

**NB-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNDE MEKANİK  
ALAŞIMLAMA SÜRESİNİN MİKROYAPI VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**2019  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ALPEREN YILMAZ**

**NB-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNDE MEKANİK ALAŞIMLAMA  
SÜRESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Alperen YILMAZ**

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

**KARABÜK  
OCAK 2020**

Alperen YILMAZ tarafından hazırlanan “NB-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNDE MEKANİK ALAŞIMLAMA SÜRESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

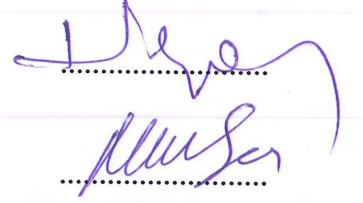


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 10/01/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Hasan KARABULUT (KBÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nuri ŞEN (DÜ)



Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

...../...../2020

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.”*

Alperen YILMAZ

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **NB-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİNDE MEKANİK ALAŞIMLAMA SÜRESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Alperen YILMAZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN**

**Ocak 2020, 68 sayfa**

Mikroalaşımli çelikler, ağırlık olarak %0,2 miktarını geçmeyecek şekilde Ti, V ve Nb gibi çökelti oluşturan mikroalaşım elementlerinden eklenerek mekanik özellikleri arttırılmış yüksek dayanıklı düşük alaşımli çelik olarak adlandırılan çelik grubudur. Mekanik özellikleri belirleme açısından Ti, Al, Nb ve V gibi mikroalaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu karbo-nitrürlerin boyutu, şekli, dağılımı, soğuma hızı ve çözünme sıcaklıklarına bağlı olarak oluşma şartları oldukça önem taşımaktadır.

Döküm yöntemi kullanılarak bu özellikleri kontrol etmek toz metalurjisi yöntemi kullanımına göre daha zordur. Bu yüzden bu çalışmada farklı oranlarda niyobyum ve vanadyum ile alaşımlandırılmış mikroalaşım çeliğinin toz metalürjisi yöntemiyle üretiminin ayrıca üretilen bu çeliklere uygulanan mekanik alaşımlandırma işleminin mekanik özellikleri nasıl etkilediğinin araştırılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada Fe matris içerisine niyobyum ve vanadyum elementlerinin ilavesiyle istenilen bileşimde 15 dk, 30dk ve 60 dk mekanik alaşımlama yöntemi uygulanarak toz metalürjisi yöntemiyle mikroalaşımli çelikler üretilmiştir. İlk olarak istenilen kompozisyonda tozlar hassas terazide tartılarak üç eksenli karıştırıcıda 1 saat süre ile karıştırılmıştır. Daha sonra farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılmıştır. Elde edilen tozlar çekme numunesi şeklinde tasarlanan kalıplarda 700 MPa presleme basıncında sıkıştırılmış ve ardından atmosfer kontrollü tüp fırında argon ortamında sinterlenmiş, böylece mikroalaşımli çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizinden sonra çekme numunesi boyutlarında hazırlanan farklı kimyasal bileşimdeki mikroalaşımli çelik numunelere çekme testi uygulanmıştır. Numunelerin % uzama, akma-çekme dayanımları, mikroyapısal değişimlere bağlı olarak açıklanmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Toz metalürjisi, mekanik alaşımlama, Nb-V mikroalaşımli çelik, mikroyapı mekanik özellik ilişkisi, mekanik alaşımlama süresi.

**Bilim Kodu** : 91514-91528

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE EFFECT OF MECHANICAL ALLOYING TIME ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NB-V MICROALLOYS STEEL**

**Alperen YILMAZ**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof.Dr. Mehmet Akif ERDEN**

**January 2020, 68 pages**

Microalloyed steels, not exceeding the amount of 0.2% by weight Ti, V and Nb precipitating microalloys are added to the elements added to the mechanical properties of high-strength low-alloy steel is called steel group. In terms of determining the mechanical properties, the conditions of formation depending on the size, shape, distribution, cooling rate and dissolution temperatures of the carbonitrides formed by microalloy elements such as Ti, Al, Nb and V are very important.

It is more difficult to control these properties using the casting method than using the powder metallurgy method. Therefore, in this study, it is aimed to investigate how the production of microalloy steel alloyed with niobium and vanadium alloyed with different ratios by powder metallurgy method and the mechanical alloying process applied to these steels affect mechanical properties.

In this study, microalloyed steels were produced by powder alloying method by applying mechanical alloying method at 15 min, 30 min and 60 min in desired composition by adding niobium and vanadium elements into Fe matrix. First, the powders of the desired composition were weighed on a precision balance and mixed in a three-axis mixer for 1 hour. Then, mechanical alloying was performed at different times. The obtained powders were compressed at 700 MPa pressing pressure in molds designed as tensile sample and then sintered in argon medium in an atmosphere-controlled tube furnace, thus producing microalloyed steel. After microstructure analysis, tensile test was applied to microalloyed steel samples with different chemical composition prepared in tensile sample dimensions. % Elongation, yield-tensile strength of the samples are explained due to microstructural changes.

**Key Word** : Powder metallurgy, mechanical alloying, Nb-V microalloyed steel, microstructure mechanical properties, mechanical alloying time.

**Science Code** : 91514-91528



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar ve diğer çalışmalarda imkânlarından faydalandığım Teknoloji Fakültesi Dekanlığı, İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, Bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını hayata geçirirken fikirleriyle, ilgisiyle, çabalarıyla desteğini esirgemeyen Ahmet Nusrev TANRIVERDİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve hoşgörü ile maddi-manevi destek olan kıymetli Aileme teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
MİKROALAŞIMLI ÇELİKLER.....	3
2.1. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN TANIMI VE GELİŞİMİ .....	3
2.2. Nb-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİ .....	5
2.3. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN AVANTAJLARI VE UYGULAMA ALANLARI.....	7
2.4. MİKROALAŞIM ELEMENTLERİ .....	8
2.4.1. Niyobyum (Nb) .....	9
2.4.2. Vanadyum (V).....	10
2.4.3. Titanyum (Ti).....	12
2.4.4. Alüminyum (Al).....	13
2.4.5. Karbon (C) .....	13
2.4.6. Azot (N) .....	14
2.4.7. Silisyum (Si) .....	14
2.4.8. Fosfor (P) .....	15
2.4.9. Mangan (Mn) .....	15

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.4.10.Bakır (Cu) .....	15
2.4.11.Nikel (Ni).....	16
2.4.12.Molibden (Mo).....	16
2.4.13.Krom (Cr) .....	17
2.5. MİKROALAŞIM ÇELİKLERDE ÇÖKELTİ OLUŞUMU .....	17
2.6. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERDE DAYANIM ARTTIRICI MEKANİZMALAR .....	18
 BÖLÜM 3 .....	 19
TOZ METALÜRJİSİ .....	19
3.1. TOZ ÜRETİMİ.....	20
3.1.1. Toz Metalürjisinde Üretim Aşamaları .....	22
3.1.2. Toz numunesi alma .....	22
3.1.3. Parçacık boyut ölçümü .....	22
3.1.4. Tozların Sıkıştırılması ve Preslenmesi.....	22
3.1.5. Tozların Sinterlenmesi .....	24
3.1.6. Bağlayıcı veya Yağlayıcı Yakma.....	24
3.2. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN ANALİZİ .....	24
3.2.1. Mikroyapısal Özellikler .....	24
3.2.2. Mekanik Özellikler.....	25
3.2.3. Yüzeyle İlgili Özellikler.....	25
 BÖLÜM 4 .....	 26
MEKANİK ALAŞIMLAMA.....	26
4.1. MEKANİK ALAŞIMLAMANNIN AVANTAJLARI VE UYGULAMA ALANLARI.....	30
4.2. DEĞİRMEN ÇEŞİTLERİ .....	31
4.2.1. Speks Çalkalayıcılı Değirmenler.....	31
4.2.2. Planeter (Gezegensel) Bilyeli Değirmenler .....	32
4.2.3. Atritör Tipi Değirmenler .....	32
4.2.4. Ticari Tambur Bilyeli Değirmen.....	33

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.3. MEKANİK ALAŞIMLAMADA TOZ KARAKTERLERİ .....	33
4.4. MEKANİK ALAŞIMLAMAMANIN KİNETİKLERİ .....	34
4.5. MEKANİK ALAŞIMLAMAMANIN PARAMETRELERİ .....	35
4.5.1. Değirmen Türü .....	36
4.5.2. Öğütme Kabı .....	36
4.5.3. Öğütme Hızı .....	37
4.5.4. Öğütme Süresi .....	37
4.5.5. Öğütücü Madde .....	37
4.5.6. Bilye-Toz Ağırlık Oranı .....	38
4.5.7. Öğütme Kabının Doldurulması .....	38
4.5.8. Öğütme Atmosferi .....	38
4.5.9. İşlem Kontrol Elemanları .....	39
4.5.10. Öğütme Sıcaklığı .....	39
BÖLÜM 5 .....	40
DENEYSEL METOT .....	40
5.1. GİRİŞ .....	40
5.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN İŞLEM BASAMAKLARI .....	41
5.3. DENEYSEL ÇALIŞMA ORTAMININ HAZIRLANMASI .....	42
5.4. MEKANİK ALAŞIMLAMA DENEYLERİNDE KULLANILAN TOZLAR .....	42
5.5. TOZLARIN KARIŞTIRILMASI, MEKANİK ALAŞIMLANDIRILMASI VE SIKIŞTIRILMASI .....	43
5.6. SİNERLEME İŞLEMLERİ .....	44
5.7. NUMUNELERE ÇEKME DENEYİNİN UYGULANMASI .....	45
5.8. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMELERİ .....	45
5.9. METALOGRAFİK İNCELEMELERDE KULLANILAN NUMUNELERİN HAZIRLANMASI .....	45
5.10. DAĞLAYICILARIN HAZIRLANMASI VE DAĞLAMA İŞLEMİNİN YAPILMASI .....	45
5.11. YOĞUNLUK, GÖZENEKLİLİK, FERRİT-PERLİT ORANLARININ BELİRLENMESİ .....	46

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 6 .....	48
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	48
6.1. GİRİŞ .....	48
6.2. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....	48
6.3. MEKANİK TEST SONUÇLARI VE TARTIŞILMASI .....	55
6.3.1. FeC ve Nb-V Mikroalaşımli TM Çeliğinin Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	55
6.4. TARAMA ELEKTRON MİKROSKOP (SEM) İNCELEMELERİ.....	58
6.5. SPEKTRAL ANALİZ İNCELEMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ..	62
6.6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.1. Deneysel Çalışmada İzlenen İşlem Basamakları. ....	41
Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın. ....	44
Şekil 6.1. 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	49
Şekil 6.2. 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	49
Şekil 6.3. 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	49
Şekil 6.4. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	50
Şekil 6.5. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	50
Şekil 6.6. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	50
Şekil 6.7. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	51
Şekil 6.8. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	51
Şekil 6.9. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	51
Şekil 6.10. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	52
Şekil 6.11. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	52
Şekil 6.12. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri. ....	52

Şekil 6.13. Mekanik alaşımlama işlemi yapılmadan 1350 °C’de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a)0,25C+Fe, (b)0,25C+0,025NbV+Fe ve (c)0,25C+0,1NbV+Fe .....	55
Şekil 6.14. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi yapıldıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a)0,25C+Fe, (b)0,25C+0,025NbV+Fe ve (c)0,25C+0,1NbV+Fe .....	56
Şekil 6.15. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi yapıldıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a)0,25C+Fe, (b)0,25C+0,025NbV+Fe ve (c)0,25C+0,1NbV+Fe .....	56
Şekil 6.16. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi yapıldıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a)0,25C+Fe, (b)0,25C+0,025NbV+Fe ve (c)0,25C+0,1NbV+Fe .....	57
Şekil 6.17. 0,25C+Fe MA’sız TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	59
Şekil 6.18. 0,25C+Fe 15 dakika MA’lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	59
Şekil 6.19. 0,25C+Fe 60 dakika MA’lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	59
Şekil 6.20. 0,25C+0,05NbV+Fe MA’sız TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	60
Şekil 6.21. 0,25C+0,05NbV+Fe 15 dakika MA’lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	60
Şekil 6.22. 0,25C+0,05NbV+Fe 60 dakika MA’lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	60
Şekil 6.23. 0,25C+0,1NbV+Fe MA’sız TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	61
Şekil 6.24. 0,25C+0,1NbV+Fe 15 dakika MA’lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	61
Şekil 6.25. 0,25C+0,1NbV+Fe 60 dakika MA’lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelelerdeki kırık yüzey görüntüleri.....	61
Şekil 6.26. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunenin X5000 büyütmelelerdeki SEM mikroyapı resimleri ve EDS sonuçları.....	62

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 5.1. Tozlar ve özellikleri .....	42
Çizelge 5.2. Mikroalaşımli TM çeliklerin kimyasal kompozisyonları .....	43
Çizelge 6.1. TM çelik numunelerin % yoğunluk, % gözeneklilik, %ferrit-perlit, ort. tane boyutu değerleri. ....	54
Çizelge 6.2. 1350 °C'de sinterlenmiş TM çelik numunelerin akma dayanımı(YS), çekme dayanımı(UTS), % uzama ve sertlik değerleri.....	57
Çizelge 6.3. 1350 °C'de sinterlenen TM çelik numunelerin spektral analiz sonuçları. ....	61



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

mm	: milimetre
$\mu\text{m}$	: mikrometre
MPa	: megapaskal
s	: saniye
k	: malzeme sabiti (Hall-Petch sabiti)

### KISALTMALAR

HSLA	: High Strenght-Low Alloyed (Yüksek Dayanımlı-Düşük Alaşımli)
SEM	: Scanning Electron Microscobe (Tarama Elektron Mikroskobu)
TiN	: Titanyumnitrür
YDDA	: Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli Çelik
MA	: Mekanik Alaşımlama
TM	: Toz Metalurjisi

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Mikroalaşımli çelikler, ağırlık olarak %0,2 miktarını geçmeyecek şekilde Ti, V, Nb ve Al gibi çökelti oluşturan elementlerden eklenerek mekanik özellikleri arttırılmış çeliklerdir. Mekanik özellikleri belirleme açısından Ti, Al, Nb ve V gibi mikroalaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu karbo-nitrürlerin boyutu, şekli, dağılımı, soğuma hızı ve çözünme sıcaklıklarına bağlı olarak oluşma şartları oldukça önem taşımaktadır.

Döküm yöntemi kullanılarak bu özellikleri kontrol etmek toz metalürjisi yöntemi kullanımına göre daha zordur. Bu yüzden bu çalışmada farklı oranlarda niyobyum ve vanadyum ile alaşımlandırılmış mikroalaşım çeliğinin toz metalürjisi yöntemiyle üretiminin ayrıca üretilen bu çeliklere uygulanan mekanik alaşımlandırma işleminin; mekanik özellikleri nasıl etkilediğinin araştırılması amaçlanmıştır. Üretilen çeliklerde mekanik alaşımlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisi belirlenmiştir. Döküm yönteminde bu özellikleri kontrol etmek toz metalürjisi yöntemine göre daha zordur. Bu yüzden bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi kullanılarak farklı kimyasal bileşimlere sahip ve farklı mekanik alaşımlandırma işlemleri uygulanmış mikroalaşımli çeliklerin üretilmesi sağlanmıştır. Bu sayede mekanik özellikleri daha yüksek hassas ürünlerin üretilmesi söz konusu olacaktır. Bu çalışmanın ana amacı ülkemizi vasıflı çelik üretiminde söz sahibi konuma getirmek ve vasıflı toz metal çelik üretiminin arttırılmasına katkı sağlamaktır.

Bu çalışmanın amacı, mekanik alaşımlandırma işlemi süresinin TM mikroalaşım çeliklerinde mikroyapı-mekanik özellikleri nasıl etkilediği tespit edebilmektir. Bu sayede toz metalürjisi ile üretilen bu çeliklerin mekanik alaşımlandırma sürelerinin hangisi ile daha yüksek mekanik özellikler gösterebileceği incelenmiştir.

Bilindiği gibi bu çeliklerin etimi toz metalurjisi ile yapıldığında üretim maliyetleri, önemli ölçüde azalacaktır. Üretilen parçanın yüzey kalitesinin iyi olması, daha hassas ve daha kaliteli bir üretimin gerçekleştirilmesi, diğer yöntemlerle üretilmesi ve işlenmesi zor bazı metallerin etimi sağlanacaktır. Toz metalurjisi yöntemi sayesinde Türkiye’de sanayi kuruluşlarında istenilen özelliklerde mikroalaşımlı elik parçaların etimi kolaylaşmış olacaktır ve yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanacaktır. Bu retim yöntemi ülkemizdeki hadde ürünü olan mikroalaşım çeliğinin toz metalürjisi ile üretiminin yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu alışmada Nb-V mikroalaşım çeliği değişik kompozisyonlarda üretilmiştir. Üretilen bu parçalara farklı sürelerde mekanik alaşımlandırma işlemi uygulanmıştır. Üretilen parçalara çekme deneyi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Mekanik zellikleri belirlenen numunelerin mikroyapı incelemeleri (SEM mikroyapı, SEM EDS, Spektral analiz) yapılarak mikroyapı mekanik özellikleri ilişkilendirilerek toz metalurjisi ile üretilen Nb-V mikroalaşım çelikleri için ideal mekanik alaşımlandırma işlemi süresi tayin edilmiştir.

## BÖLÜM 2

### MİKROALAŞIMLI ÇELİKLER

#### 2.1. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN TANIMI VE GELİŞİMİ

Mikroalaşımli çelikler, mekanik özelliklerin güçlendirilmesi amacıyla çok az miktarda kuvvetli karbür yada nitrür yapıcı element ilavesiyle yüksek dayanım özelliği kazanmasından dolayı Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli Çelikler (YDDA) ya da High Strength-Low Alloyed (HSLA) olarak adlandırılmaktadır. Düşük karbon içeriği, farklı sertleştirme mekanizmaları ve termomekanik işlem kolaylığıyla birlikte kaynak edilebilirlik, tokluk, düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma emniyeti veya mukavemet özelliklerinin bileşimine sahip bir malzeme grubudur (Topateş, 1995).

Çok az miktarlarda (<%0,10) alaşımlama elementi ile üretilen bu çeliklere, Çokaz Alaşımli (ÇA) çelikler adı da verilmektedir. Bu çelikler, sıcak haddelenmiş ya da normalleme uygulanmış durumda 275 MPa'dan daha fazla akma gerilimlerine ulaşan düşük karbonlu çokaz alaşımlanmış çelikler olarak tanımlanabilir. Eşdeğer C-Mn çeliklerinden daha üstün mekanik özellikler sergilerler. Büyük çoğunlukla sıcak haddelenmiş durumda mevcudiyetini korurlar. Doğalgaz ve petrol boru çeliklerine denetimli haddeme uygulanarak mekanik özellikleri daha fazla iyileştirilir (Tekin, 2012).

Mikroalaşımli çelikler, yassı mamuller ve dövme amaçlı mamuller olarak tasnif edilmekle birlikte boru çeliği olarak da üretilmektedir. Genel uygulama yassı ürünler üzerinde yapılmakta, dövme amaçlı ürünler özellikle otomotiv sektöründe yaygınlaşarak kullanılmaktadır (Erden, 2015).

Üretilen çelikte karbon ve diğer alaşım elementlerinin içeriği azaltılarak kaynaklanabilirlik artırılmakta, meydana gelen çökeltiler ise kuvvet kaybını engellemektedir (Rongjian, Zidong, Lijie ve Xiaolu, 2019).

Karbon miktarı, çökelti sertleşmesi ve deformasyon sertleşmesi, akma dayanımı ile darbe geçiş sıcaklığı artırıp, tokluğu düşürmektedir. Ferrit tane boyutunun küçültülmesi ise, akma, çekme dayanımını ve tokluğu artırıcı etki yapmaktadır (Hulka, K., 1994. aktaran Mahmutoglu, 2003).

1900'lü yıllarda alaşımlamayla birlikte mikroalaşımli çeliklerin gelişimi başlamıştır. 1930 ve 1940'lı yıllarda yüksek dayanımlı yapı çeliklerinin geliştirilmesi sonrası ferrit tane boyutunun küçültülmesiyle 1950'lerde ince taneli çelikler üretilmiş ve normalleştirmenin yerine kontrollü haddelemenin uygulanmasıyla da Avrupa'da yüksek dayanımlı düşük alaşımli çelikler üretilmiştir (Erden, 2015).

Bu süreçte; 20. yüzyılın başlarında Ford Model T'nin üretiminde vanadyum çeliklerinin kullanımı, 1921'de Almanya'da az miktarda titanyum ilavesiyle çeliğin dayanımının iyileştirilmesi, 1950 sonrasında Çin'de mikrotitanyum ve mikrovanadyum kullanımı, 1962'de İngiliz BS 968 mikroalaşım ilaveli ulusal çelik standardının meydana getirilmesi sonrasında devrim niteliğinde sayılan Amerikan Great Lakes Steel şirketince 1988'de Niyobyumlu (Nb) C-Mn çeliği üretimiyle bu alanda önemli gelişme sağlanmıştır (Morrison, 2000).

Mikroalaşımlama 1960'lı yıllarda çelik ürünlerinde yaygınlaşmıştır. Yapı çeliklerinde kaynak kullanılmadığı 1940'lı yıllarda yüksek karbon ve mangan içeriği problem oluşturmaya da Melbourne King Street köprüsü yapılırken kaynaklamada yaşanan problem köprü yapımında başarısızlığa yol açmıştır. Bu sorun çeliğe mikroalaşım ilavesiyle çözülmüştür (Morrison, 2000).

Günümüzde çelik üretiminin % 10-15'lik bölümünü mikroalaşımli çelik üretimiminin oluşturduğu düşünülmektedir. Normal karbon çeliklerine göre ağırlık olarak yaklaşık % 34 hafif olmasına rağmen dayanımı iki kat fazladır. Bu açıdan bakıldığında mikroalaşımli çelik üretimi ve kullanımı satış fiyatı / maliyet oranı

normal karbon çeliğinden yüksek olduğundan üretici açısından ağırlık / dayanım oranı ise karbon çeliğinden yüksek olduğundan kullanıcı açısından daha avantajlıdır (Korchynsky, 2001 den aktaran Erden, 2015).

## 2.2. Nb-V MİKROALAŞIM ÇELİĞİ

Çeliklere Niyobyum (Nb) ve Vanadyum (V) eklenmesi ilk kez 2. Dünya Savaşı yıllarında ABD’de yapılmakla birlikte yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerinin gelişimi 1960’lı yıllarda başladı. Nb ve V elementlerinin (<%0,10) oranında katımlarıyla C-Mn çeliklerinin dayanımının arttığı bulundu (Morrison, W.B. 1963 aktaran Tekin, 2012).

Devam eden araştırmalarla, içyapıları ferritli + çok az perlitli olan çelikler geliştirildi. Bunlar içinde sadece Nb, sadece V, sadece Ti içerikli olanlar gibi V+Nb, V+Ti, Nb+Ti, Nb+Mo ve V+N içerikli olanların yanında üçlü ve dörtlü alaşımlılar da katılmıştır (Tekin, 2012).

Üretilen çeliklere Niyobyum (Nb), Vanadyum (V) ve Titanyum (Ti) gibi mikroalaşımlama elementlerinin eklenmesi ve termomekanik haddeleme pratiklerinin uygulanmasıyla geliştirilen YDDA çeliklerde istenen özellikler elde edilmiş ve çeşitli ihtiyaçları karşılayabilecek, kullanım alanı geniş bir ürün elde edilmiştir (Mahmutoğlu, 2003).

Bu alaşımlarda %C < 0.10 düzeyindedir. Düşük perlit oranı nedeniyle çarüma tokluğu ve kaynaklanabilirlik iyidir. Bu çeliklere bu nedenle “perliti azaltılmış çelikler” de denilmektedir (Tekin, 2012).

Mikroalaşımlı çelikler barındırdıkları alaşım elementlerine göre başlıca şekilde sınıflandırılmıştır;

- Vanadyum içerenler
- Niyobyum içerenler
- Titanyum içerenler

- Vanadyum-niyobyum içerenler
- Niyobyum-molibden içerenler
- Niyobyum-titanyum içerenler
- Vanadyum-azot içerenler
- Vanadyum-titanyum içerenler

Boru çeliği üretiminde Vanadyum ilavesiyle başlayan süreçte, tane inceltme amacıyla sıcak haddeme ve normalizasyon yapılma ihtiyacıyla birlikte dayanımın artırılması için vanadyum ilave edilen niyobyum çeliklerinin kontrollü haddelenmesi yoluna gidilmiştir. Niyobyum, haddeme süresince östenitin yeniden kristalleşme miktarını azalttığından kontrollü haddeme prosesi uygulanan çeliklerde kullanımı önem arz eder (Erden, 2015).

Niyobyum ve Vanadyumun birlikte kullanılmasıyla yalnız başlarına kullanılmalarından daha yüksek akma mukavemetlerine ulaşılmaktadır. Çökme sertleşmesinden kaynaklanan yüksek dayanım, yüksek sünek-gevrek geçiş sıcaklığını da beraberinde getirmektedir. Kontrollü haddelenmede ise birlikte kullanım tane boyutunu küçülterek dayanım artışını sağlar, sünek-gevrek geçiş sıcaklığını düşürür. Nb-V mikroyaşım çeliklerindeki düşük Karbon oranı perlit miktarını azaltarak, tokluğu, kaynaklanabilirliğini ve sünekliği iyileştirir (Özcan, 2005).

Taş, tarafından 2006'da yapılan çalışmada Mannesmann Boru fabrikasından temin edilen American Petroleum Institute (API) 5L Gr X65 olan Sollac ve Kosice Nb-V alaşımlı çelikler ile API 5L Gr X60 ve API 5L Gr X52 Nb-V alaşımlı boru çelikleri incelenmiş ve aşağıdaki tespitler yapılmıştır.

Mahmutoğlu ve Çimenoglu, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarında üretilen API X60 kalite boru hattı Nb-V çeliğinin üzerinde yaptıkları çalışmada (2003);

- Çelik içeriğinin % 0.095 C, % 1.24 Mn, % 0.215 Si, % 0.056 Al, % 0.006 S, % 0.0013 P, % 0.028 Nb ve % 0.051 V bileşiminde olduğunu,
- Çeliğin tane boyutu küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinin arttığını, koyma uzamasında ise dikkat çekici bir değişim olmadığını,

- 3.3 - 100  $\mu\text{m}$  tane boyutu ile 200-650 N/mm<sup>2</sup> aralığındaki akma mukavemeti için Hall-Petch bağıntısından elde edilen k sabitinin 19 N.mm<sup>-3/2</sup> olduğunu,
- Hall-Petch bağıntısındaki iç sürtünme gerilmesi ( $\sigma_0$ ) 312 N/mm<sup>2</sup> ve tane sınırı direnci ile ilgili sabitin (k) ise 16.5 N.mm<sup>-3/2</sup> olduğunu tespit etmiştir.

Başka bir çalışmada ise Nb'li çelik için sabitler  $\sigma_0 = 288$  N/mm<sup>2</sup> ve  $k = 15.9$  N.mm<sup>-3/2</sup> olarak elde edilmiştir (DeArdo, 1992 aktaran Mahmutoğlu, Çimenoğlu, 2003).

### **2.3. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERİN AVANTAJLARI VE UYGULAMA ALANLARI**

Mikroalaşımli çelikler üretimi ve kullanımı açısından çeşitli avantajlara sahiptir. İslah çeliklerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir (Erden, 2015) (Karabulut, 2004) (Morrison, 2000).

- Çok az miktarda alaşım kullanılır.
- Üretimi daha hızlı yapılabilir.
- Zaman ve enerji tasarrufu sağlar.
- Isıl işlem ihtiyacı yoktur.
- Mekanik özellikleri daha iyidir.
- Sertlik, gerilme, yorulma özellikleri ıslah çeliklerine eşittir.
- Dayanımı daha yüksektir.
- İşlenebilirliği daha yüksektir.
- Daha hafiftir.
- Dayanım / ağırlık oranı dikkate alındığında maliyeti daha azdır.
- Kaynaklanabilirlik ve tokluğu daha iyidir.
- Yüzey görünümü ve şekli daha iyidir.
- Daha düşük atık üretir.
- Çeşitli elementlerin kombinasyonu ile istenen özelliklere ulaşılabilir.

Günümüzde mikroalaşım çeliklerinin birçok alanda kullanım bulunmaktadır. Bunlar arasında otomotiv endüstrisi, büyük çaplı borular, gaz ve petrol boru hatları, çelik binalar ve köprüler, gemi, tren, vagon, vinç, kamyon, sürekli taşıyıcılar, tarım



makinaları, depo tankları ve basınçlı kaplar, baraj bileşimlerinde yapı elemanları, su kontrol ekipmanları, petrol arama platformları, su altı çelik borular ve kanal boruları, sondaj, havalandırma boruları, çimento mikserleri sayılabilir (Erden, 2015).

#### **2.4. MİKROALAŞIM ELEMENTLERİ**

Mikroalaşım çeliklerinde niyobyum, vanadyum, titanyum ve alüminyum başta olmak üzere çeşitli mikroalaşım elementleri kullanılabilir. Üretilmek istenen çeliğin kullanım alanına göre belirlenen mikroalaşım elementleri uygun oranlarda üretime alınır. Elementlerin dayanımı artırması ve mikroyapıyı iyileştirmesi beklenmektedir.

Elementlerin mikroyapı üzerindeki etkileri şunlardır (Sage, 1992 aktaran Topateş, 1995).

- Karbonitrür çökmesi,
- Katı çözeltiler,
- Nitrürlerin oluşumu esnasında katı çözeltilerden azotun alınmasıdır.

Mikroalaşım elementlerinin oluşturduğu çökeltiler değişen sıcaklıklarda farklılık gösterir. Çökeltilerin oluşum sıcaklığı ve etkileri şu şekilde sıralanabilir (Erden, 2015).

- Tane büyümesini kontrol etmede yararlanılan östenitin yüksek sıcaklıklarında istikrarlı olan azotça zengin karbo-nitrür çökeltileri oluşumu,
- Östenitin yeniden kristalleşmesini ve normalizasyon işlemi süresince tane büyümesini engellemede faydalanılan 1000 °C ve daha düşük dönüşüm sıcaklıklardaki (Nb, V ve Ti) karbo-nitrür oluşumları,
- Ferritin yeniden kristalleşmesini engelleme, dayanımı artırma veya ince ya da yassı taneler oluşması amaçlandığında kullanılan ferrit dönüşüm süresince ve dönüşüm sonrası karbo-nitrür çökelti oluşumları,
- Çekme dayanımını ve sertliği artırma amacıyla hızlı soğuma sırasında ve sonrası asiküler ferritteki çökelti oluşumları

### 2.4.1. Niyobyum (Nb)

Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli çeliklere niyobyum eklenmesi, karbon ve manganez kullanımının azalmasına izin verirken gelişmiş özelliklere yol açar. Ayrıca, niyobyum çelik matrisi içindeki çözünürlük sınırını aştığında, bir tane arıtıcı olarak görev yapan ve çeliğin tokluğunu ve mukavemetini daha da artıran karbür veya nitrür olarak çöker. Niyobyumun paslanmaz çeliğe eklenmesi, genellikle matrisde faydalı bir dispersiyon sertleştirme etki eden karbür çökeltileri oluşturur. Aynı zamanda, malzeme üzerinde zararlı bir kırılma etkisi yaratacak olan krom karbür oluşumunu önler (Sutulov, A., Wang, C. T., çevrimiçi a).

Niyobyum, çökeltme sertleşmesiyle mukavemet artışı çökeltme niyobyum karbürlerinin boyutuna ve miktarına bağlıdır. Tane küçültme özelliği, vanadyuma göre daha fazladır. Genellikle Niyobyum ilavesi %0.02 ile %0.04 arasındadır. %0.01 oranında ilavesi 35-40 MPa dayanım artışı sağlar (Özcan, 2005).

Pek çok martensitik paslanmaz çelik sınıfı, tane büyüklüğünün iyileştirilmesi için niyobyum içerir, böylece sünme direnci ve tokluk artar. Ferritik paslanmaz çelikler ayrıca, tanecikler arası korozyonu önlemek için karbon ve oksijen gibi interstisyel kirliliklerin stabilizasyonu için niyobyum kullanır (Sutulov, A., Wang, C. T., çevrimiçi a).

Niyobyum içeren çelikler, genel olarak kontrollü haddeleme, kontrollü yeniden kristalleşme haddelemesi, hızlı soğutma ve doğrudan su vermeyle üretilir. Çentik darbe direncinde meydana gelen azalmayı önlemek için özel haddeleme yöntemi bulunmaktadır. Widmanstätten ferrit oluşumu ve farklı büyüklükte tane meydana gelmemesi için yüksek sıcaklıkta haddeleme yapılmamalıdır (Özcan, 2005).

Kontrollü haddelemede dikkat edilmesi gereken bir husus da niyobyum karbür oluşumu için elementin tamamının ısıtma sırasında çözeltiye eklenmesi gerektiğidir. Bunun için gerekli olan yüksek sıcaklığa çıkma ve bekleme ihtiyacı beraberinde masraf artışını getirir (Topateş, 1995).

Kontrollü yeniden kristalleşme haddemesi vanadyumlu alaşımların aksine titanyumsuz da etkili olabilir. Titanyumla birlikte kullanıldığında niyobyum miktarı düşük tutulur ve kontrollü yeniden kristalleşme haddeme sıcaklığı yüksek tutulabilir (Özcan, 2005).

#### **2.4.2. Vanadyum (V)**

Yapısal çeliklere az miktarda vanadyum (yüzde 0.2'den az) eklenmesi, vanadyum karbür çökeltilerinin tane rafine edici etkisi sayesinde tokluklarını, sünekliklerini ve kuvvetlerini artırır. Bu Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı çelikler, davlumbazlar ve kapı panelleri gibi otomotiv bileşenlerinde ve petrol ve gaz boru hatlarında kullanılır (Sutulov, A., Wang, C. T., çevrimiçi b).

Neredeyse tüm takım çelikleri yüzde 0,10 ile 5 arasında değişen miktarlarda vanadyum içerir. Yüksek sıcaklıklarda sertlik ve kesme kabiliyetinin korunmasını sağlamak için buna ihtiyaç duyulmaktadır (Sutulov, A., Wang, C. T., çevrimiçi b).

Sıcak haddelenmiş vanadyum çelikleri geleneksel haddemenin yanı sıra, kontrollü yeniden kristalleşme haddemesiyle de üretilebilir. Elde edilen dayanımın temelde çökeltme sertleşmesinden bir kısmı da tane küçülmesinden gelir (Özcan, 2005).

Vanadyum ferrit içerisinde Alüminyumnitrid ile birlikte tane büyümesini engeller ve ince ferrit oluşmasını etkiler. Kontrollü haddeleden önce normalize edilmiş çeliklerde, yüksek dayanımlı boru hatlarında Vanadyumkarbonitrid çökeltmek haddeme sırasında yüksek dayanım sağlar. Normalizasyon çelikleri ve haddelenmiş çeliklerin dayanımını artırır. Azot miktarı artırılarak vanadyumun etkisi artırılabilir (Topateş, 1995; Karabulut, 2004; Erden,2014).

Vanadyum içerikli çeliklerde element miktarı genellikle % 0.10 oranına kadardır ve sıcak haddelenmiş durumda kullanılırlar. Oluşturduğu çökelti niyobyum çökeltileri kadar kararlı değildir ve soğuma hızının etkisindedir. Karbon miktarı, sıcak haddeleden sonraki soğuma hızı ve kesit kalınlığına bağlı olarak %0.01 V dayanımı 5 ile 15 MPa artırır (Özcan, 2005).

Bazı dökme demirlerde, az miktarda vanadyum ilavesi, grafit pullarının boyutunu ve dağılımını kontrol eder, böylece mukavemet ve aşınma direncini artırır. Vanadyum ilavelerine sahip çelik dökümler ayrıca, ağır iş ekipmanlarında ve makinelerde kullanılabilir düzeyde şok ve aşınma direnci de gösterir (Sutulov, A., Wang, C. T., çevrimiçi b).

Vanadyum, diğer mikroalaşımların tersine ferriti stabilize ederken ferrit oluşumunu engellemez. Kaynaklama açısından östenit tane sınırında gelişen ferrit formasyonu kaynak bölgesinin tokluğunu artırır. Vanadyumun bu özelliği beyitik oluşturan niobyumdan farklıdır (Topateş, 1995).

Manganez içeriği de dayanımı etkiler. Mangandaki %0.9 oranındaki artış matriksin dayanımını 34 MPa artırır. Manganın dayanım artırırken östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığını düşürmesi ve çok küçük taneli çökeltilerin oluşmasını sağlamasından yararlanılmaktadır (Özcan, 2005).

Vanadyum, titanyum alaşımlarının gücünü ve termal kararlılıklarını artırır. Bazı önemli ticari titanyum alaşımları yüzde 2,5 ila 15 arasında vanadyum içerir. Jantlar, kanatlar ve jet uçaklarının motorlarında kullanım alanı bulunmaktadır (Sutulov, A., Wang, C. T., çevrimiçi b).

%0.25 C ve %0.08 V içerikli sıcak haddelenmiş bir vanadyum çeliğinin akma dayanımı maksimum 450 MPa'dır. Sıcak haddelenmiş vanadyumlu mikroalaşımli çeliklerin akma dayanım limiti kontrollü haddeleme teknikleri uygulanmasına rağmen 415 MPa'dır. Kontrollü haddelemede yeniden kristalleşmenin olduğu vanadyumlu çeliklerde östenit tane büyümesine engel olmak için küçük taneli TiN çökeltilerini meydana getirmek için titanyum ilavesi gerekir. Yeniden kristalleşmenin engellenmemesinden dolayı geleneksel kontrollü haddelemede akma dayanımı 415 MPa değerini geçemez (Özcan, 2005).

### 2.4.3. Titanyum (Ti)

Titanyum, Nb – V alaşımlı çeliklerde olduğu gibi çökelme sertleşmesi ve tane küçülmesi yoluyla dayanımı artırır. Yeniden tavlanan veya sürekli döküm ile üretilen çeliklerde ostenit tane büyümesini engeleyerek tane küçültücü etki yapar. Titanyumun deoksidan yapısı sadece alüminyum ile deokside edilmiş elementlerle kullanılabilmesine yol açar (Özcan, 2005).

Titanyum haddelenmeden önce ve ısıdan etkilenen kaynak bölgelerinin yeniden ısıtılması sırasında, ostenit aralığında yüksek sıcaklıklarda ince tane büyüklüğünü muhafaza etmede rol oynamaktadır. Genellikle vanadyum ve / veya niyobyum ile birleştirilir ve uygun sıcaklık planlamasıyla tane küçültmede etkili olur (Morrison, 2000).

Titanyumlu çeliklerde, yeniden kristalleşmeli kontrollü haddeme ile sağlanabilen tane rafinasyonu, niyobyumlu çelikler kadar olmasada çoğu zaman amaca uygundur (Topateş, 1995).

Kontrollü haddelenmede titanyumun tane küçültücü etkisi vanadyumdan daha fazla niyobyumdan daha azdır. Yeterli titanyum kullanımıyla, titanyum karbür vanadyum ve niyobyumdan daha fazla çökelme sertleşmesi sağlar. Bu durumla birlikte tokluk düşüşünü engellemek için tane boyutu küçültülmelidir. Yüksek dayanımlı sıcak haddelenmiş saclarda dayanım arttırıcı olarak sadece titanyum kullanımı mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler (Özcan, 2005).

Düşük karbonlu niyobyum çeliklerine titanyum ilavesi tüm özelliklerde iyileştirme sağlamaktadır. Azotun TiN olarak bağlanmasıyla niyobyumun verimini arttırmakta ve ferrit çökmesini arttırmaktadır. Farklı miktarlarda niyobyum içerikli %0.04 oranında titanyum ilaveli saclarda 675 °C deki bobin sarma sıcaklığında akma dayanımı yaklaşık 105 Mpa artmıştır. Sıcak haddelenmiş niyobyum titanyum çelik saclarda ferrit-perlitik yapıda 550 MPa akma mukavemeti elde edilmektedir. Vanadyum veya molibden ilavesi ile akma dayanımı 690 MPa'ya yükseltilebilmiştir (Özcan, 2005).

#### **2.4.4. Alüminyum (Al)**

Alüminyum akma dayanımını ve darbe tokluğunu arttırıcı etki gösterir. Ayrıca oksijen gidermek için de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Alüminyumun çökmesi çok yavaş olmakla birlikte sadece nitrür oluşturur. Alüminyunnitrür, ancak 1000 °C sıcaklık üzerinde çözünür. Ancak indüksiyon ısıtma gibi hızla ısıtılma durumunda, belirli bir zaman çözelti dışında kalabilir, böylece ince tane boyutu sağlamak için kullanılır. Alüminyunnitrür normalizasyon çeliklerinde tane büyümesini engeller (Topateş 1995, Karabulut, 2004).

Çekme dayanımı düşük olan saf alüminyum, bakır, silisyum, çinko, magnezyum, manganez gibi elementlerle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilir (Odabaşı. Ç., 2017).

#### **2.4.5. Karbon (C)**

Çeliğin mekanik özelliklerine en çok etki eden alaşım elementi karbondur. Akma ve çekme dayanımını artırıcı etki yaparken şekillenebilirliği, kaynak yapılabilirliği ve uzamayı azaltır. Çeliğin kullanım alanına göre karbon miktarı düzenlenir. Düşük karbonlu çeliklerde 270-350 °C de yapılan şekillendirmede karbon atomunun çapı küçük olduğundan yayılımı artar ve kırılma hızına neden olur. Çeliğin bu sırada aldığı mavi renk nedeniyle mavi gevreklik denilen bu olaya dikkat edilmesi gerekir.

Karbon kullanımını arttırdığında martenzit ve beyitlik yapı oluşumunda etkilidir. Mikroalaşımli çeliklerde sıcak haddeleme yapılırken yaklaşık % 0,2 oranında karbon kullanılır. Kontrollü soğutma mekanizmasıyla üretilen otomotiv sanayisi dövme parçalarında bu oran % 0,25'in üzerine çıkabilir (Metals Handbook, 1994; aktaran Topateş 1995).

#### **2.4.6. Azot (N)**

Azot çelik üretiminde kırılabilirliği artırdığı, eğme dayanımını düşürdüğü için istenmeyen bir element olmakla birlikte mikroalaşımli çeliklerde çökeltme sertleşmesini artırdığı için düşük miktarda kullanılmaktadır.

Mikroalaşımli çeliklerde genel olarak % 0,02 seviyesinde azot kullanımı görülmekle birlikte % 0,005 seviyesinde sınırlandırılan uygulamalar da bulunmaktadır. Vanadyumlu çeliklere eklenen azot çökeltme sertleşmesini artırır (Sage, 1992 aktaran Topateş 1995).

Çökeltme sertleşmesi çentik darbe dayanımını düşürür, bu durumda karbon miktarı azaltılmalıdır. Azotun çökeltme sertleşmesine sağlamak amacıyla 9,5 mm kalınlık üstündeki kontrollü soğutulmuş sac ve levhalarda kullanımı bulunmaktadır. Azot miktarı 0.018'le 0.022% arasında değişen Vanadyumlu sıcak haddelenmiş 16 mm kalınlığa kadar çelik levhalarda 550 MPa akma dayanımı kontrollü soğutma ile elde edilir. Azotun ısı tesiri altındaki bölgenin tokluğuna zararı nedeniyle kaynak yapılacak ürünlerde kullanılmaz (Özcan, 2005).

#### **2.4.7. Silisyum (Si)**

Silisyum ucuz bir alaşım elementidir ve oksijen giderici olarak kullanılır, malzemenin süneklik ve tokluğunu düşürmeden akma, çekme dayanımını ve esnekliği artırır. İçerikteki silisyum miktarı azaldıkça tufal yama oranı artar. Elektrik akım kaybını engelleyici özelliği vardır. Esneklik özelliği nedeniyle yay çeliklerinde kullanılır, tel malzemelerde telin sertleşmesine ve kopmalara neden olduğu için tercih edilmez.

Silisyumun deoksidan olarak kullanımı % 0,35 oranındadır. Katı çözültü sertleşmesi sağlayarak akma dayanımını artırır. Kaynaklanacak bölgelerde % 0,3'den fazla kullanımı toklukta ve kaynaklanabilirlikte düşmeye neden olur (Topateş, 1995; Karabulut, 2004).

#### **2.4.8. Fosfor (P)**

Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını arttırır, talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır. Yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini olumsuz etkiler, soğuk kırılma yararı, Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir ve istenmeyen özellikleri nedeniyle çelik içerisinde mümkün olduğunca düşük olmasına çalışılır. Kükürtle birlikte fosfor azlığı malzeme kalitesinde birinci kriterdir. Kaliteli ıslah çeliklerinde maksimum fosfor miktarı %0.045, asal ıslah çeliklerinde ise %0,035 dir.

Mikroalaşım çeliklerinde ferrit içinde katı çözümleri sertleştiricisi olarak yararlanır ve bakır ile birlikte kullanımı korozyon dayanımını artırır. % 0,05'den düşük kullanımlarda kırılma nedeni olur (Topateş, 1995, Karabulut, 2004).

#### **2.4.9. Manganez (Mn)**

Manganez çeliğin dayanımını, sertleşme, dövme ve kaynak kabiliyetini artırır. Östenit kararlaştırıcıdır. Manganezin iyi yöndeki etkisi, karbon özelliğinin artmasını etkiler, paslanmaya ve korozyona olan dayanımı, su verme derinliğini artırır. Kükürtle Mn S bileşiği yaparak sıcak kırılma nedeni olan demir kükürt Fe S oluşumunu engeller.

Mikroalaşım çelikler yaklaşık olarak %1,3 manganez içerirler. İğneli ferritin tane küçültülmesine manganezin etkisi bu oranın üstünde ihmal edilecek düzeylerde olduğundan maksimum manganez miktarı %1,3 ile % 1,7 arasındadır (Topateş,1995).

#### **2.4.10. Bakır (Cu)**

Bakır, akma ve çekme dayanımı, korozyon direnci üzerinde olumlu etki yaparken yüzde uzamayı soğuk çekilebilirliği ve şekillenebilirliği olumsuz etkiler.

Mikroalaşım çeliklerde yaklaşık %0.2 oranında kullanımı atmosferik korozyonda etkilidir. %0.05 oranında fosfor eklenmesi bu özelliği artırır. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde %0.5 oranında bakır kullanımı ferritte sertleşmeyi sağlayarak dayanımı



arttırır. %0.67 nin üzerindeki değerlerde ferrit içinde sertleştirici etki gösterir (Topateş, 1995).

#### **2.4.11. Nikel (Ni)**

Nikel stenit kararlaştırıcı bir elementtir. Oda sıcaklığında bile kafes yapısı kübik yüzey merkezlidir ve kolay şekillendirilebilmede etkili olur. Nikel, darbe tokluğunu ve tavlı çeliklerde dayanımı arttırır, tane kltcdr. Krom ile birlikte kullanılarak, sertleşmeyi, sneklıği ve yorulma direncini arttırır.

Nikel alaşımlı malzemeler türlü sanayi dalı içinde kullanılmakla birlikte nükleer reaktörler, uçak ve gaz türbinleri, buhar üretme kazanları, roket motorları, deniz altılar, kesici takımlar ve cam sanayii alanında yaygın kullanımı bulunmaktadır (Ayvacı, 2019).

#### **2.4.12. Molibden (Mo)**

Molibden, düşük nikel ve düşük krom içeren çeliklerde temper gevrekliği eğilimini gidermek için kullanılır. Ayrıca, eliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir.

Uçak ve yer taşıtları motorları ile imalat sektörü çeliklerinde kullanıma uygun niteliktedir. Bunun yanında oyuklanma korozyonunu engellemek amacıyla da kullanılır (Ayvacı, 2019).

Speich, G.R (1981) tarafından molibdenin çeliğin tane boyutuna etkisi olmadığı belirtilmiştir. Molibdenin, ferrit fazında oluşturduğu karbür tavlama sıcaklığında çabuk cznr. Molibdenin katı eriyikteki sertliğe önemli etkisi bulunmaktadır. Çift fazlı çeliklerde %0,1 ile 0,5 arasında molibden bulunur (Speich, 1981 aktaran Aydın, 2006).

Ferrit – perlit niyobyum çeliklerine molibden eklenerek çekme ve akma dayanımları %0.27 Mo seviyesine kadar her %0.1 için 20-30 MPa arasında artış sağlar. Molibden

mikroyapı üzerinde perlitin morfolojisini değiştirerek üst beyniti kısmi olarak perlitin yerine almasını sağlayarak etki eder. Bu etki sonucu dayanım artışı molibden-niyobyum birlikteliğinin Nb(CN) çökeltme sertleşmesine ve katı-eriyik sertleşmesine bağlanmaktadır. Molibden ile niyobyum (veya vanadyum) arasındaki etkileşimde çökeltme sertleşmesinin artışı molibden ilavesine bağlanmaktadır. Molibdenin karbon aktivitesini düşürüp ostenitdeki çözünürlüğü artırdığı ve çökeltmeyi azalttığı, bunun sonucunda ferritte daha fazla çökeltme sağlayıp dayanımı artıracığı belirtilmektedir (Özcan, 2005).

#### **2.4.13. Krom (Cr)**

Oksidasyona karşı direnç ve yüksek sıcaklık korozyonu açısından en önemli alaşım elementi kromdur. Krom, paslanmaz çeliklerin, nikel krom alaşımlarının, korozyona dirençli çeliklerin ve süper alaşımların yapısında bulunur (Superalloys, 1984 aktaran Ertan, 2003).

Krom sertleşebilme kabiliyetine etki eder, korozyon ve oksidasyon direnci sağlar. Yüksek karbonlu çeliklerde aşınma direncini yükseltir Yüksek miktarda krom ilavesiyle karbonla oluşturduğu bileşik yüzeyi paslanmazlık sınırının altına çeker. Çekme dayanımını ve sıcağa dayanımı da artırıcı özelliğe sahiptir.

### **2.5. MİKROALAŞIM ÇELİKLERDE ÇÖKELTİ OLUŞUMU**

Mikroalaşım çeliklerde çökeltme sertleşmesi, çok küçük karbonitrür ve karbür çökeltmeleri ile gerçekleştirilir. Çökeltme sertleşmesinin düzeyi çökeltmelerin türü, çökeltmelerin ferrit içinde yayılma yoğunluğu ve parçacık büyüklüğüne bağlıdır. Bu çeliklerde çökeltme sertleşmesinde en etkili karbür MC türüdür (Tekin, 2012).

Mikroalaşım çeliklerde çökeltmelerin çeliğin özelliklerine önemli etkisi olduğundan mikroalaşım elementleri bu elementlerin çözünebilirlikleri ve çökeltme oluşturmalarına uygun olarak seçilmelidir. Karbür ve nitrür oluşturabilme, çökeltme sertleşmesi özelliğini kazandırır (Tekin, 1995 aktaran Karabulut, 2004).

Mikroalaşım çeliklerinde karbonitrür çökmesi 3 aşamalıdır.

- Çökelti sıvı faz içerisinde ve katılma sırasında veya katılmadan sonra sıvı-katı ara yüzeyinde ve ferrit içerisinde meydana gelirler.
- Çökelti sıcaklık düşerken sıcak deformasyon sürecinde meydana gelirler.
- Çökelti östenit-ferrit faz dönüşümü sırasında ve sonrasında meydana gelmektedir (Gladman, 1989 aktaran Karabulut, 2004).

Mikroalaşım çelik üretiminde soğuma hızı arttıkça, çökelti oluştuğu sıcaklık düşmektedir. Burada hız çökelti hangi fazda (ferrit ya da östenitte) çökeceğini belirlemektedir (Koltuk, 1996 aktaran Karabulut, 2004).

## **2.6. MİKROALAŞIMLI ÇELİKLERDE DAYANIM ARTTIRICI MEKANİZMALAR**

Çeliklerde dayanımı artırıcı mekanizmalar;

- Katı çözümlü sertleşmesi,
- İşlem sertleşmesi,
- Çökelim sertleşmesi,
- Ferrit tane küçülme sertleşmesidir (Tekin, 2012).

YDDA çeliklerde akma dayanımını artıran mekanizmalar dislokasyon sertleşmesi, tane sınırı sertleşmesi ve faz dönüşüm sertleşmesi olarak sıralanabilir. Ferrit tane boyutunun, hem akma sınırı hem de sünek-gevrek geçiş sıcaklığına etki ettiğinin belirlenmesi bu alanda çok önemli bir gelişmedir (Koltuk, 1996; aktaran Karabulut, 2004).

## BÖLÜM 3

### TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalürjisi (TM) saf metal tozları, alaşım tozları, seramik tozları gibi çeşitli tozların karıştırılma, preslenme ve sinterlenmesi yoluyla dayanımı daha yüksek malzeme elde edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Robert, 1984; Özkük, 2004 aktaran Erden, 2015).

Bu yöntemle birbiri içinde çözünmeyen tozlar, intermetalikler, bakırlı çelikler, refrakter malzemeler, sermetler ve karışık fazlı bileşimler üretilebilir (Erden,2015).

Elde edilen ürünün son şekle yakın olması, küçük parçaları ekonomik üretme imkanı, ileri teknoloji malzeme üretimine uygunluğu, sıcak presleme, toz metal enjeksiyonu, sinterleme, sıcak izostatik presleme, nano parça teknikleri ve mekanik alaşımlama yöntemlerinin kullanılmasıyla öne çıkan ileri teknoloji olarak görülmektedir (Kılınç ve Uslan, 2003 aktaran Somunkıran, 2006).

TM farklı metal tozlarını, yüksek performanslı, hassas ölçülü, ve dayanıklı ürünlere dönüştürür. Toz hazırlığı sonrasında, tozların preslenmesi ve sinterleme basamaklarını içerir. Bu üretim yöntemi çok geniş malzemelerle alaşımlama yapılabilmesi, son ürüne en yakın boyutta ürün üretimi, malzeme kaybı olmaması, diğer yöntemlerin uygulanamadığı malzemelerin kullanılabilmesi, karmaşık şekillerin üretimine imkan vermesi gibi avantajları bulunmaktadır (Somunkıran, 2006).

Döküm yöntemiyle üretilemesi mümkün olmayan seramikler, karışık fazlı bileşimler, bakırlı çelikler, intermetalikler, refrakter malzemeler, birbirinde çözünemeyen tozlar, sermetler gibi malzemeler TM yoluyla üretilebilir. Ortopedi malzemeleri, yüksek sıcaklığa dayanıklı filtreler, nükleer güç santralleri, otomobil ve uçak parçaları, saat

parçaları, elektrik bağlantı elemanları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Erden, Taşçı, 2016).

TM ürünleri pürüzsüz yüzeye sahiptir ve nadiren ikincil işleme gerektirir. Seri üretimde malzeme verimliliği %97 oranlarındadır. Maliyet, son ürün şekline yakınlık ve istenen özelliklere sahip olma açısından diğer yöntemlere üstünlükleri vardır (Sarıtış, Türker, Durlu, 2007 aktaran Erden, 2017).

Yapılan çalışmalarda TM yöntemiyle Ti ve V, Nb ve V mikroalaşımli çelik üretilmiş mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır (Erden ve ark 2014, 2015, 2016, 2017).

### **3.1. TOZ ÜRETİMİ**

Toz üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yöntemlerin toz boyutuna, şekline, mikroyapısına etkili olduğu, birçok özelliğine ve maliyetine etki ettiği belirtilmektedir (Erden, 2015).

Kullanılan yöntemler;

- Mekanik yöntemler; (öğütme, talaşlı üretim, aşındırma ile öğütme ve mekanik alaşımlama, darbe yöntemleri)
- Elektrolizle üretim,
- Kimyasal yöntemler; (gazla bozunma, ısıl bozunma, sıvıdan çökeltme, gazdan çökeltme, katı-katı tepkimeli sentez)
- Atomizasyon yöntemleri; (gaz atomizasyonu, sıvı atomizasyonu, savurmalı atomizasyon, plazma tekniği)
- Buharlaştırma yöntemi,
- Özel üretim yöntemleri olarak sayılmaktadır (Sarıtış vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015).

Talaşlı üretimde, elde edilen tozlar düzensiz yapıda ve iri taneli, genellikle de dış etkenler nedeniyle kirlenmeye açıktır. Genellikle hurda değerlendirme amacıyla tercih edilmektedir (Saritaş vd. 2007 aktaran Yavuzer, 2019).

Öğütme sert bilyeler, çekiç ve çubuk gibi araçlarla kırılğan malzemelerden toz üretme yöntemidir. Sünek malzemelerde kırılma gerçekleşmediğinden öğütme metodu kullanılamamaktadır (Saritaş vd. 2007 aktaran Yavuzer, 2019). Genellikle bilyeli değirmenlerde üretim gerçekleştirilmektedir. Demir alaşımli kırılğan malzemeler bilyeli değirmenlerde öğütülebilir (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlama (MA), çeşitli metal tozların tekrar tekrar soğuk kaynak, kırma ve yeniden işleme tabi tutulduğu yüksek enerjili bir öğütme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Mekanik enerjinin toz parçacıklarına aktarılmasıyla partikül ve tane büyüklüklerinde incelmeye meydana gelir, difüzyon mesafeleri azalır, öğütme sırasında sıcaklığın da hafif artışıyla harmanlanmış tozların alaşımlanmasına yol açar (Suryanarayana, 2001) (Suryanarayana, 2004 aktaran Suryanarayana, 2008).

Elektroliz yöntemiyle iletkenliği yüksek metal tozları üretilebilir. Uygun şartlar sağlandığında katotta biriken tozlar toplanarak çeşitli işlemlerden geçirilirler (Kurt, 1992).

Kimyasal üretim yönteminde katı, sıvı veya buhar fazı tepkimeleriyle toz elde edilebilmektedir. Doğrudan indirgeme, termal ayrışma (karbonil), sıvıdan çöktürme ve gazdan çöktürme olarak ayrılır (Roll, 1984 aktaran Ayvaci 2019).

Atomizasyon sıvı metalin eritme kabının altındaki delikten akarken basınçlı sıvı ya da gaz püskürtülerek parçalanmasına dayanmaktadır (Kurt, 1992). Yaygın bir toz üretim yöntemidir. Homojenliği sağlamanın kolaylığı, şekil, tane boyutu kontrolü kolaydır. Bu yöntemde kullanılan teknikler; su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, döner disk atomizasyonu ve dönen elektrot atomizasyonudur (Boz, 1999).

### **3.1.1. Toz Metalürjisinde Üretim Aşamaları**

TM üretiminde toz hazırlığından başlayan süreçte birçok basamak bulunmaktadır. Bu basamakların her biri istenen ürünün özelliğine göre hassas olarak takip edilmektedir.

### **3.1.2. Toz numunesi alma**

Toz numunesi farklı noktalardan az miktarda numune alınıp harmanlanarak oluşturulur. Yapılacak analiz için tüm partinin tamamını temsil edecek şekilde toz numunesi alınmalıdır. Numune alırken parçacıkların yapışma eğilimi, zayıf ve kuvvetli bağlarla tutunan topraklanmalar giderilmelidir. Bu amaçla mekanik ve ultrasonik çalkalama işe yüzey aktifleştiren sıvılar kullanılır. Kayma kuvvetleri de toz dağıtılmasında kullanılabilir. (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015).

### **3.1.3. Parçacık boyut ölçümü**

Toz parçacık boyutlarını ölçmede çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; mikroskopla ölçüm, elemeye ölçüm, sedimentasyonla ölçüm, ışık saçılımı ve kırınımıyla ölçüm, elektriksel alan algılamasıyla ölçüm, ışık engellemeyle ölçüm, X-ışınıyla ölçüm şeklinde sayılabilir (Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden, 2015).

### **3.1.4. Tozların Sıkıştırılması ve Preslenmesi**

Hazırlanan tozlar sıkıştırılarak katı bir malzemeye dönüştürülür. Sıkıştırma ve şekillendirme, gevşek durumdaki tozun belirli bir dayanımı olan kütleye dönüştürülmesidir. En çok kullanılan yöntem kalıpta sıkıştırma, küçük ve sert parça üretiminde bağlayıcı kullanılması gereklidir (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015).

Toz karışımında homojenliği sağlamak amacıyla karıştırma işlemi yapılmaktadır. Homojen karışım parçanın dayanımını olumlu etkiler (German, 1998; Matik, 2010;

Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015). Presleme işleminde kalıp içerisine çinko stearat, stearik asit, lityum stearat, kalsiyum stearat gibi yağlayıcı ilave edilmesi, sürtünme nedeniyle oluşabilecek çarpılmaları önleyerek preslenen numunenin kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırır. Çekme testinde çatlak oluşumunun, numune kalıptan çıkarılırken oluşan ve sinterleme aşamasında kapanmayan mikro çatlaklar ile açıklanabilecek şekilde numune yüzey bölgelerinde olduğu gözlemlenmektedir. Yağlayıcının fazla kullanımı da yüzey pürüzsüzlüğünü olumsuz etkiler (Erden, 2015).

TM aşamalarından sıkıştırma işlemi tek yönlü presleme, çift yönlü presleme, soğuk izostatik presleme ve sıcak izostatik presleme olarak 4 şekilde yapılmaktadır.

Tek yönlü preslemede malzemenin yoğunluk dağılımının hareketli zımba yönünde fazla diğer yönde daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca kalıba doldurulan toz yüksekliği ile çap arasındaki oran yoğunluğun dağılımına etkili olur. Presleme yapılan kalıpların oldukça dayanıklı malzemelerden imal edilmesi gereklidir (Ekşi ve Kurt, 1999; Karabulut, 2011 aktaran Erden, 2015).

Çift yönlü preslemede toz, alttan ve üstten eş zamanlı olarak sıkıştırılır. Tek yönlü sıkıştırmaya göre daha homojen yoğunluk dağılımı oluşmaktadır.( Erden, 2015).

Soğuk izostatik preslemede eşit olarak her yönden baskı uygulanır. Toz konulan sızdırmaz elastik kalıp havadan arındırılarak, yüksek basınçlı akışkan içinde preslenir. Bu yöntemde yoğunluk dağılımının daha homojen olduğu gözlenmektedir (German, 1994; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden, 2015).

Sıcak izostatik presleme, genellikle 10 ila 207 Mpa arası yüksek basınçlı ve 2000 °C'ye varan sıcaklıktaki argon veya azot gazının tozu her yönden preslemesi ile uygulanan diğer yöntemlere göre daha üstün nitelikli ürün elde edilebilen bir yöntemdir (Zimmerman, Toops, 2008).



### **3.1.5. Tozların Sinterlenmesi**

Sinterleme, tozların şekillendirildikten sonra yüksek sıcaklık etkisiyle yoğunlaştırma ve dayanım kazandırma işlemidir. Sinterleme, ön ısıtma, sinterleme ve soğutma aşamalarından oluşur (Erden,2015).

Sinterleme işleminde sıcaklık etkisiyle yüksek enerjiyle yüklenen atomların ergime sıcaklığının belli bir seviyede altındaki aktivitesini, polimer yakılması, boyut değişimi, parçacıklar arası bağlanma ve mikroyapının irileşmesi ile sonuçlanmaktadır. Sinterlemeden sonra yoğunluk, dayanım, sertlik, iletkenlik, elastikiyet gibi değişimler meydana gelir. Sinterleme işlemi katı hal sinterleme ve sıvı fazlı sinterleme olarak iki yöntemle yapılmaktadır. Katı hal sinterleme üzerinde birçok çalışma yapılmasına rağmen ürünlerin %70'i sıvı fazlı sinterleme işlemiyle üretilmektedir (German, 2007, Carter, Norton, 2007 aktaran Kaya. 2014).

### **3.1.6. Bağlayıcı veya Yağlayıcı Yakma**

Toz hazırlığı ve karıştırılmasında eklenen bağlayıcı veya yağlayıcıların üründen uzaklaştırılması amacıyla ham parçanın bağlayıcı veya yağlayıcıların buharlaşmasını sağlayacak düzeyde ısıtılmasıyla gerçekleştirilir (Erden,2015).

## **3.2. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN ANALİZİ**

TM ile üretimde elde edilen malzemelerin mikroyapısal, mekaniksel ve yüzey özelliklerine değinilecektir.

### **3.2.1. Mikroyapısal Özellikler**

Mikroyapı analizi, sinterlemeden sonra ürün kesitinin parlatılıp dağlanarak genellikle optik ve elektron mikroskoplarıyla gözenek ve tane yapısının incelenmesiyle gerçekleştirilir. İncelemede, ince ve düzensiz bölgeler tane sınırı, toplam hacmin boşluklu kısmı ise gözeneklilik olarak tanımlanır. Gözenek tespiti, parlatılmış ve

dağlanmış yüzeye epoksi uygulanması, yeniden parlatma ve dağlamaya müteakip tekrar epoksi uygulanarak hafif dağlama ve parlatma işlemi sonrası mikroyapı incelemesiyle de gerçekleştirilmektedir. Ayrıca nokta sayma işlemi de yapılmaktadır (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015).

### **3.2.2. Mekanik Özellikler**

Yoğunluğu istenen düzeydeki malzemeler, mikroyapılarındaki bozukluklar nedeniyle istenen özelliklere sahip olamayabilir. Malzemelerin dayanım ve sertliği, süneklik, darbe tokluğu, yorulma ve kırılma tokluğu değerleri incelenir (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015).

Sertlik, malzeme yüzeyine batırılan bilye, konik uç yada piramit uç gibi ölçüm elemanlarının derinlik ve yüzey alanı değerleri belirlenerek ölçülmektedir. Dayanım düşük süneklikteki malzemelerde çapraz kırma deneyi ile ölçülmektedir. Sünek malzemelerde ise çekme deneyi uygulanmaktadır (Erden,2015).

### **3.2.3. Yüzeyle İlgili Özellikler**

TM ürünlerinde, yüzeyde oluşabilecek oksitlenme, aşınma ve korozyon yüzey gözenekliliği ile ilişkili olabilir. Gözenekler yüzey alanını genişlettiğinden, orozyona neden olabilecek unsurlar gözeneklerde birikebileceğinden, gözeneklerde bulunan akışkanlar kimyasal bileşimi değiştirebileceğinden oksitlenme, aşınma ve korozyon oluşumuna neden olabilirler. Yoğunluğu yüksek malzemeler ve iyi sinterlenmiş malzemelerde aşınma, oksitlenme ve korozyon dayanımı daha fazladır (Saritaş vd., 2007; Matik, 2010; Karabulut, 2011 aktaran Erden,2015).

## BÖLÜM 4

### MEKANİK ALAŞIMLAMA

Mekanik alaşımlama, toz partiküllerinin tekrar tekrar soğuk kaynak, kırma ve yeniden işleme tabi tutulduğu yüksek enerjili bir öğütme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Mekanik enerjinin toz parçacıklarına aktarılmasıyla partikül ve tane büyüklüklerinde incelmeye meydana gelir, difüzyon mesafeleri azalır, öğütme sırasında sıcaklığın da hafif artışıyla harmanlanmış tozların alaşımlanmasına yol açar (Suryanarayana, 2001) (Suryanarayana, 2004 aktaran Suryanarayana, 2008).

Mekanik alaşımlama, öğütme işlemleri içinde en başarılı yöntemlerdendir. Mikroskopik boyutta yenilenen çarpışma, soğuk kaynama ve kırılma işlemleriyle istenilen kompozit toz üretilir (Söyler, 2008).

Mekanik alaşımlama tozların belirli oranlarda karıştırarak öğütücü malzemeye birlikte öğütme ortamına konulması ile başlar. Karışım kararlı hale gelinceye kadar işleme devam edilir. Elde edilen toz kalıp içerisinde sıkıştırılır veya ekstrüze edilir. Sonrasında homojenleştirme ısı işlemine tabi tutulur. Bu işlemlerde mekanik alaşımlama süresi, başlangıç tozlarının yapısı, öğütücü madde çeşidi ve kullanılan atmosfer gibi değişkenler mekanik alaşımlamanın öne çıkan parametreleridir (Kılınç, 1999).

Mekanik alaşımlama tekniği, 1966'da, çökelme sertleşmesiyle elde edilen oda sıcaklığı kuvvetini, dispersiyon sertleşmesi ile elde edilen yüksek sıcaklık kuvvetiyle birleştiren nikel bazlı süper alaşımlar üretmek için endüstriyel bir zorunluluktan geliştirilmiştir (J.S. Benjamin, 1990 aktaran Suryanarayana, 2008).

Mekanik alaşımlamanın son 40 yıldaki tarihsel gelişimi üç ana döneme ayrılabilir.

- 1966'dan 1985'e kadar olan ilk dönem, çoğunlukla havacılık endüstrisindeki uygulamalar için oksit dispersiyonlu (ODS) süper alaşımların geliştirilmesi ve üretilmesiyle ilgiliydi. Yararlı özelliklere sahip olan ve Ni ve Fe'ye dayanan geliştirilmiş alaşımlara sahip olan çeşitli alaşımlar kendilerine kullanım alanı bulmuştur. Bunlar arasında MA754, MA760, MA956, MA957, MA6000 ve diğerleri sayılabilir. Bu çalışmanın büyük kısmı ABD'deki INCO laboratuvarlarında yapıldı (Suryanarayana, 2008).
- Mekanik alaşımlama ürünü olan MA 754 askeri jet motorlarında kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık amacıyla 1910 yılında thoryum ve tungsten kullanılmıştır. Mekanik alaşımlamayla üretilen ferritik ODS alaşımlarının yüksek sıcaklıkta sürünme, oksitlenme ve nitrürlenmeye dayanımları yüksektir. Bu nedenle gaz türbinleri gibi ortamlarda kullanılmaktadır (Kılınç. 1999).
- Bunlara ek olarak, mekanik alaşımlama ürünleri için birkaç küçük ölçekli uygulama da geliştirilmiştir. Tipik bir örnek olarak, ABD ordusu tarafından Körfez savaşı sırasında ve sonrasında kullanılan Mekanik alaşımlanmış hazır yemek ısıtıcılarıdır (Suryanarayana, 2008).
- 1986'dan yaklaşık 2000 yılında mekanik alaşımlama süreçlerine yeni yaklaşımlar getirilmiştir. Bu dönemde birçok bilimsel çalışma ve konferanslar yapılmış ve adeta bir yayın faaliyeti patlaması olmuştur (Suryanarayana, 1995 aktaran Suryanarayana, 2008).
- Bu dönemde çeşitli yeni maddeler sentezlenmiş, elde edilen fazların veya elde edilen mikro yapıların tahminini mümkün kılmak için çeşitli modelleme çalışmaları yapılmıştır.
- 2001 yılından itibaren başlayan üçüncü periyotta, mekanik alaşımlama ürünlerinin yeni kullanım alanları kazanması ve alaşımın tam yoğunluğa getirilmesi için yenilikçi teknikler geliştirilmesiyle sürmüştür (Suryanarayana, 2008).

Diğer parametreler sabit tutularak değişen zamanlarda öğütülen toz mikroyapısı incelenip, olumlu sonuç alınabilir. Mekanik alaşımlama tekniği başka tekniklerle alaşım haline getirilemeyen elementlerin homojen biçimde alaşımlanmasında kullanılır. Gelişim aşamalarında özgün “sentetik” alaşımların üretilmesi ve geliştirilmesi mümkündür (Kılınç, 1999).

Mekanik alaşımlama tekniği, türbin endüstrisinde yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen nikel bazlı terkiplerin üretilmesine olan endüstriyel ihtiyaca cevap olarak geliştirilmiştir. Birkaç denemeden sonra, şu anda mekanik alaşımlama olarak bilinen yüksek enerjili bilyeli frezeleme en uygun işleme yöntemi olarak seçilmiştir. O zamandan beri, Mekanik alaşımlama aracılığıyla birtakım oksit dağılımıyla mukavemetlendirilmiş süper alaşımları geliştirilmiştir ve bunlar sektörde kabul görmüştür. Şu anda endüstride Fe ve Ni'ye dayanan çok sayıda alaşımlar kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2008).

Çok önemli gelişmeler gösterilen mekanik alaşımlamada 3 zayıf yön Maliyet, birleştirme ve kirlenme olarak belirtilmektedir. Toz işlemenin maliyetiyle pazar büyüklüğü dengesi sağlanamadığı takdirde pahalı olmaya devam edecektir. Öğütülmüş tozun konsolidasyonu ciddi bir problem olmaya devam etmektedir. Tam yoğunluğa ulaşmak ve aynı zamanda metastatik etkileri korumak için tozların başarılı bir şekilde birleştirildiğini bildiren çok fazla araştırma yapılmamıştır (Suryanarayana, 2008).

Son nokta, tozların kirlenmesinin birçok durumda ciddi bir sorun olduğudur (Suryanarayana, 2004 aktaran Suryanarayana, 2008). Kirlenmeyi en aza indirmek için bazı çözümler önerilmiştir. Bunlar, öğütücülerin boşaltılmış ve veya etkisiz bir gazla doldurulmuş odaların içine yerleştirilmesini veya tozların öğütülebildiği yüksek saflıkta gazlı bir atmosferin kullanılmasını içerir. Her iki seçenek de pahalı ve / veya pratik olmayabilir (Suryanarayana, 2008).

Kirlenmeyi önleme amacıyla aynı malzemeden bilyeler karıştırıcı ve tank kullanılabilir. Ortam olarak organik bir sıvı ortamı kullanmanın da öğütme ve

kaynama işlemleri arasındaki dengeyi kurmada faydalı olduğu belirtilmektedir (German, 1994 aktaran Söyler, 2008).

Süperalaşımın önemli bir dezavantajı, yüksek sıcaklıklarda kullanım ömürlerinin azlığıdır. (Curwick, 1981 aktaran Kılınç 1999). Mekanik alaşımlama ile üretilen süper alaşımlar, alüminyum ve titanyum gibi reaktif alaşımlama elemanları ve ince dağılmış Al ve Ti oksit partiküllerinin bulunduğu alaşımlardır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklara dayanımları yüksektir ve yapılarını korurlar (Kılınç, 1999).

Mekanik alaşımlamada yaygın olarak 1-200 µm arasında saf tozlar ve oksitler kullanılır. Bilye çapından küçük olduğu durumlarda toz boyutu kritik bir özellik değildir. Bunun nedeni toz boyutunun öğütmenin ilk dakikalarından sonra küçük bir değere ulaşmasıdır (Ertan, 2003).

Başlangıçta tozlar yumuşaktır ve birbirleriyle soğuk kaynaklanarak başlangıç tozlarına üç kat daha büyük büyük boyutlu parçalar oluşturabilirler katmanlı görünümde dirler. Kırılgan fazlar kaynayan yüzeylerin arasında kalarak kaplanır ve yapıya karışır. Yenilenen kırılma ve kaynama sonucu tozlar deformasyon sertleşmesine maruz kalarak kararlı hale gelir. Partikül boyutu küçüldükçe mikroyapıdaki karışmayı hızlandırır. Bilyelerin uyguladığı enerji ve ısı artışı ile yeni fazlar meydana gelebilmektedir (Keçeli, 2007).

Partikül boyut dağılımı aralığı daralmıştır. Büyük partiküller küçülürken küçük boyutlu partiküller de büyümüştür (Suryanarayana, 2001). Elde edilen yapı ile başlangıç bileşimi aynı olduğunda daha fazla alaşımlamanın homojenleşmeye etkisi olmayacaktır (Keçeli, 2007).

Son olarak düzenli hale gelen yapıda kaynaklanma ve kırılma arasında bir dengeye ulaşılarak homojenleşme sağlanır (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlamanın katı halde meydana gelmesi faz diyagramlarındaki sınırlamaları mekanik alaşımlama işlemi için geçersiz hale getirir (Suryanarayana, 2001).

#### **4.1. MEKANİK ALAŞIMLAMAMANIN AVANTAJLARI VE UYGULAMA ALANLARI**

Mekanik alaşımlanmış malzemeler; süper iletkenler, manyetik malzemeler, fonksiyonel seramikler, gıda ısıtıcılarının, nano kompozitlerin, intermetaliklerin, hidrojen depolama malzemelerinin, gaz absorbe eden malzemelerin işlenmesi ve sentezlenmesi gibi çok çeşitli endüstrilerde uygulama alanı bulmaktadır.

Bu malzemelerin en yaygın uygulama alanları, uçak ve uzay araçları, ısıl işlem, cam işleme ve enerji üretimi olmuştur. (Suryanarayana ve diğ., 2001 aktaran Ertan, 2003).

Mekanik alaşımlamanın üretim ve ticari avantajları şu şekilde sıralanabilir (Suryanarayana, 2001) (Kılınç, 1999).

- Katı hal işleme olmasından dolayı, normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve/veya olanaksız olan WC-Co gibi ürünler elde edilebilir.
- Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementler alaşımlanabilir.
- Çok farklı ergime sıcaklığındaki malzemelerden intermetalikler üretilebilir.
- Katı-sıvı-gaz şeklinde alaşımlama sırasında oksit, nitrür ve karbürler takviye edilebilir.
- Termodinamik olarak, alaşımlamada kompozisyon sınırlaması olmadığından çok geniş yelpazede ve sıra dışı alaşımlar elde edilebilir.
- Homojen dağılım sayesinde dislokasyon hareketlerini engelleyen bariyerler oluşur.
- Partiküller sayesinde, toparlanma ve yeniden kristalleşme engellenir veya yavaşlar. Böylece yüksek sıcaklık kararlılığı artırır.
- Elde edilen tozların yapısında tamamen homojenlik sağlanabilir. Böylece segregasyon problemi minimuma indirilebilir.
- Korozyon ve aşınma direnci yüksek, termal kararlılığı gelişmiş uygun malzemeler üretilebilir.
- Her seferde oldukça fazla toz üretilip alaşımlanabilir.

- Depolanması ve fabrikasyonu kolaydır.
- Sinterleme ile kritik sıcaklıklarda ısıl işlem imkanı bulunur.
- Nano kristalli malzemelerin üretimine elverişlidir.
- İstenilen reaksiyonların oluşumu ve hızlanmasını sağlar.
- Presleme ve sinterlemeyle %100'e yakın yoğunlukta parça üretilebilir.
- Sıvılar kontrol elemanı veya reaktant olarak kullanılabilir.
- Endüstriyel uygulamalarda karmaşık şekilli ve hassas toleranslar dahilinde malzeme üretimi mümkündür.

## **4.2. DEĞİRMEN ÇEŞİTLERİ**

Mekanik alaşımlama aşamalarından toz üretimi safhasında yüksek enerjili değirmenler kullanılmaktadır. Temel olarak 4 farklı çeşit değirmen kullanımı yaygındır.

### **4.2.1. Speks Çalkalayıcı Değirmenler**

Spex™ tipi değirmenler düşük kapasiteli (10-20 g) toz öğütebilen genellikle laboratuvar çalışmalarında kullanılan değirmenlerdir. Öğütülecek tozlar ve bilyeler öğütme kaplarına konular ve bu kaplar cihaza yerleştirilip, mengene ile sıkıştırılır. Cihaz kilitlenip çalıştırıldığında, kaplar 1200 devir/dakika ortalama hızla üç yönde salınım hareketi yapar. Geri ve ileri sallama hareketi, kabın uçlarının yanıl hareketleriyle birleştirilir, böylece kap hareket ederken 8 veya sonsuzluk sembolünün bir figürünü tarif ediyor gibi görünür. Bilye-bilye ve bilye-kap çarpışmaları ile tozlar mekanik alaşımlanır. Spex™ cihazında; sertleştirilmiş çelik, alümina, tungsten karbür, zirkonyum, paslanmaz çelik, silisyum nitrür ve plastik öğütme kapları kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001), (Reza, Majid, Maryam, 2015 aktaran Al-Azzawi, Baumli, Mucsi, 2015).

Değirmen çeşitleri içinde daha kısa sürede alaşımlama yapabilirler. Bu değirmenlerin eş zamanlı çalışan iki öğütücü kaplı sistemleri ve soğutuculu olanları bulunmaktadır (Ertan, 2003).



#### **4.2.2. Planeter (Gezegensel) Bilyeli Değirmenler**

Gezegen tipi değirmenler birkaç yüz gram toz öğütmek için kullanılan dönen disk üstüne yerleştirilmiş kapların kendi etraflarında, diskle ters yönde gezegen hareketi şeklinde dönerek oluşan merkezkaç kuvvetiyle tozların bilyeler ve kap içi duvarlar arasında sıkışıp mekanik alaşımlandığı değirmenlerdir. Spex™ değirmenine göre bilye hızı daha yüksek, ancak çarpışma frekansı daha düşüktür (Suryanarayana, 2004 aktaran Kasapgil 2014).

Gezegen tipi değirmenler, Fritsch Pulverisette değirmeni olarak da bilinmektedir. Kaplar ve taşıyıcı disklerin zıt yönlerde dönme hareketi bilyelerin kabin iç yüzeyinden karşı iç yüzeye yuvarlanmasına neden olur. Öğütücü kabin ve diskin dönme hızları birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. SPEX değirmenleriyle karşılaştırıldığında planeter bilyeli değirmenler daha düşük enerjili değirmenleri olarak düşünülebilirler (Ertan, 2003).

#### **4.2.3. Atritör Tipi Değirmenler**

Çok fazla miktarda toz öğütebilen atritör değirmenleri dakikada yaklaşık 250 devirle dönen karıştırıcı kollara bağlı olduğu milin dönmesiyle, hazne içindeki bilyelerin tozlar ve hazne duvarlarına çarumasının etkisiyle mekanik alaşım olmayı sağlar. Bilyelerin hareketi toz üzerinde kayma ve darbe kuvvetleri oluşturur. Bu değirmenlerde dönme hızının belli bir düzeyde tutulması gerekir. Yüksek hızlarda bilyeler kabin duvarlarında dönme eğilimindedir. Dönme hızı arttıkça öğütme hızı da artar. Laboratuvar tipi atritörler tipik bir bilyeli değirmenden 10 kat daha hızlı çalışır. Bilye hızı ve çaruma enerjileri Fritsch veya Spex değirmenlerine göre daha düşüktür. Alaşımlama hazneleri, paslanmaz çelik veya içi alümina, silisyum karbür, silisyum nitrür, zirkonya, kauçuk ve poliüretan ile kaplı paslanmaz çelik olabilir. Öğütücü bilyeler cam, çakmak taşı, steatit seramik, mullit, silisyum karbür, silisyum nitrür, siyalon, alümina, zirkonyum, silikat, zirkonya, paslanmaz çelik, karbon çeliği, krom çeliği ve tungsten karbürden olabilir (Ertan, 2003).

Atritörlerde bulunması gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir (Kılınç, 1999). (Ertan, 2003).

- Devir hızı göstergesi ve hız değiştirebilme,
- Atmosfer kontrollü hazne
- Farklı çapta ve özellikte bilye kullanabilme
- Hazne yükseklik ayarı
- Haznenin kolay değiştirilebilmesi ve boşaltılabilmesi
- Paslanmaz çelik shaft ve nikel alaşımlı kollar
- Soğutma sistemi
- Su bağlantısı ve elektrik kesme mekanizması

#### **4.2.4. Ticari Tambur Bilyeli Değirmen**

Ticari tambur bilyeli değirmenler diğer değirmenlerden çok daha fazla miktarda toz üretir. Bu miktar bir tonun üstünde olabilir. Öğütme süresi hıza bağlı olarak azalır. Toz üretimi günler sürebilmektedir (Neikov vd. 2009 aktaran Küçükdeveci, 2015).

### **4.3. MEKANİK ALAŞIMLAMADA TOZ KARAKTERLERİ**

Mekanik alaşımlama işleminde öğütme sırasında çarpışmalarda toza yüklenen enerji tozların levhalaşmasına, kaynaklanmaya, kırılmaya ve tekrar kaynaklaşmaya neden olur. İlk aşamada toz boyutları büyür. İşlem devam ettikçe sertleşme ve boyutta küçülme gerçekleşir. Kararlı yapı ve homojenleşme gerçekleştiğinde toz boyutunda değişim olmaz. Sıcaklık artış gösterip boşluklar azalırken alaşımlanma başlar.

Toz karakterine göre yapılan sınıflandırmada sünek-sünek, sünek-gevrek ve gevrek-gevrek olmak üzere 3 kategori kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2004 aktaran Kasapgil 2014).

- Sünek-sünek karakterli bileşenler; Soğuk kaynaklanmaya uygunluğu açısından sünek-sünek karakterli bileşenler en ideal mekanik alaşımlama kombinasyonudur. Alaşımlamanın başarısı için en az %15 sünek karakterli

bileşen gerekir. Sünek karakterli bileşenin bulunmaması halinde soğuk kaynaklanma meydana gelmez.

- Sünek-gevrek karakterli bileşenler; Mekanik alaşımlamanın ilk evrelerinde, gevrek oksit taneler veya intermetalikler parçalanır, sünek metal tozları ise bilyeler ile çarpıştırılır. Gevrek parçacıklar kırılır ve sünek tozlar tarafından çevrelenir. Gevrek parçacıklar katmanlar arası boşlukları doldurur. Devam eden aşamalarda sünek parçacıklar sertleşerek katmanlar sarmal yapı kazanır. Katmanların incilmesi devam eder boşluklar azalarak gevrek parçaların homojen dağılımı sağlanır.
- Gevrek-gevrek karakterli bileşenler; En az 2 gevrek bileşen bulunmaktadır. Sünek bileşen eksikliğinin soğuk kaynaklamaya engel olduğu görüşünün yanında Si-Ge ve Mn-Bi gibi gevrek-gevrek karakterli bileşenlerle alaşımlama gerçekleştirilmektedir. Bu bileşenlerden daha gevrek olan kırılarak, daha az gevrek bileşene eklenme eğilimindedir. Kırılma sonucu toz boyutu küçüldükçe sünek davranış gözlemlenir ve küçülme devam etmez.

Bir sünek-gevrek karakterli bileşenlerle alaşımlamanın başarısı gevrek bileşenin sünek matris içerisindeki katı çözünebilirliğine de bağlıdır. Eğer katı çözünebilirlik istenen düzeyde değilse alaşımlama oluşmaz (Suryanarayana, 2001).

Tüm bileşenlerde alaşımlama için difüzyon önemli görülmektedir ancak gevrek-gevrek karakterli bileşenlerle yapılan alaşımlamada düşük sıcaklıklarda alaşımlama gerçekleşmez. Diğer bileşenlerde ise ortam sıcaklığının altında dahi alaşımlama oluşmaktadır (Koch, 1989 aktaran Ertan, 2003).

#### **4.4. MEKANİK ALAŞIMLAMAMANIN KİNETİKLERİ**

Mekanik alaşımlamada geleneksel olarak yüksek sıcaklıkta gerçekleşen katı hal reaksiyonları düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilmektedir. Isı ile teşvik edilmediği halde mekanik alaşımlamada belirli şartlarda, bir faz değişimi ile reaksiyon oranı artmaktadır (Forrester ve Schaffer, 1995 aktaran Ertan, 2003).

Öğütme sırasında artan temas yüzeyi ve difüzyon miktarının artması reaksiyonu artırır. Oda sıcaklığında difüzyonun oluşması plastik deformasyon yoluyla meydana gelen yoğun kristal kusurlarının yapı içerisinde bulunmasıdır (Schaffer ve McCormick, 1992 aktaran Ertan, 2003).

Öğütme aşamasında sırasında reaksiyon artışına bağlı olarak Al ihtiva eden işlemlerde kendiliğinden yanma gerçekleşebilir (Kılınç, 1999).

Kimyasal kinetikler ile öğütme parametreleri arasındaki ilişkide bilye toz ağırlık oranı ile öğütme süresi arasında ters orantı olduğu belirtilmektedir (Suryanarayana, 1992 aktaran Ertan, 2003).

Öğütme süresini belirleyen esas unsurun bilye-toz çarpışma sayısı olmadığı, çarpışma sırasında her bir parçacığa yüklenen enerjinin daha önemli olduğu belirtilmektedir. Çarpışma sayısı ve enerjisi birlikte kinetiği etkilemektedir (Schaffer ve McCormick, 1992 aktaran Ertan, 2003).

Çarpışma sürecinde bilyelerin hızı deneysel bir şekilde belirlenebilir. Çarpışma hız aralıklarının atritör için 0.1 m/s, spex ve yatay değirmenler için ise 1 m/s düzeyine ulaştığı belirlenmiştir. Tozlu çarpışmalarda ortaya çıkan enerji oldukça azdır. Atritörde tozlar, birbirine yakın tozların kesme, bilyelerin ise darbe etkileri gibi farklı etkilere maruz kalır. Çarpışma süreçlerinin etkin olabilmesinde bilye toz ağırlık oranı ve öğütme hızı en etkin parametrelerdir (Demir, 2014).

Reaktif derece, tozların oluşmasına etki eder, oksit ya da benzeri tabakalar yüzeyde meydana gelebilecek difüzyonu etkiler, atmosfer bundan dolayı önemlidir (Milli, 2017).

#### **4.5. MEKANİK ALAŞIMLAMAMANIN PARAMETRELERİ**

Mekanik alaşımlamada birçok etken sonuç üzerinde belirleyici olabilir. İstenen ürünün özelliklerine göre öğütme hızı, süresi, atmosfer gibi parametreler farklılaştırılabilir.

Mekanik Alaşımın Parametreleri;

- Değirmen türü,
- Öğütme kabı,
- Öğütme hızı,
- Öğütme zamanı,
- Öğütme elemanının tür, boyut ve tane dağılımı,
- Bilya-toz ağırlık oranı,
- Öğütme kabının doluluk derecesi,
- Öğütme atmosferi,
- İşlem kontrol etkenleri,
- Öğütme sıcaklığı olarak sıralanmaktadır (Suryanarayana, 2001).

#### **4.5.1. Değirmen Türü**

Değirmenler, kirlenmeyi azaltması, işlem sıcaklığını belirleyebilme, öğütme hızı ve miktarı açılarından farklıdırlar. Toz türü, miktarı ile aranan son bileşimine bağlı olarak değirmen seçimi yapılmalıdır. Özel amaçlı çalışmalarda özel olarak tasarlanmış değirmenler kullanılır. Öğütme performansı en yüksek değirmenler SPEX çalkalayıcı değirmenleridir (Suryanarayana, 2001).

#### **4.5.2. Öğütme Kabı**

Öğütme kabının önemi yapıldığı malzemenin öğütme aşamasında aşınmasıyla ilgilidir. Bu aşınma tozda kirlenmeye, kimyasal bileşimin değişmesine neden olabilir. Öğütme kabı ve elemanlarının aynı malzemedен olması kirlenmeyi engeller. Öğütme kaplarında takım çeliği, paslanmaz çelik, sertleştirilmiş çelik, temperlenmiş çelik, sertleştirilmiş krom çeliği, WC-astar çeliği, yatak çeliği ve WC-Co yaygın kullanım alanı bulmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Özel amaçlı çalışmalarda titanyum, bakır, sinterlenmiş korondum, sert porselen, Cu-Be, yitrium oksit-stabilize edilmiş zirkon (YSZ) ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kullanılabilir (Lee ve diğ., 1991 aktaran Ertan, 2003).

Kabın iç tasarımı da öğütme süresini ve alaşımlamayı etkilemektedir. SPEX değirmenlerinde yapılan bir çalışmada uç kısmı bombeli ve uç kısmı düz ve kaplar kullanıldığında farklı sonuçlar elde edilmiştir (Harringa ve diğ., 1992) (aktaran Ertan, 2003).

#### **4.5.3. Öğütme Hızı**

Hız artışın bağlı olarak toza yüklenen enri de artar. Değirmen tasarımına bağlı olarak hızın belirli değerlerin üstüne çıkması da öğütmeyi olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında hıza bağlı sıcaklık artışı da difüzyonu hızlandırmaktadır, bu da alaşımın yapısında farklılıklara neden olabilir (Küçükdeveci, 2015).

#### **4.5.4. Öğütme Süresi**

Öğütme süresi mekanik alaşımlamanın en önemli parametresidir. Tozların kırılması ve soğuk kaynaklanma sonucu kararlı duruma ulaşılması zamanla doğrudan ilişkilidir (Suryanarayana, 1995 aktaran Çakar, 2013). Bu noktada başlangıç toz boyutu çok önemli olmamaktadır (Suryanarayana, 2001).

Süre değirmen türüne, sıcaklığa, bilye-toz oranına, öğütme yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Süre artışı tozda kirlenmeye, istenmeyen yapıların oluşmasına etki ettiğinden yeterli süre öğütme yapılmalıdır (Suryanarayana, 1995 aktaran Çakar, 2013).

#### **4.5.5. Öğütücü Madde**

Yaygın olarak çeşitli çelik malzemeler yüksek yoğunluklarda öğütücü olarak kullanılmaktadır. Özel çalışmalar için çeşitli öğütücü maddeler de kullanılmaktadır (Koch ve Whittenberger, 1996 aktaran Ertan, 2003).

Öğütücü kap ve öğütücü maddenin malzemesi aynı olduğunda tozlar kaba yapışmaz. Öğütücü maddenin boyutu toza uygulanan darbe kuvvetini etkiler. Yoğunluğu yüksek ve boyutu büyük maddeler daha avantajlıdır. Ti ve Al tozlarının

alaşımlanması yapılan çalışmada bilye çapının alaşımlamada katı çözeltilerin oluşup oluşmaması ve amorf fazın oluşumu üzerinde çok önemli etkileri tespit edilmiştir (Suryanarayana, 2001).

Öğütmede farklı çaplı bilyelerin birlikte kullanım soğuk kaynaklama ve bilye yüzeyine minimum toz yapışmasını olumlu etkilemektedir (Takacs ve diğ., 1994 aktaran Ertan, 2003).

#### **4.5.6. Bilye-Toz Ağırlık Oranı**

Toplam bilye ağırlığının toplam toz ağırlığına oranı bilye-toz ağırlık oranı ya da şarj oranı olarak tanımlanmaktadır (Forrester ve Schaffer, 1995 aktaran Ertan, 2003). Bu oran değirmen türüne ve kapasitesine bağlı olarak değişmektedir.

Bilye-toz ağırlık oranının artması süreyi kısaltır (Forrester ve Schaffer, 1995 aktaran Ertan, 2003). Bunun nedeni çarpışma sayısının ve toza yüklenen enerjinin artmasıdır. Enerjiye bağlı sıcaklık artışı ise amorf fazı kristalize edebilir (Suryanarayana vd., 1999 aktaran Ertan, 2003).

#### **4.5.7. Öğütme Kabının Doldurulması**

Öğütme kabında mekanik alaşımlamanın gerçekleşebilmesi bilye ve tozların serbestçe çarpışmasına bağlıdır. Kabın az doldurulması ürün miktarını azaltır, çok doldurulması ise mekanik alaşımlamayı engeller (Suryanarayana, 2001).

#### **4.5.8. Öğütme Atmosferi**

Öğütme atmosferi, tozun bozulması veya kirlenmesini engelleyecek şekilde seçilir. Genellikle içindeki hava boşaltılıp, argon veya helyum türü inert gaz doldurulmuş kabinlerde kirlenme azdır. Azotun tozlarla reaksiyona girmesi mümkünse de oksidasyonu engellemek amacıyla az miktarlarda kullanılmaktadır. Nitrür üretiminde azot veya amonyak, hidrid üretiminde ise hidrojen atmosferi kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

Argon ortamında amorf faz oluşumu gözlenmezken, argon hava karışımı veya azot kullanıldığında amorf faz oluşmaktadır (Orgino ve diğ., 1990 aktaran Ertan, 2003).

#### **4.5.9. İşlem Kontrol Elemanları**

Mekanik alaşımlamada kullanılan toz karakterlerine göre işlem kontrol elemanları kullanılır. Gevrek karakterli tozlarda bu elemanların kullanımına gerek yoktur. Ancak sünek tozların plastik deformasyona uğraması ve soğuk kaynaklanmanın azaltılmasında işlem kontrol elemanları kullanılmaktadır (Suryanarayana, 2001).

İşlem kontrol elemanı olan kayganlaştırıcı veya yüzey aktif maddeler katı sıvı veya gaz olabilirler. Stearik asit, etanol, metanol, hekzan gibi sık kullanılan elemanlar alaşımlamada tozların üzerine tutunarak topaklaşmayı ve soğuk kaynamayı azaltırlar. Toz ağırlığına oranı %1-5 seviyelerinde olabilsede dir ancak tozlarda oksit ve nitrür oluşumuna etki edebileceğinden %1-2 seviyelerinde kullanımları yaygındır (Koch, 1989 aktaran Ertan, 2003).

#### **4.5.10. Öğütme Sıcaklığı**

Sıcaklık, difüzyonu doğrudan etkilediğinden oluşan alaşımda hangi fazların bulunduğu etki eder, bu yüzden önemli bir etken olarak kabul edilir (Suryanarayana, 2001).

Sıcaklığın yükselmesi, öğütücünün enerjisi ve meydana gelen reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır (Gaşan, 2008 aktaran Küçükdeveci, 2015). Yüksek sıcaklıklarda daha büyük nano kristal tane boyutu oluşmaktadır (Lee ve diğ., 1990 aktaran Ertan, 2003).



## BÖLÜM 5

### DENEYSEL METOT

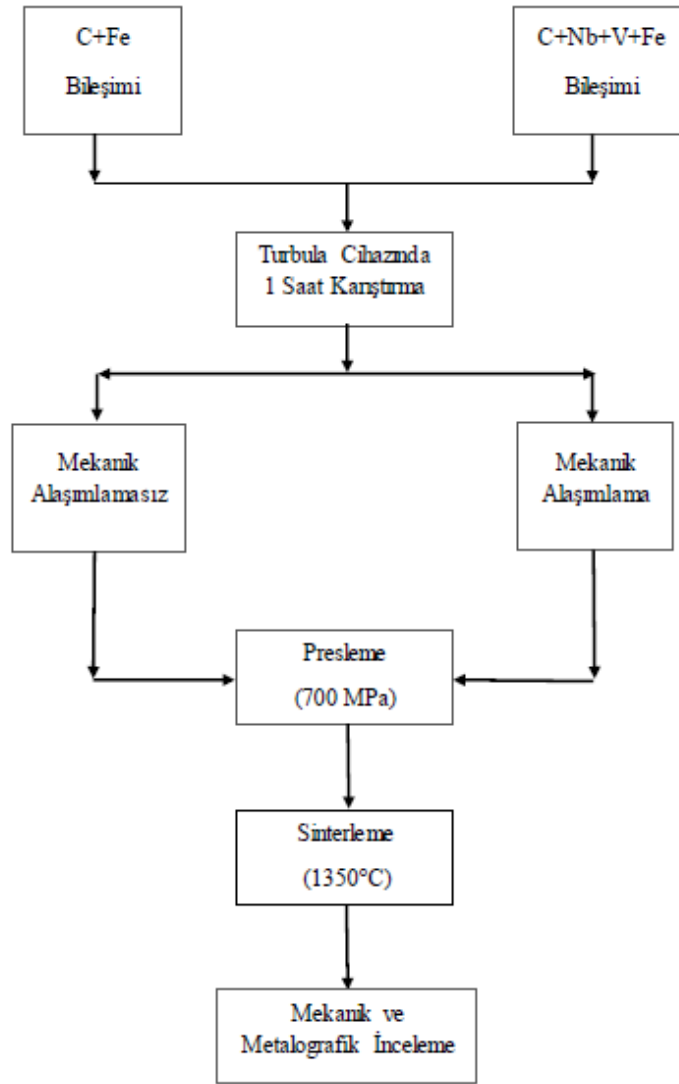
#### 5.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak istenilen bileşim oranlarında çelik numuneler imal edilmişlerdir. Farklı oranlarda eklenen mikroalaşım element miktarının ve bu oranlarda karıştırılan toz metallerin mekanik alaşımlandırma sürelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 5.2’de deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları, bölüm 5.3’de deneysel çalışma ortamının hazırlanışı, bölüm 5.4’te deneysel çalışma için gerekli olan tozların temini, bölüm 5.5’te tozların karıştırılması ve preslenmesi işlemleri, bölüm 5.6’da sinterleme aşaması, bölüm 5.7’de çekme testinin uygulanışı, bölüm 5.8’de optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelemeleri, bölüm 5.9’da metalografik incelemelerde kullanılan numunelerin hazırlanması, 5.10’da dağlayıcıların hazırlanması ve dağlama işleminin yapılması, bölüm 5.11’de yoğunluk, gözeneklilik, ortalama tane boyutu ölçümleri açıklanmıştır. Çekme deneyi Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. SEM deneyleri ve Optik mikroskop incelemeleri Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, Margem laboratuvarlarında yapılmıştır.

## 5.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA İZLENEN İŞLEM BASAMAKLARI

Yapılan deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları Şekil 5.1’de görselleştirilmiştir. Yapılan çalışma Şekil 5.1’de gösterildiği gibi tozların temin edilmesi ile başlayarak, toz karışım oranlarının hesabı ve karıştırılması, preslenmesi, sinterlenmesi daha sonra ise mekanik testlerin yapılması ve mikro yapı incelemelerinin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır.



Şekil 0.1. Deneysel çalışmada izlenen işlem basamakları.

### 5.3. DENEYSEL ÇALIŞMA ORTAMININ HAZIRLANMASI

RADWAG AS-60-220 C/2 hassas terazi ve RADWAG AS yoğunluk ölçme kiti ile tozların tartılması ve üretimi yapılan numunelerin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Willy A. Bachofen AG T2F marka turbula mixer cihazı tozların istenilen bileşim oranlarında ve homojen olarak karıştırılması için kullanılmıştır. Farklı mekanik alaşımlama işleminden sonra 100 Ton kapasiteli HİDROLİKSAN marka hidrolik tek pistonlu pres tozların preslenmesi için kullanılmıştır. Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü boru fırın (maks. çalışma sıcaklığı 1600 °C) kullanılarak sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

### 5.4. MEKANİK ALAŞIMLAMA DENEYLERİNDE KULLANILAN TOZLAR

Mikroalaşımli çelik numunelerin üretimi için gerekli olan tozların temini yapılmış olup, özellikleri ve temin edilen firmaların isimleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Tozlar ve özellikleri.

	<b>Elementel Tozlar</b>	<b>Toz Boyutu (µm)</b>	<b>% Saflık Değeri</b>	<b>Temin Edilen Firma</b>
<b>1</b>	<b>Demir</b>	<150	99,9	Sintek
<b>2</b>	<b>Karbon</b>	10-20	96,5	Sintek
<b>3</b>	<b>Niyobyum</b>	<45	99,8	Aldrich
<b>4</b>	<b>Vanadyum</b>	44	99,5	Aldrich

Çizelge 5.1.'de belirtilen temin edilmiş olan tozlar, Bölüm 5.5.'de verilen kimyasal bileşimlerde karıştırılarak alaşımsız çelik ve mikroalaşımli çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler için çekme testi uygulanmış; mikroyapıları incelenmiş, yoğunluk ve gözeneklilik oranı ve ortalama tane boyutu hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

## 5.5. TOZLARIN KARIŞTIRILMASI, MEKANİK ALAŞIMLANDIRILMASI VE SIKIŞTIRILMASI

RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazi ile 0.0001 hassasiyetinde tartılan toz metallere izelge 5.2.'de kimyasal kompozisyonu verilen oranlarda biraraya getirilip karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tartım ve biraraya getirilme işlemi yapılan tozlar Turbula marka uç eksenli karıştırıcı ile 1 saat sureyle bilyesiz olarak karıştırılmıştır.

Çizelge 5.2. Mikroalaşımlı TM eliklerin kimyasal kompozisyonları

BİLEŞEN	KARBON (%ađ.)	NİYOBYUM (%Ađ.)	VANADYUM (%Ađ.)	DEMİR (%Ađ.)
ALAŞIM 1	0,25	-	-	GERİ KALANI
ALAŞIM 2	0,25	0,050	0,050	GERİ KALANI
ALAŞIM 3	0,25	0,100	0,100	GERİ KALANI

Hazırlanan tozmetal karıŐımlarına 1/10 toz/bilye oranında 5 mm çapındaki elik bilyeler kullanılarak mekanik alaşımlandırma gerçekleştirilmiştir. Değirmen hızı 300 dev/ dk. olarak belirlenmiştir. Mekanik alaşımlandırma işlemi gerçekleŐtirilirken mekanik alaşımlandırma suresi 15 dk 30 dk ve 60 dk olarak uygulanmıştır. Bu uygulamalarda 15 dk için 8 dk dndrlp soğutma için 5 dk dinlendirilip 7 dk döndürülmüŐtür. 30 dk için 10 dk de bir 5 dk soğutma için dinlendirilme, 60 dk için 20 dk da bir 5 dk soğutma için dinlendirilme işlemi uygulanmıştır.

Hazırlanan karışım tozlarının preslenmesi 100 Ton basma kapasiteli Hidrolik san marka preste 700 MPa presleme basıncında çekme numunesi Şeklinde ve tek yönlü olarak yapılmıştır. Çekme deneyi için hazırlanan numune boyutları ASTM (E8M) toz metal malzeme standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır.

## 5.6. SİNERLEME İŞLEMLERİ

Üretilen numuneler argon gazı atmosferinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Mekanik Metalürji laboratuvarında bulunan Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü boru fırında (maks. çalışma sıcaklığı 1600 °C) yapılmıştır. Çizelge 5.2.'de belirtilen bileşimdeki numuneler 1350 °C'de sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin 1350 °C'olarak uygulanması literatürde yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir (Erden,2017). Sinterleme işlemi numunelerin sinterleme sıcaklığına 5 °C/dak. hızla ısıtılması ile başlanmıştır. Sıcaklık sinterleme sıcaklığına ulaştıktan sonra numuneler bu sıcaklıkta 2 saat bekletilip ardından oda sıcaklığına yine 5 °C/dak. hızla soğutulmuştur. Şekil 5.2 atmosfer kontrollü fırını göstermektedir.



Şekil 0.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan atmosfer kontrollü fırın.

Oksitlenmenin en aza indirilmesi için Sinterleme sırasında argon atmosferinin yanısıra fırın içerisine sünger titanyum kullanılmıştır. Sünger titanyum oksitlenmeyi kendinde toplama özelliğinden dolayı kullanılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

## **5.7. NUMUNELERE ÇEKME DENEYİNİN UYGULANMASI**

Sinterlenen çekme numuneleri çekme deneyi uygulanarak 1mm/dak. çekme hızında kopana kadar deneye tabi tutulmuştur. Her deney sonrasında gerilme-%gerinim diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlardan numunelerin akma dayanımı (%0,2) çekme dayanımı ve % uzama değerleri hesaplanarak alaşım miktarındaki değişimden dolayı mekanik özelliklerdeki farklılık tespit edilmiştir.

## **5.8. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMELERİ**

Mikro yapı incelemeleri, Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarlarında bulunan Nikon marka (X50-X2000 büyütme kapasiteli) optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Her numunenin birbirinden farklı bölgelerinden farklı oranlarda ki büyütme ile görüntüler alınarak bu görüntülerin bütün mikroyapının temsili nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. SEM incelemeleri ise Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

## **5.9. METALOGRAFİK İNCELEMELERDE KULLANILAN NUMUNELERİN HAZIRLANMASI**

Bu çalışmada optik mikroskop kullanılarak argon atmosferinde sinterlenmiş numunelerin mikro yapısını incelenmiştir. Farklı bileşime sahip mikroalaşımli sinterlenmiş numuneler polisaj cihazı ile sırasıyla 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 meshlik su zımparasıyla yüzeydeki pürüzlerden arındırılıp yok edilinceye kadar zımparalanmıştır. Hazırlanan yüzeyler alümina aşındırıcısıyla parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir.

## **5.10. DAĞLAYICILARIN HAZIRLANMASI VE DAĞLAMA İŞLEMİNİN YAPILMASI**

Metalografik incelemelerin yapılması için; parlatılan ve dağlamaya hazır hale getirilen numunelere uygulamak üzere metanol içerisine %2 nitrik asit karıştırılarak

elde edilen nital çözeltisi hazırlanmıştır. Dağlama işlemi, nital çözeltisi içerisinde numunelerin daldırılarak 3-5 saniye bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi numunelere uygulandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenerek kurutulduktan sonra optik mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir.

### 5.11. YOĞUNLUK, GÖZENEKLİLİK, FERRİT-PERLİT ORANLARININ BELİRLENMESİ

Numunelerin yoğunluk ölçümleri, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazide RADWAG AS yoğunluk ölçüm kiti ile Archimets prensibine göre yapılmıştır.

Üretilen malzemelerin gözenek oranının belirlenmesinde aşağıdaki eşitlik 5.1.'de verilen formül kullanılmıştır.

$$\%Gözeneklilik = \frac{q_{teorik} - q_{deneysel}}{q_{teorik}} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada;  $q_{teorik}$ : Teorik yoğunluk ( $gr/cm^3$ )

$q_{deneysel}$ : Deneysel yoğunluk ( $gr/cm^3$ ) şeklindedir.

Numunelerin teorik yoğunlukları ise, aşağıda belirtilen karışım kuralı esasına göre hesaplanmıştır;

[Fe - % 0,25 C için]; Karışımın teorik yoğunluğu = [C'nin yoğunluğu x 0,25] + [Fe'in yoğunluğu x 99,75]

[Fe - % 0,25 C - %0,05 Nb - %0,05 V için]; Karışımın teorik yoğunluğu = [C'nin yoğunluğu x 0,25] + [Fe'in yoğunluğu x 99,65] + [Nb'un yoğunluğu x 0,05] + [V'un yoğunluğu x 0,05]

[Fe - % 0,25 C - %0,1 Nb - %0,1 V ]; Karışımın teorik yoğunluğu= [C'nin yoğunluğu x 0,25] + [Fe'in yoğunluğu x 99,55] + [Nb'un yoğunluğu x 0,1] + [V'un yoğunluğu x 0,1]



## BÖLÜM 6

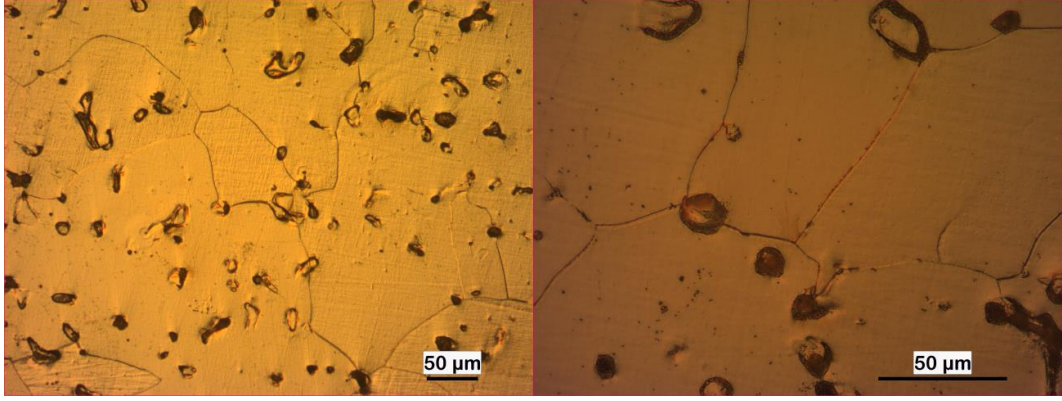
### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 6.1. GİRİŞ

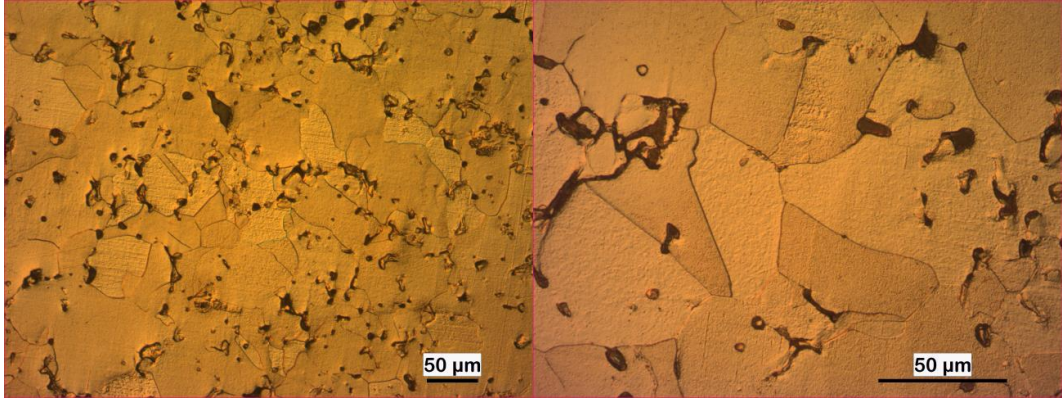
Bu bölüm, C ve farklı Nb, V kompozisyona sahip argon atmosferinde sinterlenmiş m, kroalaşım çelik numunelerin deneysel sonuçlarını ve bu sonuçların değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bölüm 6.2’de TM numunelerin mikroyapı, ferrit ve perlit oranı, gözeneklilik oranı ve yoğunluk sonuçları verilerek değerlendirilmiştir. Bölüm 6.3’de Fe—0,25C, Fe—0,25C—0,05V-0,05Nb, Fe—0,25C—0,1V-0,1Nb bileşimlerine sahip olan ve 1350 °C’de sinterlenen mikroalaşımli çelik numunelerin çekme sonuçları verilerek tartışılmıştır. Ayrıca Bölüm 6.4’de farklı kimyasal bileşimde üretilen mikroalaşımli TM çeliklerinin Tarama Elektron Mikroskop (SEM) kırık yüzey incelemeleri değerlendirilmiştir. Bölüm 6.5’de genel sonuçlar ve öneriler tartışılmıştır.

#### 6.2. MİKROYAPI SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

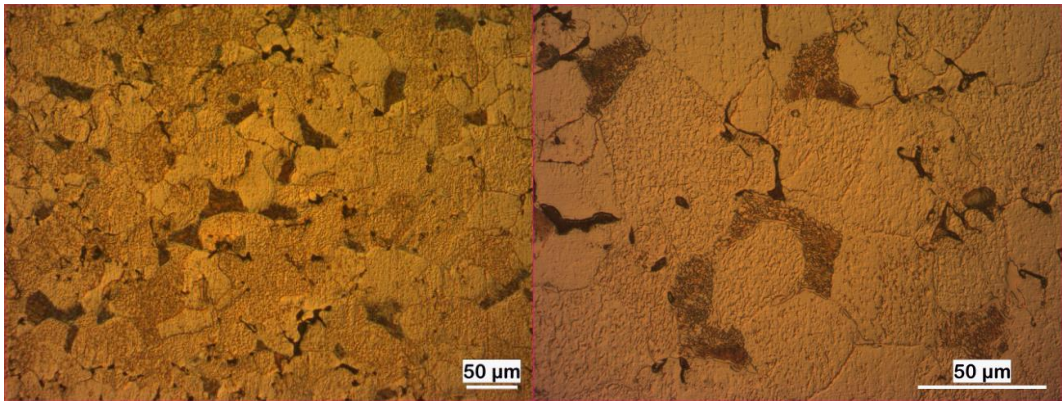
1350 °C’de sinterlenen alaşımsız ve Nb ve V elementleri ile alaşımlandırılan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.1-6.2-6.3’de gösterilmiştir. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen alaşımsız ve Nb ve V elementleri ile alaşımlandırılan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.4-6.5-6.6’da gösterilmiştir. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen alaşımsız ve Nb ve V elementleri ile alaşımlandırılan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.7-6.8-6.9’da gösterilmiştir. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen alaşımsız ve Nb ve V elementleri ile alaşımlandırılan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.10-6.11 ve 6.12’de gösterilmiştir.



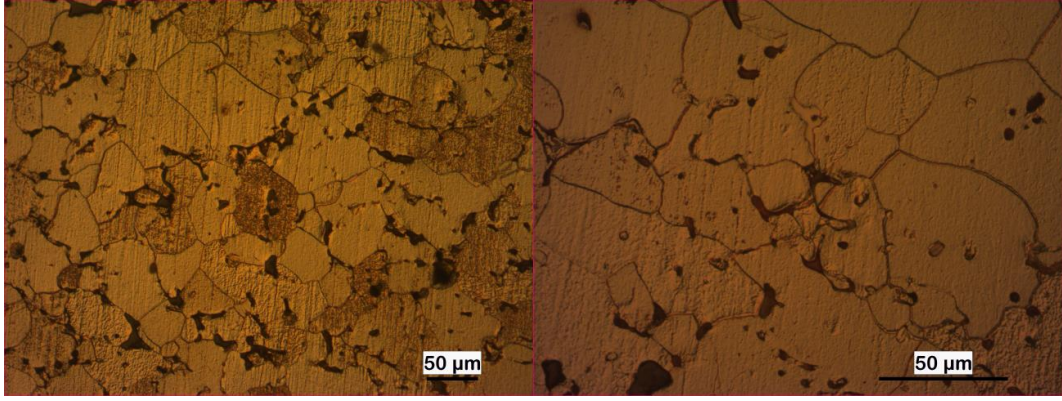
Şekil 6.1. 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



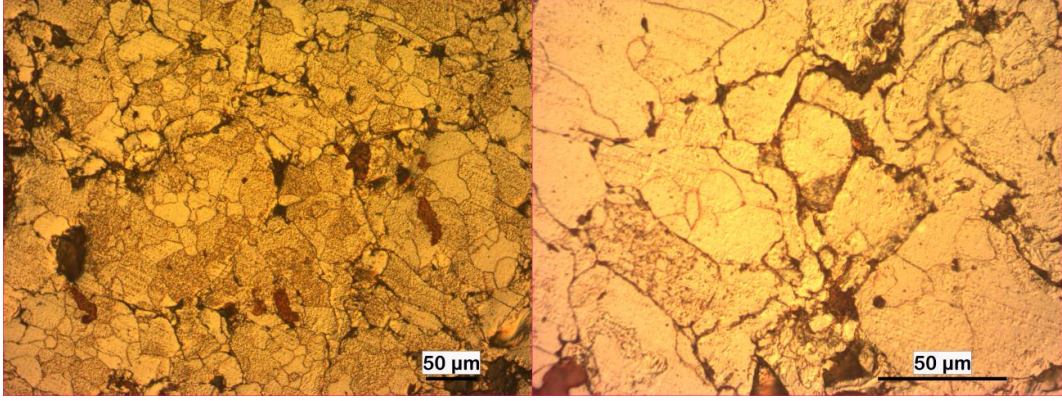
Şekil 6.2. 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



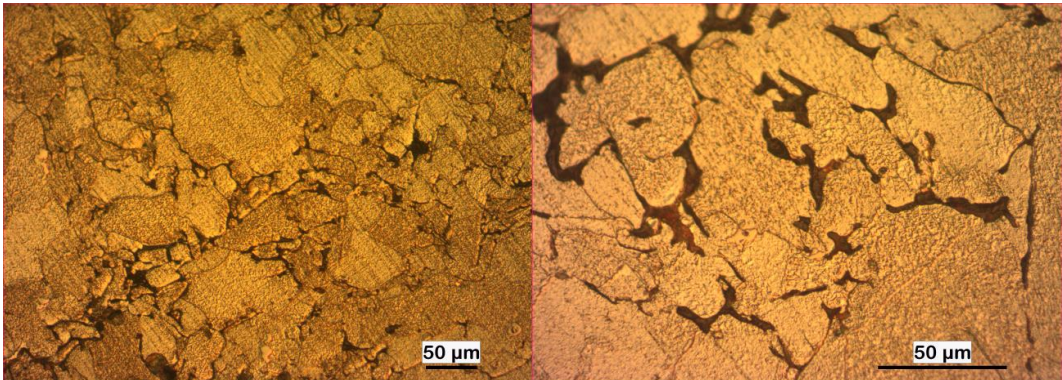
Şekil 6.3. 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



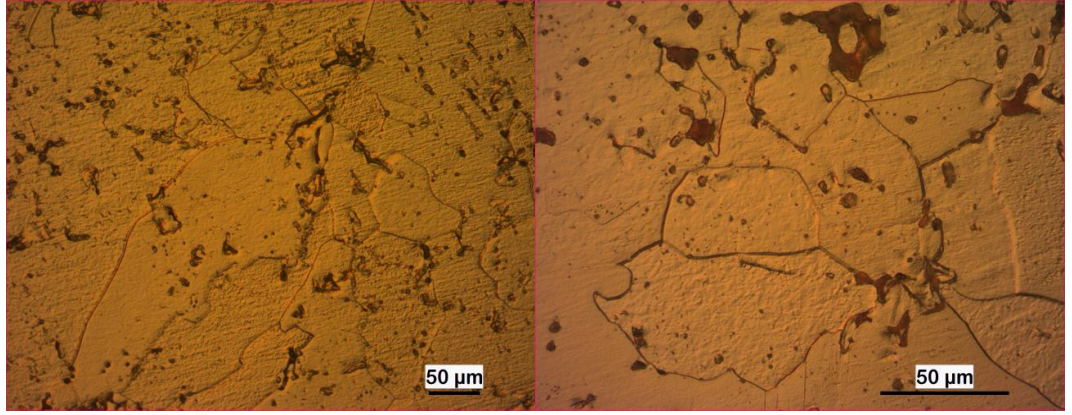
Şekil 6.1. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



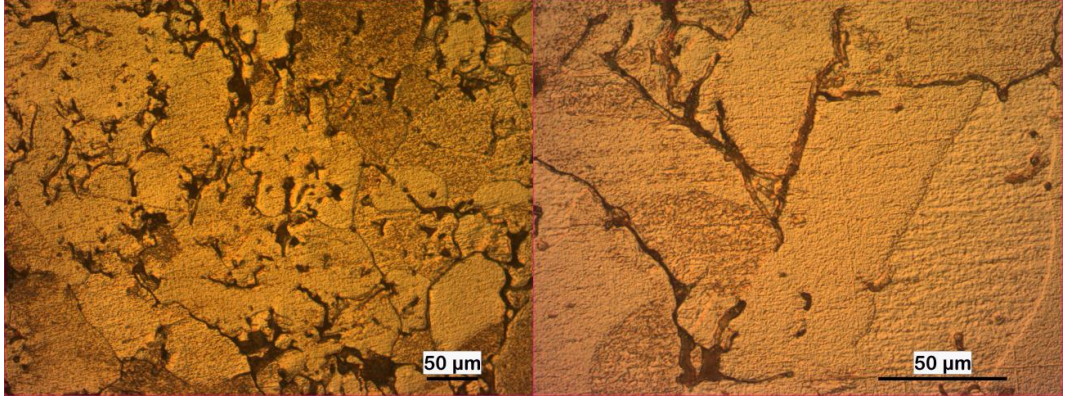
Şekil 6.2. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



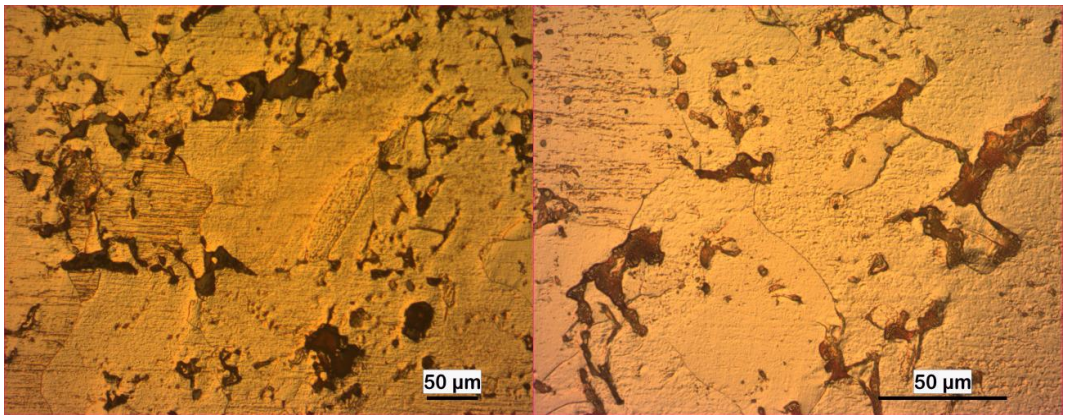
Şekil 6.3. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



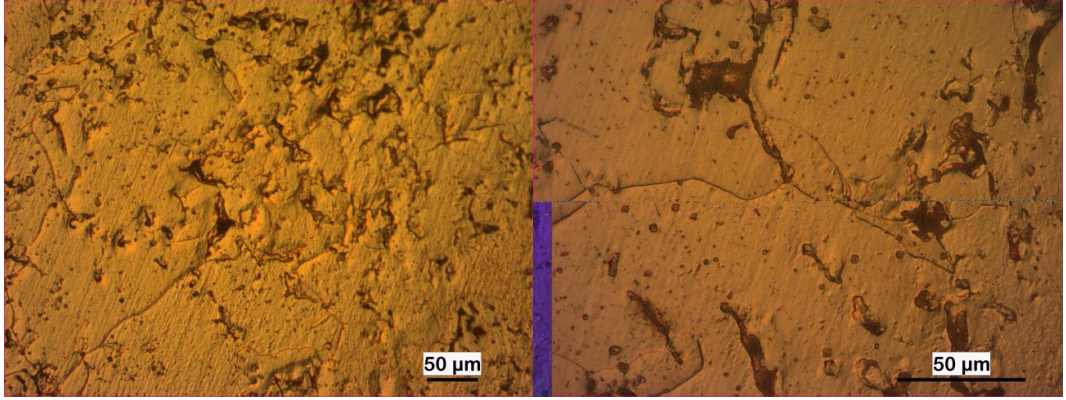
Şekil 6.4. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



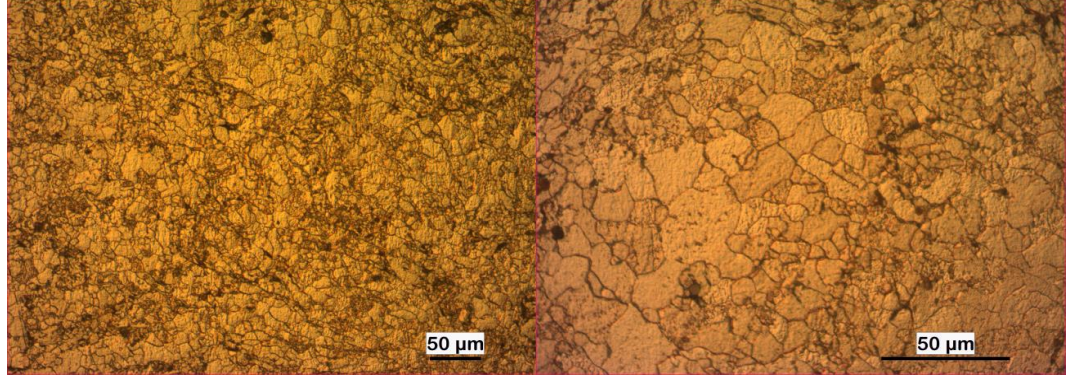
Şekil 6.5. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



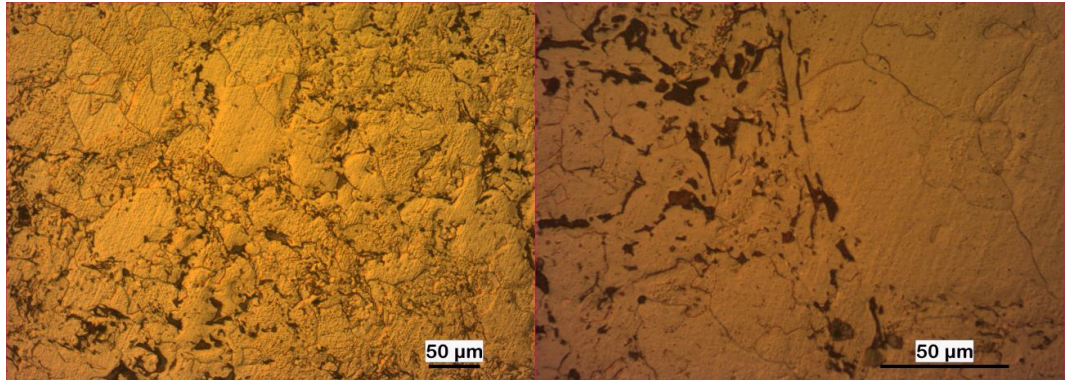
Şekil 6.6. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



Şekil 6.7. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



Şekil 6.8. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,05NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.



Şekil 6.9. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C’de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunelerinin X200 ve X500 büyütmelerdeki mikroyapı resimleri.

Mikroyapı resimlerinden alaşımsız TM çeliğinin Nb ve V ile alaşımlandırılan TM çeliğine göre daha büyük taneli olduğu gözlenmiştir. Örneğin; ağırlık olarak %,1 NbV içeren mikroalaşım TM çeliğinin ortalama tane boyutu 24,45  $\mu\text{m}$  iken alaşımsız TM çeliğinin ortalama tane boyutu 36,68  $\mu\text{m}$  çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu arttığı için küçük taneler birleşerek büyüme eğilimindedir. Bu nedenle sıcaklığın artması ile tanelerin büyümesi beklenen bir sonuçtur (Askeland, 1996).

15 dakika mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.4-6.5-6.6'da verilmiştir. Mikroyapı resimlerinden mekanik alaşımsız TM çeliğinin daha büyük taneli olduğu ve mekanik alaşımlama yapılmış mikroalaşımli TM çeliklerde tane boyutunun giderek küçüldüğü anlaşılmaktadır. Buna nazaran yapıdaki perlit fazlarının birleşerek belli bir oranda büyüdüğü görülmektedir.

30 dakika mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.7-6.8 ve 6.9'da verilmiştir. Mikroyapı resimlerinden anlaşılacağı üzere 15 dakika mekanik alaşımlı TM çeliklerdeki tane yapılarının, mekanik alaşımlama süresi 30 dakikaya çıkması ile tane boyutunun büyüdüğü görülmektedir.

60 dakika mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulan TM çelik numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 6.10-6.11 ve 6.12'de verilmiştir. Mekanik alaşımlama süresinin 60 dakikaya çıkması ile yapılarıdaki tane boyutunun iyice büyüdüğü görülmektedir.

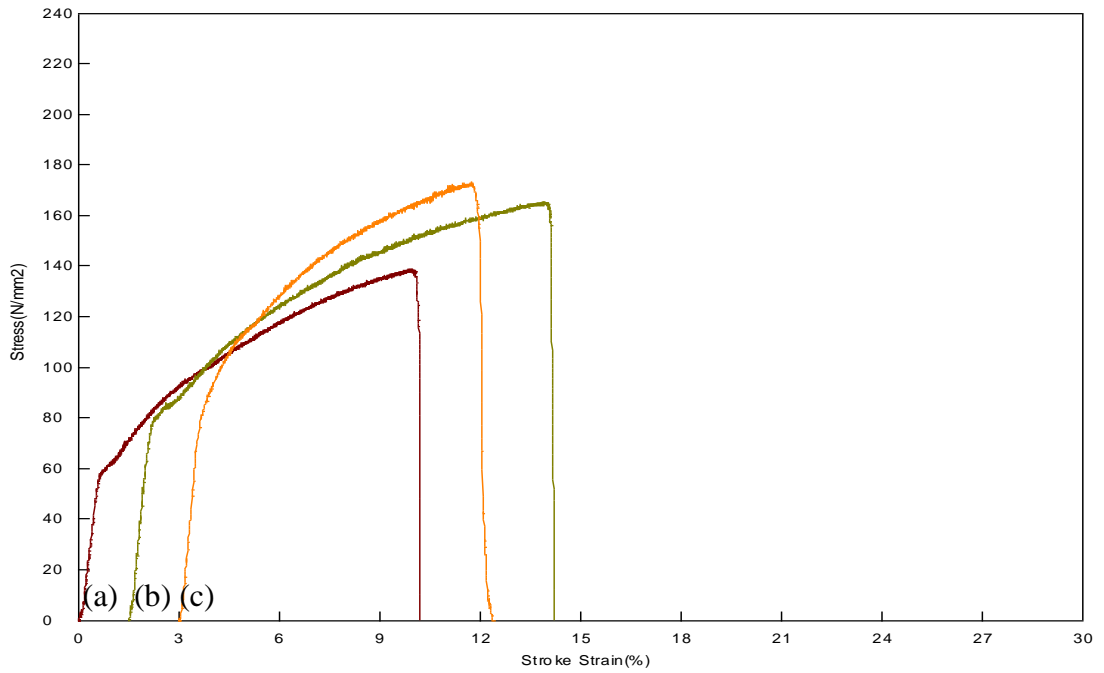
Çizelge 6.1. TM çelik numunelerin % yoğunluk, % gözeneklilik, ort. tane boyutu değerleri.

<b>Bileşen</b>	<b>Yoğunluk (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gözeneklilik (%)</b>	<b>Tane Boyutu (µm)</b>
0,25C+Fe MASız	7,5021	6,09	36,68
0,25C+0,05NbV+Fe MASız	7,4002	5,68	26,33
0,25C+0,1NbV+Fe MASız	7,3673	4,38	24,45
0,25C+Fe 15 Dk MA	7,9022	0,71	25,63
0,25C+0,05NbV+Fe 15 Dk MA	7,3574	6,22	18,96
0,25C+0,1NbV+Fe 15 Dk MA	7,3030	6,91	16,56
0,25C+Fe 30 Dk MA	7,3575	6,23	38,66
0,25C+0,05NbV+Fe 30 Dk MA	7,2624	7,43	28,53
0,25C+0,1NbV+Fe 30 Dk MA	7,3627	6,15	19,75
0,25C+Fe 60 Dk MA	7,3189	6,72	38,96
0,25C+0,05NbV+Fe 60 Dk MA	7,3946	5,74	30,11
0,25C+0,1NbV+Fe 60 Dk MA	7,3851	5,86	21,31

### 6.3. MEKANİK TEST SONUÇLARI VE TARTIŞILMASI

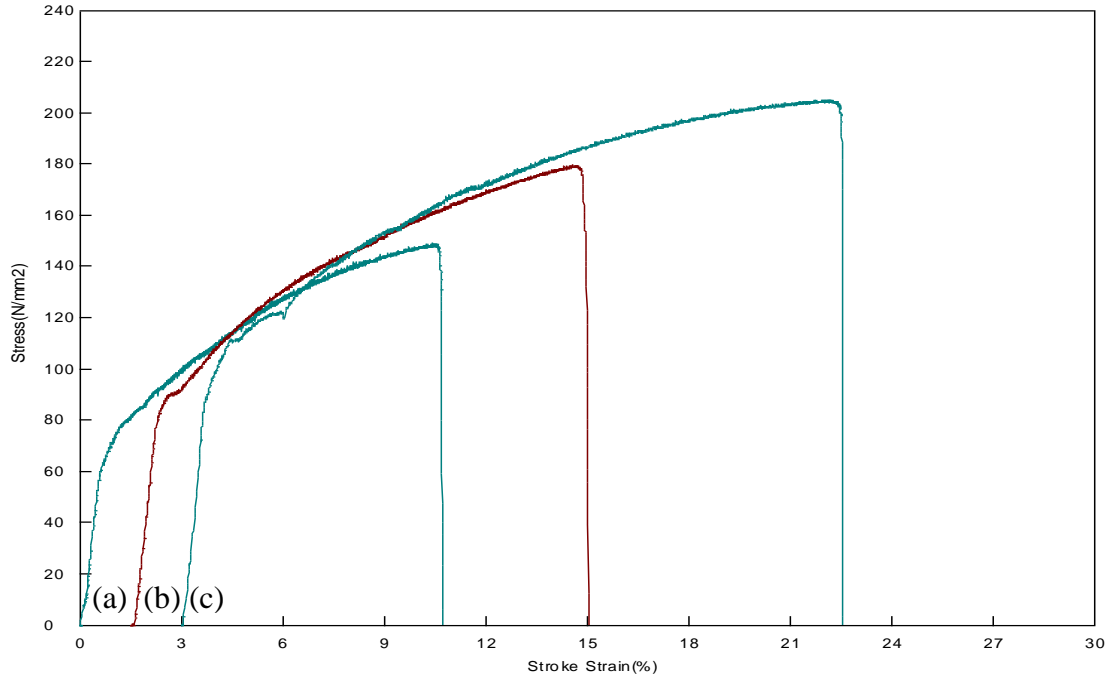
#### 6.3.1. FeC ve Nb-V Mikroalaşımlı TM Çeliğinin Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

TM ile FeC ve FeC mikroalaşım çeliğine Nb-V ilavesiyle üretilen numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 6.13-6.14-6.15 ve 6.16'da verilmiştir.

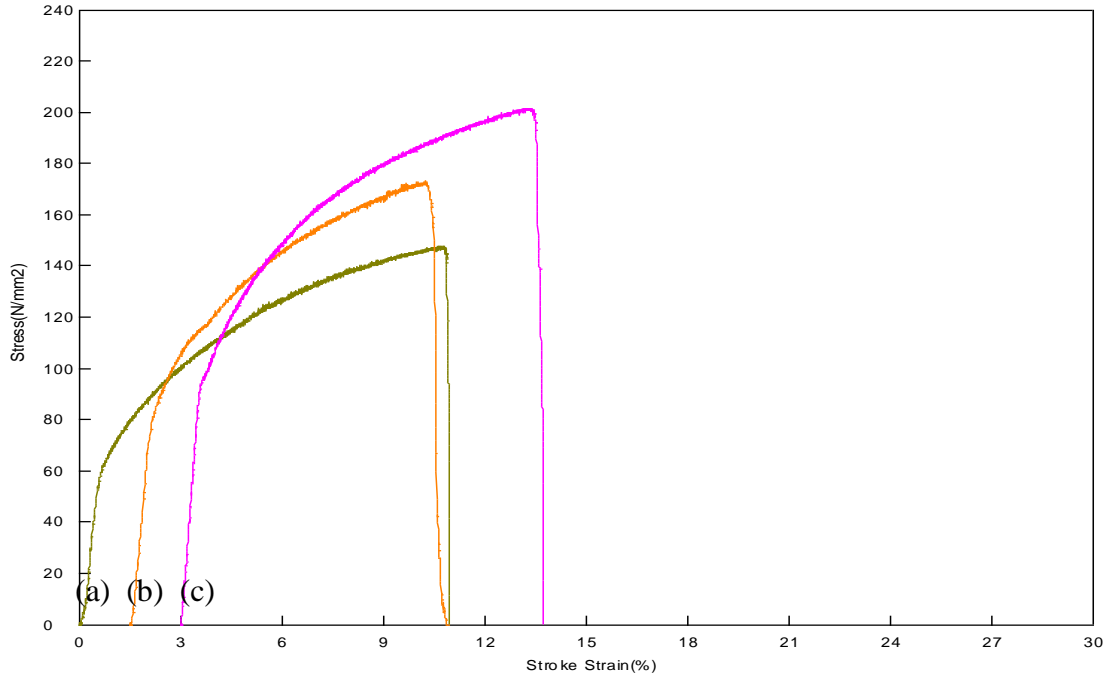


Şekil 6.10. Mekanik alaşımlama işlemi yapılmadan 1350 °C'de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a) 0,25C+Fe, (b) 0,25C+0,025NbV+Fe ve (c) 0,25C+0,1NbV+Fe.

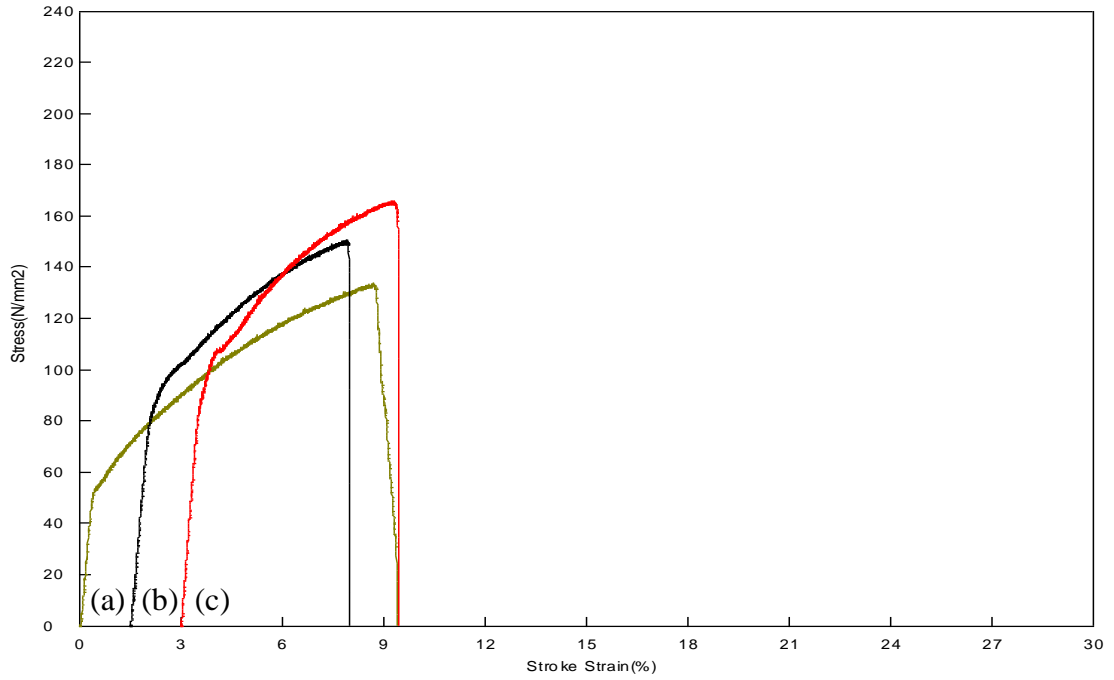




Şekil 6.11. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi yapıldıktan sonra 1350 °C'de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a) 0,25C+Fe, (b) 0,25C+0,025NbV+Fe ve (c) 0,25C+0,1NbV+Fe



Şekil 6.12. 30 dakika mekanik alaşımlama işlemi yapıldıktan sonra 1350 °C'de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a) 0,25C+Fe, (b) 0,25C+0,025NbV+Fe ve (c) 0,25C+0,1NbV+Fe



Şekil 6.13. 60 dakika mekanik alaşımlama işlemi yapıldıktan sonra 1350 °C'de sinterlenen TM numunelerinin çekme deneyi sonuçları (a) 0,25C+Fe, (b) 0,25C+0,025NbV+Fe ve (c) 0,25C+0,1NbV+Fe

Çizelge 6.2. 1350 °C'de sinterlenmiş TM çelik numunelerin akma dayanımı(YS), çekme dayanımı(UTS), % uzama ve sertlik değerleri.

Bileşen	Akme Dayanımı (MPa)	Max.Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
0,25C+Fe MAsız	63	140	10
0,25C+0,05NbV+Fe MAsız	85	166	12,4
0,25C+0,1NbV+Fe Masız	115	174	10
0,25C+Fe 15 Dk MA	86	150	10
0,25C+0,05NbV+Fe 15 Dk MA	93	180	13
0,25C+0,1NbV+Fe 15 Dk MA	121	205	19
0,25C+Fe 30 Dk MA	66	148	10
0,25C+0,05NbV+Fe 30 Dk MA	88	173	9
0,25C+0,1NbV+Fe 30 Dk MA	100	201	11
0,25C+Fe 60 Dk MA	55	134	9
0,25C+0,05NbV+Fe 60 Dk MA	83	151	7
0,25C+0,1NbV+Fe 60 Dk MA	91	166	6

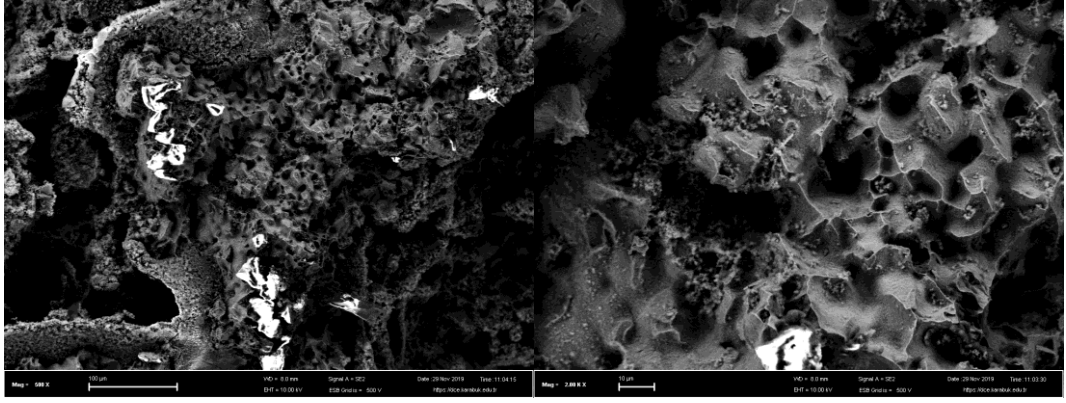
Çizelge 6.2'de de belirtildiği gibi karbon miktarları aynı olmasına rağmen içerisine Nb ve V eklemesi yapılan TM metallerinin akma ve çekme dayanımının artışı net bir şekilde görülmektedir. TM metallerinin akma ve çekme dayanımlarının maksimum olduğu mekanik alaşımlama süresinin 15 dakika olduğu saptanmıştır. Mekanik alaşımlama süresinin 30 dakika ve üzeri sürelerle çıkması ile akma ve çekme

dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Mekanik alaşımlama işleminin 30 dakika ve üzeri sürelerle çıkması mikroalaşım elementlerinin tane sınırlarına yayılması, tane büyümesini engelleyememesi mekanik özelliklerin düşmesinin başlıca sebeplerindendir.

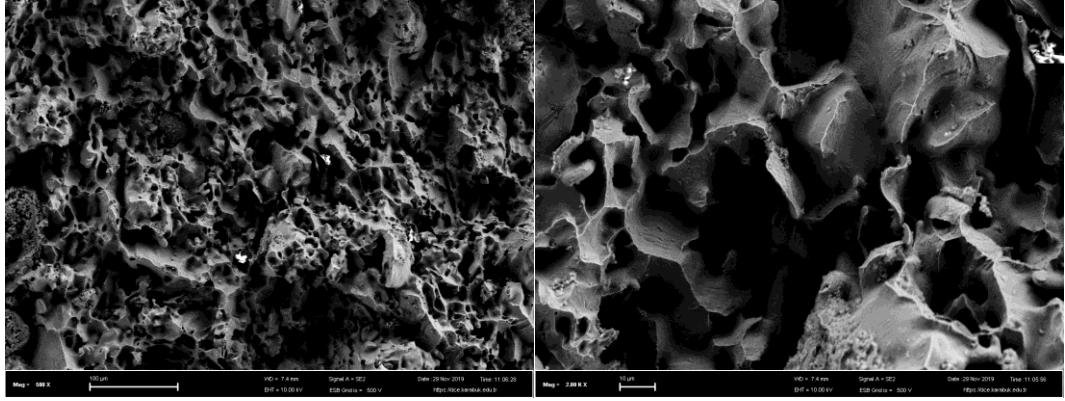
#### **6.4. TARAMA ELEKTRON MİKROSKOP (SEM) İNCELEMELERİ**

1350 °C’de argon ortamında sinterlenmiş olan TM numunelerin çekme deneyi sonrası X500 ve X5000’de kırık yüzey görüntüleri alınmıştır. Alınan kırık yüzey görüntüleri Şekil 6.17-6.18-6.19-6.20-6.21-6.22-6.23-6.24-6.25’de gösterilmiştir.

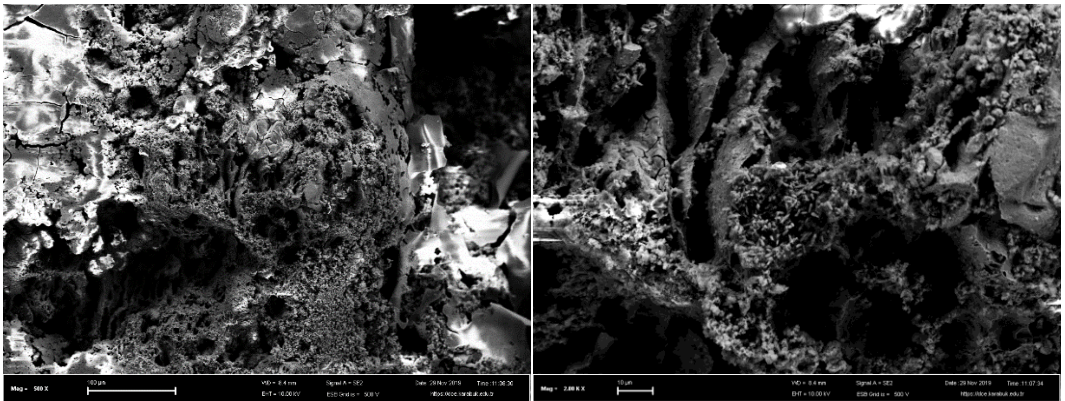
Alaşımsız ve mikroalaşımlı TM eliklerinin kırık yüzeyleri incelendiğinde kırık yüzeylerin kısmen sünek (petekli yapı) ve kısmen gevrek (ayrılma düzlemleri) davranış sergilediği görölmektedir. Mikroboşlukların birleşip büyümesi ile bu çukurcukların oluştuğu düşünölmektedir. Bu nedenle bu TM eliklerinin sünek bir davranış sergilediği kırık yüzey görüntüsünden anlaşılmaktadır. Gevrek kırılmanın ağırlıklı olarak %1 Nb-V içeren mikroalaşımlı elik numunelerde olduğu görölmektedir.



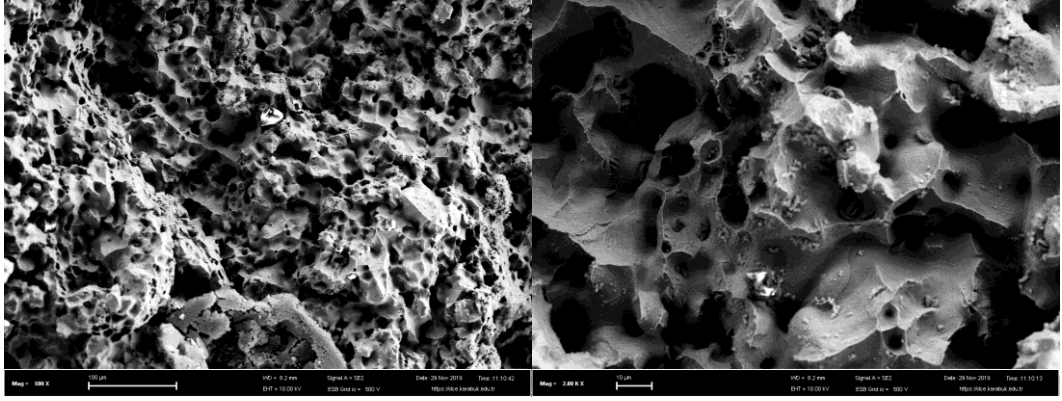
Şekil 6.14. 0,25C+Fe MA'sız TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



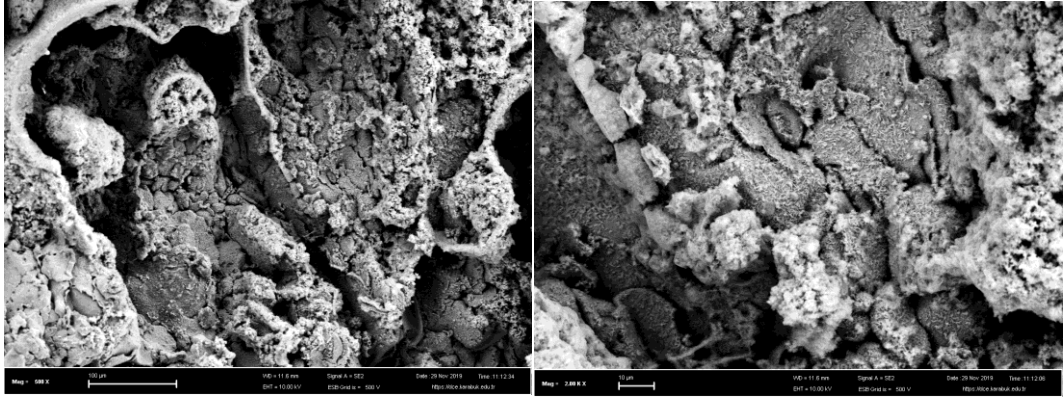
Şekil 6.15. 0,25C+Fe 15 dakika MA'lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



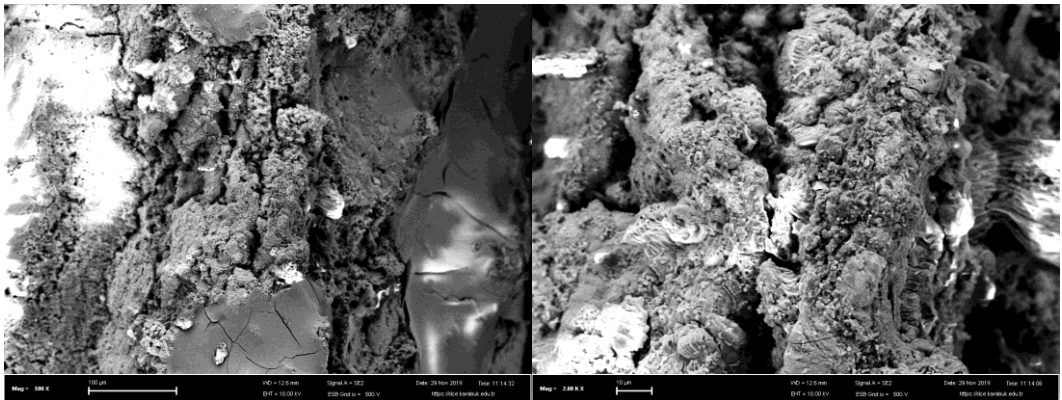
Şekil 6.16. 0,25C+Fe 60 dakika MA'lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



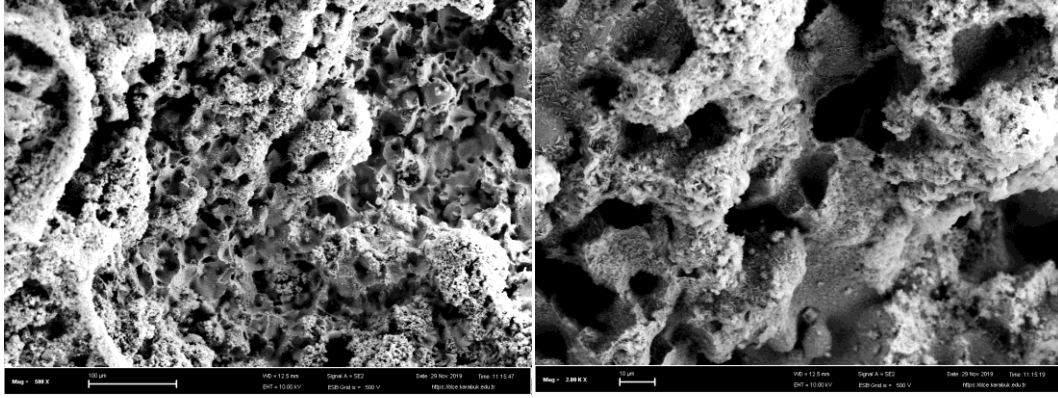
Şekil 6.17. 0,25C+0,05NbV+Fe MA'sız TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



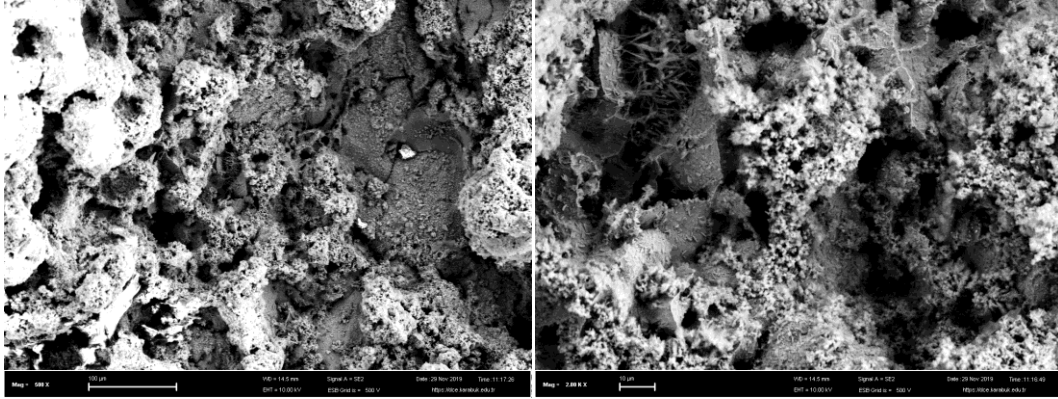
Şekil 6.18. 0,25C+0,05NbV+Fe 15 dakika MA'lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



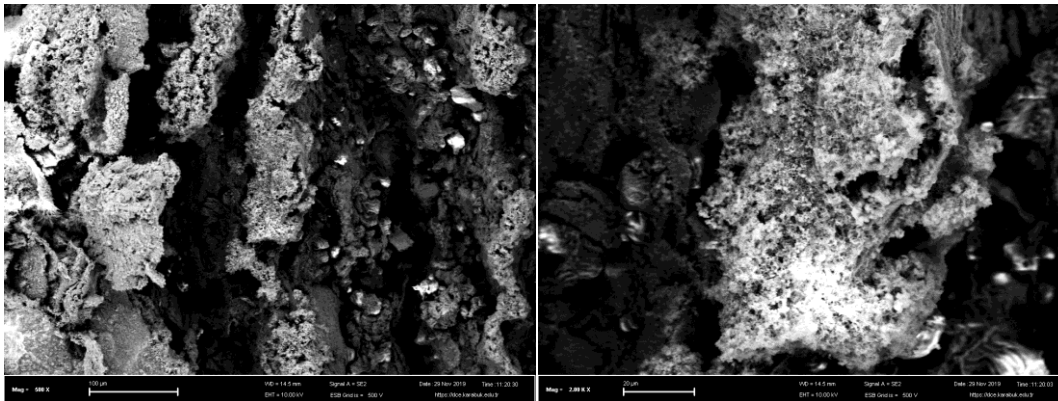
Şekil 6.19. 0,25C+0,05NbV+Fe 60 dakika MA'lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



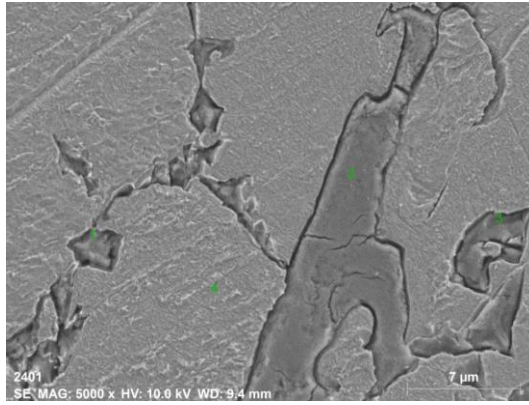
Şekil 6.20. 0,25C+0,1NbV+Fe MA'sız TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



Şekil 6.21. 0,25C+0,1NbV+Fe 15 dakika MA'lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



Şekil 6.22. 0,25C+0,1NbV+Fe 60 dakika MA'lı TM çeliklerinin X500 ve X5000 büyütmelerdeki kırık yüzey görüntüleri.



Mass percent (%)				
Spectrum	C	V	Fe	Nb
1	6.11	0.93	92.97	0.00
2	8.07	0.00	91.48	0.45
3	12.35	0.99	86.04	0.62
4	3.02	0.00	96.60	0.37
Mean value:	7.39	0.48	91.77	0.36
Sigma:	3.91	0.55	4.39	0.26
Sigma mean:	1.95	0.28	2.19	0.13

Şekil 6.23. 15 dakika mekanik alaşımlama işlemi uygulandıktan sonra 1350 °C'de sinterlenen 0,25C+0,1NbV+Fe TM numunenin X5000 büyütmelerdeki SEM mikroyapı resimleri ve EDS sonuçları.

Şekil 6.0.26'da gösterilen nokta EDS sonuçları incelendiğinde Nb-V mikroalaşımli çelikler incelendiğinde demir ve karbon içermesinden dolayı Fe<sub>3</sub>C çökeltilerinin, niyobyumun ve vanadyumun çelik içerisinde bulunması ile NbC(N) ve VC(N) çökeltilerinin oluştuğu yine SEM ve EDS incelemeleri ile tespit edilmiştir. Oluşan bu çökeltilerin çökelti serleşmesi ve tane boyutu küçültme gibi mukavemet artırıcı mekanizmalar ile malzemenin dayanımını artırdığı belirtilmiştir (Erden, 2017; Karabulut vd, 2016; Erden vd, 2014; Kostryzhev et al., 2014).

## 6.5. SPEKTRAL ANALİZ İNCELEMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Elde edilen sonuçlar çizelge 6.3'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar üretim öncesi öngörülen kimyasal bileşim ile üretim sonrası elde edilen kimyasal bileşim değerlerinin birbiri ile tutarlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.3. 1350 °C’de sinterlenen TM çelik numunelerin spektral analiz sonuçları.

Alaşım 1			Alaşım 2			Alaşım 3		
Element	Sonuç	Birim	Element	Sonuç	Birim	Element	Sonuç	Birim
<b>C</b>	0,111	%Kütle	<b>C</b>	0,126	%Kütle	<b>C</b>	0,975	%Kütle
<b>Si</b>	0,091	%Kütle	<b>Si</b>	0,0038	%Kütle	<b>Si</b>	0,035	%Kütle
<b>Mn</b>	0,184	%Kütle	<b>Mn</b>	0,0187	%Kütle	<b>Mn</b>	0,020	%Kütle
<b>P</b>	0,016	%Kütle	<b>P</b>	0,016	%Kütle	<b>P</b>	0,014	%Kütle
<b>S</b>	0,009	%Kütle	<b>S</b>	0,011	%Kütle	<b>S</b>	0,018	%Kütle
<b>N</b>	0,099	%Kütle	<b>Cr</b>	0,099	%Kütle	<b>Cr</b>	0,105	%Kütle
<b>Mo</b>	0,028	%Kütle	<b>Mo</b>	0,066	%Kütle	<b>Mo</b>	0,018	%Kütle
<b>Al</b>	0,003	%Kütle	<b>Al</b>	0,003	%Kütle	<b>Al</b>	0,003	%Kütle
<b>Cu</b>	0,122	%Kütle	<b>Cu</b>	0,0115	%Kütle	<b>Cu</b>	0,111	%Kütle
<b>Nb</b>	0,001	%Kütle	<b>Nb</b>	0,037	%Kütle	<b>Nb</b>	0,078	%Kütle
<b>V</b>	0,008	%Kütle	<b>V</b>	0,042	%Kütle	<b>V</b>	0,073	%Kütle
<b>Fe</b>	Geri Kalan	%Kütle	<b>Fe</b>	Geri Kalan	%Kütle	<b>Fe</b>	Geri Kalan	%Kütle

## 6.6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Alaşımsız çelik ve iki farklı hacim oranına sahip (%0,05 ve %0,1 Nb-V) olan mikroalaşımli TM çelik numuneler, farklı mekanik alaşımlama süreleri uygulanarak elde edilen tozların soğuk presleme ve ardından 1350 °C’de argon atmosferinde sinterleme işlemi uygulanarak üretilmiştir. Aşağıda sıralanan sonuçlar bu çalışmadan elde edilmiştir.

- (Nb-V) mikroalaşımli çelikler, alaşımsız çeliklere göre bütün alaşım oranlarında daha küçük taneli yapı sergilemişlerdir. Bu durum alaşım elementlerinin oluşturmuş olduğu karbür ve nitrürlerin tane büyümesini engellemesinden kaynaklanmaktadır.
- Alaşımsız ve (Nb-V) mikroalaşımli TM çeliklerinin sinterleme sonrası yoğunluklarının genel olarak %88 civarında olduğu görülmektedir.
- Maximum akma ve çekme dayanımı 15 dakika yapılan mekanik alaşımlama ile sağlanmıştır. 30 dakika ve 60 dakika yapılan mekanik alaşımlamalarda ise dayanımlarda düşüş görülmüştür.



- (Nb-V) mikroalaşım çelikleri toz metalürjisi yöntemiyle üretilebilmektedir. Sinterleme sırasında veya sinterleme sonrası soğutma sırasında oluşan katı ergiyik sertleşmesi ve çökelti sertleşmesi çeliğin mukavemetini arttırmaktadır.
- (Nb-V) ile mikroalaşımlandırılmış TM eliklerinin EDS analizleri V, Nb C ve N elementlerini ve bu elementlerin oluşturmuş olduğu VC(N) ve NbC(N) gibi çökeltilerin demir matris içinde bulunduğunu ortaya çıkarmaktadır.
- Alaşımsız ve Nb-V ile mikroalaşımlandırılmış TM eliklerinin spektral analizleri üretim öncesi planlanan kimyasal bileşim değerleri ile sonrası elde edilen kimyasal bileşim değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR

Al-Azzawi, A., Baumli, P., Mucsi, G., Mechanical Alloying and Milling. MultiScience - XXIX. *microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*, (2015).

Aydın, H., Çelik Saçların Çift Faz Isıl İşlemi Sonrası Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Değişimi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi* (2006).

Ayvacı, Burak, Toz Metalürjisi ile Üretilen Çeliklerde Presleme Tekniğinin Mikroyapı Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi*, (2019).

Ayvacı, Burak, Toz Metalürjisi ile Üretilen Çeliklerde Presleme Tekniğinin Mikroyapı Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi*, (2019).

Boz, M., “Toz metalürjisi ile üretilmiş bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1999).

Çakar, H. U., Production Of Zirconia Powders By Milling Process, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi*, (2013).

Demir, Fatih, Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile FeCrC Takviyeli Ni Esaslı Kompozit Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi*, (2014).

Erden, M.A., Gündüz, S., Karabulut, H., Türkmen, M., “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 İlişkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi*, (2015).

Erden, M.A., Taşçı, M. T., “Toz Metalürjisi ile Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Ni İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 19(4), 611-616, (2016).

Erden, M.A., “Effect of C Content on Microstructure and Mechanical Properties of Nb-V Added Microalloyed Steel Produced by Powder Metallurgy Method”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* Cilt. 5, No. 9, S. 44-47, (2016).

Erden, M.A., “The Effect of the Sintering Temperature and Addition of Niobium and Vanadium on the Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed PM Steels”, *Metals* 2017, 7, 329, (2017).

Erden, M. A., “Presleme Basıncının Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımız Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (1), (2017).

Ertan, Nikel Esaslı Bir Süper Alaşımın Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretilmesi ve Mikroyapı-Oksitlenme Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi**, (2003).

Karabulut, H., “Mikroalaşım Çeliklerde Yaşlanma Sertleştirilmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak*, 3-60, (2004).

Kasapgil, E., Stearik Asitin Demir Tozunun Mekanik Alaşım Sürecine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2014).

Kaya, B., AL7Sİ-xB4C ve AL7Sİ-xZrB2 (x= %5, %10 VE %15) Kompozitlerinin Mekanik Alaşım ve Sinterleme Süreçlerinin İncelenmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2014).

Keçeli, Z., Characterization investigations of powder and sintered Al-SiC and Al-B4C composites developed via mechanical alloying, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, (2007).

Kılınç, Y., Demir Bazlı Süper Alaşımın Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi*, (1999).

Kostrzyhev AG, Al Shahrani A, Zhu C, Cairney JM, Ringer SP, Killmore CR., “Effect of niobium clustering and precipitation on strength of an NbTi microalloyed ferritic steel“ *Materials Science and Engineering: A*, 607, 226–235, (2014).

Kurt. A., “Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, (1992).

Küçükdeveci, N., CoB Nano Tozu ve Filmin Elektrot Performansları ve Şarj/Deşarj Mekanizmaları, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, (2015).

Mahmutoğlu, M. Z., Çimenoglu H., % 0.03 Nb ve % 0.05 V'lu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı-Mekanik Özellik İlişkisi, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik* Cilt:2, Sayı:6, 68-72, (2003).

Mahmutoğlu, M. Z., Niyobyum ve Vanadyumlu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı-Mekanik Özellik Karakterizasyonu, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2003).

Milli, A., “Mekanik alaşımlama yöntemi ile (b4c+feti) takviyeli fe esaslı kompozit üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, **Namık Kemal Üniversitesi** (2017).

Morrison, W.B., Overview of Microalloying in Steel. The Proceedings of the Vanitec Symposium, Guilin, pp:25-35, (2000).

Odabaşı, Ç., “Toz Metalurjisi İle Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Bakır İlavesinin Mikroyapı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **İmalat Mühendisliği**, (2017).

Özcan, M. M., Mikroalaşım ve Sementasyon Çeliklerinin Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, (2005).

Rongjian Shi, Zidong Wang, Lijie Qiao, Xiaolu Pang. Microstructure evolution of in-situ nanoparticles and its comprehensive effect on high strength steel. **Journal of Materials Science & Technology**, (2019).

Söyler, A. U., Mekanik Alaşımlama Yöntemleri İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y2O3 Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, (2008).

Suryanarayana, C., Ivanov, E., Boldyrev, V.V., The science and thecnology of mechanical alloying, **Mater. Sci. Eng.**, A304-306, 151-158, (2001).

Tekin, E., API Standardı Petrol ve Doğalgaz Boruları Çeliklerine Genel Bir Bakış, **Metalurji Dergisi**, Sayı 162, 23-41, (2012).

Topateş, T., “Mikroalaşımli çeliklerin termomekanik işlemleri sırasında değişen proses parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (1995).

Yavuzer, Bekir, Mekanik Alaşımlama ile Üretilen A1sı 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi**, (2019).

Zimmerman, F. X., Jerry, T., Hot Isostatic Pressing, **Today and Tomorrow**, (2008).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Alperen YILMAZ, 1992 yılında Ankara'da doğdu; ilköğrenimini Maraşal Fevzi Çakmak İlkokulu'nda, lise öğrenimini Sincan Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2016 yılında buradan mezun oldu. Halen Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan eğitimine devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Tandoğan mah. Dinçer cad. No:2 Sincan/ANKARA  
Tel : (551) 205 23 25  
E-posta : alperenyilmaz92@gmail.com