veya daha fazla malzemenin daha büyük ölçekte birleştirilmesiyle oluşturulur (Hiçyılmaz, 1999).

Makro yapısal düzeyde oluşturulan tanıma göre kompozit malzemeler iki temel özelliğe sahiptir. Kompozit malzemeyi oluşturan çeşitli elementler sıklıkla farklı kimyasal bileşimlere sahiptir. Kompozit malzemeleri oluşturan elemanlar esasen birbirleri içinde çözünemezler. Kompozit malzemeyi oluşturan elemanlar, yapı içindeki özelliklerini koruyarak, bunların tanımlanmasına ve bileşenler arasındaki arayüzün gözlemlenmesine olanak sağlar (Kalaycıoğlu, 2010).

Bir kompozit malzeme çeşidi olan metal matrisli kompozitlerin oluşturulması için metalik matrisler gereklidir. Matris malzemesinin seçimi öncelikle amaçlanan uygulamalar için sıcaklık, mukavemet, yoğunluk ve maliyet hususlarından etkilenir. Elektrik iletkenliği, süneklik, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi diğer etkenler tercih edilen metal malzemeye bağlıdır. Bu aşamada en önemli faktörlerden biri matris malzemesi ile donatı arasındaki uyumdur. Uyumluluk, matris ile takviye arasındaki sınırda istenmeyen kimyasal reaksiyonların bulunmaması anlamına gelir. Bazen reaksiyon, arayüzeyde intermetalik bileşiklerin oluşmasına neden olabilir, bu da yükün donatılara aktarılması nedeniyle istenmeyen ve tehlikeli sonuçlara yol açabilir. Ayrıca reaksiyon ürünleri çatlak oluşumu için başlangıç noktası görevi görebilir (Pandey, 2001).

Metal matrisli kompozitler, mukavemet, iyi aşınma direnci, yüksek sertlik ve korozyon dayanımı gibi hayati önem taşıyan özelliklere sahiptirler. Sünek metal ve sert seramik takviyesinin birleşiminden dolayı da havacılık, uzay, savunma ve imalat gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılırlar. Bu kompozitleri üretmek için geleneksel döküm ve toz metalurjisi yöntemleri yaygın olarak kullanılırken, bileşenler arasındaki kimyasal reaksiyon gerçekleşen yöntemler de tercih edilmektedir. Geleneksel tekniklerin aksine kompozit üretimi, bileşenlerin ayrı ayrı karıştırılması (Ex-situ) ihtiyacını ortadan kaldırarak kimyasal reaksiyonlar yoluyla (In-situ) gerçekleştirilebilir. Her iki yaklaşım da sürekli ve süreksiz pekiştirme dönemleriyle sonuçlanabilir. Takviye malzemeleri fiber, kısa fiber veya parçacık formunda olabilir (Koçyiğit, M., 2023).

In-situ yöntemiyle metal matrisli kompozit üretimi, Ex-situ üretim yöntemlerine göre bazı avantajlar sunar. Yerinde takviye oluşumu, matris ve takviye arasında temiz arayüzleri, matris içinde takviye fazının eşit dağılımını ve sonuç olarak gelişmiş mekanik mukavemet ve termal stabiliteyi garanti eder. Yerinde parçacık takviyesi, element sistemlerinin belirli oranlarda birleştirilmesi ve kontrollü sıcaklıklara tabi tutulmasıyla elde edilebilir. Bu nedenle üretimi diğer takviye türlerine göre hızlı ve uygun fiyatlı olabilir. Ancak tanelerin büyümesi ve istenmeyen fazların gelişmesi bu teknikte optimizasyon gerektiren faktörlerdir (Koçyiğit, M., 2023).

Metal matrisli kompozitler (MMK) çeşitli teknikler kullanılarak üretilmektedir. Bunlardan birisi olan toz metalurjisi; metalleri ve metal alaşımlarını, belirli boyutlardaki parçacıklara bağlayıcılar ve yağlayıcılar eklemeyi içeren ısıtma işlemine tabi tutarak mukavemetini arttırmak için kullanılan bir tekniktir. İnce parçacıklı metalik parçacıkların üretilmesi, işlenmesi, elde edilmesi ve teknolojiye kazandırılması işlemi, ince parçacıklı metalik parçacık üretimi olarak bilinir (Picken, 1981). Ana bileşen erime noktasının altındaki sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulduktan sonra istenilen malzeme oluşur. Toz parçacıklarının temas ettiği yüzeyler güçlü bir bağlantı kurarak istenilen özelliklerin elde edilmesini sağlar (Demirel, 2007).

Bu çalışmada T/M tekniğiyle spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi kullanılarak saflık oranları yüksek olan toz elementlerle Cu matrisli C ve Cr takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Artan oranlarda C ve Cr tozu kullanarak üretilen Cu matrisli kompozit malzemeler; mekanik özellik, mikroyapı ve yoğunluk bakımından karakterize edilmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek için mikrosertlik ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Mikroyapısal incelemelerde ise SEM ve SEM/EDS incelemeleri ile XRD analizlerinden faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar benzer çalışmalarla karşılaştırılarak literatüre kazandırılacaktır.

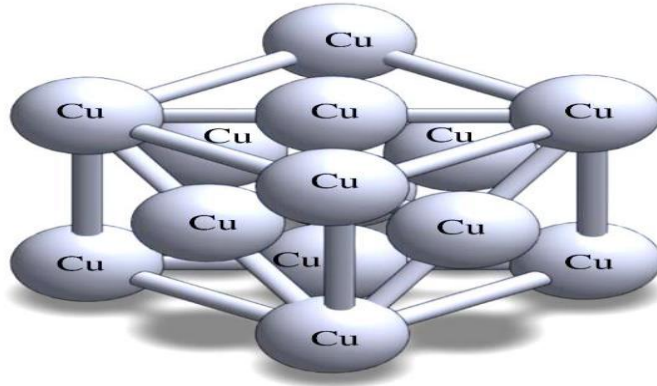
2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Bakırın Tarihçesi

Bakır binlerce yıldır insanlar tarafından kullanılmaktadır. Doğada yaygın olarak bulunan bir bileşendir ve başta kükürt, karbonatlar, oksitler, sülfatlar, hidroksil klorürler ve doğal bakır olmak üzere yer kabuğunda bol miktarda bulunur (Davenport vd. 2002). Demirin keşfinden önce bakır ve kalay karıştırılarak veya alaşımlanarak bakır elde ediliyor, çeşitli silahlar ve aletler yapılıyordu. Bugün de birçok yerde bakır ve pirinç kullanılmaktadır. Tasarım amaçlı takı, el sanatları, madeni para; iyi iletken olması nedeniyle kablo yapımı; rengi nedeniyle bobin sargıları gibi çeşitli uygulama yerleri mevcuttur (Ehbil Kriewah, 2022).

2.2. Bakırın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bakır, Şekil 2.1'deki gibi yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip metalik bir elementtir. Saf bakır Şekil 2.2'de görüldüğü gibi kırmızımsı bir renk tonuna sahiptir ve çinko ile birleştirildiğinde sarımsı bir renk alırken, nikel ilavesi ona gümüş bir görünüm kazandırır. Ergime noktası 1083°C olup yoğunluğu $8,90\text{ g/cm}^3$ olup alüminyumdan üç kat daha ağırdır. Bakır, gümüşe göre daha düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahipken alüminyuma göre iletkenliği yaklaşık 1.5 kat daha yüksektir (Konečná ve Fintová, 2012).



Şekil 2.1. Bakıra ait kristal yapı modeli



Şekil 2.2. Doğal bakır (Url-1, 2024)

Bakır, elektriği ve ısıyı iyi ileten, aynı zamanda paslanmaya karşı dayanıklı, dövülebilir bir metaldir. Saf bakır, olağanüstü elektrik iletkenliği nedeniyle çok sayıda elektrik uygulamasında yaygın olarak kullanılan yumuşak ve esnek bir metaldir. Bakır mükemmel bir ısı iletkenidir, bu da onu yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kullanım için ideal kılar (Ehbil Kriewah, 2022). Tablo 2.1’de bakıra ait bazı önemli fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir (Çelebi Efe, 2010).

Tablo 2.1. Bakırın önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri

Simgesi	Cu
Periyot, Grup, Blok	4, 11 , d
Sınıfı	Geçiş elementi
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik
Rengi	Metalik Kahverengi
Özkütlesi	8,96 gr/cm ³
Atom Ağırlığı	63,546 u
Brinell Sertliği	874 Mpa
Mohs Sertliği	3
Vickers Sertliği	369 Mpa
Ergime Noktası	1083 °C
Ergime Isısı	43 k.kal (1 kg'ın ergimesi için gerekli enerji)
Kaynama Noktası	2567 °C
Buharlaşma Isısı	300,4 kJ/mol
Isı Kapasitesi	24,440 (25°C)J/(mol.K)
Isıl İletkenlik	401 W/(m.K)
Isıl Genleşme	16,5 mm/(m.K) (25 °C'de)
Elektrik İletme Özelliği	%99.95
Elektrik direnci	16,78 nΩ.m(20°C'de)
Atom Numarası	29

Ayırt edici özellikleri bakırı mühendislikte önemli bir malzeme haline getirmiştir ve gelecekteki teknolojik gelişmelerde önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Bakırın bulunabilirliği ve talebi son yıllarda ekonomik, teknolojik ve sosyal faktörlerden etkilenmiştir. Bakıra yönelik artan küresel talep, üretimin artmasına yol açarak yeni maden ve tesislerin kurulmasına ve mevcut olanların genişletilmesine yol açmıştır. Saf bakırın elektriksel iletkenliği, diğer metallerin iletkenliğini değerlendirmek ve elektriksel iletkenlik alaşımlarını sınıflandırmak için temel bir referans görevi görür (Ehbil Kriewah, 2022). Tüm metaller arasında bakır, olağanüstü şekillendirilebilirliği, oksidasyona ve korozyona karşı direnci ve olağanüstü elektrik ve termal iletkenliği nedeniyle benzersiz bir konuma sahiptir. Sonuç olarak Cu, hem yüksek elektriksel hem de termal iletkenliğin gerekli olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılır. Cu ve alaşımlarının başlıca dezavantajları ise mukavemet özelliklerinin düşük olması ve aşınmaya karşı düşük dirençleridir (Meydanoğlu vd., 2013).

2.3. Bakırın Elektriksel İletkenliği

Elektrik yükünün bir malzemedan ne kadar kolay akabileceğinin ölçüsü, elektrik iletkenliği olarak bilinir. Birimi siemens/metre'dir. Elektriksel iletkenlik değerleri sıklıkla Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) standardının yüzdesi olarak ifade edilir. Bakırın elektriksel iletkenliği %IACS (Uluslararası tavlanmış bakır standardı) cinsinden ölçülür ve saf bakırın 20°C'deki iletkenliği %100 olarak tanımlanır. IACS değeri ne kadar yüksek olursa malzemenin iletkenliği de o kadar yüksek olur (Özorak, 2019; Çelebi Efe, 2010).

Bakır, mükemmel elektrik iletkenliği, korozyona karşı direnci ve işlenme kolaylığı nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Saf bakırın kullanıldığı bazı temel yerler şunlardır; bobin sargıları, jeneratörler, teller, transformatörler, havai iletim hatları, yağ soğutucuları ve radyatörler, yüksek fırın tüyerleri, yastık radyatörler, ark fırınlarının elektrot tutucuları ve kollarının yapımıdır (Çelebi Efe, 2010).

Bakır, elektriğin üretimi (jeneratörler, transformatörler vb.), taşınması (enerji nakil hatları) ve kullanımı (elektrik motorları, elektrik makineleri vb.) için en uygun maliyetli malzemedir. Aydınlatma armatürleri, beyaz eşyalar, radyo, televizyon, küçük ev aletleri gibi rutin olarak kullandığımız birçok eşyada bakır kullanılmaktadır ve günlük hayatımızdaki birçok eşya bakırın varlığının bir sonucudur. Ayrıca mobilya malzemesi olarak kullanılan dayanıklı çatı kaplamaları, bakır levhalar, bakır ve pirinç gibi uygulama yerleri de bulunmaktadır. Torna, kaynak makinesi, matkap, freze gibi ekipmanlarda elektrik enerjisinin sağlanması ve dağıtılması işlevini yerine getirir. Ayrıca otomobil, tren, gemi gibi çeşitli vasıtalarda, kimya endüstrisinde, radyatör, boru gibi bileşenlerde ve soğutma sistemlerinde de bakır bulunur. Özetle elektriğin üretildiği, iletildiği ve kullanıldığı her alanda bakırdan yararlanılmaktadır. Bakır öncelikle elektrik ve elektronik sektöründe kullanılmaktadır ve kullanımının %80'ini oluşturmaktadır, geriye kalan %20'lik kısım ise makine ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak bulunan pirinç ve bronz gibi alaşımlar halinde kullanılmaktadır (Çelebi Efe, 2010; TMMOB, 2003).

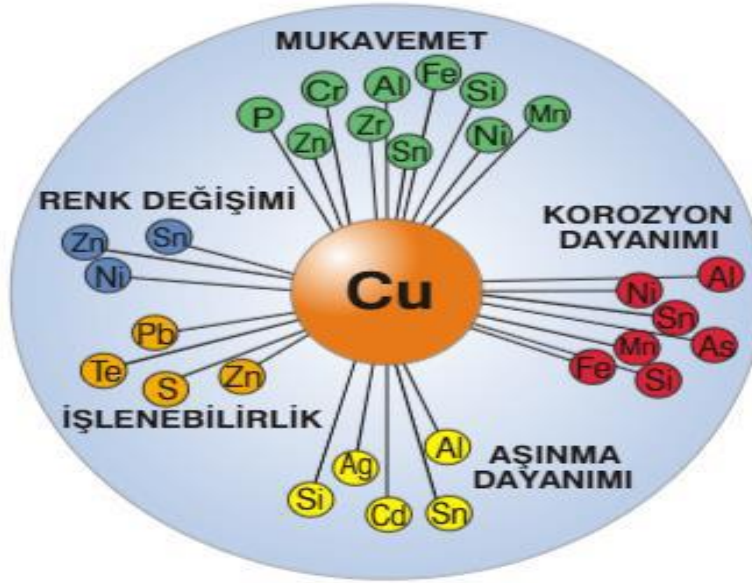
2.4. Bakırın Mukavemetinin Arttırılması

Gümüş bütün metaller arasında en yüksek elektrik iletkenliğine sahip olanıdır. Gümüşü bakır takip ediyor. Bakır, yüksek maliyeti ve tedarikiyle ilgili zorluklar nedeniyle genellikle gümüş yerine tercih ediliyor. Alüminyum bakırın rakibidir ancak bakırla karşılaştırıldığında daha düşük iletkenliği ve dayanıklılığı onu ikinci plana iter. Bakır gümüşten sonra en iletken metal olduğundan, verimli elektrik iletkenliğinin gerekli olduğu uygulamalarda popüler bir seçimdir (Çelebi Efe, 2010).

Bakır, mükemmel ısı ve elektrik iletkenliği, korozyona karşı direnci, çekici rengi, orta düzeyde mukavemeti ve şekillendirme kolaylığı nedeniyle tarihte önemli bir rol oynamış ve onu çeşitli mühendislik alanlarında en yaygın tercih edilen metal haline getirmiştir (Xu vd., 2003; Dobrzanski, 2006; Zhu vd., 2007, Çelebi Efe, 2010).

İletkenler, açma-kapama kontakları ve elektrotlar gibi elektrik iletkenliğine öncelik veren uygulamalar için bakır malzemeler yüksek elektrik iletkenlikte olmalı, oda sıcaklığında olağanüstü bir dayanıklılığa sahip olmalı, yüksek sıcaklıklarda bile dayanımını korumalıdır. Elektrolitik bakır, elektriği iletme yeteneği açısından eşsizdir ancak gücü sınırlıdır. Bakırın sınırlı mukavemeti ve özellikle yüksek sıcaklıklarda yumuşama eğilimi daha geniş uygulama alanı bulmasını sınırlamaktadır (Özorak, 2019). Bakır soğuk şekillendirmeyeyle sertleştirildiğinde elektriksel iletkenliği etkilense de ciddi bir azalma olmaz ancak 100°C civarında yeniden kristalleşme nedeniyle sertliğini ve mukavemet özelliklerinde bir miktar azalma olur (Özorak, 2019; Url-2, 2024).

Bakırın mukavemetini arttırmak için alaşımlama yöntemi tercih edilebilir. Bir malzemenin mukavemeti, katı çözelti sertleştirilmesi veya çökeltme sertleştirilmesi yoluyla artırılabilir, ancak bunun dezavantajı, elektrik iletkenliğinde önemli bir azalmadır. Sonuç olarak, alaşımların eklenmesi kısıtlanmalıdır aksi takdirde mukavemet arttıkça iletkenlik azalır. Bu nedenden ötürü üretim sürecinde alaşım elementinin %2 civarında kullanılması yaygındır. Şekil 2.3’de takviye elementlerinin bakır üzerindeki etkileri gösterilmiştir (Zhan ve Zhang, 2003; Dobrzanski, 2006; Çelebi Efe, 2010; Url-2, 2024).



Şekil 2.3. Takviye elementlerin bakır üzerindeki etkileri

Bir kompozitteki parçacık sayısı arttıkça elektriksel iletkenlik azalır. Bu nedenle kompozitin mukavemeti ve iletkenliği arasında bir denge bulmak ve hedeflenen amaca uygun olmasını sağlamak önemlidir. Ağırlıkça %1,1'e kadar alümina parçacıklarından meydana gelen kompozit malzemeler günümüzde temin edilebilmektedir. Bu kompozitlerin iletkenliği, düşük alaşımlı bakırın iletkenliğini aşmaktadır (Ying ve Zhang, 2000; Jena vd., 2001).

2.5. Bakır Alaşımları

Bakırdan yapılan alaşımlar, yüksek elektriksel veya termal iletkenliğin gerekli olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılır. Ticari bakır malzemeleri olan saf bakır alaşımları, en az %99,3 oranında ilave bakır içeriğine sahip malzemeler olarak tanımlanır. Cu'nun farklı elementleri içeren çeşitli alaşımları vardır (Ehbil Kriewah, 2022).

2.5.1. Pirinç Alaşımları

Pirinç; bakır ve çinkodan oluşan, olağanüstü mukavemet ve esnekliğe sahip, soğuk sıcaklıklarda kolayca şekillendirilebilen ve %35'e varan çinko içeriğiyle gelişmiş iyileştirme yetenekleri sergileyen bir alaşım türüdür. Pirinç rengi, alaşımda bulunan çinko miktarına bağlı olarak canlı kırmızıdan sıcak altın sarısına kadar değişebilir. Çinko içeriği

%32 ila %39 arasında değişen pirinç, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında olağanüstü performans gösterir ancak daha düşük sıcaklıklarda şekillendirilme yeteneği sınırlıdır. Muntz Metal gibi %39'u aşan çinko içeriğine sahip pirinç alaşımları, daha düşük çinko içeriğine sahip alaşımlara kıyasla oda sıcaklığında daha fazla mukavemet ve daha düşük süneklik sergilerler. Pirinç, çekme yoluyla imalattaki basitliği, soğuk çalışmaya dayanma yeteneği ve korozyona karşı direnci ile ünlüdür. Olağanüstü döküm yetenekleriyle tanınan Pirinç döküm, sıhhi tesisat armatürlerinde, dekoratif donanımlarda, mimari ekipmanlarda, düşük basınçlı vanalarda, dişlilerde ve yataklarda uygulama alanı bulur (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.2. Kalay-Pirinç Alaşımlar

Kalay Pirinç alaşımı içerisinde bakır, kalay (%0,2-3) ve çinko (%2-40) bulunduran alaşımlardır. Bu alaşım ailesi denizci pirinçleri, lacivert pirinçler ve kolayca işlenebilir kalay pirinçlerden oluşur. Bu alaşımlar; yaylar, yüksek mukavemetli bağlantı elemanları, elektrik bağlantıları, denizcilik donanımı, korozyona dayanıklı mekanik ürünler, pompa milleri ve korozyona dayanıklı vidalı makine parçaları üretmek için kullanılır. Korozyona dayanıklıdırlar, çinkosuzlaşmaya karşı çok daha az duyarlıdırlar ve geleneksel bakırdan daha yüksek dayanıma sahiptirler. Yüksek sıcak dövme kabiliyetine ve iyi soğuk şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptirler. Bu malzemeler yüksek korozyon direncine, orta derecede dayanıklılığa ve mükemmel elektrik iletkenliğine sahiptirler (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.3. Silikon-Bronz Alaşımlar

Silikon Bronzları, pirinçler kategorisinin yüksek mukavemet özellikli bir parçasıdır. Çinko miktarı %20'den daha az, silikon miktarı %6'ya kadar olmalı ve katı çözeltiyle güçlendirilirler. Valf gövdelerinde hem korozyon direnci hem de yüksek mukavemet sağladığından silikon kaplamalı pirinç kullanılır. Silikon kırmızı pirinçlere benzeyen ancak önemli ölçüde daha düşük çinko konsantrasyonuna sahip olan silikon kırmızı bronzlar bu kategoriye girer. Rulmanların, dişlilerin ve pompa, valf gibi çeşitli şekillerdeki bileşenlerin imalatında kullanılırlar (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.4. Nikel-Gümüş Alaşımlar

Nikel Pirinç olarak da bilinen nikel gümüşler; çinko, bakır ve nikelden oluşan alaşımlardır. İçeriğinde gümüş bulundurmamalarına rağmen görsel olarak çekici bir gümüş parlaklığına, orta düzeyde dayanıklılığa ve iyi korozyon direncine sahiptirler. Elektrolizle kaplanmış sofra takımları, optik ve fotoğraf ekipmanları, yiyecek ve içecek işleme ekipmanları, dekoratif donanımlar ve müzik aletlerinin üretiminde tercih edilirler (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.5. Bakır-Nikel Alaşımları

Bakır-nikel alaşımları %2-30 oranında nikelden oluşur, bu da onları korozyona karşı oldukça dirençli hale getirir ve yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Bu malzemelerin mukavemeti ve korozyona karşı direnci demir, krom, niyobyum ve/veya mangan katılarak artırılabilir. Bu malzemeler stresli korozyon çatlamasına karşı oldukça dirençlidir ve hem buhar hem de nemli hava ortamlarında oksidasyona karşı mükemmel direnç gösterirler. Daha yüksek nikel alaşımları, deniz suyundaki korozyona dayanma yetenekleri ve yüzeylerine yapışan deniz organizmalarına karşı dirençleriyle ünlüdür. Bu malzeme, gemilerdeki kapasitörler, açık deniz platformları, enerji santralleri ve vanalar, pompalar, bağlantı parçaları gibi çeşitli deniz parçaları, borular, gemi gövdeleri için elektrik ve elektronik bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.6. Bronz Alaşımlar

Kalay bronzları olarak da bilinen fosfor bronzlarının içeriğinde bulundurduğu kalay ve fosfor oranı; %0,5-11 arası kalay , %0,01-0,35 arası fosfordur. Kalay korozyon direncini ve çekme mukavemetini yükseltirken, fosfor aşınma direncini ve sertliği yükseltir. Fosfor bronzları olağanüstü yaylanma özelliklerine, yorulmaya karşı olağanüstü dirence, mükemmel işlenebilirliğe ve lehimlenebilirliğe, korozyona karşı olağanüstü dirence sahiptir. Esas olarak elektrikli ürünlerde kullanılırlar, ancak aynı zamanda korozyona dayanıklı körükler, diyaframlar ve yaylı rondelalarda uygulama alanları bulurlar. Alüminyum Bronzlar %6-12 arası alüminyum, %6'ya kadar demir ve nikelden oluşurlar, korozyona ve aşınmaya karşı olağanüstü dayanıklılık, direnç gösterirler. Katı çözelti

sertleşmesi, soğuk işlem ve demir açısından zengin bir fazın çökertilmesi bu özelliklere katkıda bulunan faktörlerdir. Alüminyum içeriği yüksek olan alaşımlar su verme ve tavlama işlemlerine tabi tutulabilir. Alüminyum bronzlar; deniz suyu, kirlenmiş maden suları, oksitleyici olmayan asitler ve endüstriyel proses sıvılarının taşınmasında kullanılan denizcilik ekipmanlarında, şaftlarda ve pompa valf bileşenlerinde uygulama alanı bulur. Ayrıca ağır yatak kovanları ve işleme makinesi paletleri olarak da kullanılırlar. Alüminyum bronz dökümler korozyona, yüksek mukavemete, tokluğa ve aşınmaya karşı olağanüstü bir dirence sahiptir. Ayrıca mükemmel döküm ve kaynak özellikleri sergilerler (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.7. Bakır-Alüminyum Alaşımları

Al Bronzları olarak adlandırılan Cu-Al alaşımları değişen miktarlarda Fe, Ni, Mn ve Si elementleri içerir aynı zamanda %3-15 arasında ek Al içerir. Al bronzun iki farklı türü olmasına rağmen bunlardan ilki ısıtma işlemiyle sertleştirilemeyen alfa veya tek fazlı alaşımlardır. Bu alaşımlar %7'den az element içerir. İkincisi ise az miktarda ek element içeren alfa ve beta fazlarının birleşiminden oluşan iki fazlı bir Cu-Al alaşımıdır. Her iki bakır-alüminyum alaşımı da kaynaklanması kolay ancak elektrik ve ısı iletkenliği düşük olan alaşımlardır. Ayrıca, alfa fazı bronzları ön ısıtmaya gerek kalmadan kusursuz bir şekilde birbirine kaynaştırılabilir. İki fazlı alaşımlar, diğer birçok bakır alaşımı türüyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Bu alaşımların miktarı arttıkça süneklikleri azalır ve sertlik özellikleri artar. Alfa-beta alaşımları, alfa alaşımlarına kıyasla daha geniş bir plastik deformasyon aralığına sahiptir (Kalender, 2023).

Al bronzların yüzeylerinde ince bir AlO_2 tabakası oluşur. Bu katman metalin yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı direncini artırır. Ancak kaynak işlemi öncesinde metal üzerindeki alüminyum oksit kaplamanın giderilmesi gerekmektedir. Ayrıca Ni-Al bronz %8,5-11 oranında ilave alüminyum ve %3-5 oranında ilave nikel içerir. Ni-Al alaşımları kaynaklı bağlantılarda çatlak oluşumuna eğilimlidir (Kalender, 2023). Yüksek alaşımlı bronzlar genellikle sıcak şekillendirme proseslerinde kullanılır. Armatür üretiminde $CuAl_9Mn_2$ alaşımı, $CuAl_9Fe_3$ alaşımı yatak kovanları, valf yuvası üretimi vb. amaçlar için kullanılırlar. $CuAl_{10}Fe_3Mn_{1.5}$ alaşımının sertliği, gücü artırılmıştır ve şaft kovanları,

yatakların üretimi için idealdir. Korozyona dayanıklı Cu-Al alaşımları deniz suyunda Cr-Ni çeliklerinden daha iyi performans gösterirken kavitasyon korozyonuna ve stres korozyonuna karşı da dayanıklıdır. CuAl10Fe4Ni4 alaşımı yaygın olarak döküm, su türbini ve pompa imalatında, valf yuvalarında, egzoz valflerinde ve yüksek sıcaklıklarda çalışan çeşitli diğer bileşenlerde ve kimya endüstrisinde kullanılır (Kalender, 2023).

2.5.8. Bakır-Berilyum Alaşımları

Berilyum elementinin katılmasıyla oluşturulan Cu-Be alaşımları mükemmel elektriksel ve termal iletkenlik sergilerler. Amonyak, güçlü asitler ve bazların varlığı dışında mükemmel korozyon dirençleri nedeniyle, ek koruyucu kaplamalara ihtiyaç duymadan aşındırıcı ortamlarda kullanılabilirler. CuBe₂ korozyona karşı üstün direnç gösterdiği için saf bakır alaşımı ve Ag içeren bakır alaşımlarının yerine geçer. Cu ve Cu-Be alaşımları arasındaki farklardan biri elektriksel ve termal iletkenliklerinde yatmakta olup CuBe₂ alaşımı daha düşük değerler sergilemektedir. Cu-Be alaşımları saf bakır metaline göre daha iyi işlenebilirliğe sahiptir ancak P alaşım elementli bronz alaşımları kadar iyi değildir (Kalender, 2023).

2.5.9. Özel Bakır Alaşımları

Bakır-nikel-silikon ve bakır-nikel-kalay sistemleri, çökelme sertleşmesine uğrama yeteneklerinden dolayı ayırt edici özelliklere sahiptirler. Olağanüstü güçleri, iyi şekillendirilebilirlikleri, termal kararlılıkları ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle elektrikli ve elektronik konektörlerde ve donanımlarda kullanım için çok uygundur. Bu alaşımlar UNS sisteminde bileşimlerine göre sınıflandırılır (Bakır Geliştirme Derneği, 2010).

2.5.10. Oksijensiz Bakır Alaşımları

Yüksek iletkenliğe sahip bakır olarak da bilinen oksijensiz bakır alaşımlarının ~58,36 m/Ωmm² değerinde yüksek bir elektrik iletkenliği vardır. Pürüzsüz yüzey işlemine sahip, oksijensiz bir alaşımdan yapılan bileşen, vakumlu ortamlarda kullanıma uygundur. Ayrıca

sistemin yüksek saflıkta bir vakum gerektirmesi durumunda oksijensiz bakır yüzeyler altın, krom, nikel gibi metallerle kaplanabilir (Panitz, 1998).

Oksijensiz bakır alaşımları (UNS Num. C10100-C10800), 10 ppm (milyonda bir kısım) oksijen ve minimum %0,01 diğer elementlerden oluşan alaşımlardır. Bu alaşımların üretim ortamı diğer bakır alaşımlarından farklıdır. Malzemenin eritilip bir kalıba dökülmesiyle oluşturulurlar ve nihai ürüne oksijen girmemesi sağlanır. Oksijensiz alaşımların kimyasal bileşimlerinde anti-oksit (baskılayıcı) bir element bulunmaz bu da yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında alaşımların içine oksijenin girebileceği anlamına gelir. Oksijen içeren alaşımlar, bakır alaşımlarının kaynaklanması ve lehimlenmesi gibi yüksek sıcaklıktaki işlemlerde zorluklara neden olabilir. Oksijensiz bakır alaşımları, oksijen ihtiva eden bakır alaşımlarına benzer mekanik davranışlar sergileyebilmektedir fakat mikro yapıları incelendiğinde daha düzgün bir yapı gözlenmektedir. Ayrıca, oksijensiz bakır mükemmel bir esnekliğe sahiptir ve kaynaklama ve sert lehimleme yetenekleri diğer bakır alaşımlarınıninkini geride bırakır. Mükemmel elektriksel özelliklere sahip oksijensiz alaşımlara Ag katılarak sıcaklık direnci artırılabilir ve elektriksel iletkenlik ile bağlanma yeteneği korunabilir. Ayrıca, Ag eklenmesi malzemenin deformasyona karşı direncini artırır ve bu alaşımdan üretilen bileşenlerin ömrünü uzatır (Kalender, 2023).

Farklı türlere sahip oksijensiz Cu alaşım örnekleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir (Url-3, 2024).

Tablo 2.2. Oksijensiz bakır alaşımları

Malzeme	% O (Maks.)	Alaşım Elementi	% Cu	Termal İletkenlik (W/mK)	Elektriksel İletkenlik (MS/m)	Elektriksel Direnc (nΩm)
Cu-OF	0,05	-	99,95	395	58,4	17,6
Cu-OFE	0,0005	-	99,995	399	58,6	17,02
Cu-OF-OK	0,0005	-	99,99	399	58,6	17,24
CuAg.0.1-OF	0,0010	Ag 0.1	99,98Cu+Ag	395	57,7	17,33

2.6. Bakır Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları

Daha yüksek sertliğe, dayanıklılığa ve aşınma direncine sahip seramikler genellikle metal matrisli kompozitlerde kullanılır. Metal matrisli kompozitlerde ağırlıklı olarak üç gruba ayrılan gelişmiş teknolojik seramikler kullanılır. Bunlar oksitler, karbürler ve nitrürlerdir (Soy, 2009). SiC, Al₂O₃, grafit, TiC ve B₄C takviye malzemesi olarak yaygın kullanılan gelişmiş seramik örneklerdir. Tablo 2.3’de çeşitli takviye malzemelerinin genel özellikleri verilmektedir (Toptan, 2006).

Tablo 2.3. Seramik takviye elemanlarının genel özellikleri

Takviye Malz.	Ergime Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (x10 ³ kgm ⁻³)	Mukavemet (MPa)	Isıl Gen. Katsayısı (x10 ⁻⁶ C ^{o-1})	Elektriksel Direnç (Ohm-cm)	Elastiklik Modülü (GPa)
B ₄ C	2420	2,52	2759 (24 °C)	6,08	10	448 (24 °C)
Al ₂ O ₃	2100	3,98	221 (1090 °C)	7,92	10 ¹⁴	379 (1090 °C)
SiO ₂	1710	2,66		<1,08	10 ²²	73
AlN	2375	3,26	2069 (24 °C)	4,84	10 ¹⁴	310 (1090 °C)
SiC	2420	2,52		5,40	10 ⁶	324 (1090 °C)

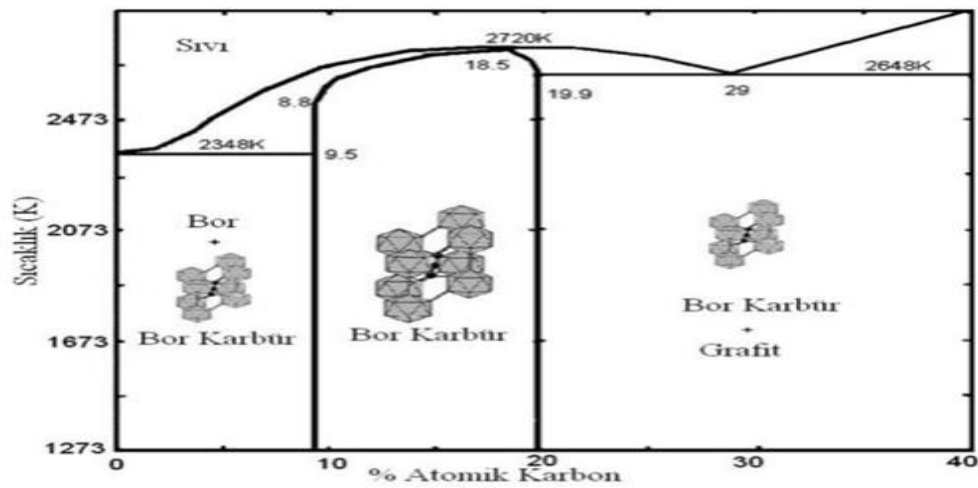
Metal matrisli kompozit malzemelerde en sık kullanılan takviye bileşenlerden biri silisyum karbürdür. Tanecik ve whisker takviye bileşeni olarak kullanılabilir. SiC'nin birincil faydası, yüksek sıcaklıklarda bile özelliklerini koruyabilmesidir (Nazik, 2013). Alümina yüksek teknolojiye sahip seramik çeşitleri arasında kullanım oranı en yüksek olanıdır. Olağanüstü gücü, yüksek erime noktası ve düşük elektrik iletkenliği nedeniyle alümina; refrakterlerde, kesici takımlarda, elektrik yalıtkanlarında, aşınmaya dayanıklı parçalarda ve kompozit malzemelerde uygulama sahası bulmuştur. Onu çok aranan kılan ve öne çıkaran özellikleri; aşınmaya dayanma yeteneği, düşük yoğunluk ve yüksek sıcaklık direncidir ancak 1000°C'yi aşan sıcaklıklara maruz kaldığında malzemenin aşınmaya karşı direnci azalır (Kurt, 2010).

Grafit ve karbon bazlı yapıların esas özelliği olan karbonun fiziksel özellikleri büyük önem taşımaktadır. Yapının adı kompozisyonundaki değişiklikten kaynaklanmaktadır. Kristal yapılarına ve bu yapılardaki hatalarına göre farklı isimler alırlar. Örneğin, grafit

altıgen bir atom düzenine sahipken, elmas dörtgen bir düzene sahiptir. Yaygın olarak anılan karbon tipik olarak kusurlu olduğu düşünülen amorf bir kristal yapıya sahiptir. 1100°C gibi yüksek sıcaklık toleransına, düşük iletken özelliğe ve sağlam bir yapıya sahiptir. Buna karşılık grafit hatasız bir kristal yapıya sahiptir. 3000°C işlem sıcaklığına, yüksek iletken özelliğe, dayanıklı bir yağlama özelliğine sahiptir. Bu özelliklerle yüksek sürtünme ve aşınma direnci için tasarlanan kompozitlerde takviye elemanı görevi görmektedir (Gültekin, 2007).

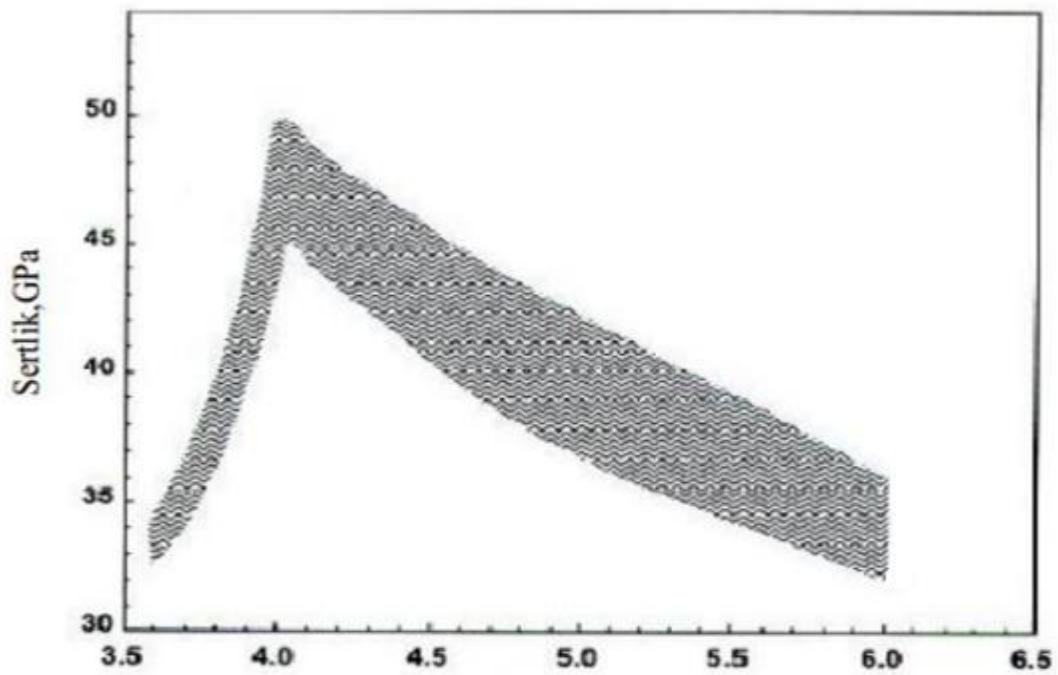
TiC, mekanik özelliklerini yüksek sıcaklıklarda bile muhafaza edebilmesi sebebiyle kompozit malzemelerde takviye bileşeni olarak kullanılır. TiC, yüksek sıcaklıklarda bile gücünü ve sertliğini koruyabilmektedir ve zamanla deformasyona karşı mükemmel direnç göstermektedir. Başlıca dezavantajı yüksek yoğunluğudur. TiC, yüksek yoğunluğundan dolayı kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak yaygın kullanılmamaktadır (Kalaycıoğlu, 2010).

Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra üçüncü en sert malzemedir (Deepa vd., 2011). Bor karbür olağanüstü sertliği, yüksek erime noktası, düşük yoğunluğu, kimyasal direnci ve önemli mekanik özellikleri nedeniyle üst düzey bir yüksek teknolojik malzemedir. Bu önemli özellikler, B₄C'yi hafif zırh ve yüksek sıcaklıklara dayanabilecek malzemelerin üretiminde popüler bir seçim haline getirdi. B₄C çok kararlı bir kimyasal bileşime sahiptir ve bu da onu güvenilir bir bileşik haline getirir. Bu nedenle asit ve bazlarla reaksiyona girmez. Bor karbür dışındaki karbürler ve nitrürler buharlaşınca erimezler ancak bor karbür, diğer karbürlerden ve nitrürlerden farklı özelliklere sahip olup 2450 °C'de eriyip sıvı duruma geçer. Bor karbüre ait ikili denge diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmiştir (Kalaycıoğlu, 2010).



Şekil 2.4. Bor-Karbür ikili denge diyagramı (Uzun, 2011)

Yüksek verimli bor karbür elde etmek için B/C oranının dikkate alınması çok önemlidir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi maksimum sertliğin elde edilebilmesi için B/C oranının 4 olması gerekir. Bu oranın artması sertliğin azalmasına neden olur (Uzun, 2011).



Şekil 2.5. Malzemenin sertliğinin mevcut Bor/Karbür oranına göre değişimi

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

1837 yılında Gize'de keşfedilen çelik incelendiğinde, metal kompozitlerin bilinen en eski kullanımı M.Ö. Çin, Almanya, Tayland, Endonezya, İran, Fransa, İngiltere, Belçika, gibi ülkelerde çeşitli kompozit malzemeler üretilmiştir. Scala, 1950 ile 1960 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde kompozit malzemelere artan ilginin nedenlerini bir araya getirerek bunları üç ana alanda kategorize etti.

- Uzay araştırmaları, havacılık, spor malzemeleri ve elektronik gibi çeşitli endüstrilerde hafif malzemelerin önemi
- Düşük iletkenlik ve esneklik
- Amerika Birleşik Devletleri ekonomisinin büyümesi ve ilerlemesi

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK) üzerine araştırmalar 1950'li ve 1960'lı yıllarda başlamıştır. Bor, SiC vb. 1960-1970 yılları arasında kullanılmıştır. Yüksek mukavemetli elyaflarla güçlendirilmiş kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda ilgi görmektedir. Metal matrisli kompozit malzemeler daha çok otomotiv ve havacılık sektörlerinde tercih edilmektedir (Kalaycıoğlu, 2010).

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de havacılık ve otomotiv sanayisinde kullanılan MMK ve uygulama sahaları gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Havacılıkta kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri (Akın 2006)

Kompozit Malzeme	Kullanım Yerleri	Avantajları
Al-SiC Partikül	Uçak omurga ve iskeleti	Aşınma direnci
Mg-Al ₂ O ₃ fiber	Uçak motorları	Termal kararlılık Sürünmeye karşı direnç
Al-Karbon fiber	Uçak motorları	Termal kararlılık ve sürünmeye karşı direnç
Ti-Al / Karbon fiber	Roket motorları	Termal kararlılık
Al-Ti / Be	Helikopter pervane şaftı	Mukavemet
Al-Ti-V Bor fiber	Türbin kanatları	Yüksek mukavemet, sürünme direnci
Ti / Mo fiberler	Set üstü uçak roketi fırlatıcısı	Yüksek servis sıcaklığı
Ti-Al / SiC	Turbojet motor aksamaları	Yüksek mukavemet, sürtünme direnci sürünme direnci

Tablo 3.2. Otomotiv sanayisinde kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri (Akın 2006)

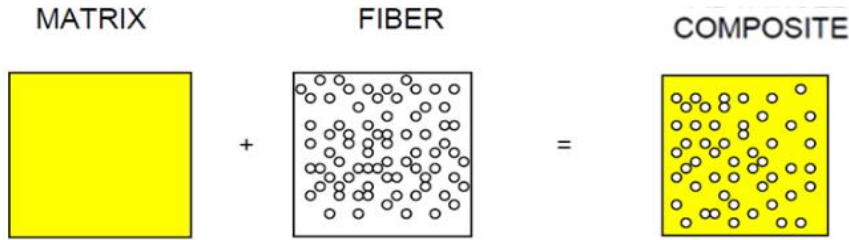
Kompozit Malzemeler	Uygulamalar alanları	Avantajlar
Al-SiC Partikül	Piston, fren balatası, şaftlar	Hafiflik, aşınma direnci
Mg-SiC partikül	Makaralar, motor bloğu	Aşınma direnci ve termal direnç
Al-SiC whisker	Bağlantı rotları	Yüksek spesifik mukavemet ve direnç, düşük genleşme
Al-Al ₂ O ₃ uzun fiber	Bağlantı rotları	Yüksek spesifik mukavemet ve direnç, düşük genleşme
Al-Al ₂ O ₃ kısa fiber	Piston halkası, yanma odası	Aşınma direnci, yüksek servis sıcaklığı
Al-TiC	Silindir, rulman	Düşük aşınma ve hafiflik
Cu-Grafit	Elektrik Malzemeleri	Düşük sürtünme ve aşınma, düşük genleşme katsayısı
Al-Al ₂ O ₃ -C fiber	Motor bloğu	Hafiflik, yüksek mukavemet ve aşınma direnci

Teknolojik ve endüstriyel ilerlemeler, olağanüstü özelliklere sahip malzemelere olan talebi artırmış, benzersiz ve üstün özelliklere sahip yeni ürünlerin yaratılması konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmasına yol açmıştır. Bu çalışmalar sonucunda kompozit malzemeler oluşturuldu. Yüksek direnç, düşük ısı genleşme katsayısı gibi olağanüstü niteliklere sahip malzemeler, kompozit malzemelerin yaygın şekilde kullanılmasına yol açmıştır (Ray and Kannikeswaran 1989). Metal bazlı kompozitler ister katı toz tekniği ister sıvı metal infiltrasyon tekniği yoluyla olsun imalatla oldukça etkilidir. Hafif metaller ve alaşımları kompozit malzemeler için en uygun malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı piyasada yaygın olarak bulunan malzemeler alüminyum, titanyum, magnezyum, nikel, bakır ve çinkodur (Taya and Arsenault 1987).

3.2. Kompozit Malzeme Nedir

Kompozit malzemeler, aynı veya farklı kategorilerdeki iki veya daha çok malzemenin en avantajlı özelliklerinin büyük ölçekte bir araya getirilerek yeni ve bütünleşik bir malzeme oluşturulmasıyla yapılan maddelerdir. En az iki farklı özellikteki malzemenin büyük oranda birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerde her iki bileşen de etkili bir role sahiptir. Daha zorlu ve daha fazla güce sahip olan aşama, güçlendirme aşaması olarak bilinir. Sistemin birincil bileşenine matris aşaması denir (Kurt, 2010).

Takviye aşamasının temel amacı gelen yükü desteklemek ve matrisin sertliğini ve stabilitesini yükseltmektir. Matrisin amacı, donatı elemanlarını bir arada tutmak, donatılara yük ve gerilme aktarımını sağlamak, onları dış ve çevresel etkilerden korumaktır. Takviyelerin çoğu kırılğandır ve hasara karşı hassastır. Şekil 3.1’de kompozit malzemenin yapısı gösterilmiştir (Karadağ, 2017).



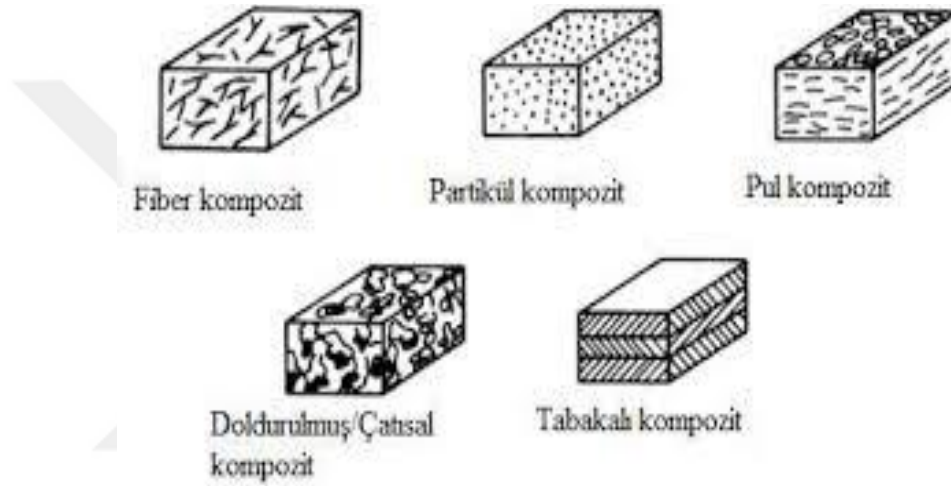
Şekil 3.1. Kompozit malzemenin yapısı (Url-4, 2024)

İki farklı fazdan oluşan malzemelerin tümü kompozit malzeme olarak sınıflandırılmaz. Herhangi bir malzemenin kompozit malzeme grubuna girip girmediğini belirlemek için aşağıdaki faktörler dikkate alınabilir (Kurt, 2010).

- Bileşenleri, kimyasal olarak farklı en az iki malzemenin bir ara yüzeyle ayrılabilen kombinasyonu olmalıdır
- İnsan yapımı olmalıdır
- Kompozit oluşturmak için çeşitli malzemeler üç boyutta birleştirilmelidir
- Kompozitin belirlenen özellikleri onu oluşturan elementlerin hiçbirine tek başına bağlı olmamalıdır

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler farklı tiplere ayrılabilir. Malzemelerin kombinasyonu (metal-organik veya metal-inorganik), bileşen fazlarının özellikleri (matriks sistemler), bileşenlerin dağılımı (sürekli veya süreksiz) ve hizmet ettikleri işlevler (elektriksel veya yapısal) gibi faktörleri dikkate alarak sınıflandırmaları genişletebiliriz (Akbulut, 1994). Kompozitlerin yapısal bileşenlerinin şekillerine göre gruplandırılması Şekil 3.2'deki gibidir (Deniz, 2012).



Şekil 3.2. Kompozitlerin yapı bileşenleri

Kompozit malzemeler tipik olarak matrisi oluşturan bileşene göre sınıflandırılır. Bu malzemelere organik matrisli kompozitler (OMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) adı verilmektedir. Organik matrisli kompozitler iki farklı tipte kompozitten oluşur. Birinci tip kompozit malzeme, polimer matrisli kompozitler (PMK) olarak bilinirken, ikinci tip kompozit malzeme, karbon matrisli kompozitler (karbon-karbon kompozitler) olarak anılır (Özorak, 2019).

Kompozit malzemeler matris ve takviye malzemesi olarak kullanılan malzeme türüne göre iki gruba ayrılabilir.

3.3.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, yapımında kullanılan matris malzemesinin çeşidine göre sınıflandırılır. Matris malzemelerinin sınıflandırılmasında kompozitler genellikle üç ana kategoride incelenir. Bunlar; polimer, metal ve seramik matrisli kompozitlerdir (Akbulut, 1994; Ögel, 1997).

3.3.1.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Metallerden ve seramiklerden daha karmaşık olan polimerler genellikle ucuzdur ve işleme sırasında kolaylıkla manipüle edilebilir. Düşük elastite modülüne ve düşük çalışma sıcaklığına sahiptirler. Polimerlerden ve karbon, aramid veya cam gibi takviyelerden yapılan kompozitler çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer kompozitlerin temel amacı çelikle aynı mukavemete sahip, hafif olmaları, yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve uygun maliyetli malzemeler yaratmaktır (Özorak, 2019).

Günümüz dünyasında gelişmiş teknolojik malzemeler diye bahsedildiğinde şüphesiz ki akla gelen ilk sektörler araç ve elektronik sektörleridir. Otomotiv sektöründe plastik malzemeler toplam kullanımın yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır. Tamponlarda polimer kompozitlerin istisnai uygulamaları benzersizdir. Polimer kompozitler, optik fiberlerde, piezoelektrik sistemlerde çok sayıda malzemenin yerini alabilir ve insan bedeniyle uyumlu yapay doku ve organlarda uygulama alanı bulabilirler (Özorak, 2019).

Günümüzde polimer kompozitler, uçaklar ve füzeler gibi maliyete duyarlı endüstrilerden beyaz eşya ve lastik gibi günlük eşyalara kadar çeşitli uygulamalarda bulunabilmektedir. Gelecekte uzay araştırmaları, robotik ve tıp alanlarında polimer kompozitlere daha fazla önem verileceği düşünülüyor. Sonuç olarak polimer kompozitler üzerine araştırmalar büyümeye devam edecektir (Özorak, 2019).

3.3.1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozitlerin kullanımı özellikle son dönemlerde yaygınlaşsa da bu kompozitlerle ilgili bilgiler çok eski dönemlere dayanmaktadır. Son yıllarda metal matrisli kompozitler endüstriyel ve mühendislik uygulamalarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır (Kumar, 1987; Çalın, 2006; Gültekin; 2007).

Metal matris malzemelerinde genel olarak tercih edilen matris, düşük yoğunluğa, mükemmel tokluğa ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metallerin veya alaşımların bir kombinasyonudur. Tipik olarak matris malzemesi alüminyum, magnezyum, titanyum, nikel ve bakır gibi malzemeler seçilirken, takviye elemanı olarak silisyum karbür, alümina, bor karbür ve grafit gibi malzemeler tercih edilir (Özorak, 2019).

Metal matrisli malzemeler, yerine tercih edildikleri malzemelere göre avantajlar sunmaktadır. Bunlardan bazıları; yüksek elastik modüle sahip olmaları, yüksek mukavemete sahip olmaları, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeleri, yüksek elektrik direnci, termal şok direnci, düşük yoğunluk ve yüksek yüzey dayanıklılığı sergilemeleridir. Metal matrisli kompozitler mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinden dolayı 1960'lı yıllardan bu yana uzay ve havacılık endüstrisinde, elektronik endüstrisinde ve otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedirler (Özorak, 2019).

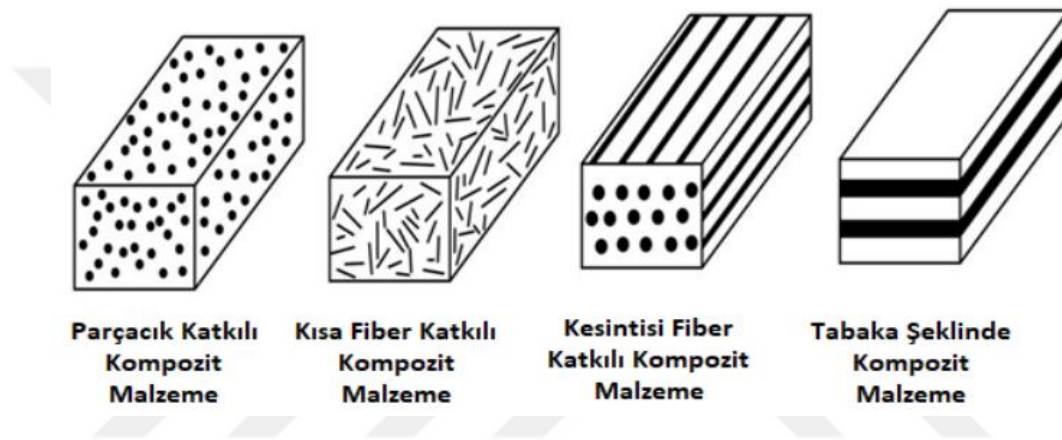
3.3.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler düşük yoğunluğa, mükemmel dayanıklılığa sahiptir ve serttirler ancak oldukça kırılgandırlar. Seramikler mükemmel yalıtkanlardır ve kimyasal ve termal etkilere karşı oldukça dayanıklıdırlar. Ne yazık ki bu malzemelerin yüksek erime sıcaklıkları ve sertlikleri nedeniyle işlenmesi son derece zordur. Kullanımları sırasında ani hasarlara yol açabildikleri için ciddi zarar verme potansiyeline sahiptirler (Özorak, 2019).

3.3.2. Takviye Çeşidine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye türüne bağlı olarak kompozit malzemeler Şekil 3.3'te görüldüğü gibi üç gruba ayrılabilir:

- Fiber Takviyeli kompozitler
- Tabaklı kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler (Kainer, 2006)



Şekil 3.3. Takviye şekline göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Yudar, 2023)

3.3.2.1. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

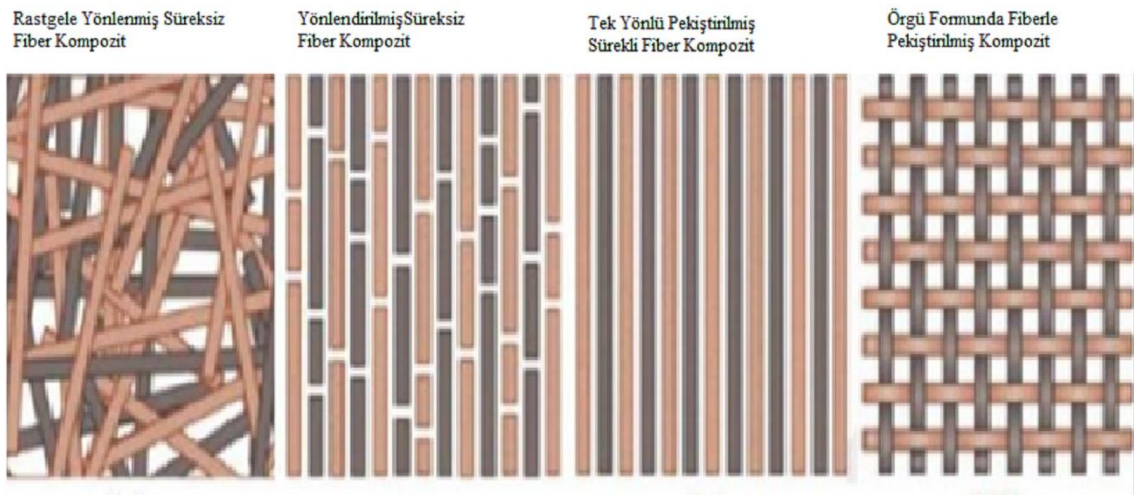
Kompozit malzemelerin imalat tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak parçacık takviyeli kompozit malzemeler giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu kompozitler uygun fiyatları ve etkileyici performanslarıyla özellikle ön plana çıkıyor. Kompozit malzemelerin üretiminde en sık kullanılan takviye malzemeleri alümina ve silisyum karbürdür (Özorak, 2019).

Takviye parçacıkları, küresel, kübik, düzgün veya farklı geometrik yapılarının olmalarının yanı sıra, kompozit malzeme içinde gelişigüzel veya yönlendirilmiş olabilir. Yönlendirilmiş parçacık takviyesi kullanılarak, belirli gerilimlere karşı koymak için takviye belirli bir yönde uygulanabilir (Kalaycıoğlu, 2010).

3.3.2.2. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler sünek matris malzemesiyle karıştırılarak daha güçlü ve dayanıklı bir ürün oluşturulur. Olağanüstü mukavemet ve elastikiyete sahip liflerin birleştirilmesiyle oluşturulurlar. Mukavemetin çok önemli olduğu durumlarda yaygın olarak kullanılan fiberlerde, matris malzemesi kompozit üzerine binen yükü fiberlere dağıtır. Yüksek mukavemetli fiber kullanılarak bu sayede yük etkili bir şekilde dağıtılabilir.

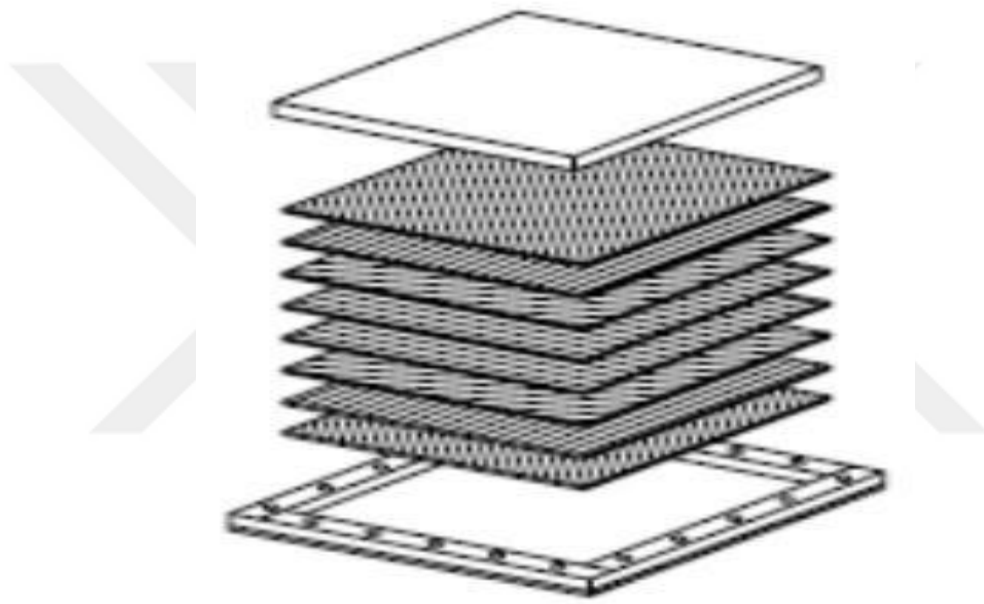
Lifler, kompozit malzeme içinde tek bir yönde veya belirli bir yönde düzenlenebilir. Lifler tipik olarak malzemeye uygulanacak kuvvetlerin yönünde düzenlenir ayrıca örme yapıların oluşturulmasında da liflerden yararlanılmaktadır. Özellikle uzay ve havacılık sanayilerinde ihtiyaç duyulan mukavemet, sertlik ve hafiflik gibi özellikleri bulunduran fiber takviyeli kompozitler, bu sektörlerin en çok tercih edilen malzeme grubu haline gelmiştir (Kalaycıoğlu, 2010). Şekil 3.4'te farklı yapı ve şekillere sahip fiber kompozit malzemelerin morfolojileri gösterilmiştir (Url-5, 2024).



Şekil 3.4. Farklı yapı ve şekillere sahip fiber kompozit malzemeler

3.3.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Farklı özelliklere sahip birden fazla katmanın bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler; tasarlanan katmanların dizilişine bağlı olarak aşınma direnci, korozyon direnci, yük taşıma kapasitesi gibi özelliklerin gerekli olduğu bölgelerde kullanılabilir. Katmanlar çeşitli malzemelerden oluşabileceği gibi kompozit malzemeler de farklı tip ve şekillerde donatı içerebilir. Şekil 3.5'te Tabakalı kompozit örneği gösterilmiştir (Kalaycıoğlu, 2010).



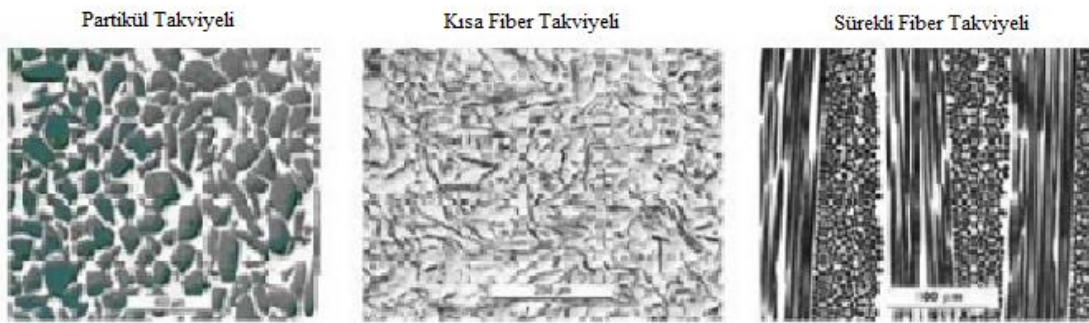
Şekil 3.5. Tabakalı kompozit örneği

Tabakalı kompozit malzemeler, özel ihtiyaçlara ve uygulamalara uyacak çeşitli şekillerde özelleştirilebilir. Malzemeler askeri teçhizat ve hafif zırh gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Kalaycıoğlu, 2010).

4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozit malzemeler; istenilen ve temel özellikleri elde etmek için en az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla farklı maddenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yenilikçi malzemelerdir. Metal matrisli kompozit malzemeler; bir metal matris içine gömülü sürekli fiberler, kısa fiberler, kıllar veya parçacıklar olabilen bir takviye fazından oluşur. Bileşenlerin bu kombinasyonu, malzemenin özelliklerini tek bileşenli alaşımlarla elde edilebilen özellikleri aşarak geliştirir. Günümüz teknolojisi kullanılarak üretilen metal matrisli kompozit malzemeler Şekil 4.1’de görüldüğü gibi üç ayrı gruba ayrılmaktadır (Kalaycıoğlu, 2010).

- Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler; parçacık şeklinde takviye malzemelerinin bağlayıcı matrise dahil edilmesiyle oluşturulur, bu da elastiklik modülünde ve mukavemetinde belirli bir dereceye kadar artışa yol açar
- Kısa fiber takviyeli metal matrisli kompozitler; parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlere göre yük aktarma kapasitesi daha fazladır, takviye için kullanılan metal yüksek mukavemete sahiptir ve kısa liflerden oluşurlar
- Sürekli fiber bazlı metal matrisli kompozitler fiberin tüm yüksek performans özelliklerine sahiptirler



Şekil 4.1. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler (Kalaycıoğlu, 2010)

Bahsedilen kompozit sistemlerin her birinin kendine özgü avantajları ve zayıflıkları vardır. Örneğin, parçacıklardan yapılan metal matrisli kompozitler sertlikte önemli gelişmeler ve neredeyse tekdüze özellikler sergilerken aynı zamanda uygun maliyetlidir. Ne yazık ki mukavemetteki artış anlamlı değildir. Ayrıca kopma deformasyonunun düşük olması ve kırılma tokluğu bu kompozitlerin dezavantajlarından. Whisker veya kısa fiberler içeren fiber takviyeli metal matrisli kompozitler, parçacıklardan yapılanlara göre daha pahalıdır ancak daha dayanıklıdır. Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler, elastikiyet modülü ve mukavemet arasında ideal dengeyi sunsa da özellikleri anizotropiktir ve birincil dezavantajları, yüksek fiber içeriğin ve üretim masraflarının pahalı olmasından kaynaklanmaktadır (Cöcen ve Önel, 1996).

Arttırılmış aşınma direnci ve mukavemet, takviye elemanı bulundurması nedeniyle metal matrisli kompozitin sağladığı maksimum mekanik özellikler avantajları arasındadır. Bununla birlikte çoğu seramik takviyenin düşük sünekliği ve tokluğu nedeniyle MMK'lerin sünekliği ve kırılma tokluğu genellikle takviyesi olmayan matris alaşımlı malzemelerden daha azdır. Bu yönleri herhangi bir yükü karşılayan yapısal uygulama için gereklidir. Sonuç olarak, MMK uygulamalarında artan süneklik ve kırılma tokluğuna sahip matris alaşımlarının arandığı açıktır (Pandey, 2001).

MMK'ler havacılık, otomotiv, petrokimya, biyomedikal ve diğer birçok endüstriyel uygulama dahil olmak üzere çok sayıda endüstriyel sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemeleri hazırlamak için kullanılan yöntemlerin kompozit özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Kompozitlerin özellikleri, takviyenin türü ve düzeni, bileşenlerin kimyasal bileşimi, parçacık boyutlarının şekli ve dağılımı, parçacıklar ile ara yüzeyleri arasındaki etkileşim gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. MMK'ler sürekli bir metal matristen ve seramik veya metalik parçacıklar olabilen bir takviye fazından oluşur. MMK'lerin amacı metalik malzemelerin arzu edilen özelliklerini ikinci faz (takviye) ile birleştirmektir. MMK'ler, aşırı sıcaklıklara ve yapısal yüklere dayanma konusunda en etkili malzemeler olarak geniş çapta kabul edilmektedir. MMK'ler, takviyesiz alaşımlara kıyasla daha yüksek çekme mukavemetine, sertliğe, young modülüne ve daha iyi aşınma direncine sahip olduğundan yüksek sıcaklıklarda üstün performans sergilerler (Ehbil Kriewah, 2022).

Belirli bir uygulamada en uygun kompozitin seçimini sağlamak için metal matrisli kompozitin bileşenleriyle ilgili kapsamlı ve kesin bilgi edinmek çok önemlidir. Takviye elemanının türü, boyutu, yüzey özellikleri, şekli, dağılımı, kimyasal bileşimi, dağılım miktarı ve homojenliği gibi ayırt edici ve yapısal özellikleri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca metal matrisin özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Matris, takviye fazını sağlam tutmak için bir bağlayıcı madde görevi görür ve temel amacı yükü bir sonraki faza aktarmaktır. Takviye fazı ile matris arasındaki uyumluluk, kompozit malzemenin kimyasal uyumluluğu için dikkate alınması gereken çok önemli bir faktördür (Kök, 2001; Akoral vd., 2002).

Sürekli fiberler, yüksek elastik modül ve mukavemet özelliklerini metal matrisli kompozitlere sunar ancak anizotropik özellikler sergilerler. Başlangıçtaki metal matrisli kompozitler bor fiberlerle güçlendirilmiş alüminyum alaşımlarından oluşmaktadır. Bu karışık malzemelere katılan bor elyafları, bor buharının bir tungsten tel yüzeyine biriktirilmesiyle üretilir. Hacimce %51 oranında bor ilavesiyle alüminyum alaşımının çekme mukavemeti ilk başta 310 MPa iken sonrasında 1417 MPa'a, çekme modülü ise ilk başta 69 MPa iken sonrasında 231 MPa'a kadar yükselir. Al-Bor kompozit malzemelerin kullanım alanına uzay mekiğinin gövde kısmında tercih edilen yapı elemanları örnek olarak verilebilir (Cöcen ve Önel, 1996; Smith, 2001).

Metal matrisli kompozit malzemelerin avantajları şunlardır;

- Daha yüksek dayanıklılığa sahiptir
- Spesifik mukavemete sahiptirler
- Daha iyi yorulma dirençleri vardır
- Termal genleşme katsayıları düşüktür
- Spesifik modüle sahiptirler
- Artan sıcaklıklarda mukavemet özelliklerini koruyabilirler

Metal matrisli kompozitlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Nispeten yeni bir teknoloji olması nedeniyle firmalar ve üreticiler arasında deneyim eksikliği bulunmaktadır
- Sürekli elyaf takviyesi kullanıldığında karmaşık ve zorlu üretim süreçleri ortaya çıkar (Döküm hariç)
- Yüksek maliyetli bir üretim sistemi ve ekipmanı bulunmaktadır
- Metallere kıyasla süneklikte belirli bir azalma görülür

Parçacık takviyeli MMK malzemeleri, özellikle döküm yönetimi yoluyla üretilenler sürtünme ve aşınma direncinin çok önemli olduğu sektörlerde kapsamlı endüstriyel uygulamalar bulurlar. Örneğin, grafit ve silisyum karbür pistonlar mükemmel aşınma direnci sunması ve yakıt tüketiminin azaltılmasına yardımcı olması nedeniyle öne çıkar. Bu tür kompozitlerin diğer uygulamaları arasında yatak malzemesi, elektrik kontak malzemesi ve silindir gömleği bulunur (Kalaycıoğlu, 2010).

4.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması

MMK'ler, yapımında kullanılan malzemeye göre çeşitli gruplara ayrılır. En sık kullanılan metal matris yapılarının örnekleri aşağıdadır (Ehbil Kriewah, 2022).

- Magnezyum esaslı kompozit malzemeler
- Bakır esaslı kompozit malzemeler
- Alüminyum esaslı kompozit malzemeler
- Titanyum esaslı kompozit malzemeler
- Süper alaşım esaslı kompozit malzemeler

4.2. Metal Matrisli Kompozitler için Takviyeler

Takviyeler; sürekli elyaflar veya kesikli elyaflar, kıl kristalleri, parçacıklar veya yapraklar gibi süreksiz takviyeler olabilir. Metal matrisli kompozitler sürekli veya süreksiz olabilir fakat her iki takviyenin birleşiminden de oluşabilir. Ayrık takviyeli kompozitlerin sürekli olanlarla karşılaştırıldığında birincil faydası, takviyesiz matris malzemeleri için

kullanılanlara benzer üretim yöntemleri kullanılarak üretilbilmeleri ve bunun sonucunda maliyet tasarrufu sağlamasıdır. Ayrıca, ayrı takviyeli kompozitler daha düşük en boy oranına ve takviyeleri daha gelişigüzel yönelime sahip olduğundan, sürekli olanlarla karşılaştırıldığında daha iyi izotropik özellikler sergilerler (Pandey, 2001).

MMK'lerdeki takviyeler, metalik matrise eklenen kıl kristalleri, fiberler, parçacıklar veya ek fazlardır ve belirli özelliklerde daha fazla güç ve sertlik sağlar. Güçlendirme aşaması matristen daha güçlüdür ve bu sebepten ötürü güçlendirme aşaması olarak anılır. Güçlendirme aşamasının tipik olarak aşağıdaki nitelikleri bulundurması beklenir (Ehbil Kriewah, 2022).

- Yüksek Young modülü
- Düşük özkütle
- Mekanik ve kimyasal bileşenler arasındaki mükemmel uyumluluk
- Mükemmel ısı direnci
- Yüksek Young modülü
- Yüksek sıkıştırma ve çekme mukavemeti

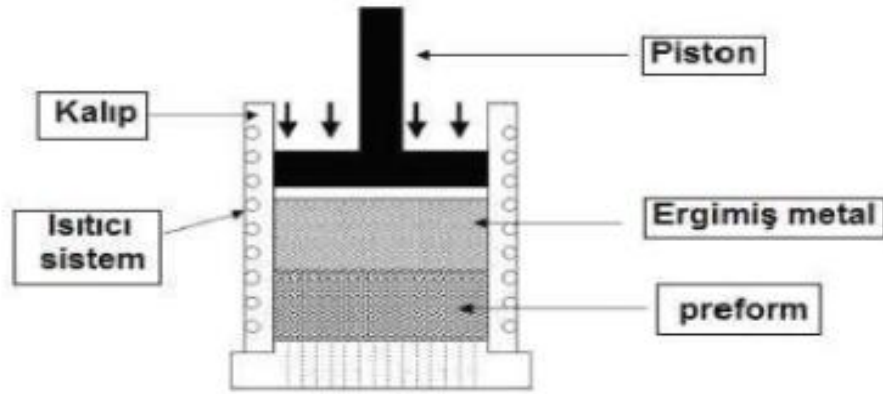
Yukarıdaki özellikleri seramik parçacıklar, karbon fiberler ve karbon nanotüpler gibi metalik olmayan inorganik malzemeler kullanılarak birleştirmek mümkündür. Sürekli hizalanmış fiberler en etkili takviye malzemesidir ve özellikle yüksek performans isteyen uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, sürekli elyaflar tekstil teknolojisi aracılığıyla çeşitli takviye formlarına dönüştürülerek, imalat kolaylığı ve kalınlıkta artırılmış mukavemet gibi spesifik özelliklerin yaratılmasına olanak sağlar. MKK'lerde kullanılan takviye malzemelerinin çoğunluğu hem normal hem de yüksek sıcaklıklarda olağanüstü mukavemet ve sertlik özelliklerine sahip olan oksitler, karbürler ve nitrürler gibi seramiklerdir. MMK takviyelerinin bazı yaygın örnekleri arasında SiC, Al₂O₃, TiB₂, B₄C, CNT'ler ve grafit bulunur (Ehbil Kriewah, 2022).

4.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzeme oluşturmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Kompozit malzemeleri oluşturmak için kullanılan çeşitli teknikler; infiltrasyon yöntemi, vorteks yöntemi, in-situ yöntemi, basınçlı döküm yöntemi ve toz metalurji yöntemi olarak kategorize edilebilir (Karadağ, 2017).

4.3.1. İnfiltrasyon Yöntemi

Şematik olarak Şekil 4.2’de gösterilen infiltrasyon tekniği, basınçlı veya basınçsız olarak uygulanabilir ve çeşitli yöntemlerle yapılabilecek preformların oluşturulmasıyla başlar. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, otomotiv sektöründe ve termal yönetim uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Karadağ, 2017).

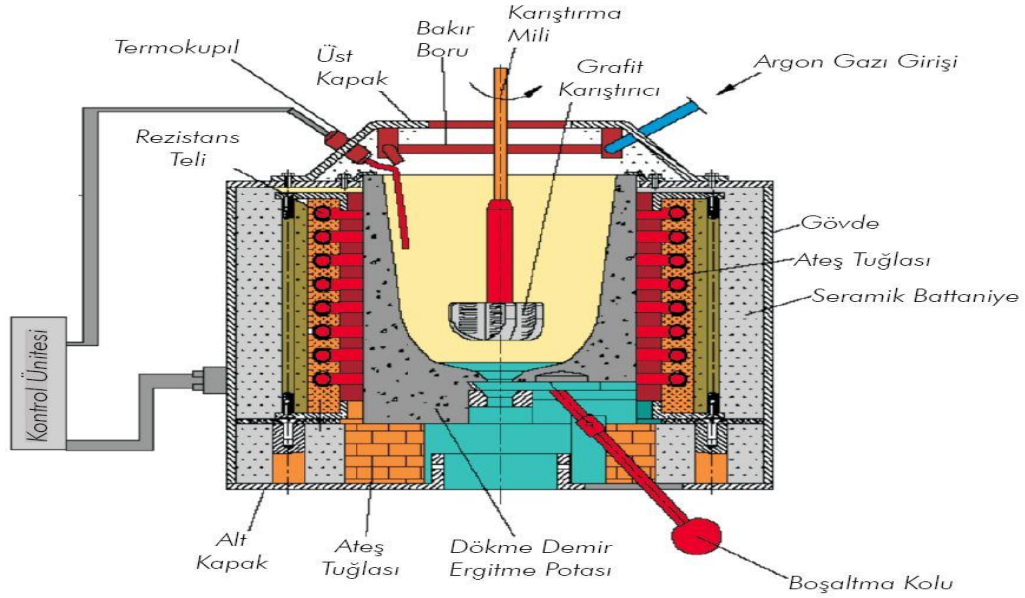


Şekil 4.2. İnfiltrasyon Yönteminin Şematik Gösterimi (Yalçinkaya, 2018)

Bu yöntemin ilgi görmesinin başlıca nedeni seramik takviyeli kompozitleri büyük miktarlarda üretebilmesi, kesin sonuçlar elde edebilmesi, maliyet etkinliği ve uygulama kolaylığıdır (Yao vd., 2015; Qi vd., 2015). Ancak sıvı metal infiltrasyon yöntemi, yüksek seramik içeriğinden dolayı deformasyon veya kırılma direnci gerektiren malzemelerde kullanımı uygun değildir (Karadağ, 2017).

4.3.2. Vorteks (Girdap) Yöntemi

Sıvı fazlı imalat yöntemlerinin seçilmesinin ardındaki asıl motivasyon, maliyet etkinliği ve amaçlanan nihai formuna çok yakın parçalar üretme yeteneğidir. Bunun tersine, sıvı fazlı imalat yöntemlerinde, seramik parçacıklarının sıvı metalce yeterince ısıtılmaması ve parçacıkların düşük yoğunlukları nedeniyle sıvı metal yüzeyinde yüzmesi gibi önemli zorluklar ortaya çıkar. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için kullanılan tekniklerden biri de girdap metodudur. Eşit dağılım elde etmek için sıvı metal bir girdap oluşturacak şekilde birleştirilir ve bu girdaba seramik parçacıkları eklenir. Daha sonra girdap oluşturularak eşit bir şekilde dağılan sıvı metal kalıba dökülür ve şekil olarak son haline yakın ürün elde edilir (Altuner, 2011). Şekil 4.3'te vorteks yöntemi gösterilmiştir (Url-6, 2024).



Şekil 4.3. Vorteks Yöntemi

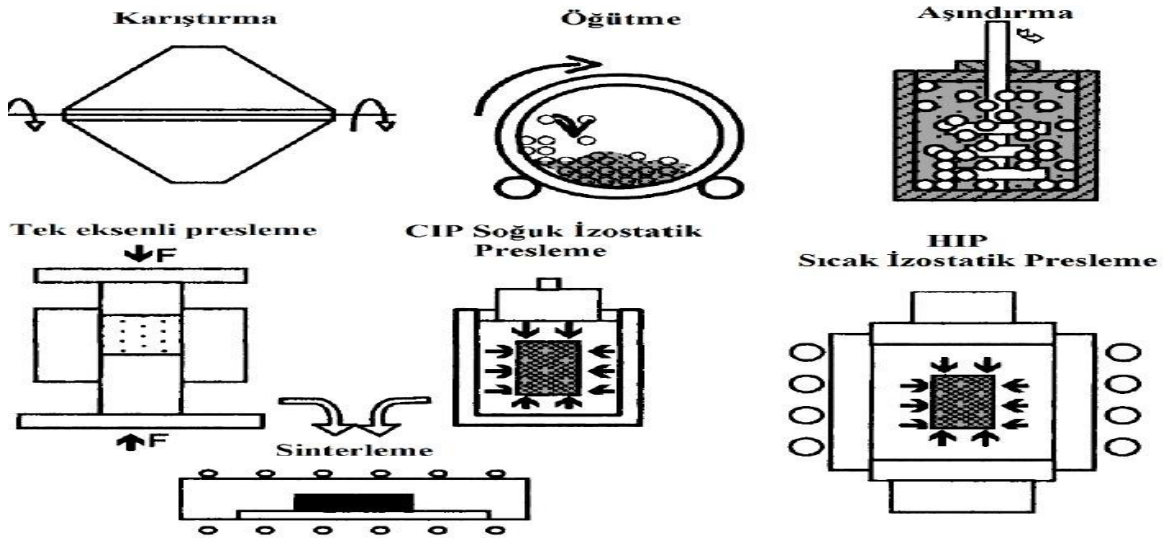
4.3.3. In-Situ Yöntemi

İn-situ yöntemde takviye fazı, matris fazında meydana gelen kimyasal reaksiyonlarla oluşturulur. Bu yöntemin en önemli faydası, diğer sıvı fazlı üretim yöntemlerinde sıklıkla karşılaşılan ıslanabilirlik sorunu ve matris ile takviye fazlar arasındaki uyumsuzluk sorunuyla karşı karşıya kalınmamasıdır. Yöntem; yüksek sıcaklıklarda oldukça stabil olan,

düzgün dağılıma sahip, düşük yatırım ve üretim maliyeti gerektiren, çeşitli uygulamalarda avantaj sağlayan küçük boyutlu ve tek kristalli takviye parçacıkları üretme avantajı sunmaktadır. Ayrıca bu yöntemin elde edilmesinde takviye fazıyla ilgili bazı termodinamik kısıtlamalar vardır ve bu da bir dezavantaj olarak kabul edilebilir (Chung, 2010).

4.3.4 Toz Metalurjisi Yöntemi

Metal matrisli kompozitler çeşitli teknikler kullanılarak üretilebilmektedir. Sıvı fazda ve katı fazda üretim yöntemleri olarak geniş bir kategoriye ayrılabilen bu üretim yöntemleri arasında, sıvı fazda üretim yöntemlerinde, homojen parçacık dağılımının sağlanmasının zorluğu ve yüksek sıcaklıklardan dolayı ara yüzeyde kimyasal reaksiyonların meydana gelmesi gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Toz metalurjisi tekniği kullanılarak bu sorunlar azaltılabilir (Moustafa, 2002). Şekil 4.4'te toz metalürji üretim prosesi gösterilmiştir (Url-7, 2024).



Şekil 4.4. Toz metalürji yöntemi üretim prosesi

5. TOZ METALURJİSİ

5.1. Toz Metalurjisi Nedir

Toz Metalurjisi (T/M) binlerce yıldır bilinen bir üretim yöntemidir. Son yıllarda teknolojiye gelişmeler bu yöntemde de önemli ilerlemelere yol açmıştır. Bu teknik; otomotiv, elektrik ve elektronik, uzay araştırmaları, kimya ve tarım dahil olmak üzere çeşitli endüstriler için gerekli olan temel bileşenleri oluşturmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. T/M yönteminin birincil avantajı, nihai ürünün tek bir adımda tamamlanmasına olanak sağlamasıdır (Yalçın, 2018).

Tipik olarak çok sayıda küçük toz parçacığının bir araya toplanmasıyla uygun maliyetli üretimi kolaylaştırır. Üretilen bu bileşenlerin ölçümlerindeki doğruluk, istenen özelliklerle uyumludur. Çeşitli metal işleme teknolojileri arasında toz metalurjisi, imalat sürecinde sağladığı geniş seçenek yelpazesi sayesinde kapsamlı üretim ve şekillendirme aşamaları ile öne çıkmaktadır. Toz metalurjisini diğer tekniklerden ayıran ve üstün kılan temel faktör, karmaşık şekillere sahip parçalar üretebilme yeteneği, olağanüstü kalite ve minimum malzeme israfıdır (Kurbanoglu vd., 2001). Şekil 5.1’de T/M ile imal edilmiş bazı ürünler gösterilmiştir (Url-8, 2024).

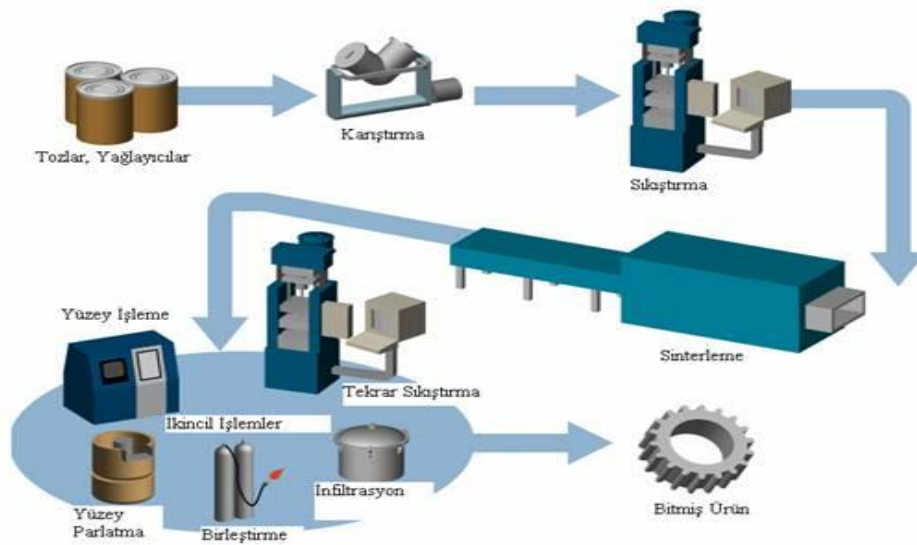


Şekil 5.1. T/M ile imal edilmiş bazı ürünler

T/M yöntemi kısımları;

- Toz üretimi
- Üretilen tozların karıştırılması
- Tozların sıkıştırılması
- Sinterleme
- İsteğe bağlı yağ emdirme ve infiltrasyondur.

Uygulamada kullanılan tozlar 1 mm'den küçük parçacıklardan oluşmakta ve mekanik, kimyasal, elektroliz veya atomizasyon gibi teknikler kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu parçacıklar daha sonra istenen karışımı oluşturmak için doğru oranlarda karıştırılır. Sıkıştırma işlemi; istenilen metal kalıba yerleştirilen tozların metal zımbalar kullanılarak sıkıştırılmasını içerir. Bu işlem sırasında maksimum 981 MPa civarı basınç uygulanabilmektedir (Doğan, 2022). Şekil 5.2’de T/M yöntemi kullanılarak parça üretim prosesi gösterilmiştir (Url-9, 2024).



Şekil 5.2. T/M yöntemi kullanılarak parça üretim prosesi

Sinterleme işlemi, fırında erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir ve parçacıkların temas ettiğinde birbirine bağlanması sağlanır. Yağ emdirme işlemi gözeneklerin doldurulmasını içerirken, infiltrasyon işlemi gözeneklerin erimiş metalle doldurulmasını içerir. Sinterleme işleminden sonra T/M yöntemiyle üretilen parçaların

mekanik özelliklerini, aşınma ve korozyona karşı dirençlerini arttırmak amacıyla çeşitli mekanik ve ısıt işlemler yapılmaktadır (Doğan, 2022).

5.2. Toz Metalurjisinin Başlıca Avantaj ve Dezavantajları

Diğer üretim yöntemleri kullanılarak yapılan parçalarla karşılaştırıldığında, T/M tekniğiyle üretilen parçalar genellikle daha pürüzsüz yüzeylere sahiptir ve hiçbir ek işleme gerek yoktur. Buradan yola çıkarak parçanın daha uygun maliyetli ve tercih edilebilir bir biçimde üretilmesi, üretimi ve işlenmesi zor olan parçaların başka teknikler kullanılarak üretilmesine de olanak sağlar. Uygulanan basıncı ayarlayarak parçaların üretiminde daha yüksek düzeyde hassasiyet ve netlik elde edilebilir (Gündüz vd., 2016).

Avantajları;

- Karmaşık şekilli malzemelerin üretiminde önemli bir konuma sahiptir
- Büyük ölçekli üretim için oldukça faydalıdır
- Maliyet diğer üretim yöntemlere göre daha kârlıdır
- Üretim yapılırken malzeme kayıpları daha azdır
- Arzu edilen esneklik, yoğunluk, gözeneklilik, sertlik ve iletkenlik gibi spesifik özellikte mamül imal etme imkânı verir
- Klasik döküm yöntemiyle üretimi yapılamayan parçaları üretme fırsatı sağlar
- T/M yöntemi kullanılarak üretilen parçalar, dökme demir ve haddelenmiş demirin mekanik özelliklerine eşit veya zaman zaman onlardan daha üstün mekanik özelliklere sahiptir (Çelik ve Türker, 2005)

Dezavantajları ;

- Seri üretim yapılmadığı takdirde üretimi oldukça maliyetlidir
- Metal tozların bazıları pahalıdır
- Tozların kalıp içindeki hareketi sınırlıdır. Sonuç olarak, üretilecek bileşenin şekli bir kısıtlama oluşturabilir.
- Büyük çaptaki ağır malzemelerin üretimi için uygun bir yöntem değildir
- Üretilen ürünün her birim hacmi için özkütle, gözeneklilik ve sertlik gibi spesifik özellikleri aynı olmayabilir (Öztürk ve İçin, 2015).

5.3. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları

Toz metalurjisi çeşitli endüstrilerde ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektörü haricinde tercih edildiği bazı alanlar şunlardır;

- Ortopedik cihazlarda
- Tungsten lamba filamentlerinde
- Yataklarda
- Dişli çarklarda
- Dişçilikte
- Elektrik malzemelerinde
- Devre plakalarında
- Uçak frenlerinde
- Nükleer güç santrallerinde
- Jet motor parçalarında
- Kaynak elektrotlarında
- Yüksek sıcaklık filtrelerinde
- Katalizörlerde (Ataş, 2003)

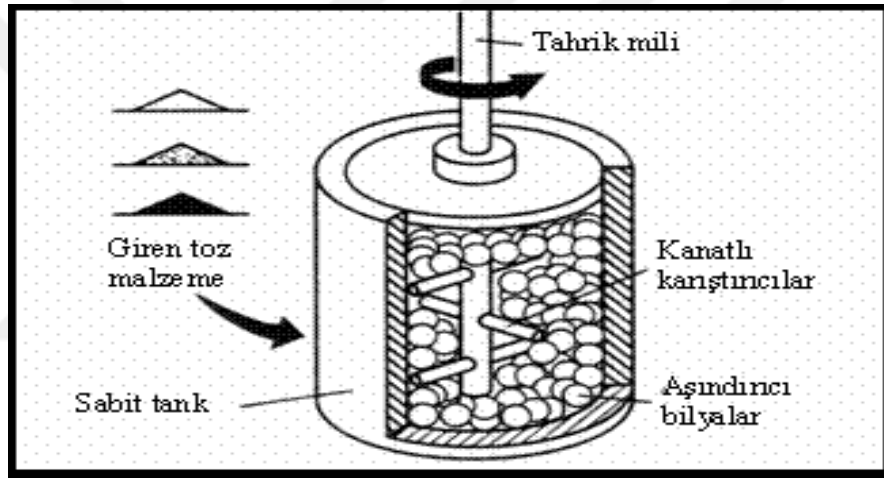
5.4. Toz Metalurji Yönteminin Aşamaları

5.4.1. Tozların Üretimi

Tozların şekillendirilmesi aşamasında tozların yoğunluğunun görünür yoğunlukla aynı olduğu kabul edilmektedir. Toz malzemelere daha fazla basınç uygulanarak toz parçacıkları arasındaki nokta teması bozulur, bu da basınç miktarı arttıkça gözenekliliğin azalmasına neden olur. Basınç arttıkça plastik deformasyon ve yoğunluk da artar (Kalaycıoğlu, 2010).

5.4.1.1 Mekanik Yöntemler

Bu yöntem kesme, darbe, basma ve aşındırarak öğütme olmak üzere dört kategoride incelenir. Kesme, talaşlı imalatla yaygın olarak kullanılan, parçaları malzemeden ayırma işlemidir. Darbe, malzemeyi daha küçük parçalara ayıran hızlı ve tekrarlayan bir uygulamadır. Basma, malzemenin kırılma noktasına ulaşmaya kadar şekil değiştirmesi ve basınç kuvvetlerinin uygulanması nedeniyle toza dönüşmesi işlemidir. Aşındırarak öğütme, iki bileşenin hareketinin yarattığı sürtünme yoluyla toz parçacıklarının boyutunun azaltılması yöntemidir (Özaydın, 2015). Şekil 5.3'te mekanik yöntemle toz üretimi gösterilmiştir (Url-10, 2024)

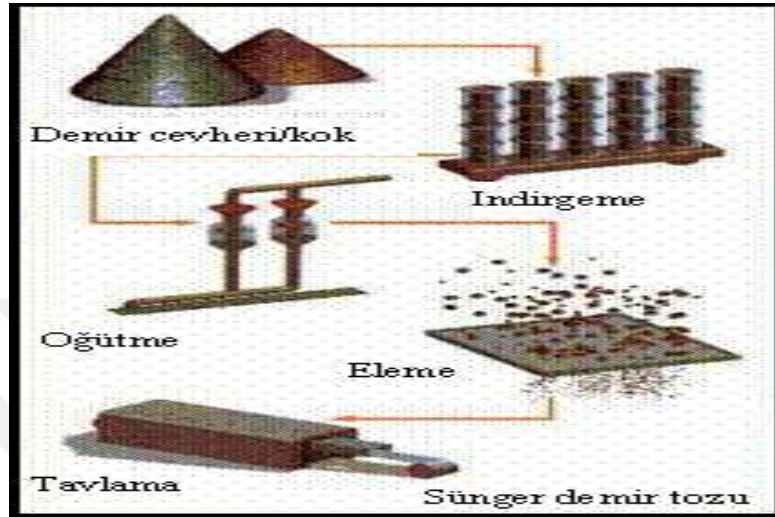


Şekil 5.3. Mekanik yöntemle toz üretimi

5.4.1.2. Kimyasal Yöntemler

Bu teknik genellikle demir tozu üretiminde kullanılır. Şekil 5.4'te gösterilen bu üretim prosesinde, seçilen cevher ince toz haline getirilerek kokla birleştirilir, karışım daha sonra sürekli bir fırına tabi tutulur ve burada indirgeme gerçekleşir sonuçta kek formunda sünger demir elde edilir. Sünger demir ince toz haline getirilir, metalik olmayan malzemeler ayrılır ve eleme yapılır. Toz parçacıklarının kalitesi, kullanılan hammaddelerin saflığına göre belirlenir. Düzensiz şekilli, yumuşak ve kolayca sıkıştırılabilen toz parçacıkları, mükemmel ham mukavemete sahip ürünlerin üretilmesine katkıda bulunur. Benzer şekilde refrakter metaller de oksit bileşiklerinin hidrojenle indirgenmesiyle üretilir (Groover, 2010).

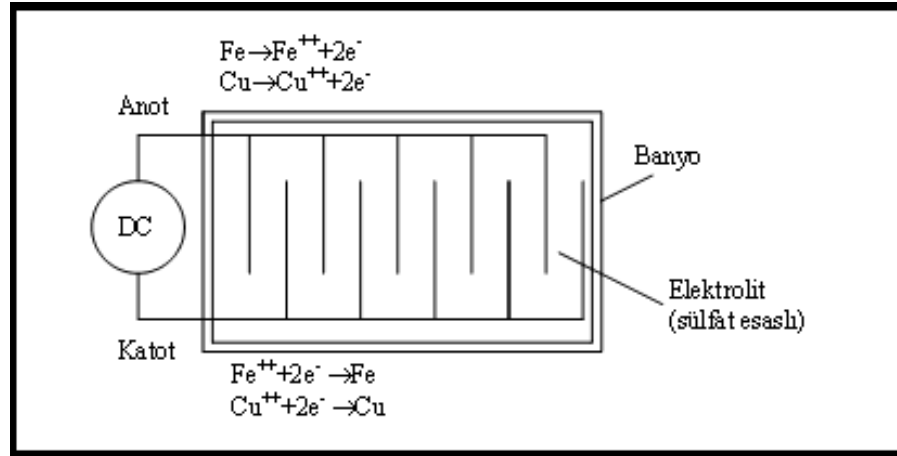
Elektrolitik ve atomizasyon yöntemlerinde tozların kimyasal saflığı tipik olarak daha yüksek olmakla birlikte, kimyasal indirgeme yöntemi istenilen toz boyut ve şekillerinin kolay üretimine olanak sağlar (Özbek vd., 2005).



Şekil 5.4. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi

5.4.1.3. Elektrolizle Üretim Yöntemleri

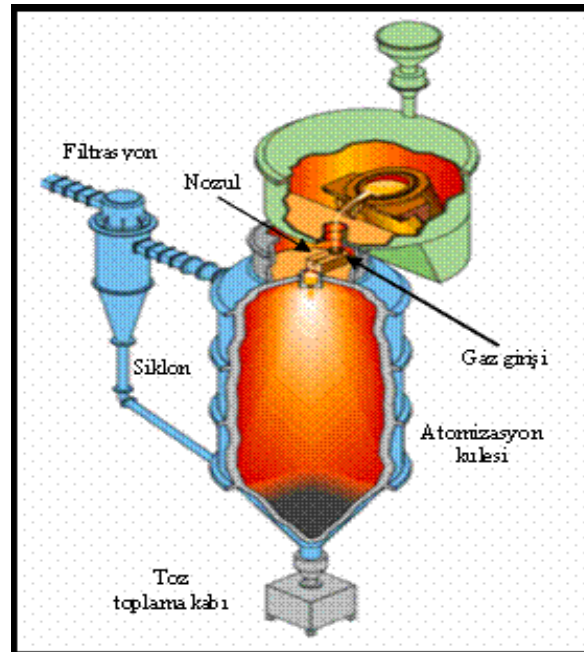
Bu teknikte hücrenin katot çubuğunda metal tozları uygulanabilmektedir. Katot üzerindeki birikintinin saflaştırma işlemi, elektrolitteki konveksiyondan yararlanır. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi çevrim işleminin başlayabilmesi için voltaj uygulanması ve anodun çözünmesi gerekir. Katoda yapışan bu birikintiler uzaklaştırılır, durulanır, kurutulur ve ince bir toz halinde öğütülür. Sonraki aşamada stresi azaltmak ve uçucu maddeleri ortadan kaldırmak için tavlama işlemine tabi tutulur (Özaydın, 2015).



Şekil 5.5. Elektroliz yöntemiyle toz üretimi

5.4.1.4. Atomizasyon Üretim Yöntemi

Bu teknik aynı zamanda yüksek sıcaklıktaki gazla eritilen metal parçacıklarını da kullanır. Eriyiklerin damlacıklara ayrılması prensibine dayanır. Bu damlacıklar donma işlemiyle katı parçacıklara dönüştürülür. Bu teknik genellikle metaller, alaşımlar ve intermetalikler için kullanılır, ancak polimer ve seramik malzemeler için de kullanılabilir. Şekil 5.6'da atomizasyon üretim yöntemi gösterilmiştir (Özaydın, 2015).



Şekil 5.6. Atomizasyon yöntemiyle toz üretimi

5.4.2. Tozların Karıştırılması

Toz üretiminin ardından sonraki adım, tozların harmanlanmasını ve karıştırılmasını içerir. Tozların homojen karıştırılmasında T/M yöntemi, üretilen malzemenin her birim hacminin aynı karakteristik özelliğe sahip olmasını sağlamak açısından çok önemlidir. Harmanlama; aynı kimyasal bileşime sahip ancak farklı parçacık boyutlarına sahip tozların birleştirilmesi sürecini ifade ederken, karıştırma ise farklı kimyasal bileşimlere sahip tozların karıştırılmasını içerir (Groover, 2010).

Toz metalurjisi tekniği kullanılarak kompozit malzemelerin imalatı sırasında alaşımlama, toz parçacıklarının bilyalı değirmende kuvvetli bir şekilde çarpılmasıyla gerçekleşen öğütme işlemidir. Bu işlem, toz parçacıklarının eşit şekilde dağılmasını ve tane boyutunun en aza indirilmesini sağlamak için çok önemlidir (Korucu ve Gürkan, 2019).

5.4.3. Yağlayıcılar

Şekillendirme işlemi sırasında enerji kayıplarını en aza indirmek için tozlara eser miktarda çinko stearat, grafit, stearik asit, stearat, lityum, ve acrawax yağlayıcılar eklenir. Ayrıca presleme işlemi sırasında enerji kayıplarını en aza indirmek ve düzgün basınç dağılımını sağlamak için tozların konumlandırıldığı sıkıştırma kalıbının iç duvarlarında yağlayıcı olarak çinko stearat yağlayıcı kullanılır (Doğan, 2022).

5.4.4. Tozların Preslenmesi

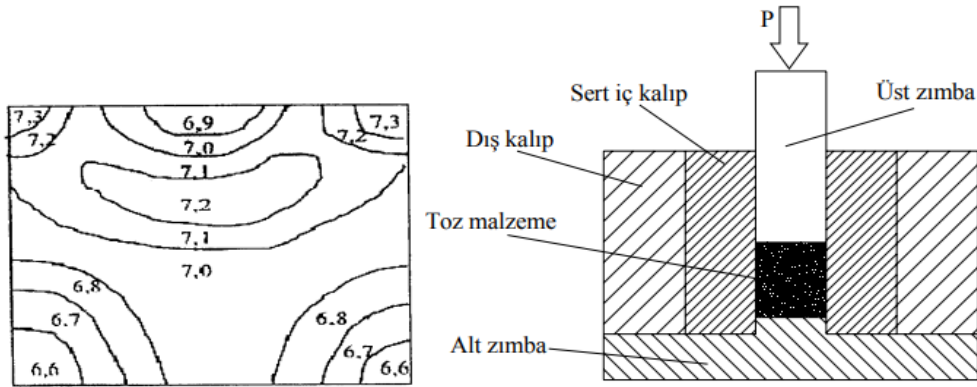
Sıkıştırma işlemi metal zimbalar, üst ve alt ve yağlanmış kalıp duvarları kullanılarak uygun sertlikte bir metal kalıba yerleştirilen tozların sıkıştırılmasını içerir. Bu süreç boyunca her bir elemanın farklı özelliklerinden dolayı farklı seviyelerde basınç uygulanması gerekir. Bu aşamadan sonraki ürüne green kompakt denir (Groover, 2010).

Sıkıştırma ve şekillendirme işlemi, gevşek toz parçacıklarının mukavemetini arttırmak için kullanılır. Tozlarda şekillendirme ve yoğunluk için tercih edilen yöntem kalıp içerisinde sıkıştırma işlemidir. En sık kullanılan teknik, toz parçacığının tek yönlü basınç kullanılarak

bir kalıpta sıkıştırılmasıdır. Küçük ve zorlu bileşenlerin sabitlenmesi güç olduğundan bağlantı elemanları önemlidir (Karabulut, 2011).

5.4.4.1 Tek Yönlü Presleme

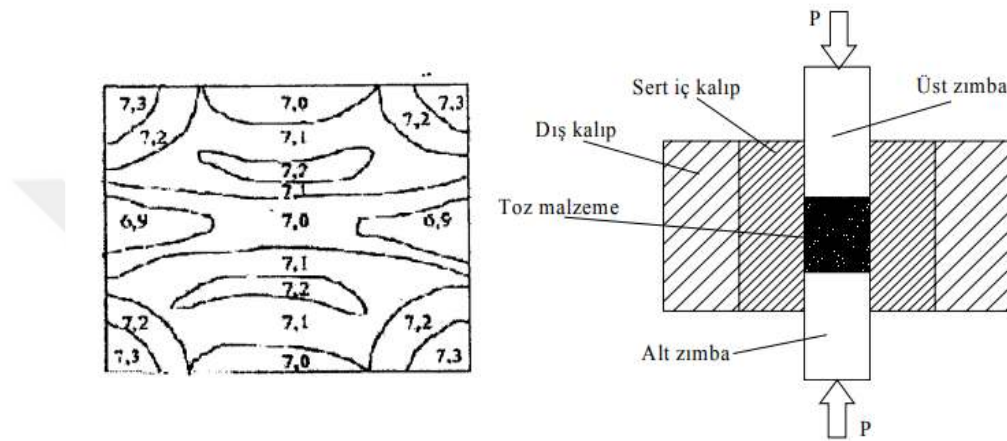
Sıkıştırma işlemi başladığında, tozun deformasyonu, parçacıklar arasında ve kalıp içinde sürtünmenin artmasına neden olur ve bu durum da basıncın eşit olmayan bir şekilde dağılmasına neden olur. Bu düzensizliğin uygulanan basıncın dağılımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Toz parçacıklarının konsantrasyonu, hareketli zımbanın yakınında daha fazla, sabit zımbanın yakınında ise daha düşüktür. Bu miktarların değişimi iş parçasının uzunluk/çap oranından etkilenir. İdeal kalıp malzemesinin uzun ömürlü olması ve toz parçacıklarının kalıp yüzeyine zarar vermesini önlemek için sağlam olması gerekir. Bu nedenle kalıpların dayanıklı metal malzemeler kullanılarak yapılması gerekmektedir. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi tek yönlü sıkıştırmada, ilk aşamada kalıba doldurulan tozun yüksekliği ile çapı (Y/Ç) arasındaki ilişki presleme aşamasından sonraki yoğunluk dağılımının belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar ve bu da genel kaliteyi etkiler. Sonuç olarak limitin $Y/\Ç \leq 4$ olarak ayarlanması önerilmektedir (Ekşi ve Kurt, 1999).



Şekil 5.7. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü (Bahçeci, 2006)

5.4.4.2. Çift Yönlü Presleme

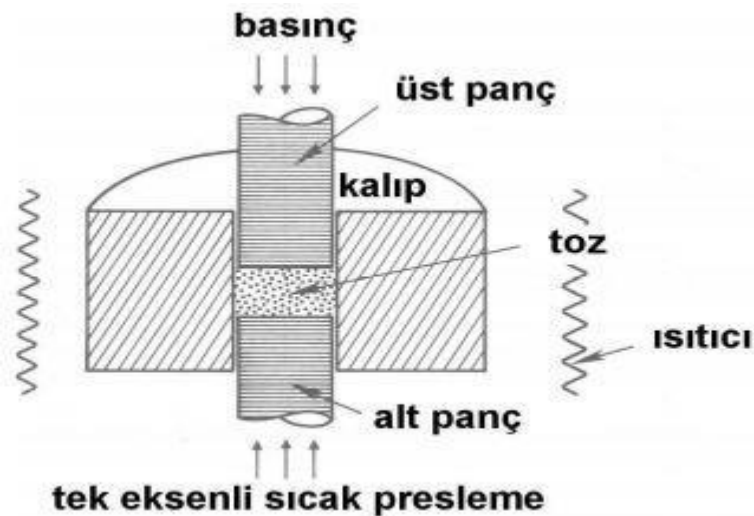
Çift taraflı preslemede toz, biri üstten diğeri alttan olmak üzere iki zımbayla aynı anda sıkıştırılır. Bu süreç boyunca her taraftan eşit baskı uygulanır. Çift taraflı preslemede kalıbın her iki tarafı da düzenli olarak sıkıştırılır. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi yoğunlukların dağılımı daha düzgün hale gelir (Ekşi ve Kurt, 1999).



Şekil 5.8. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı ve kalıp şematik görünümü (Bahçeci, 2006)

5.4.4.3 Sıcak Presleme

Sıcak presleme tekniği, Şekil 5.9’da görüldüğü gibi zımba ve toz parçacıklarına sabit bir kalıp içinde basınç uygulanmasını ve bunların hem aksel hem de iki dik yönde senkronize bir şekilde hareket ettirilmesini içerir (Cura,2002).



Şekil 5.9. Sıcak preslemenin şematik görünümü

Sistemin alt kısmı genellikle sabittir. Hidrolik sistem üst tablaya veya şafta kuvvet ve basınç uygular. Bu yöntemde kalıbı oluşturmak için kullanılan malzeme genellikle yüksek sıcaklıklara dayanıklılık sunan grafitir. Sıcaklık kalıp aracılığıyla veya dikey çubukların yardımıyla belirlenebilir (Cura, 2002).

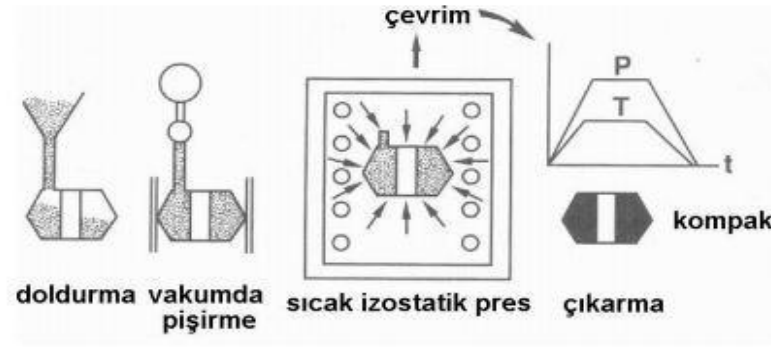
Sıcak presleme işlemi oldukça zorlu ve yoğun emek isteyen, uygulaması ciddi çaba gerektiren bir yöntemdir. Sonuç olarak kalıp mekanizması içindeki sıcaklığı düzenlemek zordur. Sıcak preslemede en yüksek sıcaklık sınırına (2200 °C) bir grafit direnç eklenerek ulaşılabilir. Daha düşük sıcaklıklara dayanabilen molibden, silisyum karbür ve tungsten dirençler grafit dirençlere alternatif olarak kullanılabilir. Elde edilen sıkıştırma miktarı, uygulanan kuvvetin yanı sıra kalıp tasarımı ve üretilen parçaların şekli gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Sinterleme işlemi sırasında genellikle vakum atmosfer ortamının olması tercih edilir. Bunun amacı fırın dirençlerini ve sinterlenen ürünü korumaktır. İstenilen sonuca bağlı olarak sinterleme, koruyucu gazın bulunduğu kontrollü bir ortamda da gerçekleştirilebilir. Kapalı gözenek yapısı uygulandığında vakum gözenekliliği tamamen ortadan kalkar (Cura, 2002).

İmalat işlemi sırasında ortaya çıkan sorunlardan biri, sinterlenmiş malzemenin kalıbın iç yüzeyine yapışmasıdır. Sinterleme işleminin ardından kalıptan çıkan malzemeler veya kalıbın kendisi zarar görebilir. Bu sorunu önlemek için özellikle grafit kalıplarda kalıbın iç yüzeyine altıgen yapıda bor nitrürün uygulanması çok önemlidir. Eklenen bu katmanın istenilen kalınlığı geçmemesi de önemlidir (Cura, 2002).

Sıcak preslemede kalıp masrafı yöntemi pahalı hale getirmektedir. Süreçler vakum ortamında yürütüldüğünde üretimle ilgili masraflar daha da artar. Yüksek maliyetinin yanı sıra sinterlemenin sunduğu faydalar nedeniyle zorlu parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Uzun süre kullanılabilecek kalıp veya takım bileşenleri gibi üretim maliyeti dikkate alınmayan ürünlerin üretimine uygundur. Bu yöntem aynı zamanda kompozit malzemeler oluşturmak için de kullanılabilir. Sıcak preslemenin bir diğer uygulaması ise elmas parçacıkları içeren kompozit parçaların imalatıdır (Cura, 2002).

5.4.4.4 Sıcak İzo-statik Presleme

Sıcak izostatik presleme havacılık ve uzay endüstrilerindeki kalıplar, kesici takım uçları ve bileşenler de dahil olmak üzere, uzun ömürlülüğün önemli olduğu çeşitli üretim sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 5.10’da görüldüğü gibi sıcak izostatik preslemede üretilecek malzemelere gaz kullanılarak eş eksenli olarak basınç uygulanır.



Şekil 5.10. Sıcak izo-statik presleme

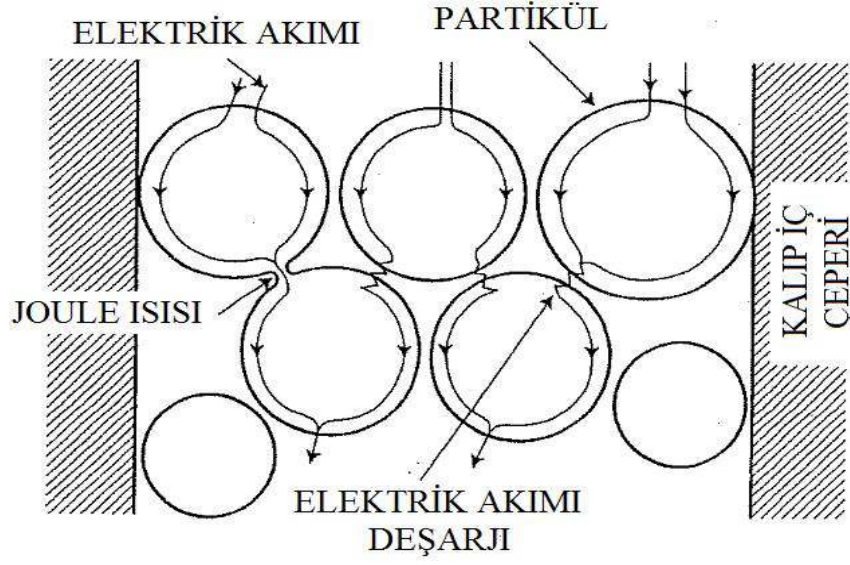
İşlem sırasında uygulanan basınç gaz miktarıyla alakalıdır. Süreci etkileyen temel faktörler sıcaklık, basınç ve zamandır. Malzeme çeşitli yöntemlerle sinterleme işlemine dahil edilebilir. Prosesteki ilk adım, toz veya ön sinterleme işleminin uygulanmasıdır. İkinci adım, malzemeler kapalı gözenekli bir yapıya önceden sinterlendikten sonra sıcak izostatik preslemenin uygulanmasını içerir. Birincil amaç, malzeme yüke dayanabilecek noktaya ulaştığında malzemeye izostatik basınç uygulamaktır. Alternatif diğer bir yaklaşımda metalik tozlar doğrudan cam veya metalden yapılmış kalıplara beslenebilir. Kalıp üretimi için malzeme seçiminde birincil faktör, optimum sinterleme sıcaklığında basıncı iletirken deformasyona dayanma kapasitesidir. Kalıp malzemesi olarak sıklıkla titanyum, çelik, cam, paslanmaz çelik veya tantalyum kullanılır.

Ortamda gaz kalmaması çok önemlidir. Ortamda gaz bulunması nedeniyle sinterlenecek malzemelerde gözenek oluşma riski vardır. Toz içerecek bu sistem, içten ısıtılan cihazın içerisine yerleştirilecektir. Yoğunlaşmanın gerçekleşmesi için gerekli basınç ve ısıyı aktarmak amacıyla yüksek basınçlı bir gaz kullanılır. Tipik olarak hedef için nitrojen veya argon gazı kullanılır. Bu sistemde genellikle maksimum sıcaklığın 2200 °C olduğu sıcaklık ortamı tercih edilir (Cura, 2002).

5.4.4.5. Spark Plazma Sinterleme (SPS)

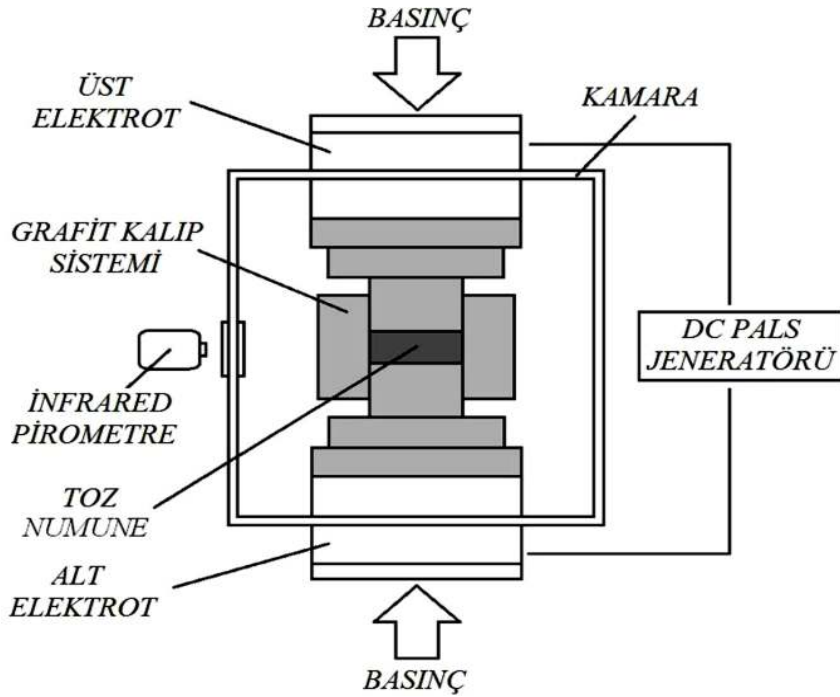
SPS düşük voltajlı, darbeleri doğru akım kullanan, basınç destekli sinterleme ve sentezi birleştiren bir tekniktir. Geleneksel sinterleme tekniklerinden farklı olarak bu yöntem, yüksek yoğunluklu darbeleri elektrik akımının toz malzeme içinden doğrudan geçişini, hızlı bir şekilde ısıtılmasını ve sinterleme işleminin kolaylaştırılmasını içerir (Aydoğmuş, 2024). Sınırlı ısıtma hızlarına sahip sinterleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında SPS yöntemi ön şekillendirmeye ihtiyaç duymaması, ısıtma hızının yüksek olması, sinterleme sıcaklığının düşük olması ve sinterleme süresinin kısa olması gibi çeşitli avantajlar sunar. Verimliliği nedeniyle, tane büyümesine gerek kalmadan kısa sürede teorik yoğunluğa sahip malzemeler elde etmek mümkündür. Sıcak presleme gibi geleneksel sinterleme yöntemlerinde nano boyutlu tozlar sinterlendiğinde, tane büyümesine bağlı olarak malzemedeki tane boyutu mikron seviyelerine kadar çıkmakta ve bu malzemelerden beklenen mekanik özelliklerin sağlanamamasına neden olmaktadır (Aydoğmuş, 2024).

SPS yönteminin sıcak izostatik presleme yöntemiyle benzerlikleri vardır. Her iki teknikte de basınç tek yönde uygulanır. Ancak yaydıkları sıcaklık açısından belirgin farklılıklara sahiptirler. Sıcak izostatik preslemede ısı, kalıbı ve numuneyi çevreleyen ancak temas etmeyen bir dirençten difüzyonla sağlanırken, SPS sisteminde 1-10 kA arasında değişebilen yüksek akım ve 10 volttan daha düşük gerilim doğrudan numuneye ve grafit kalıba uygulanırken grafit kalıp bir ısıtma direnci görevi görür. Toz parçacıklarına doğru yönlendirilen önemli miktarda akım nedeniyle Şekil 5.11'deki gibi taneler arasında ark ve kıvılcım yoluyla plazmalar oluşur. Toz taneleri arasında plazma oluşumu, tane büyümesi riski olmadan kısa sürede oldukça kompakt malzemelerin üretilmesine olanak sağlar (Aydoğan, 2023).



Şekil 5.11. Darbeli akımın SPS sisteminde partikül üzerindeki hareketi (Benzeşik, 2023)

SPS prosesindeki ısıtma hızı dakikada 1000°C 'ye kadar ulaşabilmektedir. 50-250 kN arasında değişen tek eksenli mekanik basıncın uygulanması aynı anda konsantrasyonu artırır. İşlem vakum altında ve koruyucu gaz atmosferi kullanılarak gerçekleştirilebilir (Aydoğmuş, 2024). Bir SPS sisteminin başlıca ekipmanları Şekil 5.12'de gösterilmiş olup sistemin çalışması esnasında numunede meydana gelen çekilme miktarları da kontrol ünitesinden izlenebilmektedir. Böylece sinterlemenin başladığı ve bittiği sıcaklıklar doğru bir şekilde ölçülebilir (Benzeşik, 2023).



Şekil 5.12. SPS sisteminin şematik görünümü

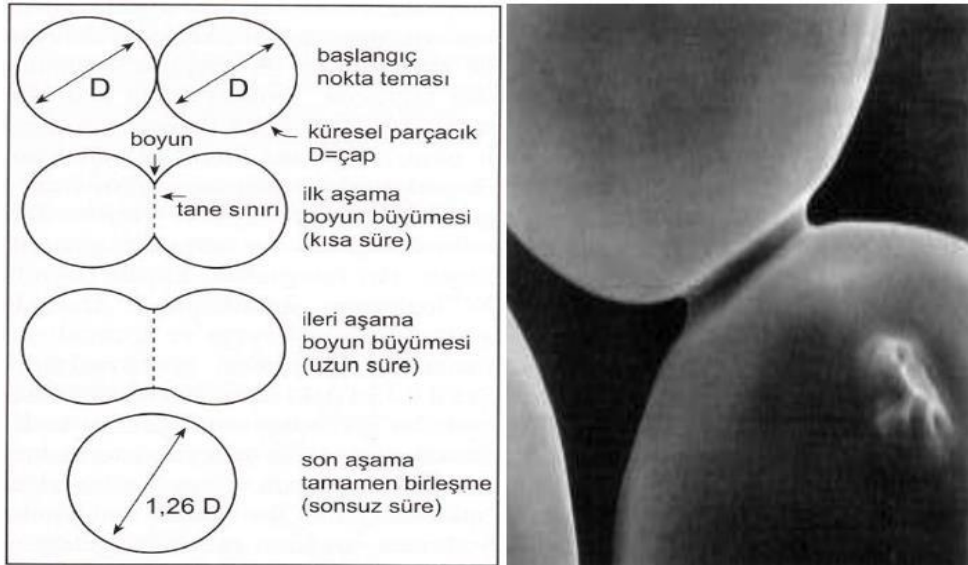
5.4.5. Sinterleme İşlemi

Sinterleme, preslenmiş malzemeyi oluşturan bileşenlerin argon dolu bir ortamda, erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre ısıtılmasıyla toz taneleri arasında metalurjik bağlantıların oluşturulması işlemidir. Sinterleme işlemi erime noktasının altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir işlemdir. Amaç, presleme sonrasında green kompakt malzemeyi oluşturan toz parçacıkları arasındaki bağlantıyı güçlendirmektir. Sinterleme sırasında parçacıklar arasındaki bağlantıların gelişimi ve yapı içindeki gözenek yapısının dönüşümü yakından alakalıdır. Ayrıca sinterleme işlemi sırasında mukavemet, iletkenlik, süneklik, manyetik korozyon ve geçirgenlik direnci gibi çeşitli özellikler önemli dönüşümlere uğrar (German, 2014).

Sinterleme sıcaklığının ve süresinin doğru olarak belirlenmesindeki zorluklar nedeniyle bu işlem farklı zaman ve sıcaklıklarda yapılan deneylerle belirlenmektedir. Ayrıca malzemelerin sinterlendiği sıcaklık arttıkça sinterleme işlemi için gereken süre azalır. Sinterleme işlemi tipik olarak üç farklı aşamada gerçekleşir. Bunlar; yanma veya temizlenme bölgesi, yüksek sıcaklık bölgesi, soğutma bölgesidir (Ocak, 2019).

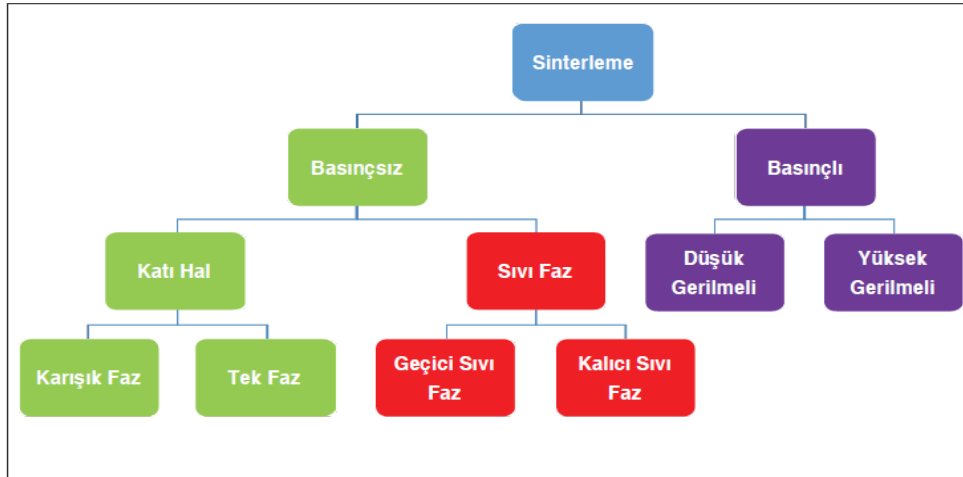
İlk yanma ve temizleme bölgesi, hava ile yakma işlemi yoluyla yağ ve bağlayıcıların giderildiği bölgedir. Isıtma hızı yüksek olduğunda, gözeneklerdeki bağlayıcı madde ve havanın birleşimi iç basınç oluşturarak parçanın parçalanmasına yol açar. Bu işlem, parçacıkların katı bir malzeme içindeki hareketi yoluyla gerçekleşir. Bekleme süresi genellikle 10 dakika ile birkaç saat arasında değişir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında birbirine temas eden parçalar aralarındaki atom alışverişi nedeniyle güçlenen bağlar oluşturur. Bu bölgedeki bekleme süresi istenilen yoğunluk düzeyine ve aranan spesifik özelliklere göre farklılık gösterebilmektedir. Soğutma bölgesi atmosfer tarafından düzenlendiğinden oksidasyon önlenir. İlk olarak, toz parçacıklarının presleme sonrasında tam temas kuramadığını ve hâlâ gözenekliliğe sahip olabileceğini unutmamak önemlidir. Bu nedenle bu üç aşamada atmosferik kontrol gereklidir (Ocak, 2019).

Sinterleme işlemi sırasında başlangıç temas noktası, boyun büyümesinin ilk aşaması, boyun büyümesinin ileri aşaması ve birleşmenin son aşaması gerçekleşir. Şekil 5.13'te görüldüğü gibi sinterleme işlemi ilerledikçe parçacıklar arasındaki gözenek sayısı azalır ancak parçacıklar arasındaki boyunların boyutu da artar. Boyun oluşumunun ardından boynun büyümesi sırasında parçacıkların buluştuğu noktada bir sınır oluşturulur. Yeterli zaman varsa, iki parçacık birleşecek ve sonunda daha büyük bir parçacık oluşturacaktır (Doğan, 2022).



Şekil 5.13. İki küreli model, sinterleme işlemi sırasında nokta temasından başlayarak parçacıklar arasındaki bağın ilerleyişi

Sinterleme için kullanılan yöntemler, sinterlenen malzemeye ve kullanılan spesifik sinterleme işlemine bağlı olarak değişebilir. Katı hal sinterleme ve sıvı faz sinterleme en yaygın sinterleme türleri olsa da şekil 5.14'te gösterilen başka sinterleme işlemleri de vardır (Gökçe vd., 2017).



Şekil 5.14. Sinterleme çeşitleri

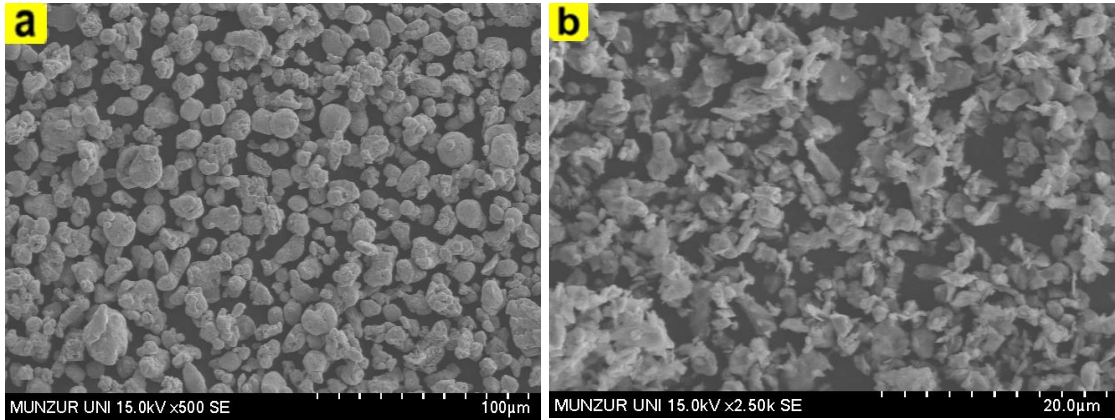
6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Cu tozu içerisine farklı oranlarda Cr ve C tozları ilave edilerek Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi ile kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

6.1.Toz ve Malzemenin Hazırlanması

6.1.1 Kullanılan Malzemeler

Deneylerde Sigma-aldrich'in firmasından temin edilmiş %99 saflığa sahip Cu tozu kullanılmıştır. Bu tozun parçacık boyutu 14 ila 25 μm arasında değişmektedir. Şekil 6.1.a'da verilen SEM görüntüsünden Cu tozunun küresel şekilli olduğu görülmektedir. Cr tozu Atlantic Equipment Engineers firmasından temin edilmiştir. Şekil 6.1.b'de Cr tozunun SEM görüntüsü verilmiştir. Cr tozu %99,8 saflıkta olup parçacık boyutu 1 ila 5 μm aralığındadır. Kullanılan grafit tozunun parçacık boyutu ise 20 μm 'nin altındadır.



Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan Bakır ve Krom tozunun SEM görüntüleri; a) Bakır tozu, b) Krom tozu

Tablo 6.1'de belirtilen toz karışımlarını elde edebilmek için saf Cu, Cr ve C tozları 0,0001 gr hassasiyetli terazide tartılmıştır. Sonrasında tartılan tozlar homojen karışım elde edilebilmek ve topaklanmaması için çelik bilyelerle falkon tüplere doldurularak 120 dakika

boyunca sabit devir altında Şekil 6.2’de gösterilen turbulada karıştırılmıştır. Şekil 6.3’te belirli oranlarda homojen karıştırılan toz karışımlarının resimleri verilmiştir.

Tablo 6.1. Üretilen kompozitlerin ağırlıkça % olarak kimyasal bileşimleri

Numune Adı	Cu	Cr	C
CuCr10C1,5	88,5	10	1,5
CuCr20C3	77	20	3
CuCr30C4,5	65,5	30	4,5



Şekil 6.2. Turbula Mixer



Şekil 6.3. Homojen karıştırılan metal tozlar

6.1.2. Presleme ve Sinterleme

Homojen karıştırılan tozlar, argon gazı atmosferinde 900 °C sıcaklık ve 35 MPa basınç altında Şekil 6.4'te gösterilen grafit kalıplar kullanılarak 4 dakika boyunca Şekil 6.5'teki SPS makinesinde üretilmiştir.



Şekil 6.4. Grafit kalıp



Şekil 6.5. SPS makinesi

6.1.3. Metalografik Hazırlık

Şekil 6.6’da gösterilen 40x10x4 mm ölçülerinde SPS yöntemiyle hazırlanan malzemelerin mikroyapılarını incelemek üzere zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işlemi her bir numune için sırasıyla 120-240-400-600-1000-1200 gritlik SiC zımpara kağıtları kullanılarak sulu ortamda Şekil 6.7’de gösterilen zımpara ve parlatma makinesinde yapılmıştır. Sonrasında çuha ve 1 µm’luk elmas süspansiyonla parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 6.6. SPS’de 40x10x4 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler



Şekil 6.7. Zımpara ve parlatma makinesi

Yüzey zımparalama ve parlatma işleminden sonra malzemelerin mikroyapısını inceleyebilmek için numuneler %36 saf su, %36 amonyum hidroksit, %21 nitrik asit, %7 hidrojen peroksit ile hazırlanan çözeltide 45 saniye bekletilerek dağlama işlemi yapılmıştır.

6.2. Mikroyapı İncelemeleri

6.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS)

SEM ve SEM/EDS incelemeleri Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan JEOL JSM 6510 SEM mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS cihazı ile yapılmıştır. Şekil 6.8’de SEM ve EDS cihazlarının resmi verilmiştir.



Şekil 6.8. SEM/EDS Mikroskobu

6.2.2. XRD Analizi

X ışını difraksiyonu (XRD) bilinmeyen bir malzemeyi tanımlamak veya bilinen malzemenin atomik boyutlardaki yapısını tayin etmek için kullanılır. XRD analizi, Munzur Üniversitesinde 0,02/0,4 derece/saniye tarama hızı ile Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1,5405$) kullanılarak Şekil 6.9’da gösterilen Rigaku marka Miniflex 600 cihazında yapılmıştır.



Şekil 6.9. XRD cihazı

6.2.3. Üç Nokta Eğme Testi

Üç Nokta eğme testi Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesinde Şekil 6.10’da gösterilen Shimadzu marka 50 kN’luk test cihazında 1 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. Üç nokta eğme test cihazı

6.2.4. Mikrosertlik Ölçümü

Yüzeyleri daha önce zımparalanmış ve parlatılmış numuneler Şekil 6.11’de gösterilen AOB marka cihazda Vickers mikrosertlik ölçüm yöntemiyle 300 gr yükün 10 sn uygulanması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Her numune için 9 farklı noktadan 0,5 mm aralıklarla ölçüm yapılarak ortalama değer esas alınmıştır.



Şekil 6.11. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

6.2.5. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen malzemelerin yoğunlukları, yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak arşimet prensibine göre belirlenmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üretilen kompozit malzemelerin teorik yoğunlukları ve Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk değerleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Teorik yoğunluklar Denklem 7.1’de verilen karışımlar kuralı (rule of mixture) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk değerleri ise Denklem 7.2’de verilen bağıntıya göre hesaplanmıştır. Denklem 7.3’te verilen bağıntı (Erçetin vd., 2021) kullanılarak hesaplanan bağıl yoğunluk değerleri Şekil 7.1’de grafik halinde verilmiştir. Şekil 7.1 incelendiğinde Cr miktarındaki artışla birlikte elde edilen bağıl yoğunluk değerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek bağıl yoğunluk değerine ağırlıkça %30 Cr içeren kompozitte ulaşılmış olup, bu değer ortalama %97,947 olmuştur. Özgür ve Erçetin tarafından geleneksel sinterleme ile üretilen Cu matrisli Cr ve C takviyeli kompozitlerde de artan Cr ve C oranına bağlı olarak bağıl yoğunluk değerlerinin arttığı bildirilmiştir (Özgün ve Erçetin, 2017). Söz konusu çalışmada ağırlıkça %40 Cr ve %4 C takviye edilen kompozitte %95,1 bağıl yoğunluğa ulaşıldığı belirtilmiştir. Tez çalışmasında spark plazma sinterleme yöntemi sayesinde daha düşük Cr-C ilavelerinde bile daha yüksek bağıl yoğunluklara ulaşılmıştır.

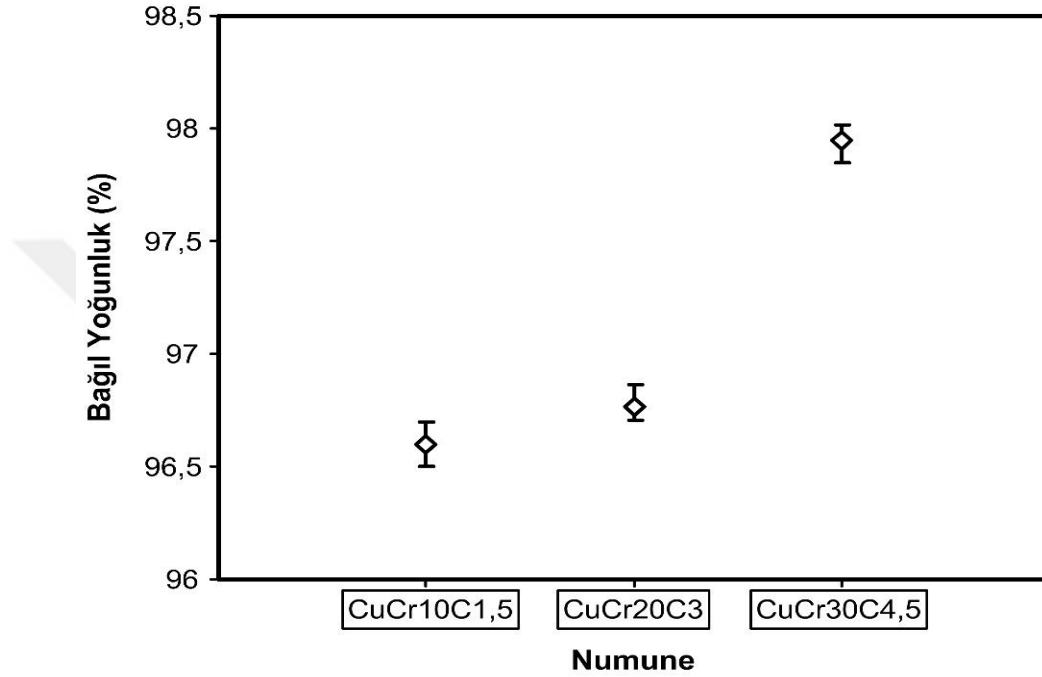
$$\text{Teorik yoğunluk } (g.cm^{-3}) = \frac{\text{Toplam kütle}}{\text{Toplam hacim}} = \frac{(Cu'n \text{ kütlesi}) + (Cr'un \text{ kütlesi}) + (C'un \text{ kütlesi})}{\left[\frac{Cu'n \text{ kütlesi}}{Cu'n \text{ yoğunluğu}} \right] + \left[\frac{Cr'un \text{ kütlesi}}{Cr'un \text{ yoğunluğu}} \right] + \left[\frac{C'un \text{ kütlesi}}{C'un \text{ yoğunluğu}} \right]} \quad (7.1)$$

$$\text{Ölçülen yoğunluk } (g.cm^{-3}) = \frac{\text{Havadaki ağırlık}}{(\text{Havadaki ağırlık}) - (\text{Sudaki ağırlık})} \quad (7.2)$$

$$\text{Bağıl Yoğunluk } (\%) = \frac{\text{Ölçülen yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk}} \times 100 \quad (7.3)$$

Tablo 7.1. Üretilen kompozitlerin teorik ve ölçülen yoğunluk değerleri

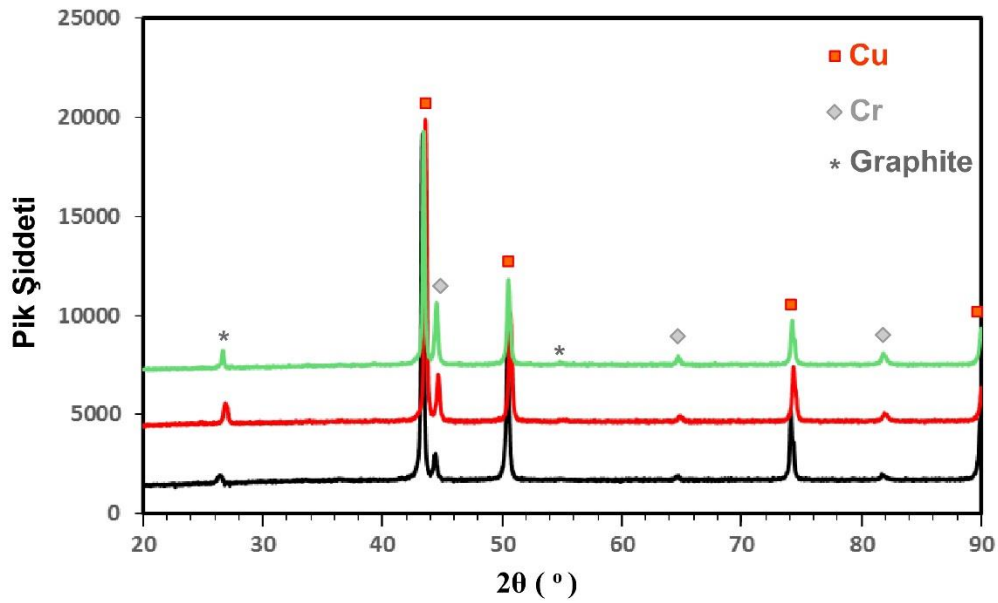
Numune	Teorik Yoğunluk (g.cm ⁻³)	Ölçülen Yoğunluk (g.cm ⁻³)
Cu-Cr10-C1,5	8,2784	7,9969
Cu-Cr20-C3	7,708	7,45883
Cu-Cr30-C4,5	7,2111	7,06306



Şekil 7.1. Üretilen kompozitlerde ile elde edilen bağıl yoğunluk değerleri

Şekil 7.2’de üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde her üç numunenin de kırınım desenlerinde Cu, Cr ve grafit olmak üzere sadece üç faz bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada her ne kadar Cu içerisine Cr ile birlikte C ilave edilerek mikroyapıda karbür bileşikler oluşturmak ve bu sayede sertliği ve mukavemeti artırmak amaçlanmış olsa da kırınım desenlerinde Cr ve C tarafından oluşturulmuş karbürlere ait pikler bulunmamaktadır. İlave edilen C, Cr ile reaksiyona girmemiş ve grafit halinde kalmıştır. Özgün ve Erçetin (2017), aynı amaçla geleneksel sinterleme ile ürettikleri Cu-Cr-C kompozitlerin XRD analizinde Cr ve C tarafından oluşturulmuş karbürlere ek olarak sinterleme işleminin azot atmosferinde gerçekleştirilmesine bağlı olarak Cr tarafından oluşturulmuş nitrür bileşiklerine ait pikler de bulunduğunu rapor etmişlerdir (Özgün ve Erçetin, 2017). Söz konusu çalışmaya kıyasla tez çalışmasında numune üretimi hem 900 °C gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta hem de 35,42 MPa gibi

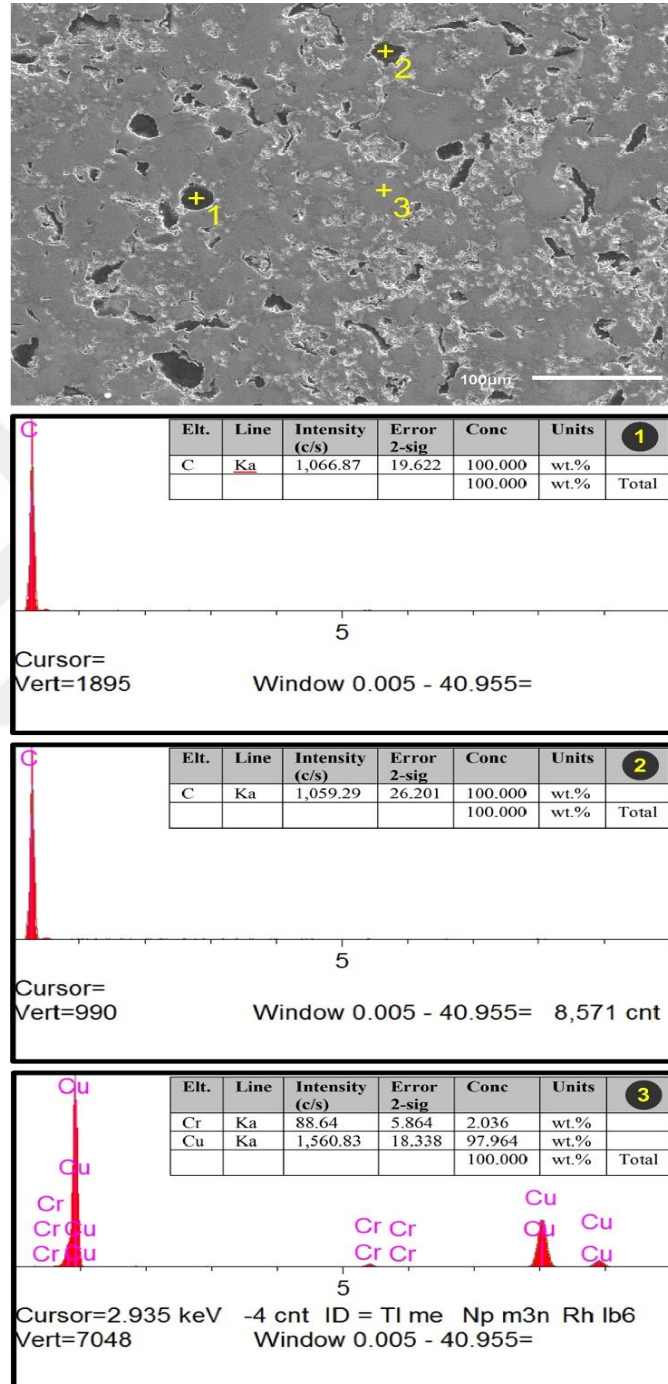
yüksek bir basınç uygulanarak gerçekleştirildiği için Cr ve C elementlerinin difüzyonunun reaksiyona girmelerine yetecek düzeyde olmadığı ve buna bağlı olarak karbür bileşikleri oluşturamadıkları düşünülmektedir. Kırınım desenleri incelendiğinde grafit fazına ait piklerin şiddetinin artan C oranıyla birlikte artış sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte ilave edilen Cr oranındaki artış Cu fazına ait piklerin şiddeti azalırken Cr fazına ait piklerin şiddeti ise doğal olarak artmıştır. Cr içeren farklı malzeme gruplarının toz metalürjisi teknikleri ile üretiminde yüksek saflıktaki soy gazlar kullanılarak gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde Cr'un oksit bileşikleri oluşturduğu bildirilmektedir (Özgün vd., 2012; Özgün vd., 2013). Tez çalışmasında yüksek saflıktaki argon atmosferinde gerçekleştirilen spark plazma sinterleme işlemi esnasında böyle bir oksit oluşumu söz konusu olmamıştır.



Şekil 7.2. Üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenleri

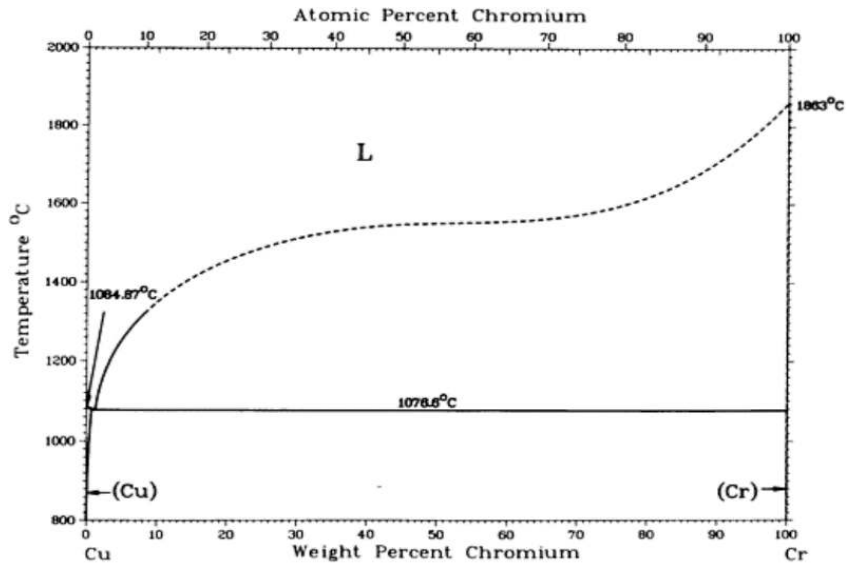
Şekil 7.3'te %30 Cr ve %4,5 C ilave edilmiş numuneden dağlama işlemi yapılmadan alınan SEM/EDS nokta analizine ait görüntüler verilmiştir. Gözenek gibi görünen 1 ve 2 numaralı bölgelerden alınan nokta analizleri, bu bölgelerde C elementi dışında başka bir element bulunmadığını göstermiştir. Bu durum, yukarıda XRD analizi ile ilgili açıklamalarda da belirtildiği gibi SPS işlemi esnasında Cr ve C elementleri arasında herhangi bir reaksiyon oluşmadığını ve ilave edilen C'un grafit halinde mikroyapıda dağılmış olduğunu göstermektedir. Grafit fazı, her yerde aynı boyut ve morfolojiye sahip değildir. Bazı bölgelerde lamel bazı bölgelerde ise disk şeklinde oluşmuş olduğu görülen bu faz, birkaç

μm 'den $40\ \mu\text{m}$ 'ye kadar bir boyut dağılımı sergilemektedir. 3 numaralı nokta analizi bakır matristen alınmış olup, beklendiği gibi çok az miktarda Cr dışında %97,964 Cu içermektedir.

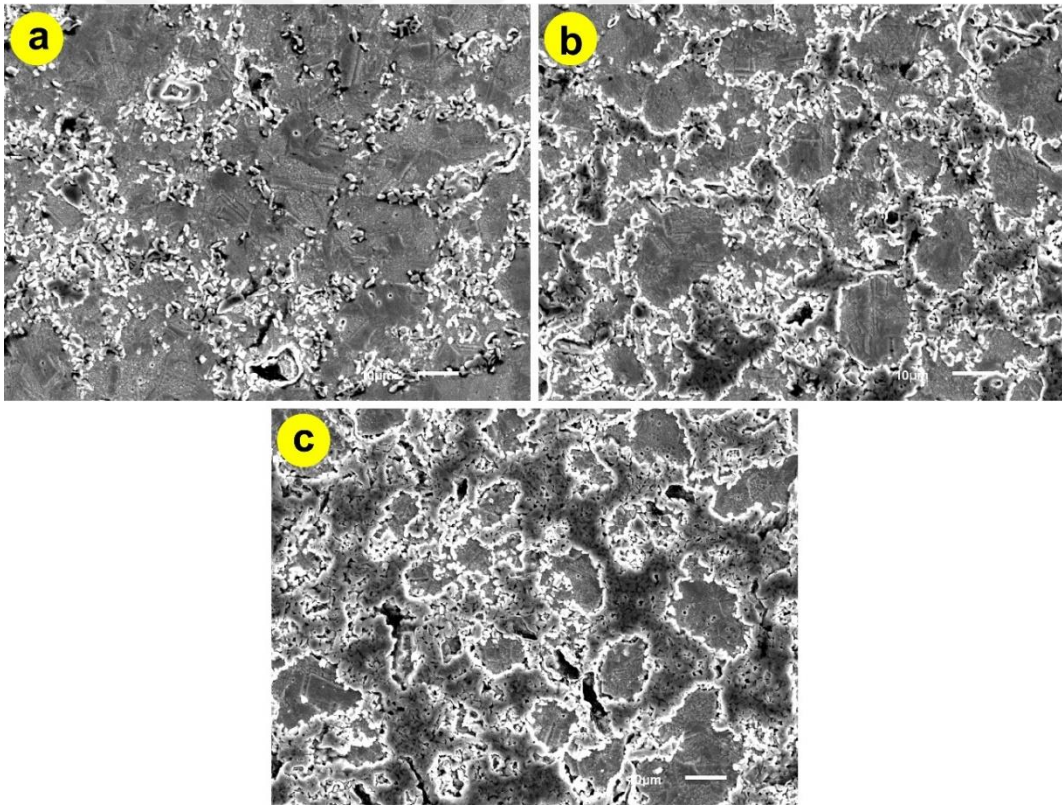


Şekil 7.3. CuCr30C4,5 numunesinden dağlama işlemi öncesi alınmış SEM/EDS nokta analizi

Şekil 7.4'te Cu-Cr faz diyagramı, Şekil 7.5'te ise üretilen kompozitlerden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Cu-Cr faz diyagramına göre (Chakrabarti and Laughlin, 1984) gerek SPS işleminin uygulandığı 900 °C'de gerekse oda sıcaklığında Cr'un Cu içerisinde hiç çözünemediği görülmektedir. Bu nedenle ilave edilen tüm Cr'un tane sınırlarında bulunduğu görülmektedir. %10 Cr ilave edilen numuneye ait SEM görüntüsünden tane sınırlarındaki Cr fazının bazı bölgelerde ayırık parçacıklar halinde, bazı bölgelerde ise kümelenmiş parçacıklar halinde bir dağılım sergilediği görülmektedir. İlave edilen Cr miktarındaki artış, Cr fazının matris tanelerini çevreleyen ve birbiriyle bağlantılı olan sürekli bir ağ oluşturmaya neden olmuştur. Bu durum özellikle %30 Cr içeren numunenin SEM görüntüsünde çok daha belirgindir. Takviye fazının tüm numunelerde homojen bir dağılım sergilediğinden söz etmek mümkündür. T/M teknikleri ile üretilen çoğu metal matrisli kompozit sisteminde matris-takviye elemanı arayüzeylerinde yetersiz bağlanmanın üretilen kompozitlerin özelliklerini olumsuz yönde etkilediği rapor edilmektedir (Uddin vd., 2010; Efe vd., 2011; Prosviryakov, 2015). Matris-takviye elemanı ara yüzeyindeki yetersiz ıslatma hem üretimde zorluklara yol açmakta hem de servis şartlarında kompozitin bu ara yüzeylerden hasara uğramasına neden olmaktadır (Zhan ve Zhang, 2003). Bu problemin üstesinden gelmek amacıyla çoğu kompozit sisteminde ara yüzey bağını geliştirecek tedbirlerin alınması gerekmektedir (Ning vd. 2005). SEM görüntüleri incelendiğinde şimdiki çalışmada Cu matris ile Cr tarafından oluşturulan fazların ara yüzeyinde herhangi özel bir tedbir uygulanmadan iyi bir bağlanmanın meydana gelmiş olduğu görülmektedir. Tüm numunelerin SEM görüntülerinde YMK yapıdaki Cu matriste bol miktarda tavlama ikizi oluşmuş olduğu görülmektedir.



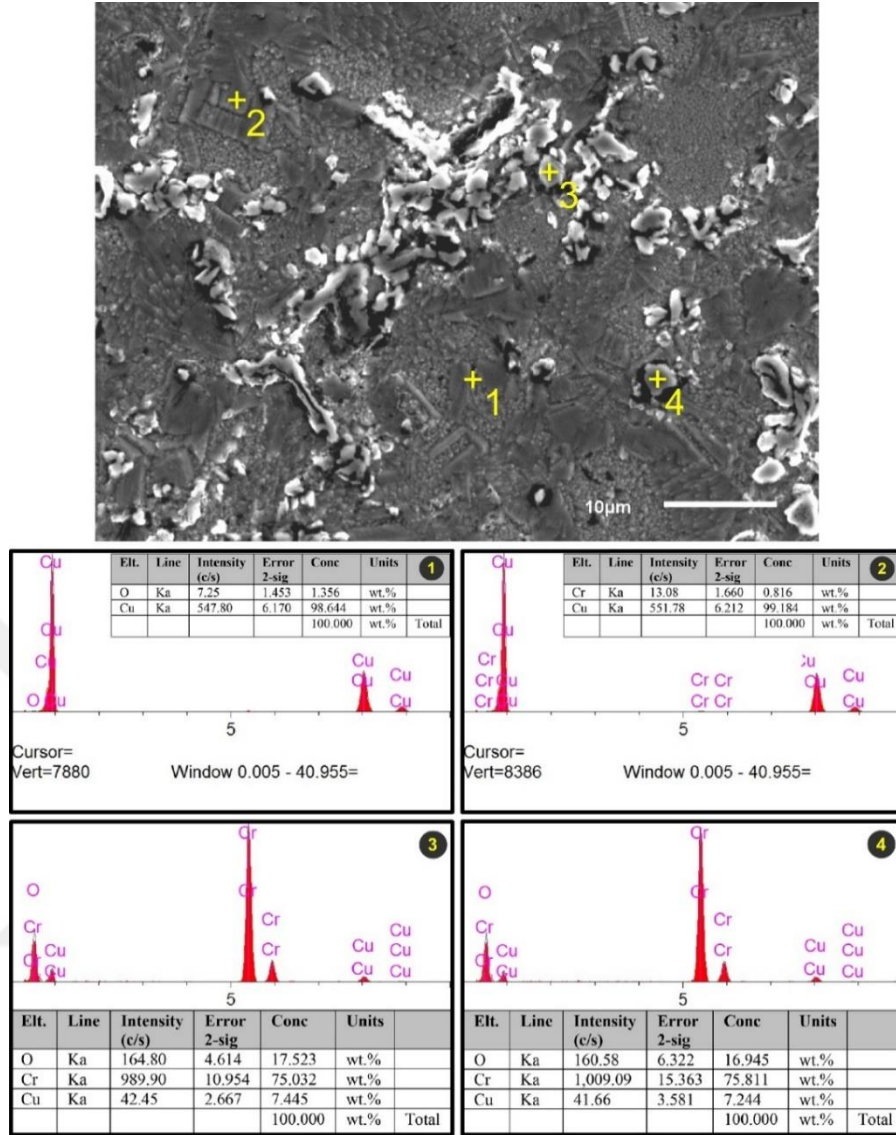
Şekil 7.4. Cu Cr faz diyagramı (Chakrabarti ve Laughlin, 1984)



Şekil 7.5. Numunelerin SEM görüntüleri; a) CuCr10Cr1,5, b) CuCr20Cr3, c) CuCr30Cr4,5

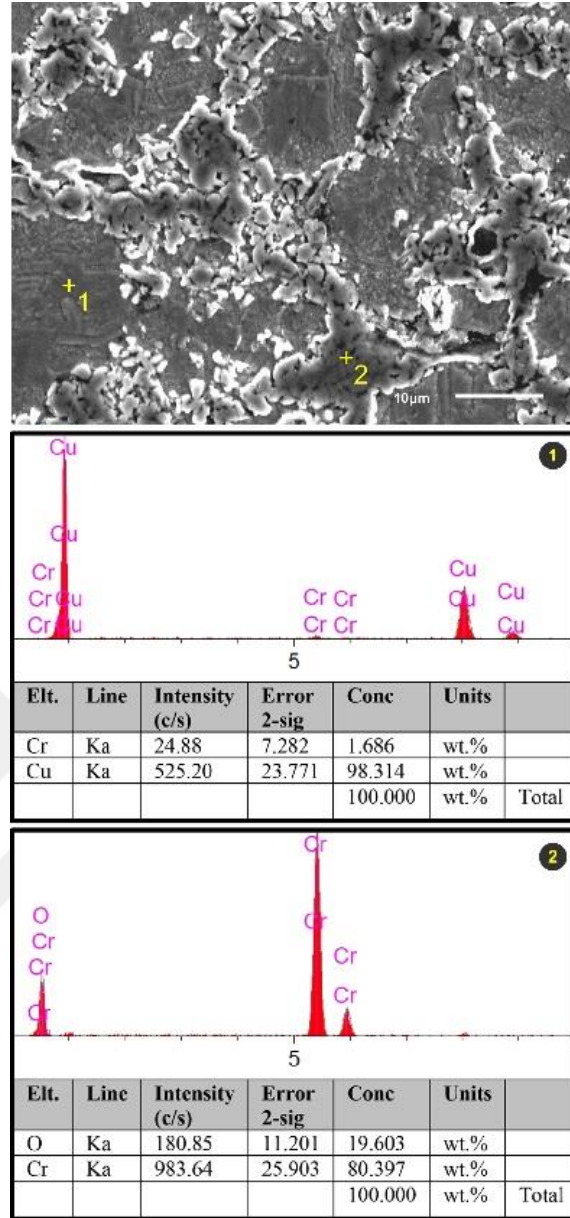
Şekil 7.6’da CuCr10Cr1,5 numunesinden alınmış SEM/EDS analizine ait görüntüler verilmiştir. Cu matriste bulunan 1 numaralı bölgede ağırlıkça %98,644 Cu ve %1,356

oksijen bulunmaktadır. Üretilen kompozitlerin XRD kırınım desenlerinde herhangi bir oksit bileşiğine ait pike rastlanmamış olmasına rağmen bu bölgede oksijen bulunmasının dağlama işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu düşüncüyü Şekil 7.3'te verilmiş olan dağlanmamış numuneden alınan SEM/EDS nokta analizi sonuçları da desteklemektedir. Cu matrisin başka bir bölgesinden alınan 2 numaralı nokta analizi, Cu matris içerisinde çok düşük miktarda Cr bulunduğunu göstermiştir (%99,184 Cu ve %0,816 Cr). Faz diyagramına göre Cr'un Cu içerisinde hiç çözünemediği göz önünde bulundurulduğunda bu bölgede bir katı çözeltilinin varlığından söz edilemez. Bu bölgede bulunan düşük miktardaki Cr'un matris içerisinde hapsolmuş küçük boyutlu Cr parçacıkları halinde bulunduğu düşünülmektedir. 3 ve 4 numaralı bölgelerden alınan EDS nokta analizleri, buradaki çökeltilerin ana bileşeninin Cr olduğunu göstermiştir. Her iki noktada da nerdeyse aynı kimyasal bileşim söz konusu olup yaklaşık %75 Cr bulunmaktadır. Cr'la birlikte düşük miktarda Cu ve yaklaşık %17 oksijen bulunmaktadır. Yukarıda Cu matris içerisindeki oksijenle ilgili yapılan açıklama bu noktalar için de geçerli olup, XRD analizinde herhangi bir oksit bileşiğine rastlanmadığı halde burada oksijen bulunmasının dağlama işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.6. CuCr10C1,5 numunesinden alınan SEM/EDS analizine ait görüntüler

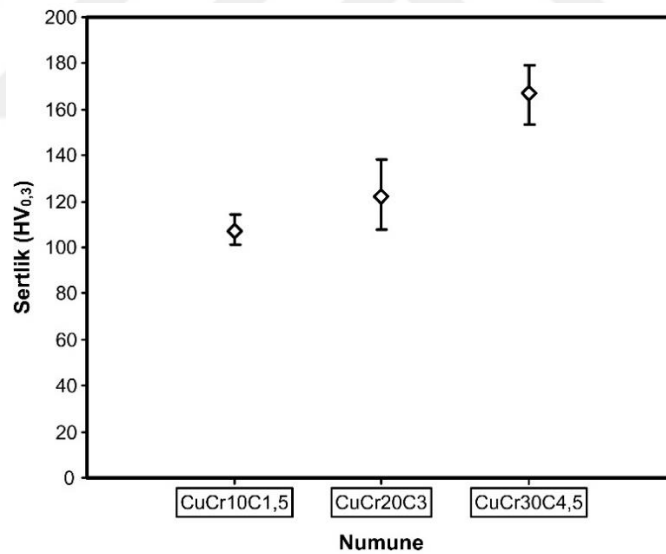
Şekil 7.7’de CuCr20C3 numunesinden alınan SEM/EDS nokta analizi verilmiştir. Matristen alınan 1 numaralı nokta analizi %98,314 Cu ve %1,686 Cr bileşimini vermiştir. İlave edilen Cr miktarındaki artışa bağlı olarak Şekil 7.6’daki SEM/EDS nokta analizine göre burada matristeki Cr oranı biraz daha yüksek çıkmıştır. 2 numaralı nokta analizi %80,397 Cr ve %19,603 oksijen bileşimini vermiştir.



Şekil 7.7. CuCr20C3 numunesine ait SEM/EDS nokta analizi

Şekil 7.8’de üretilen kompozitlerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Cr takviye oranındaki artışa bağlı olarak daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek sertlik değeri CuCr30C4,5 numunesinde elde edilmiş olup ortalama 166,96 HV’dır. Bu değer, Özgün ve Erçetin (2017) tarafından geleneksel sinterleme ile üretilmiş CuCr30C3 kompozitinin sertliğine (223 HV) göre oldukça düşüktür. Söz konusu çalışmada 1070 °C’de ve yüksek saflıktaki N₂ atmosferinde gerçekleştirilen geleneksel sinterleme sonucu Cr tarafından oluşturulmuş karbür ve nitrür bileşikler olduğu bildirilmiştir (Özgün ve Erçetin, 2017). Şimdiki çalışmada da karbür bileşikler oluşturularak sertlik ve

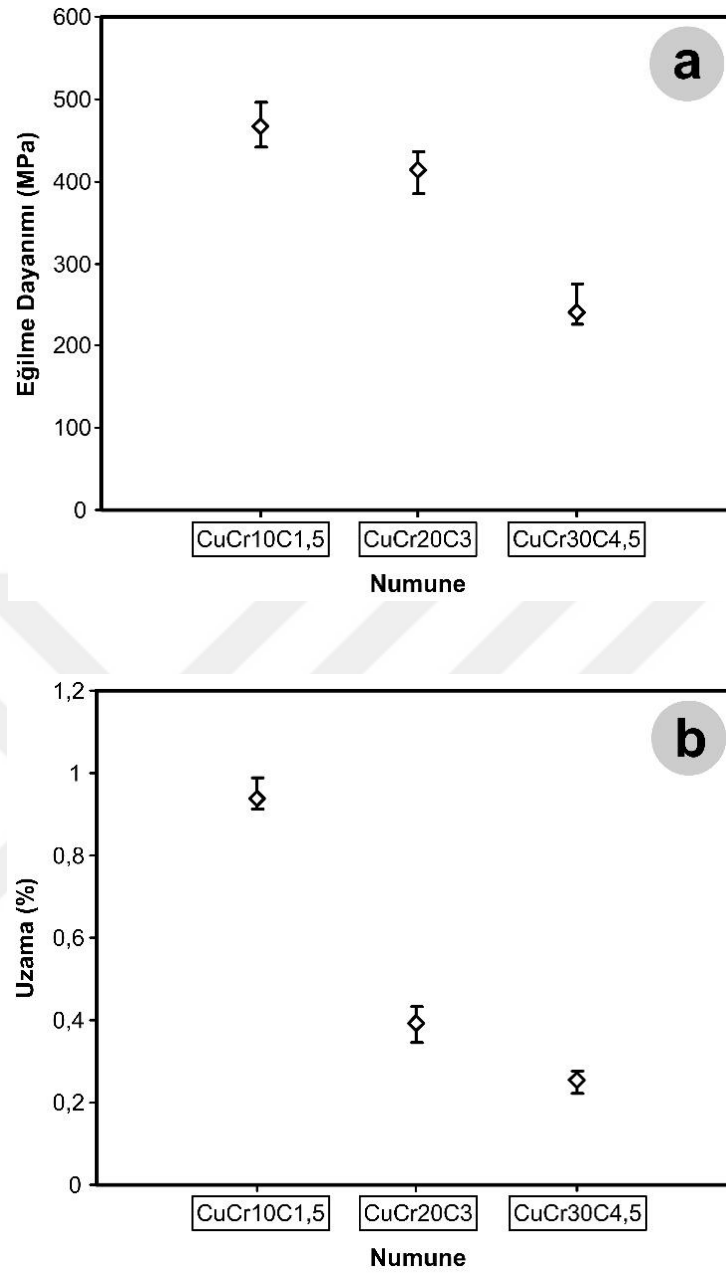
mukavemetin artırılması hedeflenmiştir. Fakat 900 °C’de ve 35 MPa basınç altında gerçekleştirilen SPS işlemi sonucu böyle bir bileşik oluşturulamamıştır. Dolayısıyla sertlik değerleri daha düşük olmuştur. Balalan ve Özgün (2018), geleneksel sinterleme ile ürettikleri saf bakırın sertliğinin 39,95 HV, ağırlıkça %25 SiC partikül takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğinin ise 149,6 HV olduğunu bildirmişlerdir (Balalan ve Özgün, 2018). Tez çalışmasında üretilen tüm kompozitlerde saf bakıra kıyasla oldukça yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında CuCr30C4,5 numunesinde ağırlıkça %25 SiC takviyeli kompozitin sertliğinden daha yüksek sertlik değerine ulaşılmıştır. Chang vd. (1999) 600 °C’de 300 MPa basınç uygulayarak sıcak presleme ile ürettikleri saf bakırın sertliğinin 70 HV olduğunu bildirmişlerdir. Aynı koşullarda ürettikleri hacimsel olarak %11,6 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 120 HV, hacimsel olarak %19,8 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 156 HV, hacimsel olarak %30,3 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 193 HV, hacimsel olarak %40 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin sertliğini 235 HV olarak rapor etmişlerdir (Chang vd. 1999).



Şekil 7.8. Üretilen kompozit numunelerin sertlik değerleri

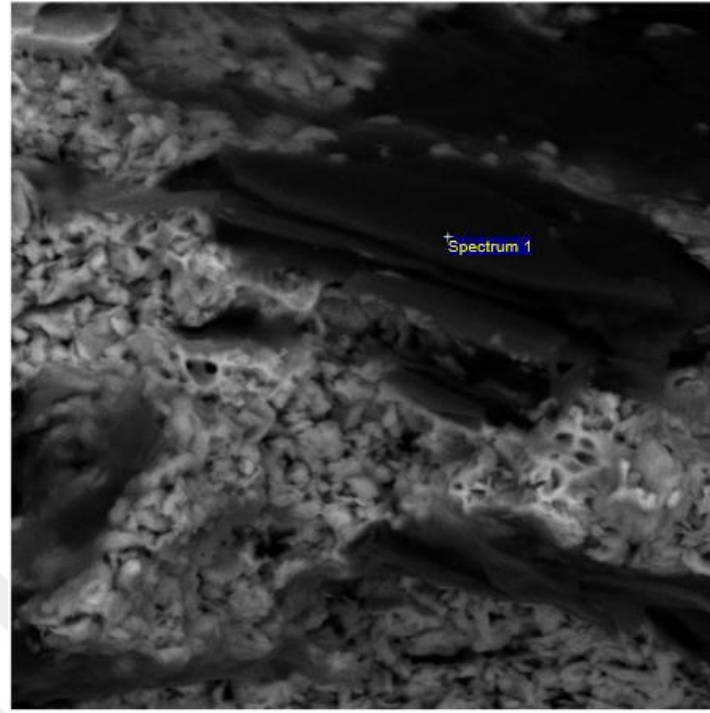
Üretilen kompozitlerin 3 nokta eğme deneyi sonucu elde edilen eğilme mukavemetleri Şekil 7.9.a’da, %uzama değerleri ise Şekil 7.9.b’de verilmiştir. Şekil 7.9.a incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımının 466,774 MPa olarak CuCr10C1,5 numunesinde elde edildiği görülmektedir. Artan Cr ve C takviye oranı, eğilme dayanımını düşürmüştür. Benzer düşüş %uzama değerleri için de geçerlidir. Literatürde farklı takviye elemanları

kullanılarak farklı yöntemlerle üretilmiş Cu matrisli kompozitlerin eğilme dayanımları ile ilgili çok veri bulunmaktadır. Balalan ve Özgün (2018), geleneksel sinterleme ile ürettikleri ağırlıkça %5 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetinin 202,7 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Artan SiC takviye oranının eğilme mukavemetini düşürdüğünü ve ağırlıkça %25 SiC partikül takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetinin 88,2 MPa olduğunu rapor etmişlerdir (Balalan ve Özgün, 2018). Wang vd. (2013) Geleneksel sinterleme yöntemiyle ürettikleri grafit takviyeli Cu matrisli kompozitlerde en yüksek eğilme mukavemetinin 223 MPa olarak %3 grafit takviye edilen kompozitte elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Artan grafit takviye oranının eğilme mukavemetini azalttığını bildirmişlerdir (Wang vd. 2013). (Chang vd., 1999) 600 °C’de 300 MPa basınç uygulayarak sıcak presleme ile ürettikleri saf bakırın eğilme mukavemetinin 260 MPa olduğunu bildirmişlerdir. Aynı koşullarda ürettikleri hacimsel olarak %11,6 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 555 MPa, hacimsel olarak %19,8 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 739 MPa, hacimsel olarak %30,3 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 536 MPa, hacimsel olarak %40 SiC takviyeli Cu matrisli kompozitin eğilme mukavemetini 499 MPa olarak rapor etmişlerdir (Chang vd., 1999). Ngai vd. (2013), 950 °C’de 50 MPa basınç uygulayarak SPS yöntemiyle Ti_3SiC_2 takviyeli Cu matrisli kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitlerden ağırlıkça %5 Ti_3SiC_2 takviyeli Cu matrisli kompozitte 410 MPa eğilme mukavemeti elde etmişlerdir. Artan Ti_3SiC_2 takviye oranının eğilme mukavemetini azalttığını ve %35 takviyeli kompozitte yaklaşık 105 MPa’a düştüğünü bildirmişlerdir (Ngai vd., 2013). Literatürdeki bu verilerle kıyaslandığında tez çalışmasında üretilen $CuCr10C1,5$ kompozitinin eğilme dayanımının oldukça iyi olduğu söylenebilir. Genel olarak takviye fazının artışı literatürde de %uzama değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 7.9. Üretilen kompozit numunelerin; a) eğilme dayanımları, b) %uzama değerleri

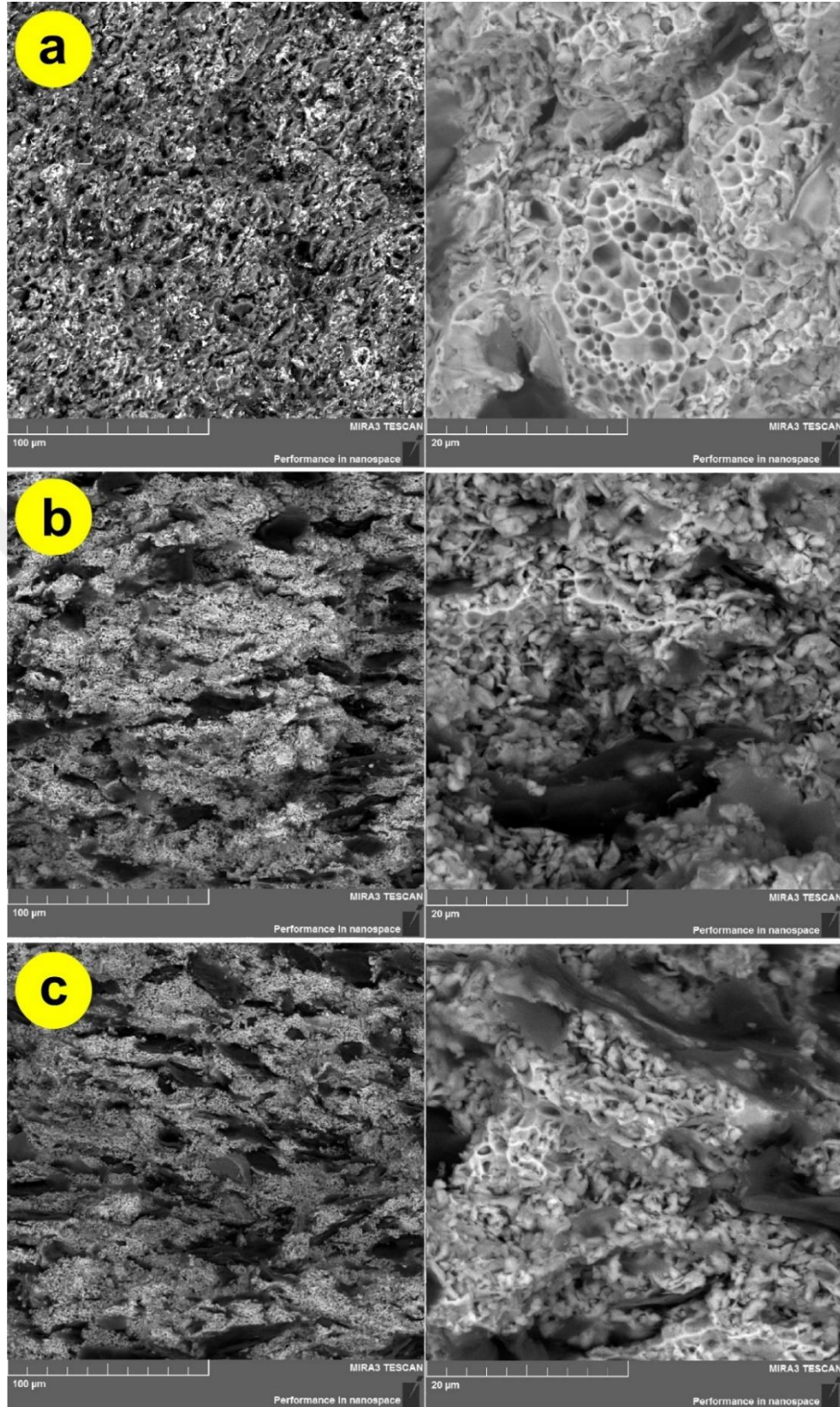
Şekil 7.10'da 3 nokta eğme deneyi sonrasında CuCr30C4,5 numunesinin kırılma yüzeyinden alınmış EDS nokta analizine ait görüntü ve değerler verilmiştir. Görüntü incelendiğinde XRD analizini ve Şekil 7.3'teki EDS nokta analizi sonuçlarını destekler tarzda mikroyapıda lamel şeklinde grafit oluşumu görülmektedir.



Element	Weight%	Atomic%
C K	97.53	99.45
Cr K	1.72	0.41
Cu K	0.75	0.14
Totals	100.00	

Şekil 7.10. CuCr30C4,5 numunesinin kırılma yüzeyinden alınmış EDS nokta analizi

Şekil 7.11’de 3 nokta eğme deneyi sonrasında kırık yüzeylerinden alınmış farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. 1000x büyütme ile alınmış görüntüler (soldaki) incelendiğinde özellikle %3-4,5C ilave edilen numunelerin görüntülerinde daha belirgin ve iri olmak üzere siyah renkli grafit fazı görülmektedir. Grafit fazı bazı bölgelerde lamellere benzemekle birlikte genel olarak karmaşık bir morfoloji sergilemektedir. Şekil 7.11.a’daki CuCr10C1,5 numunesinin 5000x ile alınan görüntüsünde (sağdaki) kırılma yüzeyinde sünek kırılmaya işaret eden yüksek miktarda gamze şeklinde çukurcuk (dimple) oluşumu görülmektedir. Daha yüksek Cr ve C ilave edilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinde gamze şeklinde çukurcuk oluşumu azalmıştır. Cr ve C oranlarındaki artışla Cr ve grafit fazlarının miktarı ve boyutları artmakta ve daha gevrek bir kırılma yüzeyi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7.11. Üretilen kompozitlerin kırık yüzeyi SEM görüntüleri; a)CuCr10C1,5, b)CuCr20C3, c)CuCr30C4,5

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada SPS metodu kullanılarak 3 farklı Cr-C içeriğine sahip Cu matrisli kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere uygulanan karakterizasyon işlemlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1) SPS tekniği ile üretilen kompozitler, genel olarak %96'nın üzerinde bağıl yoğunluk değerlerine ulaşmıştır. SPS işleminde uygulanan 900 °C sıcaklık, 35 MPa basınç ve 4 dakika bekleme süresi parametrelerinin bu kompozisyonlar için uygun olduğu görülmüştür. İlave edilen Cr ve C oranlarındaki artışla birlikte elde edilen bağıl yoğunluk değerleri de artmıştır. En yüksek bağıl yoğunluk değeri %97,947 olarak CuCr30C4,5 kompozitinde elde edilmiştir.
- 2) XRD analizi, Cu matris içerisine ilave edilen Cr ve C'nun herhangi bir bileşik oluşturmadığını göstermiştir. İlave edilen Cr tane sınırlarında Cr fazı olarak C ise grafit olarak mikroyapıda yer almıştır. Yüksek saflıkta argon atmosferinde gerçekleştirilen SPS işlemi üretilen kompozitlerde herhangi bir oksit bileşiği oluşturmamıştır.
- 3) SEM incelemelerinde üretilen kompozitlerde Cu matris ve Cr tarafından oluşturulan fazlar ayırt edilebilmektedir. Cr fazı genellikle tane sınırlarında bulunmakla birlikte CuCr10C1,5 numunesinde daha çok ayrık parçacıklar halinde mikroyapıya dağılmışken %20 ve %30 Cr ilave edilen numunelerde kümelenerek ve birleşerek matrisin tane sınırlarını kuşatan sürekli bir ağa dönüşmüştür. Grafit fazı belirgin bir morfolojiye sahip olmayıp özellikle %3 ve %4,5 C eklenen numunelerde tüm mikroyapıya yayılmış halde bulunmaktadır.
- 4) Üretilen kompozitlerde Cr ve C oranındaki artışla birlikte daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir (CuCr30C4,5 numunesinde 166,96 HV). Literatürle kıyaslandığında saf bakıra ve birçok Cu matrisli kompozite göre daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Sertlik değerlerinin yüksek olması özellikle aşınma direnci bakımından önemlidir.

- 5) Uygulanan 3 nokta eğme testi sonucu en yüksek eğilme dayanımı ve %uzama değeri sırasıyla 466,774 MPa ve %0,94 ile CuCr10C1,5 kompozitinde elde edilmiştir. Artan Cr ve C oranıyla birlikte hem eğilme dayanımlarında hem de %uzama değerlerinde düşüş olmuştur. Hem en yüksek eğilme dayanımının hem de en yüksek %uzama değerinin CuCr10C1,5 numunesinde elde edilmesi Cr fazının mikroyapıda sürekli bir ağ şeklinde değil, ayrık parçacıklar halinde oluşmuş olmasına bağlanmaktadır. Sürekli bir ağ oluşumu dayanım ve sünekliği azalmaktadır.
- 6) Kırılma yüzeyleri kıyaslandığında CuCr10C1,5 numunesinin daha sünek bir kırılma sergilediği anlaşılmaktadır.
- 7) Öneri olarak Cu içerisine daha düşük oranlarda Cr ilave edilerek SPS yöntemiyle üretilecek kompozitlerin çalışılması haline daha küçük Cr parçacıklarının daha homojen dağılım sergilediği kompozitlerin elde edilebileceği düşünülmektedir.
- 8) Artan Cr ilavesi ile saf bakıra göre oldukça yüksek sertlik değerleri elde edilen bu kompozitlerin yüksek aşınma direnci gerektiren elektrik malzemelerinde kullanılabileceği düşünülmektedir.
- 9) Benzer bileşime sahip Cu matrisli kompozit malzemelerin aşınma direnci çalışılabilir.

KAYNAKLAR

Akbulut, H. (1994). Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akın, G. (2006). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akoral, E., Türker, M. ve Özçatalbaş, Y. (2002). Al Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi. 3. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Bildiriler CD'si, 942-950.

Altuner, S. (2011). Y_2O_3 Kaplanmış Al_2O_3 Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

ASM Handbook, (2001). Composites, 21, p. 1-20.

Ataş, A. (2003). Alaşımlı Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aydoğan, Y. O. (2023). Savunma Sanayii Uygulamalarına Yönelik Grafen Takviyeli Bor Karbür Yapıların SPS Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Aydoğmuş, D. (2024). Transparan Alon Seramiklerinin SPS ile Üretimi ve Geliştirilmesi, Farklı Katkıların Transparanlık ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkilerin İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Bahçeci, E. (2006). Al Matrisli α -Si $_3$ N $_4$ Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bakır Geliştirme Derneği, (2010). The Copper Advantage: A Guide to Working with Copper and Copper Alloys.

Balalan, Z. and Ozgun, O. (2018). Effect of Production Route on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu–SiCp composites, Arab. J. Sci. Eng. 43, 4889.

Benzeşik, K. (2023). CO₂ Yakalayıcı Sorbent Olarak Li₄SiO₄ Tozlarının Yanma Sentezi ile Üretimi ve SPS ile Sinterlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Chang S. Y., Lin J. H., Lin S. J., and Theo Z. K. (April 1999). Processing Copper and Silver Matrix composites by Electroless Plating and Hot Pressing, Metallurgical and Materials Transactions A, 30, 1136.

Chakrabarti, D. J. and Laughlin, D. E. (1984). Cr-Cu (Chromium-Copper), in ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams.

Chung, D. D. L. (2010). Composite Materials: Science and Applications, Springer, London.

Cöcen, Ü. ve Önel, K. (1996). Metal Matrisli Kompozitler: Özellikleri ve Uygulamaları, Metalurji Dergisi, 20(1041), 8-31.

Cura, M. E. (2002). Sıcak Preslenmiş Wc-Co/B₄C Kompozitlerinin Mekanik, Manyetik ve Mikroyapısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çalın, R. (2006). Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelebi Efe, G. F. (2010). SiC Takviyeli İletken Bakır Kompozitlerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelik, M. ve Türker, M. (2005). Al-Cu Esaslı Tozlardan Toz Metalurjisi Yöntemi ile Malzeme Üretimi ve Yaşlandırma Tavrının İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 8(3), 275–279.

Davenport, W. G., King, M. J., Schlesinger, M. E., and Biswas, A. K. (2002). Extractive Metallurgy of Copper. 4th ed. Slovakia: Elsevier.

Deepa, J. P., Resmi, V. G., Rajan, T. P. D., Pavithran, C. and Pai, B. C. (2011). Studies On The Effect of Processing Parameters on Electroless Coating of Copper on Boron Carbide Particles, Transactions of the Indian Institute of Metals, 64(1-2), 47- 51.

Demirel, M. (2007). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni_3Al Metaller Arası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü.

Deniz, M. (2012). Anilinin Oksidatif Polimerleşmesi ile Çeşitli Takviye Malzemeli Kompozitlerin Sentezi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dobrzanski, L. A. (2006). Significance of Materials Science for the Future Development of Societies, Journal of Materials Processing Technology, 175, 133-148.

Doğan, M. (2022). Toz Metalurjisi Yöntem ile Üretilen Al-XCu Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Efe, G. C., Yener T., Altınoy, I., Ipek M., Zeytin, S. and Bindal, C. (2011). The Effect of Sintering Temperature on Some Properties of Cu-SiC Composite, J Alloy Compd 509, 6036-6042.

Ehbil Kriewah, O. A. (2022). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Bakır Matrisli Hibrit Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ekşi A. ve Kurt A. O. (1999, Eylül). Metal ve Seramik Tozlarının Bilgisayar Kontrollü Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi, II. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Ankara, s. 557- 563.

Ercetin A., Ozgun O. ve Aslantas K. (2021). Investigation of Mechanical Properties of Mg5Sn-xZn Alloys Produced Through New Method in Powder Metallurgy , J. Test. Eval, 49, 3506.

German, R. M. (2014). Sinterleme Teorisi ve Uygulamalar ISBN 978-605-133-730-2. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic Ltd Şti, s. 554.

Gökçe, A., Fındık, F. ve Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri - Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys. Engineer and Machinery, 58(568), 21-47.

Groover, M. P. (2010). Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems. ISBN 978-0470-467002. 4th ed. JohnWiley and Sons, Inc. All, USA. s.1025.

Gültekin, D. (2007). Metal Matrisli Kompozit Fren Diski, Balatası Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gündüz, S., Erden, M.A., Karabulut, H. and Turkmen M. (2016). The Effect of Vanadium and Titanium on Mechanical Properties of Micro Alloyed PM Steel, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 55(5), 277-287.

Hiçyılmaz, N. (1999). Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli 118 Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Jena, P. K., Brocchi, E. A. and Motta, M. S. (2001). In-Situ Formation of Cu–Al₂O₃ Nano-Scale Composites by Chemical Routes and Studies on Their Microstructures. Materials Science and Engineering: A, 313(1-2), 180-186.

Wang, J., Zhang, R., Xu, J., Wu, C. and Chen, P. (2013). Effect of the Content of Ball-Milled Expanded Graphite on the Bending and Tribological Properties of Copper–Graphite Composites. Materials and Design 47, 667–671.

Kainer, K. U. (2006). Metal Matrix Composites-Custom-Made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. First Edition. Weinheim: Wiley Publishing.

Kalaycıoğlu, A. S. (2010). SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kalender, M. (2023). Ultra Yüksek Vakum Uygulamalarında Kullanılan Oksijensiz Bakır Alaşımlarının Farklı Kaynak Yöntemleri ile Kaynaklanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karabulut, H. (2011). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Al₂O₃, SiC ve B₄C Takviyeli Al Matrisli Kompozit Üretiminde Mekanik Alaşımlama Süresinin Kompozit Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karadağ, M. (2017). B₄C Partikül Takviyeli Bakır Matrisli Elektrik İletken Kompozit Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Koçyiğit, M. (2023). In-Situ Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Konečná, R. and Fintová, S. (2012). Copper and Copper Alloys: Casting, Classification and Characteristic Microstructures (p. 3-30). Rijeka: InTech.

Korucu, S. ve Soy, G. (2019). Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Tungsten Karbür ve Grafen Takviyelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri Üzerine Bir Araştırma. Düzce Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(3), 1466-1487.

Kök, M. (2001). Al_2O_3 Partikül Takviyeli 2024 Alüminyum Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(2), 131-142.

Kumar, C. K. (1987). Composite Materials. New Mexico: Springer.

Kurbanoğlu, C., Durak, E., Tunay, R. F. ve Karaaslan, R. (2001, Ekim). Değişken Yüklü T/M Esaslı Kaymalı Yataklardaki Sürtünme Kuvvetinin Ölçülmesi, TMMOB IV. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir, s. 33-46.

Kurt, H. (2010). Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Meydanoglu, O., Jodoin, B. And Kayali, E. S. (2013). Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Performance of 7075 Al Matrix Ceramic Particle Reinforced Composite Coatings Produced by the Cold Gas Dynamic Spraying Proces,. Surface and Coatings Technology, 235, 108-116.

Moustafa, S. F., Abdel-Hamid, Z. and Abd-Elhay, A. M. (2002). Copper Matrix SiC and Al_2O_3 Particulate Composites by Powder Metallurgy Technique, Materials Letters, 53(4), 244-249.

Nazik, C. (2013). Alüminyum Matrisli B_4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ngai, T. L., Zheng, W., Li, Y. (2013). Effect of Sintering Temperature on the Preparation of $Cu-Ti_3SiC_2$ Metal Matrix Composite, Progress in Natural Science: Materials International, 23(1), 70-76.

Ning, Y., Patnaik, P.C., Liu, R., Yao, M.X. and Wu, X.J. (2005). Effects of Fabrication Process and Coating of Reinforcements on The Microstructure and Wear Performance of Stellite Alloy Composites, Materials Science and Engineering :A 391,313-324.

Özgün, Ö. and Erçetin, A. (2017). Microstructural and Mechanical Properties of CrC Reinforced Cu Matrix Composites Produced Through Powder Metallurgy Method, Turkish Journal of Nature and Science, 6(1) .

Özgün, Ö., Gülsoy, H. Ö., Findik, F and Yilmaz, R. (2012). Microstructure and Mechanical Properties of Injection Moulded Nimonic-90 Superalloy Parts, Powder Metall. 55, 405-414.

Özgün, Ö., Gülsoy, H. Ö., Yılmaz, R. and Findik, F. (2013). Injection Molding of Nickel Based 625 Superalloy: Sintering, Heat Treatment, Microstructure And Mechanical Properties, J. Alloys Comp. 546, 192–207.

Ögel, B. (1997, Haziran). Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler ve İleriye Dönük Beklentiler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, s. 639-649.

Özaydın, D. (2015). Toz Metalurjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özbek, Y., Yıldız, K. and Alp, A. (2005, Mayıs). Röntgen Atık Sularından Gümüş Tozu Kazanımı, 4.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Sakarya, s. 1221-1227.

Özörak, C. (2019). Bakır Yüzeyinde Üretilen Bakır Karbür Yüzey Kompozitlerinin Fiziksel, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öztürk, P. D. S. ve İçin, A. G. K. (2015). Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuar Föyü Toz Metalurjisi Deneyi, https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_14_00_db383.pdf, s.27.

Pandey (2001). A. B. Metallic Matrices (p. 380-382). ASM International Handbook.

Panitz, J. K. (1998). Construction Materials. The Handbook of Vacuum Science and Technology (p. 446-462), Elsevier;

Picken J. R. (1981). Aluminium Powder Metallurgy Technologyfor High-Strength Applications, Journal of MaterialsScience, 16(6), 1437-1457.

Prosviryakov A. S. (2015). SiC Content Effect on The Properties of Cu–SiC Composites Produced by Mechanical Alloying, J Alloy Compd 632, 707-710.

Qi, Q., Liu, Y., Zhang, H., Li, Y., Liang, H. and Huang, Z., (2015). Processing and Microstructure Characterization of SiCp/Hastelloy (Ni–Mo–Cr) Composites Prepared by Pressureless İnfiltration, Journal of Alloys and Compounds, 639, 330-335.

Ray, Y. and Kannikeswaran, K. (1989). İnter-facial Reaction Kinetics of Al/SiC Composite During Casting, Interfaces in Metal-Ceramic Composites (p. 153-164). The Minerals, Metals and Materials Society.

Soy, U. (2009). SiC/B₄C Takviyeli Metal Matriks Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Taya, M., Arsenault, R.J. (1987). A Comparison Between a Shear Lag Type Model and an Eshelby Type Model in Predicting the Mechanical Properties of a Short Fiber Composite. *Scripta Metallurgica*, 21(3) , 349-354.

TMMOB, (2003). Bakır Raporu. *Metallurji Dergisi*, 133, 3444.

Toptan, F. (2006). Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Torquato, S. (2000). Modeling of Physical Properties of Composite Materials, *International Journal of Solids and Structures*, (37), 411-422.

Uddin, S. M., Mahmud, T., Wolf, C., Glanz, C., Kolaric, I., Volkmer, C., ... and Fecht, H.-J. (2010). Effect of Size and Shape of Metal Particles to Improve Hardness and Electrical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Copper and Copper Alloy Composites, *Compos Sci Technol*, 70(16), 2253–2257.

URL-1 <https://tr.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-sonder-metalle/kupferpulver/>. 15 Ağustos 2024.

URL-2 <http://www.matweb.com/reference/copper-alloys.aspx>. 15 Ağustos 2024.

URL-3 <http://www.memsnet.org/material/>. 15 Ağustos 2024.

URL-4 <https://blog.tekyaz.com/kompozit-malzemelerin-genel-ozellikleri-ve-kullanimi/>. 20 Ağustos 2024.

URL-5 <https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri/>. 20 Ağustos 2024.

URL-6 <https://metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2011/11/metal-matriks-kompozitlerin-uretim-yontemleri.html>. 20 Ağustos 2024.

URL-7 <https://insapedia.com/toz-metallurjisi-nedir/>. 20 Ağustos 2024.

URL-8 <https://www.tozmetallurji.com/>. 22 Ağustos 2024.

URL-9 <https://rahmiunal.net/toz/powdermet.html>. 22 Ağustos 2024.

URL-10 https://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html. 22 Ağustos 2024.

Uzun, D. (2011). Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Sermet Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Xu, Q., Zhang, X., Han, J., He, X. and Kvanin, V. L. (2003). Combustion Synthesis and Densification of Titanium Diboride–Copper Matrix Composite. *Materials Letters*, 57(28), 4439-4444.

Yalçın, E. D. (2018). Za27/Grafen/B₄C Nanokompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yalçınkaya, F. (2018). Toz Metalurji Metodu İle Üretilen Alüminyum Matrisli ve Alümina Takviyeli Kompozit Malzemenin Abrasiv Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yao, Y. T., Jiang, L., Fu, G. F., Chen, L. Q. (2015). Wear Behavior and Mechanism of B₄C Reinforced Mg-Matrix Composites Fabricated by Metal-Assisted Pressureless Infiltration Technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(8), 2543-2548.

Ying, D. Y., ve Zhang, D. L. (2000). Processing of Cu–Al₂O₃ Metal Matrix Nanocomposite Materials by Using High Energy Ball Milling. *Materials Science and Engineering*, 286(1), 152-156.

Yudar, S. (2023). The Examination of Composite Materials as Alternatives to Superalloys in Aircraft Engines. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(3), 585-595.

Zhan, Y. and Zhang, G. (2003). The Effect of Interfacial Modifying on the Mechanical and Wear Properties of SiCp/Cu Composites. *Materials Letters*, 57(29), 4583-4591.

Zhu, J., Liu, L., Zhao, H., Shen, B., and Hu, W. (2007). Microstructure and Performance of Electroformed Cu/Nano-SiC Composite. *Materials and Design*, 28(6), 1958-1962.