



**GERİ DÖNÜŞÜM METAL TOZLARININ TOZ METALURJİ
YÖNTEMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Süleyman DEMİRKAPU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Süleyman DEMİRKAPU

08/07/2025

GERİ DÖNÜŞÜM METAL TOZLARININ TOZ METALURJİ YÖNTEMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Süleyman DEMİRKAPU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu çalışmada, elektro erozyonla işleme esnasında oluşan atık içerisinde yer alan metal tozlarının geri kazanımı (1.2343 sıcak iş takım çeliği ve 1.2738 plastik kalıp çeliği) ve elde edilen bu metal tozlarının toz metalurjisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Toz metalurjisi veya eklemeli imalat gibi imalat yöntemlerinde kullanılan metal tozları yüksek maliyete sahiptir. Çelik gibi değerli metal tozlarının geri dönüşümle tekrar kullanılması hem çevresel hem de ekonomik olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Elektro erozyonla işleme (EDM) atık akışlarında; dielektrik sıvı, takım elektrodundan gelen parçacıklar ve iş parçası elektrodundan gelen parçacıklar (metalik parçacıklar) olmak üzere üç bileşenden oluşur. Çelik tozlarının geri kazanımı için ilk aşamada atık çamurundaki dielektrik sıvı uzaklaştırılmıştır. Bu işlem sonucunda elde edilen tozların boyut analizi, parçacık şekli ve kimyasal kompozisyon analizi yapılmıştır. Temizleme işleminden sonra tozlara eleme işlemi yapılmıştır. 37 μ m ile 125 μ m arasındaki tozlar deneysel çalışmada kullanılmıştır. Geri dönüşüm tozların toz metalurjisinde uygulanması Hoganes firmasının ürettiği düşük alaşımlı demir tozu Distaloy AE ile karıştırılarak yapılmıştır. Yapılan denemelerde geri dönüşüm çelik tozu oranı %5'ten başlayarak %35'e kadar başarılı bir sonuç vermiştir (%40 ve üzeri başarısız olmuştur). Yapılan denemelerde yağlayıcı ve bağlayıcı olarak ağırlıkça %0,4 grafit tozu ve %0,4 stearik asit katılmıştır. Tozlar 700 ve 840 MPa basınçta sıkıştırılmıştır. Sinterleme hızı 5°C/dk ve sinterleme işleminde 950°C sıcaklıkta 3 saat bekletilmiştir. Sinterleme atmosferi olarak yüksek saflıkta argon gazı kullanılmıştır. Sinterleme sonrasında, gözeneklilik ve sertlik testi yapılmıştır. Karışımda bulunan geri dönüştürülmüş toz içeriğinin artması ile yoğunluğun azaldığı ve gözenekliliğin arttığı gözlemlenmiştir. %90 Distaloy AE ve %10 geri dönüşüm toz en yüksek yoğunluğa 7,266 g/cm³ sahipken, %65 Distaloy AE ve %35 geri dönüştürülmüş toz karışımının yoğunluğu 5,889 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Mikro Vickers sertlik değerleri 130 HV ile 229 HV aralığında ölçülmüştür. Geri dönüştürülmüş toz oranı yükseldikçe sertlikte artma gözlemlenmiştir. Ayrıca, gözeneklilik oranının yükselmesinin sertlik değerini olumsuz etkilediği bulgusuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme, Geri kazanım, Toz metalurjisi, Mekanik özellikler, Presleme, Sinterleme

Sayfa Adedi : 71

Danışman : Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

İkinci Danışman : Doç. Dr. Mehmet SUBAŞI

INVESTIGATION OF USABILITY OF RECYCLED METAL POWDERS IN POWDER
METALLURGY METHOD

(M. Sc. Thesis)

Süleyman DEMİRKAPU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In this study, the recycling of steel-based metal powders (1.2343 hot work tool steel and 1.2738 plastic mold steel) from electro-erosion machining waste streams and the usability of these metal powders in powder metallurgy were investigated. The costs of metal powders used in powder metallurgy and additive manufacturing are high. Recycling and re-using valuable metal powders such as steel has significant potential both environmentally and economically. The waste sludge of electro-erosion machining (EDM) consists of three components: dielectric fluid, particles from the tool electrode, and particles from the workpiece electrode (metallic particles). In the first stage of recovery of steel powders, dielectric fluid in the waste sludge was removed. After that, recycled powders were analyzed for particle size distribution, particle shape, and chemical composition. After the cleaning process, the powders were sieved. Powders between 37 μ m and 125 μ m were used in the experimental study. The application of recycled steel powders in powder metallurgy was done by mixing low alloy iron powder Distaloy AE produced by Höganäs. In the experiments, the recycled steel powder ratio gave successful results starting from 5% and up to 35% (40% and above failed.). In all the experiments, 0.4% graphite powder and 0.4% stearic acid were added by weight. Powders were compacted (cold compacting) at 700-840 MPa pressure. High-purity argon gas was used as a sintering atmosphere. The sintering rate was 5°C/min. It was kept at 950°C for 3 hours in the sintering process. After sintering, porosity and hardness tests were performed. It was observed that the density decreased and porosity increased with the increase in recycled powder content in the mixture. While 90% Distaloy AE and 10% recycled powder had the highest density of 7.266 g/cm³, the density of the mixture of 65% Distaloy AE and 35% recycled powder was measured as 5.889 g/cm³. Micro Vickers hardness values were measured in the range of 130 HV to 229 HV. An increase in hardness was observed as the recycled powder ratio increased. In addition, the increase in porosity negatively affected the hardness value.

Science Code : 91438

Key Words : Electro discharge machining, Recycling, Powder metallurgy, Mechanical properties, Pressing, Sintering

Page Number : 71

Supervisor : Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mehmet SUBAŞI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasındaki fikirleri ve önerileri ile beni yönlendirip sağladıkları tüm destek ve imkânlar için tez danışmanlarım Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e ve Doç. Dr. Mehmet SUBAŞI'ya teşekkür ederim.

İlk tez danışmanım olan ve 30.08.2024 tarihinde aramızdan ayrılan Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL'a Allah'tan rahmet dilerim.

Tez çalışmamın ortaya çıkmasında, ilerlemesinde sunduğu fikirler ve sağladığı katkılardan dolayı Doç. Dr. Hacı Bekir ÖZERKAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca verdiği destek ve önerileri için Öğr. Gör. Dr. Duran KAYA'ya teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımda yardımcı olan Yusuf ŐAHİNKAYA'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimi aldığım süre içerisinde maddi ve manevi sundukları her türlü destek için annem Serap DEMİRKAPU'ya, babam Hüseyin DEMİRKAPU'ya ve ablam Ece DEMİRKAPU'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Toz Metalurjisi	3
2.1.1. Toz metalurjisinin tarihi gelişimi	3
2.1.2. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim süreci.....	4
2.2. Elektro Erozyon ile İşleme.....	6
2.2.1. Parçacık oluşma mekanizması.....	6
2.2.2. EDM'in kullanım alanı ve türleri	8
2.3. Çeliklerin Geri Dönüşümünde Kullanılan Yöntemler.....	10
2.3.1. Ergitme ile geri dönüşüm yöntemi.....	10
2.3.2. Katı hal geri dönüşüm yöntemi	12
3. LİTERATÜR	13
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
4.1. Geri Dönüşüm Çelik Tozu.....	23
4.1.1. EDM atık çamuru ve metal parçacıklar	23

	Sayfa
4.1.2. Atık çamurundan çelik tozlarının geri kazanımı.....	24
4.1.3. 1.2343 ve 1.2738 çeliklerinin kimyasal kompozisyonu.....	27
4.1.4. Geri dönüşüm çelik tozunun kimyasal analizi	27
4.1.5. Geri dönüşüm çelik tozu için parçacık boyut analizi	32
4.1.6. Geri dönüşüm çelik tozu elek analizi	33
4.2. Distaloy AE Tozunun Özellikleri	33
4.3. Ultrasonik temizleme	35
4.4. Geri Dönüşüm Tozdaki Kirliliği Giderme Çalışmaları	35
4.4.1. Temizlik çalışmalarının kimyasal kompozisyon üzerindeki etkileri	39
4.4.2. Temizlik işlemi sonucunda tercih edilen yöntem.....	43
4.5. Toz Metalurjisi ile Parça Üretim Süreci.....	43
4.5.1. Karışım hazırlama	43
4.5.2. Presleme işlemi	45
4.5.3. Sinterleme	46
4.6. Üretilen Parçalara Yapılan Testler.....	47
4.6.1. Gözeneklilik testi	47
4.6.2. Mikro Vickers sertlik testi	49
4.6.3. Mikroyapı incelemesi.....	51
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
5.1. Gözeneklilik Testi Sonuçları	53
5.1.1. 700 MPa ile sıkıştırılan parçalar için gözeneklilik testi sonuçları	53
5.1.2. 840 MPa ile sıkıştırılan parçalar için gözeneklilik testi sonuçları	54
5.2. Mikro Vickers Sertlik Testi Sonuçları.....	56
5.2.1. 700 MPa ile sıkıştırılan parçalar için sertlik testi sonuçları	56

	Sayfa
5.2.2. 840 MPa ile sıkıştırılan parçalar için sertlik testi sonuçları	57
5.2.3. Farklı basınçlardaki sertlik değerlerinin karşılaştırılması	59
5.3. Mikroyapı incelemesi	60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	71



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. 1.2343 ve 1.2738 çeliklerinin kimyasal kompozisyonu.....	27
Çizelge 4.2. Geri dönüşüm çelik tozunun kimyasal kompozisyon tablosu	29
Çizelge 4.3. Nokta 1'in kimyasal kompozisyonu	30
Çizelge 4.4. Çizgi toplam spektrum (3 nokta) için kimyasal kompozisyonu	30
Çizelge 4.5. Geri dönüşüm çelik tozunun elek analizi.....	33
Çizelge 4.6. Distaloy AE elek analizi.....	34
Çizelge 4.7. Distaloy AE'nin kimyasal kompozisyonu.....	34
Çizelge 5.1. Gözeneklilik test sonuçları (700 MPa)	54
Çizelge 5.2. Gözeneklilik test sonuçları (840 MPa).....	55
Çizelge 5.3. Sertlik test sonuç tablosu (840 MPa).....	56
Çizelge 5.4. Sertlik test sonuç tablosu (700 MPa).....	58

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz metalurjisi ile üretim akış şeması	5
Şekil 2.2. EDM'de kullanılan elektro erozyon mekanizmasının şematik gösterimi	7
Şekil 2.3. Toz elektro erozyonun çalışma prensibi	9
Şekil 4.1. Atık çamurundan geri dönüşüm çelik tozlarının elde edilme işleminin şeması.....	24
Şekil 4.2. EDS harita toplamı için sonuç grafiği	28
Şekil 4.3. a) Nokta 1 EDS analiz grafiği, b) Çizgi toplamı EDS analiz grafiği.....	29
Şekil 4.4. Geri dönüşüm çelik tozuna ait parçacık boyut dağılım grafiği	32
Şekil 4.5. EDS sonuçları a) Fırında 800 °C'de 60 dk işlem, b) Aseton ile ultrasonik temizleme	39
Şekil 4.6. EDS sonuçları; a) Nitrik asit (HNO ₃) + hidroflorik asit (HF) karışımına daldırma, b) Asitleme + Fırında 800° C'de 60 dk işlem	40
Şekil 4.7. EDS sonuçları a) Bilyalı karıştırma 2 saat, b) Bilyalı karıştırma 2 saat (seramik bilya) 37 µm altı elenmiş tozlar	40
Şekil 4.8. Aseton ile ultrasonik temizleme tozuna ait noktasal EDS analizi a) Nokta 1, b) Nokta 2.....	41
Şekil 4.9. Aseton ile ultrasonik temizleme tozuna ait noktasal EDS analizi, Nokta 3 ...	42
Şekil 4.10. Sinterleme işleminin sıcaklık-zaman programı	47
Şekil 5.1. Gözeneklilik test sonuçlarının grafiği (700 MPa)	54
Şekil 5.2. Gözeneklilik test sonuçlarının grafiği (840 MPa)	56
Şekil 5.3. Sertlik test sonuçlarının grafiği (700 MPa)	57
Şekil 5.4. Toz elektro erozyonun çalışma prensibi	58
Şekil 5.5. 700 MPa ve 840 MPa basınçta sıkıştırılan parçaların sertlik test sonuçlarının karşılaştırılması	60

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. EDM atık çamuru	23
Resim 4.2. Dielektrik sıvının uzaklaştırılmasında kullanılan fırınlar a) Protherm fırın, b) metal ergitme fırını	24
Resim 4.3. a) Fırına koymadan önce EDM atık çamuru, b) Dielektrik sıvı uzaklaştırma işleminden sonra elde edilen tozlar	25
Resim 4.4. Nüve FN 055 Etüv fırını	26
Resim 4.5. EDS haritalama resmi	28
Resim 4.6. EDS haritalama sonuçları	31
Resim 4.7. Geri Dönüşüm tozunun SEM görüntüsü.....	31
Resim 4.8. Elenmiş geri dönüşüm toz a) -37 μm , b) 37-125 μm , c) +125 μm	33
Resim 4.9. a) Ultrasonik temizleyici, b) mekanik karıştırıcı	35
Resim 4.10. HITACHI SU5000 FE-SEM.....	36
Resim 4.11. Aseton ile ultrasonik temizleme işleminin noktasal EDS analizi.....	41
Resim 4.12. Ultrasonik temizleme işlemi yapılmış tozların farklı yakınlaştırma oranlarındaki SEM görüntüsü a) x500, b) x2000, c) x1200, d) x5000	42
Resim 4.13. Turbula üç boyutlu karıştırıcı	44
Resim 4.14. a)15 dk karıştırma yapılmış Distaloy AE örneği, b) 30 dk karıştırma yapılmış Distaloy AE örneği.....	45
Resim 4.15. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan kalıp	46
Resim 4.16. Sinterleme Fırını MTI OTF-1200X	46
Resim 4.17. Sinterleme fırınına yerleştirmek için hazırlanan parçalar.....	47
Resim 4.18. Arşimet Düzeneği	48
Resim 4.19. Struers zımparalama ve parlatma makinesi; zımpara işlemi (soldaki), parlatma işlemi (sağdaki).....	50
Resim 4.20. Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı	50

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Distaloy AE %90, geri dönüşüm toz %10 karışımından oluşan parçanın sinterleme sonrası görüntüsü (D=25,4 mm, t=4,1 mm)	53
Resim 5.2. Distaloy AE (%100) parçasına ait mikroyapı görüntüleri	61
Resim 5.3. %70 Distaloy AE + %30 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri	61
Resim 5.4. %80 Distaloy AE + %20 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri	62
Resim 5.5. %90 Distaloy AE + %10 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri	62



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

C	Celcius
g	Gram
GPa	Gigapascal
J	Joule
K	Kelvin
kg	kilogram
m³	Metreküp
MPa	Megapascal
µm	Mikrometre

Kısaltmalar

Açıklamalar

AM	Additive manufacturing
EBM	Electron-beam melting
EBS	Electron backscatter diffraction
EDE	Electrical discharge erosion
EDM	Electrical discharge machining
EEİ	Elektro erozyon ile işleme
HIP	Hot iso pressing
HV	Hardness Vickers
PM	Powder metallurgy
PSD	Particle size distribution
SEM	Scanning electron microscope
SLM	Selective laser melting
TM	Toz metalurjisi
XRD	X-ray diffraction

1. GİRİŞ

Toz metalurjisi ve eklemeli imalat gibi imalat yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan metal tozları yüksek maliyete sahiptir. Çelik ve demir gibi metal tozlarının üretimi hem yüksek maliyetli hem de çok enerji harcanan bir prosesdir. Çelik gibi değerli metal atıkların geri dönüşümle tekrar kullanılması hem çevresel hem de ekonomik olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, EDM atıklarında yer alan çelik parçacıkların geri kazanılması ve bu geri dönüşüm çelik tozunun toz metalurjisi yönteminde kullanılması amaçlanmıştır.

Geri dönüşüm tozlar yüksek seviyede kirlilik ve oksit içeriğine sahiptir. Bu kirlilikleri tamamen ortadan kaldırmak her zaman mümkün olmayabilir. Ayrıca, tozların temizlenme süreci maliyet, iş gücü ve zaman açısından dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gereken bir süreçtir. Toz metalurjisinde son ürünün kaliteli olabilmesi için gözeneklilik değerinin düşük olması gerekmektedir. Ancak, geri dönüşüm tozların sahip olduğu kirlilik nedeniyle gözeneklilik artmakta ve bu durum mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu nedenle, geri dönüşüm tozlar kullanılmadan önce olabildiğince temizlenmeli ve oksit içeriği azaltılmalıdır. Geri dönüşüm tozların (recycle powder) sıfır tozlarla (virgin powder) doğrudan kıyaslanması doğru bir yaklaşım değildir. Havacılık gibi yüksek kalite standartlarına sahip alanlarda geri dönüşüm tozlarının kullanımı uygun değildir. Ancak, kullanımın uygun olduğu alanlarda geri dönüşüm tozlarının %5-%10 gibi düşük oranlarda sıfır tozlarla karıştırılarak kullanılması, maliyeti düşürmek açısından uygun bir strateji olabilir.

EDM ile toz elde etmeye yönelik literatürdeki çalışmalarda, çoğunlukla toz karakterizasyonuna odaklanılmıştır. Bazı üretimi zor malzemelerin bu yöntemle elde edilmesi ile ilgili çalışmalar da vardır. Bu çalışmaların büyük bir kısmında EDM ile elde edilen geri dönüşüm tozların toz metalurjisi veya eklemeli imalat yöntemlerinde kullanıldığına dair uygulamalara rastlanmamaktadır. Paslanmaz çelikler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmışken bu çalışmada kullanılmış olan EDM ile elde edilmiş 1.2343 sıcak iş takım çeliği tozu ile toz metalurjisi alanında yapılmış bir uygulamaya rastlanmamıştır. Literatürde geri dönüşüm toz ile yapılan toz metalurjisi ile parça üretimi araştırmalarında istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Sinterleme sonrası oldukça kırılğan, kolayca dağılan ve referans malzemeye göre düşük mekanik özellikleri olan bir ürün ortaya çıkmıştır. Geri

dönüşüm tozlarda bulunan kirlilik nedeniyle parçacıklar arasında bağ oluşmadığı düşünülmektedir. Bu çalışmada, elektro erozyonla işleme (EDM) atık akışlarında bulunan iş parçasına ait çelik parçacıklarının geri kazanımı ve elde edilen geri dönüştürülmüş çelik tozunun toz metalurjisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Araştırmanın amacı

EDM işleminde tezgâhın altında biriken çamur, uzaklaştırılması gereken bir atık olarak değerlendirilmektedir. Değersiz gibi görünen bu atık çamurun içerisinde, aslında değerli olan çelik parçacıkları yer almaktadır. Literatürde EDM atıklarından elde edilmiş geri dönüşüm tozları ile yapılan toz karakterizasyonu çalışmalarına göre, bu parçacıklar boyut ve şekil açısından toz metalurjisinde kullanılmak için yeterli özelliklere sahiptir. Literatürde, bu çalışmada yapılmış olan EDM yöntemi ile elde edilen 1.2343 sıcak iş takım çeliği tozu ile toz metalurjisi alanında yapılmış bir uygulama bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında EDM atıklardan geri dönüşüm çelik tozu elde etmek ve toz metalurjisi yönteminde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan deneysel çalışmada geri dönüşüm çelik tozu ile Distaloy AE tozu karıştırılarak kullanılmıştır.

Sınırlılıklar

Deneysel çalışma yaparken hemen her çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da bazı sınırlılıklar mevcuttur. Bunlar aşağıda listelenmiştir:

- Deneysel çalışmalarda kullanılan pres kalıbı, başka bir araştırma grubu tarafından kullanılırken çatlamış ve kullanılamaz hâle gelmiştir. Kalıbın zarar görmesi nedeniyle planlanan deneyler gerçekleştirilememiştir. Uygun özelliklere sahip başka bir kalıp temin edilemediğinden, deneysel çalışmalar mevcut verilerle sınırlı tutulmuştur.
- Araştırmanın bir diğer sınırlılığı da sinterleme fırının derecesiyle ilgili olup kullanılan sinterleme fırını 1000°C'ye kadar çıkmaktadır. Fakat, demir ve çelik tozu gibi malzemelerin 1100-1200°C arasında 1 saat süre ile sinterleme yapılması önerilmektedir. Bu durum nedeniyle 950°C'de sinterleme süresi 3 saat olarak belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Toz Metalurjisi

Toz Metalurjisi (Powder Metallurgy, PM), metal tozlarının preslenerek veya diğer yöntemlerle şekillendirilip, ardından eş zamanlı ya da sonradan ısıtılarak sert ve rijit parçalar haline getirilmesi esasına dayanan bir üretim yöntemidir [1]. Bu yöntem; metal tozlarının üretilmesi, tozların karakterizasyonu, sıkıştırma öncesi karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme (tozların ısıtılarak birbirine kaynaştırılması) adımlarını içerir. Toz metalurjisi yöntemi; otomotiv, havacılık, biyomedikal ve savunma sanayi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride ve literatürde söz konusu yöntem için TM (PM) kısaltması kullanılır [1,2].

2.1.1. Toz metalurjisinin tarihi gelişimi

Altın ve bakır gibi metallerin tozları ve bazı metal oksitleri eski çağlardan beri çanak-çömlek dekorasyonu, kozmetik ve boya imalatı gibi alanlarda dekoratif amaçlı olarak kullanılmaktadır. İnkalar tarafından mücevher üretiminde uygulanmış ve Mısırlıların demir tozlarını kullanıp alet yapmaları milattan önce 3000’li yıllara kadar uzanmaktadır [2].

Modern toz metalurjisinin başlangıcı ise 19. yüzyılın başlarına kadar gider. 1815 yılında İngiliz William Wollaston platin tozlarını hazırlama, presleme ve sinterlemek için bir yöntem geliştirmiştir. Wollaston’un geliştirmiş olduğu bu yöntem toz metalurjisinin günümüzde uygulandığı biçimde yapılmış ilk uygulamadır [3].

Gywnn, Amerika Birleşik Devletleri’nde toz metalurjisi ile üretilmiş kendinden yağlamalı yataklar konusunda 1870 yılında toz metalurjisi alanında ilk patenti almıştır [4]. 1900’lü yılların başında ampul önemli bir ürün haline gelmiştir. Çeşitli filaman malzemeleri denenmiş fakat en iyi filaman malzemesi tungsten olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, tungstenin yüksek erime sıcaklığı ve tungstene şekil vermenin zor olması karşılaşılan sorunlar olmuştur. William Coolidge 1908 yılında tungsten tozlarını kullanarak lamba filamanı geliştirmiştir [1,4].

1920'li yıllarda toz metalürji yöntemiyle karbür kesici takımlar (WC-Co) üretilmiştir. 1930'lu yıllardan itibaren kendinden yağlamalı yataklar toz metalurjisi ile üretilmiştir. 1960'lı ve 1970'li yıllarda otomotiv endüstrisi başta olmak üzere, dişli ve diğer parçaların metal tozlarından seri üretimi gerçekleştirilmiştir. 1980'li yıllarda ise uçak türbini gibi parçalar toz metalurjisi yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir [1,4].

Toz metalurjisi yönteminin avantajları aşağıda listelenmiştir:

- Toz metalurjisi üretim yönteminde fire malzeme oranı çok düşüktür.
- İşlenmesi zor olan veya diğer yöntemlerle üretilmeleri güç olan bazı metaller toz metalurjisi yöntemi kullanılarak şekillendirilir (Örnek: Tungsten ile lamba filamentini üretimi, sermetler ve bazı metal alaşımları).
- Yüksek hacimli üretime uygundur.
- İstenen düzeyde porozite bulduran parçalar üretilebilir. Filtreler ve kendinden yağlamalı yataklar bu yöntemle üretilmektedir.
- Ek işlem gereksinimi düşüktür. Son ürüne yakın (çok az ek işlem gerektiren) veya hiç ek işlem gerektirmeyen parçaların üretimi mümkündür [4].

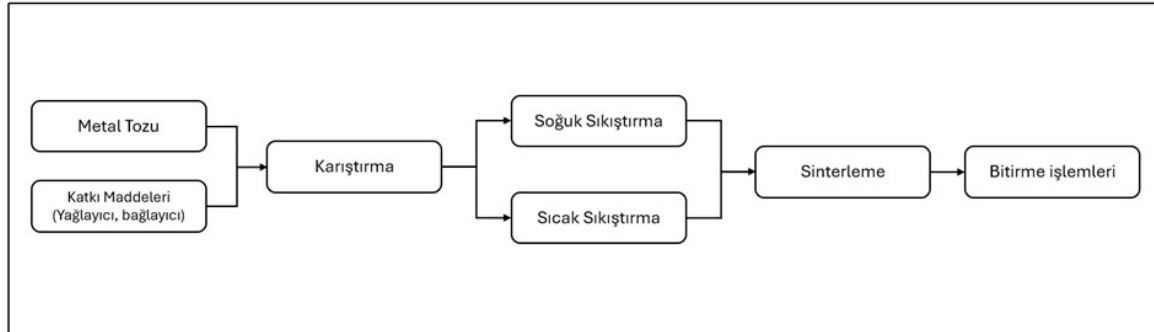
Toz metalurjisi yönteminin dezavantajları aşağıda listelenmiştir:

- Alet ve ekipman maliyetleri yüksektir.
- Metal tozları pahalıdır.
- Tozların zamanla bozulmaması, oksitlenmemesi için uygun şartlarda depolanması gerekir. Bazı tozların yanıcı olması da karşılaşılan problemlerden biridir.
- Yoğunluğun parça kesiti boyunca değişken olması gibi problemlerle karşılaşmaktadır.
- Presleme işlemi sonunda parçanın kalıptan rahat çıkabilmesi gerekir. Bu nedenle parça geometrileri sınırlıdır [4].

2.1.2. Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretim süreci

Toz metalurjisi yöntemi ile parça üretimi; toz karıştırma, tozların istenen parça şekline sıkıştırıldığı presleme, üretilen parçanın mukavemet kazanması için kullanılan malzemenin erime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta ısıtılarak toz taneleri arasında metalurjik bağ

oluşturan sinterleme işlemi olarak üç aşamada tanımlanabilir [4]. Sinterlenen parçaya ihtiyaç duyulması halinde ek işlemler uygulanır ve nihai ürün ortaya çıkar.



Şekil 2.1. Toz metalurjisi ile üretim akış şeması

Tozların karıştırılması

Toz metalurjisi yönteminde preslemeden önce tozların homojen hale gelmesi için karıştırılır. Karıştırma; metal tozları, yağlayıcı ve bağlayıcı gibi kimyasal yapısı farklı tozların bir araya getirilmesi işlemidir. Son ürünün başarılı olması için karıştırma işlemi ile tozların homojen hale getirilmesi önemlidir. Harmanlama, tozların taşıma esnasında titreşimlerle oluşan boyut ayrışmasının engellenmesi için yapılır. Titreşim sırasında küçük parçalar boşluklara girer ve büyük parçacıkların üste çıkmasına neden olur. Bu sorunu ortadan kaldırmak için harmanlama işlemi yapılır [4].

Tozların sıkıştırılması

Sıkıştırma işlemi tozların istenen şekle preslemek için alt ve üst zimba yardımıyla basınç uygulanması ile yapılır. Presleme işleminde kullanılan presler tek yönlü veya çift yönlü olabilir. Sıkıştırma işlemini sonrasında parçalar ham mukavemet (green strength) diye adlandırılan bir mukavemet kazanır. Bu mukavemet parçaları bir arada tutar ve elle tutulabilir bir yapıdadır. Daha sonra parçalar sinterlenerek esas mukavemetini kazanır [4]. Tozların sıkıştırılmasında basınç arttıkça yoğunluk artar ve gözenek miktarı azalır. Presleme sonrası parçanın yoğunluğu başlangıçtaki tozların yoğunluğundan oldukça yüksektir. Sıkıştırma oranı, sıkıştırılmış yoğunluğun görünür yoğunluğa oranıdır. Görünür yoğunluk, serbest halde bulunan bir tozun birim hacimdeki kütlesidir. Görünür yoğunluk Hall hunisi yardımıyla ölçülür [1].

Tozların sinterlenmesi

Presleme işlemi sonrası elde edilen ham ürün yeterli sertlik ve mukavemete sahip değildir. Sinterleme, presleme işleminden sonra parçacıkların birbiriyle kaynaşmasını sağlayarak büyük ölçüde mukavemet artışı ve çeşitli özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıtma işlemidir. Sinterleme sıcaklığı metalin erime derecesinin $2/3$ 'ü ve $9/10$ 'u arasında yapılır [4]. Sinterleme işlemi yapılan fırınlarda ısıtma işlemi üç aşamadan oluşur. Bunlar, yağlayıcı ve bağlayıcı gibi malzemelerin uzaklaştırıldığı polimer yakma, sinterleme ve sonrasında soğutmadır [1]. Sinterleme işleminde fırındaki atmosfer kontrol edilir. Sinterleme atmosferi oluşturmak için hava, azot, argon, hidrojen, oksijen ve çeşitli gaz karışımları kullanılır.

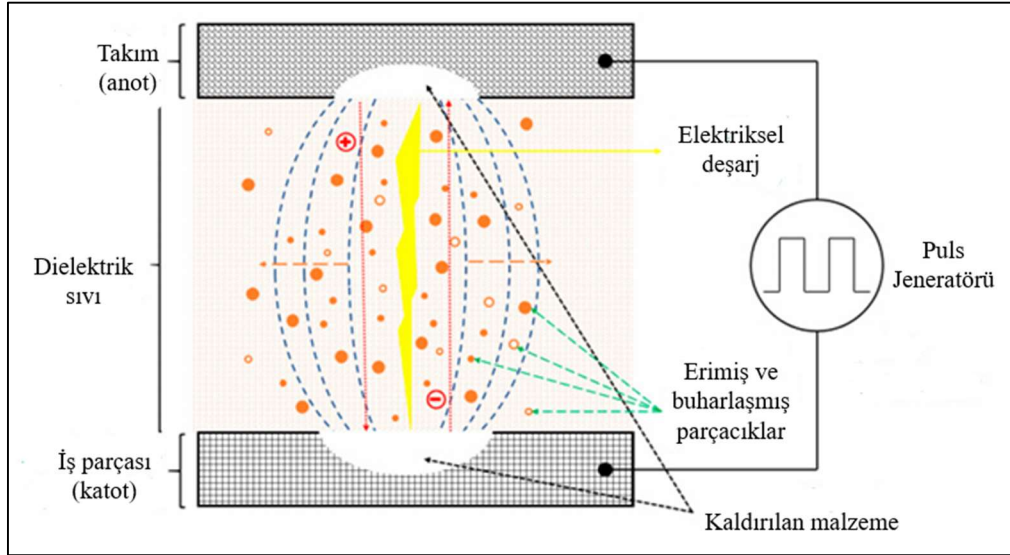
2.2. Elektro Erozyon ile İşleme (EDM)

Elektro erozyon ile işleme (EDM), birçok farklı malzemenin işlenebildiği ve üç boyutlu karmaşık boşluklar oluşturmak için kalıp endüstrisinde kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, iş parçası ve takım elektrodu arasında kontrollü bir şekilde meydana gelen kıvılcımlar (deşarjlar) sayesinde iş parçasının yüzeyinden çok küçük parçaların koparılması prensibine dayanır. İki elektrot arasına bir elektrik potansiyeli uygulanır. Bu elektrotlardan üst tarafta yer alan takım elektrodudur ve alt taraftaki elektrot ise iş parçası elektrodudur. EDM, iş parçası malzemesinin mukavemet, sertlik vb. gibi mekanik özelliklerinden bağımsız olarak hareket eder. Bu nedenle, kesilmesi zor malzemelerin işlenmesini mümkün kılar. İş parçası malzemesinin diğer özellikleri (elektriksel, termal vb.) EDM çıktısını etkileyebilir ve bu nedenle dikkate alınmalıdır [5].

2.2.1. Parçacık oluşma mekanizması

EDM bir imalat (üretim) yöntemidir. EDE (Electro Discharge Erosion) ise EDM işleminin temelinde yatan fiziksel aşınma mekanizmasını tarif eder. EDM işlemi, dielektrik bir sıvı (çoğunlukla deiyonize su veya sentetik hidrokarbon yağlar) içerisinde gerçekleştirilir. Elektrot ile iş parçası arasında çok küçük bir boşluk bırakılır ve bu boşluğa yüksek frekansta elektriksel enerji uygulanır. Uygulanan gerilim, bu bölgede bir plazma kanalı oluşturur ve ani sıcaklık artışıyla (10000 K) malzemenin ergimesi ve buharlaşması sağlanır. Bu sayede elektriksel enerji kullanılarak şekil verme işlemi gerçekleştirilir [6]. Şekil 2.2'deki şematik gösterimde; noktalı mavi çizgilerdeşarjın fazlarını temsil eder (iyonizasyon, ateşleme,

deşarj, düşme), kırmızı çizgilerdeşarj kanalını oluşturan elektron ve proton hareketini, turuncu çizgiler malzeme kaldırma akışının yönünü gösterir [6].



Şekil 2.2. EDM'de kullanılan elektro erozyon mekanizmasının şematik gösterimi [6]

Oluşan parçacıkların türleri ve dağılımları

Dvornik (2010) elektro erozyon ile üretim yönteminde oluşan parçacık biçimlerinin üç farklı türde olduğunu tanımlamıştır [7]. Oluşan parçacıkların hacimce yaklaşık %10'luk kısmının buhar fazına aşındığını (erode) ve parçacıkların bu buharlaşmış malzemenin (buharlaşmış parçacıklar) yoğunlaşmasıyla sentezlendiğini belirtmişlerdir. Bu parçacıkların boyutu oldukça küçüktür (μm altı), küreseldir ve topaklanmaya veya daha büyük parçacıkların yüzeylerine yapışma eğilimindedir. Hacimce ikinci %10'luk kısımdaki parçacıklar ise termal stres altında malzemenin gevrek bir şekilde kırılmasıyla oluşur ve katı fazda (katı parçacıklar) olur. Bu parçacıklar düzensiz bir şekle sahiptir ve boyutları bakımından büyük farklılıklar gösterir, birkaç yüz mikrona kadar çıkabilir. Çoğunluğu oluşturan parçacıklar (yaklaşık %80 hacim) ergimiş metal damlacıklarının (ergimiş parçacıklar) donması/katılaşması ile oluşur. Bu üretilen parçacıklar çoğunlukla küreseldir ve boyutları 10 mikronun altından başlayıp yaklaşık 100 mikrona kadar değişebilir. Üç farklı tipte tozdan en çok sıvı fazda oluşan küresel parçacıklar dikkat çekmektedir. Bu parçacıkların boyutları ve üç farklı türdeki parçacıkların dağılım oranları işlem yapılan makinenin özelliklerine ve işlem parametrelerine göre değişkenlik gösterir. Genel olarak, küresel parçacıklar çoğunlukla iş parçası malzemesinden oluşurken, küresel olmayan düzensiz şekle sahip

parçacıklar takım malzemesinden oluşur [6,7].

2.2.2. EDM'in kullanım alanı ve türleri

EDM işlemi kalıp yapım aracı ve kalıp endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Bunun yanında üretim miktarlarının nispeten düşük olduğu durumlarda da havacılık, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde prototip yapımında ve parça imalatında tercih edilen bir yöntemdir [8]. Ayrıca madeni para kalıp yapımı, metal parçalama işlemi vb. için de kullanılır [9]. Aşağıda farklı EDM türleri listelenmiştir.

Dalma elektro erozyon ile işleme

Karmaşık geometrilerle iş parçasının işlenmesinde kullanılan, talaşsız bir imalat yöntemidir. Bu yöntemde, genel olarak bakır veya grafit malzemedan üretilmiş elektrot, iş parçasına daldırılarak elektrot geometrisinin iş parçası üzerinde ayna görüntüsü oluşturması sağlanır [9]. Elektrot ile iş parçası arasında oluşan ardışık elektrik deşarjları nedeniyle elektrik enerjisi termal enerjiye dönüşür. Oluşan plazma kanalı sayesinde malzeme eritilir ve buharlaştırılır. Deşarjın kesilmesiyle birlikte plazma kanalı bozulur, sıcaklık aniden düşer ve dolaşımdaki dielektrik sıvı, erimiş malzemeyi iş parçasından uzaklaştırır. Sayısal kontrol sistemleri, voltaj ve akımı kontrol ederken aynı zamanda takım ve iş parçasının hareketini yönetir. Ayrıca, dielektrik sıvı sürekli olarak filtrelenerek işlem esnasında kaldırılan malzemeleri uzaklaştırır ve işlem ortamının temizliği sağlanır [6].

Tel elektro erozyon ile işleme

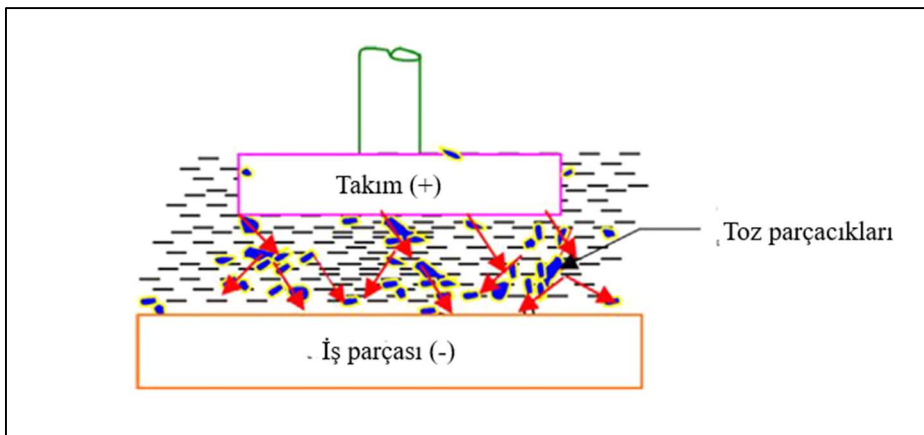
İnce bir tel elektrot kullanılarak hassas kesme işlemleri gerçekleştirilir. Genellikle hassas kesim işlemi için kullanılır. Tel erozyon EDM işleminde elektrot olarak ince bir bakır tel kullanılır ve bu tel sürekli hareket halindedir [9]. İş parçası, tezgâhın X–Y ekseninde hareket etmesi ile iş parçası üzerinde karmaşık iki boyutlu şekillerin kesilmesini sağlar [10]. Tel EDM işlemi yalnızca takım ve kalıp yapım endüstrisinde değil, aynı zamanda tıp, elektronik ve otomotiv endüstrilerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

Mikro elektro erozyon ile işleme

Çapı 5 μm 'a kadar küçük mikro delme işlemi ve karmaşık üç boyutlu (3D) mikro boşlukları da işlemi için kullanılır [9]. Mikro EDM işlemi temel olarak dört türdür: mikro-tel EDM, kalıp batırmalı mikro-EDM, mikro-EDM delme ve mikro-EDM frezeleme. Mikro-tel EDM'de, bir iş parçasını kesmek için çapı 0,02 mm'ye kadar olan bir tel kullanılır. Dalma kalıp mikro-EDM'de, iş parçasını kesmek için mikro özellikler içeren bir elektrot kullanılır. Mikro EDM delmede, mikro elektrotlar (5-10 μm 'ye kadar çaplarda) iş parçasında mikro delikler açmak için kullanılır. Mikro EDM frezelemede, mikro elektrotlar (5-10 μm 'ye kadar çaplarda) geleneksel frezeleme işlemine benzer bir hareket stratejisi benimseyerek üç boyutlu boşluklar üretmek için kullanılır [11,12].

Toz karışımı elektro erozyon ile işleme

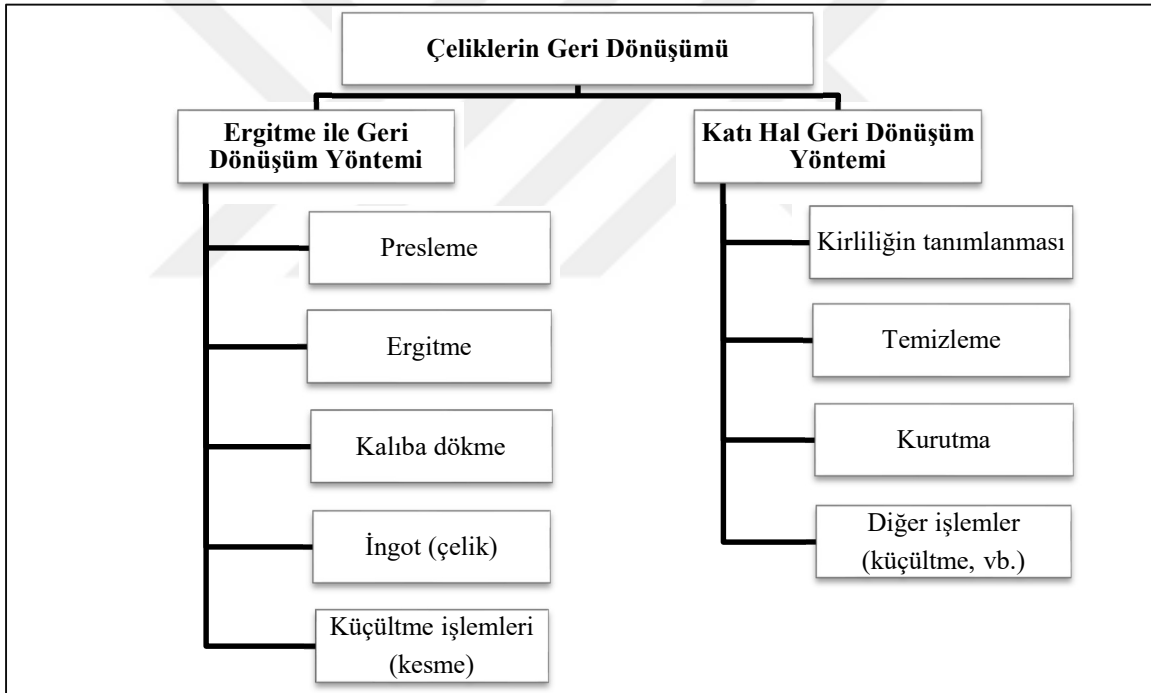
Toz karışımı elektro erozyon ile işlemenin mekanizması geleneksel EDM'den tamamen farklıdır [14]. Toz formunda işleme uygun bir malzeme dielektrik sıvısına karıştırılır. Uygun bir voltaj uygulandığında, kıvılcım aralığı eklenen toz parçacıklarıyla dolar ve takım ile iş parçası arasındaki boşluk mesafesi 25-50 mm'den 50-150 mm'ye çıkar [15]. Toz parçacıkları enerjiyi aldığı anda zikzak şeklinde hareket eder. (Şekil 2.3) Bu yüklü parçacıklar elektrik alanı tarafından hızlandırılır ve iletken görevi görür. Toz parçacıkları kıvılcım alanının altına yerleşir ve kümeler halinde toplanır. Deşarj sırasında oluşan kıvılcım ve tozların etkisiyle iş parçası yüzeyinden daha hızlı malzemenin kaldırılması gerçekleşir [9].



Şekil 2.3. Toz elektro erozyonun çalışma prensibi [15]

2.3. Çeliklerin Geri Dönüşümünde Kullanılan Yöntemler

Metal, çelik ve diğer malzemelerle ilgili literatürde çok sayıda geri dönüşüm çalışması bulunmaktadır. Çeliklerle ilgili olan geri dönüşüm çalışmalarında iki farklı yaklaşım vardır. Bunlar, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi katı hal geri dönüşüm (solid-state recyle) ve malzemenin ergitilmesi ile geri dönüşüm olarak ikiye ayrılır. Katı hal geri dönüşüm yaklaşımında yapılan çalışmalar atık talaşlardan toz elde etme, EDM atıklarından toz malzeme elde etme ve kirlenmiş tozların temizlenip yeniden kullanılması olarak sıralanabilir [16,17]. Ergitme metodunda geri dönüştürülen metal ergitilir ve daha sonra sıvı halde metal kalıba dökülür, sıvı metalin soğuyup katılaşması ile geri dönüşüm işlemi tamamlanır. Ergitme yönteminin dezavantajları yüksek maliyetli bir işlem olması ve yüksek enerji gerektirmesidir [18].



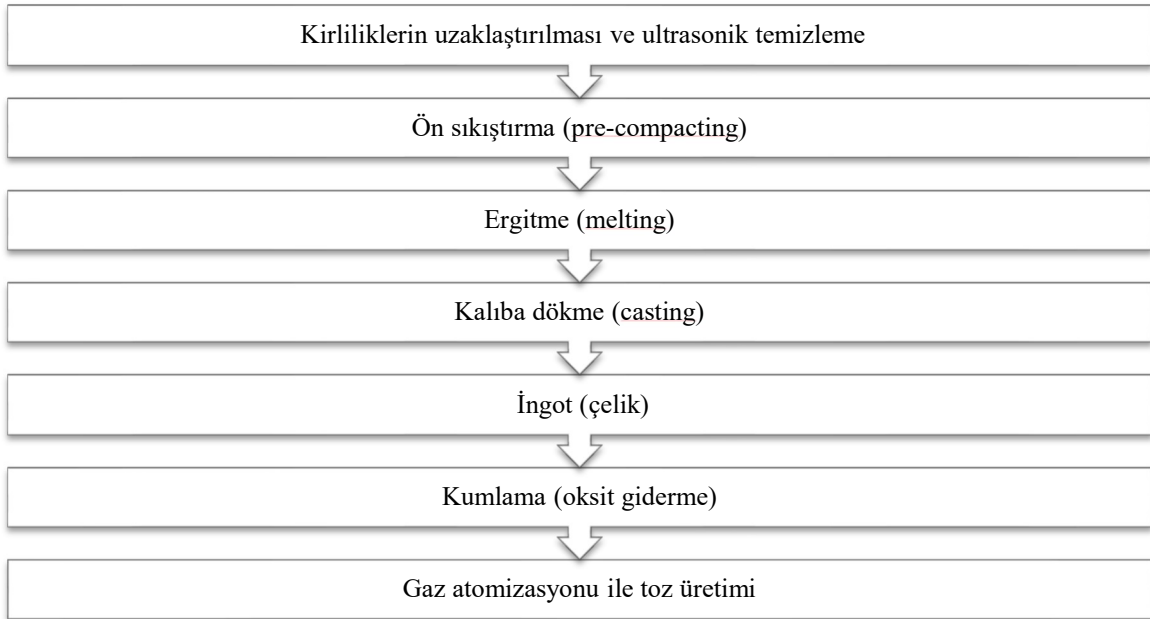
Şekil 2.4. Çeliklerin ergitme ve katı hal geri dönüşüm yöntemleri

2.3.1. Ergitme ile geri dönüşüm yöntemi

Ergitme yönteminde ve diğer geri dönüşüm yöntemlerinde ilk olarak geri dönüştürülmek istenen atıktan yabancı malzemelerin uzaklaştırılması işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada yapılan işlemler; safsızlık oluşturan fiziksel olarak büyük boyutlu kirlilikleri eleme ile uzaklaştırma, manyetik ayırıştırma, indüksiyon ocağı veya çeşitli fırınlar yardımıyla istenmeyen maddeleri uzaklaştırma ve ihtiyaç duyulan diğer işlemler yapılmaktadır [19].

Daha sonra elde edilen çelik veya metal malzemeye ultrasonik temizleme yapılır. Ultrasonik temizleme sayesinde atık maddelerin yüzeyinde bulunan yağ, kir ve oksit tabakaları uzaklaştırılmaktadır. Ultrasonik temizleme işleminde sıvı olarak aseton, etil alkol ve metil alkol kullanılmaktadır [16,17].

Temizleme işleminden sonra atık malzemelere pres yardımıyla ön sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Sıkıştırılan atık malzemelerden çelik elde etmek için erime noktasının biraz üstünde bir sıcaklıkta ergitme işlemi yapılmaktadır. Ergitme işlemi sonunda sıvı haldeki metal kalıba dökülür. Soğuma işlemi sonunda ingot (çelik) elde edilmektedir. Çeliğin yüksek sıcaklıkta kalıba dökülmesi nedeniyle yüzeyde oksit tabakası oluşmaktadır [20]. Oksit tabakasını ortadan kaldırmak için kumlama işlemi yapılmaktadır. Kumlama işlemi sonrasında geri dönüşümü yapılmış olan çelik ingot halinde kullanıma hazır olmaktadır. Geri dönüştürülmüş çelikten toz metalurjisinde kullanılmak için hammadde hazırlanmak isteniyorsa gaz atomizasyonu ile toz elde etme işlemi yapılır [17,18]. Ergitme metodu ile geri dönüşüm yönteminin işlem adımları Şekil 2.5'te listelenmiştir.



Şekil 2.5. Ergitme yöntemi ile geri dönüşüm çelik tozu üretiminin şematik gösterimi [16-18]

2.3.2. Katı hal geri dönüşüm yöntemi

Katı hal geri dönüşüm (Solid State Recycling-SSR) yöntemleri, eritme/ergitme aşamasını ortadan kaldırarak daha çevreci, daha az enerji kullanımı gerektiren ve yüksek mekanik özelliklere sahip ürünler elde etmeye olanak tanımaktadır. SSR yöntemleri toz metalurjisi ve deformasyon tabanlı uygulamalar olarak ikiye ayrılmaktadır [18]. Toz metalurjisi yönteminde geri dönüşüm tozları bitmiş ürün haline getirmek için çeşitli sinterleme ve presleme teknikleri kullanılır. Deformasyon tabanlı uygulamalarda; yüksek basınçlı burulma (High Pressure Torsion, HPT), eşkanallı açısız presleme (Equal Channel Angular Pressing, ECAP), haddeleme, sıcak presleme, sıcak dövme ve sıcak ekstrüzyon gibi yöntemler yer almaktadır [23-25]. Bu yöntemlerde talaşlar temizleme işleminin ardından sıcaklık ve basınç altında plastik deformasyona uğratarak ürünlere dönüştürülmektedir [24].

Katı hal geri dönüşüm yöntemlerinde mekanik özellikler daha düşük olmakta ve parçacıklar arası bağ oluşumu zayıf olmaktadır. Altharan ve diğerleri (2024) yaptıkları geri dönüşüm çalışmasında, alüminyum talaşlarının katı hal geri dönüşümünde talaşların düzensiz şekli, yüzeydeki oksit tabakası kalınlığı ve yüzey alanı gibi morfolojik özellikleri, talaşlar arası bağ oluşumunu zorlaştırabileceğini ifade etmişlerdir [22]. Bu durum, son üründe mukavemet düşüklüğüne ve yorulma ömrünün düşmesine neden olabilmektedir.

Çelik, demir veya diğer metallerin katı hal geri dönüşümünde önce atıklar toplanmalıdır. Atık içerisinde kirlilik oluşturan maddeler tespit edilir ve uzaklaştırmak için uygun temizleme yöntemi uygulanmalıdır [25]. Daha sonra ultrasonik temizleme ile atık malzemelerin yüzeyindeki kir, yağ gibi kirlilik oluşturan unsurlar temizlenmektedir. Ultrasonik işlem bittikten sonra atıkların kuruması için kurutma fırını kullanılmaktadır [25], [26]. Temizlenen atıklara boyut küçültme işlemi yapılır veya ihtiyaç varsa ek işlemler uygulanır. Plastik deformasyon tabanlı uygulamalarda talaş gibi atıklar boyut küçültme işlemi yapılmadan, olduğu gibi kullanılmaktadır [23]. Talaşlar, bilyalı öğütme ile toz haline getirilmekte ve toz metalurjisinde hammadde olarak kullanılmaktadır [18].

3. LİTERATÜR

Dvornik (2010) tarafından yapılan çalışmada, WC–8Co sert alaşımının kıvılcım erozyonu (spark erosion) yöntemiyle nano boyutlu toz haline getirilmesi ve ardından gerçekleştirilen karbonizasyon işlemiyle bu tozların yapısal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, kıvılcım erozyonu esnasında oluşan yüksek sıcaklık ve dielektrik sıvı içinde hızlı soğuma koşulları nedeniyle eriyen malzemenin, küresel parçacıklar halinde yeniden katılaştığı belirtilmiştir. Elde edilen tozlarda, başlangıç alaşımına kıyasla karbon içeriğinde belirgin bir azalma (%5,6'dan %2,72'ye düşmüştür.) gözlemlenmiştir. Bu karbon kaybını telafi etmek amacıyla, tozlara 800 °C sıcaklıkta ve karbon monoksit (CO) gazı atmosferinde 4 saat karbonizasyon işlemi uygulanmıştır. Yapılan karakterizasyon çalışmaları; X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve mikrosertlik ölçümlerini kapsamaktadır. Karbonizasyon işlemi yapılmış tozların mikrosertlik değeri ($HV50 = 23.7 \pm 4.2$ GPa), başlangıçtaki konvansiyonel alaşıma ($HV50 = 15.47 \pm 1.71$ GPa) kıyasla belirgin şekilde yüksek bulunmuştur. Ayrıca, karbonizasyon işlemi sonrasında ortalama parçacık boyutunun 11.75 μm olduğu ve özgül yüzey alanının 3,33 m^2/g 'den 0,85 m^2/g 'ye düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, parçacıkların aglomerasyonu ve kristal büyümesi ile ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, kıvılcım erozyonu ve karbonizasyon süreçlerinin bir arada uygulanmasının, homojen element dağılımına sahip ve yüksek sertlik değerlerine ulaşan WC–Co tozlarının üretimi açısından etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Bu yöntem, konvansiyonel üretim tekniklerine göre üstün özellikler sunmakta olup sert alaşım üretiminde önemli bir potansiyel taşımaktadır [7].

Golubeva, Sotov, Agapovichev, Smelov ve Dmitriev (2017), elektro erozyon ile işleme (EDM) atık çamurundan Ni-20Cr-10Fe-3Ti alaşımının tozunu elde ederek Seçici Lazer Ergitme (SLM) teknolojisinde kullanım potansiyelini araştırmıştır. Çamurdan elde edilen tozun temizlenmesi amacıyla mineral yağ, grafit ve bakır kalıntılarını uzaklaştıracak bir kimyasal temizleme yöntemi geliştirilmiş ve distile su, karbonat ve teknik sabun kullanılmıştır. Temizleme sürecinde santrifüj ve kurutma fırını gibi ekipmanlar kullanılmış; ardından kurutma ve eleme işlemleriyle toz hazırlanmıştır. Elektron ve optik mikroskoplarla yapılan incelemeler, toz taneciklerinin genellikle küresel-oval şekle sahip olduğunu ve çaplarının 25–35 μm arasında değiştiğini göstermiştir. X-ışını floresans (XRF) ve indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES) analizleri sonucunda tozun

kimyasal bileşiminin hedef alaşım standartlarına uygun olduğu tespit edilmiştir. SLM 280HL cihazında gerçekleştirilen denemelerde üretilen parçalar, düşük mekanik mukavemet ve platformdan ayrılma sorunları göstermiştir. Parçaların kırılğan olduğu ve kolayca parçalandığı ifade edilmiştir. Bu durumun, toz taneciklerinin yüzeyinde oluşan oksit tabakasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, EDM çamurundan elde edilen geri dönüşüm tozların SLM yönteminde kullanılabilirliğine dair umut verici bulgular elde edilmiş; ancak tozun yüzey kirliliği ve oksit sorununun giderilmesi gerektiği vurgulanmıştır [27].

Katiyar, Anuj Kumar ve Pandey (2018), elektro erozyon ile işleme (EDM) yöntemiyle geleneksel ergitme metotlarıyla bir araya getirilemeyen Fe-Cu alaşımının üretilebilirliği araştırmıştır. EDM süreci, elektrotlar arasında oluşan 10.000 °C'ye varan plazma etkisiyle malzemenin buharlaşmasına ve ardından dielektrik sıvı içinde hızla soğuyarak alaşım tozlarının oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bakır elektrot ve takım çeliği iş parçası kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, oluşan toz parçacıklarının morfolojisi, bileşimi ve kristal yapısı SEM, EDS, XRD ve TEM (transmission electron microscopy) teknikleriyle incelenmiştir. Elde edilen toz parçacıklarının 30 µm'den 50 nm'ye kadar değişen boyutlarda ve küresel, düzensiz olmak üzere iki farklı şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Küresel parçacıkların uzun darbe süresinde, hızlı katılma mekanizmasıyla oluştuğu ve demir yönünden zengin bir bileşime sahip olduğu belirlenirken; düzensiz parçacıkların ise kısa darbe süresinde, bakır yönünden zenginleşerek oluştuğu ifade edilmiştir. XRD analizlerine göre Fe-Cu tozlarının kristal yapısında bcc-Fe ve fcc-Cu fazlarının bir arada bulunduğu, düşük darbe süresinde (pulse-on-time) Cu fazının baskın olduğu; darbe süresi arttıkça ise Fe fazının oranının yükseldiği gözlemlenmiştir. TEM ve SADP (selected area diffraction pattern) incelemeleri, parçacıkların nanometre ölçeğinde olduğunu ve bir kısmının amorf yapıda olduğunu doğrulamıştır. Sonuç olarak, EDM yöntemiyle geleneksel üretim tekniklerinde bir araya getirilemeyen Fe-Cu alaşım tozlarının üretilebildiği; darbe süresi, voltaj ve akım gibi parametrelerin, tozların morfolojik ve kimyasal özellikleri üzerinde kritik rol oynadığı tespit edilmiştir [28].

Tanjilul, Ahmed, Kumar ve Rahman (2018), Inconel 718 süper alaşımında delik delme uygulamaları için elektro erozyon ile işleme (EDM) sırasında oluşan parçacıkların boyutlarını ve bunların işleme ortamından uzaklaştırılmasını araştırmışlardır. Delik delme sırasında oluşan talaşın düzgün bir şekilde uzaklaştırılmaması, işlem hızının düşmesine ve

yüzey kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır. Bu sorunu çözmek amacıyla, elektrodun içinden uygulanan basınçlı sıvı püskürtme ve vakum destekli bir talaş uzaklaştırma sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem sayesinde talaşın derin bölgelerden daha etkili bir şekilde uzaklaştırılması sağlanmış, %16 oranında işlem süresi iyileşmesi ile daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü vakum desteği olmadan $R_a=9,43 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Vakum destekli işlemde ise yüzey pürüzlülüğü $R_a=7,32 \mu\text{m}$ 'ye düşmüştür. Deneysel çalışmalar, toz boyutlarının işleme akımıyla doğru orantılı olarak arttığını ve yüksek akımlarda daha büyük çaplı talaş oluştuğunu ortaya koymuştur. Ortalama parçacık boyutu yaklaşık $10 \mu\text{m}$, boyut aralığı ise $0-180 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, vakum destekli talaş (parçacık) uzaklaştırma sistemi yüzey kalitesini artırmaktadır. Bu çalışma, delik delme EDM uygulamalarında oluşan parçacıkların ortamdan uzaklaştırmasında önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir [17].

Liu, Zhu, Li, Lin, Li Y. (2018), yaptıkları çalışmada saf su ortamında gerçekleştirilen ultrasonik destekli elektro erozyon (EDM) yöntemiyle nano ve mikro boyutlu nikel (Ni) parçacıkları üretmiş ve bu parçacıkların morfolojik, kimyasal ve boyutsal özelliklerini incelemiştir. Toz üretmek için kullanılan bu yöntem, geleneksel üretim yöntemlerine göre çevre dostu, düşük maliyetli ve zaman açısından verimli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada iki farklı deney grubu oluşturulmuş; birinci grupta ultrasonik destek olmaksızın, ikinci grupta ise 900 W gücünde ve 28 kHz frekansında çalışan bir ultrasonik destekle üretim gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda elde edilen çözeltiler, santrifüj yardımıyla nano ve mikro boyuttaki parçacıklar fiziksel özelliklerine göre ayrıştırılmıştır. Parçacıkların analizleri için SEM, TEM, EDS ve XRD; boyutsal dağılım için ise DLS ve LPSA yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan analizlere göre, mikron boyuttaki parçacıklar genellikle küresel yapıda olmaktadır. Bazıları ise içi boş olan küresel yapıda ya da düzensiz şekiller göstermektedir. Nano boyutlu parçacıklar ise küresel ve topaklanma eğilimli yapılar göstermektedir. Kimyasal analizler sonucunda, mikron boyuttaki parçacıkların yüzeyinde az miktarda nikel oksit (NiO) tespit edilmiş, nanoparçacıklarda ise hem NiO hem de nikel hidroksit (Ni(OH)_2) oluşumunun daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Ultrasonik etki, nano ölçekteki oksidasyon reaksiyonlarını önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, nano parçacıkların yüksek özgül yüzey alanına sahip olması ve iyonlarla daha kolay etkileşime girmesiyle açıklanmıştır. Boyut dağılımı analizleri, ultrasonik destekle üretilen parçacıkların her iki ölçekte de daha dar dağılım aralığına ve daha düşük ortalama boyuta sahip olduğunu göstermiştir. Örneğin, nano boyutlu tozlarda ortalama boyut 248 nm 'den 190 nm 'ye

düştür. Sonuç olarak, ultrason destekli EDM yönteminin üretilen tozların morfolojisi, kimyasal yapısı ve boyutsal kontrolü üzerinde olumlu etkiler yarattığı ortaya koyulmuştur [29].

Oßwald, Woidasky, Hoffman ve Moser (2019), tarafından yapılan çalışmada ferritik çelik (1.0601) malzemesinin elektro erozyonla işleme (EDM) prosesinde oluşan atıklardaki parçacıkların, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi için hammadde tozu olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Farklı EDM parametreleri (deşarj akımı 17–52 A,deşarj süresi 12–116 µs) kullanılarak oluşturulan parçacıklar; boyut, morfoloji, kimyasal bileşim ve mikroyapı açısından analiz edilmiştir. EDM yöntemiyle üretilen parçacıklar iyi bir küresellik gösterdiği (SPHT = 0,895–0,939) ve boyut dağılımlarının kontrol edilebildiği tespit edilmiştir. Parçacık boyutlarının kümülatif dağılımı incelendiğinde; düşükdeşarj enerjisinde üretilen parçacıkların ortalama çapı yaklaşık 11,8 µm, ortadeşarj enerjisinde 13,3 ve yüksekdeşarj enerjisinde ise 35,3 µm olarak ölçülmüştür. Parçacıkların kesitlerinde martenzitik bir mikroyapı olduğu ve %1'in altında olmak üzere çok düşük oranda içi boş parçacık gözleendiği belirlenmiştir. Kimyasal analizlerde, EDM atık akışlarındaki parçacıkların karbon oranı %4,69'a kadar yükseldiği, bu değerin kullanılan çeliğin orijinal karbon oranı (%0,57–0,65) ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu ve karbon kontaminasyonunun dielektrik sıvıdan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Elde edilen parçacıkların, düşük iç gözeneklilikleri, iyi küresellikleri ve kontrol edilebilir boyut dağılımları sayesinde SLM prosesi için umut verici bir alternatif sunabileceği; ancak karbon kontaminasyonu ve üretim maliyetinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [30].

Kabirinia, Shabgard, Tabrizi (2019), yaptıkları çalışmada elektro erozyon (EDE) yöntemiyle sentezlenen tungsten karbür (WC) parçacıklarının ilk boyutlarının tahmini için matematiksel bir model geliştirmeyi amaçlamışlardır. Model, aerosolün genel dinamik diferansiyel denklemi baz alınarak oluşturulmuştur. Elektro erozyon işleminin yalnızca giriş ve çıkış değerlerine dayanarak hesaplama yapılabilmesi için herhangi bir ek parametreye ihtiyaç duymayan bir yöntem geliştirilmiştir. EDE işlemi sırasında, elektrotların buharlaşması ve ardından yoğunlaşması sonucu nano boyutta parçacıklar oluşmaktadır. Parçacık büyümesi; atomların birbirini çekmesi, çarpışma ve birleşme mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir. Modelde, plazma kanalının yarıçapı ve soğuma hızı yalnızca giriş parametrelerine (akım şiddeti ve darbe süresi) bağlı olarak ampirik formüllerle

belirlenmiştir. Bu sayede, dışarıdan herhangi bir ölçüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmadan ilk parçacık boyutu tahmini yapılabilmektedir. Çalışmada geliştirilen matematiksel model, argon ve azot atmosferinde EDE yöntemiyle sentezlenen parçacıklara ait deneysel verilerle doğrulanmıştır. Model ile hesaplanan parçacık boyutları, XRD analizleri ve Scherrer formülü sonuçlarıyla karşılaştırıldığında ortalama %15,02 hata payı göstermiştir. Argon gazı ortamında sentezlenen parçacıklarının boyutları, azot ortamında sentezlenenlere göre yaklaşık %18 daha küçüktür. Sonuç olarak, oluşturulan modelin EDE yöntemiyle sentezlenen WC parçacıkların boyutlarını belirlemede ve süreci optimize etmede etkili bir araç olduğu ortaya konmuştur [31].

Santos ve diğerleri (2021), yaptıkları çalışmada sertleştirilmiş 1.2344 (H13) takım çeliğinden yüksek hızlı talaş kaldırma (HSM) yöntemiyle ortaya çıkan talaşların bilyalı öğütme ile toz haline getirilerek eklemeli imalat (AM) için hammadde olma potansiyelini araştırmışlardır. Talaşlardan toz elde edilmesi, atomizasyon gibi yüksek maliyetli üretim süreçlerine gerek kalmadığı için enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Bu yöntem hem ekonomik hem de çevresel açıdan yüksek potansiyele sahiptir. Yüksek hızlı talaş kaldırma işlemi, talaşlarda adiyabatik (ısı ve madde transferi olmaması durumu) kayma bantlarının oluşmasına neden olmakta; bu bölgeler, yoğun plastik şekil değişimi ve lokal ısı etkisiyle martenzitik lameller, ince alt tanelere (sub-grain) ve ardından nano yapıli tanelere dönüşmektedir. Talaşların sertliği, işlem öncesi çeliğin sertliği 5,2 GPa olurken işlem sonunda talaşların sertliği 6,3 GPa'ya yükselmektedir. XRD analizleri ise bcc/bct martenzitik yapının varlığını doğrulamaktadır. Yapılan analizler, ortalama parçacık boyutunun 85 nm olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, HSM talaşları eklemeli imalata yönelik toz üretimi için potansiyeli olan bir kaynak olabileceği ortaya konmuştur. Bu yöntem hem enerji tüketimini azaltmakta hem de sertleşmiş takım çeliklerinden yüksek sertlik ve mukavemete sahip toz üretimine olanak sağlamaktadır [16].

Bahatta ve diğerleri (2021), yaptıkları çalışmada 1.2343 çeliğinin talaşlarından toz elde etmişler ve bu tozları sıcak presleme (HIP) ile disk şekline sıkıştırmışlardır. Sıkıştırma işlemi 1140-1220°C sıcaklıkta ve 5 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi ardından diskler tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan tavlama işleminde 880°C'de 3 saat, 750°C'de 4 saat bekletilmiştir. İşlem sonunda ortaya çıkan ürünün mikro yapısı, çekme dayanımı ve kırılma davranışı incelenmiştir. Çalışmada dört farklı numune test edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, ergitme olmadan katı hal geri dönüşüm tekniği ile hazırlanan geri

dönüşüm 1.2343 çeliğinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini (çekme, sertlik ve kırılma) incelemektir. Bu çalışmada, doğrudan ergitme tekniği dışında bir metot kullanılmıştır ve literatürde 1.2343 çeliği için böyle bir çalışma mevcut değildir. Konsolide disklerin akma dayanımı, kırılma dayanımı ve kırılmaya kadar olan uzaması sırasıyla 215-264 MPa, 344-415 MPa ve 1.2-2.6% aralığında ölçülmüştür. Numunelerin Vickers sertliği 144-194 HV aralığında çıkmıştır. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş çelik akma dayanımı, çekme dayanımı ve çekme sünekliği açısından işlenmemiş (referans) malzemeye kıyasla daha düşük mekanik özellikler göstermiştir [25].

Dhiman ve diğerleri (2021), yaptıkları çalışmada talaşlı imalat süreçlerinde ortaya çıkan metal atıklarının (talaşların) çevre dostu ve ekonomik yöntemlerle değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Araştırmacılar, geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinin (örneğin ergitme) yüksek enerji tüketimi, metal kaybı ve çevresel zararları nedeniyle sürdürülebilirlik açısından yetersiz kaldığını ifade etmektedirler. Bu kapsamda, metal talaşlar bilyalı öğütme (ball milling – BM) yöntemiyle eklemeli imalat için kullanılacak metal tozu haline getirilmesi tercih edilmiştir. Çalışmada, BM yöntemi kullanılarak elde edilen tozların morfolojik, mekanik ve kimyasal özellikleri ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, BM yöntemiyle üretilen tozların %70–90 oranında küresel morfolojiye sahip olduğunu ve bu yöntemin geleneksel toz üretim tekniklerine kıyasla daha az enerji tükettiğini göstermektedir. Ayrıca, söz konusu tozların toz boyutu dağılımı, sertlik ve akışkanlık gibi özellikleri; gaz atomizasyonu gibi geleneksel yöntemlerle üretilen ticari tozlarla benzer niteliktedir. Çalışmada; talaşların ayrıştırılması, temizlenmesi, öğütülmesi ve AM’de kullanımı gibi aşamaları içeren kapsamlı bir geri dönüşüm süreci ortaya konmuştur. Sonuç olarak, bilyalı öğütme yöntemiyle talaş atıklarının düşük maliyetli, çevreci ve eklemeli imalata uygun şekilde geri kazanılabileceği ortaya konulmuştur [19].

Dvornik, Mikhailenko ve Nikolenko (2021), yaptıkları çalışmada WC-10Co sementit karbür hurdalarından mineral yağ ortamında elektro erozyon (EDE) yöntemiyle toz üretmiş ve bu tozların sinterlenmesi üzerine çalışmışlardır. WC-10Co alaşımının yağ içinde EDE ile işlenmesi sonucunda, ortalama parçacık çapı 12,7 µm olan toz elde edilmiştir. Dielektrik sıvı içerisinde bulunan karbon, tungsten karbürün karbon kaybını önlemiş ve tozun karbon içeriği %5,5’ten %8,6’ya yükselmiştir. Fazla karbonun uzaklaştırılması amacıyla CO₂ atmosferinde ve 1000 °C sıcaklıkta ısıtma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra kısa süreli öğütme (20 dakika) ile ortalama parçacık çapı 8,2 µm’ye düşürülmüş ve partiküllerde lamelli

WC-Co yapıları ile prizmatik WC taneleri gözlemlenmiştir. Sinterleme işlemi vakum ortamında 1370 °C'de gerçekleştirilmiş; elde edilen alaşımın ortalama WC tane boyutu 0,58 µm ve sertlik değeri 1520 HV olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışma, EDE yönteminin kimyasal kirlilik oluşturmeyen ve geleneksel yöntemlere kıyasla ekonomik bir alternatif olduğunu göstermektedir. Elde edilen tozlar, aşınma direnci yüksek, mikron altı boyutlara sahip ve yüksek sertlikte alaşımların üretimi için uygun özellikler taşımaktadır [32].

Kateusz ve diğerleri (2023) tarafından yapılan çalışmada, çelik atıklarının ergitme yöntemiyle geri dönüştürülerek üretimde toz hammadde olarak kullanılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada, 316L çeliği ile Z100 duplex çeliği karışımının geri dönüşümüyle elde edilen tozların mikroyapısı ve kimyasal bileşimi üzerindeki etkisini incelenmiştir. Atık metal talaşları ilk aşamada izopropanol ile ultrasonik temizleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem üç kez tekrarlanmış ve her seferinde temizleme sıvısı değiştirilmiştir. Bu sayede talaş yüzeyindeki kirlilikler etkin şekilde giderilmiştir. Malzemelerin karışım oranları, ağırlıkça %30–35 oranında 316L ve %65–70 oranında Z100 çeliği olacak şekilde belirlenmiştir. Nemin giderilmesi için metal atıklar hava ortamında en az 24 saat boyunca 150-200 °C sıcaklıkta fırın yardımıyla kurutma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu atıklar, her biri 50 kg kapasiteye sahip döküm ocakları kullanılarak, erime noktasının 100–150 °C üzerine çıkarılarak indüksiyon ocağında ergitilmiştir. Sıvı hale gelen çelik, 30 kg'lık konik kesitli kalıplara dökülerek ingot haline getirilmiştir. Soğuyan çelik kütüğün yüzeyindeki oksit tabakası kuşlama işlemiyle giderilmiştir. Kuşlama işleminden sonra çelik tozu üretmek için gaz atomizasyonu yöntemi kullanılmıştır. Üretilen tozlar; 20–50 µm, 50–100 µm ve 125–250 µm boyutlarındaki elekler kullanılarak üç farklı boyut aralığında sınıflandırılmıştır. Elde edilen tozların kimyasal kompozisyonu EDS ile analiz edilmiş, yüzey morfolojileri ise SEM görüntüleme yöntemiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 20–50 µm aralığındaki tozlar için Vickers sertliği 145HV ve Young modülü 29 GPa olmuştur. 50-100 µm aralığındaki tozlar için sertlik %63 artarak 237 HV'ye, Young modülü ise %121 artışla 64 GPa'ya yükselmiştir. 125-250 µm aralığındaki tozlar için sertlik %27 artarak 301 HV'ye, elastik modül ise %128 artışla 146 GPa'ya çıkmıştır [20].

Dvornik ve Mikhailenko (2023); yaptıkları çalışmada, WC–5TiC–10Co alaşımından elektro erozyon (EDE) yöntemiyle toz sentezlemişler ve elde edilen tozların sinterlenmesi sonrasında oluşan parçacıkların mikroyapı ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Puls enerjisinin 0,5 J'den 10 J'ye kadar artırılmasıyla EDE verimliliğinin doğrusal şekilde

yükseldiği belirlenmiştir. İşlem sırasında gerçekleşen piroliz nedeniyle, tozdaki karbon içeriğinde istenmeyen değişimler meydana gelmiştir. Fazla karbon, CO₂ atmosferinde 1000 °C'de uygulanan termal işlemle giderilmiştir. Elektro erozyon işlemi sonucunda, WC–5TiC–10Co tozu sentezlenmiştir. Sonraki ısı işlem ve sinterleme aşamalarında, tanecik boyutunun 1.45 µm'den 0.42 µm'ye düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, (Ti,W)C karbür içeriğinin artmasıyla, elde edilen alaşımın sertliği başlangıçtaki 1410 HV değerinden 1650 HV değerine yükselmiştir [33].

Voigt ve diğerleri (2024) yaptıkları çalışmada, dalma erozyon yöntemiyle işlenmiş 1.2343 sıcak iş takım çeliğinden elde edilen geri dönüşüm tozlarının morfolojisini, kimyasal bileşimini ve mikroyapısını araştırmışlardır. Geri dönüşümle elde edilen tozun eklemeli imalat (additive manufacturing, AM) alanındaki potansiyel kullanımı araştırılmıştır. Atık parçacıklar; makine haznesi tabanı ve filtre kartuşları gibi farklı kaynaklardan toplanmış, aseton ile dielektrik sıvı olan mineral yağdan arındırılmıştır. Sonrasında farklı boyutlarda elenmiş ve malzeme karakterizasyonu yapılmıştır. Makine haznesi tabanında biriken çamur yaklaşık %85 oranında metalik parçacık içermektedir. Parçacıklar 20 µm, 63 µm ve 125 µm elekten geçirilmiştir. Tane boyutu dağılımı, küresellik ve akışkanlık gibi özelliklerin, özellikle SLM ve EBM gibi eklemeli imalat yöntemleri için uygun olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal bileşim, orijinal 1.2343 çeliğiyle büyük ölçüde uyum göstermektedir. Ancak, elde edilen geri dönüşüm tozda yüksek oranda karbon (yaklaşık %5) içeriği tespit edilmiştir. Dielektrik sıvının içindeki karbon ile çelik tanelerinin reaksiyona girmesiyle ve grafit elektrottan gelen karbon nedeniyle çelik tanelerinde karbon oranı yükselmektedir. Bu durum, martenzitik yapıdan sementit ağırlıklı bir mikroyapıya geçişe neden olmaktadır; XRD ve EBSD analizleri bu dönüşümü doğrulamaktadır. Geri dönüşüm tozlarının toz metalurjisi uygulamalarında, başka bir tozla karıştırılarak kullanılması önerilmektedir [26].

Literatür araştırmasında, EDM atık çamurundan geri kazanılan tozlar, katı hal geri dönüşüm yöntemleriyle toz elde edilmesi, metallerin ergitilerek geri dönüştürülmesi ve sıcak iş takım çelikleriyle ilgili geri dönüşüm çalışmaları incelenmiştir. EDM atıklarından elde edilen tozlara yönelik çalışmalarda, genellikle toz karakterizasyonu yapılmış; kimyasal bileşimi, toz boyutu ve parçacık şekli gibi özellikler araştırılmıştır. Ancak, bu tozların toz metalurjisinde kullanıldığı uygulama sayısı literatürde oldukça azdır. Bu çalışmada kullanılan sıcak iş takım çeliği (1.2343) ile ilgili bir toz metalurjisi uygulamasına ise literatürde rastlanmamıştır.

Bahatta ve diğeri (2021), Santos ve diğeri (2021) yaptıkları çalışmalarda 1.2343 ve 1.2344 gibi sıcak iş takım çeliği talaşlarının temizlenmesi ve bilyalı öğütme ile toz haline getirilmesini araştırmışlardır. Bu çalışmalarda, tozların sıkıştırılmasında sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulandığı sıcak sıkıştırma kullanılmıştır.

Literatürde, geri dönüşüm tozlarının eklemeli imalatta hammadde olarak kullanımı üzerine de çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Voigt ve diğeri (2024), Oßwald, Woidasky, Hoffman ve Moser (2019) yaptıkları çalışmalarda EDM atıklarından elde edilen geri dönüşüm tozların eklemeli imalat yönteminde potansiyel kullanımını araştırmışlardır. Golubeva, Sotov, Agapovichev, Smelov ve Dmitriev (2017), elektro erozyon ile işleme (EDM) atık çamurundan Ni-20Cr-10Fe-3Ti alaşımının tozunu elde etmiş ve Seçici Lazer Ergitme (SLM) yönteminde kullanılabilirliğini araştırmıştır.

EDM atıklarından toz elde etme yöntemi, yüksek maliyete sahip iş parçası malzemelerinin geri kazanılması açısından ekonomik ve çevresel bakımdan önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, Dvornik (2010) yaptığı çalışmada EDM yöntemiyle toz üretiminin, özellikle geleneksel yöntemlerle işlenmesi güç olan sert malzemeler için önemli bir potansiyel taşıdığını ifade etmiştir.

Literatürdeki geri dönüşüm tozu çalışmalarında, bu tozların boyut, şekil ve kimyasal bileşim açısından referans (işlenmemiş) malzemelere oldukça yakın özellikler gösterdiği görülmektedir. Ancak, geri dönüşüm tozlarla toz metalurjisi veya eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen parçalarda mekanik özelliklerin (sertlik, çekme dayanımı) genellikle daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Geri Dönüşüm Çelik Tozu

Deneysel çalışmada geri dönüşüm toz ve Distaloy AE tozları karıştırılarak kullanılmıştır. Geri dönüşüm toz EDM atık çamurundan elde edildikten sonra toz boyutu, parçacık şekli ve kimyasal özellikler analiz edilmiştir. Daha sonra geri dönüşüm tozlardaki kirliliği ve oksitleri temizleme denemeleri yapılmıştır.

4.1.1. EDM atık çamuru ve metal parçacıklar

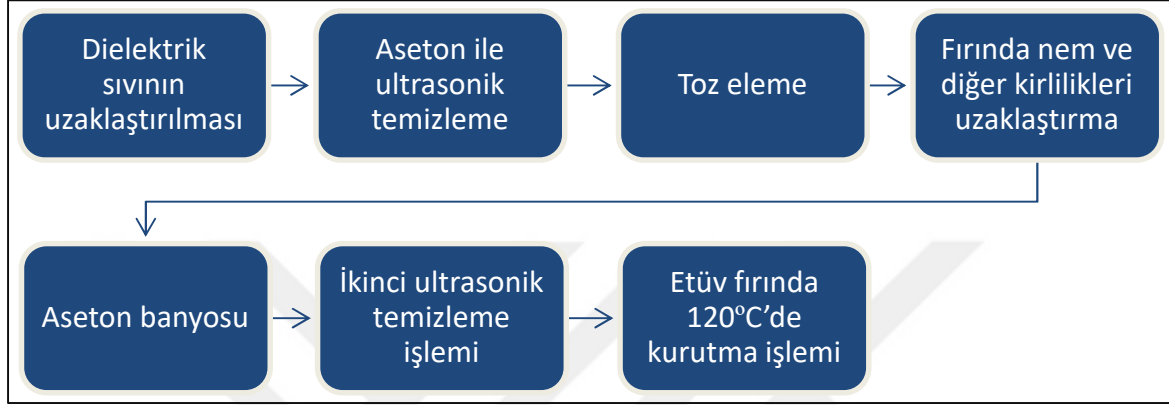
EDM atık çamuru içerisinde takım elektrodundan gelen parçacıklar (grafit veya bakır), iş parçası elektrodundan gelen metalik parçacıklar ve dielektrik sıvı olmak üzere üç farklı malzemeden oluşur [6,27]. İş parçası elektrodu olarak; paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları, sıcak iş takım çelikleri (özellikle 1.2343 çeliği), plastik kalıp çeliği yaygın olarak kullanılmaktadır [26]. Bu çalışmada, atık çamurunun alındığı işletmeden kullanılan tezgâhta 1.2343 sıcak iş takım çeliği (daha yüksek oranla) ve 1.2738 plastik kalıp çeliği işlendiği bilgisi verilmiştir.



Resim 4.1. EDM atık çamuru

4.1.2. Atık çamurundan çelik tozlarının geri kazanımı

EDM atık çamurundan çelik tozların elde edilmesi işlemi yedi adımdan oluşmaktadır. Geri dönüşüm çelik tozunun elde edilmesi için yapılan işlemler sırasıyla Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Atık çamurundan geri dönüşüm çelik tozlarının elde edilme işleminin şeması

Dielektrik sıvının (yağ) uzaklaştırılması

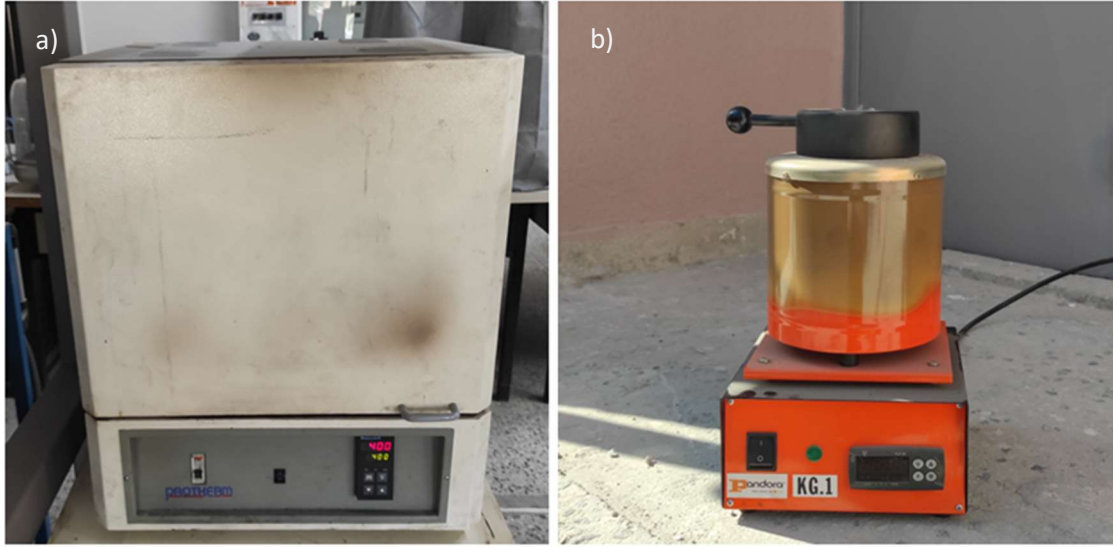
Geri dönüşüm işlemine ilk önce dielektrik sıvının uzaklaştırılması ile başlanmıştır. Elde edilen atıkta dielektrik sıvı oranı yüksek olduğu için fırın yardımıyla sıvının uzaklaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde iki farklı fırın kullanılmıştır. Dielektrik sıvıyı (yağ) uzaklaştırma işlemi 350-400 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Bu işlemde Resim 4.2’deki Protherm marka fırın ve ergitme fırını olmak üzere 2 adet fırın kullanılmıştır.

Aseton ile ultrasonik temizleme

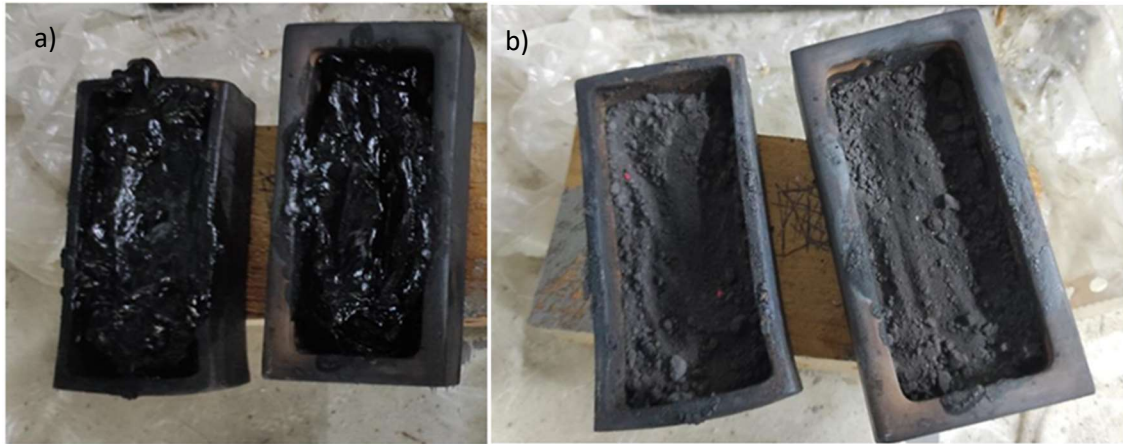
Tozların yüzeyinde oluşan kir, yağ ve oksit tabakalarının temizlenmesi için aseton ile ultrasonik temizleme yapılmıştır. Asetonun seçilme sebebi elde edilen tozlara zarar vermemesi ve kolayca uzaklaştırılmasıdır. İşlem süresi en az 30 dk olacak şekilde uygulama yapılmıştır. Ayrıca, 2 kez sıvı değişimi yapılmıştır.

Toz eleme

Elde edilen tozlara eleme işlemi yapılmıştır ve 37-125 μm aralığındaki tozlar seçilmiştir. Eleme işlemi ile ayrıca kirlilik oluşturan 125 μm 'den büyük yabancı maddeler de uzaklaştırılmıştır.



Resim 4.2. Dielektrik sıvının uzaklaştırılmasında kullanılan fırınlar, a) Protherm fırını, b) metal ergitme fırını



Resim 4.3. a) Fırına koymadan önce EDM atık çamuru, b) Dielektrik sıvı uzaklaştırma işleminden sonra elde edilen tozlar

Fırında nem ve diğer kirlilikleri uzaklaştırma

Elenmiş tozlar Resim 4.2b'de gösterilen fırınla 400 $^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat nem ve diğer kirlilikleri uzaklaştırma işlemi yapılmıştır (Bkz. Resim 4.2).

Aseton banyosu

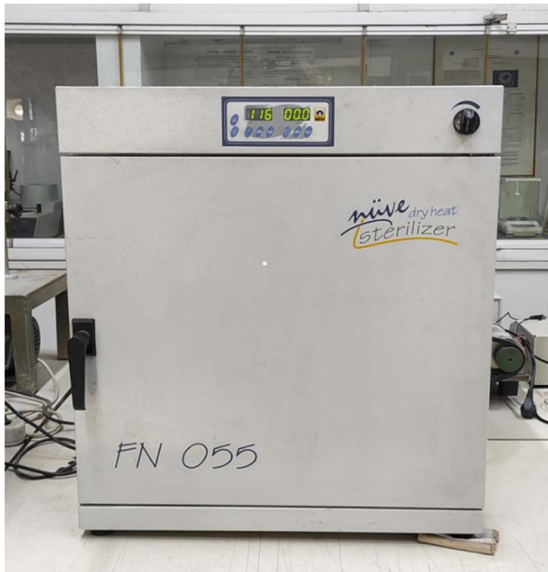
Fırından çıkan tozlar önce bir behere koyulmuştur. Daha sonra üzerine aseton eklenmiştir. Oda sıcaklığında yaklaşık 30 dk boyunca bekletilmiştir ve bu süre içerisinde aseton iki kez değiştirilmiştir. Çelik tozları yüksek yoğunluğa sahip olduğu için dibe çökmektedir. Bu nedenle, işlem bitinceye kadar karıştırılmıştır. Bu karıştırma işlemi için mekanik karıştırıcı kullanılmıştır.

İkinci ultrasonik temizleme işlemi

Aseton banyosunun ardından, ikinci bir ultrasonik temizleme işlemi uygulanmıştır. Bu aşamada aseton iki kez değiştirilmiştir. Temizleme süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir. Kimyasal kompozisyon analizi (EDS) Şekil 4.5b’de yer almaktadır.

Etüv fırında 120 °C’de kurutma işlemi

İkinci ultrasonik temizleme işleminden sonra geri dönüşüm çelik tozlarına etüv fırında kurutma işlemi yapılmıştır. Fırın sıcaklığı 120 °C olup gece boyunca bekletilmiştir. Ertesi gün fırın kapatılıp soğumaya bırakılmıştır. Soğuma gerçekleştikten sonra topaklanmayı ortadan kaldırmak için tozlar 10 dakika bilyalı karıştırma işlemi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için temizlenen geri dönüşüm çelik tozları bekletilmeden karışım hazırlanmıştır.



Resim 4.4. Nüve FN 055 Etüv fırını

4.1.3. 1.2343 ve 1.2738 çeliklerinin kimyasal kompozisyonu

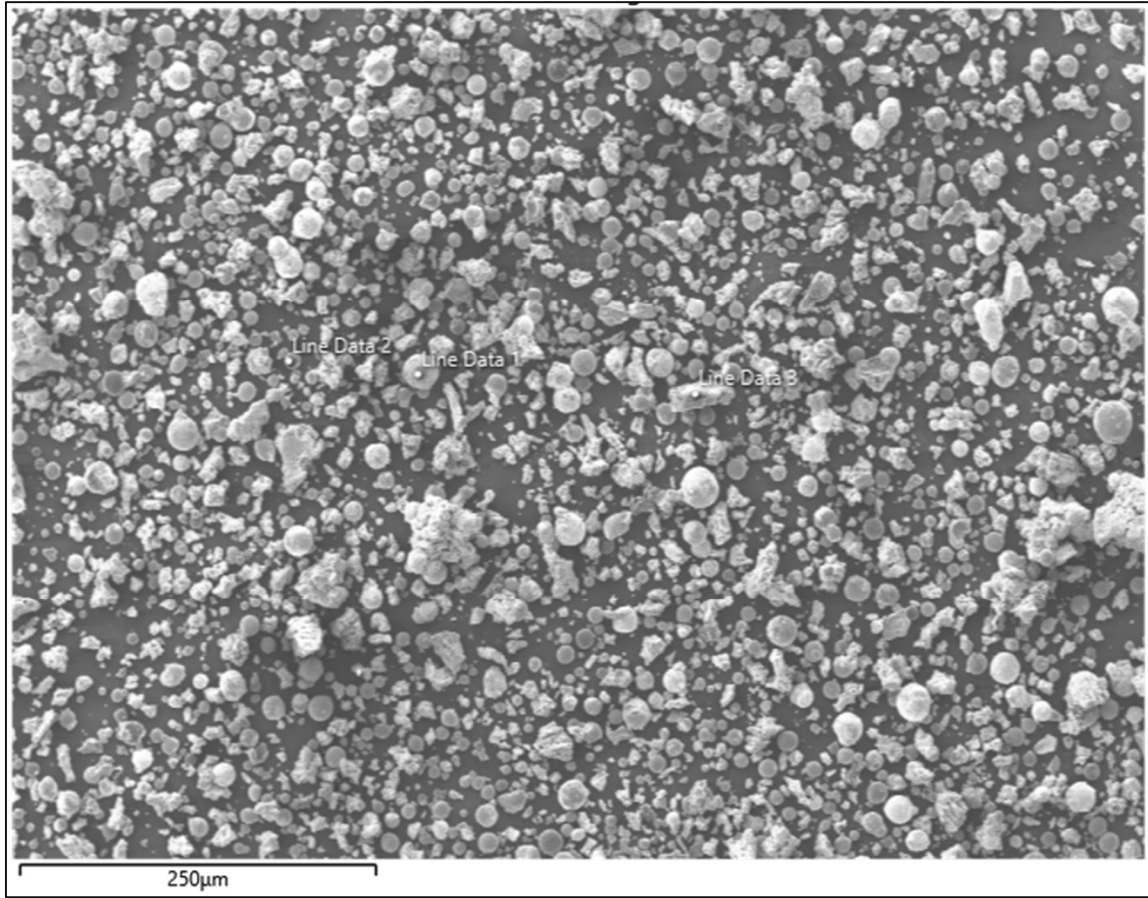
Yapılan çalışmada, atık çamurunun alındığı işletmeden kullanılan tezgâhta 1.2343 sıcak iş takım çeliği (daha yüksek oranla) ve 1.2738 plastik kalıp çeliği işlendiği bilgisi verilmiştir. 1.2343 çeliğinin çeşitli türleri bulunmakta ve bunların kimyasal kompozisyonlarında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 4.1’de bulunan tablodaki değerleri Total materia veri tabanından alınmıştır [34]. Sıcak iş takım çeliği 1.2343 ISO-B ve plastik kalıp çeliği 1.2738 ISO-BM malzemelerinin bilgileri üretici Buderus firması tarafından sağlanmıştır [35].

Çizelge 4.1. 1.2343 ve 1.2738 çeliklerinin kimyasal kompozisyonu

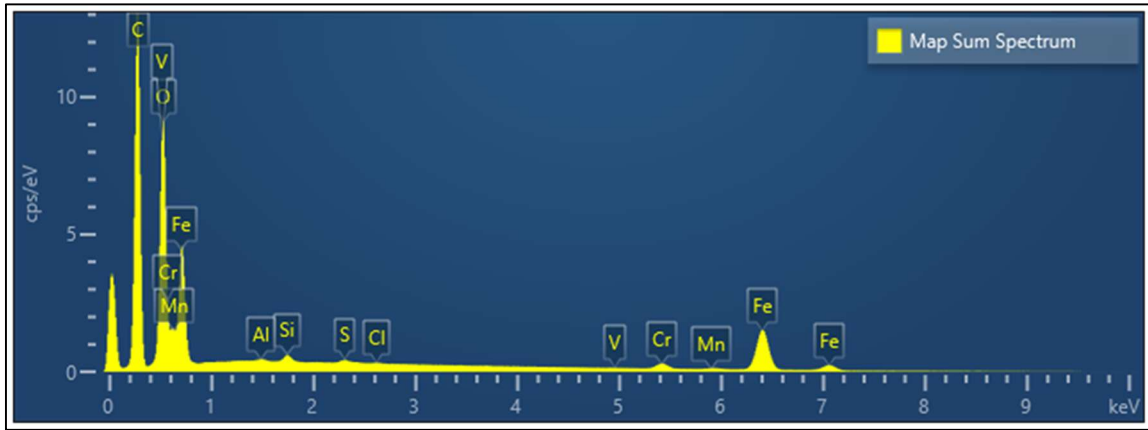
1.2343 ISO-B		1.2738 ISO-BM	
Element	Kütlece yüzde, %	Element	Kütlece yüzde, %
C	0,38	C	0,36
Cr	5,20	Cr	2,00
Mo	1,30	Mn	1,50
Mn	0,40	Mo	0,20
P	0,025	Ni	1,00
S	0,003	P	0,020
Si	1,05	S	0,003
V	0,40	Si	0,30
Fe	kalan	Fe	kalan
Toplam	100,00		100,00

4.1.4. Geri dönüşüm çelik tozunun kimyasal kompozisyonu

Elde edilen geri dönüşüm çelik tozlarına herhangi bir temizleme işlemi uygulamadan önce kimyasal kompozisyonunu öğrenmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu- SEM (scanning electron microscope) ile analiz yapılmıştır. Bu aşamada dielektrik sıvı, atık çamurundan fırın (Bkz. Resim 4.2) yardımıyla uzaklaştırılmıştır. SEM, mikro ve nano yapıların görüntülenmesine ve element analizi yapılmasına olanak sağlar. Kimyasal kompozisyonla birlikte oluşan parçacıkların şekli ve boyutları da incelenmiştir. EDS analizinde harita toplamı analizi, noktasal ölçümler ve çizgi toplam (3 nokta) analizi yapılmıştır.



Resim 4.5. EDS haritalama resmi

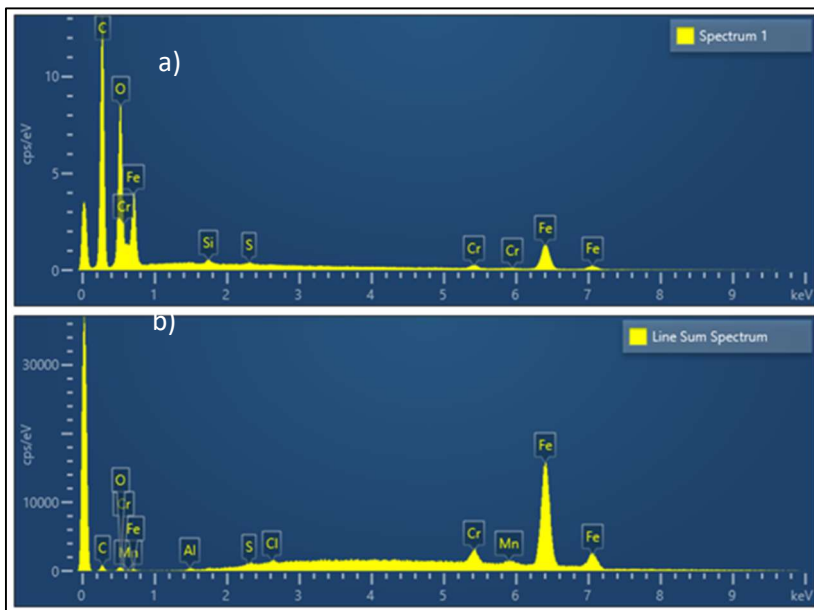


Şekil 4.2. EDS harita toplamı için sonuç grafiği

Çizelge 4.2. Geri dönüşüm çelik tozunun kimyasal kompozisyon tablosu

Map sum spectrum				
Element	Çizgi Tipi	Ağırlıkça (wt%)	wt %σ	Atomik, %
O	K serisi	28,19	0,12	57,45
Al	K serisi	0,17	0,02	0,21
Si	K serisi	0,60	0,02	0,70
S	K serisi	0,28	0,02	0,28
Cl	K serisi	0,13	0,02	0,12
V	K serisi	0,21	0,06	0,13
Cr	L serisi	0,00	1,39	0,00
Mn	L serisi	0,00	0,72	0,00
Fe	L serisi	70,42	0,13	41,11
Toplam		100,00		100,00

Yapılan EDS analizine göre, numunenin bileşimi ağırlıkça büyük oranda demir (%70,42) ve oksijen (%28,19) içermektedir. Bu durum, ölçüm yapılan toz numunesinin yüksek oranda oksitlenmiş bir yüzeye sahip bulunduğunu göstermektedir. Atomik yüzde dağılımında oksijenin %57,45 gibi yüksek bir orana sahip olması da bu durumu desteklemektedir. Düşük oranlarda alüminyum, silikon, sülfür, klor ve vanadyum gibi elementler tespit edilmiştir. Bunlar çelik içerisinde bulunan elementler, üretim sürecinden kalıntı ya da çevresel kontaminasyon kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Krom ve manganın ölçüm belirsizlikleri oldukça yüksek olduğundan ve bu elementlerin miktarı az olduğu için tutarlı bir yorum yapmak oldukça zor görünmektedir. Sonuç olarak, analiz sonuçları numunenin demir esaslı ve yüzeyinde oksitlenme belirtileri gösteren bir yapıda olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3. a) Nokta 1 EDS analiz grafiği, b) Çizgi toplamı EDS analiz grafiği

Çizelge 4.3'te yer alan Spektrum 1 kimyasal kompozisyon analizi Resim 4.5'te bulunan EDS haritasında işaretlenmiş olan "Line Data 1" noktasından alınmıştır. Geri dönüşüm küresel yapıli parçacıkta demir oranı yüksek ve kısmen oksitlenmiş bir alaşım yapısında olduğunu ortaya koymaktadır. Krom içeriği, bu tozun sıcak iş takım çeliği olabileceğine işaret etmektedir. Yüksek oksijen oranı, tozun oksitlenmeye uğradığını göstermekte ve bu durumun tozun sıkıştırma ve sinterleme davranışı üzerinde olumsuz yönde etki edeceği düşünülmelidir. Düşük seviyelerdeki Si ve S varlığı ise 1.2343 sıcak iş takım çeliği kimyasal yapısında bulunan bileşenlerdir.

Çizelge 4.3. Nokta 1'in kimyasal kompozisyonu

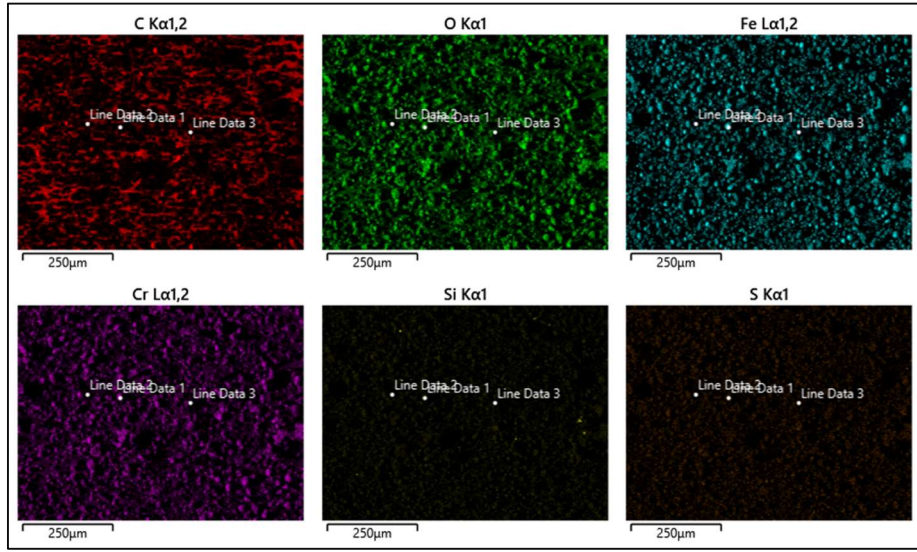
Element	Çizgi Tipi	Ağırlıkça (wt%)	wt %σ	Atomik, %
O	K serisi	24,39	0,85	52,55
Si	K serisi	0,47	0,05	0,57
S	K serisi	0,26	0,06	0,28
Cr	L serisi	8,04	2,99	5,33
Fe	L serisi	66,84	2,20	41,26
Toplam		100,00		100,00

Çizelge 4.4'te yer alan "Line Sum Spectrum" verilerine göre, geri dönüşüm çelik daha önceki analizlerde olduğu gibi tozu yüksek oranda demir içeren, krom miktarı yüksek ve belirgin oksit oranına sahip bir metalik yapıyı temsil etmektedir. Oksijen oranı, tozların oksitli fazlar içerdiğini ve geri dönüşüm süreci boyunca oksidatif koşullara maruz kaldığını göstermektedir. Silisyum ve kükürt gibi elementlerin düşük seviyede olduğu tespit edilmiş ve işlenmemiş takım çeliği kimyasal kompozisyonunda bu malzemeler az miktarda bulunmaktadır.

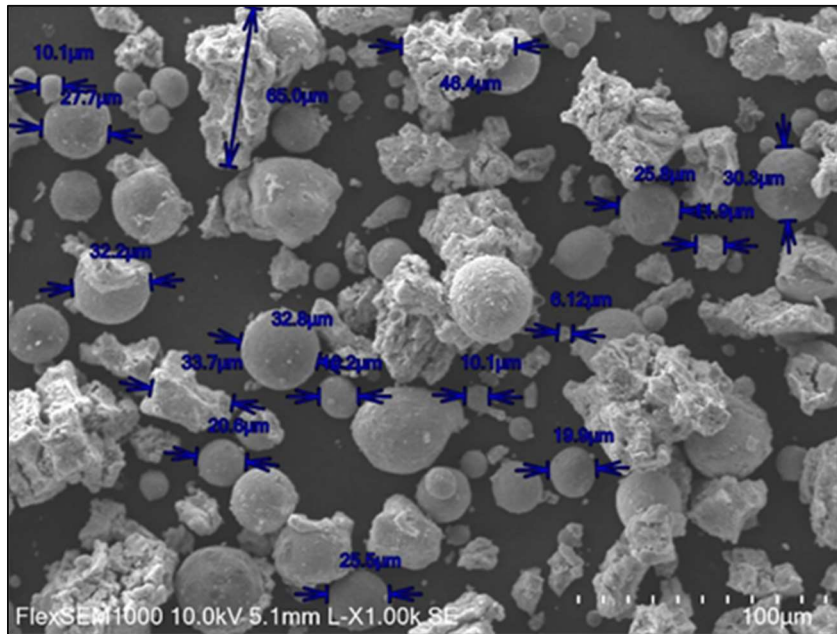
Çizelge 4.4. Çizgi toplam spektrum (3 nokta) için kimyasal kompozisyonu

Element	Çizgi Tipi	Ağırlıkça (wt%)	wt %σ	Atomik, %
O	K serisi	18,72	0,29	44,26
Si	K serisi	0,44	0,02	0,59
S	K serisi	0,15	0,02	0,18
Cr	L serisi	6,05	1,32	4,40
Fe	L serisi	74,64	1,06	50,57
Toplam		100,00		100,00

EDS haritalama sonuçlarına göre (Resim 4.6) numune, demir esaslı ve yaygın biçimde oksitlenmiş bir yüzey yapısına sahiptir. Oksijen ve demirin yüzeyde yoğun ve homojen dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Karbon belirli bölgelerde yoğunlaşmış olabilir, bu da yüzey kirlenmesi veya karbon içeren fazlara işaret edebilir. Diğer elementler (Cr, Si, S) düşük yoğunlukta ve dağınık görüldüğü için bu elementlerin az miktarda bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu haritalar, daha önce Çizelge 4.1’de verilen EDS sonuçları ile de tutarlılık göstermektedir.



Resim 4.6. EDS haritalama sonuçları

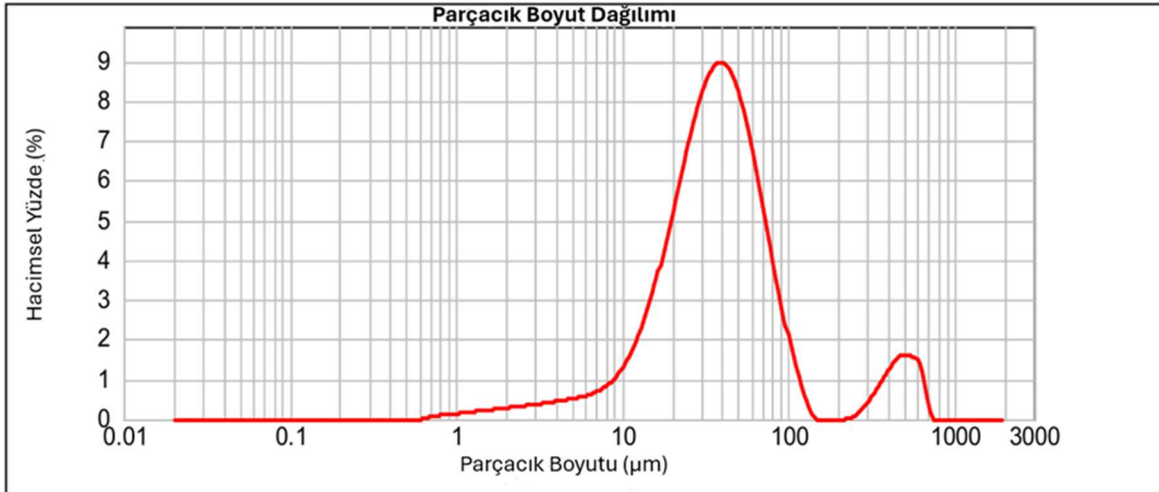


Resim 4.7. Geri Dönüşüm toz SEM görüntüsü

Resim 4.7’de yer alan SEM görüntüsü, geri dönüşüm metal tozunun morfolojik özelliklerini göstermektedir. Görselde tozların boyutları ve parçacık şekli açıkça gözlemlenmektedir. Parçacıkların çapları yaklaşık 6 μm ile 65 μm arasında değişmektedir. Görselde geri dönüşüm tozlarının çoğunluğu düzgün küresel yapıya sahiptir. Bazı partiküller ise köşeli, düzensiz ve kırılmış yapıdadır. EDM ile oluşan parçacıklarda küresel yapıların yanında düzensiz şekilde olan yapıların çıkması beklenen bir durumdur. Ayrıca, küresel tozların yüzeylerinde küçük parçacıklar barındırmaktadır.

4.1.5. Geri dönüşüm çelik tozu için parçacık boyut analizi

Parçacık boyut dağılımı (PSD) analizi Malvern Instruments Ltd firmasının Mastersizer 2000 ile yapılmıştır. Yapılan PSD analizine göre, numunede $d(0,1)$ değeri 13,087 μm , $d(0,5)$ değeri 37,148 μm ve $d(0,9)$ değeri 92,835 μm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, numunedeki partiküllerin %10’unun 13,087 μm ’den, %50’sinin 37,148 μm ’den ve %90’ının 92,835 μm ’den daha küçük olduğunu göstermektedir. Birikimli dağılımda $d(0,5)$ değeri ortalama toz boyutunu vermektedir. Şekil 4.4’te yer alan grafikte, parçacıkların hacimsel yüzdesine göre dağılımını göstermekte olup, parçacıkların büyük çoğunluğunun yaklaşık 10–50 μm aralığında yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca grafik üzerinde 100-1000 μm aralığında ikinci bir tepe daha olduğu gözlemlenmektedir.



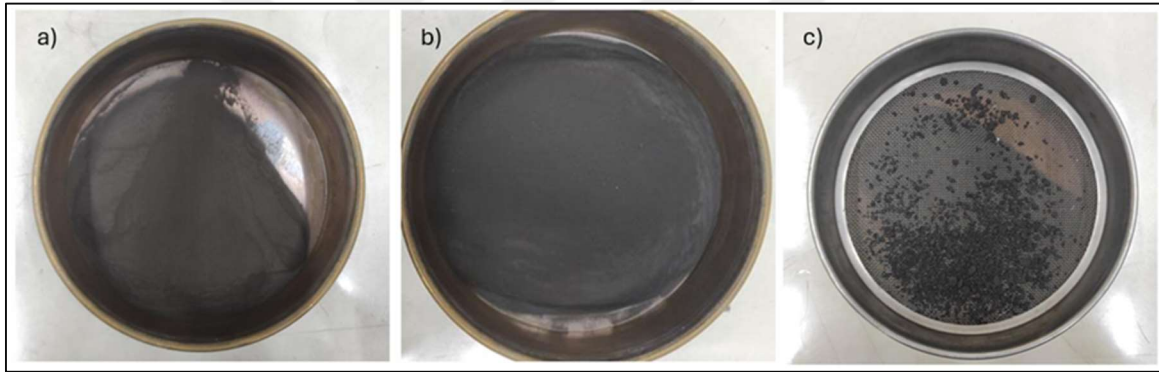
Şekil 4.4. Geri dönüşüm çelik tozuna ait parçacık boyut dağılım grafiği

4.1.6. Geri dönüşüm çelik tozu elek analizi

Geri kazanılan çelik tozları ile eleme yapılmadan hazırlanan numuneler preslemeden düzgün çıkmalarına rağmen sinterleme işleminde başarısız olmuştur. Bu nedenle eleme işlemi yapılmış ve 37-125 μm aralığındaki tozlarla başarılı sonuç elde edilmiştir. Eleme işleminde 37 μm (400 mesh) ve 125 μm (120 mesh) elek kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda 37-125 μm arasındaki tozlar kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Geri dönüşüm çelik tozunun elek analizi

Elek analizi	Gram (g)	%
+125 μm	6,0476	3,01
+37 μm -125 μm	129,4793	64,47
-37 μm	65,3174	32,52



Resim 4.8. Elenmiş geri dönüşüm toz a) -37 μm , b) 37-125 μm , c) +125 μm

4.2. Distaloy AE Tozunun Özellikleri

Deneysel çalışmalar yapılırken geri dönüşüm çelik tozuyla Distaloy AE karıştırılarak kullanılmıştır. Distaloy AE, toz metalürjisi (TM) uygulamalarında kullanılan düşük alaşımlı bir çelik tozu türüdür. Bu tür tozlar, sinterleme yöntemiyle mekanik parça üretiminde kullanılır. Distaloy AE, Höganäs AB adlı İsveçli firmanın geliştirilmiş olduğu ticari bir üründür. Bu tür baz tozlar herhangi bir toz karışımında ana bileşen olarak kullanılabilir [36]. Aşağıda verilen Distaloy AE'nin özellikleri, kullanım alanları, yoğunluk ve elek analizi bilgileri üreticinin web sitesinden alınmıştır [37].

Özellikleri:

- Ön alaşımlı demir tozudur, yani toz halindeyken içinde bazı alaşım elementleri (örneğin bakır, molibden, nikel) zaten mevcuttur.
- Sıkıştırma basıncı 400-800 MPa aralığındadır.
- Sertlik, tokluk ve aşınma direnci yüksektir.
- Yüksek yoğunluklara ulaşabilir, bu da özellikle otomotiv parçaları için önemlidir.

Kullanım alanları aşağıda listelenmiştir [38]:

- Otomotiv endüstrisinde dişliler, segmanlar, miller vb.
- Senkronizasyon parçaları ve diğer yüksek performans uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.
- Yüksek dayanım gerektiren parçalarda kullanılır.

Distaloy Ae hakkında temel bilgiler:

- Görünür yoğunluk: 3,05 g/cm³
- Akış hızı (s/50g): 26 s

Çizelge 4.6. Distaloy AE elek analizi [37]

Elek analizi	%
+212 µm	0
+150 µm	7
-45 µm	25

Çizelge 4.7. Distaloy AE'nin kimyasal kompozisyonu [37]

Element	Kütlece yüzde (%)
Karbon	<0,01
Oksijen-toplam	0,1
Bakır	1,50
Nikel	4,00
Molibden	0,50

çelik tozlarında yüksek miktarda oksijen olduğu görülmüştür. Toz metalurjisi ile parça üretiminde tozların yüzeyinin oksit ile kaplı olması istenen bir durum değildir. Tozlarda bulunan oksitler sinterleme esnasında 750-865°C sıcaklık aralığında uzaklaşmaktadır [40]. Yüksek sıcaklıklarda da oksitler azalmaya devam eder. Oksit oranı yüksek tozlar sinterlendiğinde elde edilen üründe yüksek oranda porozite oluşmaktadır. Bu nedenle tozlardaki yüksek oksit oranını düşürmek için 6 tane deneme yapılmıştır. Bu 6 deneme aşağıda listelenmiştir:

- 1) Fırında 800° C’de 60 dk işlem
- 2) Aseton ile ultrasonik temizleme
- 3) Nitrik asit (HNO₃) + hidroflorik asit (HF) karışımına daldırma
- 4) Asitleme + fırında 800° C’de 60 dk işlem
- 5) Bilyalı karıştırma 2 saat (seramik bilya)
- 6) Bilyalı karıştırma 2 saat (seramik bilya) 37 µm altı elenmiş tozlar

Yukarıda belirtilen denemelerin FE-SEM ve EDS analizi Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde (AYBÜ MERLAB) bulunan HITACHI SU5000 FE-SEM (Bkz. Resim 4.10) ile yapılmıştır. Hazırlanan tozlara aseton ile ultrasonik temizleme yapılmıştır ve tozlar analize girmeden önce 10 dakika kadar topraklanmayı gidermesi için bilyalı karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Resim 4.10. HITACHI SU5000 FE-SEM [41]

Fırında 800 °C’de 60 dk işlem

Tozlarda bulunan oksitleri indirgemek amacıyla MTI OTF-1200X fırında 800 °C’de argon atmosferinde 1 saat bekletilmiştir. EDS analizine göre oksijen oranı %6,5’e düşmüştür. Oksit giderme işlemi başarılı olsa da elde edilen tozlar toz metalurjisi uygulamalarında yetersiz kalmıştır. Bağlayıcı ve yağlayıcı oranının yükseltilmesiyle parçalar presten düzgün bir şekilde çıkmasına rağmen sinterleme işlemi sonucunda kolayca dağılan bir yapı elde edilmiştir. Bu nedenle bu yöntemde elde edilen tozlar deneysel çalışmada kullanılmamıştır.

Aseton ile ultrasonik temizleme

Aseton ile tozların yüzeyinde bulunan yağ ve kirlilikleri temizlemek için ultrasonik temizleme işlemi yapılmıştır.

Nitrik asit + hidroflorik asit karışımına daldırma

Paslanmaz çeliklerde oluşan oksit tabakasını gidermek ve diğer kirlilikleri de temizlemek için asit çözeltileri yaygın bir şekilde kullanılır. Asit çözeltileri, tek asit ve çoklu asit karışımları olmak üzere iki farklı şekilde hazırlanmaktadır [42]. Asit çözeltisi hazırlarken hangi asidin kullanılacağı işlem yapılacak malzemeye göre değişmektedir. Yapılan çalışmada, takım çeliği tozu kullanıldığı için nitrik asit ve hidroflorik asit karışımı kullanılmıştır. Bu asit karışımı paslanmaz çelikler, yüksek alaşımli çelikler ve diğer çelikler için yaygın olarak kullanılan ekonomik bir yöntemdir.

Asitleme işlemi yapılırken işlem adımları sırasıyla aşağıda listelenmiştir [43]:

- 1) Temizlik yapılacak metal asit çözeltisine atılır ve hedeflenen süre kadar bekletilir. Ön asitleme ve final asitleme olarak iki aşama da yapılabilir.
- 2) Asit çözeltisinden alınan çelik saf su ile durulanır.
- 3) Kullanılan malzeme ve amaca göre nötralizasyon çözeltisi hazırlanır ve çelik malzeme içerisine bırakılır. Asitin etkisini ortadan kaldırmak ve korozyonu önlemek için yapılır.
- 4) İhtiyaç duyulursa pasivasyon işlemi uygulanır. Bazı çelikler (krom içeren çelikler) kendinden bu özelliğe sahiptir ve bu işlemin yapılmasına gerek yoktur.

Yapılan çalışmada asitleme (pickling) çalışmasında karışım hacmen; nitrik asit (%55'lik) %15, hidroflorik asit %2 ve %83'lük kalan kısmı ise saf su ile hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımın hacmi 1 litredir. Yaklaşık 100 gr toz kullanılmıştır. Çözelti metal tozunu oranı 1'e 40'tır. İşlem yapılırken mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Çünkü, metal tozları yüksek yoğunluğa sahip olduğu için dibe çökmektedir. Bu durumun ortadan kalkması için mekanik karıştırıcı 500-1000 rpm arasında düşük bir hızda kullanılmıştır.

Geri dönüşüm çelik tozlarına oksit giderme amacıyla asit çözeltisine daldırma işlemi uygulanmıştır. Tozlar, asit karışımı içinde yaklaşık 15 dakika bekletilmiştir. Çözeltide dağılmış halde bulunan toz tanelerinin dibe çökmesi beklendiğinden, çözeltiden çıkarma süresi uzamıştır. Bu durum, çelik tozlarının beklenenden daha uzun süre aside maruz kalmasına neden olmuş ve sonuç olarak toz yüzeylerinde korozyon oluşumu gözlenmiştir. Büyük boyutlu veya bütün haldeki çelik malzemeler için etkili olan bu yöntem, toz formundaki malzemeler için uygun bulunmamıştır.

Asitleme + fırında 800° C'de 60 dk işlem

Asitleme işlemi (pickling) yapılan tozların bir kısmına deneme amacıyla fırında 800° C'de 60 dk oksit indirgeme işlemi yapılmıştır.

Bilyalı karıştırma 2 saat (seramik bilya)

Tozların yüzeyinde bulunan oksit tabakalarını gidermek için bilyalı karıştırma işlemi de denenmiştir. Tozların boyutunu küçülten bu işlem bazı durumlarda kullanılmaktadır. İşlem süresi 2 saat olarak uygulanmıştır [24,25]. Ardından da aseton ile ultrasonik temizleme yapılmıştır.

Bilyalı karıştırma 2 saat (seramik bilya) ve 37 µm altı elenmiş tozlar

2 saat süren bilyalı karıştırma işleminden sonra tozların bir kısmı alınmış ve 37 µm altı tozlar elenmiştir. 37 µm altındaki tozlar elendikten sonra elde edilen tozların kimyasal kompozisyondaki değişimi incelenmiştir. Oksijen miktarının %14,9'dan %11,8'e düştüğü görülmüştür.

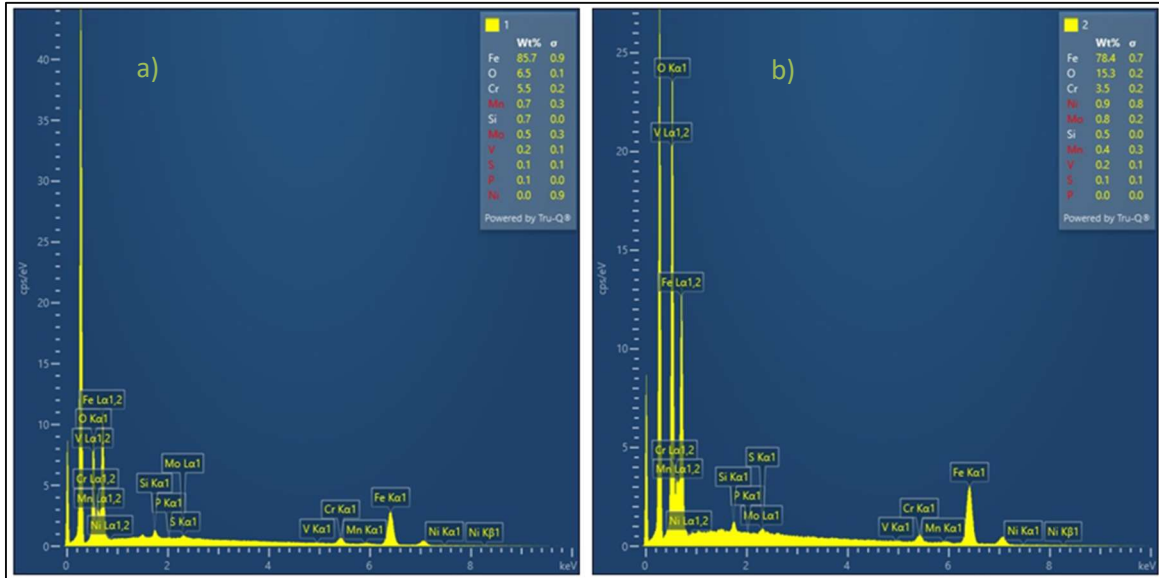
4.4.1. Temizlik çalışmalarının kimyasal kompozisyon üzerindeki etkileri

Yapılan oksit giderme ve temizlik çalışmalarının kimyasal kompozisyon üzerindeki etkilerini görmek için EDS analizi yapılmıştır.

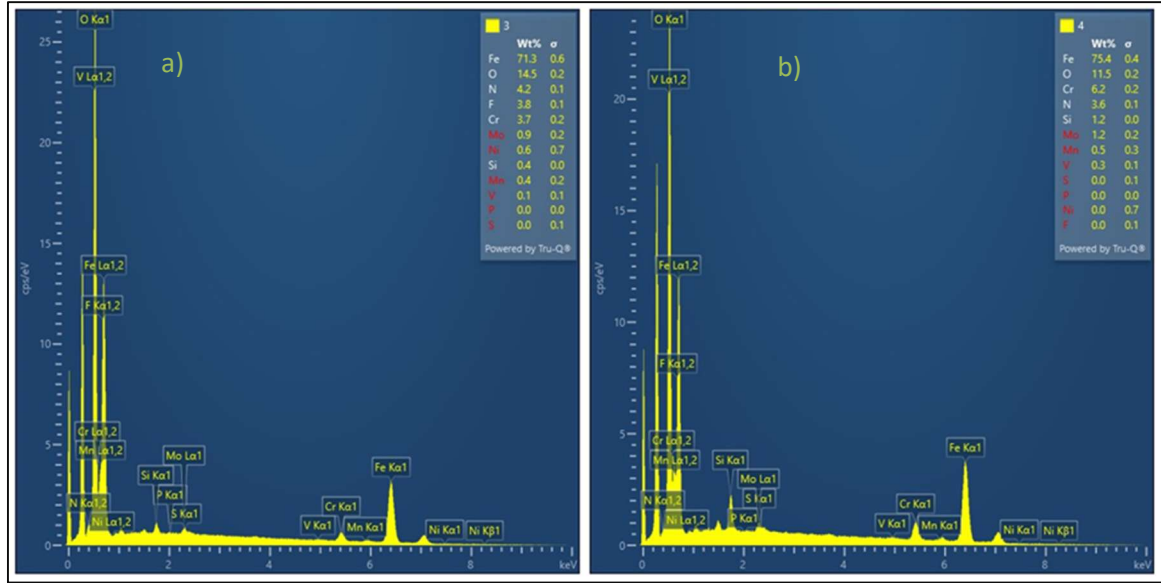
Şekil 4.5a'daki grafikte yer alan sonuçlara göre Fırında 800 °C'de 60 dk işlem uygulanan tozlardaki oksit seviyesi %6,5 seviyesine indiği görülmektedir. Aseton ile ultrasonik temizleme (Bkz. Şekil 4.5b) yapılan toz numunelerinde oksit oranı %15,3 ölçülmüştür.

Asitleme işlemi (pickling) sonunda (Şekil 4.6a) oksijen oranı %14,5 olarak ölçülmüştür. Asit karışımına daldırma ile etkin bir oksit temizliği sağlanamamıştır. Asitleme işlemi ve fırında 800°C'de 1 saat kadar işlem gören tozların (Şekil 4.6b) oksit oranının %11,5'a düştüğü görülmektedir.

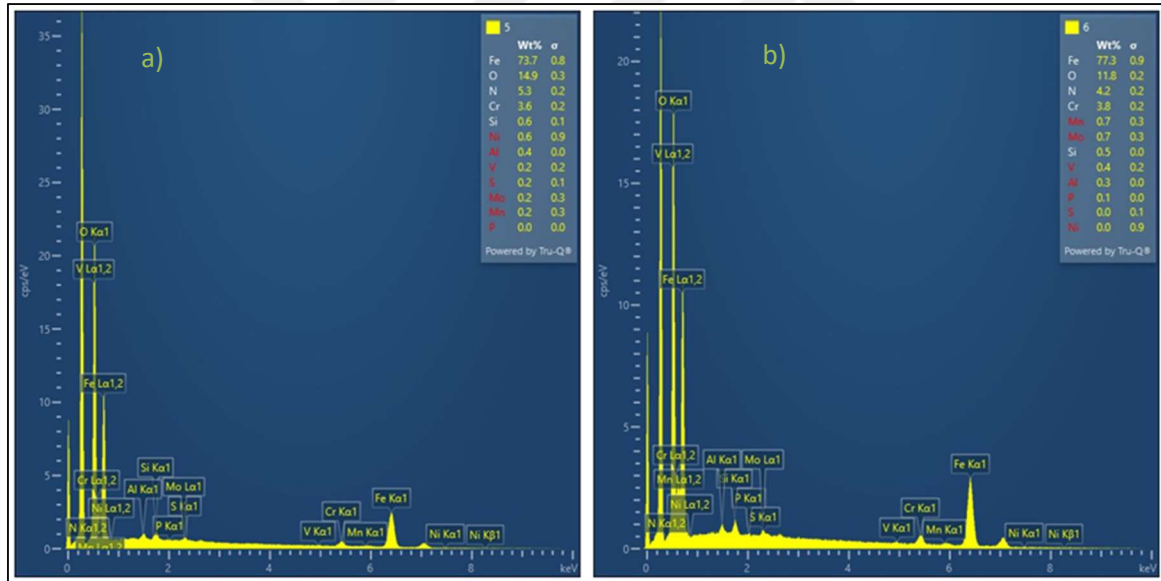
Bilyalı karıştırma işlemi sonunda Şekil 4.7a'ya göre oksit oranı %14,9 olmuştur. Bu tozların 37 µm altı elendikten sonra oksit oranı %11,8'e düştüğü ölçülmüştür. Bu durumda 37 µm altı tozlarda oksijen oranının daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 4.5. EDS sonuçları a) Fırında 800 °C'de 60 dk işlem, b) Aseton ile ultrasonik temizleme



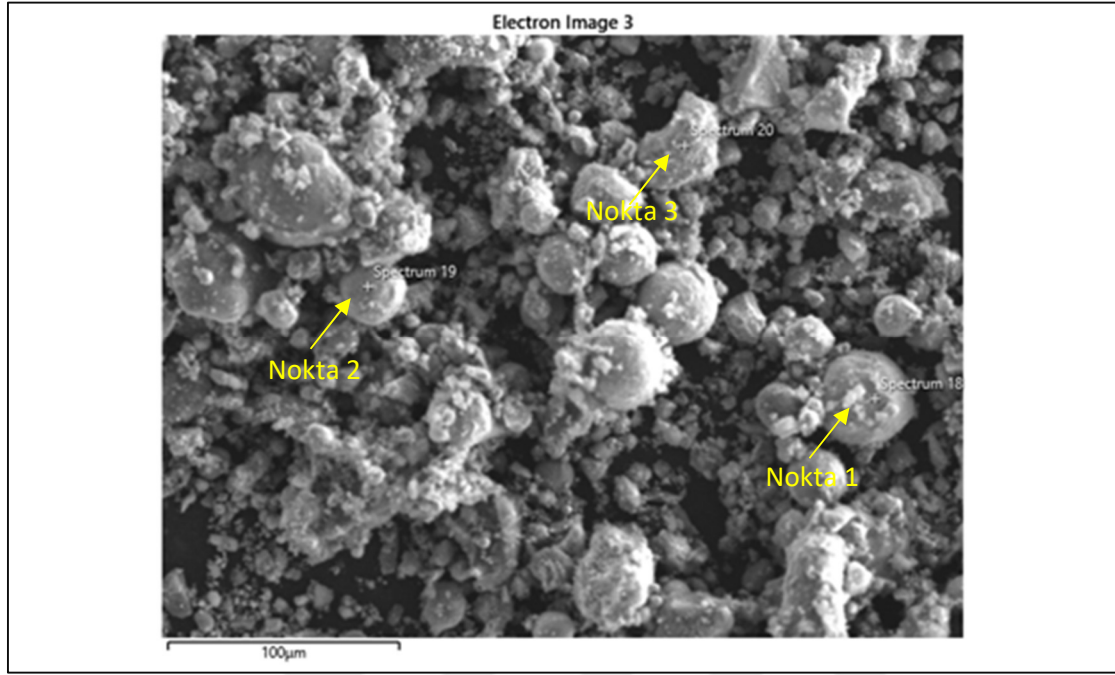
Şekil 4.6. EDS sonuçları; a) Nitrik asit (HNO₃) + hidroflorik asit (HF) karışımına daldırma, b) Asitleme + Fırında 800° C’de 60 dk işlem



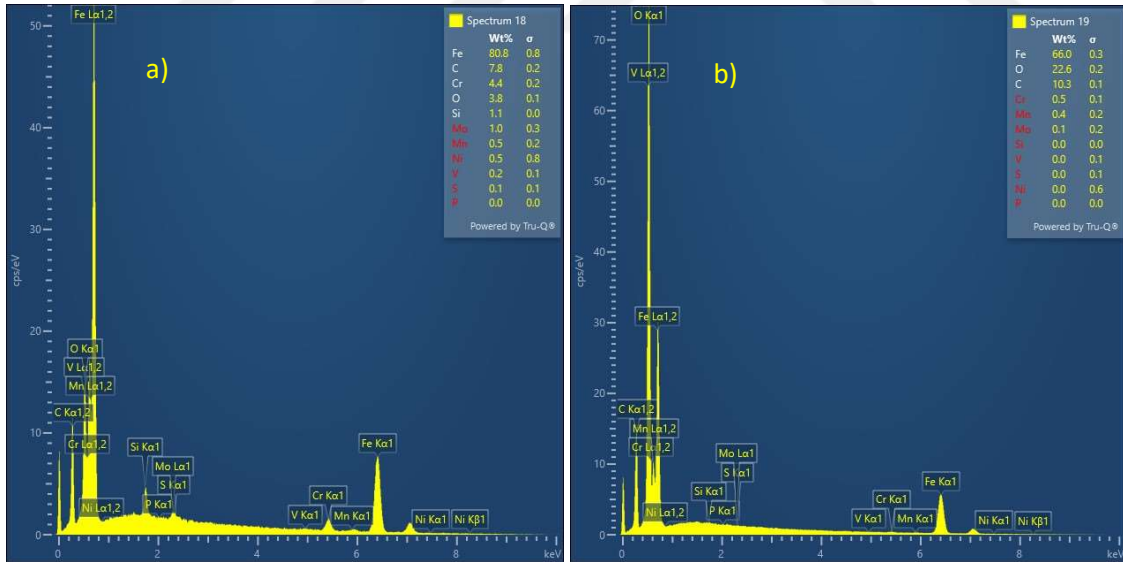
Şekil 4.7. EDS sonuçları a) Bilyalı karıştırma 2 saat, b) Bilyalı karıştırma 2 saat (seramik bilya) 37 µm altı elenmiş tozlar

Toz metalurjisi yönteminde kullanmak için Şekil 4.5b ‘de yer alan aseton ile ultrasonik temizleme yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemde elde edilen toza ait karbon oranlarını da veren noktasal EDS analizi yapılmıştır. Bu analize ait EDS resmi ve seçilen noktalar Resim 4.11’de verilmiştir. Bu noktalara ait EDS test sonuçları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da yer almaktadır. Bu analizlere göre karbon oranları ağırlıkça %7,8 ile %12,9 aralığında çıkmıştır. EDM atıklarından elde edilen çelik tozunun kimyasal bileşimindeki karbon, grafit elektrot ve

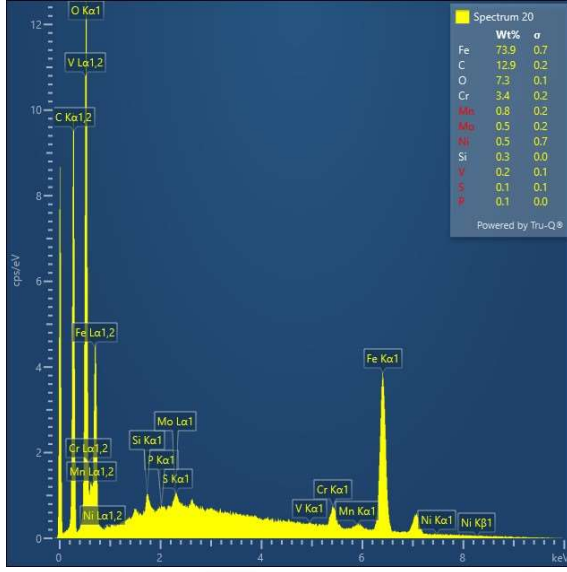
dielektrik sıvı içerisindeki karbondan gelmektedir.



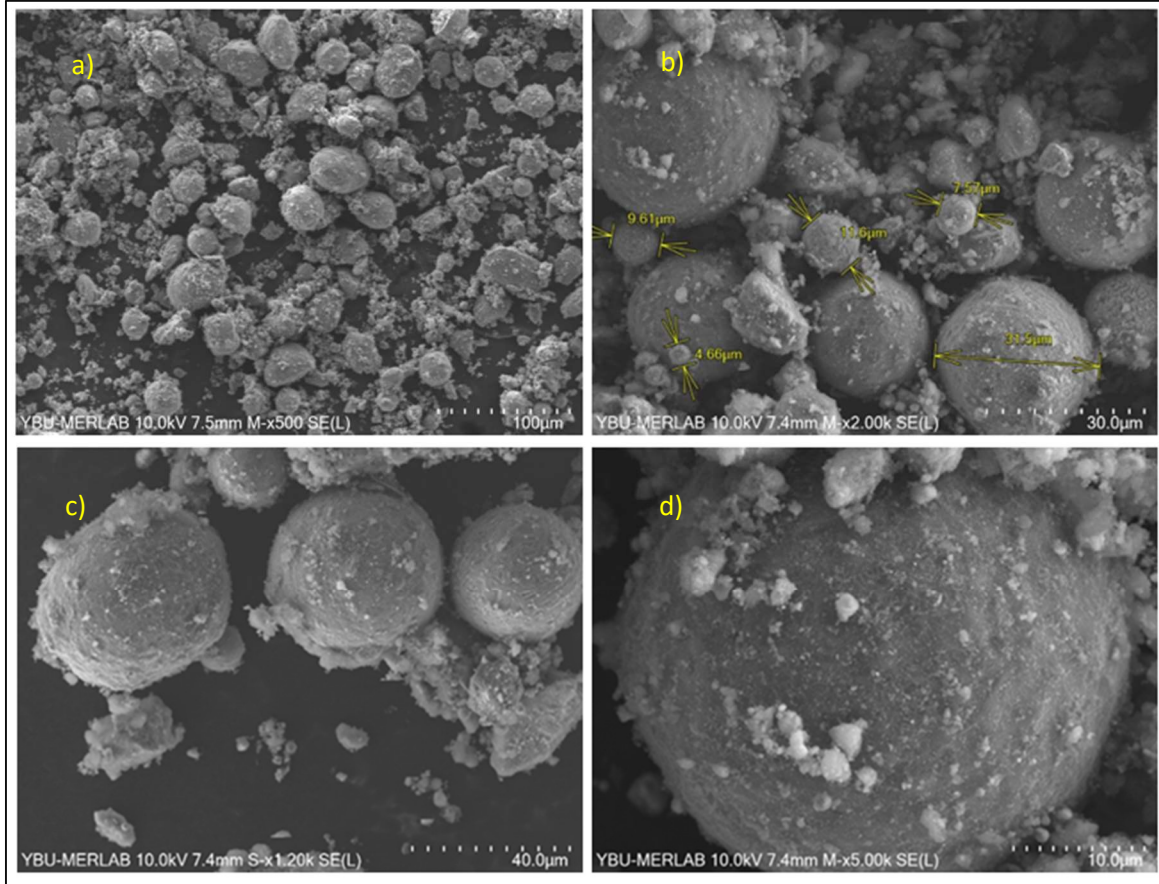
Resim 4.11. Aseton ile ultrasonik temizleme işleminin noktasal EDS analiz görüntüsü



Şekil 4.8. Aseton ile ultrasonik temizleme tozuna ait noktasal EDS analizi a) Nokta 1, b) Nokta 2



Şekil 4.9. Aseton ile ultrasonik temizleme tozuna ait noktasal EDS analizi, Nokta 3



Resim 4.12. Ultrasonik temizleme işlemi yapılmış tozların farklı yakınlaştırma oranlarındaki SEM görüntüsü a) x500, b) x2000, c) x1200, d) x5000

4.4.2. Temizlik işlemi sonucunda tercih edilen yöntem

Fırında 800°C’de gerçekleştirilen işlemde (Bkz. Şekil 4.5a) oksit indirgeme işlemi başarılı olmakla birlikte, soğuk preslemede istenilen yoğunluk elde edilememiştir. Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerde düşük mekanik özellikler gözlenmiş ve kolayca dağılan bir yapı ortaya çıkmıştır. Diğer yöntemlerde ise oksit miktarında anlamlı bir azalma sağlanamamıştır. Tozların yüzeyine ve kimyasal yapısına en az zarar veren yöntem olan aseton ile ultrasonik temizleme yöntemi tercih edilmiştir. Sonuç olarak, yapılan oksit giderme denemelerinin EDS analizlerine göre, çalışmalarda kullanılacak tozlar için aseton ile ultrasonik temizleme yöntemi uygun bulunmuş ve Şekil 4.5b’de sunulan bu yöntem deneylerde kullanılmıştır (Bkz. Şekil 4.5).

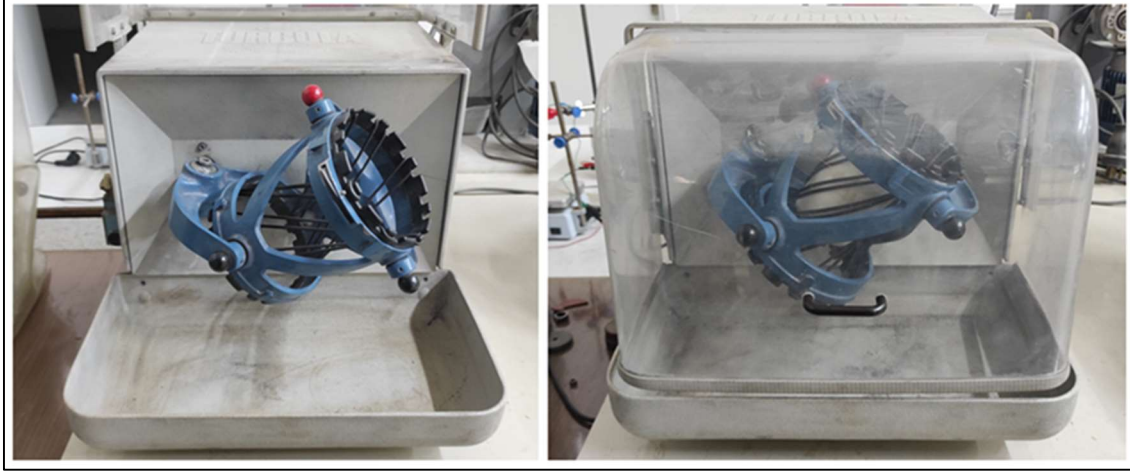
4.5. Toz Metalurjisi ile Parça Üretim Süreci

4.5.1. Karışım hazırlama

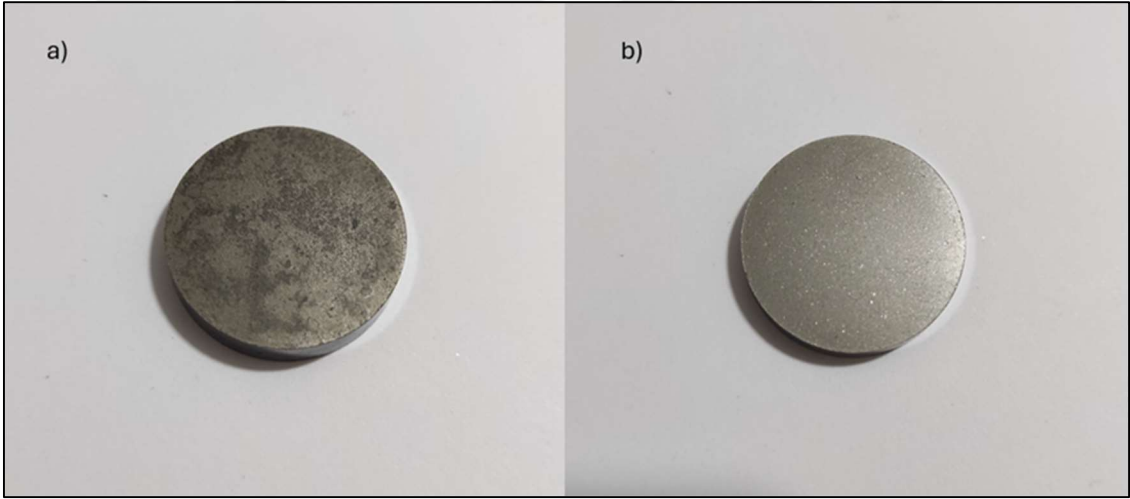
Toz karışımları hazırlanırken Turbula üç boyutlu karıştırıcı (Resim 4.13) kullanılmıştır. Karıştırma işlemi yapılırken seramik bilyalar kullanılmıştır. Bilya oranı hacimce tozun iki katı kadar olacak seviyede yapılmıştır. Örneğin, kabın dörtte biri toz ile doluyorsa bilyalarda karıştırma yapılacak kabın yarısına kadar doldurulmuştur [1]. Karıştırma işlemi önce 15 dakika olarak belirlenmiştir. Fakat sinterleme sonrası üründe homojen bir yapı ortaya çıkmamıştır. Bu nedenle karıştırma işlemi 30 dakika olarak denenmiştir ve başarılı sonuç elde edilmiştir. (Resim 4.14) Karıştırma işlemi yapılan denemelerde en az 30 dk olarak uygulanmıştır. Yağlayıcı ve bağlayıcı olarak stearik asit ve grafit tozu kullanılmıştır.

Stearik asit ve grafit tozu ekleme nedenleri

Karışım hazırlanırken bağlayıcı olarak stearik asit kullanılmıştır. Stearik asit, aynı zamanda yağlayıcı özellik gösterir [1]. Fakat, stearik asidin özkütlesi (0,94 g/cm³) düşük olduğu için yüksek oranda kullanımı son ürünlerdeki poroziteyi yükseltmektedir. Toz metalurjisi ile parça üretiminde geri dönüşüm tozun kullanıldığında porozite artmaktadır. Bu nedenle, polimer bir yağlayıcı yerine grafit tozu kullanılmıştır. Grafit tozu yağlayıcı özellik gösterir ve presleme sonrası parçanın kalıptan rahatça çıkmasını sağlar. Bu özelliği sayesinde kalıp aşınması da azalır. Ayrıca, grafit tozu karbon kaynağı olarak da kullanılır [1,3].



Resim 4.13. Turbula üç boyutlu karıştırıcı



Resim 4.14. a) 15 dk karıştırma yapılmış Distaloy AE örneği, b) 30 dk karıştırma yapılmış Distaloy AE örneği

Aşağıda verilen karışım oranları ağırlıkça yüzde olarak hazırlanmıştır. Geri dönüşüm toz olarak ultrasonik temizleme yapılmış tozlar tercih edilmiştir.

Karışım oranı 1

Yapılan karışımlarda bu oran kullanılmıştır. Metal toz kompozisyonu istenen orana göre değiştirilmiştir ve stearik asit ile grafit tozu oranı aynı kalmıştır.

- %0,4 Stearik asit (SA)
- %0,4 Grafit tozu
- %99,2 Metal toz (geri dönüşüm toz ve Distaloy AE karışımı)

Karışım oranı 2

%35 geri dönüşüm toz-%65 Distaloy AE ve %40 geri dönüşüm toz-%60 Distaloy AE karışımları presleme sonrası yeterli ham mukavemeti sağlamadığı için stearik asit oranı %0,4'ten %0,6'ya yükseltilmiştir.

- %0,6 Stearik asit (SA)
- %0,4 Grafit tozu
- %99 Metal toz (geri dönüşüm toz ve Distaloy AE karışımı)

4.5.2. Presleme işlemi

Presleme işlemi, Hürsan Hidrolik Pres ve Takım Tezgâhları San. Tic. A.Ş. firmasına ait 200 ton basma kapasiteli atölye tipi preste yapılmıştır. Presleme basıncı ilk önce 80 bar (50 ton) daha sonra 100 bar (60 ton) olarak uygulanmıştır. Presleme yapılırken kalıba zarar vermemek ve çıkan ürünün özelliklerinin iyi olması için presleme işlemi yavaş ve kontrollü bir şekilde yapılmıştır. Sıkıştırma işlemi yapılırken parça en az 40 saniye kadar bekletilmiştir. Presleme sonrası parçanın kalıptan çıkartılması işlemi de yavaş bir şekilde yapılmıştır. Toz karışımında kullanılan bağlayıcı ve yağlayıcı sayesinde parça kalıptan rahat bir şekilde çıkartılmıştır.



Resim 4.15. Tozların sıkıştırılmasında kullanılan kalıp

- Uygulanan basınç: 700 ve 840 MPa
- Numune çapı: 25,4 mm=1 inç
- Numune yüksekliği: 4-4,5 mm
- Numune ağırlığı: 15±0.5 g
- Takım çeliği (1.2343) yoğunluk: 7,81 g/cm³
- Distaloy AE yoğunluk: 7,76 g/cm³
- Grafit tozu yoğunluk: 2,26 g/cm³ (25 ° C'de)

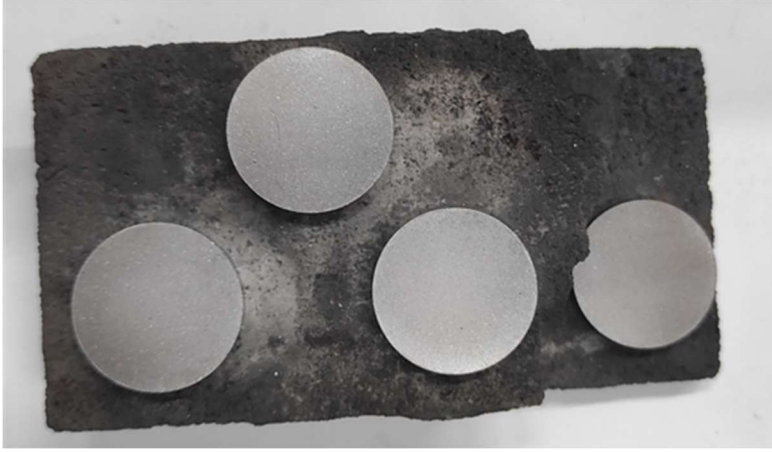
4.5.3. Sinterleme

Sinterleme işlemi, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan MTI Corporation OTF- 1200X (Resim 4.16) sinterleme fırınında yapılmıştır.

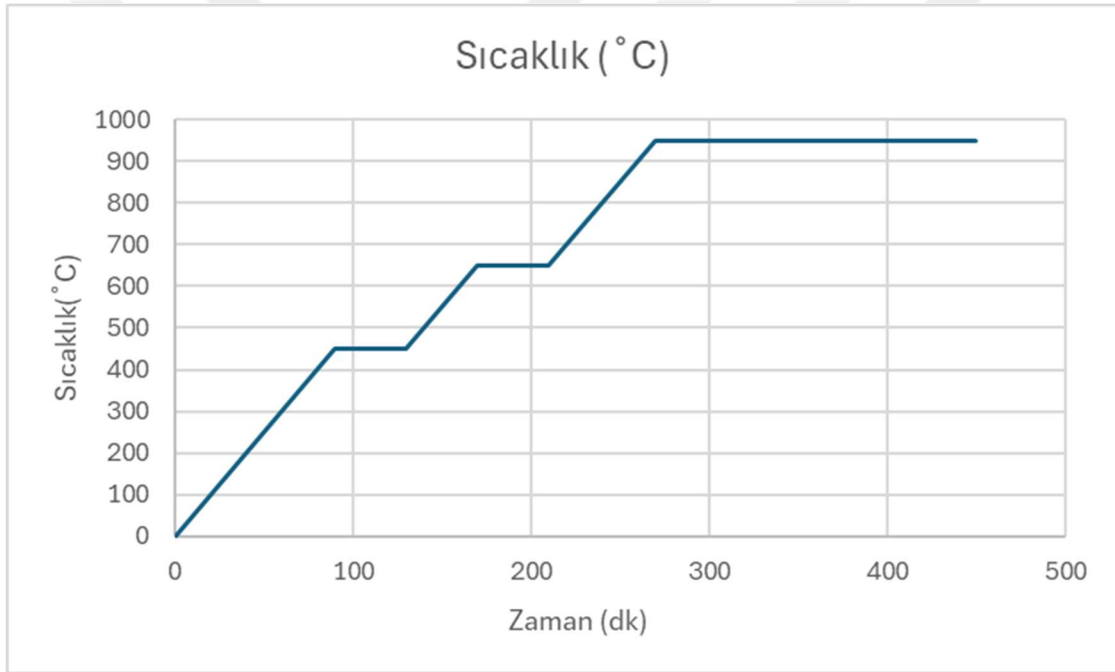
Sinterleme işlemi argon atmosferinde yapılmıştır. Habaş firmasının yüksek saflıkta (%99,999) argon gazı kullanılmıştır. Demir tozu ve çelik tozu gibi malzemelerin sinterlenmesinde son ürünün özelliklerinin iyi olması için sinterleme hızı tüm süreç boyunca 5°C/dk seçilmiştir [46]. Polimer uzaklaştırmak için 450°C'de 40 dakika süreyle sabit sıcaklıkta beklenmiştir. Yüksek sıcaklığa çıkmadan önce 650°C'de 40 dakika sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Sonrasında ise sinterleme işlemi için 950°C'de 3 saat beklenmiştir. Daha sonra ise soğumaya bırakılmıştır.



Resim 4.16. Sinterleme Fırını MTI OTF-1200X



Resim 4.17. Sinterleme fırınına yerleştirmek için hazırlanan parçalar



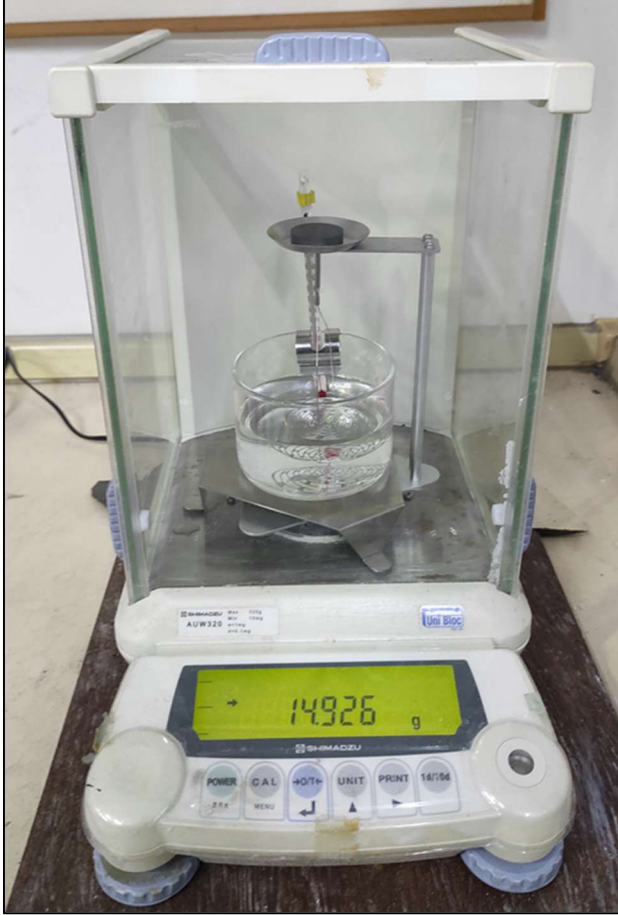
Şekil 4.10. Sinterleme işleminin sıcaklık-zaman programı

4.6. Üretilen Parçalara Yapılan Testler

4.6.1. Gözeneklilik testi

Yapılan çalışmada üretilen numunelerin, mekanik özelliklerini etkileyen bir faktör olan gözenekliliğinin olabildiğince düşük olması istenmektedir. Her bir kompozisyonun gözeneklilik testi yapılmıştır. Geri dönüşüm tozdaki yüksek oksidasyon ve diğer kirlilikler nedeniyle gözeneklilik artmaktadır. Bu nedenle, yoğunluk ve gözeneklilik yüzdesi gibi özelliklerin ölçümü yapılmıştır. Gözeneklilik testi sinterleme işleminden sonra yapılmıştır.

Bunun nedeni yüksek geri dönüşüm oranı bulunan numunelerin ham yoğunluğunun düşük olması ve kolayca dağılmasıdır. Üretilen numunelere zarar vermemek için yoğunluk testi sinterleme sonrası yapılmıştır. Arşimet düzeneği Resim 4.18’de gösterilmiştir.



Resim 4.18. Arşimet Düzeneği

Numunelerin teorik yoğunluğu, karışımı oluşturan her bir malzemenin yüzdesi ile yoğunluğunun çarpımının toplamı ile bulunmuştur. Bunun için Eş. 4.1 kullanılmıştır [47]. Eş. 4.1’de; $\rho(\text{teorik})$ karışımın teorik yoğunluğunu, $(\%W)_n$ karışım içerisindeki bir malzemenin ağırlıkça yüzdesini ve ρ_n , karışımı oluşturan her bir bileşenin yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\rho_{\text{teorik}} = [(\%W)_1 * \rho_1] + [(\%W)_2 * \rho_2] + \dots \dots \dots + [(\%W)_n * \rho_n] \quad (4.1)$$

Arşimet yönteminde, yoğunluğu bilinen bir sıvıya (saf su) katı haldeki numunenin sıvı içine batırılarak numunenin yoğunluğu ölçülmektedir. Yoğunluğu ölçülmek istenen numunenin önce havada kütlesi ölçülür daha sonra ise su içerisine batırılır ve Resim 4.18’teki Arşimet

terazisiyle numunenin kütlesi ölçülmüştür. Numunelerin deneysel hacmi Eş. 4.2 ve deneysel yoğunluğu ise Eş 4.3 ile hesaplanmıştır [47].

$$V_{cisim} = (m_a - m_b) / \rho_{su} \quad (4.2)$$

$$d_{cisim} = m_a / V_{cisim} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki formüllerde; V_{cisim} parçanın hacmini (cm³), m_a havada tartılan parçanın kütlesini (g), m_b suda tartılan parçanın kütlesini (g), ρ_{su} suyun yoğunluğunu ve d_{cisim} , parçanın yoğunluğunu (g/cm³) göstermektedir. Numunelerin gözeneklilik oranını hesaplamak için Eş. 4.4 kullanılmıştır [47].

$$\% \text{ gözeneklilik} = ((\rho_{teorik} - \rho_{deneysel}) / \rho_{teorik}) * 100 \quad (4.4)$$

4.6.2. Mikro Vickers sertlik testi

Numunelerin sertlik ölçümü Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Mikro Vickers sertlik testinde, kare tabanlı elmas piramidin numunenin yüzeyine batmasıyla ortaya çıkan iz ile sertlik ölçümü yapılmaktadır. Yapılan çalışmada, Mikro Vickers sertlik testleri ASTM E92-17 standardına göre yapılmıştır. Bu standarda göre sağlıklı bir ölçüm yapmak için metalin yüzeyinin iyice zımparalanmış ve sonrasında parlatılmış olması gerekmektedir. Ölçüm yapılan yüzeyde çizik olmayacak şekilde zımparalama yapılmalıdır. Üretilen numunelere Struers tarafından üretilen zımparalama makinesiyle önce zımparalama işlemi ardından da parlatma işlemi uygulanmıştır. Zımparalama işlemi, sırasıyla 220-400-600-1000-1200 mesh'lik zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Bir zımparalama aşamasına geçmeden önce, önceki aşmaktan kalan çiziklerin tamamen giderildiğinden emin olunmalıdır.

Zımparalama işlemi tamamlandıktan sonrası parlatma çuhası üzerinde elmas pasta ile parlatma işlemi yapılmıştır. Önce 3 mikronluk elmas pasta ardından da 1 mikronluk elmas pasta kullanılmıştır. Parlatma işlemi sonunda metalik numunenin yüzeyi ayna gibi parlamalıdır. Zımparalama ve parlatma cihazı Resim 4.19'da gösterilmiştir.



Resim 4.19. Struers zımparalama ve parlatma makinesi; zımpara işlemi (soldaki), parlatma işlemi (sağdaki)

Sertlik ölçümü TTS Unlimited, Inc firmasının HIGHWOOD HWMMT-X3 cihazıyla yapılmıştır. Sertlik testinde uygulanan yük 200 gf olarak belirlenmiş ve yük 10 saniye boyunca uygulanmıştır. Bir numune için beş farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Sertlik değeri, beş tane ölçüm değerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Resim 4.20. Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı

4.6.3. Mikroyapı incelemesi

Mikroyapı incelemesi için numunelerin önce yüzeyi zımparalanır ve parlatılır. Bu işlemlerin ardından numuneler nital çözeltisi ile dağlanır. Nital Çözeltisi, %5 Nitrik asit (%65'lik) ve %95 metil alkolden oluşmaktadır. Dağlama süresi 10-15 saniye kadar olmalıdır. Dağlama işlemi çelik içindeki fazları ve mikroyapıyı belirginleştirir. Daha sonra numuneler saf su ile yıkanır ve etil alkol ile temizlenir. Daha sonra numuneler kurutulur. Hazırlanan numune optik mikroskop veya SEM ile analiz edilir. Mikroyapı analizi; fazlar, çeliğin iç yapısı, tanecikler ve homojenlik hakkında bilgiler verir.





5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Sinterleme sonrasında toz metalurjisi ile üretilen parçaların yoğunluk, sertlik testleri yapılmıştır. Ardından da mikroyapısı incelenmiştir. Resim 5.1’de sinterleme sonrası kumpasla birlikte bir parçaya ait resim verilmiştir.



Resim 5.1. Distaloy AE %90, geri dönüşüm toz %10 karışımından oluşan parçanın sinterleme sonrası görüntüsü (D=25,4 mm, t=4,1 mm)

5.1. Gözeneklilik Test Sonuçları

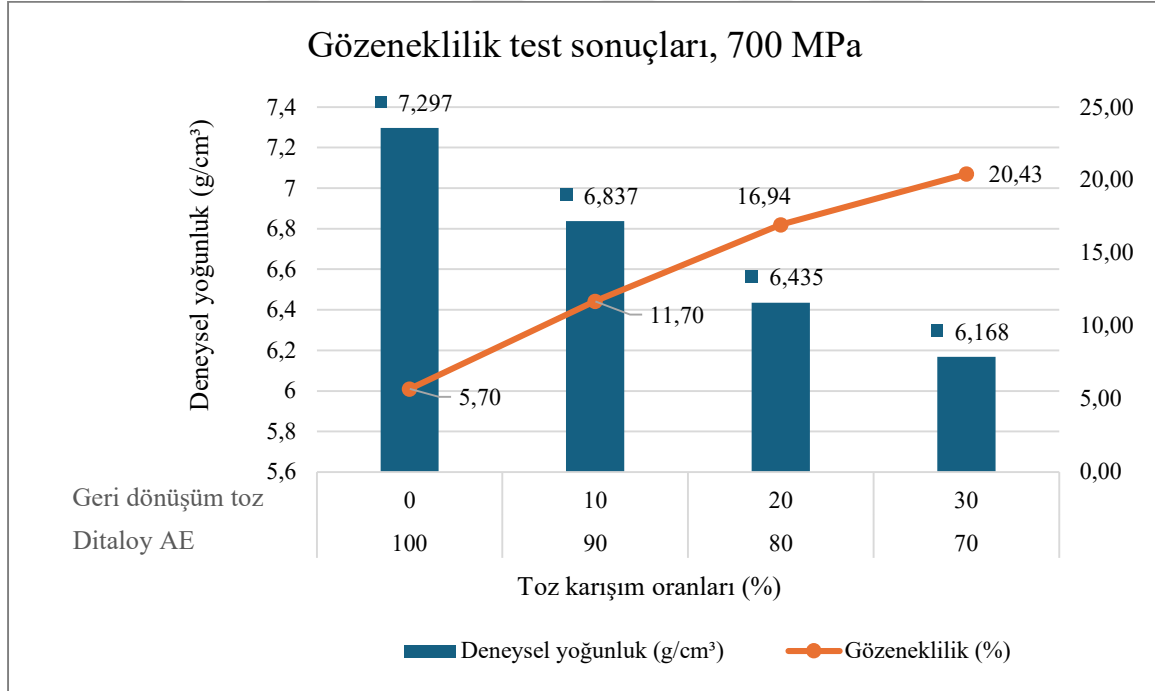
5.1.1. 700 MPa ile sıkıştırılan parçalar için gözeneklilik test sonuçları

Gözeneklilik testi Arşimet düzeneği ile yapılmıştır. 17 °C’de suyun yoğunluğu 0,9988 g/cm³’tür. Yapılan çalışmada, farklı oranlardaki geri dönüşüm tozu ve Distaloy AE karışımlarının yoğunluk ve gözeneklilik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretilen parçalarda, mekanik özelliklerin iyi olması için gözeneklilik değerinin düşük olması istenmektedir. Gözeneklilik test sonuçları Çizelge 5.1’de yer almaktadır. %100 oranında Distaloy AE içeren numunede deneysel yoğunluk 7,297 g/cm³ olarak ölçülmüş ve %5,70 oranında bir gözeneklilik tespit edilmiştir. Geri dönüşüm tozu oranının %10’a çıkarılmasıyla deneysel yoğunluk 6,837 g/cm³’e düşerken, gözeneklilik oranı %11,70’e yükselmiştir. Bu eğilim, geri dönüşüm tozu oranının artmasıyla birlikte devam etmiştir. %30 geri dönüşüm tozu içeren numunede deneysel yoğunluk 6,168 g/cm³’e kadar gerilemiş ve gözeneklilik %20,43’e ulaşmıştır.

Çizelge 5.1. Gözeneklilik test sonuçları (700 MPa)

Distaloy AE yüzdesi (%)	Geri dönüşüm toz yüzdesi (%)	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
100	0	7,738	7,297	5,70
90	10	7,743	6,837	11,70
80	20	7,748	6,435	16,94
70	30	7,752	6,168	20,43

Şekil 5.1’de verilen grafikten de görülebileceği üzere, geri dönüşüm tozu oranının artmasıyla birlikte deneysel yoğunlukta azalma, buna karşılık gözeneklilikte artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. Gözeneklilik test sonuçlarının grafiği (700 MPa)

5.1.2. 840 MPa ile sıkıştırılan parçalar için gözeneklilik test sonuçları

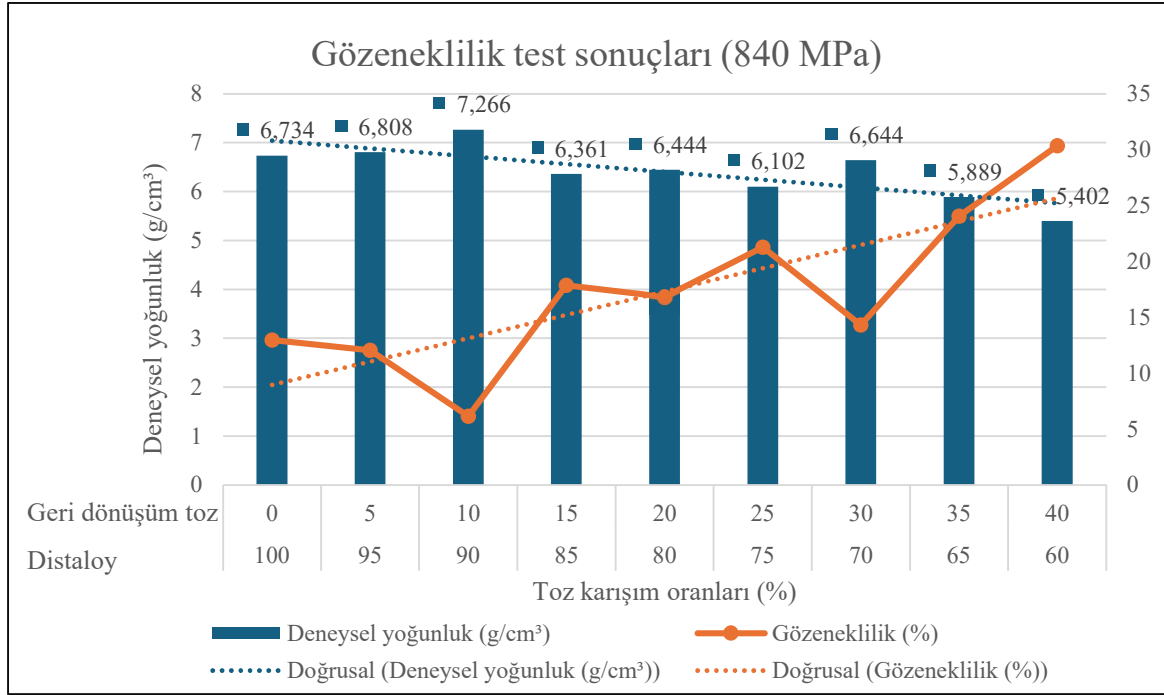
840 MPa basınç ile sıkıştırılan parçaların sinterleme sonrası gözeneklilik değerleri ölçülmüştür. Distaloy AE %60 – geri dönüşüm toz %40 karışımı %30,36 gözeneklilik oranına ve en düşük deneysel yoğunluk değerine sahiptir. Bu parçanın sertlik değeri ölçülemedi. Geri dönüşüm toz oranı için %35 olan parçada gözeneklilik değeri %24,06 değeri ile üst sınır olarak kabul edilebilir. Üretilen parçalarda en yüksek yoğunluk değeri

olan 7,266 g/cm³ ve en düşük gözeneklilik değeri %6,16'ya Distaloy AE %90 – geri dönüşüm toz %10 karışımında ulaşılmıştır. Üretilen parçaların gözeneklilik değeri %5-%20 aralığında olanları görsel olarak ve mekanik özellikler bakımından gereksinimleri karşılamaktadır.

Çizelge 5.2. Gözeneklilik test sonuçları (840 MPa)

Distaloy AE yüzdesi (%)	Geri dönüşüm toz yüzdesi (%)	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel yoğunluk (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
100	0	7,738	6,734	12,97
95	5	7,740	6,808	12,05
90	10	7,743	7,266	6,16
85	15	7,745	6,361	17,87
80	20	7,748	6,444	16,83
75	25	7,750	6,102	21,27
70	30	7,752	6,644	14,30
65	35	7,755	5,889	24,06
60	40	7,758	5,402	30,36

Farklı oranlarda geri dönüşüm tozu içeren karışımlardan oluşan numuneler üzerinde yapılan deneysel yoğunluk ve gözeneklilik ölçümleri, malzemenin sinterlenme davranışı açısından önemli sonuçlar ortaya koymuştur. %0 geri dönüşüm tozu içeren ve tamamen Distaloy AE'den oluşan numunede deneysel yoğunluk 6,734 g/cm³, gözeneklilik ise %12,97 olarak ölçülmüştür. Geri dönüşüm tozu oranı %5'e çıkarıldığında deneysel yoğunlukta çok az bir artış (6,808 g/cm³), buna paralel olarak gözeneklilikte azalma (%12,05) gözlenmiştir. %10 geri dönüşüm tozu oranına ulaşıldığında deneysel yoğunlukta belirgin bir artış (7,266 g/cm³) ve gözeneklilikte en düşük değer (%6,16) elde edilmiştir. Ancak bu oranın üzerindeki geri dönüşüm tozu oranlarında yoğunluk yeniden düşmeye başlamış, %15 ve %20 oranlarında sırasıyla 6,361 ve 6,444 g/cm³'e kadar gerilemiştir. Gözeneklilik bu oranlarda %17,87 ve %16,83 olarak artış göstermiştir. %25 katkı oranıyla birlikte deneysel yoğunluk 6,102 g/cm³'e, gözeneklilik ise %21,27'ye ulaşmıştır. Beklenmeyen şekilde, %30 oranında yeniden bir yoğunluk artışı (6,644 g/cm³) ve gözeneklilikte azalma (%14,30) gözlenmiştir. Bu durum, sıkıştırma işleminden kaynaklanabilir. %35 ve %40 katkı oranlarında ise yoğunluk ciddi şekilde düşerek 5,889 ve 5,402 g/cm³ seviyelerine gerilemiş, buna karşılık gözeneklilik sırasıyla %24,06 ve %30,36 gibi yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, yüksek orandaki geri dönüşüm tozunun yoğunluk üzerinde olumsuz etkileri olduğunu ve gözenekliliği artırdığını göstermektedir.



Şekil 5.2. Gözeneklilik test sonuçlarının grafiği (840 MPa)

5.2. Mikro Vickers Sertlik Test Sonuçları

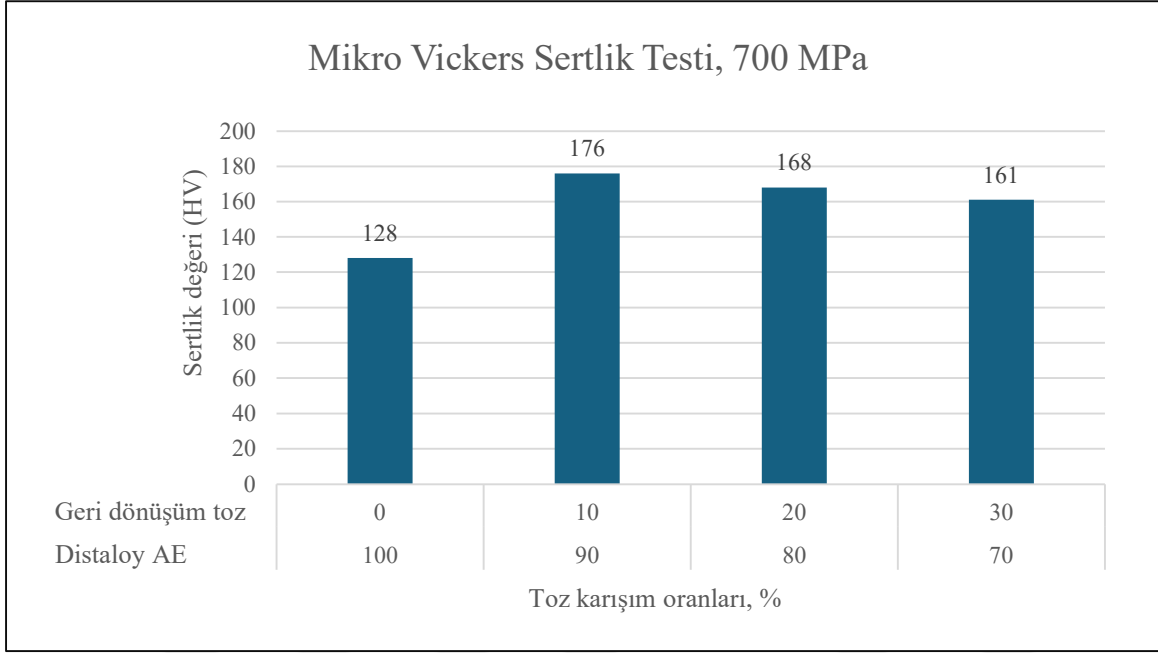
5.2.1. 700 MPa ile sıkıştırılan parçalar için sertlik test sonuçları

700 MPa ile sıkıştırılan parçalar için sertlik test sonuçları Çizelge 5.3'te yer almaktadır. %100 Distaloy AE içeren referans numune 128 HV sertlik değerine sahipken, %10 geri dönüşüm tozu ilavesiyle bu değer 176 HV'ye yükselmiştir. %20 geri dönüşüm tozu içeren numunede sertlik değeri 168 HV olarak ölçülmüş, bu oran %10'a kıyasla daha düşük bir değere sahip olsa da referans numuneye göre halen anlamlı bir artış sergilemektedir.

Çizelge 5.3. Sertlik test sonuç tablosu (700 MPa)

Distaloy AE yüzdesi (%)	Geri dönüşüm toz yüzdesi (%)	Mikro Vickers sertlik testi (HV)
100	0	128
90	10	176
80	20	168
70	30	161

%30 geri dönüşüm oranında ise sertlik 161 HV'ye düşmüştür. Bu aşamada, toz partikülleri arasındaki bağların zayıfladığı ya da artan gözenekliliğin sertlik üzerinde olumsuz etkiler yarattığı düşünülmektedir. %30'a kadar olan oranlarda sertlik, referans malzemeye kıyasla yüksek kalsa da geri dönüşüm toz arttıkça sertlik değeri düşüş eğilimi göstermektedir.



Şekil 5.3. Sertlik test sonuçlarının grafiği (700 MPa)

5.2.2. 840 MPa ile sıkıştırılan parçalar için sertlik test sonuçları

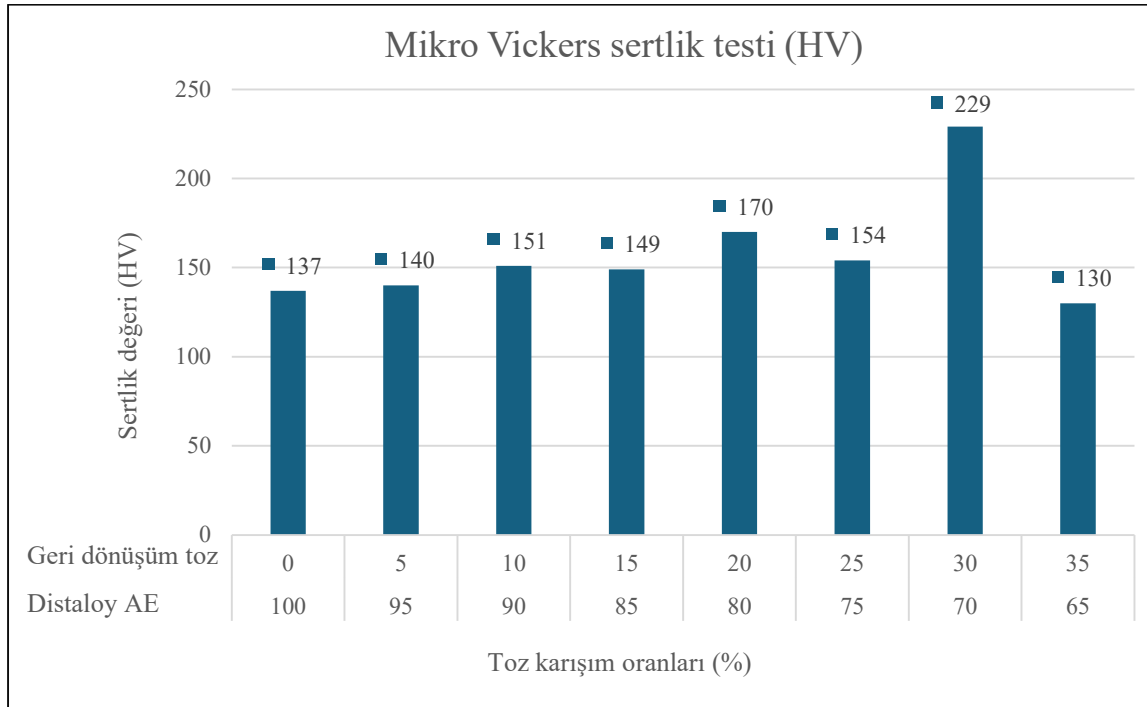
840MPa ile sıkıştırılan parçaların sertlik değeri 130-229 HV aralığında çıkmıştır. Mikro Vickers sertlik testi sonuçları, geri dönüşüm tozu oranının artmasının sertlik üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Elde edilen verilere göre, %0 geri dönüşüm tozu içeren saf Distaloy AE numunesi 137 HV sertlik değerine sahipken, %10'a kadar olan geri dönüşüm ilaveleriyle birlikte sertlikte kademeli bir artış gözlenmiştir. Özellikle %20 geri dönüşüm oranında sertlik 170 HV'ye ulaşarak dikkat çekici bir artış göstermiştir. Bu durum, belirli bir orana kadar geri dönüşüm tozunun sertlik değerini olumlu yönde etkilediğini düşündürmektedir.

Çizelge 5.4. Sertlik test sonuç tablosu (840 MPa)

Distaloy AE yüzdesi (%)	Geri dönüşüm toz yüzdesi (%)	Mikro Vickers sertlik testi (HV)
100	0	137
95	5	140
90	10	151
85	15	149
80	20	170
75	25	154
70	30	229
65	35	130
60	40	-

En yüksek sertlik değeri ise %30 geri dönüşüm oranında, 229 HV olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, gözenekliliğin azaldığı zaman sertliğin artabileceğini göstermektedir. Ancak, %35 oranında geri dönüşüm tozu kullanıldığında sertlikte ani bir düşüş gözlemlenmiş ve 130 HV seviyesine gerilemiştir. %40 oranındaki geri dönüşüm ile üretilen numunede ise sertlik testi uygulanamamıştır. Bu durum, yüksek oranlardaki geri dönüşüm tozunun sinterleme sırasında gözenekliliği artırarak mekanik özellikleri ve fiziksel bütünlüğü olumsuz etkilediğini göstermektedir.



Şekil 5.4. Sertlik test sonuçlarının grafiği (840 MPa)

Elde edilen bulgulara göre geri dönüşüm tozunun belirli oranlara kadar kullanıldığında mikrosertlik üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Ancak %30'dan sonraki artışlar yapısal kararlılığı bozmakta, bu durum geri dönüşüm oranının dikkatle belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Geri dönüşüm toz kullanmanın getirmiş olduğu riskleri ortadan kaldırmak için %5, %10 ve %15 gibi düşük geri dönüşüm toz oranlarını tercih etmek daha uygun olacaktır.

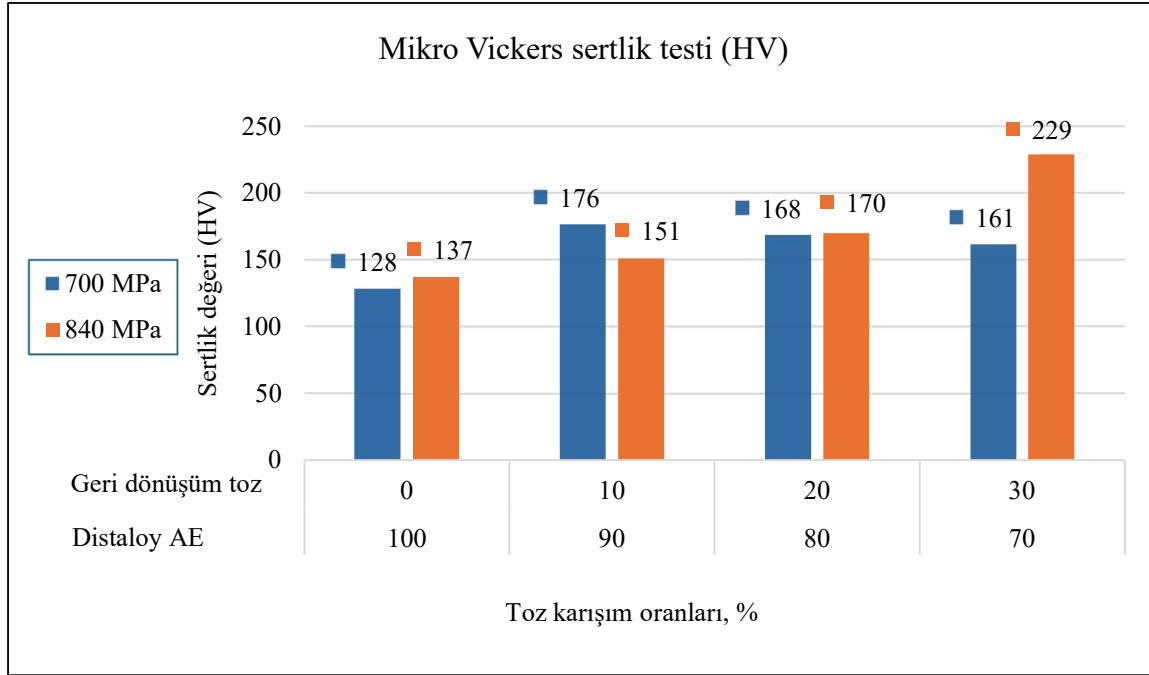
5.2.3. Farklı basınçlardaki sertlik değerlerinin karşılaştırılması

700 MPa ile sıkıştırılan parçalarda geri dönüşüm tozu oranı %10'a kadar arttığında sertlikte artış gözlenmektedir. Ancak %10'dan sonra geri dönüşüm tozu oranının artmasıyla sertlik değerinde azalma eğilimi göstermektedir. Bu, yüksek oranda geri dönüşüm tozunun parçacıklar arası bağlanmayı olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir.

840 MPa basınçta ise geri dönüşüm tozu miktarındaki artışa paralel olarak sürekli bir sertlik artışı söz konusudur. Özellikle %30 oranındaki tozla elde edilen 229 HV değeri, tüm numuneler içinde en yüksek değerdir. Bu durum, yüksek presleme basıncının, geri dönüşüm tozlarının sinterleme davranışını iyileştirdiğini ve daha yoğun, sert bir yapı oluşumuna katkı sağladığını göstermektedir. Bu durum, geri dönüşüm tozlarının etkinliğinin, uygulanan presleme basıncıyla doğrudan ilişkili olduğunu ve yüksek basınç altında daha belirgin mekanik iyileştirme sağladığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, geri dönüşüm tozlarının belirli oranlarda kullanımı malzeme sertliğini iyileştirme potansiyeline sahip olmakla birlikte, oran arttıkça yoğunluk ve bağlanma sorunları ön plana çıkmakta; bu da mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, optimum geri dönüşüm oranı %5-%20 aralığı olarak değerlendirilebilir.

Bu tez çalışmasında sıkıştırma için kullanılan kalıp başka bir projede kullanımı esnasında iç taraftan çatlamıştır. Bu nedenle, farklı denemeler yapmak mümkün olmamıştır.



Şekil 5.5. 700 MPa ve 840 MPa basınçta sıkıştırılan parçaların sertlik test sonuçlarının karşılaştırılması

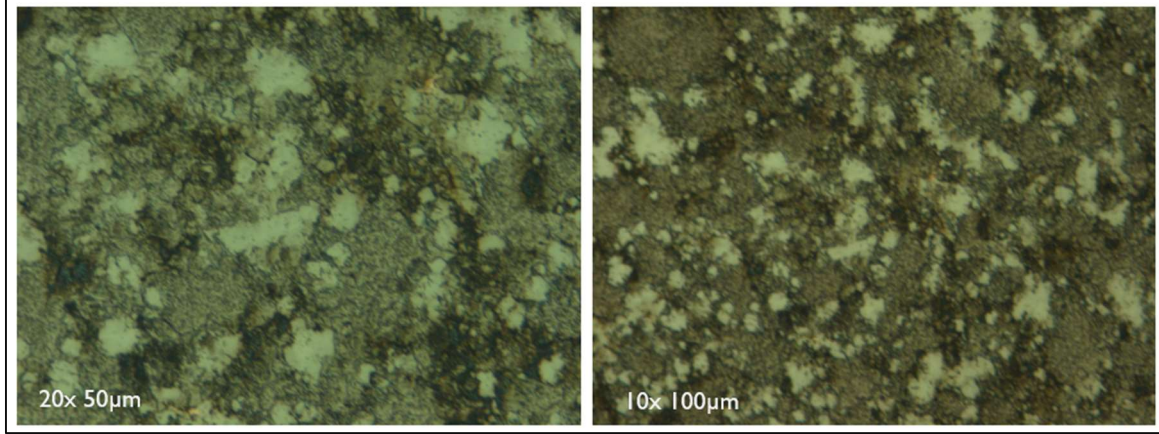
5.3. Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı incelemesi için görüntüler LEICA marka optik mikroskopla alınmıştır. Bu görüntülerle mikroyapı, taneler, fazlar, heterojenlik incelenebilir. İncelenen parçalar 700 MPa basınç ile sıkıştırılmıştır.

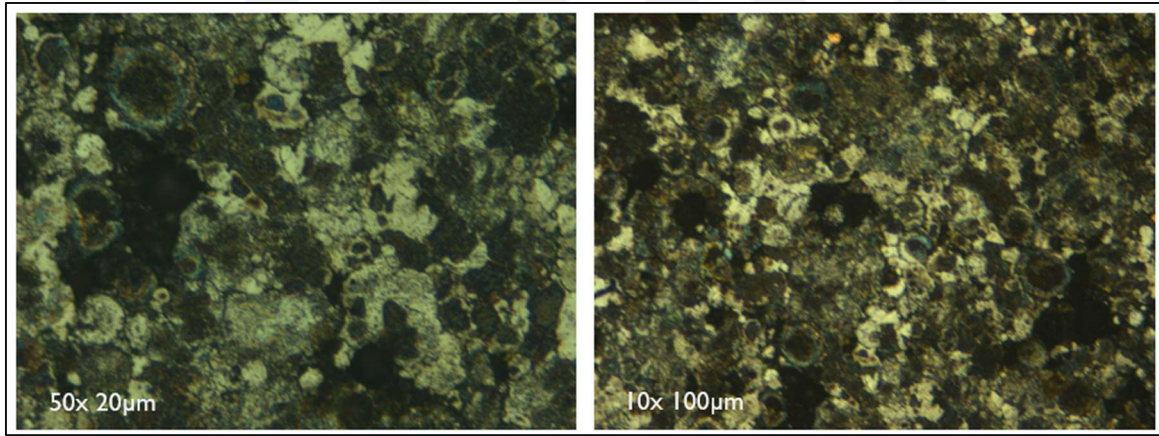
Resim 5.2’te %100 Distaloy AE içeren bir numunenin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Soldaki görüntü 20x büyütmede (ölçek: 50 μm), sağdaki ise 10x büyütmede (ölçek: 100 μm) elde edilmiştir. Özellikle 20x büyütmede daha net gözlemlendiği üzere, mikroyapı homojen bir dağılım göstermektedir. Sinterleme işlemi iyi ve parçacıklar arası bağlanma başarılı görünmektedir.

Resim 5.3’teki mikroskop görüntüleri, %70 Distaloy AE + %30 geri dönüşüm toz karışımına sahip sinterlenmiş bir parçanın mikroyapısına aittir ve iki farklı büyütmede (solda 50x, sağda 10x) sunulmuştur. Her iki büyütmede de yaygın şekilde düzensiz şekilli koyu boşluklar gözlemlenmektedir. Bu boşluklar yüksek gözenekliliği işaret etmektedir. Geri dönüşüm tozlarının bu gözenekliliği artırdığı düşünülmektedir. 10x büyütme görüntü ise gözeneklerin tüm yapı boyunca düzensiz ve yoğun şekilde dağıldığını ortaya koymaktadır.

Bu da mikroyapının homojenliğini olumsuz etkileyerek mekanik özelliklerde zayıflamalara neden olabilir. Sonuç olarak, geri dönüşüm tozunun mikroyapı bütünlüğünü bozduğu ve sinterleme kalitesini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Bu nedenle, daha düşük geri dönüşüm oranları önerilmektedir.



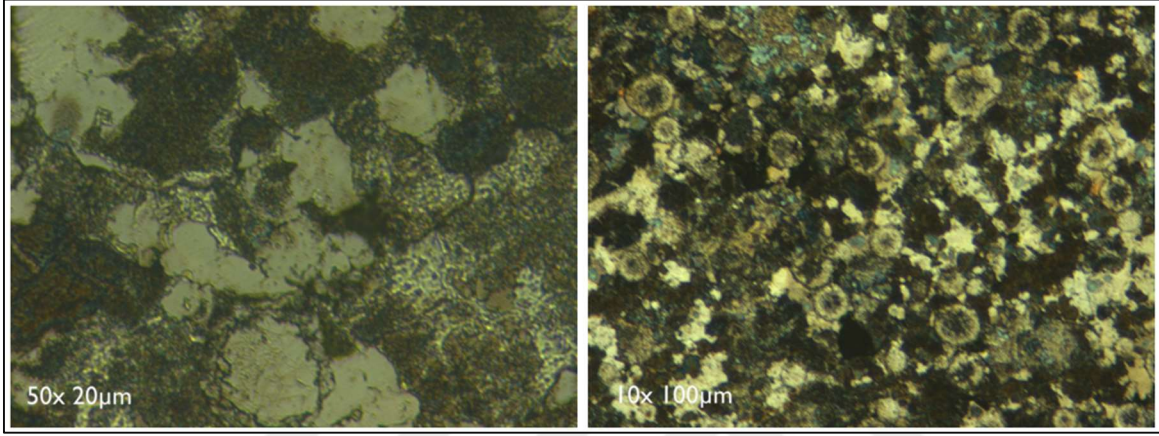
Resim 5.2. Distaloy AE (%100) parçasına ait mikroyapı görüntüleri



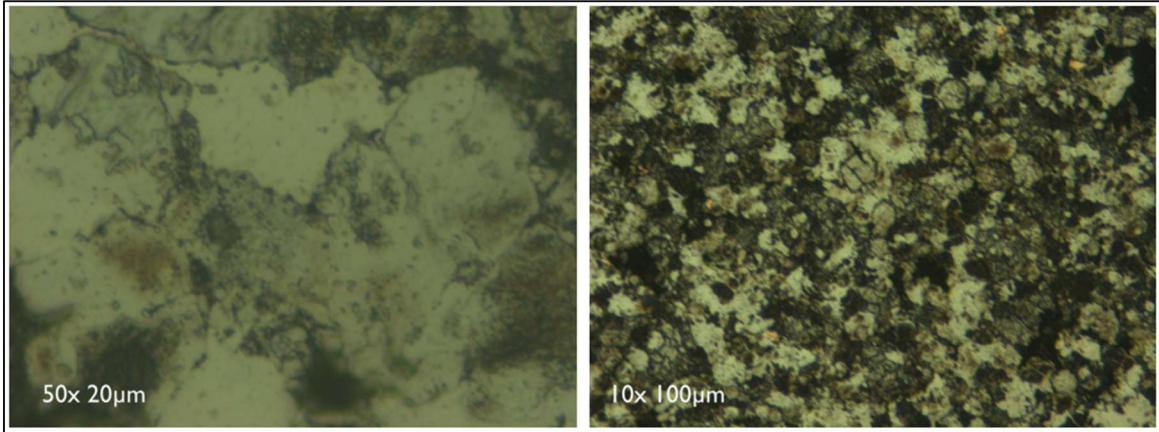
Resim 5.3. %70 Distaloy AE + %30 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri

%80 Distaloy AE ve %20 geri dönüştürülmüş toz karışımından oluşan numunenin, %100 Distaloy AE (Bkz. Resim 5.3) numunesine göre daha heterojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Resim 5.4'teki (10x) büyütmede daha geniş bir alanda dağılmış, genellikle dairesel veya yuvarlak, açık renkli partiküller dikkat çekerken, daha yüksek büyütmede (50x) ise bu partiküllerin ve onları çevreleyen daha koyu yapılar, yüzey pürüzlülükleri ve belirgin faz sınırları gözlemlenmektedir.

Resim 5.5'te yer alan %90 Distaloy AE + %10 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, tane sınırlarının belirgin olduğu ve yapının genel olarak Distaloy AE özelliklerini koruduğu görülmektedir. Açık renkli fazlar ile koyu renkli boşlukların yoğun şekilde dağılmış olduğu dikkat çekmektedir. Bu dağılım, geri dönüşüm tozlarının mikroyapıdaki homojenliği olumsuz etkilediğini ve yer yer kümelenmeler oluştuğunu düşündürmektedir.



Resim 5.4. %80 Distaloy AE + %20 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri



Resim 5.5. %90 Distaloy AE + %10 geri dönüşüm toz karışımına ait parçanın mikroyapı görüntüleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Literatürde, 1.2343 sıcak iş takım çeliği için EDM atıklarından geri kazanılan tozların toz metalurjisinde uygulaması ile ilgili bir çalışma mevcut değildir. Geri dönüşüm çelik tozu ile başka bir toz ile karıştırmadan yapılan denemelerde sinterleme sonunda başarısız olmuştur. Bu nedenle, EDM atık çamurundan elde edilmiş çelik tozlarının Distaloy AE tozları ile karıştırılarak toz metalürjisi yönteminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geri dönüşüm çelik tozunu işlenmemiş Distaloy AE gibi baz bir tozla karıştırmak maliyet düşürmek amacıyla kullanılabilir bir yöntemdir.

EDM'de işlem sonunda oluşan atık çamuru kurtulması gereken, istenmeyen değersiz bir atık olarak görülmektedir. Fakat, bu atık çamurunun içerisinde iş parçasından gelen metalik parçalar (çelik) bulunmaktadır. Çelik gibi değerli malzemelerin ekonomik yöntemlerle geri dönüşümü maliyet ve enerji sarfiyatı gibi nedenlerle hem ekonomik hem de çevresel anlamda büyük bir potansiyele sahiptir.

Konuyla ilgili literatürde bulunan geri dönüşüm çalışmaları incelendiğinde elde edilen tozların çoğu durumda yüksek kirliliğe sahip olduğu görülmüştür. EDM atıklarından elde edilen geri dönüşüm çelik tozunda karbon ve oksijen oranlarının yüksek olduğu ve kirlilik oluşturduğu görülmüştür. Bunları temizlemek çok fazla zaman almakta ve yüksek maliyete neden olmaktadır. Bu çalışmada, Oksijen oranı %28,9'dan ultrasonik temizleme işlemiyle %15,3'e düşürülmüştür. Karbon oranı ise yaklaşık %10 olarak ölçülmüştür. Çelik tozu içerisindeki karbon, grafit elektrot ve dielektrik içerisindeki karbondan gelmektedir.

Bahatta ve diğerleri [25], diğerleri yaptıkları talaşlardan elde edilen 1.2343 tozu ile yaptıkları çalışmada 144-194 HV aralığında sertlik elde etmiştir. Geri dönüşüm toz ile yapılan toz metalurjisi çalışmalarında sertlik değerleri işlenmemiş toz hammaddeye göre göre daha düşük olmaktadır.

Katıyar ve diğerleri [28], elektrik deşarjlı işleme (EDM) atık çamurundan Ni-20Cr-10Fe-3Ti alaşımının tozunun elde ederek Seçici Lazer Ergitme (SLM) teknolojisinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Üretilen parçalar, düşük mukavemet ve platformdan ayrılma sorunları göstermiştir. Parçaların kırılgan olduğu ve kolayca parçalandığı ifade edilmiştir.

Oksit giderme çalışmalarının sonuçları aşağıda listelenmiştir.

- Fırında 800°C'de gerçekleştirilen (Bkz. Şekil 4.5a) oksit indirgeme işlemi başarılı olmakla birlikte, bu tozlar sıkıştırılamamıştır. İşlem sonunda tozların sıkıştırılabilirliği azalmıştır. Bu nedenle, toz metalurjisi yönteminde kullanılmamıştır.
- Diğer temizleme yöntemlerinde ise oksit miktarında anlamlı bir azalma sağlanamamıştır. Tozların yüzeyine ve kimyasal yapısına en az zarar veren yöntem olan aseton ile ultrasonik temizleme yöntemi tercih edilmiştir. Toz metalurjisi yönteminde bu tozlar kullanılmıştır.
- Oksijen oranı %28,9'dan iki kez yapılan ultrasonik temizleme işlemi sonunda %15,3'e düşürülmüştür.

Deneysel verilere dayanarak, sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Deneysel çalışmada, 700 MPa ve 840 MPa olmak üzere iki farklı basınçta toz sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Sertlik testi ölçümlerinde üretilen parçaların sertlik değeri 130-229 HV aralığında çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde çalışmalarla benzer aralıktadır.
- Gözeneklilik değeri için ise %25'in üst limit olduğu söylenebilir. Üretilen parçaların gözeneklilik değeri %5-%20 aralığında olanları görsel olarak ve mekanik özellikler bakımından gereksinimleri karşılamaktadır. Bu aralıkta tercih yapmak daha güvenilir sonuçlar verecektir.
- Yapılan analizler ile literatürdeki çalışmalar karşılaştırıldığında kullanılan geri dönüşüm malzemenin kimyasal bileşimi 1.2343 çeliği ile benzerdir. EDS analizleri bunu doğrulamaktadır.
- Yalnızca geri dönüşüm tozun kullanıldığı toz metalurjisi uygulamasında üretilen numunelerin presleme işleminden sonra kolayca dağılan ve oldukça hassas bir yapıda olduğu görülmüştür. Sinterleme sonucunda ise üretilen parçalarda düşük mekanik özellikler ve kolayca parçalanmış bir yapı ortaya çıktığı görülmüştür.
- Yağlayıcı ve bağlayıcı seçimi yapılırken parçalarda en az gözeneklilik oluşturacak ve parçaların kalıptan rahatça çıkabileceği stearik asit ve grafit tozu karışımı tercih edilmiştir.

Bu sonuçlara dayanarak, gelecekte yapılacak araştırmalarda aşağıda listelenen konulara odaklanılması önerilmektedir.

- Yüksek oksit oranını düşürmek için çalışmalar yapılmalıdır. Bu iyileştirme çalışmalarını yapılırken geri dönüşüm çelik tozuna zarar vermekten kaçınılmalıdır.
- Yağlayıcı ve bağlayıcı seçimine yönelik çalışmalar yapılabilir. Stearik asit yerine toz halinde çinko stearat veya farklı polimerler tercih edilebilir.
- Sıcak izostatik presleme (HIP) veya SPS gibi farklı sinterleme ve sıkıştırma teknikleriyle deneme yapılabilir. Daha yüksek bir yoğunluk elde edilebilir.
- Sinterleme işleminin daha yüksek sıcaklıkta (1100-1200°C) yapılabilir.
- SLM veya EBM gibi eklemeli imalat yöntemlerinde geri dönüşüm toz ile denemeler yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. German, R. (2016). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*. (Çev. S. Sarıtaş, M. Türker, N. Durlu. İkinci Baskı). Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları. 35-273.
2. German, R. (2005). *A-Z of Powder Metallurgy*. (First Edition). New York: Elsevier Science Publishing. 152-217.
3. Upadhyaya, G. S. (2002). *Powder Metallurgy Technology*. (First Edition). Cambridge: Cambridge International Science Publishing. 1-30.
4. Groover, M. P. (2015). *Modern İmalatın Prensipleri*. (Çev. M. Yurdakul ve Y. T. İç. Dördüncü Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık. 335-352.
5. Maccarini, G., Pellegrini, G., and Ravasio, C. (2020). Effects of the properties of workpiece, electrode and dielectric fluid in micro-EDM drilling process. *Procedia Manufacturing*, 51, 834-841.
6. Voigt, O., and Peuker, U. A. (2022). Suitability of Eroded Particles from Die-Sink Electro Discharge Machining for Additive Manufacturing: Review, Characterization and Processing. *Metals*, 12(9), 1447.
7. Dvornik, M. I. (2010). Nanostructured WC–Co particles produced by carbonization of spark eroded powder: Synthesis and characterization. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(4), 523-528.
8. Gouda, D., Panda, A., Nanda, B. K., Kumar, R., Sahoo, A. K., and Routara, B. C. (2021). Recently evaluated Electrical Discharge Machining (EDM) process performances: A research perspective. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2087-2092.
9. Chakraborty, S., Dey, V., and Ghosh, S. K. (2015). A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. *Precision Engineering*, 40, 1-6.
10. Yan, M. T., and Lai, Y. P. (2007). Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1686-1694.
11. Rajurkar, K. P., and Yu, Z. Y. (2000). 3D Micro-EDM Using CAD/CAM. *CIRP Annals*, 49(1), 127-130.
12. Singh, S., and Bhardwaj, A. (2011). Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10, 199-230.
13. Kim, Y. S., and Chu, C. N. (2018). The Effects of Graphite Powder on Tool Wear in Micro Electrical Discharge Machining. *Procedia CIRP*, 68, 553-558.

14. Furutania, K., Saneto, A., Takezawa, H., Mohri, N., and Miyake, H. (2001). Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid. *Precision Engineering*, 25(2), 138-144.
15. Jeswani, M. L. (1981). Electrical discharge machining in distilled water. *Wear*, 72(1), 81-88.
16. Santos, R. F., Farinha, A. R., Rocha, R., Batista, C., Costa Rodrigues, G., and Vieira, M. T. (2021). High-speed machining tool-steel chips as an outstanding raw material for indirect additive manufacturing. *Results in Materials*, 11, 100207.
17. Tanjilul, M., Ahmed, A., Kumar, A. S., and Rahman, M. (2018). A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 263-274.
18. Sabour, M. R., Taherkhani, E., Rezaei, A. R., Zohrevand, M., Safahi, H., and Faraji, G. (2024). Solid-state recycling of magnesium and its alloys via plastic deformation: An overview of processing and properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 3117-3148.
19. Dhiman, S., Joshi, R. S., Singh, S., Gill, S. S., Singh, H., Kumar, R., and Kumar, V. (2021). A framework for effective and clean conversion of machining waste into metal powder feedstock for additive manufacturing. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100151.
20. Kateusz, F., Polkowska, A., Polkowski, W., Chrzan, K., Jaśkowiec, K., Sokołowski, P., Igartua, A., Leunda, J., Bisztyga-Szklarz, M., Dudziak, T., and Jedliński, J. (2023). Chemistry and microstructure of duplex stainless steel powders from recycled Z100 mixed with 316L steels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(4), 246.
21. Gronostajski, J., Marciniak, H., and Matuszak, A. (2000). New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 34-39.
22. Altharan, Y. M., Shamsudin, S., Al-Alimi, S., Saif, Y., and Zhou, W. (2024). A review on solid-state recycling of aluminum machining chips and their morphology effect on recycled part quality. *Heliyon*, 10(14), e34433.
23. Lai, H., Zhang, Y., Wang, C., Hu, J., Yu, F., and Zhang, D. (2025). Achieving an excellent combination of tensile properties of recycled H13 steel prepared by thermomechanical consolidations of chips. *Materials Science and Engineering: A*, 926, 147964.
24. Pei, Y., Ma, H., Yuan, M., and Teng, B. (2024). Solid state recycling of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy chips by isothermal sintering and equal channel angular pressing. *Journal of Magnesium and Alloys*, 12(7), 2725-2740.

25. Bhatta, G., De Los Santos Valladares, L., Liu, X., Ma, Z., Bustamante Domínguez, A. G., Moreno, N. O., Espinoza Suarez, S. M., Barnes, C. H. W., and Zhang, D. (2021). Microstructure and mechanical properties of solid state recycled 4Cr5MoSiV (H11) steel prepared by powder metallurgy. *Results in Materials*, 10, 100184.
26. Voigt, O., Wendler, M., Siddique, A., Stöcker, H., Quitzke, C., and Peuker, U. A. (2024). Characterization and Microstructure of Recycled Eroded Particles from Die-Sink Electro Discharge Machining of H11 Alloy for Applicability in Additive Manufacturing. *Metals and Materials International*, 30(5), 1209-1226.
27. Golubeva, A. A., Sotov, A. V., Agapovichev, A. V., Smelov, V. G., and Dmitriev, V. N. (2017). Research of the possibility of using an electrical discharge machining metal powder in selective laser melting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 177(1), 012119.
28. Katiyar, J. K., Anuj Kumar, S., and Pandey, B. (2018). Synthesis of iron-copper alloy using electrical discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(14), 1531-1538.
29. Liu, Y., Zhu, K., Li, X., Lin, F., and Li, Y. (2018). Analysis of multi-scale Ni particles generated by ultrasonic aided electrical discharge erosion in pure water. *Advanced Powder Technology*, 29(4), 863-873.
30. Obwald, K., Woidasky, J., Hoffmann, A. M., and Moser, M. (2019). Suitability of electrical discharge machining debris particles for usage as a powder for selective laser melting: an explorative study. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(4), 443-449.
31. Kabirinia, F., Shabgard, M., and Tabrizi, N. S. (2019). Prediction of initial particle size of the tungsten carbide synthesized by electrical discharge erosion method based on general dynamic equation of aerosols. *Powder Technology*, 346, 283-290.
32. Dvornik, M. I., Mikhailenko, E. A., and Nikolenko, S. V. (2021). Development of a method for producing submicron cemented carbide from a powder obtained by electrical discharge erosion of scrap in oil. *Powder Technology*, 383, 175-182.
33. Dvornik, M. I., and Mikhailenko, E. A. (2023). Preparation of powder by electrical discharge erosion and sintering of ultrafine WC-5TiC-10Co alloy with high hardness. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 112, 106154.
34. İnternet: Total Materia: 1.2343, 1.2738 Malzeme Özellikleri. URL: <https://portal.totalmateria.com/tr/search/quick/results>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2025.
35. İnternet: Product Data Sheets- Buderus Global. URL: <https://www.buderus-steel.com/en/>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2025.
36. İnternet: Metal powders for Pressing and Sintering, Höganäs. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/pressing-sintering/products/>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2025.

37. İnternet: Low-alloyed powders, Distaloy AE, Höganäs. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/products/distaloy/distaloy-ae/>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2025.
38. İnternet: Pressing and Sintering, sintered parts, Höganäs. URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/pressing-sintering/#tabs>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2025.
39. Peng, T., Ye, S., Zhang, X., Ju, J., Zhao, H., and Long, Z. (2025). An improved PDM modulation algorithm for power ultrasonic cleaning system. *Applied Acoustics*, 238, 110722.
40. Ren, X., Ozturk, M., Harris, G., Batchelor, D., and Maher, D. (2011). Oxide Removal on Silicon by Rapid Thermal Processing Using SiH₂Cl₂ and H₂. *MRS Proceedings*, 342, 243–248.
41. İnternet: Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merlab, Elektron Mikroskopi Laboratuvarı. URL: <https://aybu.edu.tr/merlab/tr/sayfa/2840>, Son Erişim Tarihi: 01.07.2025.
42. Shi, P., Shi, H., Liu, C., and Jiang, M. (2018). Effect of pickling process on removal of oxide layer on the surface of ferritic stainless steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57(2), 168-175.
43. LI, L.-F., and CELIS, J.-P. (2003). Pickling of austenitic stainless steels (a review). *Canadian Metallurgical Quarterly*, 42(3), 365-376.
44. Sheng, W., Li, J., Fu, B., Dong, T., Li, G., Ma, S., Shao, H., and Niu, Z. (2024). Study on microstructure and properties evolution of duplex stainless steel powders by high-energy ball milling. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 2014-2022.
45. Dhiman, S., Joshi, R. S., Singh, S., Gill, S. S., Singh, H., Kumar, R., and Kumar, V. (2022). Recycling of Ti6Al4V machining swarf into additive manufacturing feedstock powder to realise sustainable recycling goals. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131342.
46. Hasan, Z., Ismail, M. A., and Rahman, M. M. (2020). The Effects of Sintering Schedule on Alloy Powder ASC 100.29 Compacts Formed at Elevated Temperature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 834(1), 012074.
47. İbrahim Aslan. (2017). *Pirinç ve Dökme Demir Talaşları ile Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 56-62.



Gazili olmak ayrıcalıktır