

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**Nİ ESASLI KATKI MALZEMELERİNİN MATRİS ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Çağdaş GÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

TUNCELİ – 2022

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**Nİ ESASLI KATKI MALZEMELERİNİN MATRİS ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Çağdaş GÜNEŞ
(1388000025)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

TUNCELİ- 2022

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**Nİ ESASLI KATKI MALZEMELERİNİN MATRİS ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Çağdaş GÜNEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 07/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza	İmza	İmza
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK (Munzur Üniversitesi)	Dr. Öğr. Üyesi Salih AĞAR (Munzur Üniversitesi)	Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN (Fırat Üniversitesi)
DANIŞMAN	ÜYE	ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Çağdaş GÜNEŞ

Danışman
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında desteklerini esirgemedi benimle olan aileme; fikirlerinden, bilim insanı kişiliğinden ve insaniyetinden fazlaca bilgi edindiğim değerli hocam Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca teknik altyapı ve imkânlarından faydalandığım Munzur Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

Çağdaş GÜNEŞ
TUNCELİ-2022



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VII
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ (TM).....	2
2.1. Toz Metalürjisinin Avantajları ve Dezavantajları	3
2.2. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri.....	3
2.2.1. Mekanik üretim yöntemleri	4
2.2.1.1. Talaşlı üretim.....	4
2.2.1.2. Mekanik öğütme	5
2.2.1.3. Mekanik alaşımlama.....	6
2.2.2. Kimyasal yöntemler.....	7
2.2.3. Elektroliz yöntemi	8
2.2.4. Atomizasyon yöntemi.....	8
2.3. Toz Karakterizasyonu.....	9
2.3.1. Tozların fiziksel özellikleri.....	9
2.3.2. Toz tane boyut ölçümü	10
2.3.2.1. Elek analizi	10
2.3.2.2. Sedimentasyon.....	11
2.3.2.3. Işık huzmesi tekniği.....	11
2.3.2.4. X ışını yöntemi	11
2.3.2.5. Mikroskopik analiz	11
2.3.3. Tane şekli.....	12
2.3.4. Özgül yüzey alanı	12
2.3.5. Görünür yoğunluk	12
2.3.6. Akış hızı.....	14
2.4. Tozların Kimyasal Özellikleri	14
2.5. Toz Şekillendirme	14
2.5.1. Harmanlama ve karıştırma.....	15
2.5.2. Yağlayıcılar ve bağlayıcılar	15
2.5.3. Toz sıkıştırma	16
3. NİKEL ESASLI ALAŞIMLAR.....	19
3.1. Nikelin Kullanım Alanları	20
3.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Mikro yapıları	21
3.2.1. Gama matris (γ)	21
3.2.2. Gama prime (γ').....	21
3.2.3. Gama double prime (γ'')	21
3.2.4. Eta fazı (η)	22
3.2.5. TSP (topolojik sıkı paket) fazları.....	22
3.3. Nikel Alaşım Malzeme Grupları	22
3.3.1. Inconel alaşımlar.....	23

3.3.2. Monel alaşımlar	23
3.3.3. Hastelloy alaşımlar	24
3.3.4. Nimonic alaşımlar	24
3.4. Nikel Esaslı Süperalaşımların Üretimi	24
4. KOBALT	26
4.1. Kobalt Kullanım Alanları	26
4.2. Kobalt Alternatifleri	27
5. SİNERLEME	28
5.1. Sinterleme Aşamaları	29
5.2. Sinter Parametrelerinin Özelliklere Etkisi	30
6. SICAK PRESLEME (SP) YÖNTEMİ.....	31
6.1. Kıvılcım Plazma Sinterleme (SPS)Yöntemi.....	34
7. MATERYAL METOD.....	36
7.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	36
7.2. Toz Karışımlarının Hazırlanması	39
7.3. Numunelerin Üretimi.....	40
7.4. Mikroyapı İncelemeleri	42
7.5. Sertlik Ölçme İşlemleri.....	44
7.6. Yoğunluk Ölçme İşlemi	45
7.7. Üç Noktalı Eğme Testleri (TRS)	46
7.8. Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	47
7.9. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri.....	48
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	49
8.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları	49
8.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	50
8.3. Mikroyapı İncelemeleri	52
8.4. 3 Noktalı Eğilme (TRS) Deneyi Sonuçları.....	62
8.5. XRD Ölçüm Sonuçları.....	66
9. SONUÇLAR.....	70
10. ÖNERİLER.....	71
11. KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Toz Metalürjisi Üretim Şeması.....	2
Şekil 2.2. Bilyeli öğütme değirmeninin şematik görünümü.....	5
Şekil 2.3. Mekanik alaşımlama yöntemi.....	7
Şekil 2.4. Kimyasal yöntem ile demir tozu üretim şeması.....	7
Şekil 2.5. Elektroliz Yöntemi.....	8
Şekil 2.6. Atomizasyon yöntemi ile demir ve çelik tozu üretim şematığı.....	9
Şekil 2.7. Bazı Toz tane şekilleri.....	12
Şekil 2.8. Karıştırıcı modelleri.....	15
Şekil 2.9. Metal presleme süreci.....	17
Şekil 2.10. Haddeleme işlemi.....	17
Şekil 2.11. Nem kılıflı ve kuru kılıflı izostatik presleme.....	18
Şekil 5.1. Sinterleme sürecinde gözeneklerin yuvarlak hale gelmesi.....	29
Şekil 5.2. Sinterleme aşamaları.....	30
Şekil 6.1. İndüksiyon ile kalıbın ısıtılması.....	32
Şekil 6.2. Endirekt ısıtma tekniği.....	33
Şekil 6.3. Direkt ısıtma tekniği.....	33
Şekil 6.4. Plazma Sinterleme.....	34
Şekil 7.1. Deneysel işlem akış şeması.....	35
Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan tozların SEM görüntüleri.....	37
Şekil 7.3. Numunelerin karıştırılması için kullanılan bidonlar.....	38
Şekil 7.4. 3D Toz Mikseri.....	39
Şekil 7.5. Toz numune karışımlarının konulduğu bölmeli grafit kalıp.....	40
Şekil 7.6. Vakumlu sıcak pres makinesi.....	41
Şekil 7.7. Numune parlatma cihazı.....	41
Şekil 7.8. Sinterleme sonrasında elde edilen numune yüzeylerinin temizlenmiş hali.....	42
Şekil 7.9. Numune kesme cihazı.....	42
Şekil 7.10. Epoksi reçineye alınmış numuneler.....	43
Şekil 7.11. Sertlik ölçüm cihazı.....	44
Şekil 7.12. Yoğunluk ölçümünde kullanılan test düzeneği.....	44
Şekil 7.13. Üç noktalı eğme testlerinin yapıldığı Shimadzu marka universal test cihazı.....	46
Şekil 7.14. SEM analizlerinin yapıldığı elektron mikroskobu.....	46
Şekil 7.15. Bakır kablo bağlanan epoksi reçineye alınmış numuneler.....	47
Şekil 7.16. Numunelerin X-ışını difraksiyon desenlerinin alındığı XRD cihazı.....	47
Şekil 8.1. Üretilen metal kompozit numunelerinin katkılama oranına karşılık sertlik grafikleri.....	49
Şekil 8.2. Üretilen metal kompozit numunelerinin yoğunluklarını gösteren grafikleri.....	51
Şekil 8.3. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	53
Şekil 8.4. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	54
Şekil 8.5. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan 250x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	55
Şekil 8.6. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	56
Şekil 8.7. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile kobalt (Co) katkılı numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	57

Şekil 8.8. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile kobalt (Co) katkılı numunelerinin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	58
Şekil 8.9. Referans N1 ile 9062 katkılı N2, N3, ve N4 numunelerinin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	59
Şekil 8.10. Referans N1 ile 9045 katkılı N5, N6, ve N7 numunelerinin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	60
Şekil 8.11. Referans N1 ile kobalt katkılı N8, N9, ve N10 numunelerinin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	61
Şekil 8.12. N1 (%85Fe+%10Ni+%5Cu), N2 (N1+%10 (9062)), N3 (N1+%20(9062)), N4 (N1+%30(9062)), numunesinin 3 noktalı eğilme deneyi sonucu grafiği.....	63
Şekil 8.13. N1 (%85Fe+%10Ni+%5Cu), N5 (N1+%10(9045)), N6 (N1+%20(9045)), N7 (N1+%30(9045)), numunesinin 3 noktalı eğilme deneyi sonucu grafiği.....	64
Şekil 8.14. N1 (%85Fe+%10Ni+%5Cu), N8 (N1+%10Co), N9 (N1+%20Co), N10 (N1+%30Co), numunesinin 3 noktalı eğilme deneyi sonucu grafiği.....	66
Şekil 8.15. Üretilen N1 (Base Fe Ni Cu alaşım) numunesinin XRD grafiği.....	67
Şekil 8.16. Üretilen 9062 katkılı N2, N3 ve N4 metal kompozit numunelerinin XRD grafikleri.....	68
Şekil 8.17. Üretilen 9045 katkılı N5, N6 ve N7 metal kompozit numunelerinin XRD grafikleri.....	68
Şekil 8.18. Üretilen kobalt katkılı N8, N9 ve N10 metal kompozit numunelerinin XRD grafikleri.....	69

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Mekanik ve hidrolik preslerin genel özellikleri.....	17
Tablo 3.1. Süper alaşımlarda alaşım elementleri yüzde (%) kompozisyon miktarları.....	19
Tablo 3.2. Süper alaşımların sınıflandırılması.....	20
Tablo 3.3. Bazı Ni esaslı alaşımların isimleri ve kimyasal değerleri.....	23
Tablo 7.1. Deneylerde kullanılan malzemeler.....	36
Tablo 7.2. Deneyde kullanılan nikel esaslı alaşım tozlarının içerikleri.....	36
Tablo 7.3. Deneylerde kullanılan toz karışımları.....	38
Tablo 8.1. Numunelerin öz kütleleri ve porozite oranları.....	51
Tablo 8.2. Üretilen deney numunelerinin gerilme (MPa) ve yüzde uzama (%) değerleri...62	

SEMBOLLER LİSTESİ

B	: Boron
Co	: Kobalt
°C	: Sıcaklık birimi (derece Celsius)
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Cm	: Uzunluk birimi (santimetre)
Dk	: Dakika
Dev	: Devir
E	: Enerji
Fe	: Demir
Gr	: Gram
HIP	: Sıcak izostatik presleme
HP	: Sıcak presleme
Kg	: Kilogram
kN	: Kuvvet birimi (Kilo Newton)
mm	: Uzunluk birimi (milimetre)
MPa	: Basınç birimi (Mega pascal)
Ni	: Nikel
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
Sn	: Saniye
SPS	: Spark plazma sinterleme
TM	: Toz Metalürjisi
XRD	: X-Ray Diffraction
Al	: Alüminyum
Ti	: Titanyum

ÖZET

Her geçen gün daha fazla yayılmaya başlayan Toz Metalurjisi (TM), günümüzün endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. TM ile üretilen ürünler, proseslerinin daha az sayıda işlem aşaması gerektirmesi ve nispeten daha düşük olan maliyetleri gibi avantajlarından dolayı birçok endüstri tarafından tercih edilmektedir. Son yıllarda farklı sinterleme teknolojilerinin gelişmesi, TM kullanım alanlarını yaygınlaştırmakta ve günümüzde kullandığımız TM ile üretilmiş olan ürünlerin sayısını artırmaktadır.

Makine parçaları, kompozit malzemeler, cerrahi implant ve kesici takımlar, yüksek teknoloji malzemeleri ve diğer pek çok ürünün üretilmesinde tercih edilen yöntem olmuştur. Ayrıca tersine mühendislik uygulamalarında CAD ve CAM sistemlerinin gelişmesine bağlı olarak, kısa sürede hedef ürüne doğrudan ulaşılması ve geleneksel imalat yöntemlerine daha az veya hiç ihtiyaç duyulmadığı için artık yüksek bütçeli üretim parkının ve insan hata faktörünün önüne geçilmesi sağlanmıştır. Eklemeli imalat teknolojisinin dünya ve ülkemizde daha popüler olması nedeniyle TM yöntem ve tekniklerinin insan hayatına daha çok etki edeceği aşîkârdır.

Makine üretim yöntem ve tekniklerinin gelişmesinin yanı sıra ham madde olarak kullanılan tozların gelişimi de kimyasal, mekanik, şekilsel ve yöntemsel olarak devam etmektedir. TM imalat yönteminin imal edilecek numuneye göre iyi seçilmesi kadar seçilen hammaddenin mekanik fiziksel ve kimyasal özellikleri de ürün kalite ve kullanımını önemli oranda etkileyen kilit faktördür. TM ürün imalatında kullanılan hammaddenin türü ve cinsi de birim maliyeti etkileyen en önemli faktördür. Kobalt (Co) TM işlemlerinde ve birçok yüksek teknoloji ürünü (batarya, miknatıs, kesici takım vb.) imalatında mekanik özellikleri bakımından oldukça etkili ürünlerden biridir. Birçok firma Co yerine kullanılabilecek alternatif ürünlerin geliştirilmesi için çalışmalar yapmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, mekanik açıdan Co'ya alternatif olabilecek Nikel (Ni) esaslı iki adet alaşımlı ticari toz malzeme kullanılarak matrisin mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Ni esaslı 9062 ve 9045 ticari adlı katkıları mekanik özellikleri iyileştirerek sertlik ve kırılma mukavemetlerini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Kullanılan Ni esaslı alaşım tozların Co alternatifi olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fe esaslı matris, toz metalurjisi, sıcak presleme, süper alaşımlar

ABSTRACT

Investigation of The Effect of Ni-Based Additives On Matrix Properties

Powder Metallurgy (TM) that has started to spread more and more day by day is very widely used in today's industry. The products produced with TM are preferred by many industries due to their advantages such as needing less number of operation steps in their processes and relatively lower costs. The development of different sintering technologies in recent years are widespreading the use areas of powder metallurgy and increasing the number of powder metallurgy products we use today.

It has been the preferred method in the production of machine parts, composite materials, surgical implants and cutting tools, high-tech materials and many other different products. In addition, depending on the development of CAD and CAM systems in reverse engineering applications, it is reached the target product directly in a short time and is less or no needed for traditional manufacturing methods, thus it is now possible to avoid high-budget production park and human error factor. Since additive manufacturing technology is more popular in the world and in our country, it is obvious that powder metallurgy methods and techniques will affect human life more.

In addition to the development of machine production methods and techniques, the development of powders used as raw materials continues as chemical, mechanical, formal and methodological, too. The mechanical, physical and chemical properties of the selected raw material are the key factors that significantly affect the product quality and use, as well as the selection of the TM manufacturing method according to the sample to be manufactured. The type and class of raw material used in TM product manufacturing is the most important factor affecting the unit cost. Cobalt (Co), in terms of its mechanical properties, is one of the most effective products in TM processes and in the manufacture of many high technology products (battery, magnet, cutting tool, etc.). Many companies are working on the development of alternative products that can be used instead of Co.

In this study, the effects of using two Nickel (Ni) based commercial powder materials, which can be mechanical alternatives to Co, on the mechanical and microstructural properties of the matrix was investigated. According to all the results from the experimental works, it was concluded that the commercial Ni-based additives named 9062 and 9045 increased the hardness and fracture strength by improving the mechanical properties. Thus, it is thought that the Ni-based alloy powders used as additives in this work can be used as alternative to Co.

Keywords: Fe based matrix, powder metallurgy, hot pressing, superalloys

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ihtiyaçlarımızın artışını hızlandırmıştır. Zamanla elde edilen çözümlerin daha uzun ömürlü olması ve teknolojiye uygun ilerlemesini gerektirmiştir. Malzemeler üzerindeki çalışmalar arttıkça, mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecek ve daha dayanıklı alaşımlar bulunmuştur.

Ni, kaplama ve döküm sektörleri için önemli bir metaldir. Ni belirli özellikleri sayesinde demirden daha avantajlıdır. Demire göre ergime noktası (1454 °C) fazla olup demirden daha hafif ve daha az serttir. Ergime sıcaklığı yüksek olduğundan dolayı demire göre zor bir işleme sürecine sahiptir. Ni' in sahip olduğu özgül ağırlık 25 °C'te 8,8 kg/dm³ dir. 25°C ile 600°C arasında lineer uzama katsayısı $13,3-16,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 'tir (Oğuz, 1989; Liao ve ark., 2012).

Ni korozyon karşısında demire göre dayanıklı olması nedeniyle teknolojik olarak kullanılması daha uzun ömürlüdür ve hassas noktalarda ihtiyaç duyulur. Ni'in en fazla kullanım yeri elektro kaplama adı verilen, genelde nikelaj olarak nitelendirilen alandır. Ni korozyon karşısında dayanıklı bir tabaka oluşturur. Bu tabakanın üstü krom tabakası ile kaplanabilir. Çoğunlukla Ni esaslı süper alaşımın hacimsel olarak % 38-76 oranında Nikel(Ni), %27' den fazla Krom (Cr) ve %20 Kobalt (Co) bulunabilir (Ezugwu, 2003; Zhang ve ark., 2021).

Metal matrisli malzemelerin üretim sırası fiber takviyesinin artışına bağlı olarak üretim maliyetini artırmakta ve üretim karmaşık bir hale girmektedir. Üretim sistemleri metallerin üretimine oranla daha maliyetli teçhizatlar ile sağlanır.

Metal matrisli malzemelerin üretim yöntemleri farklılık gösterebilir. Üretici, malzemedan istediği özelliklere göre değişebilecek farklı üretim tekniklerini uygulamalıdır. Bu özelliklerden bazıları; ürünün boyutları, kullanım sıcaklığı, malzeme şekli, maliyeti, matris malzemesiyle takviye edilen malzemenin birbirlerine uyumu ve olası tepkimeleri, matris ile takviye malzemesi arasındaki ara yüzey bağlantısının eksiksiz sağlanabilmesidir.

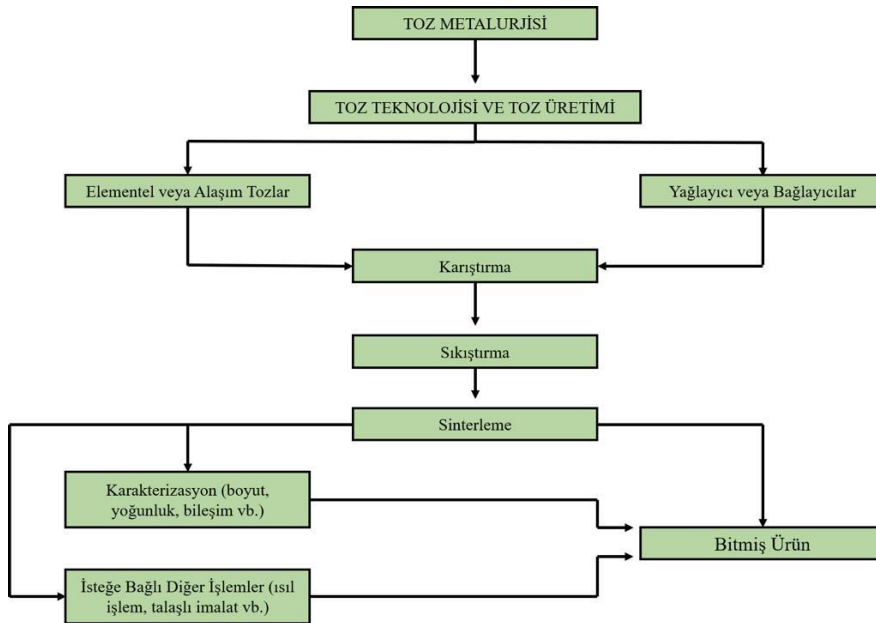
2. TOZ METALURJİSİ (TM)

TM yöntemleri kullanılarak metal, metal alaşımları, plastik veya seramik malzemeleri toz haline getirmek, toz haline getirilen malzemelerin basınç kuvveti uygulayarak şekillendirilmesi ve aynı anda ısıtılma işlemi yardımı ile dayanımı artırılması işlemidir (Hiçyılmaz, 1999; Danninger, 2018; Bai ve ark., 2021).

TM kullanım alanları fazlasıyla geniştir. Diş dolgusu, kendinden yağlama özelliğine sahip yataklar, kesici takımlar, otomotiv sektöründe güç aktarma dişlileri, zırh delici mermiler, miktanılar, tungsten lamba teli, testereler, iş makinesi parçaları, şarj edilme özelliğine sahip piller ve jet motoru parçalarında TM kullanılır.

TM imalat yöntemindeki üretim şeması Şekil 2.1’ de ki akış şemasında gösterilmiştir. İlk etap olarak numuneyi meydana getirecek olan partiküller üretilir. Üretim aşaması gerçekleştirildikten sonra partiküller karışımın içerisine bırakılan yağlayıcı maddeler ile homojen bir karışım oluncaya kadar karıştırılır. Oluşturulan bu homojen karışım kalıbın içerisindeki kalıp boşluğuna doldurulur ve kontrollü bir basınç altında ısıtılma işlemi yardımıyla sinterlenir.

TM yöntemiyle elde edilen parçalar birçok endüstri alanı da kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Toz metalurjisi üretim şeması

2.1. Toz Metalurjisinin (TM) Avantajları ve Dezavantajları

TM teknoloji ile gelişen ve gelişmeye devam eden bir imalat metodudur. İleri teknoloji cihazlarda kullanılacak malzemelerin üretimi için oldukça uygundur. Tozlar üretilirken harcanan enerji plastik şekillendirme veya demir döküm işlerine göre daha azdır. Büyük hacimli geleneksel alaşım malzemeler için döküm yöntemi ekonomiktir. Fakat parça hacmi küçüldükçe ve parça üretim isteği arttıkça seri üretim ihtiyacı doğacağı için TM ile yapılan üretim teknikleri döküm ve plastik şekillendirme yöntemlerinden daha da avantajlı hale gelir. Bu parametreler detaylı incelendiğinde, TM yönteminin, dövme ve döküm gibi yöntemlere göre bir takım avantajları ve bazı sınırlamaları mevcuttur (Ayata, 2014; Bai ve ark., 2021).

TM yönteminin avantajları aşağıdaki maddelerdir;

- Malzemede oluşan kaybın az olması,
- Üretim hızının yüksek olması,
- Belirli düzeyde geçirgenlik,
- Üretilen parçaların üstün mikro-yapı özelliklerine sahip olması,
- Üretimde düzgün yüzey elde edilmesi,
- Düşük maliyete sahip olması,
- Karmaşık geometriye sahip parçaların üretim kolaylığı,
- Yüksek sıcaklığa dayanaklı metallerin imalatı,
- Metal alaşımların üretimi.

TM yönteminin dezavantajları aşağıdaki maddelerdir;

- Toleranslar eski tip talaşlı üretimlere göre daha fazladır,
- Karmaşık parçaların üretimi sınırlıdır,
- Seri üretim olmadığı takdirde maliyetli sayılabilir,
- Tozların kalıp içindeki akışkanlıkları daha fazladır.

2.2.Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri

TM sayesinde üretilen parçaların kullanım alanlarının sayısı teknolojinin gelişimi ile birlikte artmıştır. Bu kullanım alanlarına örnek olarak; havacılık sektörü, elektrik iletim

elemanları, silahlar ve mermiler, yataklar, otomobil sektörü, yeniden doldurulmaya elverişli piller ve uzay sektörü denebilir.

Tozun üretim yönteminin bilinmesi, tozun fiziksel özelliklerinin önceden bilinmesini veya tahmin edilmesini kolaylaştırır. Her üretim tekniğinin farklı özellikleri, sonuçları ve maliyetleri vardır. TM metodunda, ortalama boyutu 1 μm 'den 200 μm 'ye kadar olan partiküllere toz denir. Elde edilen tozların yüzey durumu, şekilleri ve boyutları birbirinden farklılık gösterebilir. Bu durum üretim için değişiklik gösterir. Toz üretimi için kullanılan yöntemler;

- Mekanik üretim,
- Elektroliz yöntemi ile üretim,
- Kimyasal üretim,
- Atomizasyon yöntemi ile üretimdir.

Toz üretiminin ardından toz karakterizasyonu, tozların fiziksel ve kimyasal özellikleri, sinterleme, presleme ve uygulama alanlarından bahsedilecektir.

2.2.1. Mekanik üretim yöntemleri

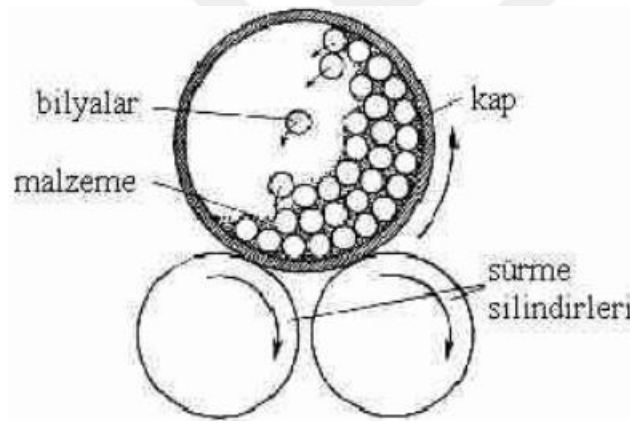
Mekanik üretim için 3 yöntem tercihi oluşur. Bu yöntemler; aşındırarak öğütme, mekanik alaşımlama ve talaşlı üretimdir.

2.2.1.1. Talaşlı üretim

Talaşlı üretim tekniği ile tornalama, taşlama ve frezeleme şeklinde talaş malzemeden kaldırma yöntemleri kullanılarak iri ve karışık tozlar üretilirebilir. Üretilen tozlar, öğütme işlemiyle birlikte daha ince bir yapıya dönüşebilir. Toz özelliklerinin kontrolündeki yağlanma, kir tutma, zorluk, oksitlenme ve diğer maddelerin hurdaları ile karıştırılarak kirlenme sonucu problemler olabilir. Yüksek karbona sahip çelik tozları talaşlı üretim yöntemiyle üretilir. Oluşan talaşların iri olması ve üretimin uzun sürmesi nedeniyle hem de üretim esnasındaki oluşan sıvılarla birlikte kirlenme olması dezavantajlarındandır.

2.2.1.2. Mekanik öğütme

Bu öğütme metodu ile makro boyutlu katı faz formunda bulunan malzemelere birtakım teknikler ile öğütme işlemi uygulanarak katı toz formuna getirilir. Mekanik öğütme yöntemiyle toz üretimlerindeki öğütme (grinding) işlemleri bilyeli, girdaplı, kırıcı veya taraklı değirmenlerle yapılabilmektedir. Bunlar arasında en sık kullanılan öğütme işlemi bilyeli silindirik değirmenlerin (ball milling) kullanıldığı işlemlerdir. Bu bilyeli değirmenler büyük (30-60 mm) çaplı bilyelerin bulunduğu dönen bir kaptan oluşmaktadırlar. Bu işlemlerde kullanılan bilyeler yapıldıkları malzemelerin öğütme işleminde öğütülen malzemeye karışmaması için çok sert ve aşınmaya (korozyona) karşı dirençli malzemelerden yapılır (German, 2005; Kartikasari ve ark., 2021). Şekil 2.2’de bilyeli değirmenin şematik bir görünümü verilmiştir.



Şekil 2.2. Bilyeli öğütme değirmeninin şematik görünümü (German, 2005)

Öğütme işlemlerinin yapıldığı değirmenlerin içerisine öğütülmek için konulacak malzemelerin miktarları, öğütme işlemini yapan değirmen içinde bulunan öğütücü bilyeler dahil değirmen kabın tüm hacminin yarısından daha büyük olmaması gerekmektedir.

Değirmen öğütme işlemi için içine konulan bir malzemeyi, aynı anda hem dönüp hem de titreştirerek bilyelerin aradaki malzeme ile birlikte birbiriyle çarpışmalarını sağlar, bilyeler birbirleriyle darbe, burulma, öğütme ve sıkıştırma gibi çarpışma etkilerinden biri ya da bazılarını birlikte yaparak aralarında kalan malzemenin daha küçük parçalara ayrılmasına neden olur. Öğütme işleminin sonunda öğütülen malzeme küçük partikül yapılı toz tanecikleri formuna getirilmiş olur (German, 2005; Kartikasari ve ark., 2021).

2.2.1.3. Mekanik alaşımlama

Mekanik alaşımlama yöntemi, bilye ve tozların karışımı kullanılarak belirli öğütücü ya da yüksek enerjiye sahip bir değirmende mikro parçacıklı kompozit toz üretim işlemidir. Mekanik alaşımlama yapılırken, metal tozuna 4 farklı işlem uygulanır. Bu işlemler; karışma, soğuk kaynak, kırılma ve tekrar kaynaktır. İşlemler tekrarlandıkça meydana gelen malzeme içerisindeki parçacıkların homojen dağılımı sağlanır. Öğütme işlemi sırasında sıcaklık artışıyla birlikte tozların alaşımlanması hızlanır. Mekanik alaşımlama başarı yüzdesi en yüksek öğütme işlemidir.

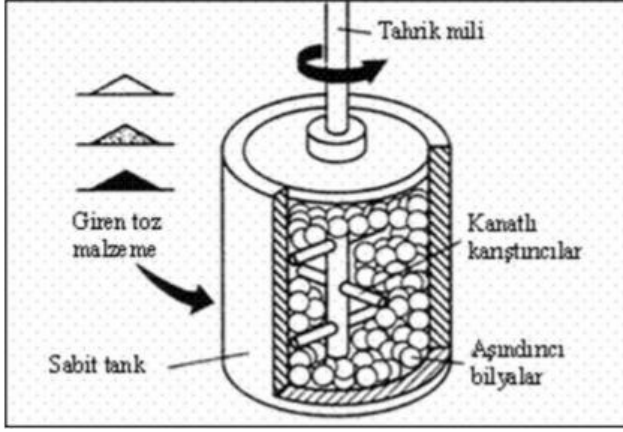
Mekanik alaşımlama, belirli tozların hesaplanmış oranlarda karıştırarak öğütücü madde ile beraber öğütme alanına eklenmesiyle başlar. İşlem, karışımın kararlı bir duruma sahip oluncaya kadar sürer. Üretilen toz kalıp içerisinde basınç ile sıkıştırılır ya da ekstrüde edilir. Ardından homojenleştirme ısı yöntemi uygulanır. Bu yöntemlerde mekanik alaşımlama süresi, tozların yapısı, öğütücü malzeme çeşidi ve üretim süresince içinde bulunan atmosfer gibi değişkenler mekanik alaşımlamanın dikkat çekici parametreleridir.

Mekanik alaşımlama yöntemi, türbin endüstrisi alanında oldukça yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecek Ni bazlı malzemelerin üretilmesine olan ihtiyaçtan dolayı geliştirilmiştir. Birkaç denemeden sonra, şu anda mekanik alaşımlama olarak bilinen yüksek enerjili bilyeli öğütme en uygun işleme yöntemi olarak seçilmiştir. Endüstride demir ve nikel esaslı bir çok sayıda farklı tür ve özellikte alaşımlar kullanılmaktadır.

Mekanik alaşımlama 3 zayıf yöne sahiptir. Bunlar; kirlenme, maliyet ve birleştirme olarak belirtilebilir. Toz kirlenmesi beraberinde bazı problemleri getirir. Kirlenmeyi azaltmak için öğütücülerin boş bir hazneye ya da etkisiz bir gazla doldurulmuş hazneye konulması veya yüksek saflığa sahip bir gaz ortamında tozların öğütülebildiği gazlı ortam içermelidir. Bu durumlar maliyeti artırabilir. Kirlenmeyi önlemek için aynı malzemedan bilyeler ve aynı malzemedan hazne kullanılabilir.

Süper alaşımların sahip olduğu önemli bir dezavantaj, yüksek sıcaklıklarda kullanım durumunda ömürlerinin kısalmasıdır.

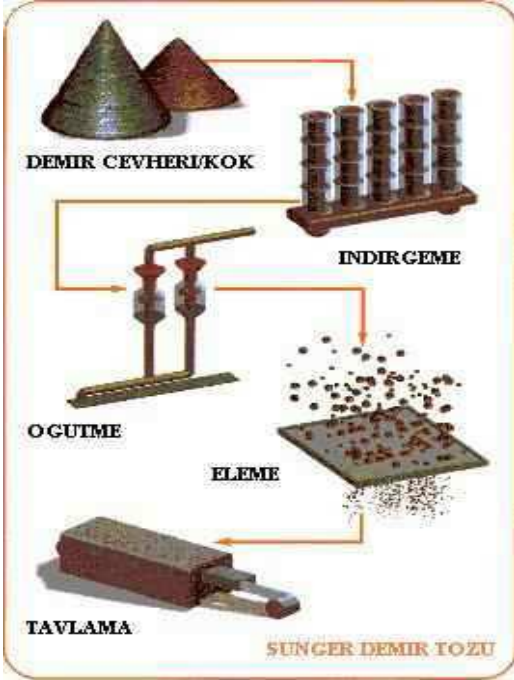
Mekanik alaşımlama yönteminde genelde saf tozlar ve oksitler kullanılır. Saf tozların ve oksitlerin boyutu 1-200 µm arasında farklılık gösterebilir. Toz ilk durumda yumuşak haldedir.



Şekil 2.3. Mekanik alaşımlama yöntemi (Lawley, 1992)

2.2.2. Kimyasal yöntemler

Metal bazlı tozların kimyasal metodu ile üretimi, metal oksitlerin (Mo, Cu, Co, Fe, W ve Ni) Karbon monoksit (CO) ya da hidrojen (H) vb. indirgeyici gazlar yardımıyla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenme sürecidir.

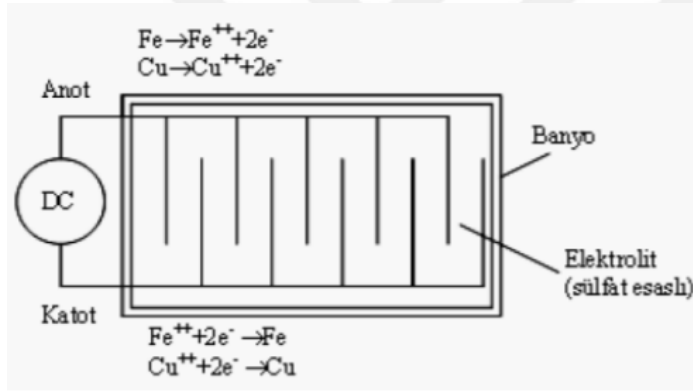


Şekil 2.4. Kimyasal yöntem ile demir tozu üretim şeması (Yaşa, 2008)

2.2.3. Elektroliz yöntemi

Elektroliz yöntemi ile oksitlerden meydana gelen tozlar katoda akım vererek elektrolitik banyoda çökertilir veya kırılabilme özelliğinin uygun olduğu durumda katot bölgesinde toplanır. Genelde banyo içi kurşun kaplıdır. Elektrolitik için bakır sülfat kullanılabilir veya sülfürik asit kullanılır. Anot bakır olur. Katotsa antimonlu kurşundur. Elektroliz yöntemiyle genelde bakır tozları imalat edilir.

Elektroliz yöntemini uygularken, elektrolitik banyoda çökertme işlemi uygulanan metal öğütülerek incecik toz durumuna getirilir. Üretilen toz haldeki malzeme yıkanmaya alınır ve temizlenir. Kurutma, oksitlenme olmaması adına asal gazlar ortamında yapılır. Elektroliz yöntemi uygulanırken oluşan toz parçaları dendritik bir yapı olarak kısa süreli oluşabilir. Elektrolitik yöntemle oluşturulan tozların en büyük avantajı iyi sıkıştırılabilirler.



Şekil 2.5. Elektroliz yöntemi (Baksan ve Gürler, 2003)

2.2.4. Atomizasyon yöntemi

Atomizasyon yöntemi, akışkan haldeki metalin mekanik olarak veya belirlenmiş hızla sıvı ya da gaz akımıyla parçalanması işlemidir. Atomizasyon yöntemi diğer toz üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında metal veya alaşım tozlarının üretilmesinde en önde gelen yöntemdir. Metalik özelliğine sahip tozların %90'ı atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Eriyik malzemenin ince şerit içinde akıtılması ve gaz jeti veya su yardımıyla çok ince parçalara ayrılırken soğutulması atomizasyon yönteminin temel prensibidir. En çok tercih edilen gaz elementleri azot ve argondur. Atomizasyon yönteminde en çok su soğutması kullanılır. Bunun nedeni, maliyet ve zaman açısından daha avantajlıdır.



Şekil 2.6. Atomizasyon yöntemi ile demir ve çelik tozu üretim şematığı (Saritaş ve Doğan, 1994)

Gaz, su, eriyik savurma, döner pota, döner disk ve döner elektrod atomizasyon yönteminin alt basamaklarıdır. Atomizasyon türüne göre tozların karakteristiği farklılık gösterir. Nikel alaşımlar için genelde asal gaz atomizasyonu, su atomizasyonu ve savurmalı atomizasyon tercih edilebilir.

2.3. Toz Karakterizasyonu

TM metotları ile üretilen toz malzemelerin kendine özel özelliklerinin bilinmesi ve bu özelliklerin gerekli testlerinin yapılmasının ardından üretilecek son ürün olarak toz metal ürünlerinin üretim süresindeki aşamalarında etkilidir. Bu sebeple tozların belirli öneme sahip özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bu özellikler iki başlık altında toplanır. Bunlardan biri fiziksel özellikler diğeri kimyasal özelliklerdir.

2.3.1. Tozların fiziksel özellikleri

Tozların fiziksel özellikleri beş tanedir. Bunlar;

- Tane boyutu
- Tane şekli

- Özgöl yüzey alanı
- Görünür yoğunluk
- Akış hızı

Yukarıda belirtilen bu beş özellikten toz şekli, toz boyutu ve özgöl yüzey alanı tozların ham yoğunluğuna, sinterleme işleminin ardından dayanımlarına ve sıkıştırılma ihtimaline etki etmektedir. Toz şekli ve toz tane boyutu metal tozlarının en önemli iki özelliği olarak sayılabilir. Tozların tane şeklinin tespiti ışın ve elektron mikroskobu yardımı ile yapılmaktadır. Toz tane şekli; tozların akışı, ham mukavemeti, sinterlenebilirlik durumu, gerginlikleri, görünür yoğunluğu vb. gibi özelliklerini etkilemektedir. Toz tane şekli, tek boyutlu, iki boyutlu (dentritik) ve üç boyutlu (pul) olarak sınıflandırılabilir.

Toz tane şekli küresel olan tozların akışkanlığı yüksektir. Pul şeklindeki olan tozların ise akışkanlığı iyi seviyede değildir. Görünür yoğunluğu en fazla olan tozlar küresel tozlardır. Köşeli, pullu ve gözenekli tozların görünür yoğunluğu düşüktür.

2.3.2. Toz tane boyut ölçümü

Toz tane boyut ölçümü birden fazla farklı teknikler yardımıyla yapılır. Toz ölçümünde uygulanan parametrelerin değerleri birbirinden farklı olduğu için her toz ölçüm yönteminde farklı sonuçlar çıkabilir. Tane boyutu ölçümü için kullanılan cihazlarının çoğu genelde sadece bir geometrik şekli ölçer. Standart olarak toz şeklinin küresel olduğu kabul edilir ve bu şekilde ön ölçüm yapılır. En yaygın kullanılan teknikler; elek analizi, sedimentasyon, ışık huzmesi, X – ışınları, mikroskobik analizdir.

2.3.2.1. Elek analizi

En fazla tercih edilen tane boyutu ölçüm tekniğidir. Kullanılan elekler metal veya ipek tellerden üretilmiştir. Belirli bir alandaki mevcut delik sayısı eleğinin özelliğini gösterir. Birim alandaki delik sayısına Meş (mesh) denir. Elek boyutu bir inç içinde bulunan tel sayısı ile belirlenir. Tozun gerçek büyüklüğü ölçülemez. Sadece elek boyutuna göre büyüklüğü veya küçüklüğü gözlenir.

2.3.2.2. Sedimentasyon

Kelime anlamı çökmedir. Bu yöntem çoğu zaman su gibi sıvıların içinde gerçekleştirilir. Öncelikle tozlar bir çökme tüpü içerisine alınır. Dibe çöken tozun çökme süresine göre hacim ve ağırlık ölçümleri yapılır. Yaklaşık 1 ila 20 mikron arasındaki tozların ölçümü için kullanılabilir. Farklı bileşime sahip tozların sedimentasyon ile ölçümü yanlış sonuçlar verebilir. Su kabı içinde demir tozu ölçümü önerilmez.

2.3.2.3. Işık huzmesi tekniği

Toz tane boyutu ışık huzmesinin açısına ve şiddetine bağlı olarak belirlenmesi yöntemidir. Bu teknikte izlenen yol, akışkan maddenin bir birinden kopmuş taneciklerle beraber detektör sisteminin tam önünden geçirilir. Kırılan ışığın şiddeti ne kadar fazla olursa tanecik çapı o kadar küçük olur yani ters orantılıdır. Kırılan ışığın şiddeti bilgisayar ortamında ölçülerek tanecik boyut hesabı yapılır.

2.3.2.4. X ışını yöntemi

Toz tanelerinin boyutunu belirlemek için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Çok küçük boyuttaki tozların ölçümünde tercih edilir. Özellikle 50 nanometreden küçük boyuttaki tozların ölçümünü sağlar. Doğruluk yüzdesi oldukça fazladır ve güveniliridir.

2.3.2.5. Mikroskopik analiz

Taramalı elektron mikroskobu, geçirmeli elektron mikroskobu ve optik yansıtımlı ışık tekniklerinin sıkça kullanıldığı bir yöntemdir. 50 mikrondan küçük toz parçalarının büyüklüğünü ve fiziksel özelliklerini öğrenmemizi sağlar. Son dönemde elektron mikroskobunun kullanımı artmıştır. Bunun nedeni ölçümlerin sağlıklı yapılması ve birden fazla bilgi edilmesidir.

2.3.3. Tane şekli

Tozların gözlemlenen belirli şekilleri vardır. Bu şekiller aşağıdaki Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Bazı toz tane şekilleri (Ünal, 2022).

2.3.4. Özgül yüzey alanı

Yüzey alanı, tozun şekline ve tozun büyüklüğüne bağlı bir değişkendir. Özgül yüzey alanı, birim kütle başına düşen alandır. Küresel tozlarda toz çapı küçüldükçe “özl yüzey alanı” artar.

2.3.5. Görünür yoğunluk

Belirli bir hacme sahip tozun sıkıştırılmamış ağırlığı olarak tanımlanır. Birimi g/cm^3 ’dür. Presleme kalıbının oluşturulması için öğrenilmesi ve bilinmesi gereken en önemli toz özelliği görünür yoğunluktur. Bu durum; tozun şekline, toz tanelerinin birim alandaki büyüklüğüne ve yoğunluğa göre değişim gösterir. Görünür yoğunluğun düşmesi

için presleme uygulanır. Bu sayede hacmi azalan tozun soğuk kaynak miktarı artışa geçer. Sonuç olarak mukavemeti yükselmiş hammadde oluşur. Tozlarla oluşturulacak ürünün sinterleme verimi soğuk kaynak artışı sayesinde artış gösterir (Oleg ve ark., 2019).

Görünür yoğunluk toz için önem arz etmektedir. Görünür yoğunluğun önemli olmasının birtakım nedenleri vardır.

Bu nedenler şöyle yazılabilir;

- Görünür yoğunluk, sıkıştırma prosesinin yapıldığı kalıbın ölçüleri ile kümeleşmiş gevşek (sıkıştırılmamış) haldeki toz kitlesinin yoğunlaştırılabilmesi ve şekillendirilebilmesi için gereken basınç kuvvetinin büyüklüğünü belirler,

- Başlangıç aşamasında tozların işlenmesi için yararlanılacak ekipmanlar ile taşınmalarında kullanılacak ekipmanların seçimlerini belirlemede etkili olur,

- Sinterleme prosesi süresince tozların görünür yoğunlukları onların sinterlenme performanslarını da etkiler (Upadhyaya, 1996; Oleg ve ark., 2019).

Toz formundaki metalik bir malzemenin görünür yoğunluğuna, malzemenin ortalama partikül yüzey alanı, partikül boyutu (size) dağılımı, tanecik (partikül) boyutu, malzemenin katı haldeki yoğunluğu, her bir taneciğin yüzey pürüzlülüğü ve partikül düzenlenişi (partikülün geometrik şekli) gibi etkenler doğrudan etki ederler. Bu etkenlerden tanecik büyüklüğü (boyutu)görünür yoğunluğa önemli derecede bir etki eder (ASM, 1998; Oleg ve ark., 2019).

Bir toz malzemenin görünür yoğunluğu farklı boyutlardaki partiküllerinin karıştırılmasıyla kontrol edilebilir. Bu harmanlama yardımıyla daha küçük boyutlu toz tanecikleri daha büyük boyutlu taneciklerin aralarında kalan boşluklara yerleşirler ve görünür yoğunluğu artırmak için, en uygun görünür yoğunluğa sahip tanecik kısımları farklı miktarlarda karıştırılır. Ayrıca, karışım tozunun içerisine yağlayıcı olarak kullanılacak madde miktarı uygun oranlarda eklenir. Eklenen bu yağlayıcı özelliğindeki maddeler sürtünmeyi azaltırsa, bu da toz karışımın görünür yoğunluğuna önemli derecede etki eder (ASM, 1998; Oleg ve ark., 2019). Yüksek yoğunluklu malzeme parçalarının üretilmeden önceki toz karışımlarında görünür yoğunluğun yüksek olması yüksek basınç kuvveti uygulanmasına gerek duyulan bunun gibi işlemlerde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Mevcut görünür yoğunluğu yüksek olan tozlar kaba (büyük) taneciklere sahip olacağından böylesi tozların sinterlenme performansları düşük olur.

2.3.6. Akış hızı

50 gram sabit ağırlıktaki tozların yer çekimi olan bir ortamda bir huni içerisinden geçen zamana göre hesaplanır. Akış hızı, tozların birbirleri arasındaki ve huni arasındaki sürtünme katsayısına göre değişiklik gösterir. Huninin geometrik şekli ve tozların yoğunluğu akış hızını etkileyen faktörlerdir. En iyi verimi küresel tozlar sağlar. En kötü verimi ise pul şeklindeki tozlar verir. Akış hızını arttırmak için en çok kullanılan yöntem yağlayıcı ilavesidir.

2.4. Tozların Kimyasal Özellikleri

Tozların kimyasal özelliklerine göre üç sınıfta ayrım yapılır. Bunlar;

- Elementel saf tozlar
- Ön karışımli tozlar
- Bileşik tozlar

Elementel saf tozlara ait en çok bilinen ve önemli özelliği saflık seviyeleridir. Kimyasal analiz sonucunda saflıkları belirlenir. Sinterlenmiş cisimlerin üretimlerine etki eder. Saf yani bir diğer adıyla metalsel tozların sahip olduğu saflık birinci derecede üretime dâhil olan hammaddeye bağlıdır. Tozların hava ile teması sonucunda oksitlenme gözlenmesi normaldir.

Çoğunlukla iki veya ikiden fazla tozun karıştırılarak bir araya getirilmesi yöntemidir. Oluşan toz karışımının kimyasal özellikleri karışım yüzdesine bağlı olarak değişir. Bu nedenle karışım yüzdeleri dikkatli hesaplanmalıdır.

Elde edilen her toz tanesinin yapısı ve kimyasal bileşeni aynıdır. Örnek olarak paslanmaz çelik ve alüminyum bakır alaşımları verilebilir.

2.5. Toz Şekillendirme

Kalıp içerisinde bulunan toz tanelerinin sıkıştırılabilirliğini arttırmak ve sinterleme işlemini daha kolay işlem haline getirmek, yoğunluğu arttırmak ve sıkıştırma yapılmadan önce tozlara çok özel özellikler kazandırabilmek amacı ile işlemler yapılır. Bu işlemler şunlardır;

- Harmanlama ve karıştırma,

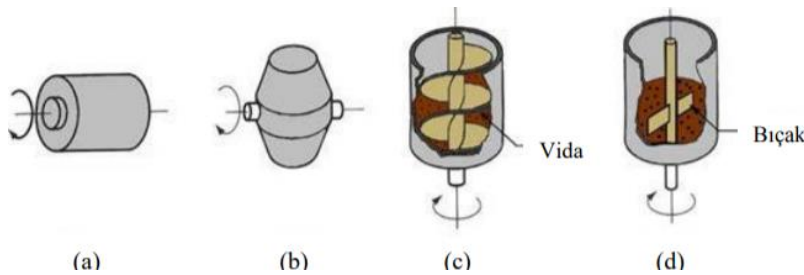
- Yağlayıcıların ve bağlayıcıların eklenmesi,
- Toz sıkıştırma.

2.5.1. Harmanlama ve karıştırma

Birbiri ile aynı kimyasal özellikler gösteren ama tanecik boyutu olarak farklı olan iki veya daha fazla tozun karıştırma işlemine harmanlama denir. Birbirinden farklı kimyasal özelliğe sahip tozları birleştirip homojen bir dağılım elde etme metoduna ise karıştırma denir. Harmanlama ve karıştırma süresi fazla olmamalıdır. Fazla olduğu takdirde tozlar sertleşebilir ve presleme zorlaşır. Ayrıca tozların kirlenmesi artabilir. Kirlenme metal tozlarda daha sık görülür. Kirlenme nedeniyle soğuk sertleşme oluşabilir. Presleme süreci uzar ve tozlar sertleşir.

Karıştırma işlemi tozlarda topraklanmayı engeller. Ayrıca akış hızını değiştirir ve yoğunluğu değiştirir. Toz taneciklerinin kırılmasına ve yuvarlak hale gelmesini sağlar. Bu sayede tozların yüzey pürüzlülüğü azalır, akış hızı artar. Ancak araştırmadaki esas en önemli fayda, taşıma hareketi esnasında oluşan titreşimlerin yol açtığı topaklaşma şeklindeki ayrışmalara mani olmaktır (Sarıtış ve ark., 2007; Oliver ve ark., 2021).

Aşağıdaki şekil 2.8’de; toz karıştırıcı mikserler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Karıştırıcı modelleri a) dönen tambur b) dönen çift koni c)vidalı mikser d) bıçaklı mikser (German, 1989)

2.5.2. Yağlayıcılar ve bağlayıcılar

Toz sıkıştırma işlemi sırasında toz tanecikleri arasında meydana gelen sürtünme etkisini ortadan kaldırmak için yağlayıcılar kullanılır. Bu sayede tozların akış hızı artar ve tozların oluşumu esnasındaki harcanan sürtünme enerjisi kaybolacağı için enerji tasarrufu sağlanmış olur. Yağlayıcıların kullanılmadığı veya eksik miktarda kullanılması sonucunda

toz tanecikleri kalıp içinde aşınma oluşturur ve aşınmanın artması ile oluşan ısı nedeniyle parçanın kalıptan ayrılması durumunda fiziksel ve kimyasal halini koruması zorlaşır. Toz sıkıştırma işlemlerinde sıklıkla yağlayıcı olarak kullanılan maddeler; metal stearatlar, polipropilen, polietilen glikol (PEG), parafin, sterik asit, politetrafloroetilen (PTFE), gibi sentetik mumlardır (Zhang, 2012).

Sıvı haldeki yağlayıcılar tozların akış kabiliyetlerini bozduğu için toz karışımlarına çoğunlukla kuru toz halindeki yağlayıcılar eklenir (Anık, 1999; Akhtar, 2021). Ancak toz karışımların sinterleme prosesi öncesinde çalışma performanslarının artırılması ve prosesin kolaylaşması için sıvı yağlayıcılar ilave edilmektedir (Çelik, 2009).

Bağlayıcılar ise ürün oluşturulmadan önce tozların presleme işlemi sonrasında dayanımı arttırmak için kullanılır. Toz preslemenin ardından istenilen şekle getirilmesi ve sinterlemeye kadar şeklinin bozulmaması için bağlayıcılar kullanılır. Genelde ucuz olması ve ısı dayanımı sebebiyle toz parafin veya stearik asit tercih edilir.

2.5.3. Toz sıkıştırma

Toz harmanlama işleminin uzamasının olumsuz etkileri vardır. Tozların geriliminin artması ve sertleşmesi yüzünden sıkıştırma zorlanır ve toz şekillerinde bozulmalar meydana gelir. Farklı boyutlara ve yoğunluklara sahip tozlar karıştırıldıktan sonra özelliklerine bağlı olarak ayrışabilirler. Bu ayrışmaya engel olmak için tozların sarsılmasını ve tekrar karışmasını engellemek gerekir. Toz sıkıştırma işlemi birtakım teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu teknikler;

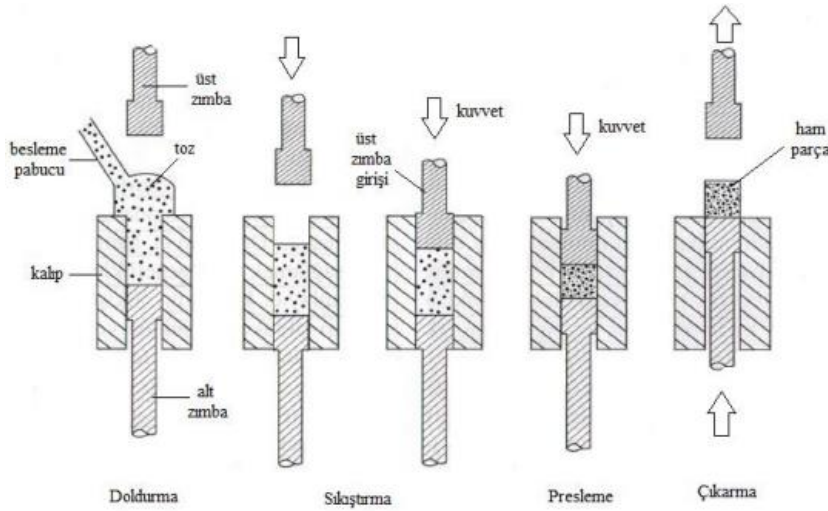
- Presleme
- Haddeleme
- İzostatik preslemedir.

Presleme en yaygın kullanılan yöntemdir. Presleme ile üretilecek olan malzemeye sinterleme öncesi ölçü ve şekil verilir. Presleme ile üretilecek malzemenin mekanik dayanımı artırılır. Preslenen malzemenin mekanik dayanımının az olması ile preslenebilme kabiliyeti artar.

Preslenme önce kalıp içine uygun miktarda üretilecek malzemenin tozu ile doldurulması ile başlar. Ardından tozların üstüne bir yük uygulanır ve tozlar ezilir. Son olarak da üretilen parça kalıptan çıkarılır.

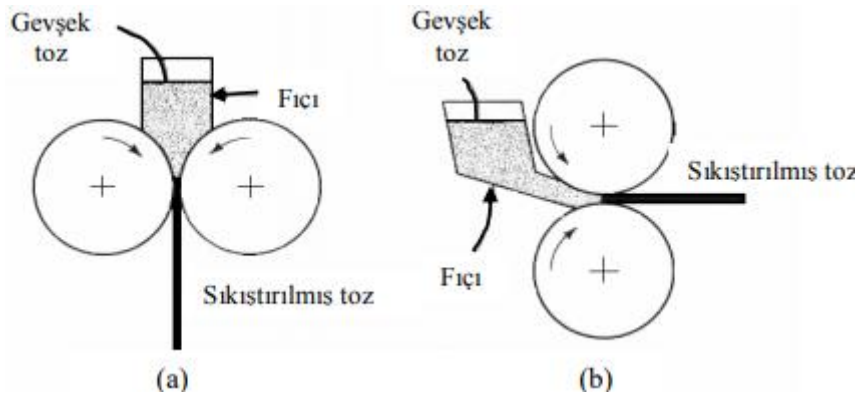
Tablo 2.1. Mekanik ve hidrolik preslerin genel özellikleri (Babayev, 2007)

Pres Türü	Presleme Yüğü (ton)	Presleme Hızı (Strok/dk)	Özellikleri
Mekanik presler	1-150	6-150	- Yüksek çalışma hızı - Dizayn esnekliği - Çalışmada esneklik ve basitlik
Hidrolik presler	1-5000	20	- Büyük boyutlu, karmaşık şekilli parçaların preslenmesinde kullanılmaktadır.



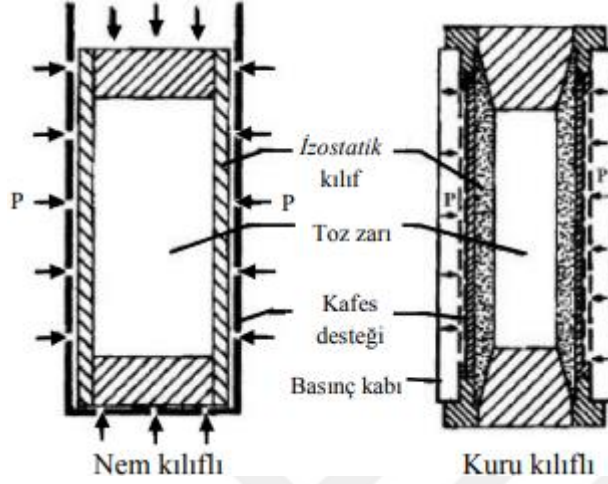
Şekil 2.9. Toz presleme süreci (German, 1989)

Haddeleme; Levha, şerit ve çubuksu şekillere sahip parçaların elde edilmesi için kullanılır. Tozlar geniş bir kaptan dairesel geometrik şekle sahip haddelerin arasında ezilerek istenilen parça şekli oluşturulur. Düşey veya yatay yönde uygulanabilir. Sıcak haddeleme ile sac parçaların üretimi sağlanır. Şekil 2.10 Haddeleme işlemi (Babayev, 2007).



Şekil 2.10. Haddeleme işlemi (Babayev, 2007)

İzostatik Presleme; Plastik, lateks veya kauçuk malzemeden yapılan esnek, kuru bir kalıp içinde tozların hidrolik yağ veya sıvı basıncı sayesinde preslenmesidir. Sıcaklık oda sıcaklığında veya üstünde olabilir. Şekil 2.11 Nem kılıflı ve kuru kılıflı izostatik presleme işlemi gösterilmiştir (Babayev, 2007).



Şekil 2.11. Nem kılıflı ve kuru kılıflı izostatik presleme (Babayev, 2007)

İzostatik presleme tekniğinin avantajları şunlardır;

- İzostatik basınç sayesinde oluşturulan ürünün homojen dağılımı her zaman korunur.

Maddenin boyutu ve şeklinin değişimi dahi olsa homojen dağılım korunur.

- Son işlem ve üretilen malzeme maliyeti düşüktür.
- Yağlayıcı veya bağlayıcılar olmadan kompakt parça üretilebilir.
- Oluşan ürün yüksek mukavemete sahiptir.

3. NİKEL ESASLI ALAŞIMLAR

Nikel (Ni) gümüşe yakın renkte parlak bir görünüme sahip, sert ve korozyona karşı dayanıklı bir metaldir. Ni yaklaşık olarak 365 °C'ye kadar ferromanyetik özellik gösterebilir. Korozyona dayanıklılığı sayesinde bazı farklı metalleri havanın uygulayacağı korozyondan korumak için Ni kullanılır. Kübik yapısı sayesinde soğuk deformasyon sağlanarak mukavemeti artırılabilir. Kaynaklamaya uygun olması sayesinde sanayinin birçok alanında kullanıma uygundur.

Alaşım grubunun merkez elementi olarak Ni'in merkezi kristal halde bulunması malzemenin faz aralığını fazlasıyla büyütür. Ayrıca alüminyum (Al) ve krom(Cr) ilavesi yapılarak krom oksit ve alüminyum oksit oluşturulduğunda yüzey kalitesini geliştirebiliriz. Genelde yüksek sıcaklıktaki nikel bazlı alaşımları 3 gruba ayırabiliriz;

- Katı çözelti yöntemi ile mukavemetlendirilen
- Çökelti yöntemi ile mukavemetlendirilen
- Oksit dispersiyon yöntemi ile mukavemetlendirilen

Katı çözelti yöntemi ile mukavemetlendirilen Ni alaşımlarda Ni oranı çok yüksek olup içinde çok az miktarda Al veya Ti bulunabilir. Çökelti yöntemi kullanılarak Ni oranı azaltılıp Al veya Ti oranı artırılır. Oksit dispersiyon yönteminde az oranda Y_2O_3 ilave edilir.

Tablo 3.1. Süper alaşımlarda alaşım elementleri % kompozisyon miktarları (İnanır, 2012)

% Kompozisyon		
Element	Fe-Ni ve Ni esaslı	Co esaslı
Ni	...	0-22
Mo, W	0-12	0-11
Al	0-6	0-4,5
Ti	0-6	0-4
Co	0-20	...
Cr	5-25	19-30
Nb	0-5	0-4
Ta	0-12	0-9
Re	0-6	0-2

Tablo 3.2. Süper alaşımların sınıflandırılması (İnanır, 2012)

SÜPER ALAŞIMLAR					
NİKEL ESASLI		DEMİR-NİKEL ESASLI		KOBALT ESASLI	
Dövme	Döküm	Dövme	Döküm	Dövme	Döküm
Inconel(600,601,617,625,702,706,718,721,X-750)	Inconel(713C,738)	Incoloy(800,801,802,907,909,925)		Haynes(25,188)	V-36
Hastelloy(W,B,C-276)	M 252	Haynes 556		Stellite B	X-40
Pyromet 860	Hastelloy X	A-286		S-816	MAR-M918
Nimonic(75,80A,90,95,100,115)	Udimet 500	V-57			
Udimet(500,520,630,700)	Rene(80,100)				
Waspaloy	MAR-M 246				

3.1. Nikelin Kullanım Alanları

Ni bir alaşım metalidir. Fiziksel ve kimyasal özelliklerinin avantajı sayesinde gündelik yaşamın ve sanayinin birçok noktasında kullanılır. En çok tercih edilme sebebi korozyona karşı dayanıklılığıdır. Dünyadaki Ni'in %66'sı paslanmaz çelik üretimi için kullanılır. Ayrıca yüksek sıcaklara dayanımı sayesinde otomotiv motor üretimi, gaz türbinleri ve jet motorlarında Ni alaşımına sıkça rastlanır. Günümüz teknolojisinin yardımıyla beraber nikel; havacılık, inşaat, ulaştırma, denizcilik, tıbbi cihazlar, elektronik ürünler, bataryalar, mutfak eşyaları, silah sanayisi, atık su arıtma tesisleri, mimari yapılar ve madeni paralar gibi yaklaşık 250-300 bin çeşit ürünün imalatında kullanılmaktadır.

Tıbbi alanda kullanılması insan hayatı için en önemli noktadır. Kalp ve damar hastalıklarında kullanılan cihazlarda bulunan Ni alaşımlar bozulmaya uğrasa dahi kolayca tamiri sayesinde diğer alaşım ve metallere göre avantajlıdır.

Ni çevreyi korumak için kullanılan yenilebilir enerji kaynaklarının verimi ve enerjinin depolanması için oldukça önemlidir. Enerji tesislerinin verimini arttırmak için kullandığı atık ısıdan enerji kazanılan sistemlerin yapısında genelde nikel alaşımlar tercih edilir.

3.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Mikro yapıları

Ni esaslı alaşımlarda iki farklı faz yapısı bulunur. Bunlar kübik merkezli ostenit ve (γ) ve Ni_3 temel bileşime sahip küresel γ' (gama prime)dır. Nikel esaslı alaşımların genel mukavemet özelliklerini γ' (gama prime) fazı sayesinde kazanır.

Süper alaşımlar W, Re, Mo gibi refrakter malzemelerin metallerle alaşımlama işleminden sonra ortaya TSP adı verilen fazlar meydana gelmektedir. Sigma (σ), mü (μ), R ve laves fazları TSP fazlarıdır. Eğer oluşan yapı içinde T, Nb gibi elementlere rastlanıyorsa eta (η), ve delta(δ) fazları oluşmaktadır (Zhao ve Henry, 2002; Martelo ve ark., 2021; Liu ve ark., 2022).

3.2.1. Gama matris (γ)

Ni esaslı süper alaşımların ana matris fazına gama matris denir. Yüzey merkezi kristal kübik yapıya sahip ve çoğunlukla katı çözelti oranı yüksektir. Saf nikelin sahip olduğu düşük difüzyon ve mukavemetin az olması özelliklerini gösterir. Yüksek sıcaklıklarda kolayca mukavemetlendirilir. Bu malzemelerin oluşumu sırasında, Ni alaşımları eriyikten soğutuldukça, karbürler çökmeye başlar, daha düşük sıcaklıklarda γ' fazı çöker.

3.2.2. Gama prime (γ')

Metal-metal bir bileşime sahip olup A_3B yapısındadır. Örnek olarak Ni_3Al verilebilir. Küresel yapıya sahip gama matris(γ) içinde çökmektedir. Yüzey merkezi kübik kristal yapıdadır. Merkez matrisi ile koherant duruma sahiptir. Alaşımların mukavemetini belirleyen temel fazdır. Çoğunlukla merkez matris içinde çökme hızları yüksektir.

3.2.3. Gama double prime (γ'')

Yapı olarak Ni_3Nb şekline sahiptir. Nb içeren nikel esaslı alaşımlarda görülebilir. Gama matris faz içerisinde. Bu faz şekli düşük ve orta sıcaklıklarla mukavemeti artırır. 650 °C üzerinde kararlı halleri bozulur.

3.2.4. Eta fazı (η)

Altıgen yapıda Ni_3Ti formunda kristal bir yapıdadır. Eta fazı çok hızlı büyüme göstererek gama prime fazından daha büyük yapıda parçalar oluştururlar. İlk çökelmeleri yavaş gerçekleşir. Eta fazının iki farklı formu vardır. Bunlar; toz tane sınırında perlit yapıya benzeyen ve widmanstatten yapısında disk şeklinde olanlardır. İlk form mekanik özelliklere zarar verirken ikinci form mukavemeti zayıflatır.

3.2.5. TSP (topolojik sıkı paket) fazları

Alaşımlama sürecinde kimyasal reaksiyonlarda bozulmalar görülebilir. Bu durumda istenmeyen fazların oluşması gerçekleşir. TSP fazları Cr ve ostenitik matrisin refrakter elemanlarının çözünürlük sınırı aşıldığında oluşur. Bu oluşum, ısıtılma sırasında veya daha yaygın servis koşullarında meydana gelir. Bu çökeltiler ana matriste bulunan atomlara paralel bir şekilde sıkıca paketler halinde oluşur. Şekilleri uzun diske veya iğneye benzer olurlar. Çökelmeler genellikle tane sınırları karbürleri üzerine olur. Ni alaşımlarla sigma fazı ve mü fazı oluşturmaya yatkınlardır. Sigma (σ) fazı TSP fazlarından en dikkat çekenidir. Oluşan malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler ve genellikle olumsuz sonuçlar doğurur. Genellikle 540-800 °C’de varlık gösterirler.

3.3. Nikel Alaşım Malzeme Grupları

Ni bazlı süper alaşımlar yapılarına 4 farklı grupta incelenir. Bunlar; inconel, monel, hastelloy ve nimonictir.

Tablo 3.3. Bazı nikel esaslı alaşımların isimleri ve kimyasal değerleri (Özdoğru, 2002)

ALAŞIM/ ELEMENT (ağ.%)	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Cb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	Diğer	Yoğunluk
IN 713 C	74	12.5	0	4.2	.0	.0	2.0	6.1	0.8	-	-	-	.12	.01	.1	-	7.9gr/cm ³
IN 713 LC	75	12	-	4.5	-	-	2.0	5.9	0.6	-	-	-	.05	.01	.1	-	8.0
B-1900	64	8.0	10	6	-	4	-	6	1	-	-	-	.1	.01	.1	-	8.2
B-1023	58	15.5	10	8.5	-	-	-	4.2	3.6	-	-	-	.16	.006	-	-	-
CMSX-2	66	8	4.6	.6	5.8	0	5.6	.0	-	-	-	-	-	-	-	-	8.6
GMR-235	63	15.5	-	5.3	-	-	-	3	2	10	.3	.6	.15	.06	-	-	8.0
IN 100	60	10	15	3	-	-	-	5.5	4.7	-	-	-	.18	.01	.06	1V	7.7
IN 713	67	9.5	10	2.5	-	-	-	5.5	4.6	-	-	-	.18	.01	.06	1V	7.7
IN 738 LC	61	16	8.5	1.7	2.6	1.7	.9	3.4	3.4	-	-	-	.11	.01	.05	-	8,1
IN 939	48	22.5	19	-	2	1.4	1	1.9	3.7	-	-	-	.15	.01	.09	-	8.2
IN 792	61	12.4	9	1.9	3.8	3.9	-	3.1	4.5	-	-	-	.12	.02	.1	-	8.3
RR 7080	61	9	10	-	-	2.5	-	5.5	1.5	-	-	-	.14	.01	.05	1.5Hf	-
IN713+Hf	74	12	-	4.5	-	-	2.0	5.9	.6	-	-	-	.05	.01	.05	1.3Hf	-
Rene125+Hf	59	8.5	10	2	8	3.8	-	4.8	2.5	-	-	-	.11	.01	.05	1.4Hf	8.5
MAR M246	63	9	10	2.5	10	1.5	-	5.5	1.5	-	-	-	.14	.01	.05	1.8Hf	8.6
Rene 80	60	14	9.5	4	4	-	-	3	5	-	-	-	.17	.01	.03	-	8.2
UDI 700	55	15	17	5	-	-	-	4	3.5	-	-	-	.06	.03	-	-	-
HASTEALLOY	57	21.2	.84	13.	-	-	-	.03	3.17	.31	-	-	-	-	-	.14V	-
INC718 718	52.5	19	-	3	-	-	5.1	.5	.9	18.5	.2	.2	.04	-	-	-	-
SRR 99	66	9	5	-	-	2.9	.7	5.5	1.8	-	-	-	.03	-	-	-	-

3.3.1. Inconel alaşımlar

Ni alaşımları arasında en yaygın olan gruptur. Inconel malzeme grubu yüksek oranda nikel ve krom içermektedir. Nadiren molibden elementine de rastlanabilir. İçerik olarak paslanmaz çeliklere benzerliği gözlemlense de maliyet açısından oldukça fazladır. Kullanım alanları zor şartlar barındıran inconel grubu, korozyon direncinin fazlalığı sayesinde bozulmaya uğramaz. Yüksek sıcaklıklarda en önce tercih edilen gruptur. En bilindik inconel malzemeler; inconel 718, inconel 625, inconel 600/601, inconel 617, inconel x750'dir. Inconel malzemeler yüksek dayanımları sayesinde gaz türbinlerinde, yüksek basınç ve sıcaklık altındaki yerlerde, havacılık ve uzay sanayisinde ve formula 1 araçlarında kullanılır.

3.3.2. Monel alaşımlar

Ni alaşımları arasında yaygın kullanım sırası ikidir. Temel yapısı Ni ve Cu elementinden oluşmaktadır. Ni yoğunluğu bakırın yaklaşık iki katıdır ve çok maliyetli bir malzeme olduğu için kullanım alanı dardır. Maliyet fazlalığı nedeniyle alternatif çözümlerin üretilmesi sebebiyet verebilir. En bilindik monel malzemeler; monel 400, monel K500, monel 401, monel 404, monel 405'dir. Kullanım alanları havacılık, petrol rafineleri, elektriksel parçalar ve denizcilik malzemeleridir.

3.3.3. Hastelloy alaşımlar

Hastelloy, Haynes International firmasının patentli ürünlerine verdiği isimdir. Yüksek sıcaklık ve basınçlı ortamlarda malzemelerin benliklerini ve özelliklerini koruması için dizayn edilmiştir. En yaygın modelleri; C276, C22, C4, X ve C2000'dir. Nükleer reaktörlerde, kimyasal reaktörlerde ve yüksek basınçlı ortamlarda kullanılmaya uygundur.

3.3.4. Nimonic alaşımlar

Special Metal isimli şirketin patentli ürünü olup temel özelliği oluşturulan malzemenin kullanıldığı ortam yüksek sıcaklıklara çıktığı anlarda düşük süneklik sağlamasıdır. Bu sayede havacılıkta, gaz türbinlerinde, basıncın fazla olduğu egzoz ağızlarında ve jet motorlarında sıkça kullanılır. En sık tercih edilen modelleri; 80A, 75 ve 90'dır.

3.4. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Üretimi

Süper alaşımların sahip olduğu tanecik boyutu ve şekli, malzemenin mikro yapısına, çökelme oranına ve morfolojisine bağlı olarak değişim gösterebilir. Yapının kontrolünün sağlanması üretim yöntemine bağlıdır. Süper alaşımlar dövme ve döküm yöntemi ile üretilir. Dövme ve döküm yöntemleri oluşan malzemede farklı sonuçlar ve özellikler elde edilmesine sebep olurlar. Eğer malzemenin yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı fazla olmasını ve yapısal olarak basit olmasını istersek dövme yöntemi, karmaşık yapılar için ise döküm yöntemini tercih edilmelidir.

Üretim esnasında istenmeyen sonuçları engellemek adına vakum altında eritme methodu geliştirilmiştir. Vakum indüksiyon ocağında yapılan bu işlem sayesinde sıcaklık kontrol altına alınır ve bozulmalar engellenir. Vakum altında üretilen alaşımların fiziksel özelliklerinde artış gözlenir. Oluşan yeni ürünler mukavemeti ve sıcaklık dayanımları artmış olarak gözlemlenebilir. Ayrıca bu yöntem sayesinde kirlenme azaltılmış olur. Vakum sayesinde üretim belirli parametrelerde kontrollü bir şekilde sonuçlandırılabilir. Vakum indüksiyon eritme yöntemi sayesinde reaktif yapıya sahip titanyum ve alüminyum gibi elementlerin atmosferde oksidasyon oluşturmalarına yardımcı olmaya çalışılır. Ayrıca gama

prime(γ') ve gama double prime (γ'') fazlarının ortaya çıkıp malzemeyi sertleştirmesi için uygun ortam oluşturmayı sağlar.

Süper alaşım malzemelerinde yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak için üretim esnasında gaz içeriğini azaltmak fayda sağlayabilir. Ayrıca gaz içeriğinin azalması sayesinde işlenebilirliği artar. Bunun yanında elektriksel iletimi ve manyetiksel özellikleri iyileşebilir.

Üründe oluşabilecek termal yorgunluk ve kırılma hatalarının sebebi alaşımın üstündeki gerilim ve tane sınırlarının genişlemesinden kaynaklı oluşabilir. Eğer tane sınırlarının genişlenmesi üretim esnasında engellenir ise oluşan üründe hatalar azalır. Bu durum soğutma sistemini geliştirerek sağlanabilir.



4. KOBALT (Co)

Toz formlardaki Co elmaslı kesici takımların metal matris bileşimlerinde kullanılan esas metal malzemelerindendir. Çünkü Co, bu tür elmas tutucu metal matrislerin aşınma dayanımı ve elmas tutma kapasitesi gibi çok önemli iki fonksiyonel özellik parametresinin değerlerini artırmaktadır (Konstanty, 2005; Konstanty, 2021) Bunların yanısıra, diğer metallerden ayrı olarak kobalt tozları çok değişik türlerde tane büyüklüklerine, tane şekilleri, tane dağılımları ve kimyasal saflıklara sahip olabildiğinden eklendikleri matrislerin fonksiyonel parametrelerini geniş skalalarda kontrol etme ve ayarlayabilme imkanı sunmaktadır. Yine teorik yoğunluğa kısmen daha düşük sıcaklık ve basınç koşulları altında yapılan sıcak presleme işlemleriyle ulaşılmasını sağlayarak maliyetleri düşürmesi kobalt kullanımının bir diğer avantajıdır (Konstanty, 2005; Konstanty, 2021).

Elmasta daha çabuk aşınan yumuşak bir matrisin tuttuğu elmasın matristeki bulunduğu yerden kopma ihtimali yüksektir. Co, dahil edildikleri tutucu matrislerin sertliklerini artırarak körelen ilk elmas tanesinden sonra ilerleme devam ettikçe ortaya çıkan yeni kesme noktalarıyla birlikte aşınan ideal bir aşınma dayanımı sağlar. Co elmas tutucu matrisin tokluk ve dayanıklılığını artırır. Elmasın bulunduğu elmas takımına(tutucu matrise) tutunma kapasitesi elmas takım performansını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Co elmas kristallerinin matrise tutunmasını yani elmas tutunma kapasitesini artıran bir metaldir (Konstanty, 2005; Çelik, 2009; Konstanty, 2021). Kobaltın elmas tutucu takımlarındaki bu fonksiyonel özelliklerinden dolayı dünya çapında üretilen toz Co'nın çoğu (%75'i) kesici ve elmaslı takım üretimi endüstrisinde kullanılmaktadır (Çelik, 2009).

4.1. Kobalt Kullanım Alanları

Cam ile metal birleştirmelerinde kullanılırken paslanmaz çelik üretimlerinde de yaygın olarak kullanılan elementlerin başında gelmektedir. Veri saklama cihazların çok daha uzun ömürlü olabilmeleri Co elementi kullanımıyla mümkün hale getirilmiştir. Çeşitli elektronik eşyaların içerisinde var olabilen lityum pillerde de Co kullanımı görülmektedir. Sanayi kolları arasında ise seramik, petrol ve cam sanayisi alanlarında kullanılmaktadır.

4.2. Kobalt Alternatifleri

Co'ın fiyatlarının yüksek ve kararsız yapıda olması kesici takım imalatı endüstrisinde kobalt alternatifi tozlar geliştirilmesi çalışmalarını zorunlu hale getirmiştir (Vishwanath, 2011; Konstanty, 2021). Bu çalışmalar sonucunda kimyasal olarak önceden alaşımlandırılmış alternatif bakır ve demir bazlı tozlar ticari olarak geliştirilmiştir (Çelik, 2009). Yeni modern teknolojik üretim tekniklerinin gelişmesiyle çok iyi sıcak pres ve son derece homojen ve çok ince taneli ve çok fazlı tozların üretimi sağlanabilmektedir. Bununla birlikte, şimdiye dek yapılmış alternatif çalışmalardan elde edilen performans sonuçları henüz kobalt kullanımına alternatif olabilecek bir düzeye erişememiştir.

Halen devam eden çalışmalar neticesinde, firmalar Co alternatifi alaşım tozlar geliştirerek piyasaya sunmuşlardır.

5. SİNERLEME

Sinterleme, TM'de kullanılan bir dizi ısıtma işlemi verilen teknik bir addır. Sinterleme işlemi sonucunda; toz parçacıkları arasında yüzeyel difüzyon bağlantılarının kurulması sağlanarak fiziksel ve kimyasal dayanım artırılır. Sinterleme işleminde malzemeler kontrollü bir atmosfer ortamında ana bileşen malzemenin erime sıcaklığının altında tutulur. Böylece sıcaklıkta ısıtma işlemi uygulanan toz tanecikleri arasında bağlanma oluşur. Bu bağın yanı sıra yeniden kristalleşme ve parçacıklarda tane büyümesi de gerçekleşmektedir. Sinterleme işleminde koruyucu bir inert gaz atmosferi kullanılmasıyla bu tür bir ısıtma işlemi sürecinde parçaların yüzeylerinde oksitlerin oluşması engellenir. Toz partikülü ile etrafı arasında meydana gelebilecek istenmeyen kimyasal tepkimelerin oluşması da önlenir. Bu nedenle parçanın dayanımı önemli derecede artar (James, 1985; Ke ve ark., 2021).

Sinterleme işlemi yapılan ürün malzemenin özellikleri; sinterleme yapılacak üst sıcaklığa ulaşma (sinterleme sıcaklığına çıkış) hızı, malzemenin sinterleme sıcaklığındaki tutulma süresi ve soğuma hızı gibi etkenlerle doğrudan ilişkilidir (Stosuy, 1993; Crawson, 1993; Ke ve ark., 2021; Konstanty 2021; Hu ve ark., 2021). Sinterleme işlemi daha genel bir ifade ile önceden pres uygulanarak yapılan sıkıştırma işlemi ile şekillendirilen poroziteli (gözenekli, boşluklu) bir yapı formuna getirilen bir ham parçanın, yapısındaki porozitelerinin büyük bir oranda azaltıldığı bir parça halinde üretmek için maruz bırakıldığı ısıtma işlemidir. Sinterleme işlemi sonucunda önceden presleme işlemiyle şekillenmiş ve birbirleriyle temas halinde olan toz taneciklerinin yüksek sinterleme sıcaklıklarında birbirlerine difüzyon yoluyla bağlanması sağlanır. Yüksek sıcaklıklarda oluşan bu bağlanma, erime sıcaklığı altındaki katı faz halinde atom hareketleriyle gerçekleşebildiği gibi bazı koşullarda sıvı faz oluşmasıyla da gerçekleşebilir. Ek olarak, tanecikler arasında oluşan bu bağlanma, birbirine temas eden parçacıklar arasında boyun oluşumu yoluyla gerçekleşir (Okuyama, 2007; Tokita, 2021).

Sinterleme işleminin başlamasında en etkili olan mekanizma sistemin iç enerjisinde oluşan azalmadır. İç enerjide meydana gelen bu azalmaya sebep olan faktörler ise; parçacıkların birbirlerine temas ettikleri alanlarının artmasından dolayı yüzey alanının azalması, gözeneklerin azalması veya küreselleşmesi, çok bileşenli sistemlerde katı fazın sıvı faz içerisinde çözünmesi sonucu meydana gelen konsantrasyon farklılığının giderilmesi gibi etkenlerdir (Gülsoy, 1999). Sinterleme işleminin oluşması ile birlikte malzemenin morfolojik yapısında bazı değişiklikler oluşur. Seramiklerde bu değişiklikler; dayanım,

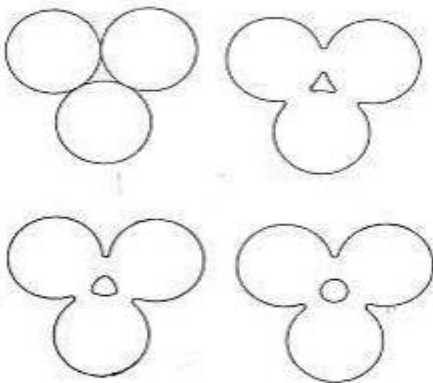
yoğunluk, termal iletkenlik, saydamlık ve yarı saydamlığın artması biçiminde oluşur. Metal malzemelerde dayanım, ısı iletkenlik ve sünekliğin artışı ile, polimerlerde ise yoğunluk ve dayanım artışı şeklinde oluşur (Aydın, 1997). Keza, boşluk morfolojisinde de sinterleme işlemi sonunda farklılıklar oluşur (Boz, 2003; Xu ve ark., 2021).

5.1. Sinterleme Aşamaları

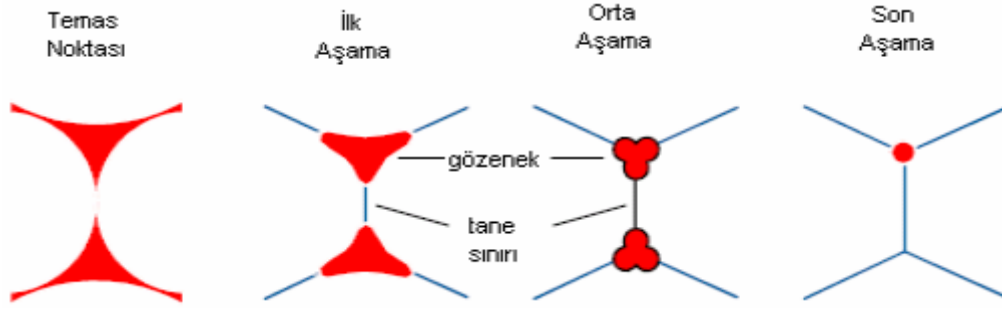
Sinterleme ilk önce bütün parçacıkların üzerinde rastgele noktalarda boyun büyümesi ile başlar. Boyunların büyüme oranları ve boyutları birbirinden farklıdır. Dışarıdan bir kuvvet (sıkıştırma) uygulanmadan parçacıkların belirli yüzeyleri birbiri ile temas etmeye başlar. Gözenekler köşeli bir şekilde rastgele dağılmış durumda gözlenir. Ardından ortam ısıtılmaya başlar ve sinterleme başlamış olur. Parçacıkların temas noktalarında bağlantılar gözlenir. İlk aşamada boyutsal bir değişiklik görülmezken mukavemette artış gözlenir. Ham yoğunluğun artması ile temas edilen yüzey alanı artar. İlk aşama tamamlanıp ara aşamaya geçilir.

Ara aşamada gözenekler yuvarlak şekle dönüşür. Fakat bu gözenekler arasında bulunan kavisli şekil, itici bir güç oluşturarak iç bükey bölgeleri doldurur. Boyunlar birbirine etki edecek derecede büyümesi bu aşamada gözlenir. Sinterlemenin yardımı sayesinde parçacıklar büyür ve gözenekler kapanmaya başlar.

Son aşamada gözenekler kapanır. Tane sınır hareketi gittikçe zorlaştığı için gözenek sayısının da azalması ile tane büyümesinin hızı artışa geçer.



Şekil 5.1. Sinterleme sürecinde gözeneklerin yuvarlak hale gelmesi (Şulan, 1993)



Şekil 5.2. Sinterleme aşamaları (Kurt, 1992)

5.2. Sinter Parametrelerinin Özelliklere Etkisi

Sinterleme esnasında toz partikülleri arasında çarpılma oluşturacak yoğunluk gradyanları meydana gelebilir. Sıkıştırma işlemi sayesinde parçanın özgül yoğunluğu artacağından dolayı boyut değiştirmesinde azalma gözlenir. Bu nedenle yüksek basınç altında sıkıştırma ve sinterleme yapılması istenir. Sıkıştırma basıncının artması ile parçanın boyut kontrolü sağlanır ve daha az sinterleme çekmesi sağlanır. Çok nadiren de olsa yüksek sıkıştırma basınçları nedeniyle parça içerisinde gaz kalması gibi olumsuzluklar meydana gelebilir. Kalıp içinde sıkıştırılan parçalarda, boyut değişimi en aza indirilir. Oluşan tanecikler iri boyutlardadır ve düşük sinterleme sıcaklığının yeterli olmasıyla sinterleme için harcanan enerji az olur. Ayrıca homojen parçalar oluşturulur.

6. SICAK PRESLEME (SP) YÖNTEMİ

Parçanın yoğunluğunu arttırmak ve üretimi geliştirmek için tercih edilir. Yoğunlaşmanın hızlı ve kontrollü olması için SP yöntemi kullanılır. Yoğunlaşma oranının iyileştirilmesi geleneksel sinterlemeye göre SP'de daha hızlı ve daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilir. SP'de sıcaklıkla beraber basınç toza uygulanır. Uygulanan basınç değeri kullanılan fırına göre değişiklik gösterse de ortalama olarak 10-75 MPa arasındadır. İşlem sıcaklığı ortalama 2000 °C'yi geçebilir (Foong ve Xu, 2021; Çevik ve ark., 2021). Kalıp malzemesi olarak dayanımı yüksek olduğu için grafit tercih edilir. Karmaşık şekilli parçaların üretimi için uygun değildir.

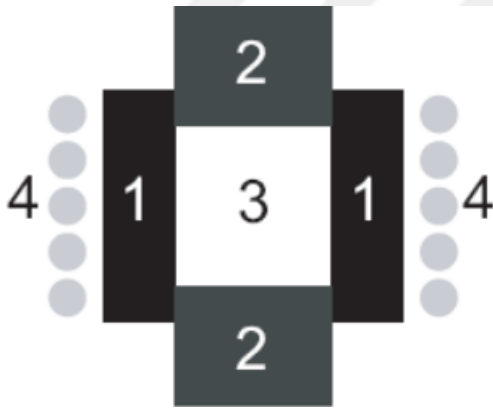
Sıcak tozların hava ortamından dolayı oksitlenme ve nitridasyona uğramamaları için kontrollü bir inert gaz atmosferine gerek vardır. Baskılayıcı kuvvet (basınç)altındaki kalıbın içine konulmuş metal tozun SP'si, metal tozunun eski bir sıkıştırma uygulamasıdır. Sıcak presleme işlemiyle yüksek kalitede ürün elde edilebilmesine rağmen, kalıbın aşınmaya uğraması, zımba yüzeylerine sıvı haldeki metalin kaynaması sebebiyle de sıkıştırılmış yüzeylerin bozulması, numune kaybı ve alet aşınması, kutu duvarlarıyla ve hareketli burçlar arasındaki boşluk gibi dezavantajları vardır (ASM, 1998; Çevik ve ark., 2021).

SP'de uygun kalıp malzemesinin seçimi dikkat edilmesi gereken en önemli detaylardan biridir. Yüksek sıcaklıklarda kalıbın yapıldığı malzemenin, tozla herhangi bir tepkimeye girmemesi ve presleme sırasında uygulanan basıncın kalıpta herhangi bir plastik deformasyona yol açmaması gerekmektedir. Kalıplar genellikle grafit malzemesinden yapılırlar bunun haricinde berilyum nikel, sementite karbürler, ve kobalt esaslı süper alaşımlar da SP işlemlerinde kullanılan kalıp malzemelerindendir (Peelen, 1979; Sharma ve ark., 2022).

Sıkıştırılmış parçanın orta noktası en düşük yoğunluklu yeridir. Orta noktadan geçen yatay ve dikey eksenlere göre yoğunluk dağılımı simetrik olmaktadır. Basınç, statik ya da dinamik olarak ısıtılan toza bir ya da iki yerden zıt yönlerde tek bir eksen yönünde uygulanmaktadır (Hiçyılmaz, 1999).

SP işlemleri ısıtma biçimine göre üç farklı teknik kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknikler indüksiyon ısıtması, endirekt dirençli ısıtma ve direkt dirençli ısıtma teknikleridir. İndüksiyon ısıtmasıyla yapılan SP işleminde, kalıp içerisindeki tozlar yüksek frekanslı bir akım uygulanarak ısıtılır. Bununla beraber metal ya da grafit malzemeden yapılmış olan kalıplara basınç kuvveti uygulanarak tozların sıkıştırılarak yoğunlaşması (sinterlenmesi)

sağlanır. İndükleyici akımının uygulanabilmesi için içinde toz numune bulunan kalıp bir indüksiyon sargısı içerisine bırakılır. Sinterleme işlemi boyunca yüksek frekans jeneratörü ve indüksiyon sargısı ile üretilen yüksek frekanslı akım ile kalıbın ısıtılması sağlanır. Bu tekniğin avantajı uygulanan basınç ve indükleme gücünün tamamen birbirinden bağımsız ve ayrı ayrı kontrol edilebilir olmasıdır. Düşük basınçlarda sıvı faz sinterleme işlemi de yapılabilmektedir. Bu tekniğin en büyük dezavantajları ise yüksek frekans jeneratörlerinin pahalı olması ve çok düzenli kalıp yerleşimi gerektirmesidir. Kalıp yeterince düzenli olarak yerleştirilemez ise ısı düzgün şekilde yayılamaz ve neticede sıcaklığın eşit dağılımını tam olarak sağlayabilmek zor olur ki bu durum sistemin temel dezavantajı olur. Ayrıca uygulanan indükleyici manyetik alan kalıbın içerisine sadece 0.5 ile 3 mm kadar sızabilmektedir. Yani esas indükleme ile ısınma bu dış bölgede oluşur ve sıcaklık kalıbın iç kısımlarına buradan yayılır ki bu durumda kalıbın ısı iletkenliği önemli olur. Kalıbın merkezinin ısıtılması bu yüzden çok zor olur. Bu nedenden dolayı oluşabilecek bir başka potansiyel sorun ise çok yüksek ısıtma oranlarında oluşan yüksek sıcaklık farklarının kalıbı tahrip edebilmesidir. Şekil 6.1’de indüksiyon ile ısıtma tekniği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.1. İndüksiyon ile kalıbın ısıtılması 1. Grafit yan tutucular 2. Baskı grafitleri 3. Preslenecek malzeme 4. İndüksiyon sargısı (Çelik, 2009)

Endirekt dirençli ısıtma yönteminde, kalıp bir ısı bölmesine konumlandırılır. Uygulanan elektrik akımı ile ısıtılan grafit ısıtma elemanları ile bu ısı bölmesi ısıtılır. Önce ısınan grafit ısıtıcılar kalıp ile temas halinde bulundukları için daha sonra ikincil olarak kalıbı ısıtırlar ki bu sebepten bu tekniğe endirekt (dolaylı yoldan) dirençli ısıtma adı verilir. Bu tekniğin avantajları; yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesi, kalıp malzemelerin ısı iletkenliklerine bağlı olmaması, basınç ve sıcaklığın birbirinden bağımsız olarak uygulanabilmesidir. Tekniğin başlıca dezavantajı ise kalıbın çok uzun sürede ısıtılabilmesi

6.1. Kıvılcım Plazma Sinterleme (SPS) Yöntemi

Kıvılcım plazma sinterleme (Spark Plasma Sintering; SPS) hızlı bir sinterleme işleme metodudur. Bu işlemde, genellikle düşük voltaj ve düşük basınç ile birlikte sinterlenecek tozun verimi yüksek şekilde toplulaştırmasını (yoğunlaştırma, birleştirme, sıkılaştırmasını) sağlamak için tek-eksenli bir kuvvet ve darbeli doğru akım (DC) uygulanır. Bu teknik, son yıllarda çeşitli malzemelerin işlenmesi için yaygın olarak uygulanmaktadır. En sık kullanılan SPS fiziksel çalışma mekanizması mikro kıvılcım plazma mekanizmasıdır.

Bu mekanizmada, toz taneleri arasında küçük yerel bölgeler oluşturacak yüksek sıcaklıktaki plazma bir saniyeden çok kısa sürelerde üretilen elektriksel deşarj kıvılcımları ile üretilir. SPS işlemi, yüksek ısıtma ve soğutma oranları ile karakterize edilir (Cavaliere ve ark., 2019).

SPS sisteminde, basınç tek eksenli uygulandığından sıcak prese çok benzer, ancak bu sistem işlem altındaki sisteme aktarılan ısı bakımından farklılık gösterir. Direkt dirençli SPS ile arasındaki fark akımın darbeli (pulse) olmasıdır. SPS sisteminde ısı düşük voltaj ve yüksek (birkaç bin amper) akım ile doğrudan uygulanır. Toz numuneye giden akım, tartışmalı tabir edilen kısa devre, ark ya da kıvılcım oluşumlarıyla toz taneleri arasında hızlı bir yoğunlaşmayı sağlayacak plazmaları oluşturur. SPS sistemiyle birkaç dakika süren çok hızlı süreçlerde tane büyümesi gerçekleşmeden bütünüyle yoğunlaştırılmış yapı parçaları üretilabilmektedir. SPS işleminde, grafit kalıp ve toz numune doğrudan darbeli yüksek bir akım ile ısıtıldığından, ısı verimi çok yüksektir. Isının homojen uygulanması, yüzey saflaştırma ve aktivasyonu sonucunda yüksek yoğunlukta ve kalitede, homojen sinterlenmiş çok çeşitli numuneler elde etmek mümkündür. Malzeme taşınımı mikro ve makro düzeyde kolaylaştığından düşük sıcaklıklarda ve çok hızlı şekilde sinterleşmiş yoğun malzeme üretimi sağlanabilmektedir. SPS ile üretilen malzemeler; fiber ve partikül esaslı kompozitler, çeşitli organik ve polimer malzemeler, sermetler (titanyum karbür ve nikelin bileşimleri), seramikler, sert metal alaşımlar, manyetik ve intermetalik bileşik malzemelerdir (Çağlar, 2015). Şekil 6.5'te plazma sinterleme makinesi gösterilmiştir.



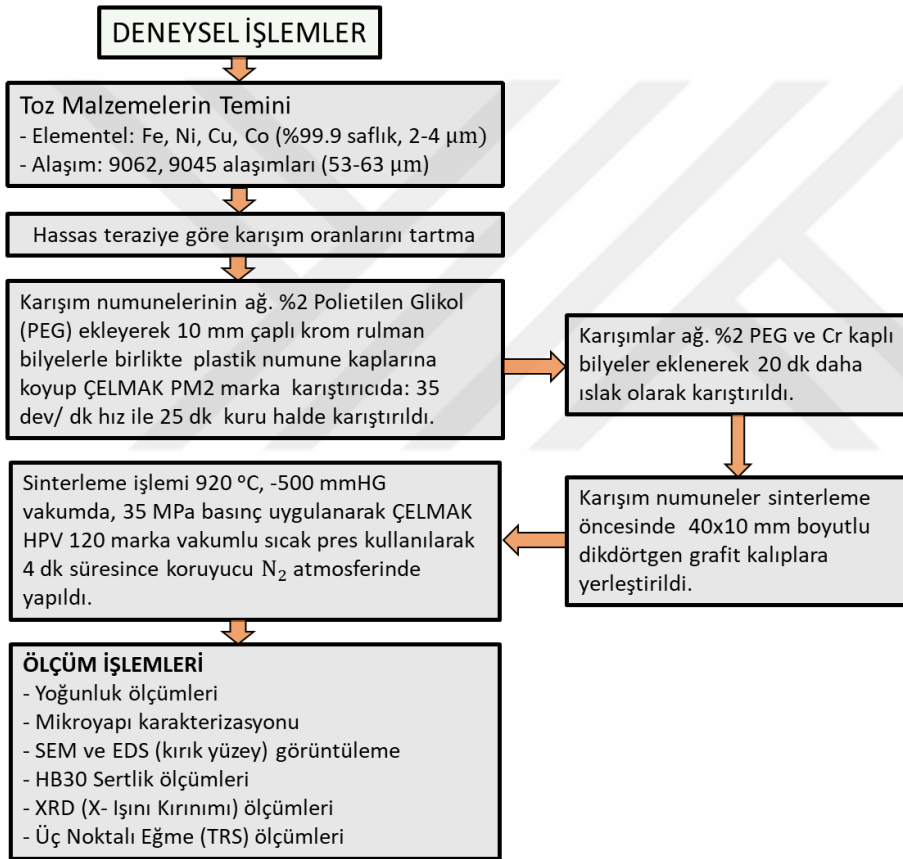
Şekil 6.4. Plazma sinterleme makinesi (FCT, Almanya)

Plazma sinterleme işleminde teorik olarak partiküller arası kıvılcımların oluşabilmesi için sinterlenecek malzemenin elektriği iletmesi gerekmektedir. Günümüzde 5. nesil plazma sinterleme makineleri Japon, Avrupa, Uzakdoğu ve Amerika kökenli imalatçılar tarafından yapılmaktadır. Güç elektroniğindeki gelişmeler ve IGBT teknolojisindeki ilerlemeler neticesinde Plazma sinterleme cihazlarında kullanılan trafo sistemlerinin daha da gelişmesi neticesinde daha etkili çalışan cihazlarda yapılabilmektedir. Bu durum cihaz üretim maliyetlerini azaltarak ürüne ulaşımı bir miktar kolaylaştırmıştır.

Gelişmiş bir basınçlı sinterleme yöntemi olan SPS tekniği günden güne endüstride daha etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır.

7. MATERYAL METOD

Tez çalışması kapsamında piyasadan ticari olarak temin edilen Fe, Ni, Cu, Co ve Ni esaslı 9062 ve 9045 ticari kodlu elementel ve alaşım tozlar, kullanılarak Direkt Dirençli Sıcak Presleme tekniği ile 35 Mpa basınç 920 °C’ de 4 dakika sinterleme süresi ile 40x10x7 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Toplamda 4 grupta 10 adet numune serisi belirlenmiştir, Direkt dirençli sıcak presleme tekniği kullanılarak, her seriden 5 adet numune üretimi yapılmıştır.



Şekil 7.1. Deneysel işlem akış şeması.

7.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler, piyasadan hazır olarak temin edilmiştir. Bu malzemeler Fe, Ni, Cu, Co saf elementel tozlar ile 9062 ve 9045 ticari kodlu Nikel esaslı alaşım tozlardır. Deneylerde kullanılan tozların özellikleri Tablo 7.1 'de gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 7.2 de alaşım tozların içeriği de verilmiştir.

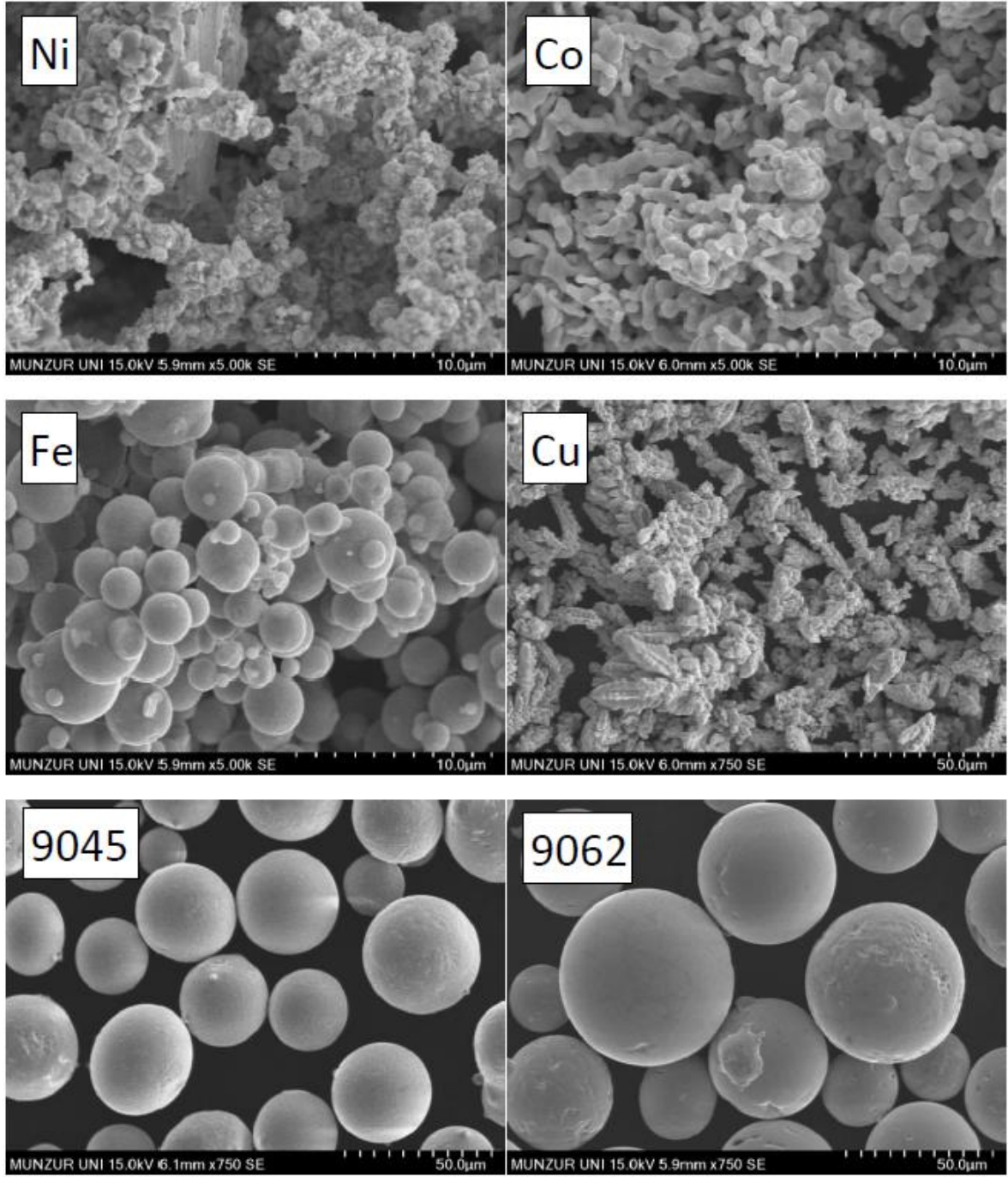
Tablo 7.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Toz Türü	Tane Boyutu (µm)	Üretici	Ticari Adı
Fe (<i>Elementel</i>)	2-4	Umicore, (Fransa)	CIP02
Ni (<i>Elementel</i>)	2-3	Vale,(İngiltere)	T255
Cu (<i>Elementel</i>)	45	PoudMet, (Fransa)	CHM 15
Co (<i>Elementel</i>)	2	Umicore, (Fransa)	Co6102
9062 (<i>alaşım</i>)	53-63	Sentes Bir, (Türkiye)	FORTECOAT,9062
9045 (<i>alaşım</i>)	53-63	Sentes Bir, (Türkiye)	FORTECOAT,9045

Tablo 7.2. Deneyde kullanılan Ni esaslı 9062 ve 9045 alaşım tozların kimyasal içerikleri

Elementler	9062 (%)	9045 (%)
Ni	Kalan	Kalan
Cr	16.19	10,53
Si	4.01	3,36
B	3.46	1,56
Fe	4.44	1,99
C	0.68	0,32
Diğerleri	<0,5	<0,5

Deneylerde kullanılan tozların Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. Deneylerde kullanılan tozların SEM görüntüleri

Temel matrisi oluşturan%85Fe-%10Ni-%5Cu (% ağı.) toz karışımı hazırlanarak katkı yapılan malzemenin tam olarak etkisinin belirlenmesi amacı ile katkı malzemeleri olan 9062,9045 ve Co tozları %10-%20ve %30 oranında temel matrise eklenmiştir. Deneylerde kullanılan matris karışımları Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

7.2. Toz Karışımlarının Hazırlanması

Tez Çalışması kapsamında kullanılacak olan Fe-Ni-Cu-Co-9062 ve 9045 metal tozları Tablo 7.3’de gösterilen oranlara göre AND FZ-500i (Japonya) 0,01 gram(gr) hassasiyete sahip hassas terazi kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 7.3. Deneylerde kullanılan toz karışımları

Numune Adı	İçerik (%Ağ.)
N1	%85Fe-%10Ni-%5Cu
N2	N1+%10 (9062)
N3	N1+%20 (9062)
N4	N1+%30 (9062)
N5	N1+%10 (9045)
N6	N1+%20 (9045)
N7	N1+%30 (9045)
N8	N1+%10 (Co)
N9	N1+%20 (Co)
N10	N1+%30 (Co)

Hazırlanan numuneler Şekil 7.3’te gösterilen 750 ml hacminde plastik numune bidonlarına bırakıldı. Metal tozlarının homojen olarak karışması için toz karışımı içerisine %2 (Ağ.) oranında Polietilen Glikol (PEG) eklendi.



Şekil 7.3. Numunelerin karıştırılması için kullanılan bidonlar

Ayrıca topaklanmanın engellenmesi amacıyla, karışım içerisine 10 mm çapında dış kısmı Krom kaplı olan rulman bilyeleri de eklendi. Bilye ve kutular karıştırma işlemi öncesi etil alkol kullanılarak temizlendi. Daha sonra karışım Şekil 7.4’te gösterilen 3 eksenli çalışma prensibine sahip ÇELMAK PM2 (Türkiye) marka bir karıştırıcı kullanılarak 25

dakika (dk.) süre ile 35 devir/dakika (dev./dk.) hız ile kuru halde karıştırılmıştır. Daha sonra karışım içerisine ağ. %2 oranında PEG ve Cr kaplı bilyeler bırakılarak 20 dakika boyunca ıslak olarak karıştırıldı. Karıştırma işleminden sonra numune tozları kilitli plastik poşetlere konularak hava almayacak şekilde sıkıca kaplatıldı.



Şekil 7.4. 3D toz mikseri

7.3. Numunelerin Üretimi

Numuneler sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. İşlem iki basamaktan oluşmaktadır. Bunlar numunelerin kalıplanması ve sıcak preslenmesi aşamalarıdır.

Hazırlanan toz karışımları Şekil 7.5'te gösterilen her bir bölmesi 40x10 mm boyutunda dikdörtgen kesitte olan grafit kalıplara yerleştirildi. Grafit yüksek sıcaklık altında elektriksel iletkenliğe sahip olması ve baskı altında deformasyona karşı mukavemetli olduğundan ötürü net ölçülerde numune üretilmesini mümkün kılmaktadır. Kalıp parçalı bir şekilde imal edilmiştir. Bu sayede imalat sonrası numunelerin rahatlıkla çıkarılıp yeni üretimde, tekrar grafit kalıpların kullanılması sağlanmıştır. Grafit kalıp çevresi yalıtkan seramik malzeme kullanılarak ısı ve elektriksel olarak izole edilmiştir. Ayrıca kalıbın en dış kısmı Alüminyum çerçeve ile sıkıştırılarak sinterleme işlemi esnasında yerinden oynaması engellenmiştir. Sıcaklık ölçümü K tipi bir termokopul ile yapılmıştır. Sıcaklık ölçümü tam

kalıp merkezinden yapılarak hassas bir şekilde numunelerin imalatı yapıldı. Numuneler soğuk presleme işlemi yapılmadan doğrudan tozların grafit kalıp içerisine boşaltılması ile üretildi. Öncelikle içerisindeki katkı elementleri ve % bileşimine göre teorik öz kütle hesabı yapıldı. 3cm^3 hacmine göre numuneler 0,1 gr hassasiyetinde tartıldı. Daha sonra toz karışımı numuneler, preslenmek üzere grafit kalıplara yerleştirildi. Numunelerin sıcak preslenme süreçlerinde kütle kaybını önlemek için grafit kalıba yapışmaması ve kalıptan zarar görmeden çıkarabilmek için kalıplara sıvı formda bor nitrür sürüldü.



Şekil 7.5. Toz numune karışımlarının konulduğu bölmeli grafit kalıp.

Sinterleme işlemi Şekil 7.6’da görülen vakumlu tip ÇELMAK HPV 120, (Türkiye) Sıcak pres kullanılarak yapıldı. Sıcak presleme işlemi $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 4 dakika 35 MPa basınç altında yapıldı. Ayrıca üretim işlemi -500 mmHg vakum ve koruyucu N_2 atmosferi altında yapıldı.



Şekil 7.6. Vakumlu sıcak pres makinesi.

7.4. Mikroyapı İncelemeleri

Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Metcon Forcipol 2V, (Türkiye) marka su zımparası kullanılarak numunelerin temizleme ve parlatma işlemi gerçekleştirildi (Şekil 7.7).



Şekil 7.7. Numune parlatma cihazı

Üretilen numuneler sertlik yoğunluk ve üç noktalı eğme deneylerinde hassas sonuçların elde edilebilmesi için öncelikle yüzey kir, kalıntı ve çapaklarından arındırıldı. Bu işlem, her bir numunenin tüm yüzeyleri 180 mesh su zımparası ile temizlenerek yapıldı.



Şekil 7.8. Sinterleme sonrasında elde edilen numune yüzeylerinin temizlenmiş hali

Bir sonraki adımda numuneler Metkon METACUT 250 (Türkiye) cihazı kullanılarak kesildi (Şekil 7.9).



Şekil 7.9. Numune kesme cihazı

Parlatma işlemini kolaylaştırmak için numuneler 29,6 mm çapında metal kalıplar kullanılarak epoksi reçine içerisine alındı. Epoksi reçine (Şekil 7.10) içerisine alınan numuneler sırası ile 180, 300, 400, 600, 800, 1200 ve 2000 Mesh'lik su zımparaları kullanılarak parlatıldı. Parlatılan numuneler daha sonra etil alkol ile yıkanıp, hava kompresörü ve sıcak hava tabancası ile kurutuldu. Sırasıyla 6 mikron, 3 mikron ve 0.25 mikron elmas pastalar kullanarak etil alkol yardımı ile numunelerin çuha üzerinde son parlatma işlemi gerçekleştirilerek kimyasal dağlamaya hazır hale getirildi.



Şekil 7.10. Epoksi reçineye alınmış numuneler.

Parlatılan numune yüzeyleri elmas pasta kalıntılardan temizlenmesi için deterjan ile yıkandı, alkol ile kurutuldu. Temizlenen yüzey (5HNO_3 (Nitrik Asit) + 5 (CH_3COOH)asetik asit + $1\text{H}_3\text{PO}_4$ (Fosforik asit) + 11 H_2O (Saf su) dağlayıcı kullanarak numunelerin daldırma yöntemi ile dağlama işlemi yapılarak mikro yapı incelemesine hazır hale getirildi.

7.5. Sertlik Ölçme İşlemleri

Üretilen numunelerin sertlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla Emco Test, Durajet (İsviçre) (Şekil 7.11) sertlik ölçme cihazında numunelerin her iki yüzeyinden 187,5 kg yük ve 2.5 mm çapında sertlik ölçüm ucu ile HB30 Brinell sertliği cinsinden ölçülmüştür. Sertliğin tam olarak belirlenebilmesi için numunelerin orta, uç, arka ve ara bölgelerinden sertlik değerleri ölçülmüş ve her bir numuneden toplam 6 adet sertlik değeri alınmıştır. Daha sonra bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numune ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir



Şekil 7.11. Sertlik Ölçüm Cihazı

7.6. Yoğunluk Ölçme İşlemi

Yoğunluk ölçümü için numuneler 0.001 gr hassasiyetinde çalışan RADWAG (Kore) marka hassas terazi ile Arşimet prensibine göre ASTM B-311 standardında uygun olarak ölçülmüştür. Şekil 7.12’de numunelerin yoğunluk ölçümünde kullanılan hassas terazi gösterilmektedir.



Şekil 7.12. Yoğunluk ölçümünde kullanılan test düzeneği

Numunelerin önce kuru ağırlıkları, ardından sıcaklığı 18°C'deki saf su dolu bir kap içinde numunelerin yaş ağırlıkları tekrar ölçülmüştür. Numunelerin yoğunlukları (öz kütleleri) aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmıştır;

$$D = \frac{m_1 * x}{m_1 - m_2}$$

Burada; D numunenin öz kütle, m_1 numunenin havadaki kuru ağırlığı, m_2 numunenin su içindeki ağırlığı, x kullanılan suyun yoğunluğudur.

7.7. Üç Noktalı Eğme Testleri (TRS)

Numunelerin F kuvveti artırılırken, malzemenin tam ortasında oluşan sehim değerini ölçmek için 3 noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. ASTM B 528-16 standartları baz alınarak 1mm/dk. hızda 20 mm alt destek boşluğunda gerçekleştirilmiştir. 3 nokta eğilme testi Şekil 7.12' de gösterilen 100 kN kapasiteli Shimadzu AG-IC (Japonya) marka universal test cihazı ile TRAPEZIUMX yazılımı kullanılarak yapılmıştır. (Şekil 7.13) Kırılma tokluğu Denklem 7.1 ile hesaplanmıştır.

$$P = \frac{3 * n * x}{2 * m * h^2}$$

P : Eğme mukavemeti (MPa),

n : Kırılma esnasında numuneye uygulanan kuvvet (N),

x : Destek noktaları arasındaki mesafe (mm),

m : Numune genişliği (mm),

h : Numune yüksekliği (mm)' dir.



Şekil 7.13. Üç noktalı eğme testlerinin yapıldığı universal test cihazı

7.8. Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Sinterlenen numunelerin mikro yapı ve kırık yüzeylerini incelemek için Munzur Üniversitesi Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Hitachi SU3500(Japonya) elektron mikroskobu kullanılarak yapıldı (Şekil 7.14).



Şekil 7.14. SEM analizlerinin yapıldığı elektron mikroskobu.

Elektron mikroskobu ile numunelerin mikro yapıları nasıl olduğu incelendi ve kırık yüzey görüntüleri de alındı. Elektron mikroskobunda ayrıca numunelerin MAP ve EDS analizleri yapıldı.

Ayrıca numunelerin epoksi reçine kalıptan çıkarılmadan SEM incelemelerinin yapılabilmesi için Şekil 7.15'te gösterildiği gibi parçaya bağlanan bir bakır kablo vasıtası ile elektriği iletmesi sağlandı.



Şekil 7.15. Bakır kablo bağlanan epoksi reçineye alınmış numuneler

7.9. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri

Numunelerin XRD ölçümleri oda sıcaklığında bir Rigaku MiniFlex 600 Japonya marka XRD cihazı (Şekil 7.16) ile $\text{CuK}\alpha$ ışınları kullanılarak alınmıştır.



Şekil 7.16. Numunelerin X-ışını difraksiyon desenlerinin alındığı XRD cihazı

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

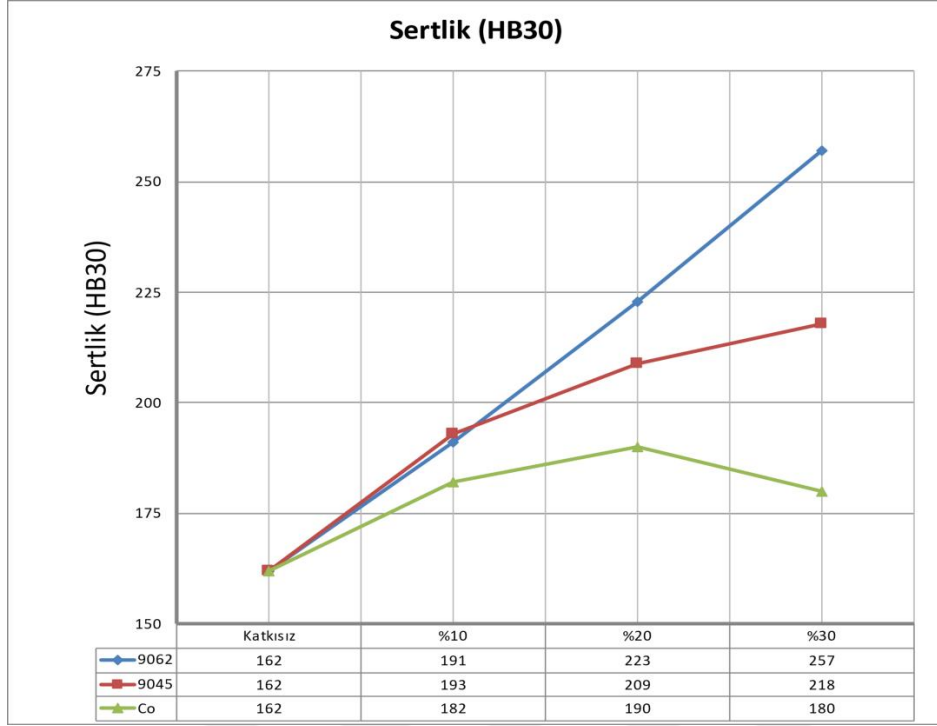
Sıcak presleme tekniği ile 35 MPa basınç, 920 °C’de 4 dakika süre ile başarı ile üretilen numunelerin karakterizasyonlarının belirlenmesi için deney sonuçları bu kısımda anlatılacaktır.

8.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Brinell cinsinden 2.5mm/ 187,5 kg kullanılarak HB30 cinsinden yapılan sertlik ölçümleri sonucunda elde edilen sonuçlar her üç numune grubu için katkı oranlarına göre sertlik değerleri grafiği Şekil 8.1’de verilmiştir. Ana matris olan Ni(%85 Fe+ 10Ni+ 5Cu) numunesinin ortalama sertlik değerleri 162 Brinell olarak ölçülmüştür. Artan katkı oranları ile sertlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Katkı oranlarının artması ile 9062 katkılı N2-N3 ve N4 numunelerinin sertlik değerleri sırası ile 191, 223 ve 257 Brinell olarak ölçülmüştür. Burada sonuç beklenildiği gibidir. Saf 9062 katkı malzemesinin sertlik değeri 62 HRC olarak ölçülmüştür. Bu nedenle artan 9062 katkı oranı ile sertlik değeri artmıştır.

9045 katkılı olan N5, N6 ve N7 numunelerinde ise sertlik değerleri sırası ile 193, 209 ve 218 Brinell olarak ölçülmüştür. Tıpkı yapılan 9062 katkısı gibi sertlik değerleri artmış fakat bu değer 9062 katkısı gibi etkili değildir. Bunun nedeni olarak 9045 katkısının sertlik değerlerinin 45 HRC olmasıdır. Sonuç beklenildiği gibidir.

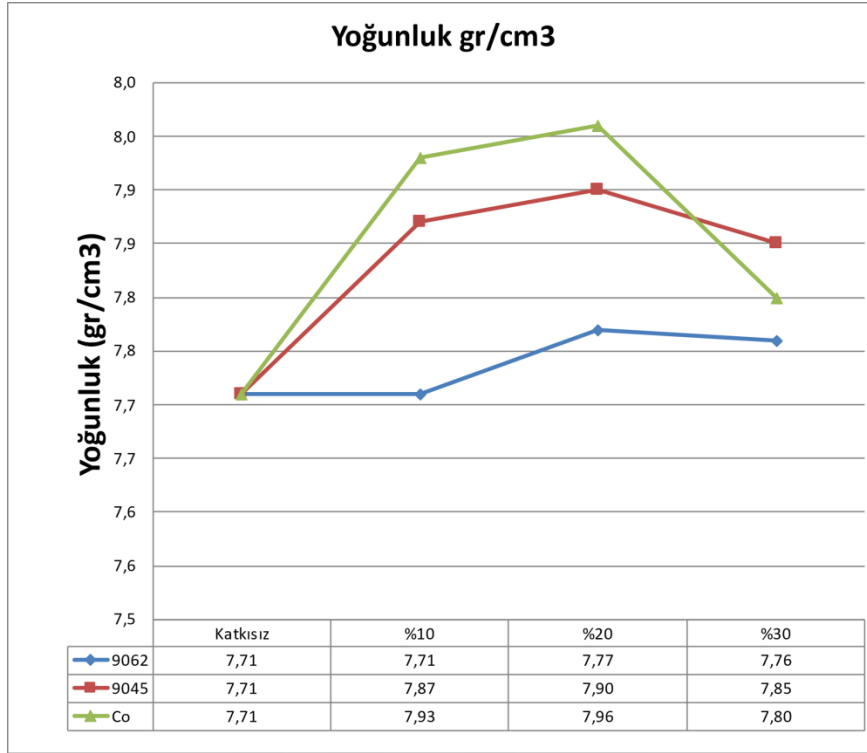
Co katkılı olan N8, N9 ve N10 numunelerinin sertlik değerleri sırası ile 182, 190 ve 180 Brinell olarak ölçülmüştür. Sertlik değeri 9062 ve 9045 katkılarının aksine fazla oranda artmamış aksine %30 Co ilaveli olan N10 numunesinde azalmıştır. Bunun nedeni C onun tane boyutu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Azalan tane boyutu sinterleme esnasında poroziteyi arttırmıştır. Ayrıca Co’nun sertliği 125 Brinell olduğu için numunelerin sertlik düşüşü belirtilen nelerden ötürü beklendiği gibidir.



Şekil 8.1. Üretilen metal kompozit numunelerinin katkılama oranına karşılık sertlik grafikleri

8.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Numunelerin ASTM B 311 standardı, Arşimet prensibine göre yapılan yoğunluk ölçüm sonuçları her üç numune grubu için katkı oranlarına göre yoğunluk grafikleri olarak Şekil-8.2’de verilmiştir. Bu grafiklere göre katkı oranı artarken; 9045 ve Co gruplarının yoğunlukları tepe noktasına ulaştıktan sonra da eksponansiyel azalmaya uğramıştır. Bununla birlikte en yüksek yoğunluk değerlerine Co katkılı numunelerinin sahip olduğu görülmüştür. Katkısız N1(%85Fe+ %10Ni + %5Cu) numunesinin yoğunluk değeri 7.71 gr/cm^3 olarak bulunmuştur. 9062 katkılı N2, N3 ve N4 numunelerinin yoğunluk değerlerine oldukça az miktarda artış meydana gelmiştir. Ayrı durum 9045 katkılı N5, N6 ve N7 numuneleri içinde geçerlidir. Co katkılı N8, N9 ve N10 numunelerinin yoğunluk değerleri ile sırasıyla 7.93, 7.96 ve 7.81 gr/cm^3 olarak bulunmuştur. Bu artışının nedenini Co’nun özkütlesinin 8.9 gr/cm^3 olmasından dolayı 9062 8.25 gr/cm^3 ve 9045 8.30 gr/cm^3 değerlerinden daha yüksek olmasıdır. Fakat artan Co oranı özkütle değerinin arttırması beklenirken bir miktar azalmıştır. Bunun nedenin ise tane boyutunun 1-2 mikron olan Co’nun yapı içerisinde kritik %20 oranından sonra daha fazla mikro porozite neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.2. Üretilen metal kompozit numunelerinin yoğunluklarını gösteren grafikleri

Üretilen numunelerin hesaplanan teorik yoğunluk değerleri ve porozite oranları tablo 8.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 8.1. Numunelerin özkütleleri ve porozite oranları

Numune Adı	Teorik Özkütle (gr/cm ³)	Gerçek Özkütle (gr/cm ³)	Porozite Oranı %
N1	8,03	7,71	3,99
N2	8,05	7,71	4,22
N3	8,07	7,77	3,72
N4	8,09	7,76	4,08
N5	8,06	7,87	2,36
N6	8,08	7,90	2,23
N7	8,11	7,85	3,21
N8	8,12	7,93	2,34
N9	8,2	7,96	2,93
N10	8,29	7,80	5,91

Gerçek ölçüm sonuçlarından elde edilen verilere göre numunelerin hesaplarının teorik özkütle değerlerine göre hesaplamalar yapılmış ve % porozite oranı değerleri elde edilmiştir. 9062 katkılı numuneler için porozite oranları neredeyse %0.5 oranında değişmiştir. 9045 katkılı numunelerin porozite oranları 9062’ye göre bir miktar daha düşüktür. Bunun nedeni 9045 katkısının partikül boyutlarının daha az ve küresel şeklinden

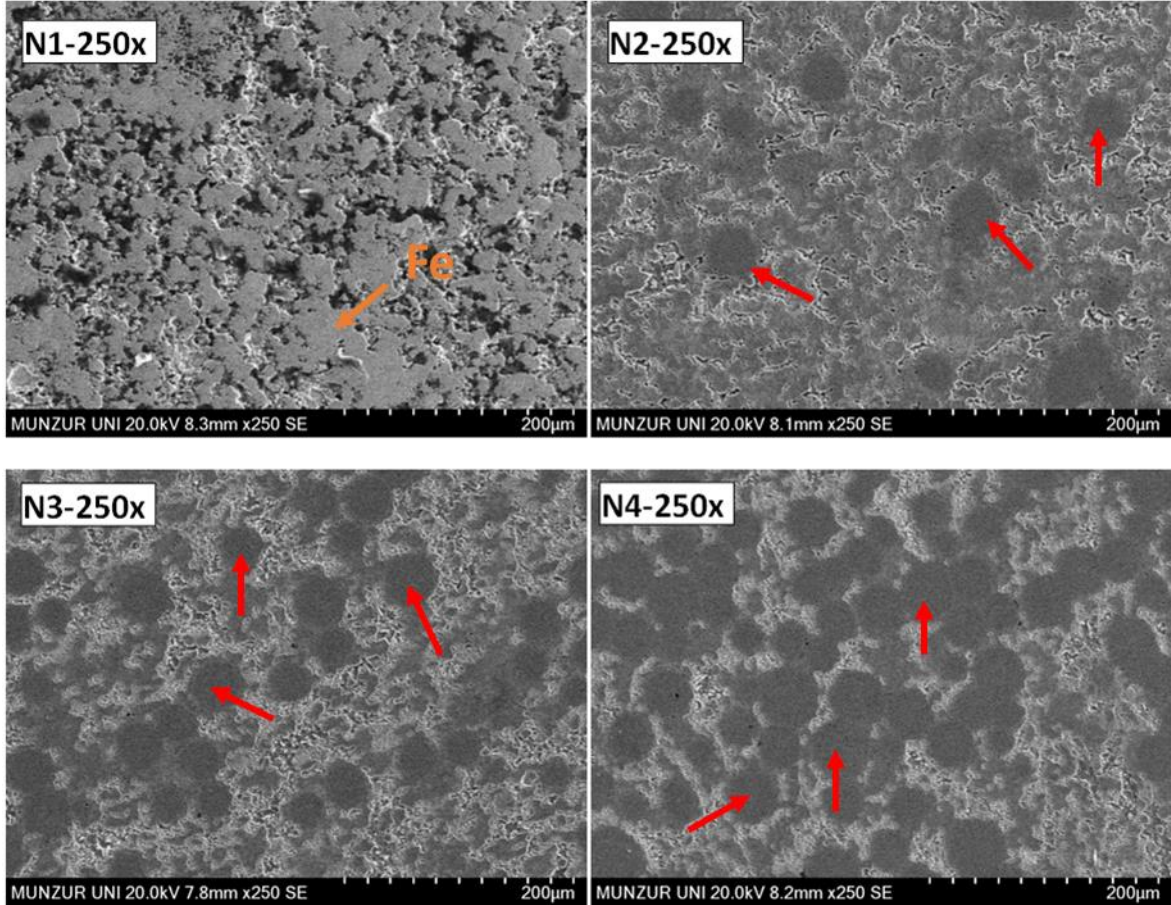
dolayı olduğu düşünülmektedir. Fakat Co katkılı N8, N9 ve N10 numunelerinde artan Co oranı porozite miktarını da arttırmıştır. Bu durum daha önce belirtildiği gibi partikül boyut şekli ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Azalan partikül boyutu sinterleme işlemi için daha çok süre ve sıcaklığa ihtiyaç duyduğu düşünülmektedir.

8.3. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri yapılırken, eklenen katkı malzemelerinin yapıya etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için sinterlenmiş numunelerin SEM resimleri 250x ve 1000x büyütmelerinde alınarak incelenmiştir.

Şekil 8.3.'te N1 (%85Fe+ %10Ni+ %5Cu) N2, N3 ve N4 numunelerinin dağlanmış yüzeylerinin 250x büyütmedeki SEM resimleri gösterilmiştir. Bunlardan, N1-250x resminde çoğunluğu oluşturan kenarları girintili çıkıntılı pütürlü dentritik yapılar demir (Fe) yapıları (Fe zaten hayli yüksek oranda olduğundan bu sonuç beklendiği gibidir). Bu demir dentritlerinin genel olarak içlerinde oluşmuş koyu alanlar nikel yapıları alanlar, çoğunlukla demir dentritleri arasındaki çukurlarda (gözeneklerde) yerleşmiş olan açık renkli bölgeler ise bakır yapılarına ait alanlardır (Çelik, 2009). Fe-bazlı yerler arasında kalan çoğu koyu karanlık yerler ise bulk iç kısımdaki kapalı hacimli boşluk porozitelerinin (gözeneklerin) dağlanmış yüzeydeki çukurlar şeklinde görünen yarım kesitsel görüntüleri ile oksitlerdir (Çelik, 2009; Jamrozek, 2020). N2-250x SEM görüntüsünde ise yuvarlağımsı ve etraflarını saran matris yüzeyleri ile kısmen iyi yüzeyler arası diffüze (iç içe geçme) olmuş şekilde topaklaşmış (sinterleşmiş) biçimli yapılar 9062 katkısına aittir. Bu yuvarlağımsı katkı topakları ile etraflarını saran matris arasında yüzey difüzyonunun veya bağlantısının oluşmamış olduğu yerlerde matris ile katkı ara yüzeylerinde oluşmuş olan küçük boyutlu boşlukların (gözeneklerin) mevcut olduğu görülmektedir. N3-250x görüntüsünde 9062 katkısının oranı artık iki katına çıktığından matris ile katkı topakları ara yüzeyindeki boşluklar minimize olmuştur, ancak matris içlerindeki çukurlar varlıklarını sürdürmüşlerdir, bunların yansıra bazı topaklar da katkı oranı artışıyla sayılarının (veya konsantrasyonlarının) artması sonucu birbirleriyle birleşmişlerdir. Katkı oranının üç katına çıktığı N4-250x görüntüsünde ise ara yüzeyel boşluk oluşumu neredeyse tamamen kalkmış (yoğunluk maksimum değere oldukça yaklaşmış), matris içi çukurlar azalmışlardır ve az sayıda noktasal oksit benekleri de mevcuttur, ancak katkı miktarı ve dolayısıyla topakların sayısı iyice arttığından topaklar birbirleriyle çokça birleşmişlerdir. Neticede 9062 katkılı N2-4 numune grubunda; katkılı

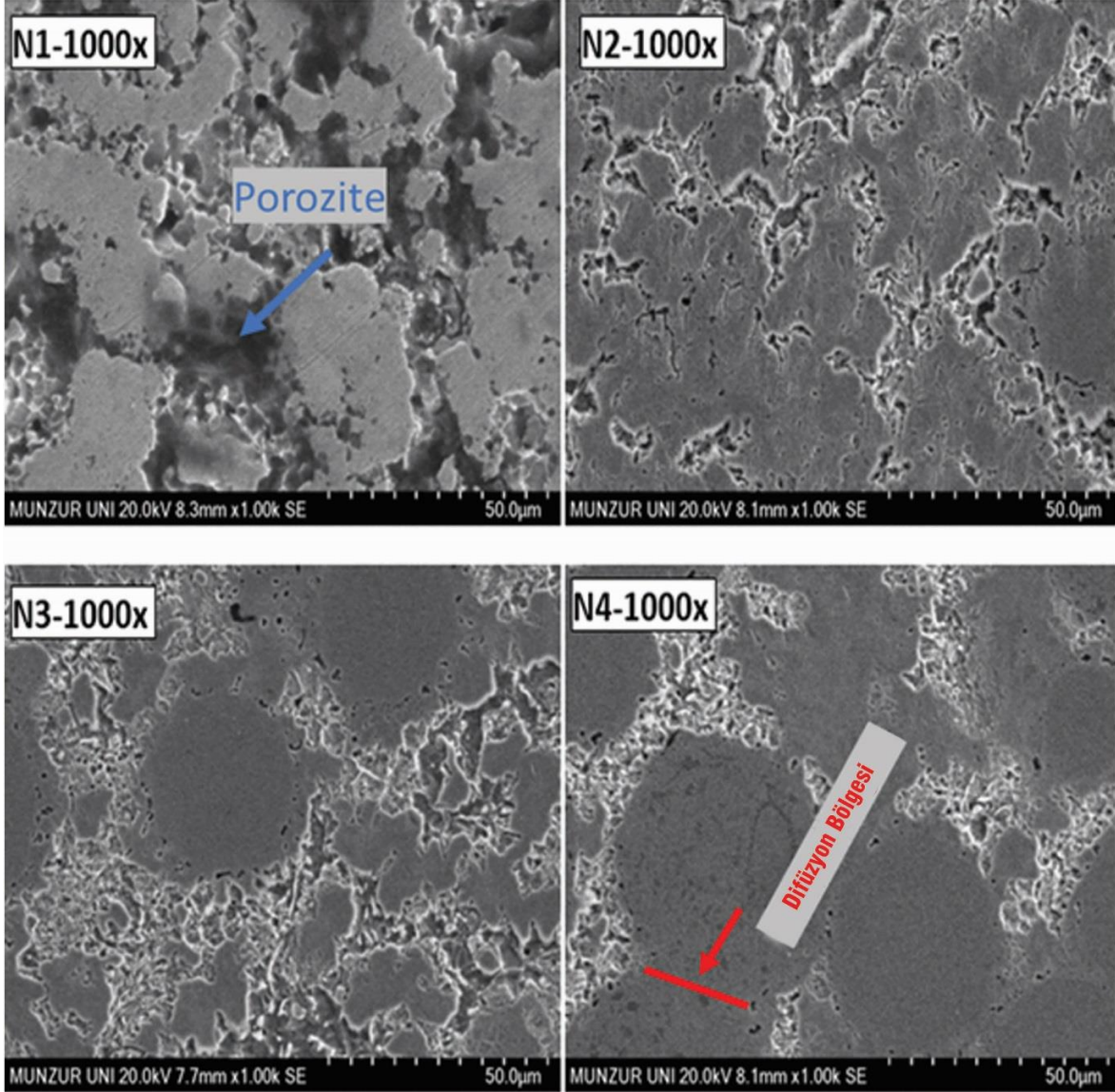
numune matris-topak ara yüzeyi boşlukları en fazla N2 numunesinde en az ise N4 numunesinde oluşmuştur, ancak matrisin etrafını en çok sardığı en fazla yalnızlaşmış topaklar N2 numunesinde düşük katkı konsantrasyonu sebebiyle oluşmuştur. Bir de katkısız N1 numunesinde oksitlenme diğerlerine göre hayli fazla olmuştur, katkılama FeNiCu baz matriste porozite miktarını kısmi derecede azaltmıştır.



Şekil 8.3. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile 9062 katkılı N2, N3 ve N4 numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri. Oklar 9062 katkısının göstermektedir

N1 ile 9062 katkılı N2, N3 ve N4 numunelerinin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 8.4'te verilmiş olup bu görüntüler numunelerin morfolojik yüzeyine daha detaylı bir bakış sunmuştur. Az önce belirtildiği gibi bu görüntülerde de katkılama oranı arttıkça referans N1 matris numunesinde bolca mevcut olan porozite çukurları ve oksitler katkılama oranı arttıkça azalmış ve N4 numunesinde neredeyse tamamen ortadan kalkmışlardır. Sonuç olarak N2-N4 elmas tutucu (binder) metal kompozit numunelerinin

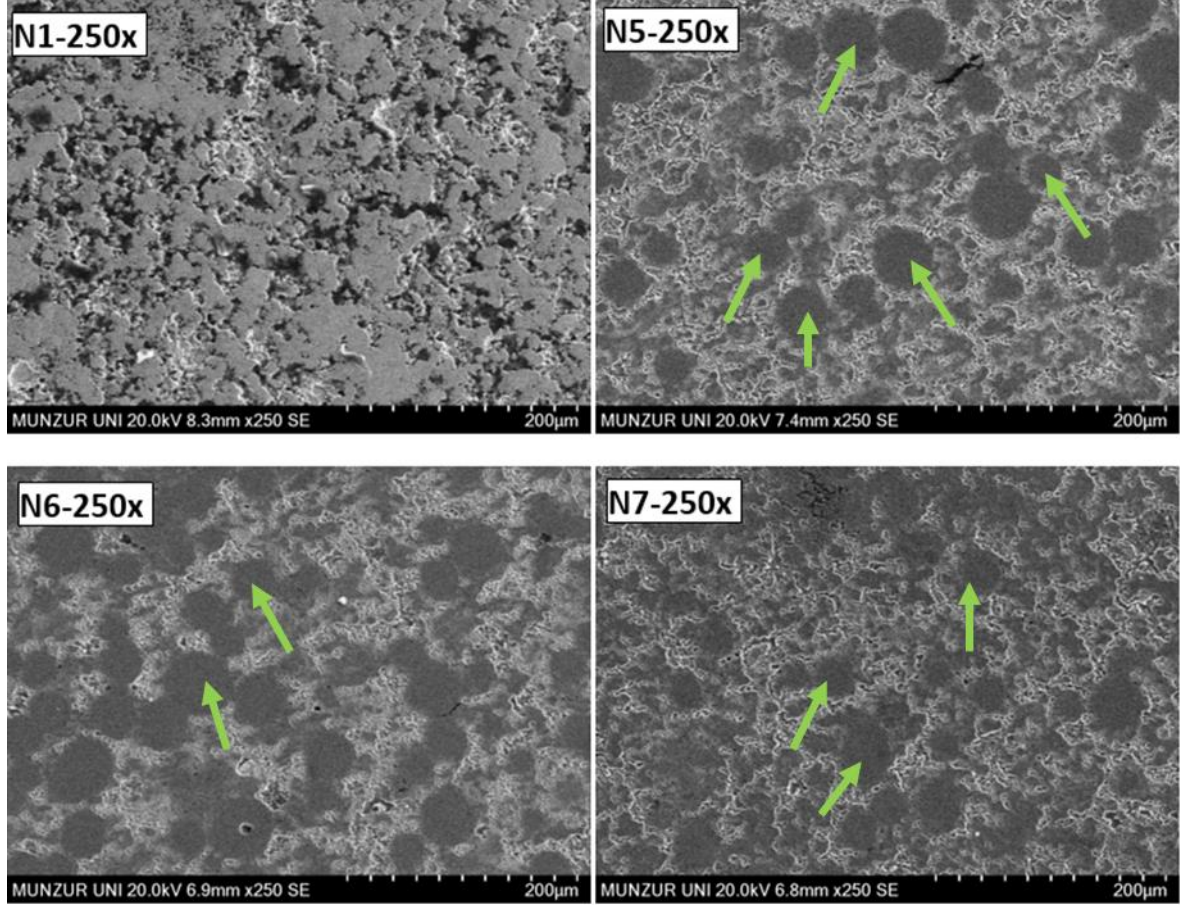
sinterleşme işlemlerinin oldukça başarılı gerçekleşmiş olduğu ve katkı oranı yükseldikçe porozite oranının azalarak teorik yoğunluğa yaklaşıldığı söylenebilir.



Şekil 8.4. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile 9062 katkılı N2, N3 ve N4 numunelerinin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

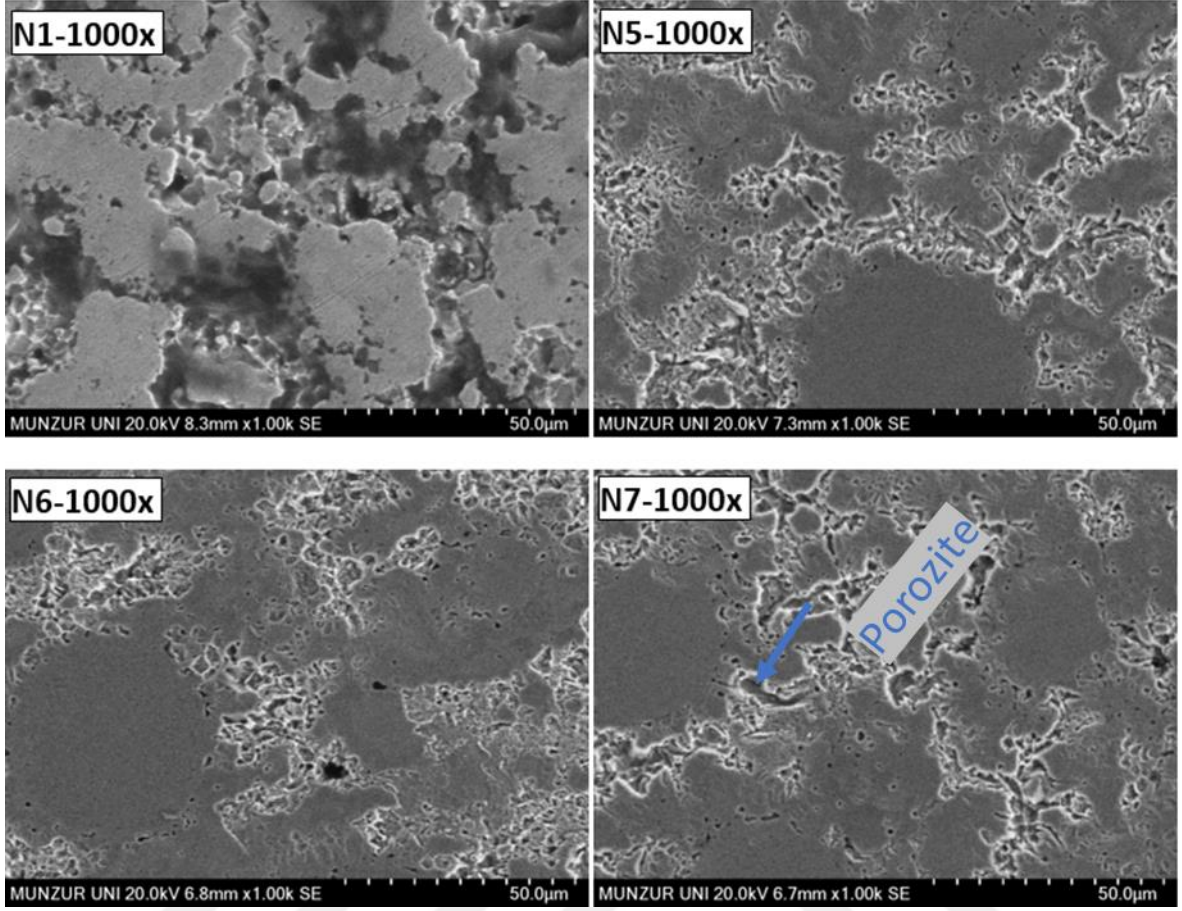
Şekil 8.5'te benzer tarzda N1 matris numunesi ile bu kez 9045 katkılı N5, N6 ve N7 metal kompozit numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntülerinin karşılaştırması verilmiştir. Bunlardan N5 numunesinde de katkılamadan dolayı yuvarlak katkı bazlı topaklaşmaların oluştuğu görülmekte ancak porozite çukurları hala çok sayıda olup oksitler mevcuttur. Önceki numune grubundan farklı olarak bu grupta en az porozite ve en

yüksek yoğunluk iki kat katkılamının olduğu N6 numunesinde meydana gelmiştir. Üç kat katkılama yapılmış N7 numunesinde çukurlar tekrar artmıştır.



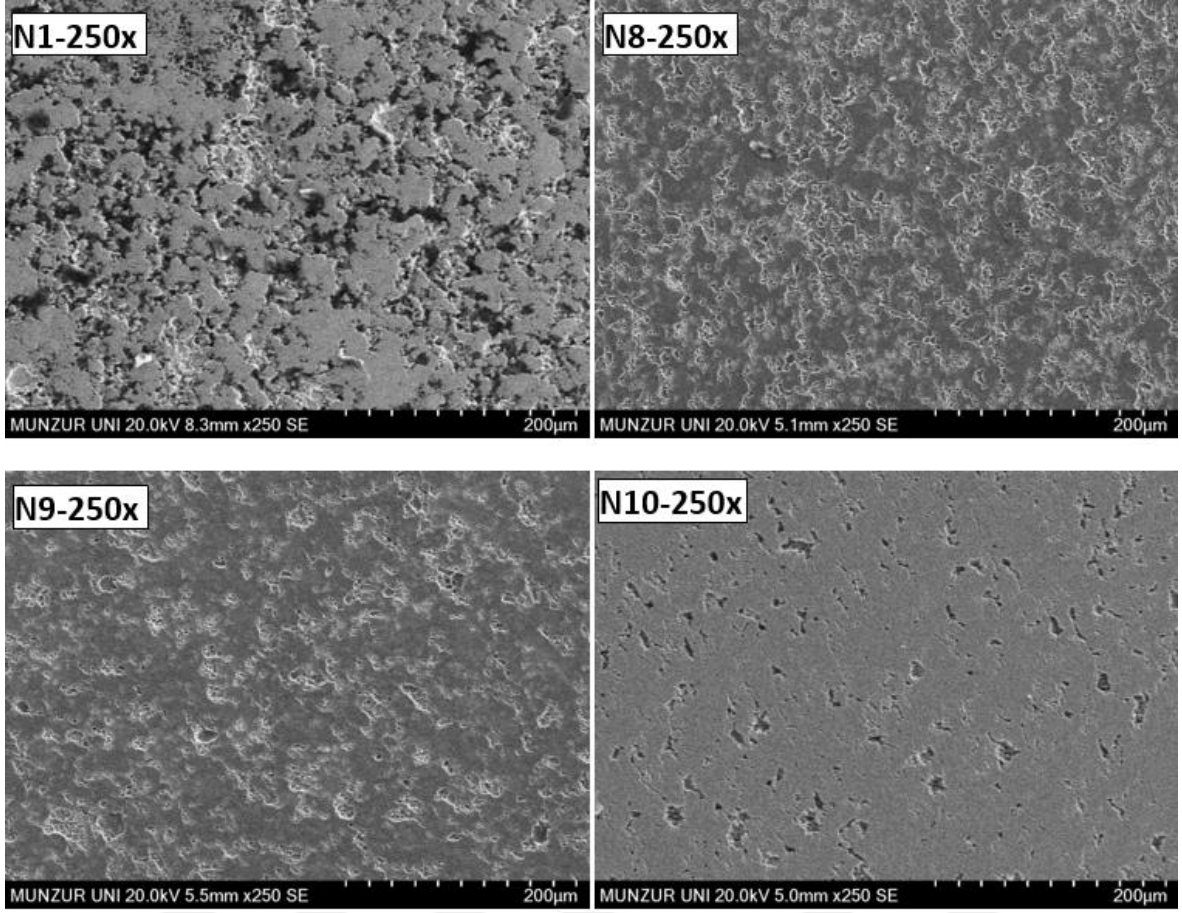
Şekil 8.5. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile 9045 katkılı N5, N6 ve N7 numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri. Oklar 9045 katkısını göstermektedir

N1 ile 9045 katkılı N5, N6 ve N7 numunelerinin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 8.6’da verilmiştir. Yine bu görüntülerde karşılaştırma ile en az porozitenin N6 kompozit tutucu numunesinde olduğu daha net görülmektedir.



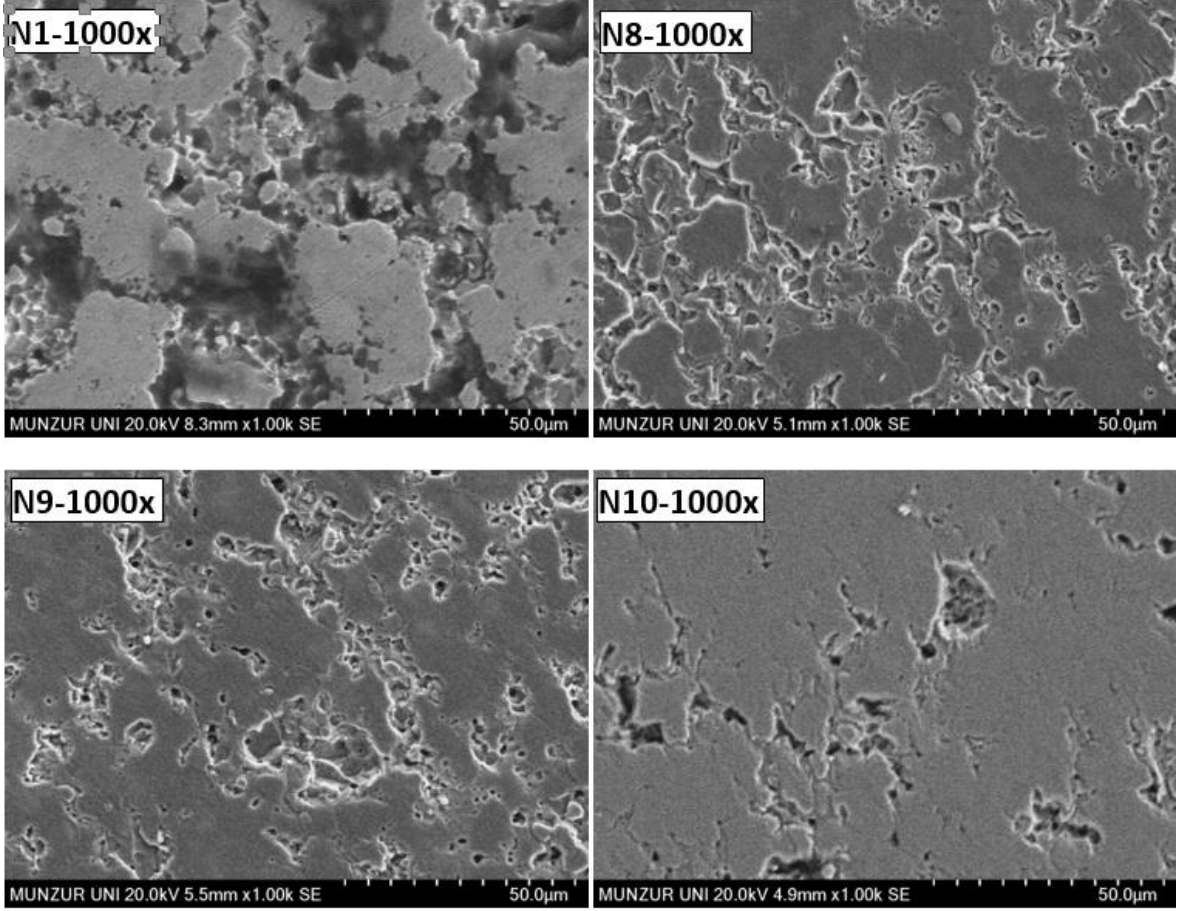
Şekil 8.6. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile 9045 katkılı N5, N6 ve N7 numunelerinin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

N1 ile kobalt (Co) katkılı N8, N9 ve N10 numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 8.7’de verilmiştir. Bu N1 ile bu numune grubunun SEM görüntülerinde, teorik yoğunluğa en fazla üç kat katkılı N10 numunesinde yaklaşılmış ve yine katkılama arttıkça porozite çukurlarının azalmış olduğu görülmekte ancak üç kat katkılama olsa da (N10 numunesinde bile) tamamen azalmayıp yer yer derinleşmiş çukur ve oksitleşmeler mevcuttur.



Şekil 8.7. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile kobalt (Co) katkılı N8, N9 ve N10 numunelerinin 250x büyütmedeki SEM görüntüleri

Kobalt (Co) katkılı N8, N9 ve N10 numuneleri ile N1 referans numunesi ile karşılaştırma amaçlı 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 8.8’de verilmiştir. Katkılama oranı artışı ile porozite çukur ve oksitlerin azaldığı görülen bu görüntülerde üç kat katkılamaya rağmen N10 numunesinde hala varlığını sürdürmüş olan sayısı azalmış ancak derinleşmiş porozite çukurları daha ayrıntılı görülebilmektedir. Önceki porozite yüzdesi verileri N10 numunesinde bu iç kısımları görünmeyen derinleşmiş porozitelerin diğer tüm numunelerden daha fazla hacme sahip olduğunu göstermektedir. N10 numunesinde porozitenin azaltılması için uygulanan sinterleme sıcaklık ve basınç kuvvetinin az bir miktar artırılması işe yarayabilir (Karaduman ve ark., 2019).



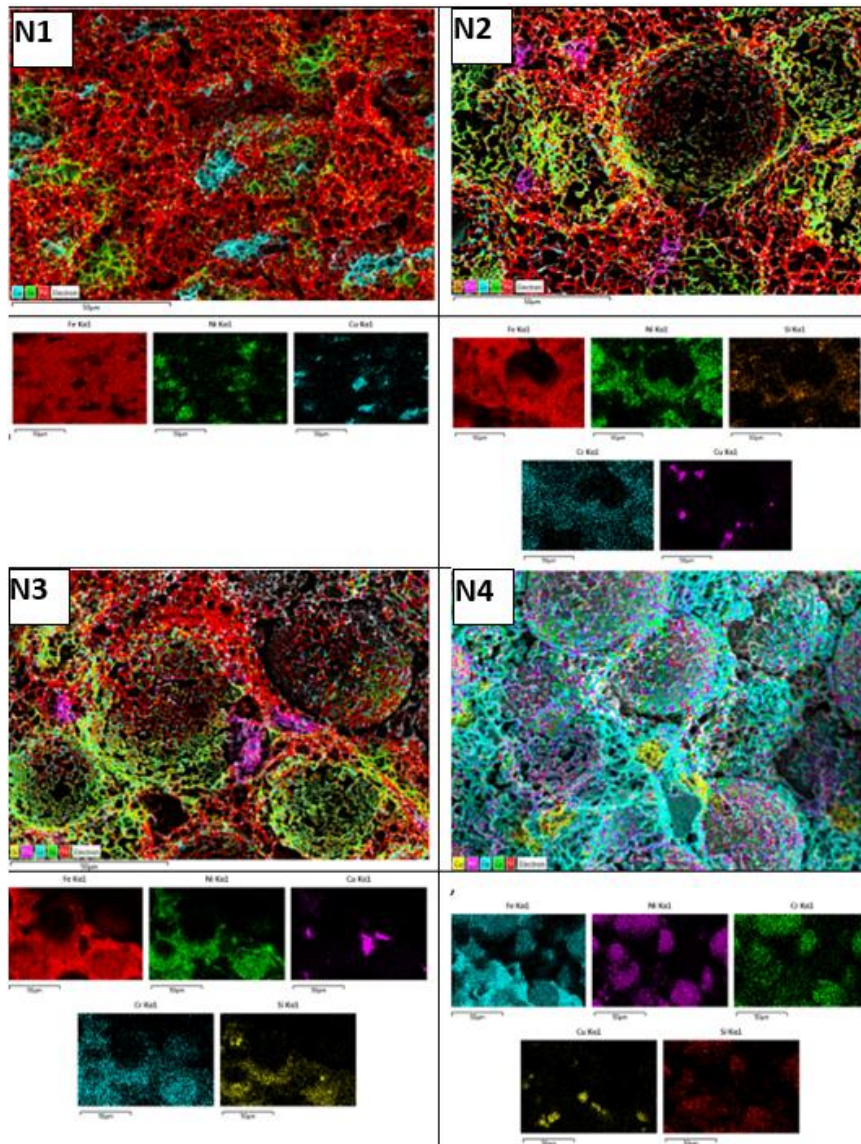
Şekil 8.8. Referans (karşılaştırma) matris numunesi olan N1 ile kobalt (Co) katkılı N8, N9 ve N10 numunelerinin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Numune gruplarının referans N1 matris numunesi ile karşılaştırmalı kırık yüzey EDS görüntüleri Şekil 8.8'deki görüntülerde verilmiştir. Bu görüntülerde renklere karşılık gelen elementler görüntülerin altındaki küçük resimlerde görülmektedir. Örneğin, N1 referans numunesinin EDS görüntüsünde kırmızı yerler demiri, yeşil nikeli ve açık mavi ise bakır yerlerini göstermektedir. Diğer numunelerde elementlerin renkleri farklı verilmiştir. Tüm görüntülerdeki koyu siyah bölgeler de çatlak veya porozite boşluklarını temsil etmektedir.

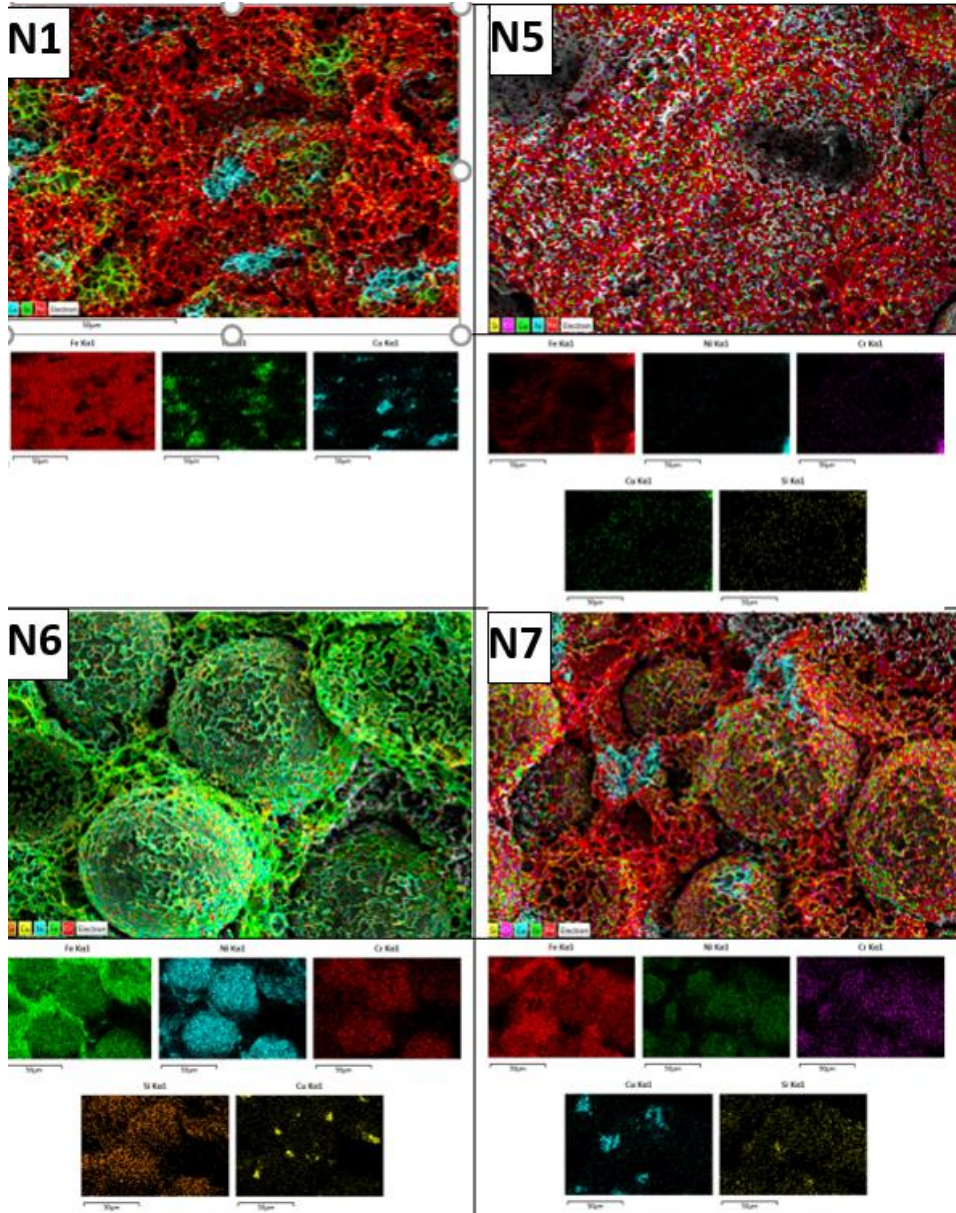
Şekil 8.9'da N1 numunesindeki renklerin dağılımı bu demir bazlı Fe-Ni-Cu malzemesinin kompozisyonuna uygun şekilde meydana gelmiştir. N2 numunesinde ortadaki tek olarak görünen küresel topağın üzeri demir bazlı matris ile tamamen sarılmamıştır ve boş yarıklar mevcuttur. N3 numunesinde 9062 katkısının oranı iki katına çıktığından bu boşluklar biraz daha kapanmış yani Fe-bazlı matris topak kürelerini daha fazla kaplamıştır. Üç kat katkılı N4 numunesinde ise küreler neredeyse tamamen baz matris ile bir zar gibi kaplanmış ve boşluklar yok denecek kadar azalmıştır. Kürelerin numune yüzeylerinin

dağlanmalarından dolayı oluşan baz-matris ile topak küreler arasındaki derin yanal kırık veya çatlak yarılmaları ise yine katkılama oranı artışıyla boyutları küçülerek azalmış olsalar da varlıklarını sürdürmüşlerdir.

Şekil 8.10’da tek kat 9045 katkılı N5 numunesinde topak küre oluşmamışken, iki kat katkılmalı N6 numunesinde yüzeyleri de aralıklı demir matris ile kaplanmış ve üç kat katkılı N7 numunesinde demir bazlı matris ile kaplanan yüzey daha da artmıştır. Bu grupta da yine yanal kırıklar önceki numune grubundakine benzer şekilde katkı oranı artışıyla küçülüp azalmış ancak varlıklarını korumuşlardır.



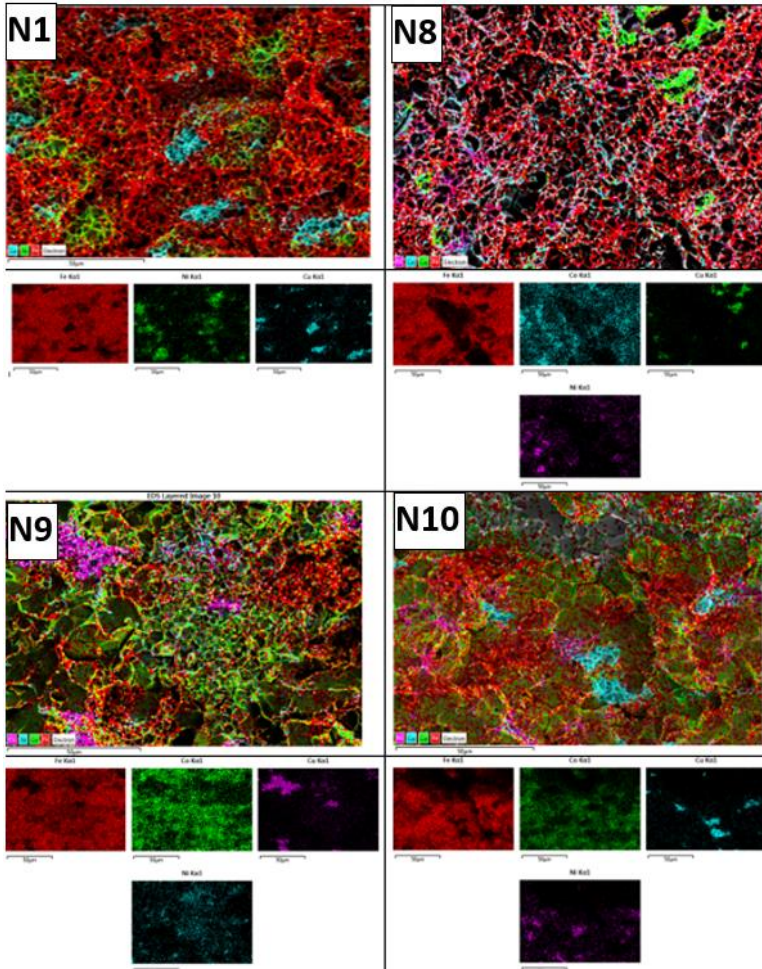
Şekil 8.9. Referans N1 ile 9062 katkılı N2, N3 ve N4 numunelerinin kırık yüzey EDS görüntüleri



Şekil 8.10. Referans N1 ile 9045 katkılı N5, N6 ve N7 numunelerinin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 8.11’de verilen kobalt katkılı N8-10 numunelerine ait renkli EDS görüntülerine bakıldığında, tek kat kobalt katkılı N8 numunesinde kobaltın matris içinde homojen dağıldığını ancak karanlık boşlukların ve oksitlerin bolca var olduğu görülmektedir. Katkı oranı N9 numunesinde iki katına çıktığında aniden irili ufaklı çok sayıda ve şekilde olan, üzerlerine ve birbirleri arasındaki boşluklara tutkal veya harç gibi yerleşmiş kobalt (yeşil renkli) ile kaplı tanelerin olduğu görülmektedir. Bu durum yoğunluğu artırmıştır, öyle ki önceki yoğunluk ölçüm sonuçlarında da bu %20 kobalt katkılı N9 numunesinin ölçülen yoğunluğu teorik yoğunluğuna en çok yaklaşmış ve en yüksek numune yoğunluğuydu.

Kobalt oranı üç katına çıktığı N10 numunesinde ise bir N9'daki gibi bazı küçük tanelerin irileştiği görülmekle beraber kobalt daha önce üzerlerini kapladığı bazı taneler ile yerleştiği bazı bölgelerden çekilmiş bu nedenle yoğunlukta birazcık bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum önceki yoğunluk ölçüm sonuçlarında kobalt grubunun yoğunluk grafiğindeki eksponasiyel azalarak gerçekleşen artışı sağlayan durum olmuştur. Neticede her üç numune grubu için de denilebilir ki herhangi bir numune grubu için teorik yoğunluğa maksimum derecede yaklaşıma katkılama oranını çok artırmakla değil matris içi boşluk prorozitelerini dolduracak kadar optimum veya ideal bir katkılama oranı artışıyla ulaşılabilir. İdeal orandan fazla olan katkılamalar yoğunluğu azaltabilen bir etken olabilmektedir. Böylesi fazla katkılamanın yol açtığı yoğunluktaki eksponasiyel azalmanın benzeri olan tane irileşmesi sonucu sertliğin ve esnekliğin azalması az ileride verilen üç nokta eğme deneylerinde elde edilen mukavemet ve yüzde uzama değerlerinde de görülmüştür.



Şekil 8.11. Referans N1 ile kobalt katkılı N8, N9 ve N10 numunelerinin kırık yüzey EDS görüntüleri

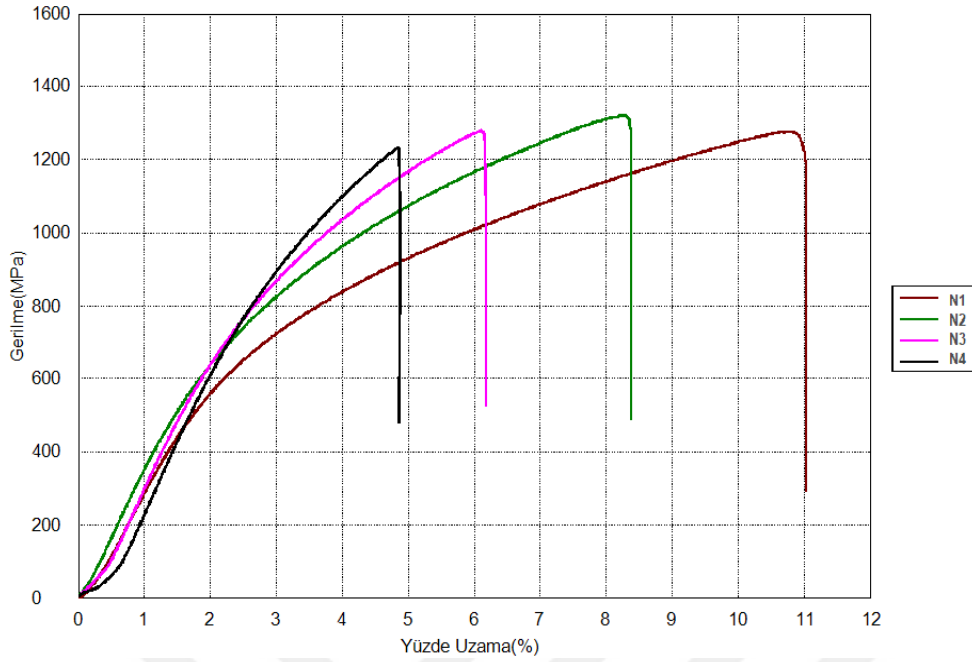
8.4. 3 Noktalı Eğilme (TRS) Deneyi Sonuçları

Şekil 8.12, 8.13 ve 8.14 ‘de üretilen numenlerin 3 noktalı eğilme sonuç grafikleri gösterilmektedir. Kıyaslamamanın daha rahat yapılabilmesi ve matris katkı malzemelerin etkisinin daha anlaşılır bir şekilde görülebilmesi için N1(%85Fe+%10Ni+%5Cu), numunesi ile kıyaslamalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için deney sonuçları Tablo 8.2’de gösterilmiştir.

Tablo 8.2. Üretilen deney numunelerinin Gerilme (MPa) ve uzama(%) değerleri

Numune Adı	Gerilme (MPa)	Yüzde Uzama (%)
N1	1276	10,72
N2	1320	8,25
N3	1279	6,11
N4	1233	4,85
N5	1313	9,26
N6	1295	7,69
N7	1269	6,12
N8	1612	16,60
N9	1609	14,92
N10	1417	11,23

9062 katkılı Alaşım toz içeren N2(N1+%10(9062)), N3(N1+%20(9062)), ve N4(N1+%30 (9062)) numunelerinin 3 noktalı eğilme deneyi sonuçları Şekil 8.12’de gösterilmiştir.

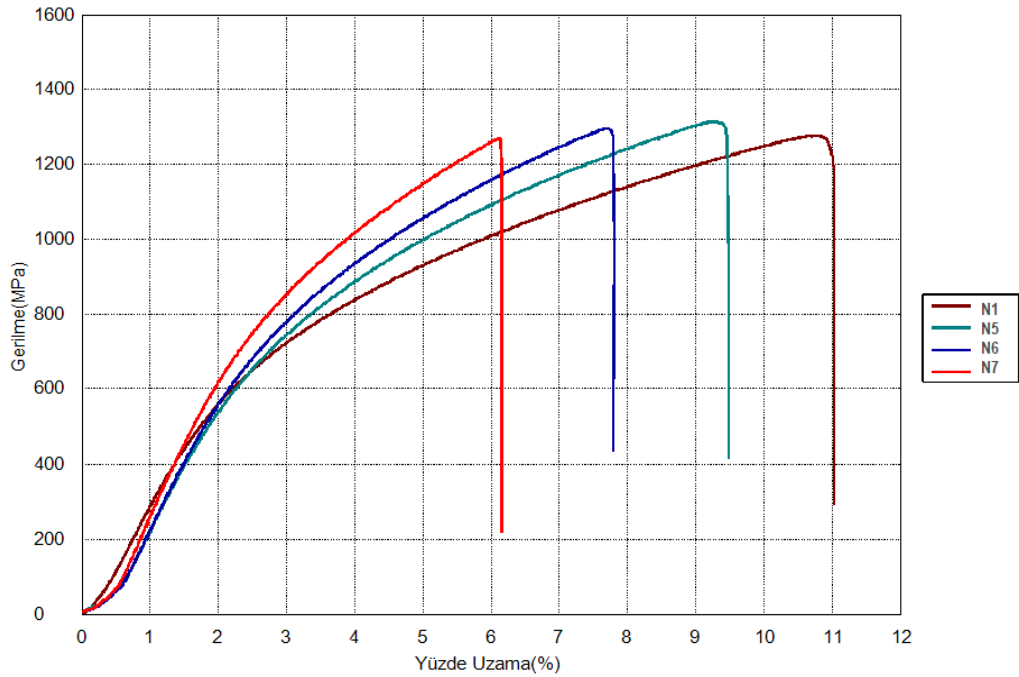


Şekil 8.12. N1(%85Fe+%10Ni+%5Cu), N2(N1+%10(9062)), N3(N1+%20(9062)), N4(N1+%30(9062)), numunesinin 3 noktalı eğilme deneyi sonucu grafiği

N1, N2, N3 ve N4 numuneleri için Elde edilen Gerilme (MPa) değerleri sırasıyla; 1276MPa, 1320MPa, 1279MPa ve 1233 MPa'dır. (%) Uzama değerleri ise sırasıyla 10,72-8,25-6,11-4,85 dir. Değerlerden anlaşılacağı üzere artan 9062 malzemesi oranı ile % uzama miktarının azaldığı görülmektedir. ayrıca %10-9062 katkılı olan N2 numunesinin 1320 MPa ile 3 noktalı eğilme mukavemetinin bir miktar arttığı görülmektedir. Şekil 8.12'de gösterilen N1-N2-N3 ve N4 numunelerinin mikro yapı resimleri incelendiğinde yaklaşık 60 mikron boyutunda olan 9062 katkı malzemesinin toz şekillerinin küresel olarak yapı içerisinde dağıldığı görülmektedir. Bu durum sertlik artışına neden olmuştur fakat matris üzerine etki eden kesme kuvvetlerinin tam olarak sönmülmesini sağlayamaması nedeniyle mukavemet %10 katkı oranında önce bir miktar artmış daha sonra ise artan sertlik değerine rağmen azaldığı görülmüştür. Bu durumun 9062 toz partiküllerinin yuvarlak olan şekillerinden dolayı ana matris malzemesi olan (%85Fe+%10Ni+%5Cu) nun eğilme mukavemeti değerini azaltmıştır (Demir ve ark., 2004).

9045 katkılı alaşım toz içeren N5(N1+%10(9045)), N6(N1+%20(9045)), ve N7(N1+%30(9045)) numunelerinin N1(%85Fe+%10Ni+%5Cu), numunesi ile karşılaştırmalı 3 noktalı eğilme deneyi sonuçları Şekil 8.13'de gösterilmiştir. N5-N6 ve N7 numunelerinin Üç Noktalı eğilme mukavemetleri sırasıyla 1313-1295 ve 1269 MPa'dır. % Uzama değerleri ise sırasıyla 9,26-7,69 ve 6,12 dir. 9062 katkılı N2-N3 ve N4 numunelerine

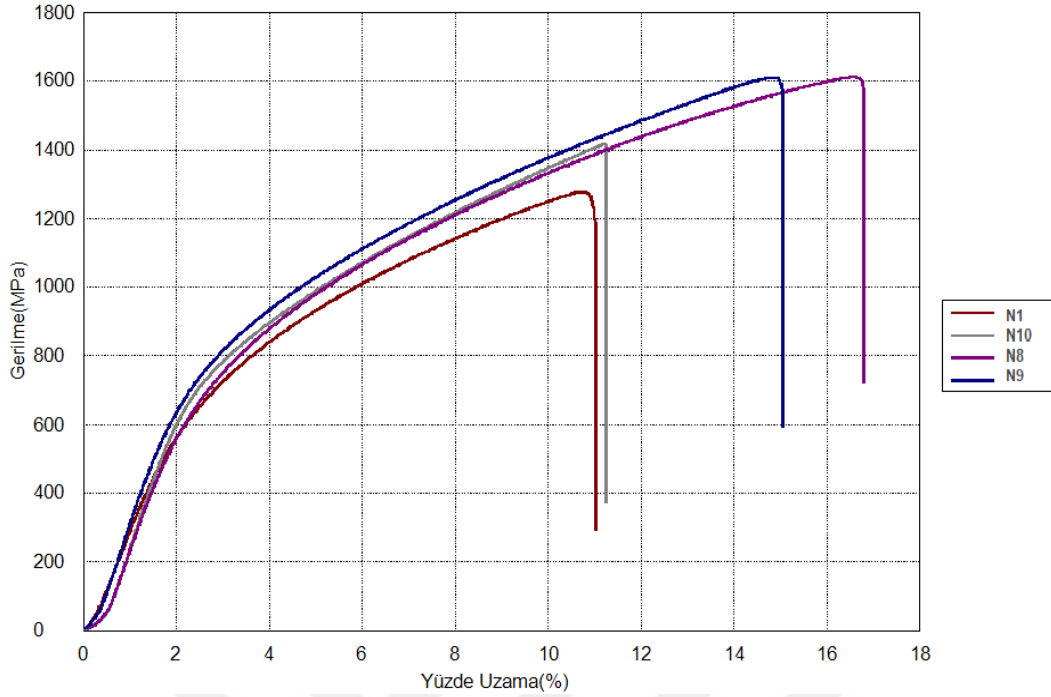
göre üç noktalı eğilme deneyi mukavemetleri N5 (N1+%109045) numunesinde bir miktar düşük çıkmıştır fakat %20 ve %30 katkılı N6 ve N7 numunelerinde çok az bir farkla daha yüksek olduğu görülmektedir. 9045 katkısının toz partiküllerinin şekli tıpkı 9062 katkı malzemesi gibi yuvarlak şekildedir. Fakat Şekil 8.13’ de gösterilen SEM fotoğrafında partikül boyutlarının daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum toplam toz yüzey alanının artmasına neden olarak sonuçların katkısız olan N1(%85Fe+%10Ni+%5Cu), numunesine göre daha yakın olduğunu göstermektedir. Bilindiği üzere özellikle metal ve alaşımlarında tane boyutu küçülmesi spesifik önem arz eden bir çalışma konusu olup tane boyutunun çeşitli yöntemlerle küçültülmesi tanelerin yüzey alanlarını büyütür ve bu malzemelerin dayanım (strength), süneklik (ductility) ve sertliğini (toughness) artırmakta, ve ayrıca çatlak veya kırık (fracture) denilen yarılmaları da azaltmaktadır (Calcagnotto ve ark., 2010). Yani malzemelerin kullanım ömürlerini artırmaktadır.



Şekil 8.13. N1(%85Fe+%10Ni+%5Cu), N5(N1+%10(9045)), N6(N1+%20(9045)), N7(N1+%30(9045)), numunesinin 3 noktalı eğilme deneyi sonucu grafiği

Co katkılı N8(N1+%10Co), N9(N1+%20Co), N10(N1+%30Co), Numunelerinin N1(%85Fe+%10Ni+%5Cu), numunesi ile karşılaştırmalı 3 noktalı eğilme deneyi sonuçları Şekil 8.14’de gösterilmiştir. N8-N9 ve N10 numunelerinin üç noktalı eğilme mukavemetleri sırasıyla 1612-1609 ve 1417 MPa’dır. % Uzama değerleri ise sırasıyla 16,6-14,92 ve 11,23 dür.

9062 ve 9045 malzemelerine göre kıyaslandığında Co'nın etkisi açıkça görülmektedir. Artan üç noktalı eğilme mukavemeti ve % uzama değerleri artan Co katkısı ile azalmaktadır. Co toz metalurjisi için önemli matris metallerinden biridir. Özellikle 2 mikron boyutundaki tane boyutu ısıatabilme kabiliyeti ve mekanik özellikleri bakımından matrisin eğilme mukavemetinde artışa neden olmuştur (Nguyen ve ark., 2020). Fakat artan Co oranı ile üç noktalı eğilme mukavemet değerinin artması gerekirken azalmaya neden olmuştur. Bu durumun Şekil 8.8 'de 1000x büyütme mikroyapı resimlerinden alırlmaktadır. Artan Co oranı ile yapıdaki mikro porozite sayısı azalmış ancak %30 gibi aşırı bir kobalt katkılama ile tanelerin büyümesiyle arada kalan bu poroziteler içlere doğru derinleştiklerinden toplam hacimsel yüzde porozite oranı diğer tüm numunelerin hepsinden daha yüksek olmuştur. Bu durum artan Co oranı ile matriste tane irileşmesinin meydana geldiğini göstermektedir. Artan tane irileşmesi ile mukavemet değerlerinde düşüş meydana gelmiştir (Nguyen ve ark., 2020). Fe, Ni, Cu ve Co metallerinin yüzey enerjileri arasında $Ni > Co > Fe > Cu$ şeklinde bir büyüklük ilişkisi (Tyson, 1975) vardır ve metaller sinterleme gibi ısı işlemlerde yüzey enerjisi büyük olan metale doğru diffüze (akma) eğilimindedirler (Uhlmann ve ark., 2020). Bir kat kobalt katkılı N8 numunesinde nikel doğru yönelen daha az orandaki kobalt bu yüzden görece düzgün ağ gibi dağılmış, N9'da bu durumu nikel oranına denk düşerek tane oluşumuna sebep olarak korumuş, ancak N10 numunesinde nikel oranını aştığı için kobaltın bir kısmı yine nikel oranını karşılamış ancak artık kalan kobalt ikinci en yüksek yüzey enerjisi olan kendi kendisine doğru diffüze olmuş ve bu nedenle de N10 numunesinin kırık yüzey görüntüsünde ayrışmış kobalt ve kobalt-nikel toplaşmalarının olduğu tanelerin oluştuğu görülmüştür, bu ayrışmalar da N10 numunesinde kısmen tane irileşmesine neden olmuştur. Yine başta boşlukları dolduran kobaltın bu ayrışma nedeniyle tanelere çekilmesi nedeniyle en yüksek porozite yüzdesi ölçümü değeri diğer tüm numunelere kıyasla bu aşırı kobalt katkılı N10 numunesinde gözlenmiştir.

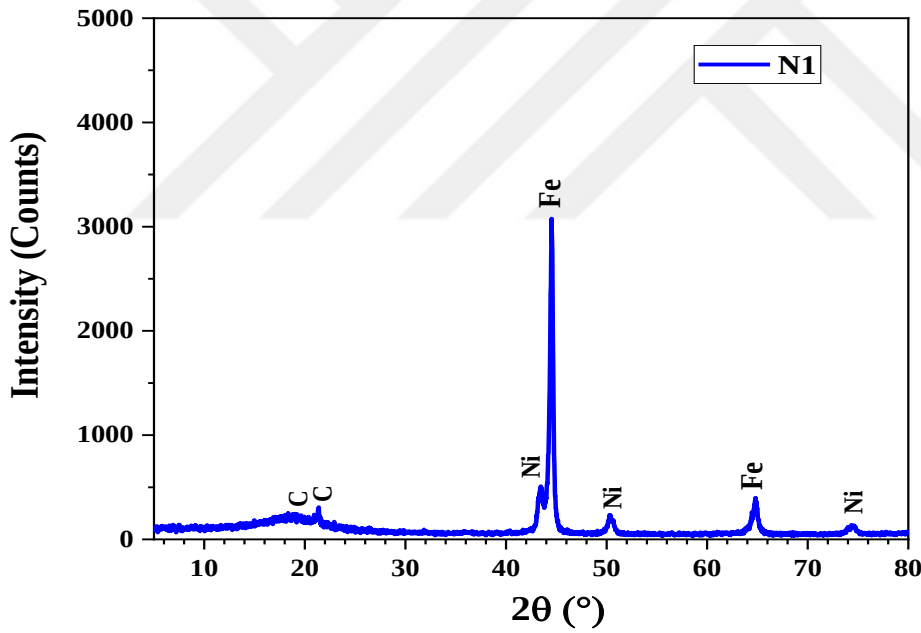


Şekil 8.14. N1 (%85Fe+%10Ni+%5Cu), N8 (N1+%10Co), N9 (N1+%20Co), N10 (N1+%30Co), numunesinin 3 noktalı eğilme deneyi sonucu grafiği

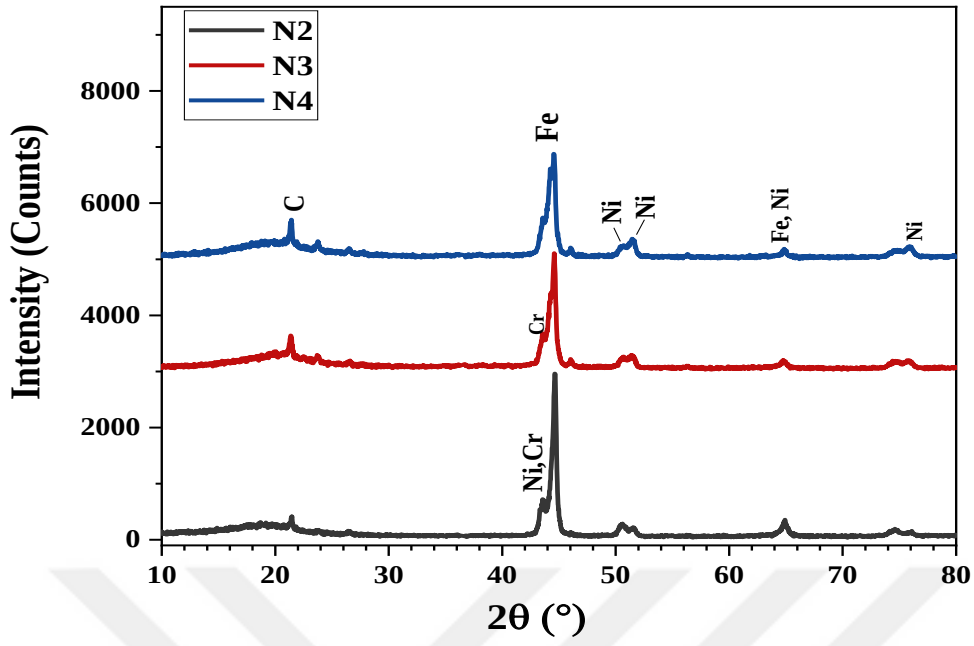
8.5. XRD Ölçüm Sonuçları

Sinterleme işlemi sonrasında numunelerde sinterleme sıcaklığında (920 °C) tutmanın etkisiyle oluşan mikro yapısal fazlar XRD ölçümleri ile analiz edilmiştir. Numunelerin oda sıcaklığında elde edilen X-ışını kırınım desenlerini gösteren XRD grafikleri Şekil 8.15, 8.16, 8.17 ve 8.18’de verilmiştir. Elde edilen tüm numune XRD desenlerinde değişen şiddetlerde (counts) gözlenen en yüksek piklerin hepsi aynı (110) yönelimli atomik kayma düzlemler (bcc) yapısındaki Fe demir (ferrit) pikleridir (Jamrozek, 2020; Li ve ark., 2016; Konstanty ve ark., 2021). Bunun sebebi demirin tüm numunelerde kütlece oldukça baskın oranda kullanılmasıdır. Bu ana demir piklerinin haricinde başka yönelimli (Miller düzlem indisli) demir ve diğer element bazlı intermetalik ara faz veya bileşik yapıları pikler de gözlenmiştir. Yine bütün numunelerde ikinci en çok miktarda bulunan baz alaşım metali olan nikel (Ni) pikleri detüm grafiklerde belirmiştir. Tüm numunelerde kullanılan baz alaşım bileşeni olan bakır (Cu) elementi miktarı az oranda olduğundan Cu pikleri yalnızca bazı numunelerin desenlerinde gözlenebilmiştir. Bunlardan ayrı olarak yine tüm numunelerde 20° civarlarında bir veya iki adet küçük sığ karbon (C) pikleri gözlenmiştir ki bu karbon piklerinin XRD ölçümü hazırlığında numunelerin kaplandığı reçine maddesindeki karbon

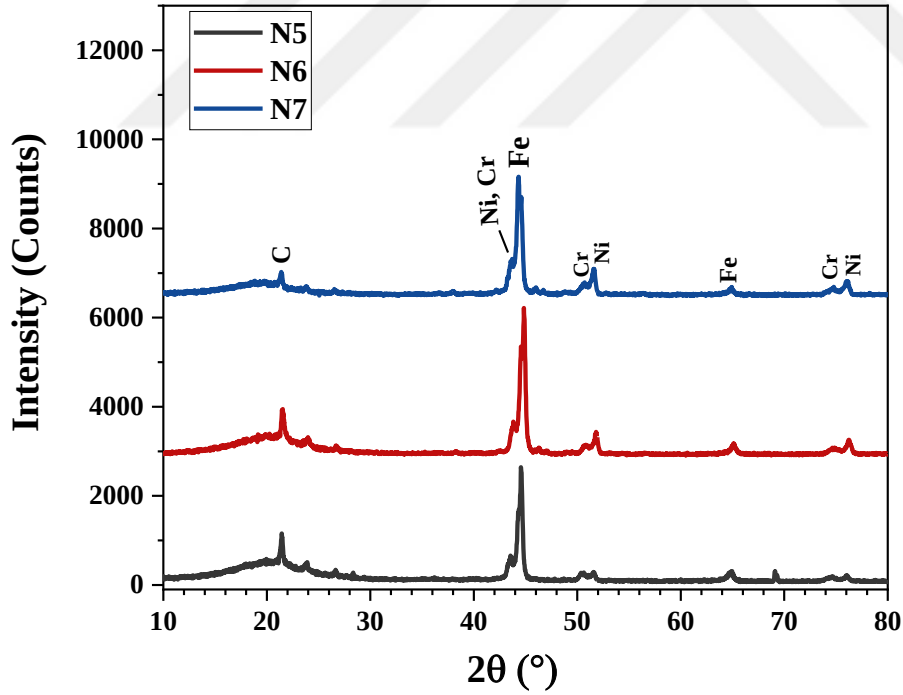
bazlı bileşiğe aittir, çünkü örneğin N1 numunesinin yapısında karbon bulunmamasına rağmen bu numunenin XRD deseninde de bu karbon pikleri belirmiştir. Ancak 9062 katkısının katkılандığı N2-N4 numune desenlerinde 9062 katkısı içeriğindeki az miktar karbona ait ayırt edici bir pik gözlenememesinin sebebi bu katkı karbonunun reçine karbonu pikine karışmış olması ya da reçine karbonunun katkı karbonu piklerini gölgelemesi olabilir. N2-N7 numunelerinde krom (Cr) ve N7-N10 numunelerinde de kobalt (Co) elementleri kullanıldığından bu elementlere ait piklerin oluştuğu da gözlenmiştir. Tüm numuneler arasında ise en az polikristal yapıda (Ghosh ve ark., 2018) olan referans N1 numunesidir, diğerlerinde ise dahil olan element sayı ve miktar çeşitliliğinin artışına bağlı olarak ara faz veya bileşik oluşumlarının sayı ve çeşidi artmıştır. İşte bu tane küçülmeleriyle birlikte oluşan bu küçük küçük fazlı yapılar (polikristal yapılar) elmas tutucu matrislerin elmas tutma kapasitelerini (Çelik, 2009) veya performanslarını artıran bir durumdur.



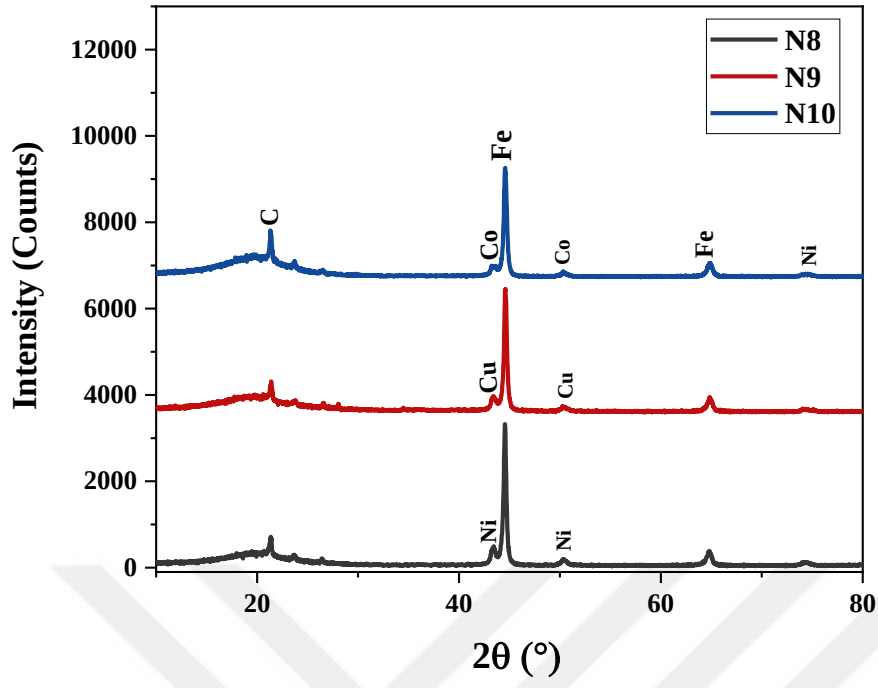
Şekil 8.15. Üretilen N1 (Base FeNiCu alaşım) numunesinin XRD grafiği



Şekil 8.16. Üretilen 9062 katkılı N2, N3 ve N4 metal kompozit numunelerinin XRD grafikleri



Şekil 8.17. Üretilen 9045 katkılı N5, N6 ve N7 metal kompozit numunelerinin XRD grafikleri



Şekil 8.18. Üretilen kobalt katkılı N8, N9 ve N10 metal kompozit numunelerinin XRD grafikleri

9. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında %10, 20 ve 30 katkılama oranlarındaki 9062, 9045 ve Co katkıları ile katkılanan demir bazlı Fe-N-iCu esaslı baz matris sıcak presleme (HP) tekniği ile oldukça başarılı şekilde üretildi. Yürütülen deneysel performans ölçümlerinden elde edilen sonuçlar oldukça ilginç olup aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Numunelerin HB30 sertlik değerleri; 9062 katkısı grubunda katkı oranı ile lineer biçimde doğru orantılı olarak artmış, 9045 katkı grubunda katkı oranı artarken eksponansiyel azalarak artmış ve kobalt katkı grubunda ise önce eksponansiyel azalarak artmış sonra da aşırı (%30 kobalt) katkılamadan kaynaklı olarak eksponansiyel olarak azalmıştır. En sert numuneler 9062 grubundakiler, sonra 9045 ve en az sert olanlar ise kobalt grubu numuneleri olmuştur.

9062 grubu hariç diğer katkı gruplarındaki numunelerin yoğunlukları baz FeNiCu matrise kıyasla bir kat katkılama (%10) ile artmış sonra iki kat katkılama ile tüm katkılı numune gruplarında artmış ve üç kat katkılama ile hepsinde bir miktar azalmıştır. Bununla beraber en yüksek porozite yüzdesi %20 oranında 9045 katkılı numunede, en yüksek ise baz numuneden bile fazla yüksek olan %30 kobalt katkılı numunede gözlenmiştir.

Numunelerin SEM ve kırık yüzey renkli EDS görüntülerinde 9045 ve 9062 numunelerinde katkılama ile düzgün küresel tozlarının yapı içerisinde homojen dağıldığı gözlenmiş, kobalt katkılamasında ise tane oluşumları gözlenmiştir. Aşırı kobalt katkılama ile kobalt homojenlikten uzaklaşan bir eğilim sergilemiştir.

Tüm %10 katkılama oranındaki katkılı numunelerin üç nokta bükme dayanımları ve yüzde uzama değerleri katkısız numuneye göre daha büyük elde edilmiştir. Katkı oranı arttıkça bu değerlerin hepsi azalmıştır. Katkılı numuneler arasında en yüksek bükme ve uzama değerlerine kobalt katkılı numuneler sahip olmuş, en düşük bükme dayanımı ve uzama değerleri ise 9062 katkılı numunelerde gözlenmiştir.

10. ÖNERİLER

Numunelerin katkı oranları ağırlıkça %30'dan fazla olduğunda performans ve özellikleri bakımından olumsuz ve homojenlikten uzaklaşan bir tutum sergilemektedir.

Katkı oranının %10 dan fazla olmaması performans ve maliyet açısından avantaj oluşturmayacağı düşünülmektedir.

Sinterleme işleminde sıvı fazın kullanımı ile etkili sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

Sıcak presleme tekniği yerine Plazma sinterleme yönteminin kullanılmasının avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Üretilen matris malzemelerin içerisine seramikler veya sentetik elmas eklenerek Metal matrisli kompozit (MMK) üretilir.

11. KAYNAKLAR

- Akhtar, S.S.**, 2021. A critical review on self lubricating ceramic composite cutting tools. *Ceramics International.*, 47(15):20745-20767.
- Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M.**, 2006. İmal usulleri. Birsen Yayınevi, İstanbul, 45-48s.
- ASM Metals Handbook**, 1998. Powder metal technologies and applications 7. ASM International, 1146. USA.
- Ayata, A.**, 2014. Toz metalurjisi. [https://webcache.googleusercontent.com/search?qcache:cdPwJsB5XF0J:https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mahmutcan.senel/71544/10\)%2520Toz%2520Metal%25C3%25BCrjisi.pdf+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr](https://webcache.googleusercontent.com/search?qcache:cdPwJsB5XF0J:https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mahmutcan.senel/71544/10)%2520Toz%2520Metal%25C3%25BCrjisi.pdf+&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr). 14 Ağustos 2021.
- Aydın, Ş.**, 1997. Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 55-58s.
- Babayev, Y.**, 2007. Bir kompresör gövdesi imalatının toz metalurjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri uygulanarak optimizasyonu. *Doktora tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 45-48s.
- Bai, Y., Li, L., Fu, L., Wang, Q.**, 2021. A review on high velocity compaction mechanism of powder metallurgy. *Science Progress*, 104(2):43-48.
- Baksan, B., Gürler, R.**, 2003. Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması. <https://docplayer.biz.tr/6570903Tozmetalurjisinininsavunmasanayiindeuygulanmasi.html>. 18 Kasım 2021.
- Boch, P., Niepce, J.C.**, 2007. Ceramic materials processes: Properties and applications. ISTE Ltd, USA, 88s.
- Boz, M.**, 2003. Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme-aşınma özelliklerinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 27s.
- Calcagnotto, M.**, 2010. Effect of grain refinement to 1 µm on strength and toughness of dual-phase steels. *Materials Science and Engineering A.*, 527(29-30):7832-7840.
- Cavaliere, P.**, 2019. Spark plasma sintering: Process fundamentals in: Cavaliere P. (eds) spark plasma sintering of materials. *Springer Cham*. 3(30):53-54.
- Crawson, A.**, 1993. P/M ferrous materials. Metal Handbook, New York, 7s.
- Çağlar, E.**, 2015. Bor karbür/bor karbür silisyum tabakalı kompozitlerin spark plazma sinterleme tekniği ile üretimi ve karakterizasyonu. *Yüksek lisans tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 110s.

- Çelik, E.**, 2009. Elmaslı kesici takımlarda alternatif bağlayıcılar. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 85-88s.
- Çelik, E.**, 2009. Elmaslı kesici takımlarda alternatif bağlayıcılar alternative binders of diamond cutting tools. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 41-44s.
- Çelik, Y.**, 2010. BOR karbürün spark plazma yöntemiyle sinterlenmesi, çeşitli sinterleme katkılarının sinterleme ve malzeme özelliklerine etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 29s.
- Danninger, H.**, 2018. What will be the future of powder metallurgy. *Powder Metallurgy Progress*, 18(2):70-79.
- Demir, A.**, 2004. Effect of gas pressure infiltration on microstructure and bending strength of porous Al₂O₃/SiC-reinforced aluminium matrix composites. *Composites science and technology*, 64(13-14):2067-2074.
- Ezugwu, E.O.**, 2003. An overview of the machinability of aero-engine. *Alloys Journal of Materials Processing Technology*, 4(6):14-18.
- Foong, L.K., Xu, C.**, 2021. Hot pressing and microstructural characterization of SiC and TiN added TiB₂ ceramics. *Ceramics International*, 47(3):3946-3954.
- German, R.M.**, 1989. Powder metallurgy science. MPIF, USA, 302s.
- German, R.M.**, 2005. Powder metallurgy and particulate materials processing, Metal Powder Industries Federation, USA, 113s.
- Ghosh, B.**, 2018. Defect induced room temperature ferromagnetism in single crystal, polycrystal, and nanorod ZnO: A comparative study. *Journal of Applied Physics*, 123(16):161507.
- Gülsoy, Ö.**, 1999. Toz metalurjisi ile üretilen demir esaslı yapısal parçaların mekanik özellikleri. *Master Tezi*, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 76-77s.
- Hiçyılmaz, N.**, 1999. Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin aşınma özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 57-59s.
- Hu, H.X., Chen, W., Deng, C.**, 2021. Effect of Fe prealloyed powder and the sintering process on the matrix properties of impregnated diamond bits. *Journal of Materials Research and Technology*, 12:150-158.
- İnanır, Z.**, 2012. Yüksek çalışma sıcaklıklarının inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 91s.
- James, B.A.**, 1985. Liquid phase sintering in ferrous powder metallurgy. *Powder Metallurgy*, 28:3-4.

- Jamrozek, J.B.**, 2020. Processing and characterization of Fe-Cu-Ni sinters prepared by ball milling and hot pressing. *Arch. Metall Mater*, 65(3):1157-1161.
- Karaduman, O.**, 2019. Structural and thermodynamical study of Cu-Zn-Al shape memory alloys with new compositions produced by hot isostatic press (HIP). *In AIP Conference Proceedings*, 2178(1):30-40.
- Kartikasari, R., Subardi, A., Wijaya, A.E.**, 2021. Development of Fe-5Al-1C alloys for grinding ball. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(12):109.
- Ke, J.G., Xie, Z.M., Liu, R., Gao, R., Wang, X.P., Wu, X.B., Liu, C.S.**, 2021. Strengthening of copper with homogeneous dispersion of nanoscale tungsten particles fabricated by spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering*, 818:141438.
- Konstanty, J.**, 2021. Sintered diamond tools the past, present and future. *Archives of Metallurgy and Materials*, 66(2):593-599.
- Konstanty, J., Tyrala, D.**, 2021. Easily sinterable low alloy steel powders for P/M diamond tools. *Metals*, 11(8):1204.
- Kurt, A.**, 1992. Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 33s.
- Lawley, A.**, 1992. Atomization: The production of metal powders, metal powder industries federation, princeton. New Jersey, USA, 101-103s.
- Li, M.**, 2016. Fabrication of Fe-based diamond composites by pressureless infiltration. *Materials*, 9(12):1006.
- Liao, H.T., Le, M.T.**, 2012. Optimization on selective fiber laser sintering of metallic Powder. *In Advanced Materials Research*, 472:2519-2530.
- Liu, G., Kong, L., Xiao, X., Birosc, S.**, 2022. Microstructure evolution and phase transformation in a nickel based superalloy with varying Ti/Al ratios: Part 1- microstructure evolution. *Materials Science and Engineering*, 831:142228.
- Martelo, D.F., Morana, R., Akid, R.**, 2021. Understanding the mechanical behaviour of 718 and 625+ nickel based super-alloys under cathodic polarization. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 112:102871.
- Nguyen, V.M.**, 2020. Spark plasma sintering of cobalt powders in conjunction with high energy mechanical treatment and nanomodification. *Processes*, 8(5):627.
- Oğuz, B.**, 1989. Malzeme bilgisine giriş. Oerlikon Yayınları, Ankara, 28s.
- Oktay, E.**, 2016. Üretim Metalurjisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 18-20s.

- Okuyama, K.**, 2007. Sintering. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02786829508965303>. 08 Eylül 2021.
- Oleg, D.N., Yefimov, N.A.**, 2019. Chapter 1 powder characterization and testing. Elsevier, Rusia, 3-62s.
- Oliver, U.C., Sunday, A.V., Christain, E.I.**, 2021. Spark plasma sintering of aluminium composite a review. *Int J Adv Manuf Technol*, 112:1819-1839.
- Özdoğan, E.**, 2002. CrCoNi süperalaşımın yüksek sıcaklık oksidasyon ve karburizasyon davranışı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 87-89s.
- Peelen, J.G.**, 1979. Transparent hot pressed alumina, I: Hot pressing of alumina. *Ceramic.*, 5(121):70-75.
- Ünal, R.**, 2007. Toz karakterizasyonu. <https://rahmiunal.net/toz/index.html>. 01.01.2022.
- Sarıtaş, S., Doğan, C.**, 1994. Metal powder production by centrifugal atomization. *Int. J. Powder Metallurgy*, 6:29-30.
- Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N.**, 2007. Toz metalurjisi. Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 48s.
- Sharma, A., Karunakar, D.B.**, 2022. Comparative evaluation of microstructural and mechanical properties of microwave and spark plasma sintered ZrB₂-SiC-TiC composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(1):576-589.
- Stosuy, A.**, 1993. Microstructures of ferrous powder metallurgy alloys. *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*, 41:9-11.
- Şulan, T.**, 1993. Toz metalurjisi yöntemleriyle geliştirilen 90w-7ni-3fe ağır alaşımlarının sıvı faz sinterlemesi süreçleriyle üretilmesi ve karakterizasyonu. *Yüksek Lisans*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 44-46s.
- Tamburini, U.A. Munir, Z.A.**, 2005. Influence of synthesis temperature on the defect structure of boron carbide: Experimental and modeling studies. *J. Am. Ceram. Soc.*, 88(6):1382-1387.
- Tokita, M.**, 2021. Progress of spark plasma sintering (SPS) method, systems, ceramics applications and industrialization. *Ceramics*, 4(2):160-198.
- Tyson, W.R.**, 1975. Surface energies of solid metals. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 14(4):307-314.
- Uhlmann, E., Polte, M., Bolz, R., Börnstein, J.**, 2020. Fundamental research of applying tungsten carbide-cobalt as tool electrode material for sinking EDM. *Procedia CIRP*, 95:466-470.

- Upadhyaya, G.S.**, 1996. Powder metallurgy technology. *Cambridge International Science Publishing*, 1(2):8-9.
- Xu, H., Du, H., Kang, L., Cheng, Q., Feng, D., Xia, S.**, 2021. Constructing straight pores and improving mechanical properties of gangue based porous ceramics. *Journal of Renewable Materials*, 9(12):21-29.
- Yaşa, A.**, 2008. Düz dişlilerin modellenmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa 14s.
- Zhang, M., Zhang, W., Zhang, Y., Gao, L.**, 2012. Fabrication, microstructure and mechanical behavior of SiCw-B₄C-Si composite. *Materials Science and Engineering A*, 552:410-414.
- Zhang, W., Zhu, B., Wu, S., Tao, S.**, 2021. Investigation on microstructure evolution of Co-Ni-Cr-W based superalloy during the hot deformation. *Frontiers in Materials*, 8:237-238.
- Zhao, J.C., Henry, F.M.**, 2002. The thermodynamic prediction of phase stability in multicomponent superalloys. *JOM*, 9:37-42.

ÖZGEÇMİŞ

