

# Üretim Parametrelerin Düşük Alaşımli TM Çeliklerin Sertlik Ve Aşınma Özelliklerine Etkisi

\*<sup>1</sup>Ramazan Yılmaz, <sup>2</sup>Mesut Ramazan Ekici

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Esentepe Kampüsü, 54187, SAKARYA, TURKEY

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi, Esentepe Kampüsü,  
54187, SAKARYA, TURKEY

## Özet

Bu çalışmada, Distaloy AE tozu kullanılarak Fe-Ni-Cu-Mo-C içeren düşük alaşımli çelik malzeme toz metalürjisi (TM) yöntemi ile üretilmiştir. Çalışmada ticari olarak 505 distaloy olarak adlandırılan sinter sonrası sertleşebilen çelik tozları kullanılmıştır. Farklı kimyasal kompozisyonlarda harmanlanan tozlar öncelikle 700 MPa basınçla preslendikten sonra 505 malzeme 1120 ve 1200°C, diğer numuneler ise 1200°C sinterleme sıcaklıklarında azot + % 4 H<sub>2</sub> gaz ortamında 30 dakika sinterlenmiş ve hemen sonrasında havada ve su ortamında soğutulmuştur. Sinterleme sıcaklıkları, soğutma ortamı ve kimyasal kompozisyonun üretilen TM çeliklerin sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Aşınma işlemleri 3000 m mesafede 25 N yük, 1 ve 2 ms<sup>-1</sup> kayma hızları kullanılmıştır. Aşınma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda sinterlenen ve sinterleme sonrasında hızlı soğutulan TM çeliklerin daha yüksek sertlik ve aşınma dirençlerine sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, TM çelik malzeme içerisinde molibden miktarı üretilen malzemenin sertlik ve aşınma dirençlerine artırmaktadır. Ancak, bor ilave edildiğinde bu bahsedilen özellikleri oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalürjisi, distaloy, düşük alaşımli çelik, sertlik, aşınma

## The Effects of Processing Parameters on Hardness and Wear Properties of Low Alloy Sintered Steel

### Abstract

In this study, Fe-Ni-Cu-Mo-C low alloyed powder metallurgy (PM) steel was produced by powder metallurgy method with various processing parameters. Distaloy AE powder traditionally named 505 distaloy, well known as sinter hardening steel powder was used in this study. The powder were mixed with various compositions and cold pressed at 700 MPa and 505 samples sintered at different temperatures such as 1120 and 1200°C and the others were sintered at 1200°C in atmosphere controlled furnace used nitrogen+ hydrogen 4% for 30 minutes. Later they are cooled in air and water. The effects of processing parameters such as sintering temperature, cooling environment and chemical composition on hardness and wear behaviours were investigated. In this study, wear tests were carried out by using pin on disc sliding wear machine with the sliding speeds of 1 and 2 ms<sup>-1</sup> at loads of 25 N. Total sliding distance was 3000 m. Worn surfaces of the samples after wear tests were examined by using Scanning Electron Microscopy (SEM). It is seen that chemical composition and processing parameters strongly effect on the hardness and wear resistance of the samples. Higher temperature and cooling speeds have positive effects on hardness values and wear resistance. Besides, amount of molybdenum in the sintered steel increases hardness values and wear resistance. However, boron addition has negative effect on those properties of the sintered steels.

**Key Words:** Powder metallurgy, distaloy, low alloyed steel, hardness, wear

## 1. Giriş

Toz Metalurjisi (TM), yöntemi karmaşık şekilli malzemelerin seri ve ekonomik bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Farklı kompozisyonlara ve istenilen mekanik özellikler sahip TM parçalar kolaylıkla tasarlanabilmektedir [1, 2]. Diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha düşük mekanik özelliklere sahip TM malzemelere geleneksel ısıl işlemler yöntemleri uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Sert yüzeylerin elde edilerek TM malzemenin aşınma dayanımını artırılması amacıyla erime sıcaklıklarının altındaki yüksek sıcaklığa kadar ısıtılıp, daha sonra su banyosu içerisinde hızlı bir şekilde soğutulmaktadır. Hızlı soğuma ile metaller sertleştirilerek malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri istenilen seviyelere ulaştırılmaktadır. Toz metal parçaların üretimden sonra uygulanacak ısıl işlem ile malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri değiştirmek yerine son zamanlarda malzemenin kimyasal kompozisyonlarının ayarlanması ile uygun malzemeler geliştirilmektedir. Böylece, malzemelerin sinterleme işlemlerinin hemen sonrasında farklı hızlarda soğutulması ile daha sert ve üstün mekanik özelliklere sahip sinterlenmiş çelik malzemeler pratik olarak üretilmektedir. Sinterleme sonrası hızlı soğuma ile sertleşerek mukavemet kazanabilen malzemelere sinterleme ile sertleşen malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Bu durum çelik içerisinde bazı alaşım elementlerinin belirli oranlarda ilave edilmesi esasına dayanmaktadır. Sinterleme esnasında soğutma ünitesinde sinterleme sonrasında malzemelerin kontrollü bir şekilde hızlı soğutulmakta ve arzu edilen sertlik değerlerine sahip malzemeler üretilmektedir. Bu şekilde gerçekleştirilen üretim ile mikroyapı içerisinde sert fazların oluşturulması sonucu üretilen malzemelerin sertlik, çekme dayanımı ve aşınma gibi mekanik özellikleri ayarlanmaktadır [3-5]. TM çelik malzemelerin üretimi esnasında farklı soğuma hızları kullanılarak ve soğuma oranının artışına paralel olarak sertlik ve çekme dayanımı değerlerinde artış sağlanmaktadır [5].

Toz Metalurjisi ile üretilen çelik malzemelerin uygulama alanlarında aşınma direnci önemlidir. Üretim şartları, mikroyapı ve gözenek durumu kuru sürtünme davranışlarına dolayısı ile aşınma dirençlerini etkilemektedir [6-12]. Farklı deney şartları malzemenin çalışma şartlarında nasıl bir aşınma davranışı göstereceğinin belirlenmesi açısından önemli olduğundan aşınma davranışları ile birçok araştırma yapılmıştır [13-14]. Farklı şartlarda üretilen ve farklı kompozisyonlara ve mikroyapılara sahip TM malzemelerin mikroyapı, sertlik ve aşınma dirençlerinin belirlenmesi uygulamalarda güvenli kullanım açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada, Fe-Ni-Cu-Mo-C tipi düşük alaşımlı çelik malzemeler farklı kompozisyonlarda ve farklı üretim parametrelerde üretilmiştir. Sinterlemenin hemen ardından hava ve su gibi iki farklı ortamda soğutulmuştur. Üretilen TM malzemelerin mikroyapı, sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ilgili literatür ışığında tartışılmıştır.

## 2. Deneysel Çalışmalar

### 2.1. Malzeme ve Üretimi

Bu çalışmada starmix 505 ticari ismi ile anılan distalloy AE tozu kullanılmıştır. Distalloy AE tozları difüzyonla bağlanmış olan küçük alaşım elementleri ile çok saf Fe tozlarından meydana gelmiştir [15]. Toz içerisine ilave edilen molibden ise Alfa Easer'den temin edilmiştir. Ferro bor ise külçe halinde alınarak; değirmende öğütüldükten sonra 37  $\mu\text{m}$ 'luk elekten geçirilerek kullanılmıştır. Kullanılan tozların ve üretilen TM malzemelerin kimyasal kompozisyonu sırasıyla Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler 10 mm çapında ve 7 mm yüksekliğinde, 700 MPa basınçla hidrolik pres kullanılarak şekillendirilmiştir. Daha sonra azot+ %4 hidrojen atmosferinde 505 numuneler 1120 ve 1200°C sıcaklıkta diğer numuneler ise 1200°C sıcaklıkta 30 dakika sinterleme işlemine tabi tutulmuş ve hemen sonrasında hava ve su ortamında soğutulmuştur.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların ve numunelerin kimyasal bileşimi [15].

	C	Cu	Mo	B	Ni	MnS	Si	S	P	Amit mum PM	Fe
<b>505</b>	0,61	1,47	0,5	-	3,95	0,5	-	-	-	0,9	Kalan
<b>B</b>	0,61	1,47	0,5	0,5	3,95	0,5	0,05	eser	eser	0,9	Kalan
<b>Mo</b>	0,61	1,47	1,0	-	3,95	0,5	0,05	eser	eser	0,9	Kalan

## 2.2. Mikroyapı İncelemeleri

Sinterlenmiş TM düşük alaşımlı çelik numuneler %3 Nital ve daha sonra %4 Pikral çözelti ile dağlanmış. Mikroyapı incelemelerinde NIKON LP 1200 ELIPSE marka optik mikroskop ve mikroyapı ve aşınma yüzeylerinin incelemelerinde JEOL JSM 6060 LV tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. EDS element analizleri ise SEM cihazına bağlı IXRF 500 model elektron dağılım spektrometresi (EDS) kullanılarak yapılmıştır.

## 2.3. Yoğunluk Ölçümü ve Mekanik Deneyler

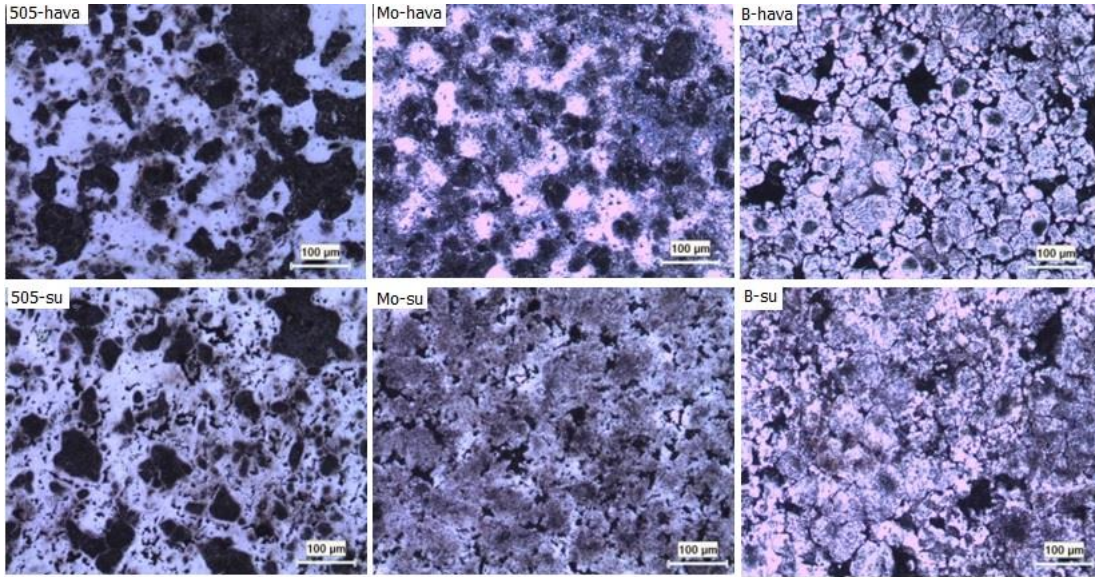
TM ile üretilen parçaların görünür yoğunlukları Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Sertlik değerlerinin belirlenmesinde Brinell sertlik metodu kullanılmıştır. Her numunenin ortalama beş farklı noktadan sertlik ölçümü alınıp, ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir.

Aşınma deneyleri ise pin-on disk yöntemiyle yapılmıştır. Aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak 62 HRC sertliğe sahip 100Cr6 rulman çeliğinden yapılmış disk kullanılmıştır. Aşınma testi yapılan numuneler,  $1\text{ms}^{-1}$  ve  $2\text{ms}^{-1}$  hızlarla 3000 m yol alacak şekilde 25N'luk yüklere maruz bırakılmışlardır. Numuneler, deney öncesinde ve deney sonrasında  $10^{-4}$  g hassasiyetindeki dijital terazide tartılarak ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Aşınma oranı, aşınan malzemenin hacminin alınan yola bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Aşınan malzemenin hacmi ise aşınma sonrasında aşınma kaybı ağırlığının, malzemenin yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilmektedir.

## 3. Deney Sonuçları Ve Tartışma

### 3.1. Mikroyapı

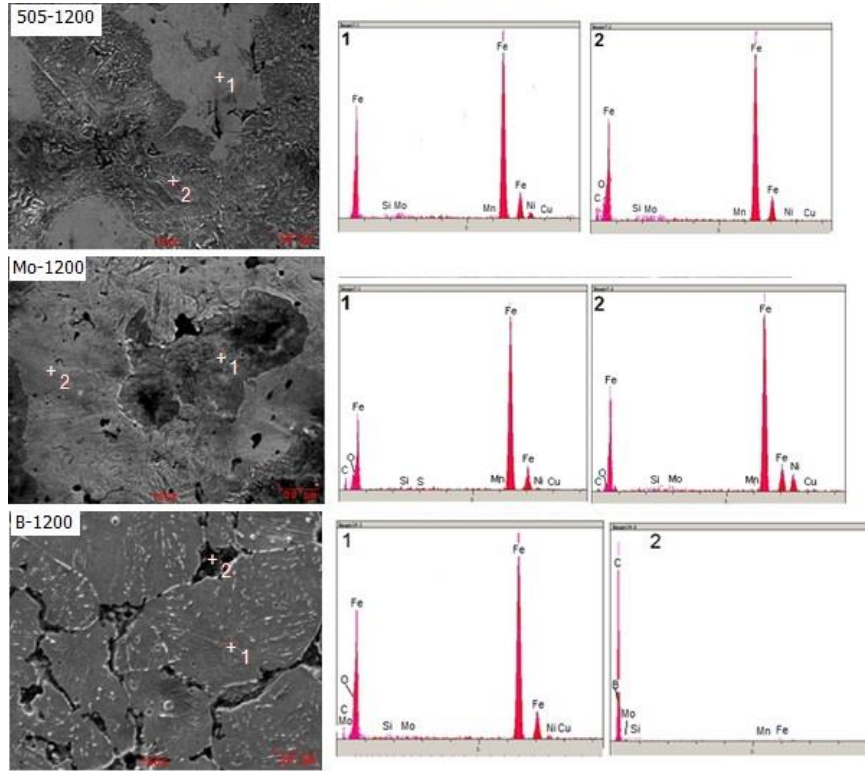
Fe-Ni-Cu-Mo-C distaloy tozları kullanılarak TM yöntemi ile farklı proses parametreleri ile üretilen düşük alaşımlı çelik malzemelerin mikroyapıları optik mikroskop incelemelerinde farklılıklar gözlenmiştir (Şekil 1). 1200°C 30 dakika süreyle sinterlenen TM malzemeler hemen sonrasında havada ve suda soğutulmuştur. Farklı soğutma hızları malzemelerin mikroyapısını etkilediği net olarak görülmektedir. Ana malzeme olan 505 hava ortamında soğutulduğunda gerçekleşen yavaş soğuma sonucu mikroyapı içerisinde daha yumuşak fazların oluştuğu gözlenmektedir. Mikroyapıda ferrit, perlit ve beynitik yapıdan oluştuğu gözlenmektedir. Soğuma hızının artmasına paralel olarak mikroyapı içerisinde ferrit, perlit, ostenit ve kaba beynit fazlarının yanında bir miktar martenzit gibi sert fazlardan oluşmaktadır.



Şekil 1. 1200 °C’de sinterleme sonrasında farklı ortamlarda soğutulan düşük alaşımlı TM çelik malzemelerin optik mikroskop görüntüleri

Mikroyapının içerisinde görülen koyu siyah bölümlerin ince perlit olduğu düşünülmektedir. Benzer durum 1120°C’de sinterlenen TM malzemelerde de gözlenmiştir. Sinterleme, sıcaklığındaki artışa paralel olarak malzemenin içerisinde fazların farklılaştığı görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artışı malzemenin içerisinde bulunan bazı elementlerin difüzyon katsayılarını arttırdığından mikroyapı içerisinde daha geniş alana yayılmakta ve böylece soğuma hızı artışı ile mikroyapı içerisinde daha sert yapıların oluşmasına ve oranlarının artmasını sağlamaktadır. Soğuma hızının artışı mikroyapı içerisinde ince perlit ve beynit fazların miktarını artırmaktadır. Bu durum önceki çalışmalarda da gözlenmiştir [12]. Şekilde görüldüğü gibi içerisinde fazla molibden içeren numunede de sinterleme sonrası soğuma hızının artmasına paralel olarak mikroyapı içerisinde sert fazların miktarında artış gözlenmektedir. TM malzemenin içerisine molibden oranı artırıldığında mikroyapı değişmekte ve yapı beynitik yapıya dönüşmektedir. Daha önceki çalışmalarda belirtildiği gibi molibden artışı beynitik yapının artmasını sağlamaktadır. Başlangıç tozu içerisine bor katıldığında malzemenin yapısı tamamıyla değişmekte ve bu durumda oluşan fazların miktarını ve dağılımını etkilemektedir. Fazlar birbirinden ayrılmış ve mikroyapı içerisinde gözenek miktarı artışı gözlenmektedir. Başlangıç tozlarının içerisine ferro-bor ilavesi malzemeyi olumsuz etkilemekte malzemenin yapısını bozmakta

ve düşük sertliğe sahip fazların oluşmasına neden olmaktadır.

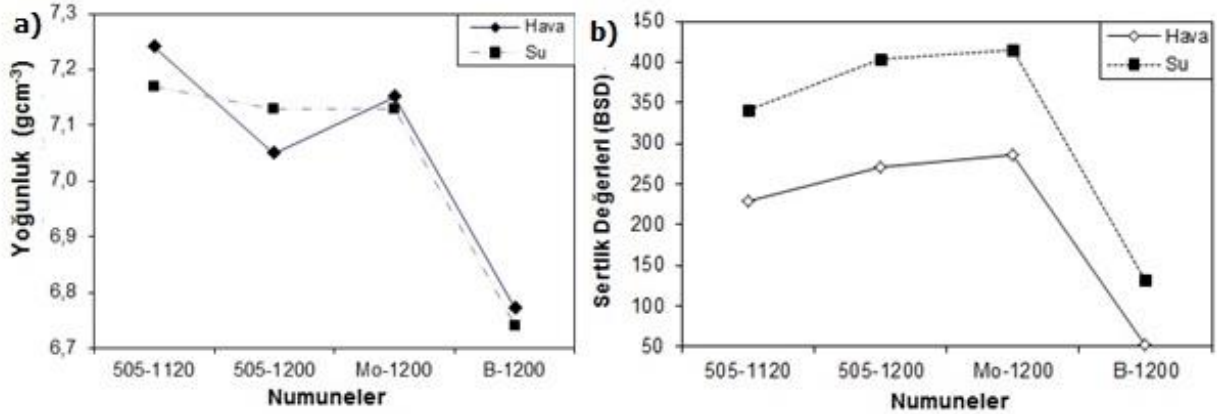


**Şekil 2.** Sinterleme sonrasında hava ortamında soğutulan düşük alaşımlı TM çelik malzemenin mikroyapısı içindeki bazı noktalardan alınmış EDS analizleri

Farklı kimyasal kompozisyona sahip düşük alaşımlı toz metalurjik çelik malzemenin nokta analizlerinde. Şekil 2’de verilmiştir. 1200°C’de sinterleme sonrasında hava ortamlarında soğutulan 505 tipi düşük alaşımlı TM çelik malzemenin mikroyapısı içerisindeki bazı noktalardan alınmış EDS analizleri verilmiştir. 1 nolu noktanın genel olarak Fe ve Ni içerdiği ve ayrıca Cu, Mo ve Si elementleri de bulunmakta ancak mikroyapıda C yoktur. Dolayısıyla bu fazın ferritik veya ostenitik yapıya sahip olduğu söylenebilir. 2 no’lu noktada bulunan yapıda yapı içerisinde Fe ve C elementleri temel olarak bulunmakta; diğer elementler ise çok az bulunmaktadır. Bu fazın perlitik yapı olduğu anlaşılmaktadır. İçerisinde Mo oranı fazla olan numunenin EDS analizlerinde her iki nokta içerisinde de C elementi bulunmaktadır. 1 noktasındaki C elementinin fazla olması oluşan yapının ince perlitik olduğunu göstermektedir. 2 no’lu noktada ise az miktarda karbon bulunması yapının içerisindeki C difüzyonunun artması, bu noktalardaki ferritik yapının kaba beynitik yapıya dönüştüğünü göstermektedir. İçerisinde bor bulunan TM malzemenin EDS analizinde 1 nolu noktasında yapıda Fe, Ni, Cu, Mo ve Si haricinde C ve O bulunmaktadır. Geniş bir alanı bu fazın genel olarak ferrit taneciklerinin üzerinde kaba beynit yapının oluştuğu düşünülmektedir. 2 nolu noktası genel olarak C ve B elementlerinden oluşmaktadır. Bu durum sinterleme esnasında ilave edilen ferro borun sisteme olumsuz etkilediği taneler arasına yerleşerek birbirinden ayırdığı ve gözeneklere neden olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.2. Yoğunluk ve Sertlik Ölçümleri

TM düşük alaşımlı çelik malzemelerin farklı proses parametrelerine göre değişen görünür yoğunluk Şekil 3 (a)'da verilmiştir. Soğutma hızlarının TM çelik malzemenin yoğunluk değerlerini çok azda olsa etkilediği gözlenmektedir. En yüksek yoğunluk değerleri 505 ana malzemenin sinter sonrası hava ortamında soğutma sonucu, en düşük yoğunluğun ise, bor içeren TM çelik malzemenin sinter sonrası suda soğutma ile elde edilmiştir. Sinterleme esnasında yüksek sıcaklığa bağlı olarak malzemelerin daha çok genişmesi ve havada soğutma esnasında daha yavaş büzülme göstermesi düşük yoğunluk değerlerinin elde edilmesine neden olduğu düşünülmektedir ([16]. FeB'un sinterleme esnasında bazı elementlerle reaksiyona girerek malzeme içerisinde gözenek oluşturması yoğunluk değerlerinin düşmesine neden olabilir. Mikroyapı görüntüleri bu durumu onaylamaktadır. Malzeme içerisine Mo ilavesi TM çelik malzemelerin yoğunluğunun artmasına olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

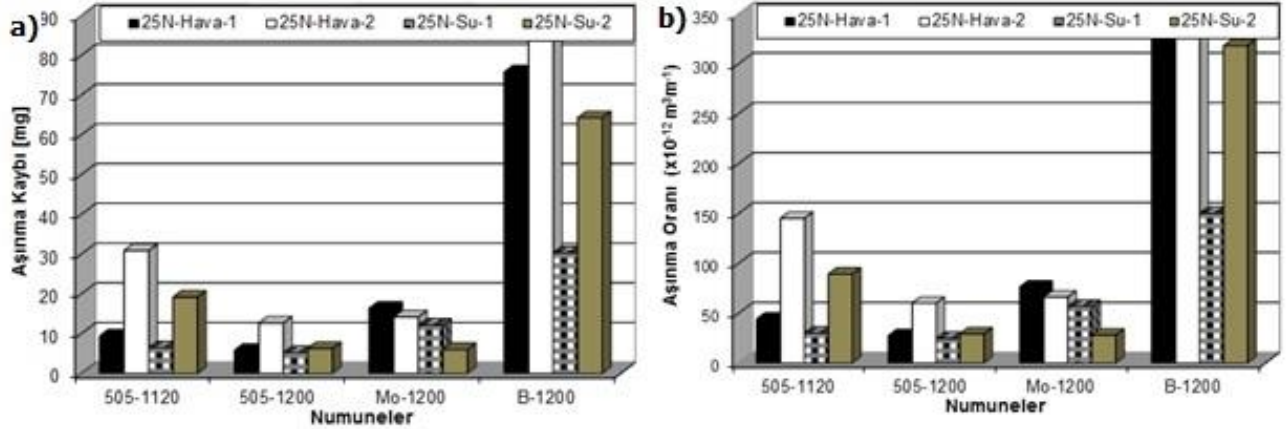


Şekil 3. Sinterleme sonrası farklı ortamlarda soğutulan düşük alaşımlı TM çelik malzemenin sahip olduğu a) yoğunluk b) Brinell sertlik değerleri

Farklı parametreler ve kompozisyon kullanılarak üretilen TM düşük alaşımlı çelik malzemelerden elde edilen Brinell sertlik değerleri Şekil 3 (b)'de verilmiştir. Sertlik değerleri çalışmada kullanılan bütün numunelerde sinterleme sonrası soğutma hızına bağlı olarak artmakta olduğu görülmektedir. Sertlik değerleri sinterleme sıcaklığına bağlı olarak yükselmektedir. Fe esaslı toz metalurjik malzemenin üretiminde yavaş soğuma hızı nedeni ile malzemenin mikroyapısı ferrit-perlit mikroyapı fazlarından oluşmaktadır. Sinterleme sonrası soğutma hızına bağlı olarak TM çelik malzemelerin yoğunluğu artışı ve sert fazların oluşması sertlik değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Malzemenin içerisinde ince perlit, üst beynit gibi sert fazların oranları artmaktadır. Sertlik değerleri mikroyapı çalışmalarında elde edilen optik ve SEM görüntüleri ile SEM/EDS analizleri görüntüleri ile uyum içerisindedir. TM ile üretilen çelik malzemelerde C miktarı sertlik değerlerinde en önemli etkidir. Malzemenin içerisinde yeterli miktarda C bulunduğu Mn ve Mo gibi elementler ferrit içerisinde çözünebilmekte hem de karbür yapabilmektedirler [17]. Ferrit fazı içerisinde çözünen bu alaşım elementleri katı çözelti sertleşmesi mekanizması ile toz metalurjik malzemenin sertlik ve dayanımının artmasını sağlamaktadır. Toz metalurjik malzemelerde toz içerisinde bulunan Mo ilavesi katı çözelti sertleşmesine az miktarda etki etmekte fakat molibden karbon içerisinde çözüldüğünde sertleşebilme özelliği nedeniyle malzemenin sertlik değerlerinin artmasına katkı sağlamaktadır [9-12]. Malzeme içerisinde bulunan Bor elementi malzemenin sertlik değerinin düşmesine neden olmaktadır. FeB katılması malzeme içerisinde saflığı bozduğundan sinterleme esnasında diğer elementlerin malzeme içerisine yayılımını engellediği ve düşük sertlik değerlerinin elde edilmesine neden olduğu düşünülmektedir.

### 3.3. Aşınma Deneyleri

Farklı kompozisyon, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme sonrası soğutma hızının aşınma miktarına ve oranına etkisi Şekil 4 (a) ve (b)'de verilmiştir. Sinterleme sonrası soğutma hızının artışı paralel olarak TM çelik malzemenin aşınma direncinde artış gözlenmiştir. Sinter sonrası soğuma hızının artışı malzemeye aşınma direnci artırmaktadır [5]. Aşınma deneylerinde kayma hızı artışı ile ağırlık kaybı miktarında önemli miktarda artma görülmüştür. Sinterleme sonrası soğutma hızı arttıkça aşınma miktarı düşmekte malzemenin aşınma direnci önemli ölçüde artmaktadır. Aynı eğilimler aşınma oranı değerlerinde de elde edilmiştir (Şekil 4 (b)).

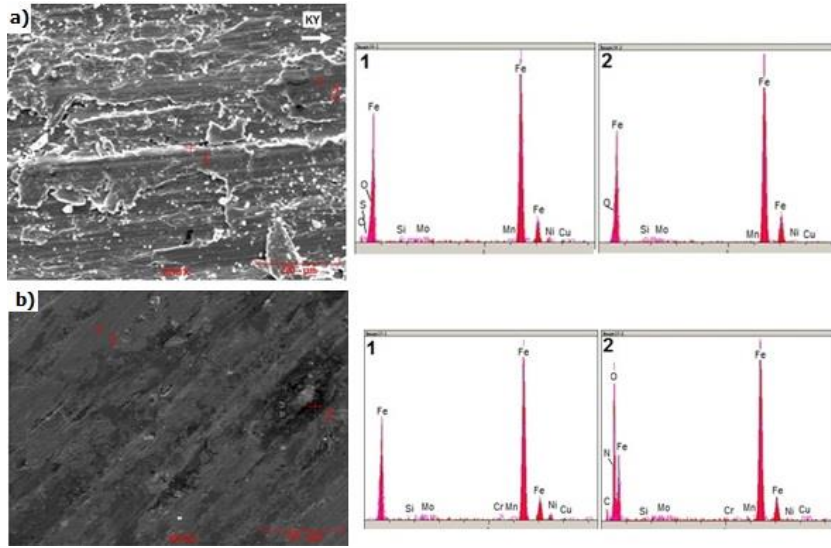


Şekil 4. Düşük alaşımlı TM çelik malzemelerin aşınma deneylerinde elde edilen a) ağırlık kaybı b) aşınma oranlarının değişimi

Bor içeren TM çelik numunelerin aşınma deneylerinde aşınma miktarları çok yüksek olduğundan dolayı diğer numunelerin ağırlık kaybı miktarlarını net görülmesi için ölçek dar tutulduğundan grafikte gösterilememektedir. Bu malzemenin sahip olduğu değerler sinterleme sonrasında hava ortamlarında soğutulan ve 25 N ve  $1\text{ms}^{-1}$  hız uygulanarak aşınma deneyinde  $403,2\text{ mg}$  aşınma kaybı değeri ve  $1984,24 \times 10^{-12} \text{ m}^3\text{m}^{-2}$  aşınma oranı değeri elde edilmiştir. Soğuma hızı arttıkça ağırlık kaybı miktarı artmaktadır. Soğuma hızı arttıkça ağırlık kaybı değerleri arasındaki fark daha net olarak görülmektedir.  $1200^\circ\text{C}$ 'de sinterleme sonrasında su ortamlarında soğutulan ve 25 N ve  $1\text{ms}^{-1}$  hız uygulanarak aşınma deneyine tabi tutulan 505 tipi düşük alaşımlı TM çelik malzemenin en yüksek aşınma direncini göstermektedir ( $5,5\text{mg}$  aşınma kaybı ve  $24,78 \times 10^{-12} \text{ m}^3\text{m}^{-2}$  aşınma oranı). Bu malzemelerin sertlik değerleri de daha yüksektir. Bu çalışmada sertlik değerleri ile aşınma dirençleri arasında paralellik gözlenmektedir. İçerisinde bir miktar daha fazla molibden olması aşınma direncinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bor içeren TM çelik malzeme en az aşınma direnci gösteren malzemelerdir. Sinterleme sonrasında soğuma hızları arttıkça aşınma deneylerinde elde edilen ağırlık kaybı miktarları da düşmektedir.

Şekil 5'de  $1200^\circ\text{C}$ 'de sinterlendikten sonra havada soğutularak üretilen 25 N yük ve  $1\text{ms}^{-1}$  hız uygulanarak aşınma deneyi yapılan sırasıyla bor daha fazla Mo içeren düşük alaşımlı TM çelik malzemenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Hava ortamında sertlik ve ağırlık kaybı miktarları yüksek olup daha az aşınma direnci gösterdiklerinden parlatma işlemi yapılmış gibi aşınma yüzeyi göstermişlerdir. Ancak Bor içeren düşük alaşımlı TM çelik malzemenin aşınma yüzeyi aşınmanın daha şiddetli olduğunu göstermektedir. Aşınma

esnasında yüzeyde plastik deformasyon ve döküntülerin daha çok olduğu gözlemlenmektedir. Böylece malzemenin aşınma ağırlık kaybı miktarı ve aşınma oranının artmaktadır.



**Şekil 5.** 1200 °C’de sinterlendikten sonra havada soğutulmuş 25 N yük ve 1 ms<sup>-1</sup> hız uygulanarak aşınma deneyi yapılan a) bor b) Mo içeren düşük alaşımlı TM çelik malzemenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri

EDS analizlerinde daha az oksit içerdiği görülmektedir. Bu malzemenin aşınmaya karşı dirençli olmadığını aşınma esnasında yüzeyin çok yüksek sıcaklıklara ulaşmadan döküldüğünü göstermektedir. Ancak daha fazla molibden içeren düşük alaşımlı TM çelik malzemenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizlerinde karbon ve daha fazla miktarda oksit içermektedir. Aşınma daha şiddetli olmakta ve malzeme direnç göstermesi sonucu yüzeyde sıcaklık yükselerek malzemenin yüzeyini oksitlemektedir. Yük ve kayma hızı yüksek olduğundan aşınma şiddetli gerçekleşmiş ve karşılıklı olarak aşındıran dik ve aşınan numunenin yüzeyinde ısınının artışına neden olmakta ve bu noktalarda demir oksit tabakası oluşmuştur. Yüzeyde çok az oksit oluştuğu hem SEM görüntüsünden hem de EDS analizinden anlaşılmaktadır. Yüzeyde demir oksit oluşması kayma eğilimini arttırdığından sürtünme katsayısının düşmesine neden olmakta, malzemenin aşınma direncini arttırmaktadır. Burada elde edilen çalışmalar daha önceki yapılan çalışmalarla uyumlu olup o çalışmalarda da bazı bölgelerinde demir oksit oluştuğu gözlemlenmektedir [9-13].

## Sonuçlar

Yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- TM çelik malzemenin mikroyapısı sinterleme sonrası soğutma hızına, kompozisyona ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak farklılaşmaktadır: Sinterleme sıcaklığı, soğutma hızının ve molibden oranının artışına bağlı olarak mikroyapının beyritik ve martenzitik gibi sert fazların miktarının artışına neden olmaktadır.
- Üretimde farklı parametrelerin kullanılması TM çelik malzemenin yoğunluk değerlerini az da



olsa etkilemektedir. Yoğunluk değerleri sinter sonrası soğutma hızının artışına bağlı olarak bir miktar artmaktadır. Başlangıç tozuna element ilavesi yoğunluk değerlerini az da olsa olumsuz etkilemekte bor ilavesi olumsuzluğu daha da artırmaktadır.

- Sinterleme sonrası soğutma hızı, TM malzemenin kompozisyona ve sinterleme sıcaklığına malzemenin sertlik değerlerini etkilemekte ve sıcaklık, molibden ilavesine bağlı olarak artarken, .bor ilavesi sertlik değerlerini düşürmektedir.
- Sinterleme sıcaklığı, sinter sonrası soğutma hızındaki artış ve molibden artışı TM çelik malzemenin aşınma direncini artırmakta, bor ilavesi ise aşınma direncini düşürmektedir. Aşınma deneyi esnasında uygulanan kayma hızı aşınma direncini azaltarak ağırlık kaybı miktarını arttırmaktadır.

### **Teşekkür**

Bu çalışma, 2008-50-01-020 No'lu Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Tozların temininde ve cihazların kullanılmasında yardımcı olan Toz Metal Ticaret A.Ş. yetkililerine, Prof. Dr. Adem DEMİR'e, Prof.Dr. Hüseyin ÜNAL'a Prof. Dr. Can KURNAZ a; Uzman Fuat KAYIŞ'a çok teşekkür ediyoruz.

### **Kaynaklar**

- [1] German RM, Powder metallurgy of iron and steel, John Willey and Sons, U.S.A., 1998
- [2] Upadhyaya GS, Sintered metallic and ceramic materials-sintered low-alloy ferrous materials, John Wiley & Sons LTD, West Sussex, England, 2000
- [3] Hatemi S, Malakizadi A, Nyborg, L, Wallint D, Critical aspects of sinter-hardening of prealloyed Cr–Mo steel, Journal of Materials Processing Technology, 2010, 1180-1189.
- [4] Fillari G, Causton R, Lawle, A, Effect of cooling rates during sinter-hardening, Hoeganaes Corporation, Presented at PM2TEC 2003, Las Vegas 2003.
- [5] Dobrański LA, Musztyfaga M, Effect of cooling rates on sinter-hardened steels, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, JAMME, 2009; 37 ,2, 630-638,.
- [6] Khorsand H, Habii SM, Yoozbasizade K, Janghordban K, Rihhai SMS, Serai HR, Ashtai M, The role of Heat Treatment on Wear Behavior of Powder Metallurgy Low Alloy Steels, Materials and Design, 2002; 23, 667-670.
- [7] Tekeli S. Güral A, Dry Sliding Wear Behaviour of Heat Treated Iron Based Powder Metallurgy Steels with 0.3% Graphite + 2% Ni Additions, Materials and Design, 2007; 28, 1923-1927.
- [8] Dhanasekaran S, Gnanamoorthy R, Dry Sliding Friction and Wear Characteristics of Fe–C–Cu Alloy Containing Molybdenum Di sulphide, Materials and Design, 2007; 28, 1135–1141.
- [9] Yılmaz R, Ekici MR, Molibden İlavesinin Düşük Alaşımli TM Malzemelerin Aşınma Davranışlarına Etkisi, 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 849-858, İstanbul 16-18 Ekim 2008.
- [10] Yılmaz R, Ekici MR, Sinterleme Sıcaklıkların Düşük Alaşımli TM Çeliklerin Aşınma Özelliklerine Etkisi, 14th International Materials Symposium (IMSP'2012), 1207-1214, Denizli 10-12 October 2012,
- [11] Yılmaz R, Özgün, Ö, Özyürek D, Fe-Cu-Mn-C TM Çeliklerin Aşınma Davranışları, 1. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu, 531-538, Karabük 2-4 Nisan 2012.

- [12] Yılmaz R, Ekici MR, Sinterleme Sonrası Soğutma Hızının Düşük Alaşımli Tm Çeliklerin Aşınma Davranışlarına Etkisi, 14th International Materials Symposium (IMSP'2012), 702-710, Denizli 15-17 October 2014.
- [13] Wang J, Danninger H, Dry Sliding Wear Behavior of Molybdenum Alloyed Sintered Steels, *Wear*, 1998; 222, 49-56.
- [14] Sudhaker KV, Sampatkumaran P, Dwarakadasa ES, Dry Sliding Wear in High Density Fe-2 % Ni Based P/M Alloys, *Wear* 2000; 242, 207, 207-212.
- [15] Höganäs Datasheet, 69.02.505, Starmix, 2007.
- [16] Lawcock RL, Davies TJ, Effect of Carbon on Dimensional and Microstructural Characteristics of Fe-Cu Compacts During Sintering, *Powder Metallurgy*, 1990; 33, 2, 147-149.
- [17] Causton RJ, Fulmer JJ, Sinter Hardening Low Alloy Steels, *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, (ed:J.M. Capus, R.M. German), San Francisco, California, USA, 5, 17, June 1992.