



**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Ni-Mo VE W-
Ni-Mo ÇELİĞİNE PRESLEME VE SİNERLEME
PARAMETRELELERİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Mehmet Akif ERDEN

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Ni-Mo VE W-Ni-Mo ÇELİĞİNE
PRESLEME VE SİNERLEME PARAMETRELELERİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Mehmet Akif ERDEN

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2021**

Mehmet Akif ERDEN tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Ni-Mo VE W-Ni-Mo ÇELİĞİNE PRESLEME VE SİNERLEME PARAMETRELELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

.....

Tez Danışmanı, Makine Müh. A.B.D.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17/06/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üy. Mehmet AKKAŞ (KÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üy. Harun ÇUĞ (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mehmet Akif ERDEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Ni-Mo VE W-Ni-Mo ÇELİĞİNE PRESLEME VE SİNERLEME PARAMETRELELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Mehmet Akif ERDEN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Haziran 2021, 60 sayfa

Çelik demir karbon alaşımı olarak tanımlanır. Alaşımli, alaşımsız, düşük karbonlu, yüksek karbonlu, otomat, yüksek düşük alaşımli çelikler gibi kimyasal bileşimine ve kullanım yeri gibi durumlarına göre çelikler sınıflandırmaları mevcuttur. Çelikler, birçok sektörde kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan malzemelerin büyük çoğunluğunu çelik grupları oluşturmaktadır.

Toz metalürjisi (TM) imali zor küçük hassas parçaların karıştırma, presleme ve sinterleme gibi proseslerden geçirilerek faydalı ürün haline getirme işlemi olarak tanımlanabilir. Başta demir matrisli olmak üzere birçok metal grubu toz metalürjisi yöntemi uygulanarak otomotiv endüstrisi başta olmak üzere endüstride kullanılmak üzere üretilirler.

Bu çalışmada üretim yöntemi olarak toz metalürjisi seçilmiştir. Demir içerisine % ağırlık olarak 0,55 grafit ilavesinin yanı sıra %3 Mo, %5-10 Ni ve %0,5W elementi ilave edilerek ayrı ayrı ve çoklu olarak belirlenen kompozisyonlarda üç eksenli karıştırıcıda 2 saat bilyasız olarak karıştırma işlemi uygulanarak alaşımli çelik toz karışım elde edilmiştir. Homojen karışımı gerçekleştirilen tozlar çekme numunesi şeklinde tasarlanan çelik ve grafit kalıplarda tek yönlü olarak değişik presleme basınçlarında (soğuk ve ılık presleme için 750MPa ve sıcak presleme için 25 ve 33MPa) ve farklı sinterleme sıcaklıklarında (soğuk ve ılık presleme için 1400°C ve sıcak presleme için 900 °C) parça üretimleri gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi yapılan numunelere 1400°C'de argon atmosferinde 1 saat ikinci bir sinterleme işlemi ek olarak uygulanmıştır. Tüm bu prosesler sonrasında elde edilen numunelerin mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenirken, mikroyapı özellikleri optik mikroskop, SEM ve EDS yardımıyla tespit edilmiştir. Presleme basıncının artması ve sinterleme işlemi mekanik özellikleri olumlu etkilemiştir.

Anahtar Sözcükler : Toz metalürjisi, Mo-Ni çeliği, W, mikroyapı mekanik özellik ilişkisi, presleme tekniği, presleme sıcaklığı.

Bilim Kodu : 91437

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

**EFFECT OF PRESSING AND SINTERING PARAMETERS ON
MECHANICAL PROPERTIES ON Ni-Mo AND W-Ni-Mo STEEL
MANUFACTURED BY POWDER METALLURGY**

Mehmet Akif ERDEN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Mustafa GÜNAY

June 2021, 60 pages

Steel is defined as an iron carbon alloy. There are classifications of steels according to their chemical composition, such as alloyed, unalloyed, low-carbon, high-carbon, automat, high-low alloy steels, and their conditions of use. Steels are used in many industries. Steel groups constitute the majority of the materials used today.

Powder metallurgy can be defined as the process of turning small precision parts that are difficult to manufacture into useful products by going through processes such as mixing, pressing and sintering. Many metal groups, especially iron matrix, are produced by applying powder metallurgy method to be used in industry, especially in the automotive industry.

In this study, powder metallurgy was chosen as the production method. In addition to the addition of 0.55 wt% graphite into the Fe matrix, 3% Mo, 5-10% Ni and 0.5%W

element are added into the alloy steel powder by applying the mixing process for 2 hours in a triaxial mixer in the compositions determined separately and in multiples. mixture was obtained. The powders obtained are designed as tensile specimens in steel and graphite molds unidirectionally at different pressing pressures (750MPa for cold and warm pressing and 25 and 33MPa for hot pressing) and at different sintering temperatures (1400°C for cold and warm pressing and 900°C for hot pressing).) parts were produced. A second sintering process for 1 hour in argon atmosphere at 1400 ° C was additionally applied to the sintered samples. While the mechanical properties of the samples obtained after all these processes were determined by the tensile test, the microstructure properties were determined with the help of optical microscope, SEM and EDS. Increasing pressing pressure and sintering process affected the mechanical properties positively.

Key Word : Powder metallurgy, Mo-Ni steel, W, microstructure, mechanical properties, pressing techniques, pressing temperatures.

Science Code : 91437

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa GÜNAY 'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca, deneysel çalışmalarda desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Ramazan ÖZMEN'e teşekkür ederim.

Laboratuvar ve diğer çalışmalarda imkânlarından faydalandığım Demir elik Enstitüsü, Teknoloji Fakültesi Dekanlığı ve Mühendislik Fakültesi Dekanlığı bünyesinde hocalarıma teőekkürlerimi sunarım.

Sürekli gelişimim için destek veren ve bu tez çalıőmasında desteklerini esirgemeyen Karabük Üniversitesi bünyesinde bulunan akademik ve idari çalışma arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalıőmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve hoşgörü ile maddi-manevi destek olan kıymetli eşim Hayriye ERDEN, biricik kızım ve oğlum Zeynep Serra ERDEN ve Ahmet Alperen ERDEN'e ayrıca başta annem, babam ve kardeşlerim olmak üzere tüm geniş aileme teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
TOZ METALÜRJİSİ	3
2.1. TOZ METALÜRJİSİNİN TANIMI	3
2.2. NİÇİN TOZ METALÜRJİSİ?.....	5
2.3. TOZ METALÜRJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEJAVANTAJLARI.....	20
BÖLÜM 3	21
ÇELİKLER	21
3.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	21
3.2. KARBON ÇELİKLERİ: ÖZELLİKLER, ÜRETİM, ÖRNEKLER VE UYGULAMALAR.....	24
3.4. ALAŞIM ELEMENTLERİ	27
3.4.1. Niyobyum (Nb).....	27
3.4.2. Alüminyum (Al)	27
3.4.3. Karbon (C).....	28
3.4.4. Nikel (Ni).....	29
3.4.5. Molibden (Mo)	29

	<u>Sayfa</u>
3.4.6. Manganez (Mn)	30
3.4.7. Tungsten (W).....	30
BÖLÜM 4	31
MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1. GİRİŞ.....	31
4.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN İŞLEM BASAMAKLARI	31
4.3. TOZLARIN KARIŞTIRILMASI VE SIKIŞTIRILMASI	32
4.4. SİNTERLEME İŞLEMLERİ	37
4.5. NUMUNELERE ÇEKME DENEYİNİN UYGULANMASI.....	37
4.6. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMERİ.....	38
4.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	40
BÖLÜM 5	41
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	41
5.1. GİRİŞ.....	41
5.2. TOZ KARAKTERİZASYONU	41
5.2. ÇEKME TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	43
5.3. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	45
5.5. TARAMA ELEKTRON MİKROSKOPU (SEM) İNCELEMELERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	51
5.8. GENEL SONUÇLAR	56
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir ürünün TM ile üretimi.	3
Şekil 2.2. Küresel tozların tek yönlü sıkıştırılması	34
Şekil 4.1. Deneysel Çalışmada İzlenen İşlem Basamakları.	353
Şekil 4.2. Tez çalışması için kullanılan cihazlar.	34
Şekil 4.3. Hidrolik preste oluşturulan ılık presleme prosesi.	42
Şekil 4.4. Soğuk presleme sonrası çekme numunelerin görüntüsü.	35
Şekil 4.5. Ilık (a) ve Sıcak presleme (b) sonrası çekme numunelerin görüntüsü.	36
Şekil 4.6. Sıcak presleme cihazı.	36
Şekil 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın.	37
Şekil 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan çekme cihazı.	38
Şekil 4.1. Deneysel Çalışmada İzlenen İşlem Basamakları.	35
Şekil 4.2. Tez çalışması için kullanılan cihazlar.	35
Şekil 4.3. Hidrolik preste oluşturulan ılık presleme prosesi.	36
Şekil 4.4. Soğuk presleme sonrası çekme numunelerin görüntüsü.	36
Şekil 4.5. Ilık (a) ve Sıcak presleme (b) sonrası çekme numunelerin görüntüsü.	37
Şekil 4.6. Sıcak presleme cihazı.	37
Şekil 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın.	38
Şekil 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan çekme cihazı.	39
Şekil 4.9. Epiphot 200 Nikon Marka Optik Mikroskop.	40
Şekil 4.10. Deneysel çalışmada kullanılan SEM cihazı.	40
Şekil 4.11. Mecapol P262 marka parlatma cihazı.	41
Şekil 4.12. RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazinin yoğunluk kiti.	41
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan tozların SEM resimleri.	43
Şekil 5.2. Farklı presleme ve sinterleme prosesleri uygulanmış alaşımli çeliklerin çekme eğrileri.	44
Şekil 5.3. Soğuk, ılık ve sıcak presleme ve farklı sinterleme prosesleri uygulanmış TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri.	49
Şekil 5.4. Alaşım 1 çelik numunenin SEM resimleri (sırasıyla 1000X, 5000X ve 10000x) Spektrum 1 Grafiği ve EDS sonuçları.	51
Şekil 5.5. Alaşım 2 çelik numunenin SEM resimleri (sırasıyla 1000X ve 5000X), Spektrum 2 Grafiği, EDS sonuçları ve Mapping.	52

Sayfa

Şekil 5.6. Soğuk, ılık ve sıcak preslenen numunelerin kırık yüzey resimi. 55

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Karbon içerikleri, mikroyapıları ve özellikleri	25
Çizelge 3.2. Çeşitli karbonlu çeliklerin özellikleri ve uygulamaları.....	27
Çizelge 4.1. Tozlar ve Özellikleri	33
Çizelge 4.2. Alaşımli TM çeliklerin kimyasal kompozisyonları	33
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların boyut ve % saflık değerleri.	42
Çizelge 5.2. Farklı presleme ve sinterleme prosesleri uygulanmış alaşımli çeliklerin çekme (UTS), % uzama değerleri.	44
Çizelge 5.3. TM çelikler numunelerin yoğunluk ve % gözenek miktarı	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

σ_a	: katı çözeltilinin akma mukavemeti
σ_i	: saf matrisin iç sürtünme gerilmesi
Kc	: malzeme
σ_y	: akma gerilmesini
σ_i	: akma gerilmesini
k	: hall-Petch faktörü
C	: alaşım elementi konsantrasyonu
d	: katı çözeltilinin akma mukavemeti
Tb	: saf matrisin iç sürtünme gerilmesi
Td	: malzeme
b	: alaşım elementi konsantrasyonu
mm	: milimetre
s	: saniye
Mpa	: megapaskal
T	: sıcaklık
kg	: kilogram
dak	: dakika

KISALTMALAR

TM	: Toz metalürjisi
TS	: Türk Standartı
MnS	: Mangan(II)Sülfür
FeS	: Demir(II)Sülfat
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
EDS	: Energy Dispersive Spektrometre(Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi)
VN	: Vanadyumnitrür
TiN	: Titanyumnitrür
VC	: Vanadyumkarbür
TiC	: Titanyumkarbür
NbC	: Niyobyumkarbür
NbN	: Niyobyumnitrür
AlN	: Alüminyumnitrür
VCN	: Vanadyumkarbonitrür
NbCN	: Niobyumkarbonitrür
MoC	: Molibdenkarbür
MoN	: Molibdennitrür
WCN	: Tungstenkarbonitrür

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Birçok kaynakta toz metalürjisi (TM) üretim yöntemi, istenilen kompozisyonda tozların karıştırılması, preslenmesi, sinterlenmesi ve ihtiyaç halinde delik delme dış açma, yüzey serleştirme işlemi gibi ikincil işlemleri uygulandığı malzeme üretim tekniği şeklinde tanımlanmaktadır (Özkök, 2004; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010). Dökümde olduğu gibi net şekilli parçalar TM teknikleri ile üretilebilir. Döküm yöntemi üretilmeyen birçok malzeme TM yöntemi ile üretilebilir. Örneğin, karışık fazlı bileşimler, yüksek ergime sıcaklığına sahip seramikler, refrakter malzemeler, intermetalikler, birbiri içerisinde çözünmeyen tozlar, sermetler ve bakırlı çelikler bunlardan bazılarıdır. TM yönteminin üretim maliyetinin düşük olması ve performansının yüksek olması sayesinde birçok farklı alanda kullanımı artmaktadır (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Çelikler ise demir karbon alaşımlarıdır. Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzeme grupları içerisinde çelikler vazgeçilmez bir yere sahiptirler. Özellikle ikinci dünya savaşının ardından taşıtlar, enerji boru hatları ve santralleri ve benzeri ihtiyaçlar için çelik gereksinimi artmıştır. Dayanım/ağırlık oranının yükselmesiyle daha ince ve hafif çeliklerin geliştirilmesi neticesinde üretim ve işletme giderlerinin birim maliyetinin düşürülmesi sağlanmıştır. Çelikler sade karbonlu olabileceği gibi, çeşitli özelliklerin geliştirilebilmesi için bazı alaşım elementleri içerebilirler. Çeliğin içerisinde belirli oranlarda bulunan elementlerin kimyasal bileşimleri ve çeliğin içyapısı çekanik özelliklerini belirler. Örneğin; çelik içerisindeki karbonun görevi sertleştirilebilirliğini arttırmaktır. Alaşımdaki karbon miktarı ile oynanarak çeliğin sertliği, sünekliği ve gerilme miktarı gibi mekanik ve mikroyapısal özellikleri değiştirilebilir. Çeliğin ilave edilen alaşım elementleri ya mikroyapıyı değiştirerek dayanımı artırır veya ilave edilen alaşım elementleri kuvvetli karbür ya da nitrür yapıcı alaşım elementi ise çökelti sertleşmesi ve tane boyutu küçültme gibi mekanizmalarla çeliğin dayanımını artırır. Ayrıca çeliğin kimyasal bileşimini

değiştirmeden de su verme, yumuşatma tavlamaşı gibi ısıl işlemlerle elik içerisindeki karbon gibi alaşım elementi miktarına bağlı olarak mikroyapsını değiştirerek çeliğin dayanımı arttırılabilir veya azaltılabilir (Erden, 2015; Karabulut, 2011).

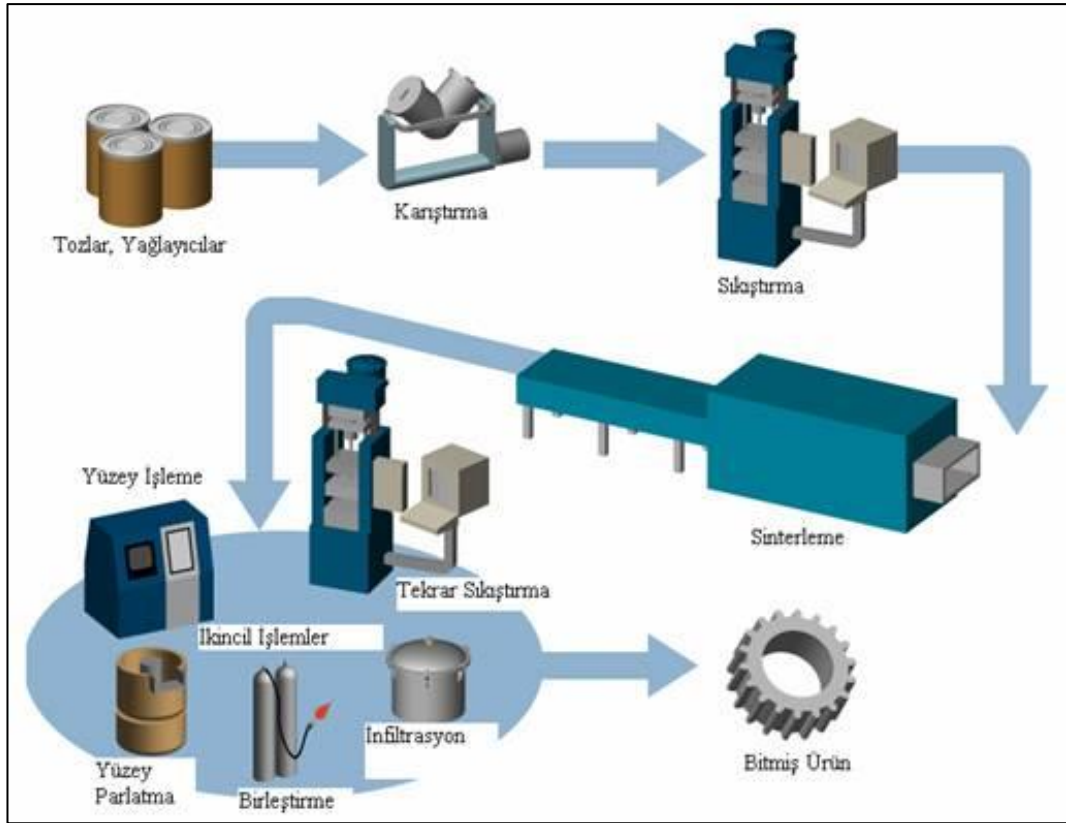
Bu çalışmada üretim yöntemi olarak toz metalürjisi seçilmiştir. Demir içerisine ağrlık olarak %0,55 grafit ilavesinin yanı sıra %3 Mo, %5-10 Ni ve %0,5W elementi ilave edilerek ayrı ayrı ve çoklu olarak belirlenen kompozisyonlarda üç eksenli karıştırıcıda 2 saat bilyasız olarak karıştırma işlemi uygulanarak alaşımlı elik toz karışım elde edilmiştir. Homojen karışımı gerçekleştirilen tozlar çekme numunesi şeklinde tasarlanan elik ve grafit kalıplarda tek yönlü olarak değişik presleme başınlarında (soğuk ve ılık presleme için 750MPa ve sıcak presleme için 25 ve 33MPa) ve farklı sinterleme sıcaklıklarında (soğuk ve ılık presleme için 1400°C ve sıcak presleme için 900 °C) parça üretimleri gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi yapılan numunelere 1400°C’de argon atmosferinde 1 saat ikinci bir sinterleme işlemi ek olarak uygulanmıştır. Tüm bu prosesler sonrasında elde edilen numunelerin mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenirken, mikroyapı özellikleri optik mikroskop, SEM ve EDS yardımıyla tespit edilmiştir. Presleme başınının artması ve sinterleme işlemi mekanik özellikleri olumlu etkilemiştir.

BÖLÜM 2

TOZ METALÜRJİSİ

2.1. TOZ METALÜRJİSİNİN TANIMI

Toz metalürjisi (TM) imali zor küçük hassas parçaların karıştırma, presleme ve sinterleme gibi proseslerden geçirilerek faydalı ürün haline getirme işlemi olarak tanımlanabilir. Müstakil üretim yöntemi olan TM genellikle aşağıdaki işlem adımlarının tamamını veya çoğunu içerir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Bir ürünün TM ile üretimi (Öztürk, 2012).

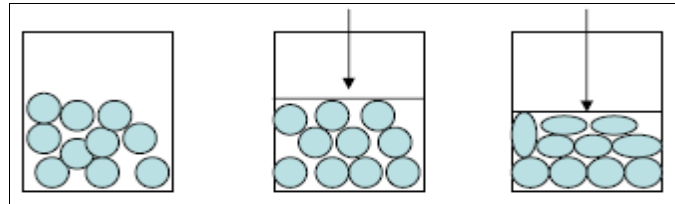
Toz üretim teknikleri, üretilecek tozların ekonomikliği, boyutu, şekli ve mikroyapısı açısından önem taşır. Deneysel çalışmalarda kullanılan metalik tozun üretim yöntemini

bilmek, tozun karakteristik özelliklerini anlaşılmasına katkı sağlar. Tozları üretmek için seçilen toz üretim yöntemleri üretilecek malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Üretim yöntemini seçerken; maliyet, tepkimeler ve beklentiler dikkate alınmalıdır. Mekanik, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyon gibi dört ana toz üretim metodu vardır. Ayrıca bazı özel malzemeler için farklı üretim teknikleri de kullanılmaktadır. TM Parça üretiminde kullanılan tozların yarısından fazlası atomizasyon ile gerçekleştirilmektedir.

Tozların karıştırılması ise genellikle alaşım ilavelerinin elementel toz formunda verilmesini veya bir pres yağlayıcının dahil edilmesini içerebilir.

Karıştırılan tozların kompakt haline getirilmesi işlem basmağı presleme süreci, bir kalıp, zımbalar ve diğer sert alet setiyle preslemeyi içerir. Bununla birlikte, tolerans değerlerini minimum hale getirmek adına ikinci presleme gibi ikincil işlemleri içeren uygulamalarda kullanılan birkaç başka konsolidasyon süreci vardır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Küresel tozların tek yönlü sıkıştırılması (Sarıtaş vd., 2007).

Soğuk presleme oda sıcaklığında yapılan işlemdir. Soğuk preslemede kalıba doldurulan toz basınçla kalıptan çıkarılır. Soğuk preslemenin avantajı çalışma kolaylığı, yüksek sıkıştırma basıncı, seri üretim ve boyutsal kontrol, mekanik ve hidrolik presle parça üretimidir (Karomatullozoda, 2018).

Ilık presleme tekniğinde ise toz, kalıp ve/veya her ikisinde presleme öncesinde ısıtılırlar. Ilık sıkıştırma yöntemi ile demir tozunun 180 °C sıcaklıkta ki yoğunluğunda % 2.5 artış gözlenmiştir (German, 2005). Genelde toz üretim uygulamalarında toz ve kalıp

sıcaklığı 150 °C olarak ayarlanır ve sıkıştırma için 700 MPa basınç uygulanır. Bu sıcaklık ve basınç çelik tozunda uygulandığında yoğunluk % 1-3 arttırılmıştır olur (James ve Narasimhan, 2006). Daha yüksek ham yoğunluklara ulaşılabilir. Bu da sinterleme sonrasındaki özellikleri iyileştirir. Örnek olarak; çelik alaşım (Fe₂Ni₂Cu 0.9Mo,0.8C) oda sıcaklığında presleme, 1300 °C ve 50 dakika sinterleme sonunda 7,31 g/cm³ yoğunluk verirken, 150 °C ılık sıkıştırma ve sinterleme ile 7.32 g/cm³ yoğunluk vermektedir (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; German, 2005; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Sıcak presleme erime sıcaklığının yarısı ve üzeri sıcaklıklarda ısıtılmış tozların veya kalıbın içinde sıkıştırılması tozların sıkıştırılması ve kalıptan çıkarılması işlemidir.

Preslenmiş numunenin sinterleme aşaması, şekillendirilmiş toz metal parçalara mukavemet kazandırmak amacıyla yüksek sıcaklıklarda pişirilip yoğunlaştırılması işlemidir. Sinterleme işlemi yağlayıcıyı alma (ön ısıtma), sinterleme ve soğutma aşamalarından oluşur. Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanmasını takip eder.

Sinterleme sonrasında parçaların yoğunluğu artmış olur. Sinterleme işleminde;

- a) Toz taneleri arasında noktasal bağ oluşmaya başlar.
- b) Temas noktaları genişleyerek boyun oluşumu başlar.
- c) Toz taneleri arasında gözenekler azalır.
- d) Boyun oluşan bölgelerde tane sınırları oluşur. Tane sınırları genişleyerek malzeme daha homojen bir yapı alır (Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

İkincil işlemler ise bitirme işlemlerinin sinterlenmiş parçaya uygulanması işlemleridir. TM endüstrisinde, bu tür işlemler genellikle "ikincil işlemler" olarak adlandırılır.

2.2. NİÇİN TOZ METALÜRJİSİ?

TM imalatı zor olan küçük hassas parçaların seri olarak üretilebildiği, üretim sırasında çok az atık malzeme ortaya koyan, seri olarak parça imalatı nedeniyle ekonomik bir

üretim yöntemidir. TM, başlangıç malzemesini gerekli toz şekline dönüştürmek için önemli ölçüde zaman ve çaba harcanmasını ve sonrasında katı bir nesne üretmek için malzemeyi tekrar "sıkıştırmak ve belli dayanımı sağlamak için Sinterleme gibi bir çok prosesi içerebilen daha fazla zaman ve çaba harcanan bir teknolojidir. Peki bu kadar meşakkatli süreci içeren toz metalürjisini niçin kullanılmalıdır? " Sorusunu sormak mantıksız değildir. Aslında, TM bir ürünün imalatı için tercih edilen yol olarak seçilmesinin birçok nedeni vardır. Genel olarak ifade edilmesi gerekirse, bu nedenler iki kategoriye ayrılır (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Bunlardan birincisi, maliyet etkinliğidir. TM, parçayı üretmek için bir dizi olası seçenek arasında en uygun maliyetli olanıdır. Ürün maliyet etkinliği, TM yöntemini seçmenin en önemli nedenidir ve yapısal (veya mekanik) parça sektörünün ana itici gücüdür. TM, diğer üretim teknolojilerine kıyasla daha düşük enerji tüketimi, daha yüksek malzeme kullanımı ve daha az işlem adımı içermesi nedeniyle diğer üretim yöntemlerine kıyasla maliyet rekabetini kazanmaktadır. Tüm bu sayılan faktörler, Toz Metalürjisinin geleneksel imalatta uygulanacak işleme operasyonlarını azaltma veya hatta muhtemelen tamamen ortadan kaldırma yeteneğine bağlıdır. Toz Metalürjisi, talaşlı imalat işlemlerini ortadan kaldırmak için doğrudan karmaşık geometrik şekiller oluşturma ve sinterlenmiş üründe yakın boyutsal tolerans kontrolü tutma yeteneklerine sahiptir. Bu özelliği diğer üretim yöntemlerine kıyasla üstün özellikleri arasında yer alır. Toz Metalürjisinin maliyet etkinliği genellikle belirli bir ürünün büyük üretim miktarlarında yapılmasını gerektirir. Üretim miktarı gereksinimleri çok düşükse, (uzun ömürlü) şekillendirme takımlarının maliyetlerini yeterli sayıda parça üzerinden amorti etme veya takım değiştirme / ayarlama işlemlerinde potansiyel üretim süresinin önemli bölümünü kapsaması nedeniyle dejavantajlı konumu getirir. Yani seri üretimde avantajlı yöntemdir. Toz Metalürjisinin tercih edilen proses olacağı üretim miktarları, elbette şekli farklı bir yolla oluşturmanın ne kadar zor olacağına bağlıdır, ancak genel olarak en azından yıl başına on binlerce parça düzeyinde olmalıdır. Ancak elektrik lambalarında kullanılan tungsten filament gibi diğer üretim yöntemlerinde üretimi çok sınırlı olan parça üretimleri için kullanılabilir (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

İkincisi ise benzersizliktir. Kimyasal bileşenlerin kombinasyonu, mikroyapı üzerinde kontrol, gözeneklilik kontrolü gibi ürünün bazı özellikleri geleneksel imalat yöntemlerinde çok zor veya bazen imkansız olabilir. Ürünün benzersizliği, Toz Metalurjisi tarafından birkaç farklı yolla sağlanabilir. Karıştırılması imkânsız olan malzeme kombinasyonlarının üretimi gerçekleştirilebilir. Toz Metalurjisi, geleneksel olarak karışmaz olarak kabul edilecek malzeme kombinasyonlarının üretimine izin verir. Bu tür Toz Metalurjisi uygulamasının köklü örnekleri mevcuttur. Aşınma direnci sağlamak veya sürtünme seviyelerini kontrol etmek için bir dizi metalik olmayan malzemenin bakır bazlı veya demir bazlı bir matrise gömülü olduğu fren balataları ve debriyaj yüzeyleri için sürtünme malzemeleri TM yöntemi ile üretilebilir. Kesici takımlar, şekillendirme aletleri veya aşınan parçalar için kullanılan sert metaller veya sinterlenmiş karbürler de TM yöntemi ile üretilebilir. Bunlar, yalnızca bağlayıcının erime noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta sıvı faz sinterleme yoluyla üretilebilen bir mikroyapı olan bir metal faz ile bağlanmış bir sert faz içerir. Kobalt ile bağlanmış tungsten karbür, bu tür bir malzemenin baskın örneğidir, ancak bir dizi başka karbür, nitrür, karbonitrür veya oksit içeren başka sert metaller mevcuttur ve kobalt dışındaki metaller bağlayıcı olarak kullanılabilir (Ni, Ni-Cr, Ni-Co vb.) TM ile ince elmas taneciklerinin metalik bir matris içinde homojen olarak dağıldığı elmas kesici takım malzemeleri de üretilebilir. Yine bu malzemelerin işlenmesinde sıvı faz sinterleme kullanılmaktadır. Bakır, tungsten, gümüş, kadmiyum oksit gibi elektrikle temas eden malzemeler de TM ile üretilen parçalara örnek verilebilir. Toz Metalurjisi, tungsten, molibden ve tantal gibi refrakter metaller dahil olmak üzere çok yüksek erime noktalarına sahip malzemelerin işlenmesini sağlar. Bu tür metallerin eritilerek ve dökülerek üretilmesi çok zordur ve genellikle döküm halinde çok kırılgan bir yapıya sahiptir. Toz Metalurjisinin çok erken uygulama alanlarından birisi de akkor lambalar için sonradan tele çekme için tungsten kütük üretimidir. Toz Metalurjisi, yapılarında kontrollü gözeneklilik seviyelerine sahip ürünlerin üretimini imkân sağlar. Sinterlenmiş filtre elemanları, böyle bir uygulamanın örnekleri arasında yer alır. Diğer önemli örnek ise Toz Metalurjisinin en eski uygulamalardan biri olan, sinterlenmiş yapıdaki birbirine bağlı gözenekliliğin bir petrol rezervuarını tutmak için kullanıldığı, yağ tutucu veya kendinden yağlamalı yataklardır. Bazı özel uygulamalarda, genellikle mikroyapı üzerinde üstün kontrol yoluyla üstün özelliklerin oluşturulması, geleneksel döküm veya dövme üretimlerinin aksine Toz Metalurjisi işleme ile mümkündür. Bu

uygulama kategorisindeki iyi örnekler vardır. Hemen hemen tüm sert (kalıcı) mıknatıslar ve yumuşak mıknatısların yaklaşık %30'u toz besleme stoklarından işlenir. Toz Metalurjisi ile işlenmiş bir malzemeden daha ince ve daha kontrollü mikroyapı, dövme ürünlerden daha üstün tokluk ve kesme performansı sağlar. Nikel veya kobalt bazlı süper alaşımlar, Toz Metalurjisi işleminin geleneksel olarak elde edilemeyen bileşim aralıkları ve mikroyapısal kontrol sağlayabildiği ve bu nedenle çalışma sıcaklığı ve performansında bir iyileştirme sağlayabildiği hava motor uygulamaları için kullanılır (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Toz Metalurjisinin uygulama alanları, Toz Metalurjisi parçalarının büyük bölümü otomotiv sektörü için üretilir. Tüm coğrafi bölgelerde ortalama olarak, tüm Toz Metalurjisi yapısal bileşenlerinin yaklaşık %80'i otomotiv uygulamaları içindir. Bu otomotiv uygulamalarının yaklaşık %75'i şanzımanlar (otomatik ve manuel) ve motorlar için bileşenlerdir. Senkronizasyon sistemi parçaları, vites değiştirme bileşenleri, debriyaj göbekleri, planet dişli taşıyıcıları, türbin göbekleri, debriyaj ve cep plakaları gibi iletim uygulamaları içerir. Toz metalürjisi ile üretilen motor parçaları ise kasnaklar, dişliler ve göbekler, özellikle motor trijer kayışı sistemiyle ilişkili olanlar, valf yuvası uçları, valf kılavuzları, montajlı eksantrik milleri için PM lobları, dengeleyici dişliler, ana yatak kapakları, motor manifoldu aktüatörleri, eksantrik mili yatak kapakları, motor yönetimi sensör halkaları şeklinde sıralanabilir. Toz Metalurjisi parçaları ayrıca bir dizi başka otomotiv sistemlerinde de uygulama bulmaktadır. Bunlar, yağ pompalarında özellikle dişliler, amortisörlerde piston kolu kılavuzları, piston valfleri, uç valfleri, kilitlemeyi önleyici fren sistemleri (ABS)'de sensör halkaları, egzoz sistemlerinde flanşlar, oksijen sensörü göbekleri, Şasi bileşenleri, değişken valf zamanlama sistemleri, sürekli değişken şanzımanlar, egzoz gazı devridaim (EGR) sistemleri ve turboşarjlar olarak sıralanabilir (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Toz Metalurjisi yapısal parçalar için, bileşenlerin büyük üretim miktarlarında gerekli olduğu başka önemli pazarlar da vardır. İkinci en büyük yapısal parça pazarı, ev aletleridir. Rulmanlar ve çeşitli dişli parçaları, Toz Metalurjisi uygulamalarının örnekleridir. Metal grafit karbon fırçalar ayrıca elektrikli motorlarda ve ev aletleri,

otomobiller ve elektrikli aletler için jeneratörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer Toz Metalurjisi yapısal parça pazarları ise iş makineleri, eğlence ve bahçe ürünleri, endüstriyel motorlar ve kontroller, kilit parçaları, mandallar gibi birçok parça sayılabilir (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Havacılık uygulamaları da TM'nin uygulama alanları arasında yer alır. Bu sektöre örnek vermek gerekirse aero-motor ve kara tabanlı gaz türbini uygulamaları en iyi örnekler arasındadır. Toz Metalurjisi ürünleri için uçak motoru ve kara tabanlı gaz türbini uygulamaları son derece iyi özellikler gerektirir ve bu sektördeki TM tabanlı işlem yolları genellikle Sıcak İzostatik Presleme (HIP) içerir. Nikel bazlı süperalaşım türbin diskleri için, külçe yollu malzemeye kıyasla gelişmiş mikroyapısal kontrol ve bileşim kapasitesi yoluyla ürün performansında sonraki artışlara izin vermek için tozlardan işleme gerekli hale gelmiştir. Toz Metalurjisi süreci genellikle bir HIP kütüğünün izotermal dövülmesini içerir, ancak "HIP" parçalar da sürünme mukavemetinin tek tasarım kriteri olduğu yerlerde kullanılabilir. Net şekilli HIP titanyum TM ürünleri, geleneksel işlemenin (talaşlı işlemeyi içeren) çok fazla malzeme israfı olduğu ve Toz Metalurjisi yolunun maliyet avantajları sunabileceği türbin uygulamaları için geliştirilmiştir. Toz bazlı eklemeli üretim teknikleri kullanılarak dövme veya döküm parçalara özelliklerin eklenmesi de benzer nedenlerle uygulanmaktadır. Uçak gövdesi sektöründe titanyum Toz Metalurjisinin kullanımına da, halihazırda dövme rotalı titanyum kullanan uygulamalarda maliyet tasarrufu veya çelik parçaların değiştirilmesinde potansiyel ağırlık azaltımı için artan bir ilgi var.

Petrol ve Gaz sektöründe, petrol ve gaz aramalarında düzenli olarak sert metal ve elmas kesme aletleri kullanılmaktadır. Bir dizi östenitik ve dupleks paslanmaz çelikteki HIP toz ürünleri, manifoldlar ve vanalar dahil olmak üzere açık deniz uygulamalarında da giderek daha fazla kullanılmaktadır. HIP ve lazer kaplama teknikleri, çeşitli açık deniz bileşenleri üzerinde aşınmaya dirençli kaplamaları biriktirmek için kullanılmaktadır. Otomotiv, havacılık ve genel mühendislik dahil olmak üzere birçok endüstriyel sektörde işleme operasyonları için sert metal ve elmas kesme aletleri de kullanılmaktadır (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Sağlık sektöründe toz bazlı yollarla yapılabilen bileşenler içeren birçok cihaz mevcuttur. MRI tarayıcıları, tozlardan işlenmiş büyük miktarlarda nadir toprak miktatısları kullanılmaktadır. Metal Enjeksiyon Kalıplama ile birçok cerrahi alet ve diş implantı üretilmektedir. Katmanlı imalat kullanarak özelleştirilmiş tıbbi implantlar üretmeye ve boşluk tutucu ilaveler içeren malzemelerin TM işlemleri ile gözenekli implant yapıları (kemik sertliğini eşleştirmek ve osteo-entegrasyona yardımcı olmak için) üretmeye yönelik her geçen gün ilgi artmaktadır.

Toz Metalurjisi yapısal parça uygulamalarının büyük çoğunluğu, aynı bileşen şeklini oluşturmak için diğer yollara karşı bir maliyet rekabetinin kazanılmasına dayanmaktadır. Buna karşılık, Toz Metalurjisinin diğer teknolojilere karşı maliyet rekabeti iki ana konuya dayanmaktadır. Bunlar, üretim sürecinde daha düşük enerji tüketimi ve başlangıç ham maddesinin üstün kullanımınıdır.

Bir bileşen uygulamasının Toz Metalurjisi için uygun bir hedef olup olmayacağını belirleyen birkaç husus vardır. Bunlardan bazıları ise ürün boyutu ve ağırlığı, ürün geometrisi ve üretim miktarı gereksinimleri olarak sıralanabilir.

Toz Metalurjisinde malzeme kullanımı yüksek olmasına rağmen, kullanılan tozlar, birçok rakip işlemde kullanılan çelik çubuk veya kütük ile karşılaştırıldığında nispeten pahalı bir hammaddedir. Toz Metalurjisi bu nedenle genellikle diğer üretim yöntemleriyle küçük ve hafif parçalarda rekabet eder, burada malzeme maliyetleri toplam üretim maliyetlerinin nispeten küçük bir yüzdesine (belki yaklaşık %20) dahil edilebilir. Ayrıca, parça plan görünümünde ne kadar büyükse, o kadar büyük presleme basıncına ihtiyaç vardır. Gerekli sıkıştırma tonajı ve Toz Metalurjisi sıkıştırma preslerinin tonaj kapasitesi yaklaşık 1.000 ton ile sınırlıdır (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Toz Metalurjisi, iki boyutta neredeyse sınırsız şekil karmaşıklığına sahip (kalıpta radyal veya plan görünüm), ancak üçüncü boyutta, aksel veya kalınlık boyunca çok daha sınırlı karmaşıklığa sahip "prizmatik" şekiller oluşturmak için en iyi sonucu verir.

Toz Metalurjisinin uygulanabilir olması için büyük üretim çalışmaları gerekir. İlk olarak, gerekli biçimlendirme araçları genellikle karmaşıktır ve nispeten pahalıdır ve takımlama maliyetinin çok sayıda ürün üzerinden amortismanına tabi tutulması gerekir. Benzer şekilde, TM işleme ekipmanının (presler, fırınlar) sermaye maliyetleri yüksektir ve çok sayıda ürün için amortismanına tabi tutulmaları gerekir. Ekipman sermaye maliyetleriyle ilişkili bir sorun, üretim işleri arasındaki kesinti süresinin en aza indirilmesi ve dolayısıyla toplu işler takım değiştirme, ayarlama sürelerinin çok sık olmaması için nispeten uzun olması gerekir (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Toz Metalurjisinin diğer teknolojilere karşı hem malzeme kullanım faktörleri hem de enerji tüketim oranları açısından rekabetçi konumdadır. Orijinal hammaddenin % 95'inin tipik Toz Metalurjisi malzeme kullanımı, rakip süreçlerin herhangi birine göre daha üstündür. Örneğin, Toz Metalurjisinin burada başka bir avantajı vardır. 1 ton prese hazır atomize demir tozu üretmek için gereken enerji, işleme için 1 ton çelik çubuk stoğu üretmek için yaklaşık 14GJ ile karşılaştırıldığında yaklaşık 10 GJ'dir (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Toz Metalurjisi yapısal parçalarının yoğunluk seviyesini ve dolayısıyla bunların performans seviyelerini arttırmayı amaçlayan bir dizi Toz Metalurjisi işlemi ve / veya malzeme gelişmesi ortaya çıkmıştır. Bunlar biri de Toz dövmedir. Toz dövme, ilk olarak 1970'lerde ticari olarak tanıtılan bu türden en erken gelişme, geleneksel Pres / Sinter Toz Metalurjisi ile bir preform üretimini ve ardından kapalı kalıp sıcak dövme kullanarak tam yoğunluğa yakın konsolidasyonu içeren bir hibrit teknolojidir. Toz Dövme, yüksek mukavemet ve performans sağlamak için seri üretimde uygulanmıştır. Bununla birlikte, bu, geleneksel Pres / Sinter Toz Metalurjisi işlemine kıyasla daha yüksek maliyetler ve azaltılmış boyut tolerans kontrolü pahasına olmuştur. Konvansiyonel sürecin her aşamasında sıkıştırma, sinterleme veya sinterleme sonrası işlem yoluyla - yoğunluğu artırmak mümkündür (Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Daha yüksek çevre yoğunluğunun sağlanması için artık çeşitli sıkıştırma süreci geliştirmeleri mevcuttur. Daha yüksek basınç, soğuk sıkıştırma ile ham yoğunluğu

arttırmak hedeflenmiştir. İnce, kırılğan zımbalar gerektirmeyen parça geometrileri için, sıkıştırma basınçlarını maksimum 600 MPa'dan yaklaşık 1.000 MPa'ya yükseltmek ve bunun sonucunda ham yoğunluğun artması mümkündür.

Sıcak presleme hem tozun hem de sıkıştırma aletinin yaklaşık 150 ° C'ye ısıtılmasını içerir. Artan sıcaklık, demir tozunun akış stresini azaltır ve yeşil yoğunluğun 0,2 g / cm³'e kadar artmasına izin verir. Sıcak kalıp sıkıştırma ise yalnızca takımın önceden 95 ° C'ye ısıtıldığı Sıcak Sıkıştırma'nın daha yeni bir çeşididir. Yüksek hızlı sıkıştırma ise üst zımbaya tekrarlanan yüksek hızlı çekiç darbelerini içerir. Yine, işlem ince, kırılğan zımbalar içeren aletlere uygulanmamalıdır (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Kalıp duvar yağlaması, Toz karışımlarında karıştırılmış yağlayıcıyı (ve sıkıştırılmış kısımdaki yağlayıcı tarafından kaplanan hacim) ortadan kaldırarak, daha yüksek yeşil yoğunluk elde edilebilir. Buradaki geometrik kısıtlama, sıkıştırma döngüsünün kalıp doldurma aşamasında tüm ilgili takım yüzeylerinin yağlamaya maruz bırakılması gerektiğidir.

Sinterlemede yoğunlaştırmayı artırma seçenekleri ise katı faz Sinterleme, sıvı faz sinterleme ve Ferrit faz sinterlemeyi içerir. Sinterleme sonrası yoğunlaştırma ise hem toz dövme hem de shot peening bu kategoriye örnek olarak düşünülebilirse de, en çok dikkat çeken sinterleme sonrası yoğunlaştırma işlemi, yerel soğuk deformasyon yoluyla seçici yüzey yoğunlaştırmayı içermiştir. Bu yaklaşımın en yaygın olarak kullanılan varyantı, hemen yüzeyde tam yoğunluk ve yüzeyin altında bir yoğunluk gradyanı oluşturmak için sinterlenmiş bir ön kalıbın yüzey katmanlarının bir örgü haddeme aleti ile soğuk haddemesini içermektedir. Bu süreç, büyük ölçüde, daha yüksek performans seviyelerine sahip Toz Metalurjisi dişli formlarının üretimine yöneliktir (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Toz Metalurjisi için Tasarım, Toz Metalurjisi teknolojisi önemli tasarım özgürlükleri sunsa da, süreç göz önünde bulundurularak bir ürün tasarlarırken akılda tutulması gereken bir dizi "yapılması" ve "yapılmaması gerekenler" vardır. Bunlar, en boy oranı,

yeniden giriş özellikleri, eğimler, pahlar, kesitte ani değişiklikler vek köşeler şeklinde sıralanabilir.

En boy oranı (yani uzunluk / genişlik oranı) - toz besleme stoğu ve takımlar arasındaki sürtünme etkilerinin oluşturduğu yoğunluk değişimleri, çift yönlü sıkıştırmada bile en boy oranının 3: 1'den daha fazla olmayacak şekilde sınırlandırılması gerektiği anlamına gelmektedir.

Oluklar, ters koniklikler veya yanal delikler gibi yeniden giriş özellikleri, parçanın kalıptan çıkmasını önleyeceği için Toz Metalurjisi tarafından doğrudan oluşturulamaz. Gerekirse, bu tür özelliklerin sinterlenmiş parçanın işlenmesiyle tanıtılması gerekecektir (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Eğimler, kaçınılması gereken ince kenarlı zımbalar gerektirir. Mümkünse, eğimli bir kenar küçük bir düzle bitmelidir. Yine, ince kenarlı zımbalar ihtiyacını ortadan kaldırmak için, bileşen kenarlarında yarıçap için pahlar tercih edilir. Ejeksiyonda geri esnemeye bağlı olarak çatlama yol açabilecek gerilim arttırıcılara neden olduklarından, kesitteki ani değişikliklerden kaçınılmalıdır. Keskin köşeler, Yine gerilimi arttırmaktan kaçınmak için plan görünümü bölümündeki keskin köşeler yerine yarıçaplar dahil edilmelidir.

Toz üretim teknolojileri ise mekanik, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyon gibi dört ana toz üretim metodu vardır. Parça üretiminde kullanılan tozların yarısından fazlası su, gaz ve hava gibiatomizasyon yöntemleri ile üretilmektedir (Ayvacı, 2019; Karabulut, 2011, İnternet, 2021).

Demir tozu üretimi, tonaj olarak, TM yapısal parça üretimi için demir tozu üretimi, tüm demir dışı metal tozlarının üretimini gölgede bırakmaktadır. Hemen hemen tüm demir tozları iki işlemde biri ile üretilir. Sünger demir işlemi, bu işlemlerin en uzun süredir kurulmuş olanı, bir oksidin katı hal indirgenmesini içeren bir süreç ailesinin önde gelen örneği olan sünger demir işlemidir. İndirgeme işlemine tabi tutulan sünger demir tozu, partikül şeklinde oldukça düzensizdir, bu nedenle iyi bir "ham

mukavemet" sağlar, böylece kalıpla preslenmiş kompaktlar sinterlemeden önce kolayca kullanılabilir ve her partikül iç gözenekleri bulundurur, böylece düşük sıkıştırılmış yoğunluk seviyelerinde iyi ham mukavemet elde edilir. Sünger demir, tüm demir bazlı, kendinden yağlamalı rulmanlar için temel hammadde sağlar ve yine de TM yapısal parçalarındaki demir tozu kullanımının yaklaşık %30'unu oluşturur (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Atomizasyon yöntemi, bir sıvının (sıvı veya gaz) yüksek enerjili jetlerinin çarpması yoluyla ince bir erimiş metal akımının parçalanmasını içerir. Su, atomizasyonda en yaygın kullanılan sıvıdır. Su atomize edilmiş demir tozları da düzensiz partikül şekline ve bu nedenle iyi Ham mukavemete sahiptir. Sünger demirden farklı olarak, tek tek toz parçacıkları iç gözeneklilik içermez ve tavlama işleminin kapsamlı gelişimi nedeniyle üstün sıkıştırılabilirliğe sahiptir (Şekillendirme işlemlerine ilişkin bölüme bakın). Bu nedenle, su atomize tozlar, PM yapısal parçalarında yüksek yeşil yoğunluğun arandığı yerlerde tercih edilen malzemedir.

İnert gaz atomizasyonu, demir içermeyen metal tozları çeşitli yollarla üretilir. Bunlardan en önemlisi, atomize sıvı olarak bu sefer inert bir gaz kullanan başka bir püskürtme işlemidir. İnert gaz atomizasyonunda, üretilen partikül şekli, yüzey geriliminin katılaşmadan önce erimiş damlacıklar üzerinde etkili olması için mevcut olan süreye bağlıdır ve düşük ısı kapasiteli bir gaz kullanılıyorsa (azot ve argon en yaygın olanlardır), bu süre uzatılmış ve küresel toz şekilleri ortaya çıkar. Küresel tozlar, ham mukavemetin bir sorun olmadığı, ancak kaptaki tozun başlangıçtaki paketleme yoğunluğunun önemli olduğu sıcak izostatik preslemede özellikle yararlıdır (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Elektroliz, metal tozları üretmenin bir yoludur ve en yaygın olarak özel uygulamalar için bakır tozlarının üretiminde kullanılmaktadır. Elektrolitik tozlar, elektro kaplamada kullanılan prensipler izlenerek üretilir ve koşullar, pürüzsüz, yapışkan bir katı tabaka yerine gevşek bir toz tortu oluşturmak için değiştirilir. Katoda gevşek bir şekilde yapışkan toz birikintilerinin oluşumu, elektrolitte düşük metal iyon

konsantrasyonu, yüksek asit konsantrasyonu ve yüksek katot akımı yoğunluğu tarafından tercih edilir. Başlangıç malzemesi saf bir metal anottur.

Mekanik üretim yöntemi, dört ana mekanik öğütme yöntemi vardır. Bunlar, darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basma şeklinde sıralanabilir. Gevrek malzemeler, toz oluşturmak için bilyalı değirmenlerde, çekiçli değirmenlerde veya aşındırıcı değirmenlerde toz haline getirilebilir. Metaller arası ve ferro alaşımlar genellikle bu şekilde işlenir. Bu yaklaşımın varyantları olarak, Hidrit-Dehidrit (HDH) titanyum alaşımı tozları, daha sonra toz haline getirilebilen ve dehidridize edilebilen kırılğan bir hidrit oluşturmak için alaşımın hidrojenle katı formda reaksiyona sokulmasıyla ve Nd-Fe-B'nin Hidrojen Dekrepitasyonu yoluyla üretilebilir (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Son olarak, ince nikel veya demir tozlarının üretimi için karbonil işlemleri başta olmak üzere, bir dizi kimyasal dönüştürme işlemi vardır. Bu işlemde, ham metal basınç altında CO ile reaksiyona sokularak reaksiyon sıcaklığında gaz halindeki karbonil oluşturulur, ancak artan sıcaklık ve düşük basınç üzerine metali çökeltilmek için ayrıştırılır.

TM İşleme için Tozları Karıştırma konusuna değinmek gerekirse, TM parçalarının kalıp preslemesi için toz hammaddelerin karıştırılması veya harmanlanması iki nedenden dolayı gerçekleştirilir. Bunlar alaşım element ilavelerini homojen bir biçimde karıştırmak ve presleme yağlayıcısı eklemek içindir. Kalıp presleme hammaddeleri, mümkün olduğu kadar yüksek bir sıkıştırılabilirlik seviyesini korumak için genellikle temel karışımlardan oluşur. Bu yaklaşımın kullanılması, sıkıştırılabilirliğin yumuşak, tavllanmış baz tozun (en yaygın olarak demir) kontrol edilmesi anlamına gelir. Tamamen ön alaşımlı bir tozun kullanılması, başlangıçtaki partikül sertliğinin ve iş sertleştirme oranının hem alaşım ilaveleri ile artırılacağı hem de sıkıştırılabilirliğin bu nedenle azalacağı anlamına gelecektir. Popüler yağlayıcılar, stearik asit, stearin, metalik stearatlar veya mumsu yapıdaki diğer organik bileşiklerdir. Yağlayıcı eklemenin amaçları, sıkıştırma sırasında sürtünmeyi azaltmak (ve dolayısıyla yoğunluk değişikliklerini eşitlemek), ejeksiyon kuvvetlerini azaltmak ve kompakta fırlatma çatlağı eğilimini en aza indirmektir. Homojen bir karışım, genellikle uygun bir karıştırma kabında bir yuvarlanma hareketiyle başlangıç bileşenlerinden üretilir.

Karıştırma kapları genellikle çift koni geometrisine sahiptir, ancak diğer kap şekilleri de kullanılır (V, W veya Y-şekilli bölümler) (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Sinterlenmiş karbür malzemelerin özel durumunda, tek tek karbür parçacıklarını bağlayıcı metalle (örneğin kobalt) kaplamak için karıştırma bir bilyalı değirmende gerçekleştirilir. İlgili çok ince toz partikülleri zayıf akış özelliklerine sahip olduğundan, karışım daha sonra aglomeralar oluşturmak için granüle edilir.

Toz Metalurjisi kompaktının oluşturulması, Toz malzemelerden ürünlerin şekillendirilmesi için hem tonaj miktarları hem de üretilen parça sayısı açısından baskın teknoloji Kalıp Presleme'dir. Bu şekillendirme teknolojisi, aşağıdakileri içeren bir üretim döngüsünü içerir:

Bir doldurma pabucundan verilen, bilinen hacimde toz besleme stoğu ile bir kalıp boşluğunun doldurulması, kompaktın oluşturulması için kalıp içindeki tozun zımbalarla sıkıştırılmasıdır. Kompaktın içindeki yoğunluk gradyanı seviyesini azaltmak için genellikle, alet setinin her iki ucundan zımbalar yoluyla sıkıştırma basıncı uygulanır. Alt zımba (lar) kullanılarak kompaktın kalıptan çıkarılması, bir sonraki döngünün doldurma aşamasında doldurma pabucu kullanılarak kompaktın kalıbın üst yüzünden çıkarılması. Bu döngü, kolayca otomatikleştirilmiş ve yüksek üretim oranlı bir süreç sunar. Bununla birlikte, bu yolla üretilen ürünlerde bazı sınırlamalar vardır:

Geometrik karmaşıklık, verilebilecek geometrik karmaşıklık en iyi "iki ve yarım boyutlu" olarak tanımlanabilir. Radyal yönlerde (yani parçanın plan görünümünde) sınırsız karmaşıklık vardır; şekil kalıba kesilebiliyorsa, parçada oluşturulabilir. Üçüncü boyutta, parçanın eksenel veya kalınlık boyunca yönü, bununla birlikte, önemli sınırlamalar vardır. Kesit kalınlığındaki değişiklikler, çoklu üst ve alt zımbaların kullanılmasıyla oluşturulabilir ve bu yönde delikler, araç setine çekirdek çubuklar ve mandrellerin dahil edilmesi yoluyla oluşturulabilir. Bununla birlikte, parçanın kalıptan çıkarılmasını engelleyeceği için yeniden giriş özellikleri oluşturulamaz.

En boy oranı ise yoğunluk değişimleri üzerinde kabul edilebilir kontrol aranırsa, parçanın en boy oranı (uzunluk / çap) oranı sınırlıdır (yaklaşık 3: 1).

Ebat ve ağırlık, parçanın boyutu ve ağırlığı, mevcut şekillendirme preslerinin maksimum tonaj kapasitesi (yaklaşık 1000 ton kapasite) ile sınırlıdır. 2 kg. demirli PM kısmı büyük olarak kabul edilecektir.

Presleme sonrası parçaya mukavemet kazandırma, Geleneksel olarak preslenmiş parçaların mukavemet seviyesi, üründe kalan gözenekliliğin etkisiyle bir dereceye kadar sınırlıdır. Bu sınırlamalardan bir veya daha fazlasını gidermek için çalışan bir birçok şekillendirme işlemi geliştirilmiştir. Bunlardan biri izostatik presleme tekniğidir. İzostatik presleme, çok büyük bileşenlerin oluşturulabilmesi, elde edilebilen en boy oranı üzerindeki tek sınırın, pres sıvısını içeren kabın boyutlarından kaynaklanması, gerçek üç boyutlu geometrik karmaşıklığın elde edilebilmesi ve tam yoğunluklu sıkıştırmanın mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, tüm bunlar, kalıp presleme ile karşılaştırıldığında, şekillendirme döngüsü süresinde önemli artışlar ve boyutsal tolerans kontrolünde bazı sınırlamaları getirmektedir. İzostatik preslemede toz, her yöne hidrostatik basınçla sıkıştırılır. İşlem soğuk veya sıcak yapılabilir. Soğuk izostatik presleme (CIP)'de toz, yüksek basınca pompalanan bir basınçlı kaptaki sıvıya, genellikle suya daldırılan, genellikle poliüretandan olan esnek bir kalıp içinde bulunur. Sıcak izostatik presleme (HIP)'de ise basınç ortamı bir gazdır, normalde argondur. Toz, basınçlı kaptaki hidrostatik basınca maruz kalan metal bir kutu içinde bulunur. HIP ile tam yoğunluk elde edilebilir ve proses, malzemelerin bütünlüğünün öncelikli olduğu süper alaşımlar, yüksek hızlı çelikler, titanyum gibi malzemeler için kullanılır. Bölünmüş kalıp sıkıştırma, TM parçalarının geometrik karmaşıklığını artırmayı ve yeniden giriş özellikleri oluşturma yeteneğini sunmayı amaçlayan erken bir süreç geliştirme, bölünmüş kalıp sıkıştırma olarak bilinen kalıp preslemenin evrimsel bir uzantısıdır. Bu süreçte, alet seti, parça oluşturulduktan sonra kalıp yatay düzlemde bölünerek yeniden giriş özelliklerine sahip kompaktın kalıbın iki yarısı arasında çıkarılmasına izin verecek şekilde tasarlanmaktadır. Bununla birlikte, tozlardan yapılan parçaların şekil kabiliyetini artırmada en büyük etkiye sahip olan süreç Metal Enjeksiyon Kalıplama (MIM) olmuştur. MIM'de, toz, enjeksiyonla

kalıplanmış plastik parçalar için kullanılan işleme benzer bir şekilde bir kalıba enjekte edilebilen bir besleme stoğu oluşturmak için organik bir bağlayıcıyla karıştırılır. Yeşil gövdenin kalıptan çıkarılmasından sonra, çözülür ve ardından sinterlenir. Bu işlemde yakın boyut toleransları tutulabilir ve kullanılan ince tozlar ve buna bağlı olarak yüksek sinterleme aktivitesi nedeniyle, tam yoğunluğa yakın yoğunluk seviyeleri ve dolayısıyla yüksek mukavemet seviyeleri elde edilebilir. Ayrıca, son derece karmaşık 3 boyutlu geometriler oluşturulabilir. Bununla birlikte, esas olarak sürecin ayrılma aşamasıyla ilgili zorluklar nedeniyle, MIM parçaları genellikle ince duvarlı bölümlerle küçük ve hafiftir. Kalıpla preslenmiş parçalarla bir karşılaştırma olarak, 100 g. MIM parça büyük kabul edilir (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

Sinterleme, mukavemet ve bütünlük kazandırmak için bir toz kompakt üzerine uygulanan bir ısıl işlemdir. Sinterleme için kullanılan sıcaklık, Toz Metalurjisi malzemesinin ana bileşeninin erime noktasının altındadır. Sıkıştırmadan sonra, komşu toz parçacıkları, işlenecek kompakt "ham mukavemet" veren kompakt soğuk kaynaklarla bir arada tutulur. Sinterleme sıcaklığında difüzyon süreçleri bu temas noktalarında boyunların oluşmasına ve büyümesine neden olur. Bu "katı hal sinterleme" mekanizmasının gerçekleşebilmesi için gerekli iki öncü vardır:

Yağlayıcı ve bağlayıcıların buharlaşması ve yakılmasıyla pres yağının uzaklaştırılması
Kompakt içindeki toz partiküllerinden yüzey oksitlerinin azaltılması.

Bu adımlar ve sinterleme işleminin kendisi genellikle tek ve sürekli bir fırında, fırın atmosferinin akıllıca seçilmesi ve bölgelere ayrılmasıyla ve fırın boyunca uygun bir sıcaklık profili kullanılarak gerçekleştirilir.

Yapısal Toz Metalurjisi bileşenlerinin mekanik özellikleri, yaygın olarak yapısal veya mühendislik bileşeni uygulamaları için kullanılan malzemelerden elde edilebilen mekanik özellikler şu şekilde özetlenebilir:

Demir Toz Metalurji malzemeleri, standart kalıp presi ve sinter yolu ile işlenen Demir Tozu Metalurjisi malzemeleri, sinterlenmiş durumda yaklaşık 900 N / mm²'ye kadar veya ısıl işlem veya sinter sertleştirmeden sonra yaklaşık 1200 N / mm²'ye kadar UTS

(Maksimum çekme dayanımı) seviyeleri sağlayabilir. Bu preslenmiş ve sinterlenmiş malzemeler aynı zamanda sinterlenmiş olarak 480 N / mm²'ye kadar veya ısıl işlem veya sinter sertleştirmeden sonra yaklaşık 1200 N / mm²'ye kadar gerilmesi seviyeleri sağlayabilir. Sıkıştırma akma gerilmeleri, sinterlenmiş yaklaşık 510 N / mm²'ye kadar veya ısıl işlem görmüş yaklaşık 1250 N / mm²'den biraz daha yüksektir. Bununla birlikte, bu çok önemli mukavemet seviyelerine, oldukça düşük gerilme sünekliği seviyeleri eşlik etmektedir (% 2'nin altındaki uzama seviyeleri oldukça tipiktir). Toz dövülmüş çelikler, daha yüksek seviyelerde yüksek mukavemet seviyeleri (dövme olarak yaklaşık 950 N / mm² ve 2050 N / mm² ısıl işlem görmüş olarak UTS; dövme olarak yaklaşık 650 N / mm² ve 1760 N / mm² ısıl işlem görmüş olarak çekme akma gerilmesi) sağlayabilir süneklik (% 5-18 Uzama).

Paslanmaz çelikler, Pres / Sinter durumunda 300 serisi TM paslanmaz çelikler, yaklaşık 480 N / mm²'ye kadar UTS seviyeleri, yaklaşık 310 N / mm²'ye kadar akma gerilimi sağlayabilir, ancak çok daha fazlasıyla düşük alaşımlı çelik muadillerinden daha yüksek süneklik seviyelerine sahiptir. (>% 10 Uzama). 400 serisi PM paslanmaz çelikler, sinterlenmiş durumda 300 serisi malzemelere benzer özellikler sunabilir. Martensitik kalitelerin ısıl işlemi, mukavemet seviyelerini yaklaşık 720 N / mm² UTS'ye kadar artırabilir ve akma gerilmesi 640 N / mm²'ne çıkabilir, ancak çok daha düşük süneklik (<% 1 Uzama) değerlerine sahip olabilir. Bakır alaşımları, pres ve sinterlenmiş Cu alaşımları nispeten mütevazı mukavemet seviyeleri (yaklaşık 240 N / mm² UTS, 140 N / mm² akma gerilimi) sağlayabilir, ancak demir içeren emsallerinden çok daha yüksek sünekliğe sahip olabilir (10-20 % Uzama). Alüminyum alaşımları, preslenmiş ve sinterlenmiş Al alaşımları, sinterlenmiş olarak yaklaşık 200 N / mm²'ye kadar veya ısıl işlemden sonra yaklaşık 320 N / mm²'ye kadar UTS ve sinterlenmiş olarak yaklaşık 170 N / mm²'ye kadar veya ısıl işlemden sonra yaklaşık 320 N / mm²'ye kadar akma gerilimi sağlayabilir. Ancak oldukça düşük süneklik seviyeleri ile sahip olabilir (% 0,5-2 Uzama). Sinter Toz Metalurjisi çelikleri hem de Toz Dövme çelikler, önemli seviyelerde yorulma mukavemeti sağlayabilir. Sinterlenmiş durumda, Pres / Sinter PM çelikleri, döner bükme yükleme modunda yaklaşık 320 N / mm²'ye kadar ve eksenel yükleme modunda yaklaşık 270 N / mm²'ye kadar yorulma dayanıklılığı limitleri sağlayabilir (R = -1, Kt = 1). Isıl işlem, bu değerleri sırasıyla yaklaşık 540 N / mm² ve 460 N / mm²'ye çıkarabilir.

Toz dövülmüş çelikler, döner bükme yükleme modunda yaklaşık 420 N / mm²'ye kadar ve eksenel yükleme modunda (R = -1, Kt = 1) yaklaşık 360 N / mm²'ye kadar yorulma dayanıklılığı sınırları sağlayabilir. Isıl işlem, bu değerleri sırasıyla yaklaşık 635 N / mm² ve 560 N / mm²'ye çıkarabilir (Ayvacı, 2019; Black, 2017; Elliott, 1988; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

2. 3. TOZ METALÜRJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEJAVANTAJLARI

TM yönteminin avantajları, talaşlı işlemlere minimum ihtiyaç duyarak seri üretim gerçekleştirilebilir. Üretim sonrası minimum malzeme israfı olur (yaklaşık %3) bulunur. Gözeneklilik belli oranda ayarlanabilir. Yüzde yüz yoğunluklu parça üretimi gerçekleştirilebilir. Diğer yöntemlerle üretimi zor bazı malzemeler TM yöntemi ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Seri üretime sağlanabilir. T/M boyut kontrolü bakımından çoğu döküm yönteminden daha üstündür. Yüksek üretim hızlarına sahiptir. Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin imalatı gerçekleştirilebilir. TM yönteminin deavantajları ise ekipmanların maliyeti yüksektir. Parça içerisindeki yoğunluk değişimi istenen karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi zor olabilir. Mukavemeti porozite bulunduğunda, geleneksele göre daha düşüktür. Sadece 20-100gr arası küçük parçalar için ekonomiktir (Ayvacı, 2019; Erden, 2015; İnternet, 2021; Sarıtaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011).

BÖLÜM 3

ÇELİKLER

Çelik günümüzde en yaygın olarak kullanılan malzeme gruplarından biridir. Bunun nedeni doğada diğer metallere göre daha çok bulunan demir esaslı bir malzeme olmasıdır. Üretimde diğer malzeme üretimlerine nazaran daha az enerji gerektirmesi ve özelliklerin istekler doğrultusunda ve geniş sınırlar içerisinde iyileştirilebilmesidir (Erden, 2015; Karabulut, 2015; Köksal, 2021).

Çelik, alternatif malzemeler olmasına rağmen hala başta otomotiv endüstrisi olmak üzere tüm sektörler için önemli malzeme sınıfını teşkil etmektedir. Isıl işlem ile özellikleri değiştirilerek özellikle yüksek dayanım mukavemeti gerektiren yerler başta olmak üzere, inşaat, otomotiv, beyaz eşya, gemi imalatı, sanayinin her kolunda ve birçok diğer alanda insanlığa hizmet verir hale gelmiştir (Erden, 2015; Köksal, 2008; Köksal, 2021).

3.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Toplam sayı muhtemelen 1000'i aşsa da, halihazırda mevcut olan çelik bileşimlerinin ve diğer varyasyonların kesin sayısını belirlemek imkansızdır; bu nedenle herhangi bir sınıflandırma yapılamaz. Bununla birlikte, çelikler genellikle dört gruba ayrılır. Bunlar; Karbon çelikleri, Alaşımli çelikler, Paslanmaz çelikler, özel amaçlı çelikler olarak ifade edilebilir (Ayvacı, 2019; Köksal, 2021; İnternet,2021).

Bunların ilk üçü, Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ve Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından geliştirilen atama sistemleri tarafından tanımlanmıştır. Her bir genel sınıf, her sınıfın tanımlandığı çok sayıda gruba ayrılmıştır. Dördüncü grup, birkaç yüz farklı bileşimden oluşur; çoğu tescillidir. Bu özel çeliklerin çoğu, ilk üç gruptaki belirli çeliklere benzer, ancak ayrı bileşimler olarak işaretlenmek için yeterince farklıdır. Örneğin, SAE-AISI tanımlama sistemi, yaklaşık 60 paslanmaz

çeliği listeler. Bu çeliklere ek olarak (genellikle "standart sınıflar" olarak anılır), standart olmayan 100'den fazla başka bileşim vardır. Her çelik belirli bir uygulama için geliştirilmiştir (Ayvacı, 2019; Köksal, 2021; İnternet,2021).

Çeliklerin bileşime göre sınıflandırılması

Karbon çelikleri

Düşük karbonlu çelikler ($C < \% 0,25$);

Orta karbonlu çelikler ($C = \% 0,25$ ila $\% 0,55$);

Yüksek karbonlu çelikler ($C > \% 0,55$).

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI), Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) ile birlikte dört basamaklı (ek harf önekleriyle) atama sistemi oluşturulmuştur.

SAE 1XXX

İlk rakam 1 karbon çeliğini gösterir (2-9 alaşımlı çelikler için kullanılır);

İkinci rakam çeliğin modifikasyonunu gösterir.

0 - Sade karbon, değiştirilmemiş

1 - Yeniden kükürtlenmiş

2 - Yeniden kükürtlenmiş ve yeniden fosforlanmış

5 - Kükürtlenmemiş, Mn% 1.0'in üzerinde

Son iki hane, % 0.01 olarak karbon konsantrasyonunu gösterir.

Örnek: SAE 1030, % 0,30 karbon içeren değiştirilmemiş karbon çeliği anlamına gelir.

Dört basamaklı sayının önündeki bir harf ön eki, çelik üretim teknolojisini belirtir:

A - Alaşım, temel açık ocak

B - Karbon, asit Bessemer

C - Karbon, temel açık ocak

D - Karbon, asit açık ocak

E - Elektrikli fırın

Örnek: AISI B1020, asit Bessemer'de üretilen ve % 0.20 karbon içeren modifiye edilmemiş karbon çeliği anlamına gelir (Ayvacı, 2019; Köksal, 2021; İnternet,2021).

Alaşımli çelikler

Düşük alaşımli çelikler (alaşım elementleri $\leq 8\%$);

Yüksek alaşımli çelikler (alaşım elementleri $> 8\%$).

Dört basamaklı sınıflandırma SAE-AISI sistemine göre:

İlk rakam, alaşımli çeliğin sınıfını gösterir:

- 2- Nikel çelikler;
- 3- Nikel-krom çelikler;
- 4- Molibden çelikler;
- 5- Krom çelikler;
- 6- Krom vanadyum çelikleri;
- 7- Tungsten-krom çelikler;
- 9- Silikon-manganlı çelikler.

İkinci rakam, ana elementin yüzde cinsinden konsantrasyonunu gösterir (1, % 1 anlamına gelir). Son iki hane, % 0.01 olarak karbon konsantrasyonunu gösterir. Örnek: SAE 5130, % 1 krom ve % 0,30 karbon içeren alaşımli krom çeliği anlamına gelir. Çeliklerin uygulamaya göre sınıflandırılması;

Paslanmaz çelikler için üç basamaklı bir sistem kurmuştur.

2XX serisi - krom-nikel-mangan östenitik paslanmaz çelikler;

3XX serisi - krom-nikel östenitik paslanmaz çelikler;

4XX serisi - krom martensitik paslanmaz çelikler veya ferritik paslanmaz çelikler;

5XX serisi - düşük kromlu martensitik paslanmaz çelikler;

Takım ve kalıp çelikleri:

Takım çelikleri için bir sayı ile birlikte tek harfli tanımlama sistemi kabul edilir.

Harfler şu anlama gelir:

W - Su ile sertleştirilmiş düz karbon takım çelikleri;

O - Yağla sertleşen soğuk iş alaşımli çelikler;

A - Hava ile sertleşen soğuk işlenmiş alaşımli çelikler;

D-Difüze sertleşen soğuk işlenmiş alaşımli çelikler;

- S - Darbelere dayanıklı düşük karbonlu takım çelikleri;
T - Yüksek hızlı tungsten takım çelikleri;
M - Yüksek hızlı molibden takım çelikleri;
H - Sıcak iş takım çelikleri;
P - Plastik kalıp takım çelikleri.

Bu bölümde karbon çelikleri ve alaşımlı çelikler anlatılacaktır.

3.2. KARBON ÇELİKLERİ: ÖZELLİKLER, ÜRETİM, ÖRNEKLER VE UYGULAMALAR

Karbon çeliği, genellikle ağırlıkça % 2,1'e kadar karbon içeren bir demir-karbon alaşımı şeklinde tanımlanmaktadır. Karbonlu çelikler için, diğer alaşım elementlerinin minimum belirlenmiş içeriği yoktur. Maksimum mangan, silikon ve bakır içeriği sırasıyla ağırlıkça % 1,65, ağırlıkça % 0,6 ve ağırlıkça % 0,6'dan az olmalıdır. Karbon çeliği, karbon içeriğine göre üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar, düşük karbonlu çelik (veya hafif karbonlu çelik), orta karbonlu çelik ve yüksek karbonlu çelik şeklinde ifade edilebilir (Black, 2017; Elliott, 1988; İnternet, 2018; İnternet, 2021). Karbon içerikleri, mikroyapıları ve özellikleri aşağıdaki gibi karşılaştırılır:

Çizelge 3.1. Karbon içerikleri, mikroyapıları ve özellikleri (İnternet, 2018).

	Karbon miktarı (% ağırlık)	Mikroyapı	Özellikler	Örnekler
Düşük Karbonlu çelik	< 0,25	Ferrit, perlit	Düşük sertlik ve maliyet. Yüksek süneklik, tokluk, işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik	AISI 304, ASTM A815
Orta Karbonlu çelik	0,25-0,60	Martensit	Düşük sertleşebilirlik, orta güç, süneklik ve tokluk	AISI 409, ASTM A29, SCM435
Yüksek Karbonlu Çelik	0,60-1,25	Perlit	Yüksek sertlik, mukavemet, düşük süneklik	AISI 440C, EN 10088-3

Düşük karbonlu çelik, en yaygın kullanılan karbon çeliğidir. Bu çelikler genellikle ağırlıkça %0,25'ten daha az karbon içeriğine sahiptir. Isıl işleme (martensit oluşturmak için) sertleştirilemezler, bu nedenle bu genellikle soğuk işleme elde edilir.

Karbon çelikleri genellikle nispeten yumuşaktır ve düşük mukavemete sahiptir. Bununla birlikte, yüksek sünekliğe sahiptirler, bu da onları işleme, kaynak ve düşük maliyet için mükemmel kılar (Black, 2017; Elliott, 1988; İnternet, 2018; İnternet, 2021).

Yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı çelikler (HSLA) genellikle düşük karbonlu çelikler olarak sınıflandırılır, ancak bakır, nikel, vanadyum ve molibden gibi başka elementler de içerir. Kombine edildiğinde bunlar, çelik içeriğinin ağırlıkça % 10 'unu oluşturur. Adından da anlaşılacağı gibi yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı çelikler, ısı ile elde edilen dayanımdan daha yüksek mukavemete sahiptir. Ayrıca sünekliği korurlar, bu da onları kolayca şekillendirilebilir ve işlenebilir hale getirir. HSLA, düz düşük karbonlu çeliklere göre korozyona karşı daha dirençlidir. Düşük karbonlu çelikler genellikle otomobil gövdesi bileşenlerinde, yapısal şekillerde (I-kirişler, kanal ve köşebent demiri), borularda, yapı ve köprü bileşenlerinde ve yiyecek kutularında kullanılır (Black, 2017; Elliott, 1988; İnternet, 2018; İnternet, 2021).

Orta karbonlu çelik, ağırlıkça %0,25 - 0,60 karbon içeriğine ve ağırlıkça % 0,60 - 1,65 manganez içeriğine sahiptir. Bu çeliğin mekanik özellikleri, autenitleştirmeyi içeren ısı ile işlem ve ardından su verme ve tavlama yoluyla iyileştirilerek onlara martensitik bir mikroyapı kazandırılır. Isıl işlem yalnızca çok ince kesitlerde gerçekleştirilebilir, ancak çeliklerin ısı ile işleme tabi tutulma ve dolayısıyla sertleşme kabiliyetini iyileştirmek için krom, molibden ve nikel gibi ek alaşım elementleri eklenebilir. Sertleştirilmiş orta karbonlu çelikler, düşük karbonlu çeliklerden daha fazla dayanıma sahiptir, ancak bu, süneklik ve tokluk pahasına gelir. Orta karbonlu çelikler, yüksek mukavemetlerinin, aşınma ve tokluğun bir sonucu olarak, bu özelliklerin kombinasyonunu gerektiren demiryolu rayları, tren tekerlekleri, krank milleri ve dişliler ve makine parçaları için sıklıkla kullanılır (Black, 2017; Elliott, 1988; İnternet, 2018; İnternet, 2021).

Yüksek karbonlu çelik, ağırlıkça %0,60-1,25 karbon içeriğine ve ağırlıkça%0,30-0,90 manganez içeriğine sahiptir. Karbonlu çelikler arasında en yüksek sertliğe ve tokluğa ve en düşük süneklığe sahiptir. Yüksek karbonlu çelikler, neredeyse her zaman sertleştirilmiş ve temperlenmiş olmaları nedeniyle aşınmaya karşı çok dayanıklıdır.

Takım çelikleri ve kalıp çelikleri, krom, molibden ve tungsten gibi ek alaşım elementleri içeren yüksek karbonlu çelik türleridir. Bu elementlerin eklenmesi, tungsten karbür (WC) gibi karbür bileşiklerinin oluşumunun bir sonucu olan çok sert aşınmaya dayanıklı çelikle sonuçlanır. Karbon çeliği, geri dönüştürülmüş çelikten, işlenmemiş çelikten veya her ikisinin kombinasyonundan üretilebilir. Yüksek aşınma direnci ve sertlikleri nedeniyle, yüksek karbonlu çelikler kesici takımlarda, yüksek mukavemetli tel yaylarında ve kalıplarda kullanılır. Çeşitli karbonlu çeliklerin örnekleri, özellikleri ve uygulamaları aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır (Black, 2017; Elliott, 1988; İnternet, 2018; İnternet, 2021) (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Çeşitli karbonlu çeliklerin özellikleri ve uygulamaları (İnternet, 2021).

Çeşit	AISI/ ASTM ismi	Karbon miktarı (% ağı.)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Süneklilik (50 mm'de % uzama)	Kullanı m yerleri
Düşük	1010	0.10	325	180	28	Otomobil paneller, çiviler, tel
Düşük	1020	0.20	380	205	25	Borular, yapısal çelik, çelik sac
Düşük	A516 Grade 70	0.31	485	260	21	Düşük sıcaklıklı basınçlı kaplar

Orta	1030	0.27 – 0.34	460	325	12	Makine parçaları, dişliler, vitesler, akslar, cıvatalar
Orta	1040	0.37 – 0.44	620	415	25	Krank milleri, kaplinler, soğuk başlı parçalar
Yüksek	1080	0.75 – 0.88	924	440	12	Müzik kablosu
Yüksek	1095	0.90 – 1.04	665	380	10	Yaylar, kesici aletler

Çizelge 3.2. Devam ediyor.

3.4. ALAŞIM ELEMENTLERİ

3.4.1. Niyobyum (Nb)

Niyobyum çökelme sertleşmesi yoluyla akma mukavemetinde artış sağlar. Yapı içerisinde çökelen NbC miktar ve boyutu artış miktarını belirler. Niyobyum östenit yapıda küçük çökelti oluşumlarıyla düşük sıcaklık tokluğunun elde edilmesini sağlar. Fakat uygulamada niyobyumkarbonitrürleri östenitleştirmede çözünmeden kaldığından sınırlı oranda alaşımlandırılır. Niyobyum, vanadyuma göre daha etkili bir tane küçültücü element olup mukavemet artırıcı etki yapmaktadır. Aynı zamanda niyobyum yeniden kristalleşmeyi geciktirir. 0.04 Nb miktarında tane küçültme etkisi en yüksek seviyededir. Bu miktar Nb alaşımında tokluk maksimum seviyededir (Çeviker, 1991; Karabulut, 2011).

3.4.2. Alüminyum (Al)

Çeliklerde deoksidasyon işlemi ortamdan oksijeni uzaklaştırma işlemidir. Alüminyum kuvvetli bir deoksidandır ve uygulamalarda deoksidan olarak kullanılır. Saf

alüminyumda mikromekanik özellikler düşüktür ve çinko, magnezyum, bakır, mangan, silisum gibi elementlerin eklenmesiyle bu özellikleri iyileştirilir. Alüminyum alaşımları yüksek dayanım istenip, ağırlıkça da hafiflik istendiği durumlarda tercih edilir. Uzay ve uçak araçlarında tercih edilme sebebi dayanım/ağırlık oranlarıdır. Alüminyum nitrür çökeltisi oluşturur (Erden, 2015; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011).

3.4.3. Karbon (C)

Tüm çeliklerin asıl elementi olan karbon üretim esnasında yapı içerisindeki yerini alır ve tüm mekanik özellikleri etkileyen en önemli etkendir. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. Çelikten istenen özelliğe göre karbon miktarı belirlenir. S 235 jr (KARDEMİR ST-37) çelikten istenen özellik yumuşaklık ve kolay şekil verilebilirliktir ve karbon miktarı 0.17-0.23 arasındadır ve düşük tutulur. S 420 çelik ise Türkiye standartlarında inşaat çeliği olarak kullanılır ve akma mukavemeti ve çekme mukavemet değerleri yüksektir. (Erden, 2015; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011).

Çelikler karbon miktarına göre 3'e ayrılır. Düşük karbonlu çelikler 0.2 C'a kadar karbon bulunduran çeliklerdir. Mekanik özellikleri göz önüne alındığında yumuşak çelikler olarak adlandırılır. Sertleştirilebilme özellikleri iyi değildir. Soğuk deformasyon ile kısmen sertleşebilirken, süneklikleri bozulur. Sementasyon ve nitrürleme ile sert yüzey yumuşak içyapı istenen parçalarda kullanılır. Haddeleme, dövme, preste şekil verme, derin çekme işlemlerinde tercih edilir. Orta karbonlu çelikler 0.2C - 0.5C arasında karbon içeren çeliklerdir. Bu grupta bulunan çelikler ısı ile istenen sertlik değerlerine ulaşabilirler. İşlenebilme ve şekil alabilme özellikleri düşük karbonlu çeliklere nazaran daha düşüktür. Genellikle makine parçaları, civata, somun, dingil, gemi şaftı, uskur mili, dişli çark, transmisyon mili, frezeli mil, yük kancası, manivela kolu, ray, kazma, kürek gibi araç gereçlerin yapımında kullanılırlar. Yüksek karbonlu çelikler ise 0.5 C üzerinde karbon içeren çeliklerdir. Yüksek mukavemetli ve az sünekliği olan malzemelerdir. Buna karşın yüksek aşınma direnci ve kesici özelliğe sahiptirler. Bu sebepten yüksek mukavemet ve aşınma direnci istenen durumlarda kullanılırlar (Erden, 2015; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011, İnternet, 2021).

Düşük karbonlu çeliklerde gözlenen en önemli sorun mavi gevrekliktir. Mavi gevreklik düşük karbonlu çeliklerde 270-300 °C derecelerde şekillendirme işleminde küçük çaplı karbon ve azot atomları yayınarak dislokasyonları kilitleyerek akma sınırı noktasına yükseltir ve malzeme gevrek davranır. Mavi gevreklik terimi çeliğin aldığı mavi renkten gelmektedir (Erden, 2015; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011, İnternet, 2021).

3.4.4. Nikel (Ni)

Nikel alaşımlı kompozit malzemeler günümüz koşullarında üzerine çalışmalar yapılan önemli bir alandır. Nikel alaşımlı malzemeler uçak ve gaz türbinleri, roket motorları, nükleer reaktörler, buhar üretme kazanları, kesici takımlar, deniz altılar, cam sanayii gibi her türlü sanayi dalı içinde kullanılır ve gelişmeye devam etmektedir.

Demir esaslı malzemelerde nikel kromla kullanıldığında sertliğin derinliğe kadar inmesinde kullanılır. Krom-nikel esaslı paslanmaz çelikler kabuklaşma ve ısıya karşı dayanımlıdır. Düşük sıcaklıklarda makine yapım çeliklerinin çentik dayanımını artırır. İstenen özellikler içerisinde paslanmaya dayanım ve kabuklaşmama ise nikel kullanım için en uygun elementtir.

Ferrit fazında sertleşme özelliği ile dayanım artırır ve tokluk üzerinde olumlu etkileri vardır. Düşük alaşımlı çeliklerde dayanım ve sertlik arttırmak için sıkça kullanılır (Ayvaci, 2019; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011, İnternet, 2021).

3.4.5. Molibden (Mo)

Krom ve nikel alaşımlı çeliklerde kullanılan molibden çelik akma ve çekme dayanımlarını artırır. Uygulanan kuvvet altında % uzamasını ve elastisiteyi düşürür. Molibden içerikli çeliklerde tav dayanımı artar ve çelik yapıda gevrekliği azaltır. Molibden çeliklerde sürünme direncini ve aşınma direncini yükseltir. Alaşımlı takım çeliklerinde de önemli bir alaşım elementidir.

Molibden uygulamaları çelik yapıların vuruntulu yerlerde çalışmaya uygunluğunu ortaya koymuştur. Uçak ve yer taşıtları motorları ile imalat sektörü çeliklerinde sıklıkla tercih edilir. Oyuklanma korozyonu metal yüzeyin bazı noktalarında çukur şeklinde görülen bir korozyon türüdür. Oyuklanma korozyonu genellikle pasifleşebilen metaller olarak nitelenen paslanmaz çelik alaşımlarında görülür ve değişik oyuk yapılar olarak kendini gösterir. Bu tür korozyonların önlenmesinde önemli bir engelleyici olduğu için paslanmaz çelik uygulamalarında tercih edilir (Ayvacı, 2019; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011, İnternet, 2021).

3.4.6. Manganez (Mn)

Mangan çelik yapıda sertleşebilme ve kaynak edilebilme özelliklerini iyileştirir ve östenit yapıyı kararlaştırır. Mangan kükürt ile MnS bileşimi yapar ve FeS bileşimini engeller ve kırılganlığın önüne geçer.

Manganez çeliklerin yapısını kabalaştırır ve ısı işlemlere karşı hassaslaştırır. Çeliklerin çekirdeğe kadar sertleşmesini sağlar ve yağ çelikleri olarak adlandırılır. Manganez çelik yapısında % 12-13 oranında bulunduğu östenit çeliklerdir. Aşınmaya karşı büyük direnç gösterirler. Kesme ve işlemeye karşı dirençleri yüksek olur. Yüksek mangan içeren çeliklerden tüm bu özellikleri sebebiyle kasalar ve hapisane parmaklıkları imal edilmektedir (Ayvacı, 2019; Çeviker, 1991; Karabulut, 2011, İnternet, 2021).

3.4.7. Tungsten (W)

Kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Oluşan bu karbürler çok sert olur ve tokluğu iyileştirir. Yüksek sıcaklıklarda aşınma direncini artırır. Sıcak iş kalıp çelikleri, yüksek hız çelikleri, en yüksek sertlikteki elmas çelikleri gibi bir çok çelik grubunda kullanılır. Yüksek hız çeliklerinde sıklıkla % 20'ye ulaşan oranlarda kullanılır (Köksal, 2021).

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

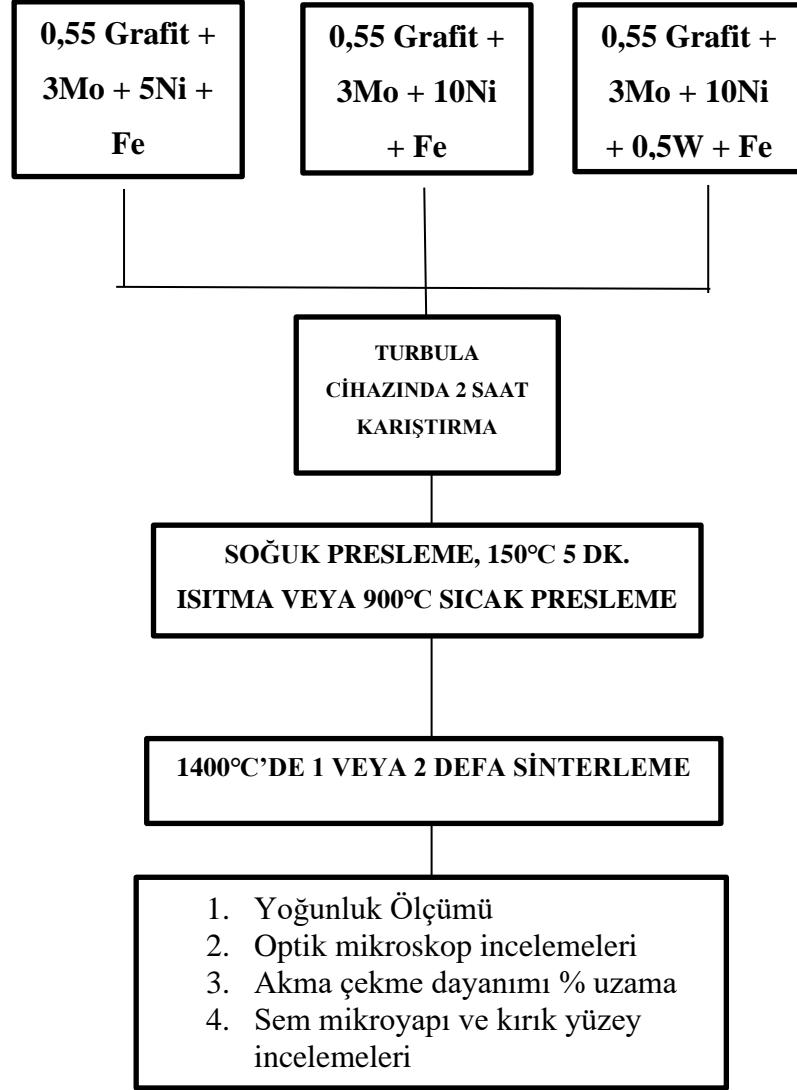
4.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, molibden, nikel ve tungsten içeren çelik numuneler TM yöntemi ile istenilen bileşimlerde üretilmiştir. Farklı kompozisyonlarda karıştırılan tozlar soğuk, ılık ve sıcak presleme teknikleri ile preslenip ve sinterleme işlemi yapıp üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin mekanik özelliklerindeki değişim mikroyapısal değişime bağlı olarak açıklanmıştır.

Bölüm 4.2’de deneysel çalışmanın işlem basamakları, bölüm 4.3’te tozların karıştırma işlemi ve farklı presleme tekniklerinin uygulanması, bölüm 4.4’de sinterleme aşamaları, bölüm 4.5’de çekme testinin uygulanışı, bölüm 4.6’da Mikroyapı ve kırık yüzey incelemeleri, bölüm 4.7’de yoğunluk ölçümleri açıklanmıştır. Çekme testleri Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. SEM deneyleri Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, Margem laboratuvarlarında yapılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri ise Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN İŞLEM BASAMAKLARI

Deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları Şekil 5.1’de görülmektedir. Üretim aşamaları klasik olarak karıştırma, presleme, sinterleme ve karakterizasyon işlemleri şeklinde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları.

4.3. TOZLARIN KARIŞTIRILMASI VE SIKIŞTIRILMASI

Çizelge 4.2'de belirtilen kimyasal kompozisyonlarda çelik üretimi için gerekli olan tozların özellikleri ve temin edilen firma isimleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tozlar ve Özellikleri.

	Elementel Tozlar	Toz Boyutu (µm)	% Saflık Değeri	Temin Edilen Firma
1	Demir	<150	99,9	Sintek
2	Karbon	10-20	96,5	Sintek
3	Bakır	<75	99	Aldrich
4	Nikel	<150	99,9	Aldrich
5	Molibden	<150	99,9	Aldrich
6	Tungsten	<75	93	Aldrich

Çizelge 4.1’de belirtilen tozlar, Çizelge 4.2’de belirtilen kompozisyonlarda karıştırılarak Mo-Ni çeliği ve Mo-Ni-W çeliği üretimi gerçekleştirilmiştir.

Karıştırma işlemi öncesinde tozlar RADWAG marka hassas terazide Çizelge 4.2.’de yüzde ağırlık olarak verilen kompozisyonlarda 1/10000 hassasiyetinde tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Tartımı yapılan tozlar üç eksenli karıştırıcı ile 120dk süreyle bilyesiz olarak karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 4.2. Alaşımli TM çeliklerin kimyasal kompozisyonları.

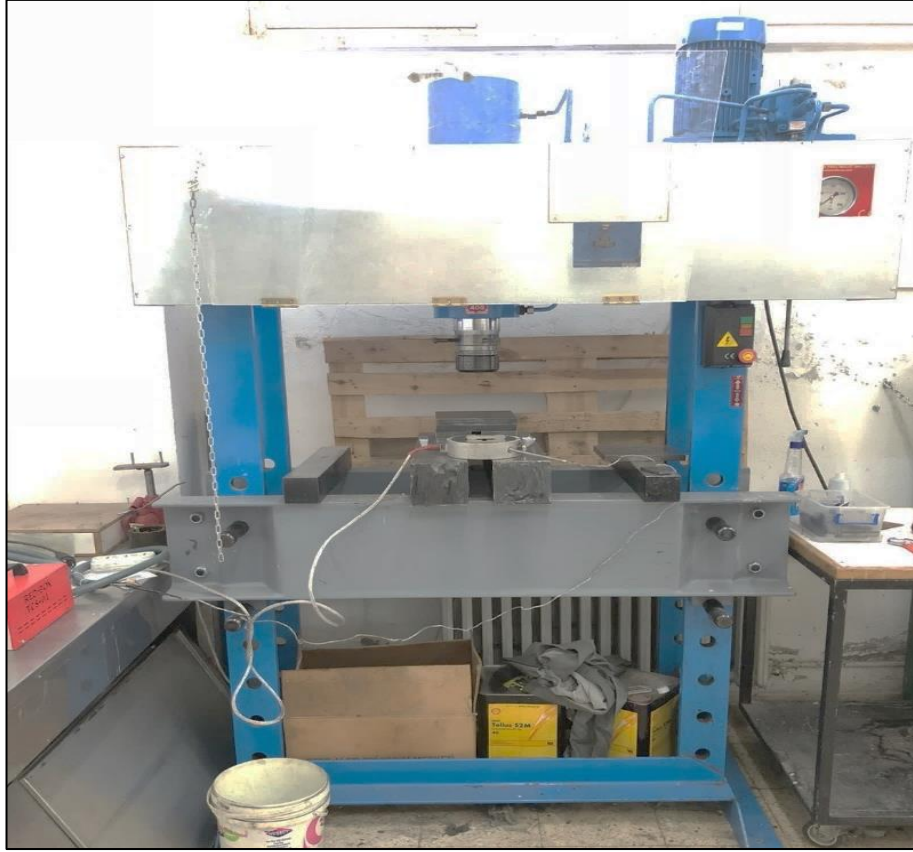
Bileşen	Grafit (%ağ.)	Mo (%ağ.)	Ni (%ağ.)	W (%ağ.)	Demir (%ağ.)
Fe+0,55Grafit+3Mo+5Ni (Alaşım 1)	0,55	3	5	-	Geri Kalanı
Fe+0,55Grafit+3Mo+10Ni (Alaşım 2)	0,55	3	10	-	Geri Kalanı
Fe+0,55Grafit+3Mo+10Ni+0,5W (Alaşım 3)	0,55	3	10	0,5	Geri Kalanı

Hazırlanan tozların preslenme işlemi, soğuk veya 150°C’de 15 dakika ılık presleme işlemine tabi tutularak gerçekleştirilmiştir. Soğuk ve ılık presleme işlemine tabi tutulan

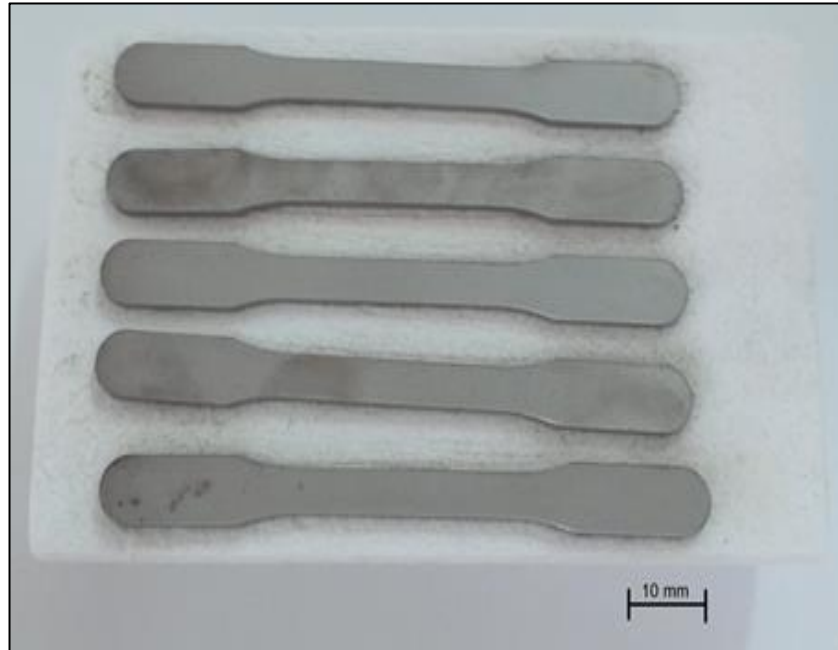
numuneler 96 ton kapasiteli Hidroliksan marka hidrolik preste ASTM (E8M) toz metal malzeme standartlarına göre imal edilen kalıp ile çekme numunesi şeklinde 750 MPa presleme basıncında tek yönlü olarak yapılmıştır (Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).



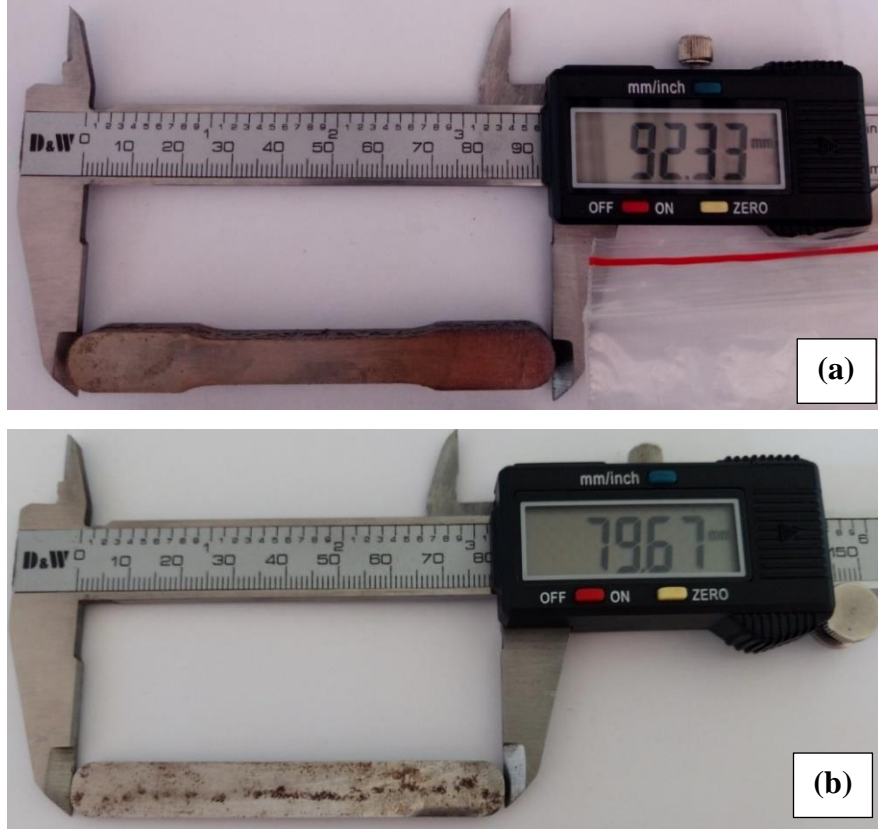
Şekil 4.2. Tez çalışması için kullanılan cihazlar a) hassas terazi, b) hidrolik pres ve üç eksenli karıştırıcı.



Şekil 4.3. Hidrolik preste oluşturulan ılık presleme prosesi.



Şekil 4.4. Soğuk presleme sonrası çekme numunelerinin görüntüsü.



Şekil 4.5. Ilık (a) ve Sıcak presleme (b) sonrası çekme numunelerin görüntüsü.

Sıcak presleme işlemi ise 25 ve 33 MPa presleme basıncında grafit kalıpta maksimum 1000°C sıcaklıkta çalışabilen grafit kalıpta maksimum 45 MPa presleme basıncı uygulanabilen MSE HP_1200 Sıcak Presleme Cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Sıcak presleme cihazı.

4.4. SİNERLEME İŞLEMLERİ

Sinterleme işlemi Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Metalürji laboratuvarında bulunan 1600 °C maksimum kapasiteli Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü boru fırında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi argon sirkülasyonunda seramik tüp fırın içerisinde dakikada 5 °C hızda 1400°C sıcaklığa ulaştıktan sonra bu sıcaklıkta 1 saat bekledikten sonra yine dakikada 5°C hızla soğutma ilemi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7 sinterleme aşamasında kullanılan atmosfer kontrollü fırını göstermektedir.



Şekil 4.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın.

4.5. NUMUNELERE ÇEKME DENEYİNİN UYGULANMASI

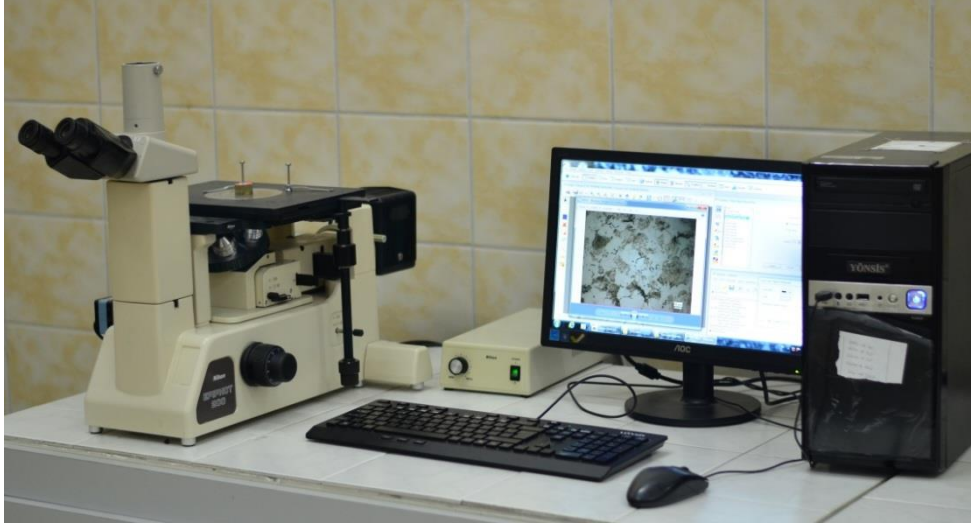
Üretilen numuneler, SHIMADZU AG-IS marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazında 1 mm/dak çekme hızında çekilerek koparılmışlardır. Şekil 4.8’de SHIMADZU AG-IS marka çekme test cihazı görülmektedir.



Şekil 4.8. Deneysel çalışmalarda kullanılan çekme cihazı.

4.6. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMERİ

Mikroyapı incelemeleri, Epiphot 200 Nikon marka optik mikroskopta 200X ve 500X büyütmelemlerde numunelerin değişik bölgelerinden görüntüler alınarak gerçekleştirilmiştir. SEM mikroyapı ve kırık yüzey incelemeleri ise CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka cihazda KBÜ MARGEM Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).



Şekil 4.9. Epiphot 200 Nikon Marka Optik Mikroskop.



Şekil 4.10. Deneysel çalışmada kullanılan SEM cihazı.

Bu çalışmada argon atmosferinde sinterlenmiş numunelerin mikroyapısını incelemek için optik mikroskop kullanılmıştır. Farklı bileşime sahip numuneler polisaj cihazı ile 240 meslik zımpara kağıdından başlayarak 2500 meshe kadar zımparalanmıştır. Parlatma işlemi ise parlatma keçesinde 1-3 ve 6µm boyutlarına sahip elmas pasta aşındırıcısıyla parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Parlatma işlemleri Şekil 4.11' de resmi verilen Mecapol P262 marka parlatma cihazında 200 dev/dk hız

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parlatma işleminin hemen ardından yüzey Alkol ile yıkanıp kurutulduktan sonra dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.11. Mecapol P262 marka parlatma cihazı.

Dağlamaya hazır hale getirilen numunelerin dağlama işlemi metanol içerisinde %2 nital çözeltisi içerisinde daldırılarak 5-8 saniye bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenip kurutulmuş ve ardından optik mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir.

4.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin yoğunluk ölçümleri, RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazinin yoğunluk ölçüm kiti ile Archimets prensibine göre yapılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazinin yoğunluk kiti.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

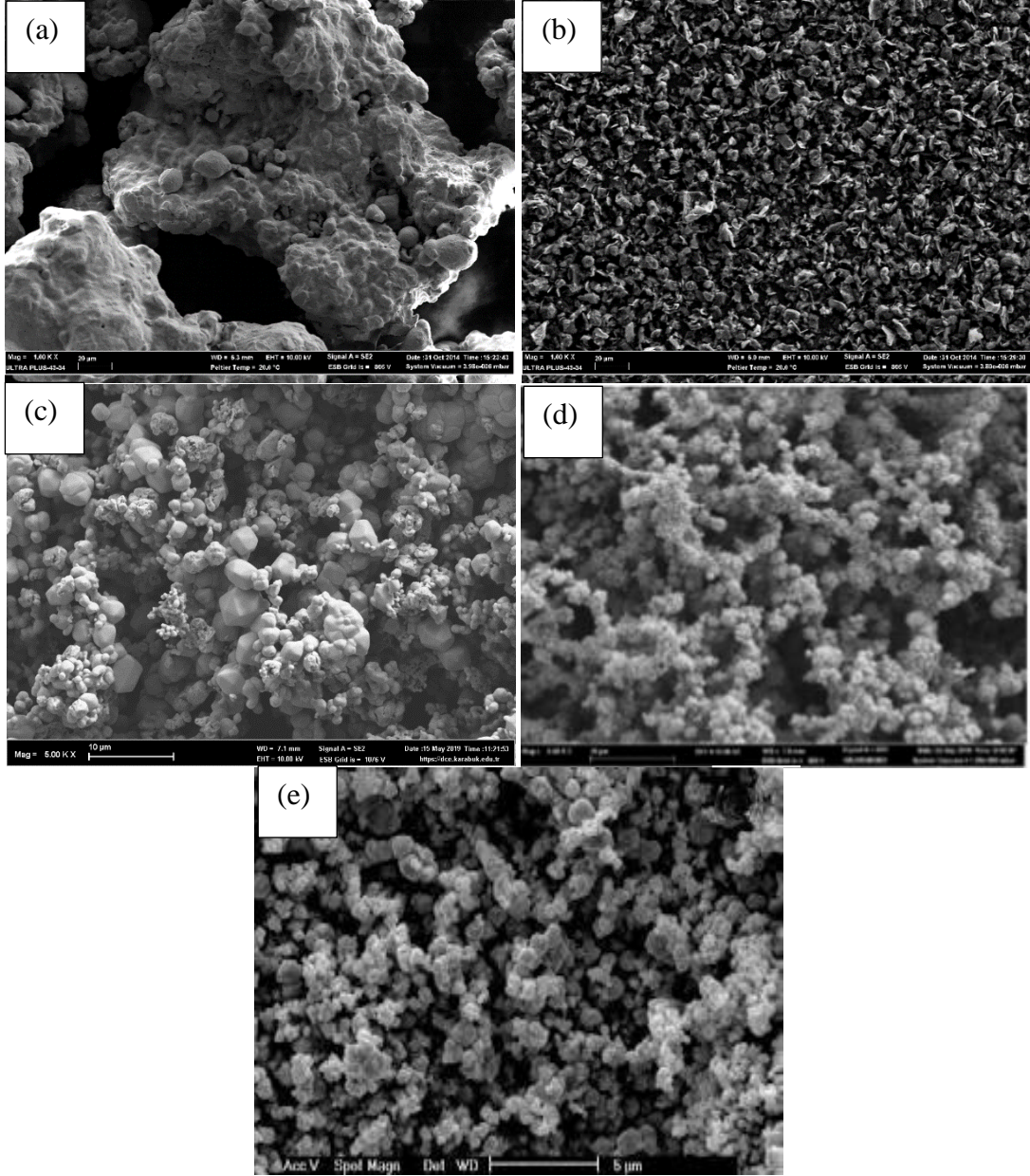
5.1. GİRİŞ

Bu bölüm farklı kompozisyonlarda farklı presleme basıncı ve soğuk, ılık ve sıcak presleme ile preslenmiş, argon atmosferinde sinterlenmiş olan alaşımlı numunelerin deneysel sonuçlarını içermektedir. Bölüm 5.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan tozların karakterizasyonu analiz edilirken Bölüm 5.3’de TM numunelerin mikroyapı, gözeneklilik oranı ve yoğunluk sonuçları verilerek değerlendirilmiştir. Bölüm 5.4’te sinterlenmiş olan alaşımsız ve Mo-AISI 4140 çelik numunelerin çekme sonuçları verilerek tartışılmıştır. Üretilen çeliklere ait SEM görüntüleri, SEM EDS analiz sonuçları, Bölüm 5.5 ’de tartışılmıştır.

5.2. TOZ KARAKTERİZASYONU

1400 °C’de sinterlenmiş olan çelik numunelerin üretiminde kullanılan tozların genelini yansıtan alansal bir kesiti göstermektedir.

Matris olarak kullanılan demir tozlar Şekil 5.1(a)’da görüldüğü gibi çoğunlukla düzensiz şekillidir. Şekil 5.1(b)’de görülen grafit tozu pulsu yapıdadır. Takviye elemanı olarak kullanılan nikel, molibden ve tungsten tozları birbirine benzer şekilde Şekil 5.1(c, d, e)’de görüldüğü gibi genel olarak keskin köşeli ve düzensiz bir geometriye sahiptir. Ayrıca, toz boyutları ve saflık yüzdeleri Çizelge 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan tozların SEM resimleri; (a) Fe ($\leq 180 \mu\text{m}$, 1000x, büyütme), (b) grafit ($< 20 \mu\text{m}$, 1000x büyütme), (c) Mo ($< 150 \mu\text{m}$, 5000x büyütme), (d) Ni ($44 \mu\text{m}$, 2000x büyütme), (e) W ($42 \mu\text{m}$, 2000x büyütme)

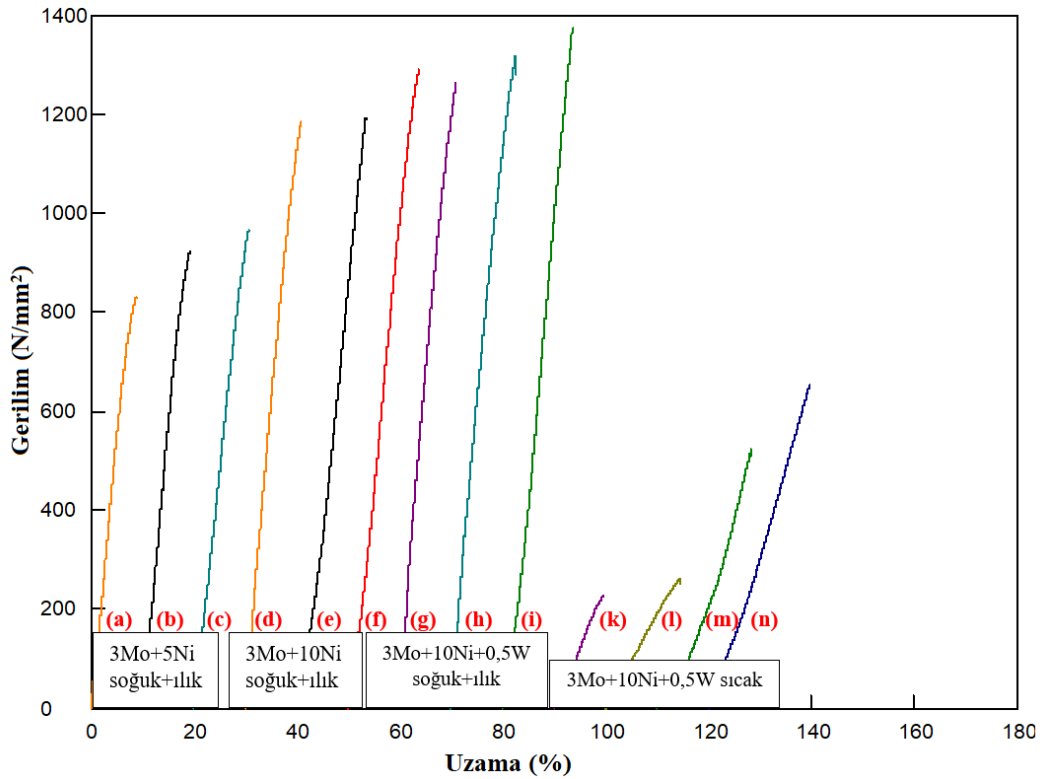
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların boyut ve % saflık değerleri.

Tozlar	Grafit	Fe	Ni	Mo	W
Toz Boyutu (μm)	10-20	< 150	44	< 150	< 75
Saflık Değeri (%)	96,5	99,9	99,5	99,9	99

Deneysel çalışmada tozlar öğütme veya atomize yöntemiyle küçük parçacık boyutlarına getirilerek toz haline getirilmiştir. Demir ise su atomize yöntemiyle toz haline getirilmiştir. Hidrojenle indirgeme ve öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5.1.'de demir tozunun X2000 büyütülmüş SEM görüntüsü incelendiğinde topaklanma ve uydulaşma görülmektedir. Ayrıca grafit tozlarının pulsu şekilde olduğu görülmüştür. Nikel, molibden ve tungsten tozları hidrürleme, öğütme ve vakum altında hidrojeni giderme işlemi sonucu köşeli parçacık şeklini almıştır. Mo ve W hidrojene maruz kaldığında gevrekleşir ve öğütme sonrası, hidrojen malzemedan uzaklaştırılabilir.

5.2. ÇEKME TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Soğuk, ılık ve sıcak presleme ve farklı sinterleme prosesleri uygulanmış TM çelik numuneler 1mm/dk çekme hızı uygulanarak koparılmıştır. Bu numunelerden elde edilen çekme grafikleri Şekil 5.2'da gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 5.2'de TM çelik numunelerinin çekme dayanımı ve % uzama değerleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Farklı presleme ve sinterleme prosesleri uygulanmış alaşımli çeliklerin çekme eğrileri (a) Alaşım 1 soğuk presleme+1400°C sinterleme, b) Alaşım 1 ılık presleme+1400°C sinterleme, c) Alaşım 1 ılık presleme+2

defa 1400°C Sinterleme, d) Alaşım 2 soğuk presleme+1400°C sinterleme, e) Alaşım 2 ılık presleme+1400°C sinterleme, f) Alaşım 2 ılık presleme+2 defa 1400°C Sinterleme, g) Alaşım 3 soğuk presleme+1400°C sinterleme, h) Alaşım 3 ılık presleme+1400°C sinterleme, i) Alaşım 3 ılık presleme+2 defa 1400°C Sinterleme, k) Alaşım 3 25 MPa sıcak presleme, l) Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme, m) Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme+ 1400°C sinterleme ve n) Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme+ 2 defa 1400°C sinterleme).

Çizelge 5.2. Farklı presleme ve sinterleme prosesleri uygulanmış alaşımlı çeliklerin çekme (UTS), % uzama değerleri.

Bileşenler	Mak. Çekme (N/mm²)	Mak. Uzama (%)
Alaşım 1 soğuk presleme+1400°C sinterleme	836	8,9
Alaşım 1 ılık presleme+1400°C sinterleme	924	9,3
Alaşım 1 ılık presleme+2 defa 1400°C Sinterleme	969	10,7
Alaşım 2 soğuk presleme+1400°C sinterleme	1187	10,9
Alaşım 2 ılık presleme+1400°C sinterleme	1197	13,5
Alaşım 2 ılık presleme +2 defa 1400°C Sinterleme	1294	13,8
Alaşım 3 soğuk presleme+1400°C sinterleme	1266	11,1
Alaşım 3 ılık presleme+1400°C sinterleme	1321	12,5
Alaşım 3 ılık presleme + 2 defa 1400°C Sinterleme	1378	13,7
Alaşım 3 25 MPa sıcak presleme	231	9,7
Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme	264	14,5
Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme+ 1400°C sinterleme	528	18,4
Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme+ 2 defa 1400°C sinterleme	656	19,8

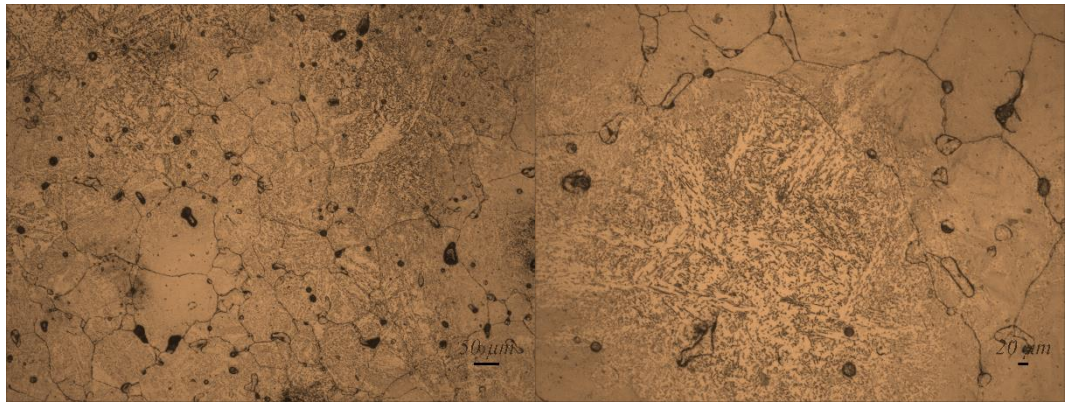
Çizelge 5.3 ve Şekil 5.2’de grafiklerde görüldüğü gibi genel olarak Fe-Grafit-molibden ana matrisi bileşimine nikel ve tungsten ayrı veya bir arada ilavesinin etkisi çekme dayanımlarında ve % uzama değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu artışın nedeni Ni elementi ilavesi ile yapıdaki beynit, martenzit gibi sert fazlarının yoğunluğunun artması ve W elementinin ilavesi ile WC(N), MoC(N) ve WMoC(N) gibi çökeltilerin matris ve tane sınırlarında sinterleme sırasında ve sonrasında oluşması ile çökelti sertleşmesi, kümeleşme sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mukavemet artırıcı mekanizmaları ile dayanım artışı gözlenmiştir. Nitekim Özdemir vd. (2016), Erden (2015) ve Erden vd. (2016) yaptıkları çalışmalarda V ve

Ti gibi mikroalaşım elementi ilave ederek TM çelik üretimi gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri sonuçlar incelendiğinde mikroalaşım elementi ilavesi ile üretilen malzemelerin akma, çekme ve sertlik dayanımlarında artış, tane boyutunda düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebini sinterleme sırasında ve sonrasında oluşan NbC(N), VC(N) ve TiC(N) gibi mikroalaşım elementlerinin oluşturduğu çökeltilerin östenit tanelerinin büyümesini engellemesi olarak ifade etmektedirler. Ayrıca oluşan bu çökeltilerin çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mekanizmaları ile dayanım artışına neden olduğu ifade edilmiştir.

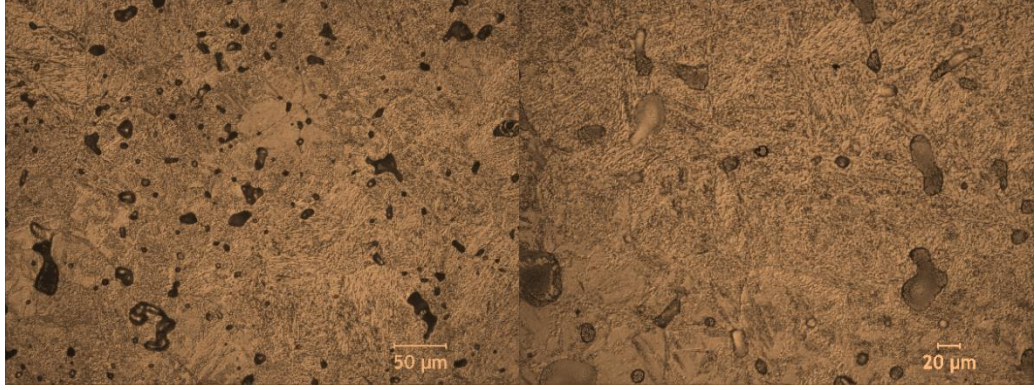
Ayrıca çizelge 5.3 incelendiğinde presleme tekniğinin değişmesi ile soğuk ve ılık presleme karşılaştırıldığında ılık preslenmiş numunelerin mekanik özellikleri daha iyi çıkmıştır. Ilık preslemede çekme dayanımı ve % uzama değerlerinin iyi çıkmasının sebebi yoğunluk değerlerindeki genel artıştan ve gözenek miktarlarındaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Genel olarak bu değişimler mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir.

5.3. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

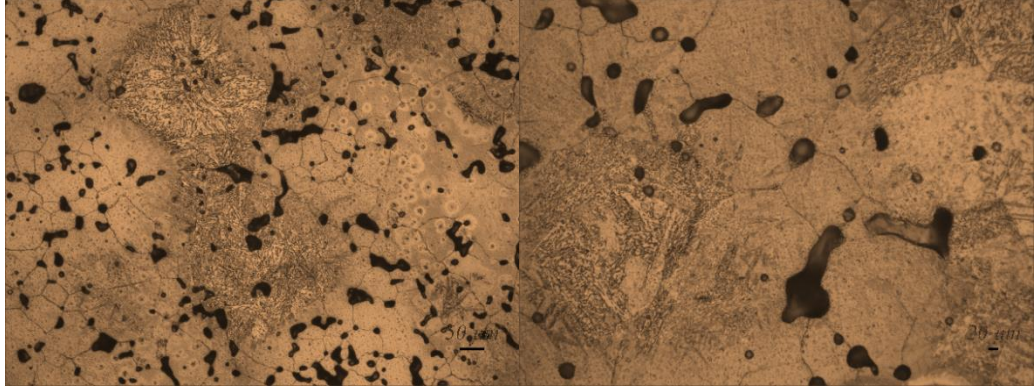
Soğuk, ılık ve sıcak presleme ve farklı sinterleme prosesleri uygulanmış TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Mikroyapı resimlerinden W ve Ni ayrı ayrı ve birlikte ilavesi ile yapının beynit, martenzit ve kalıntı östenit fazlarının oluştuğu düşünülmektedir.



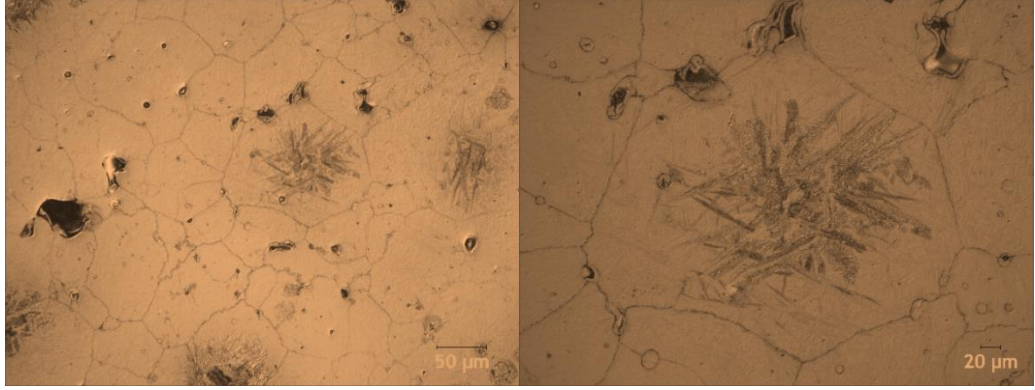
0,55C-3Mo-5Ni-Fe soğuk presleme (200x-500x)



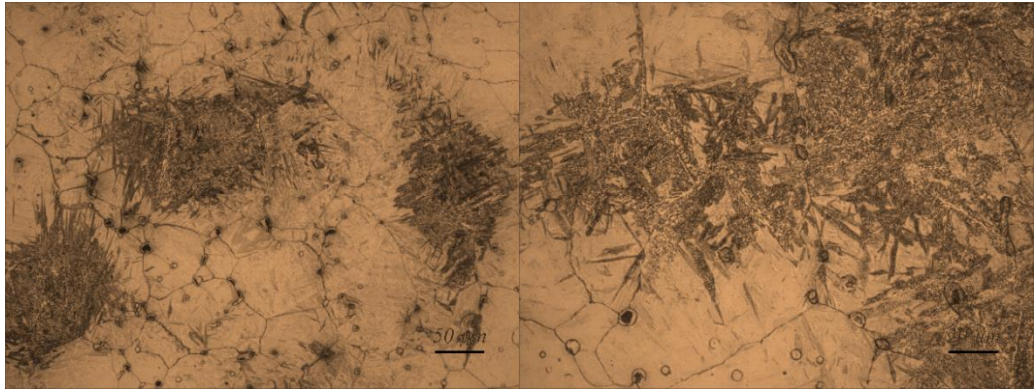
0,55C-3Mo-5NiFe 150°C ılık presleme (200x-500x)



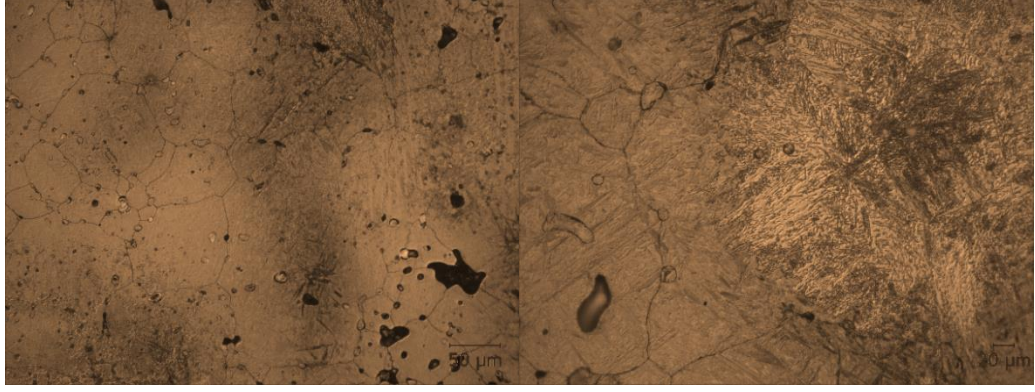
0,55C-3Mo-10Ni-Fe soğuk presleme (200x-500x)



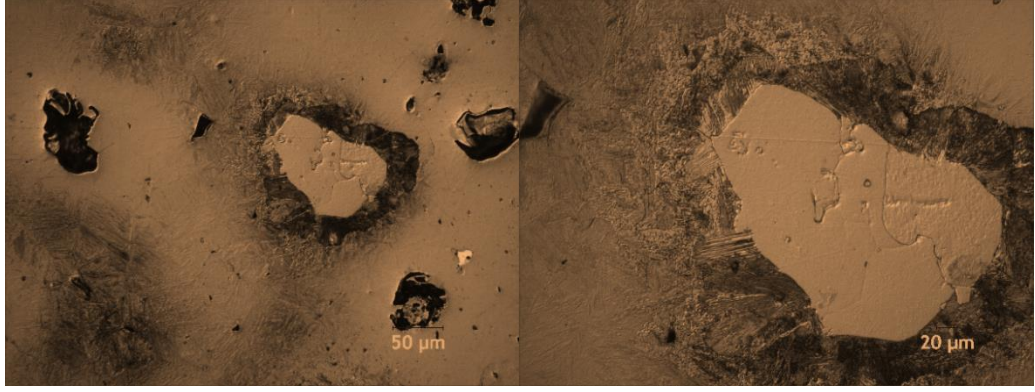
0,55C-3Mo-10Ni-Fe 150°C ılık presleme (200x-500x)



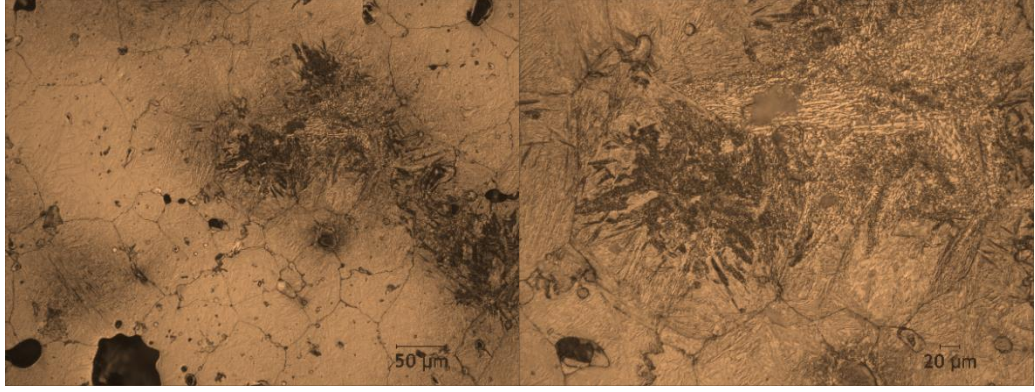
0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe soğuk presleme (200x-500x)



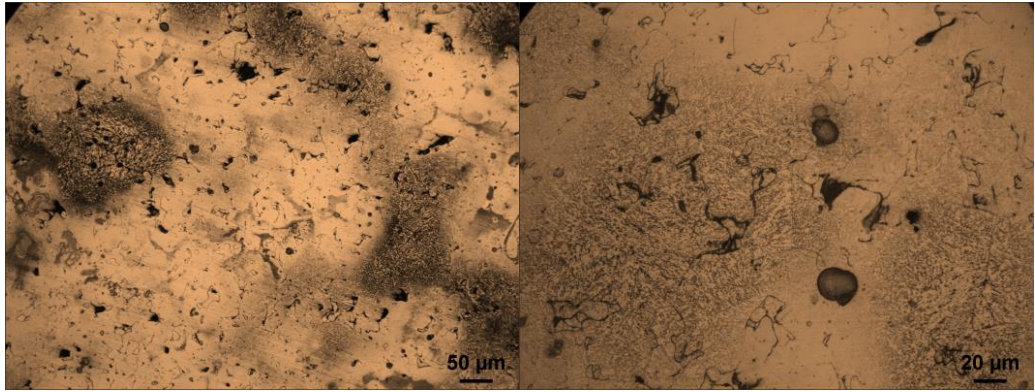
0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe 150°C ılık presleme (200x-500x)



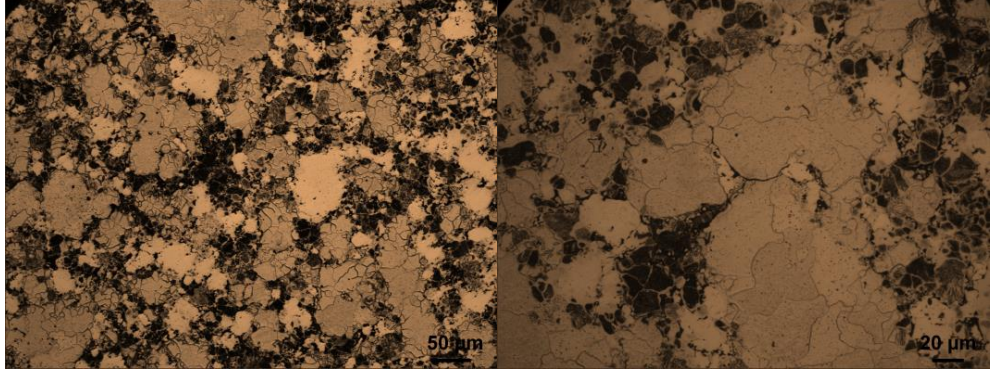
0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe 150°C ılık presleme 1400°C 1.sinter (200x-500x)



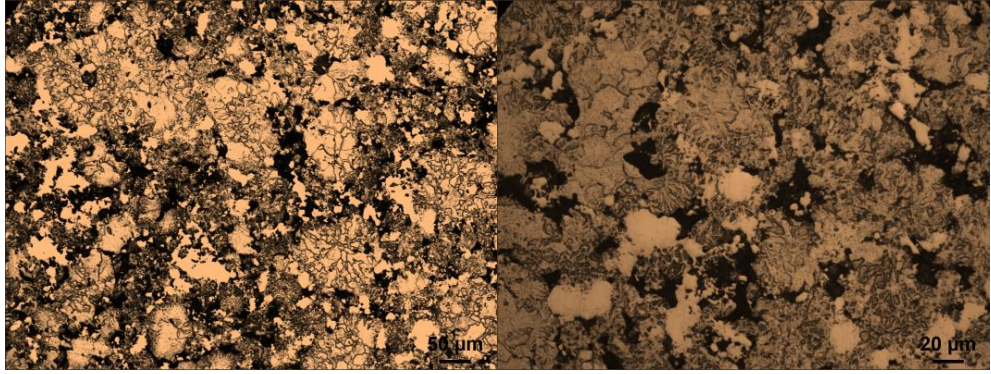
0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe 150°C ılık presleme 1400°C 2.sinter (200x-500x)



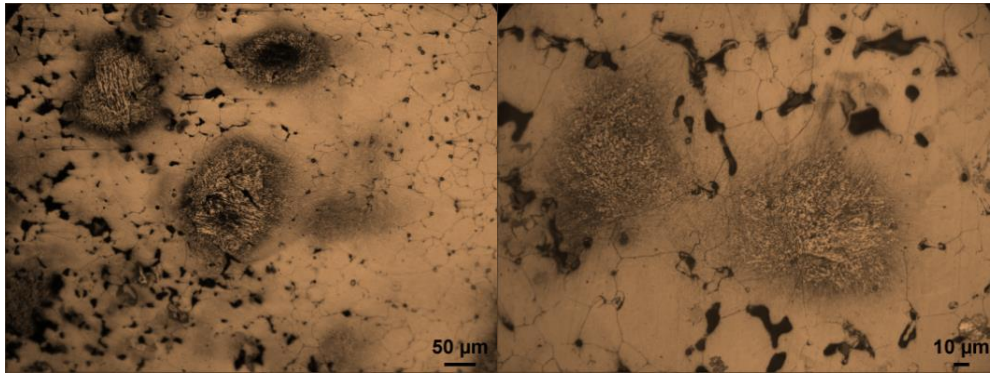
0,55C-3Mo-10Ni-Fe 900°C 25MPa sıcak presleme sinter öncesi (200X-500X)



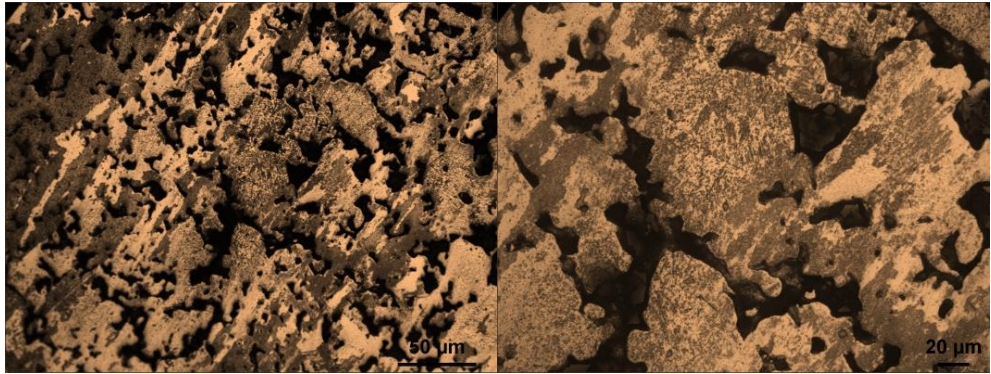
0,55C-3Mo-10Ni-Fe 900°C 33MPa sıcak presleme sinter öncesi (200X-500X)



0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe 900°C 33MPa sıcak presleme sinter öncesi (200X-500X)



0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe 900°C 33 MPa sıcak presleme+1400°C sinterleme



0,55C-3Mo-10Ni-0,5W-Fe 900°C 33 MPa sıcak presleme+ 2 defa 1400°C sinterleme

Şekil 5.3. Soğuk, ılık ve sıcak presleme ve farklı sinterleme prosesleri uygulanmış TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri.

Alaşım ve alaşımlı çelikler incelendiğinde TM çeliklerin soğuk, ılık ve sıcak preslenmesi ile gözenek miktarında azalma yoğunlukta bir artış gözlenmiştir. Bu değişim mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir (Ayvacı, 2019).

Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi sinterleme öncesi teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve gözeneklilik miktarı hesaplanmıştır. Toz metal çeliklerde alaşım miktarının artması genel olarak gözenek miktarını arttırmaktadır. Presleme tekniği yönünden incelendiğinde presleme sıcaklığının artması yoğunluğu arttırmaktadır. Sinterleme sırasında toz taneleri birbirine kaynaşmıştır. Sinterleme sonrasında ise numunelerin doğal olarak yoğunluğu artmıştır. Ayrıca çizelge 5.3 incelendiğinde presleme tekniğinin değişmesi ile ılık ve sıcak presleme ile yoğunluk değerlerinde genel olarak artış, gözenek miktarında ise azalma görülmüştür. Genel olarak bu değişimler mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir.

Çizelge 5.3. TM çelikler numunelerin yoğunluk ve % gözenek miktarı.

Kimyasal Bileşim	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Deneysel Yoğunluk (gr/cm ³)	Gözenek Miktarı (%)
Alaşım 1 soğuk presleme+1400°C sinterleme	7,9187	7,3152	7,62
Alaşım 1 ılık presleme+1400°C sinterleme	7,9187	7,4475	5,95
Alaşım 1 ılık presleme+2 defa 1400°C Sinterleme	7,9187	7,5043	5,23
Alaşım 2 soğuk presleme+1400°C sinterleme	8,0154	7,4014	7,66
Alaşım 2 ılık presleme+1400°C sinterleme	8,0154	7,4519	7,03
Alaşım 2 ılık presleme +2 defa 1400°C Sinterleme	8,0154	7,4951	6,49
Alaşım 3 soğuk presleme+1400°C sinterleme	8,0278	7,4133	7,65
Alaşım 3 ılık presleme+1400°C sinterleme	8,0278	7,4488	7,21
Alaşım 3 ılık presleme + 2 defa 1400°C Sinterleme	8,0278	7,5083	6,47
Alaşım 3 25 MPa sıcak presleme	8,0278	6,4045	20,22
Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme	8,0278	6,6213	17,52
Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme+ 1400°C sinterleme	8,0278	7,0522	12,15
Alaşım 3 33 MPa sıcak presleme+ 2 defa 1400°C sinterleme	8,0278	7,1162	11,35

Nitekim Gething vd. (2005), molibden toz metal çeliklerinin mekanik özellikleri üzerine Ni ilavesinin etkisini değerlendirmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar, eklenen Ni miktarının ağırlık olarak artmasıyla birlikte üretilen toz metal

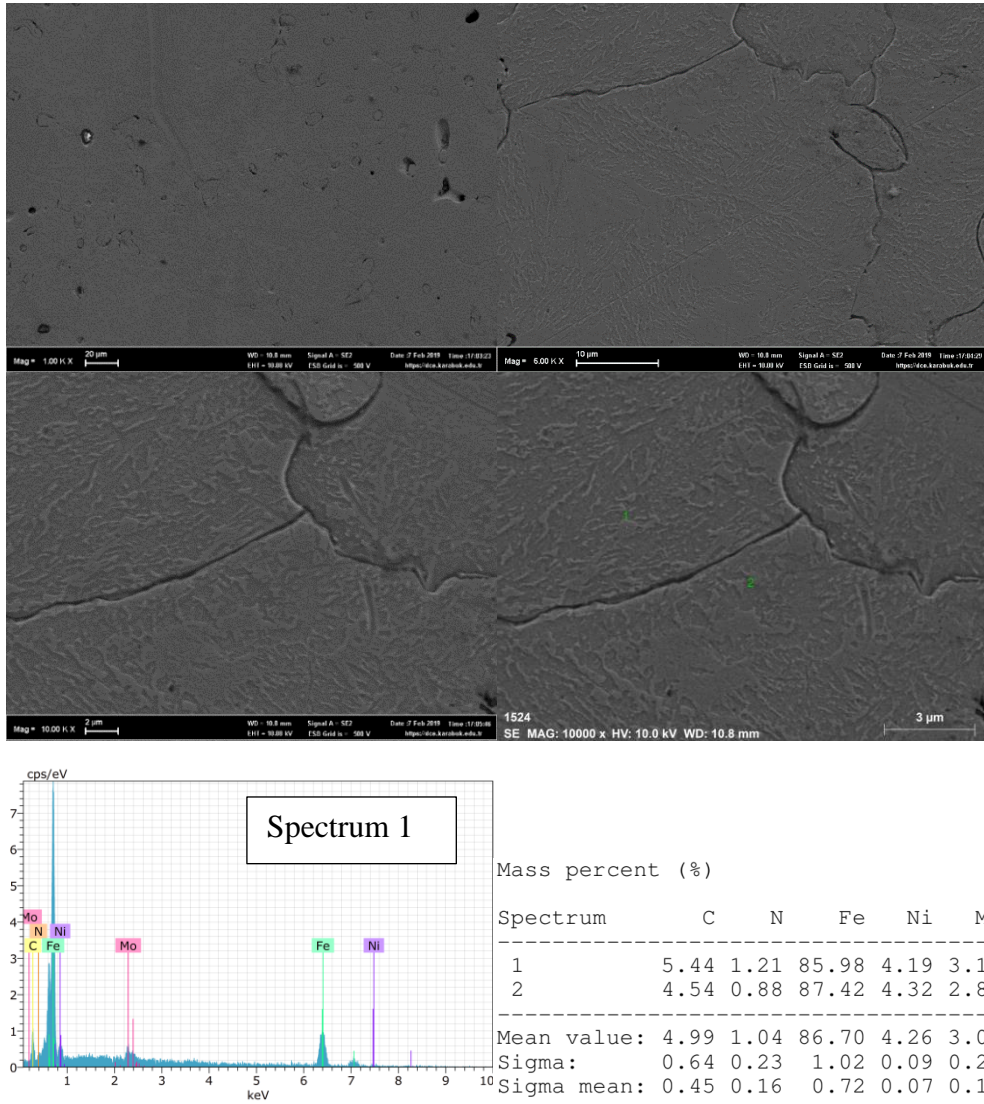
çeliklerin çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklerinde iyileşme gözlemlenmişler. Bunun yanında mikroyapı incelemelerinde Ni içermeyen molibden çeliğinin mikroyapısının ferrit ve perlitten oluştuğu; ancak bu alaşımların içerisinde nikel miktarının ağırlık olarak %0-2 bulunması durumunda mikroyapıda daha sert fazların oluştuğunu ve nikel miktarı ağırlık olarak arttığında beynit ve martenzit fazlarının ortaya çıktığını gözlemlenmişlerdir (Tracey, 1992). Ayrıca Taşcı yaptığı çalışmada (2016), Nb-V çeliğine belirli oranlarla Ni ilavesi eklemiştir. Ağırlık olarak nikel ilavesinin artmasıyla mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenmişlerdir.

Bu çalışmada sinterleme süresinin artışıyla martenzit miktarında artış gözlemlenmektedir. Nitekim Nabeel (2008) araştırmasında, Fe parçacığının merkezinde Ni atomlar tarafından ulaşılmayan beynitik yapıya C ve Mo vasıtasıyla ulaşır. Ni zengin östenitik alanların 30 dakikalık sinterlemeden sonra bile mevcut olduğu, daha uzun sinterleme süresi sağlandığında martenzitik bölgelere dönüştüğü gözlemlenir. Daha uzun sinterleme süresi sağlandıkça, Ni bakımından zengin martenzit miktarı artar.

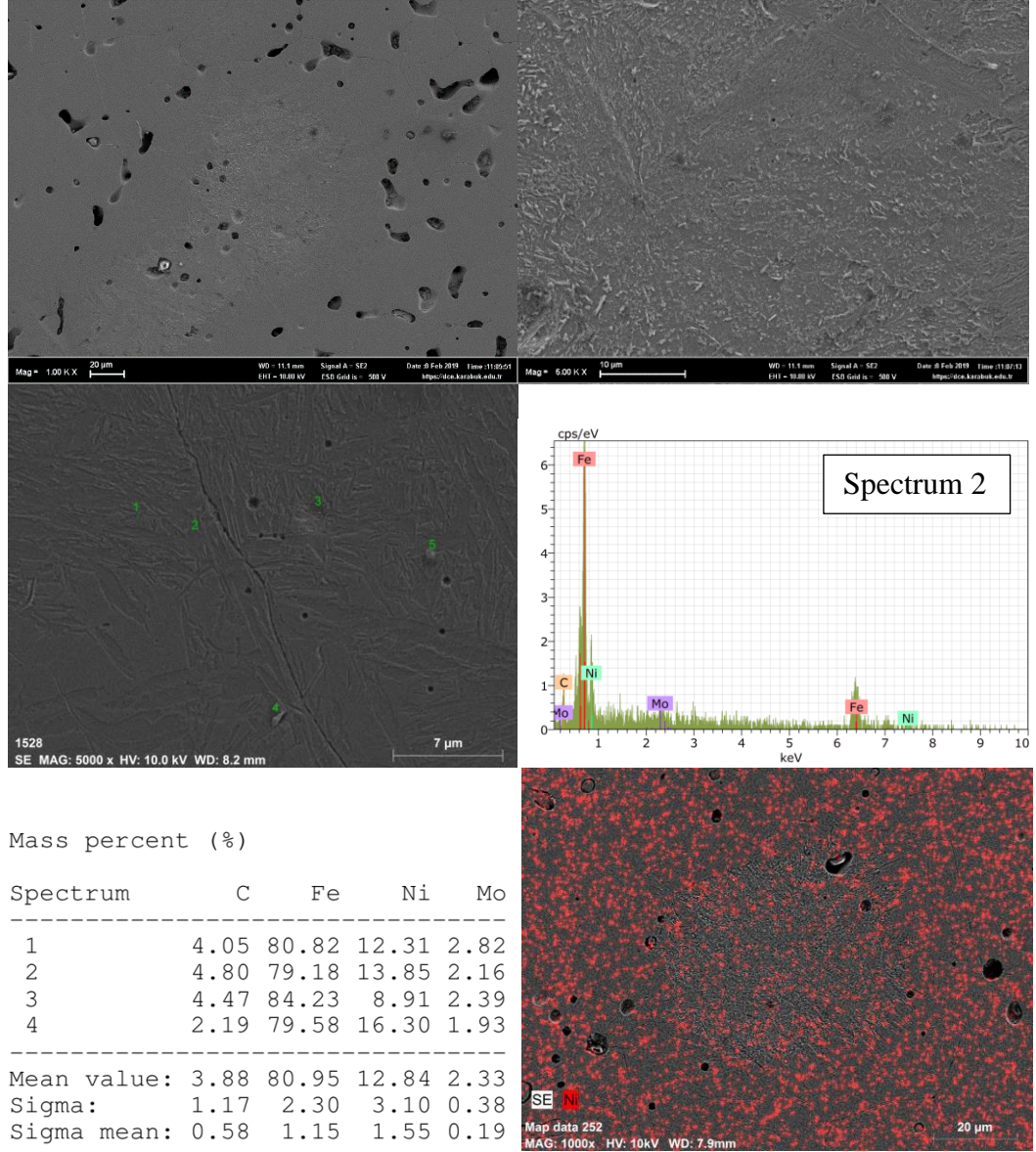
Sinterleme esnasında kimyasal kompozisyonda bulunan alaşım elementlerinin MoC(N), WC(N), MoWC(N) ve MoWC(N) gibi çökelti oluşturarak östenit tanelerinin büyümesini engellediği düşünülmektedir. Nitekim Köksal (2021), Özdemir vd. (2016) ve Gündüz vd. (2016) yaptıkları çalışmalarda Nb, V ve Ti gibi mikroalaşım elementi ilave ederek toz metalurjisi çelik üretimi gerçekleştirmiştir. Elde ettikleri sonuçlar incelendiğinde mikroalaşım elementi ilavesi ile üretilen malzemelerin akma, çekme ve sertlik dayanımlarında artış, tane boyutunda düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebini sinterleme sırasında ve sonrasında oluşan WC(N), NbCN, VCN ve AlN gibi alaşım elementlerinin oluşturduğu çökeltilerin östenit tanelerinin büyümesini engellemesi olarak ifade etmektedirler. Ayrıca oluşan bu çökeltilerin çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mekanizmaları ile dayanım artışına neden olduğu ifade edilmiştir.

5.5. TARAMA ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

TM yöntemiyle üretilen çelik numunelerin SEM mikroyapı ve EDS analiz sonuçları Şekil 5.8-5.9'da görülmektedir. Fe, C, Mo, Ni ve W'nin çelik içerisinde bulunması ile MoC(N), MoWC(N) ve WC(N) ve Fe₃C gibi karbür, nitrür veya karbonitrür çökeltilerinin oluştuğu SEM mikroyapı EDS incelemeleri sonucunda tespit edilmiştir. Oluşan bu çökeltilerin bir önceki bölümde detaylı olarak tartışıldığı gibi östenit tane büyümesini sınırladığı ve ayrıca çökelti sertleşmesi ile malzemenin dayanımını artırdığı belirtilmiştir (Ayvacı; 2019; Erden, 2015; Kostryzhev et al., 2014).



Şekil 5.4. Alaşım 1 çelik numunenin SEM resimleri (sırasıyla 1000X, 5000X ve 10000x) Spektrum 1 Grafiği ve EDS sonuçları.

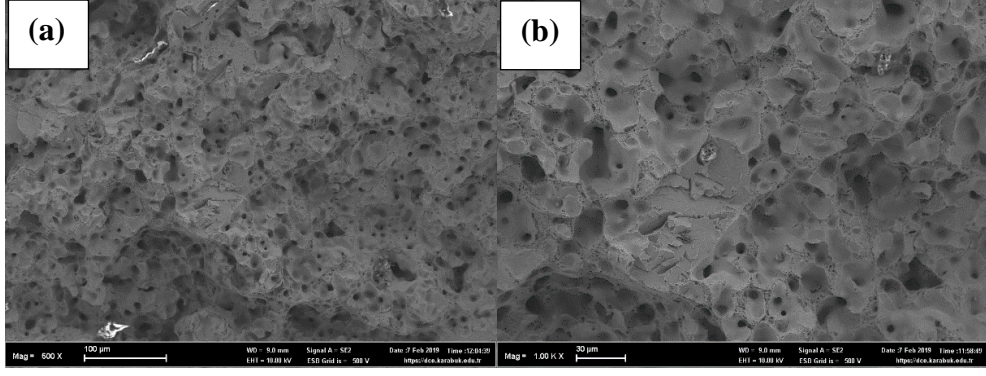


Şekil 5.5. Alaşım 2 çelik numunenin SEM resimleri (sırasıyla 1000X ve 5000X), Spektrum 2 Grafiği, EDS sonuçları ve Mapping.

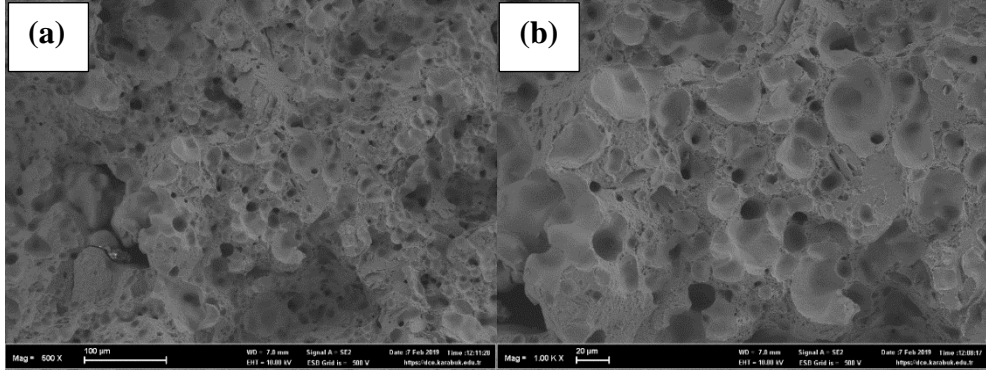
Çözelti içindeki alaşım elementlerinin östenitin yeniden kristalleşmesine etkisi çok zayıftır. Çökelmiş partiküller ile tane sınırı hareketinin engellenmesi çözünen atomların etkisinden çok daha fazladır (Erden, 2015). Yapılan mikroyapı, SEM ve EDS analiz sonuçlarında Mo, ve W elementinin çözelti içinde ve çökelmiş partikül şeklinde bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.9’da alaşımlı çelik numunenin matris ve çökeltilerden alınan nokta EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Nokta EDS sonuçları incelendiğinde MoC(N) çökeltisinin oluştuğu görülmektedir. Literatürde bu sonucu destekleyen çalışmalar mevcuttur. Örneğin Ayvacı yaptığı çalışmada (2019) AISI 4140-3Cr-3Mo içeren TM çeliğinin çizgi EDS analizi sonuçlarına bakıldığında

matris ve çökeltiyi kesen çizgi boyunca element türü ve miktarında farklılık olduğu görülmektedir. Matris fazının demirce zengin olduğu fakat yuvarlak şeklindeki çökeltinin ise krom ve molibden zengin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca matristen gelen analiz çizgisinin çökeltiyi kestiği anda krom ve molibden miktarında keskin bir artış olmuştur. Ayvaci'nın yaptığı çalışmada elde edilen nokta ve çizgi EDS analiz sonuçları literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında MoC(N) gibi çökeltilerin alaşımlı TM çeliklerinde oluştuğunu göstermektedir. Nitekim benzer çalışmalar bunu destekler niteliktedir (Erden vd., 2016; Köksal, 2021). Diğer kompozisyonlardan alınan nokta ve çizgi EDS'ler çökeltinin oluştuğunu göstermektedir.

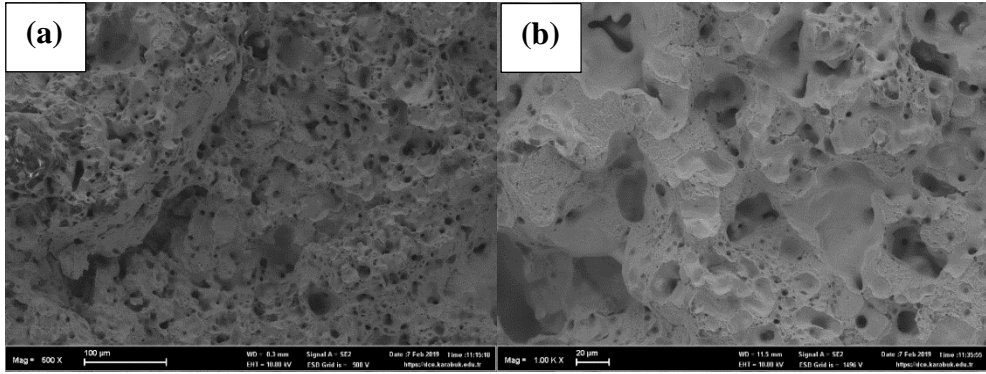
1400°C'de sinterlenmiş TM çelik numunenin çekme deneyi sonrası X500 ve X1000'de kırık yüzey görüntüleri alınmıştır. Farklı alaşım oranlarına sahip çelik bileşimine sahip numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.20-5.25) görüldüğü gibi kırık yüzeylerin kısmen sünek (petekli yapı) ve kısmen gevrek (ayrılma düzlemleri) davranış sergilemişlerdir. Kırık yüzeylerin tamamında gözeneklerin olduğu belirgin bir şekilde görülmüştür. Bu durum kırılmanın mikroboşlukların birleşip ilerlemesiyle gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca üretilen TM çelik numunelerde büyük boşluklar görülmüştür. Bu boşlukların bulunması MoC(N), ve CrC(N) gibi çökeltinin çekme testi sırasında yüzeyden koparak ayrıldığını göstermektedir. Shanmugasundaram ve Chandramouli yapmış olduğu çalışmada (2009) Cr, Ni ve Mo içeren TM çeliğinin kırık yüzeylerinde bu tür büyük boşlukların oluştuğunu görmüş ve bunun nedenini çekme testi sırasında karbür, nitrür ve karbonitrürlerin yüzeyden ayrılmasına bağlamıştır. Çekme testi sonucu Mo, W ve Ni miktarının artması ile akma ve çekme dayanımında artış gözlenmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen değerlerle kırık yüzey resimleri uyumluluk göstermektedir. Ayrıca sıcak presleme ile üretilen numunelerin kırık yüzey resimleri incelendiğinde presleme basıncının artması ve sinterleme proseslerinin uygulanması ile sünekliliği temsil eden petekli yapıları arttığı gözlenmiştir. Elde edilen çekme sonuçları ile uyum içerisindedir.



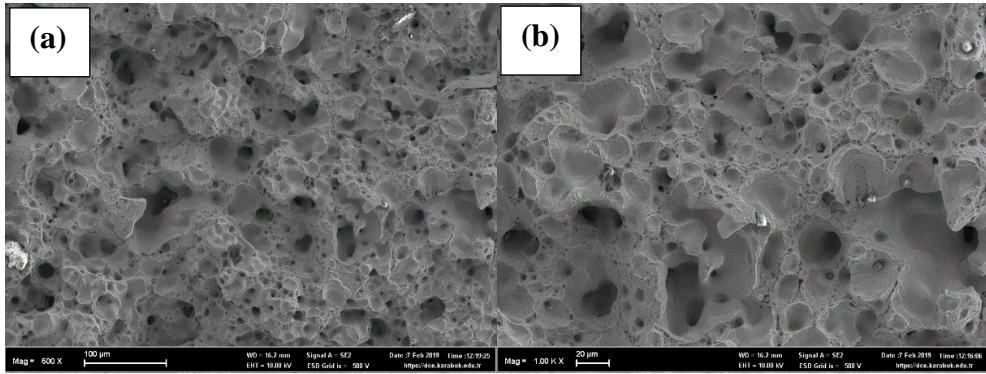
Alaşım 1-soğuk presleme



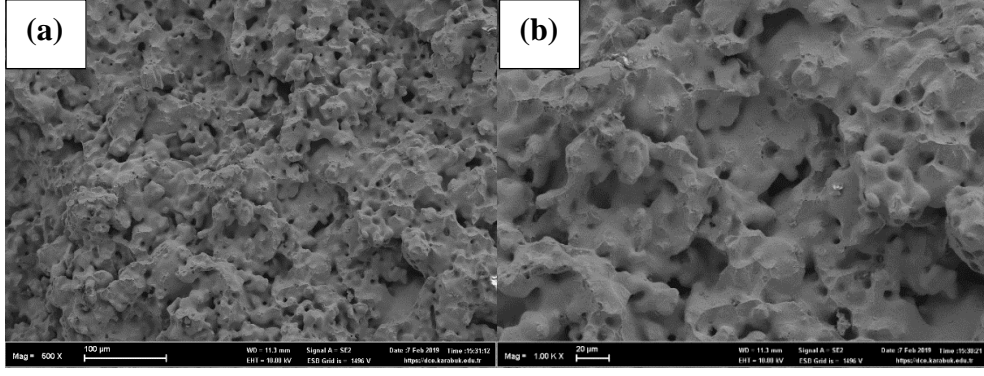
Alaşım 1-ılık presleme-1.sinter



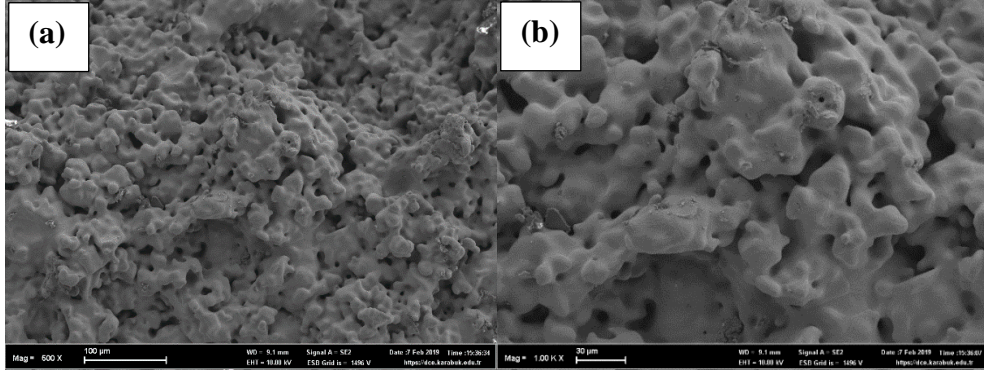
Alaşım 2-soğuk presleme



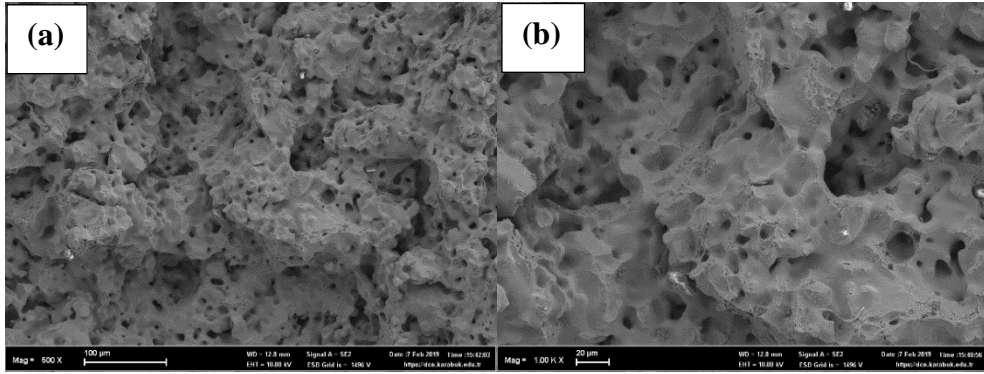
Alaşım 2-ılık presleme



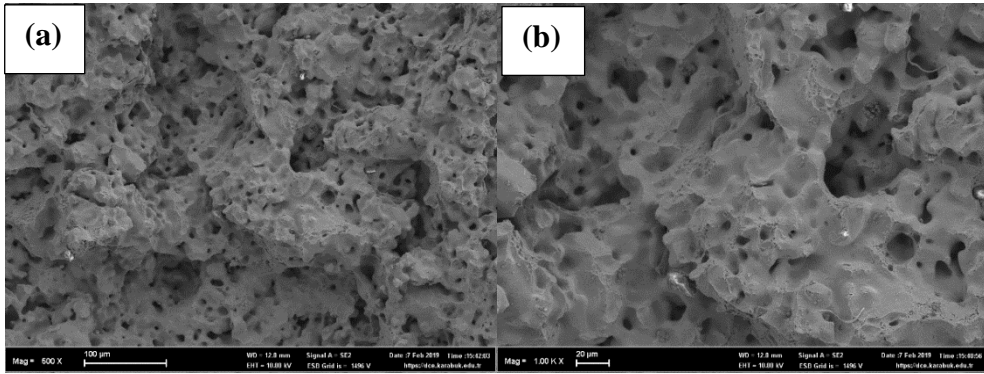
Alaçım 3 25 MPa sıcak presleme



Alaçım 3 33 MPa sıcak presleme



Alaçım 3 33 MPa sıcak presleme+ 1400°C sinterleme



Alaçım 3 33 MPa sıcak presleme+ + 2 defa 1400°C sinterleme

Şekil 5.6. Soğuk, ılık ve sıcak preslenen numunelerin kırık yüzey resmi (a- X500; b- X 1000).

5.8. GENEL SONUÇLAR

Mo-Ni ve Mo-Ni-W alaşım elementlerini içeren toz metal kompozisyonları soğuk, ılık ve sıcak presleme teknikleri uygulandıktan sonra 1400°C'de argon atmosferinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Aşağıda ise bu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

- 1- Toz metal çeliğin perlit, beynit ve martenzit oranı Ni ve W alaşım elementi ilavesi ile artmıştır. Aynı zamanda perlit oranı artarken ferrit oranı azalma göstermiştir. Gerekli literatür çalışması yapıldığında bu sonuç doğrulanmıştır.
- 2- Sinterleme sırasında veya sinterleme sonrası soğuma sırasında oluşan katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi çeliğin mukavemetini arttırmaktadır.
- 3- Genel olarak nikel miktarının artışı ile çekme ve akma dayanımının arttığı görülmüştür. Dayanımdaki artışın nedeni nikelin mikroyapıdaki perlit miktarını artırmasına ayrıca yapıda oluşan beynit ve martenzit fazlarına bağlanmıştır. Ayrıca W ilavesi ile WC(N), MoWC(N) gibi çökelti oluşumu gerçekleşmesi sonucu çökelti sertleşmesi, tane boyutu küçültme gibi mukavemet arttırıcı mekanizmalar ile toz metal çeliğin çekme dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. Literatür ve çekme testi sonuçları, optik mikroyapı resimleri ve alınan SEM EDS sonuçları bu sonucu desteklemektedir.
- 4- TM çeliklerinin EDS analizleri W, Mo C ve N elementlerini ve bu elementlerin oluşturmuş olduğu WC(N) ve MoC(N) gibi çökeltilerin demir matris içinde bulunduğunu ortaya çıkarmaktadır.
- 5- Presleme tekniği kıyaslama yapıldığında en iyi sertlik sonuçları ılık presleme tekniği uygulanan numulere gözlenmiştir. Bunun gerekçesi olarakta yoğunluk miktarının artması gözeneklilik miktarının azalması sonucunda oluştuğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

Ayvacı B., “Toz metalürjisi ile üretilen çeliklerde presleme tekniğinin mikroyapı mekanik özelliklere etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 1-55 (2019).

Black J. T. and Kohser R. A., DeGarmo's, Materials and Processes in Manufacturing, 12th ed., **Wiley**, p. 105-107, (2017).

Çeviker, I., “Mikroalaşımli dövme çeliklerde mikroyapısal karakterizasyon ve mikroyapı-mekanik özellikler ilişkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 6-30 (1991).

Elliott R., “Cast Iron Technology”, 1st ed., Butterworth-Heinemann, **Elsevier**, 1-2, (1988).

Erden, M. A., Gündüz S., Türkmen M., and Karabulut H., “Microstructural characterization and mechanical properties of microalloyed powder metallurgy steels”, **Materials Science and Engineering: A**, 616: 201-206 (2014).

Erden, M. A., “Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen mikroalaşım çeliklerinin mikroyapı mekanik özellik ilişkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 1-155 (2015).

Erden, M. A., Gündüz, S., Türkmen, M., and Karabulut, H., “The effect of V addition on the microstructure and mechanical properties of low carbon microalloyed powder metallurgy steels”, **Materials Testing**, 58 (5): 433-437, (2016).

German, R. M., “Powder metallurgy science”, 2nd edition, **Metal Powder Industries Federation**, USA, 1-61 (1994).

Gething, B. A., Heaney, D. F., Koss, D. A., and Mueller, T. J., “The effect of nickel on the mechanical behavior of molybdenum P/M steels”, **Materials Science and Engineering A**, 390: 19–26, (2005)

İnternet: Amardeep Steel Centre Blog "Difference between low alloy steel & high alloy steel", <https://www.amardeepsteel.com/blog/SpecificBlog/alloy-steel-difference/difference-between-low-alloy-steel-&-high-alloy-steel.html> (2018).

İnternet: Inovar Communications Ltd. Shrewsbury, UK “Powder Metallurgy Review magazine”, <https://www.pm-review.com/introduction-to-powder-metallurgy/author-and-further-reading/> (2021).

İnternet: Metallurgy for Dummies, “classification of steels”, <https://www.metallurgyfordummies.com/classification-of-steels.html> (2021).

İnternet: Sciencing, "The Alloy Steel Manufacturing Process", <https://sciencing.com/alloy-steel-manufacturing-process-7267414.html>. (2018).

Karabulut, H., "Mikroalaşımli çeliklerde yaşlanma sertleştirmesinin mekanik özelliklere etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 3-60 (2004).

Karomatullozoda, L., "Demir alaşımli parçaların toz metalürjisi ile üretimi ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya, 5-8 (2018).

Köksal F. R., "Demir Çelik İşletmeleri İçin Bir Verimlilik Araştırılması Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-10 (2008).

Köksal Ü., "Toz metalürjisi ile üretilen W-Nb-V ilave edilen Ni-Mo çeliğine sinterleme süresinin mekanik özelliklere etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-55 (2021).

Kostrzyhev, A. G., Al Shahrani, A., Zhu, C., Cairney, J. M., Ringer, S. P., and Killmore, C. R., "Effect of niobium clustering and precipitation on strength of an NbTi 86 microalloyed ferritic steel", *Materials Science and Engineering: A*, 607: 226–235, (2014).

Matik, U, "Akımsız nikel kaplamalarda ısıl işlemin sertlik ve aşınma özelliklerine etkisi", Doktora Tezi, *G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-50 (2010).

Nabeel, M. "Diffusion of Elemental Additives during Sintering", Master Thesis Department of Materials, *Science and Engineering Division of Physical Metallurgy Royal Institute of Technology*, SE-100 44 Stockholm, (2008).

Taşci M. T., "Toz metalürjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çeliğine nikel ilavesinin mikroyapı mekanik özellikleri üzerine etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-55 (2016).

Tracey, V. A. Nickel Sintered Steels: Development, Status and Prospects. *Advances in Powder Metallurgy&Particulate Materials* 1992, 5, 303-314, ed: J.M. Capus, R.M. German, , 21-26 June, San Francisco, California, USA.

Özdemirler, D., Gündüz, S., Erden, M.A., Karabulut, H., Türkmen, H., "Sinterleme sıcaklığının NbC ilave edilmiş TM çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Özel Sayı 92-97, Afyon, (2016).

Öztürk, Z., "Gaz atomizasyonu ile Al 2024 tozu üretimi ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-60 (2012).

Sarıtaş, S., Türker, M, ve Durlu, N, "Toz metalürjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri", *Türk Toz Metalürjisi Yayınları: 05*, Ankara, 2-34, 206-237, 379-410 (2007).

Shanmugasundaram, D.; Chandramouli, R. Tensile and impact behaviour of sinter-forged Cr, Ni and Mo alloyed PM steels. *Mater. Des.* 2009, 30, 3444–3449.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Akif ERDEN, ilköğrenimini Bursa Gürsu Mehmet Akif ERSOY İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Bursa Emirsultan lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği Bölümünü kazandı ve 2007 yılında buradan mezun oldu. Ayrıca başka bir lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2020 yılında başarı ile tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini ise Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'ndan 2011 yılında tamamladı.