

# Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ferrobor takviyeli bakır kompozitinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Aytekin ULUTAŞ<sup>1\*</sup>, Hüseyin TURHAN<sup>2</sup>, Hanifi ÇİNİCİ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Balıkesir Üniversitesi, Edremit Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Geliş Tarihi (Received Date): 21.08.2015

Kabul Tarihi (Accepted Date): 08.12.2015

## Özet

*Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile ferrobor partikülleri takviyeli bakır mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, ferrobor takviye partikülleri bakır tozları içerisine ağırlıkça %1-1.5-2-2.5-3-3.5 oranlarında ilave edilerek sıkıştırıldıktan sonra 800-850-900 °C sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterleme öncesinde ve sonrasında yoğunluk ölçümleri yapılan MMC numunelerinin sertlik ve çapraz kırılma dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca SEM-EDS analizleri ile mikroyapısal karakterizasyonu yapılmıştır. Yapılan SEM-EDS analizleri sonucunda, farklı sıcaklıklarda uygulanan sinterleme işlemi ile farklı intermetalik bileşiklerin oluştuğu ve sinterleme sıcaklığı artışının numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Farklı bileşim oranları dikkate alındığında, yapı içerisinde artan takviye partikülü oranına paralel olarak sertlik değerlerinin arttığı, ve çapraz kırılma mukavemetinin azaldığı tespit edilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Toz metalurjisi, metal matriksli kompozit, Cu, FeB, mekanik özellikler.

\* Aytekin Ulutaş, aulutas@balikesir.edu.tr

## Determination of mechanical properties of ferroboron reinforced copper composite which produced by the powder metallurgy technique

### Abstract

*In this study, mechanical properties of ferroboron reinforced copper composite which produced by the powder metallurgy technique were studied. For this purpose, the ferroboron reinforced particles were mixed into copper powders in the rate of 1-1.5-2-2.5-3-3.5% in weight, then sintered at the temperature of 800-850-900 °C. The hardness and the transverse rupture strengths of the MMC samples that the density measurements had done before and after the sintering were determined. In addition, the microstructural characterization was carried out by SEM-EDS analysis. As a result of SEM EDS, it was seen the sintering process at different temperatures was produced different intermetallic compounds, and the increasing of the sintering temperature was upgrade the mechanic features of the samples. It is determined that if the different composition ratios were take into account, the hardness values were increased and the transverse rupture strength was decreased whit increasing the rate of the reinforcement particles.*

**Keywords:** Powder metallurgy, metal matrix composites, Cu, FeB, mechanical properties.

### 1. Giriş

Malzeme üretimindeki gelişmeler farklı uygulama alanları için farklı malzemeler geliştirilmesini gerektirmiştir [1]. Yeni malzemelerden olan kompozit malzemeler, yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı ve hafiflik gibi önemli özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık ve uzay endüstrileri gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Ticari malzemelerde bir arada bulunmayan üstün özellikler ancak kompozit malzemelerle sağlanır [2]. Toz metalurjisi üretim yöntemleri diğer metal şekillendirme yöntemlerinden tamamen farklıdır ve seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir. İşlem her iki halde de tozların bir kalıp içinde sıkıştırılmasıyla başlanır. Oluşturulan şekil pişirilerek gerekli mukavemete kavuşturulur [3]. Bazı parçalar bu işlemi takiben kalibrasyon (yeniden presleme), yağ veya plastik emdirme, daha düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım sızdırma, ısıl işlem veya kaplama işlemlerine tabi tutulabilir. Diğer bir ifadeyle T/M, elementel tozların, tam ve/veya yarı ön alaşımlanmış tozların bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun sıkıştırma yöntemleri ve sıcaklıklar kullanılarak arzu edilen şekilde üretilmeleri süreçlerini içeren oldukça kapsamlı ve çok disiplinli bir malzeme üretim yöntemidir [4].

Üretilen malzemelerin çeşitli alanlarda güvenli bir şekilde kullanılmaları için, mekanik davranışlarının iyi anlaşılması ve bilinmesi gereklidir [5]. Çoğu metal ve alaşım sisteminde olduğu gibi toz metalurjik malzemelerin de mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından alaşım dizaynı önemlilik arz etmektedir [6]. Bu bakımdan çeşitli parçaların tasarımı, üretimi açısından büyük önem taşımaktadır [5]. Davala'ya [7] göre

malzeme kompozisyonu, sağladığı yoğunlukla, alaşım sisteminin sertleşebilirliğini arttırarak genellikle sistemin mekanik performansını yükselten alaşım elemanlarıyla eşit rol oynar.

Xiong [8], demir ve bakır esaslı malzemeler mukayese edildiğinde Bakır esaslı malzemelerin daha iyi ısı iletkenlik ve sürtünme direnci gibi özellikleri olduğunu dile getirir.

Saf bakır yüksek elektrik ve ısı iletkenliğe sahip olmasına karşın, çekme, sürünme ve sertlik gibi mekanik özellikleri düşüktür. Bu bakımdan yüksek çekme mukavemetli ve sert bakır esaslı malzeme geliştirilmesi önemlidir. Bakırın mekanik dayanımı matris içerisine homojen olarak dağılmış sert parçacık takviyesi ile veya yaşlandırma ısı işlemi ile artırılabilir [9].

Bu çalışma ile verilen literatür ışığında Bakır matris içine FeB takviye tasarlanan kompozit, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Hazırlanan kompozite ait numunelerin Mekanik, Elektriksel özellikleri araştırılmış ve üretilen kompozitin metalurjik karakterizasyonu belirlenmiştir. Literatürde toz metalurjisi alanında bakır esaslı FeB takviyeli bir kompozit üretimine dair herhangi bir bilgiye ulaşılamamıştır. Bu çalışma temelde bor takviyesinin Fe-Cu ikili denge diagramları incelendiğinde sinterleme sıcaklığında oluşacak intermetalik bileşikler ve bu bileşiklere bağlı bor atomu morfolojisindeki değişimi ve takibi inceleme amacıyla yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada ticari saflıktaki bakır tozuna %1-1.5-2-2.5-3-3.5 oranlarında FeB tozu karıştırılarak sabit basınç altında preslenmiştir. Toz malzeme olarak ortalama 35 µm boyutlarında bakır tozu ve Tablo 1’de özellikleri verilen ve ortalama 50 µm boyutlarında FeB tozları kullanılmıştır. Bu tozlar karıştırma, presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuştur.

Kullanılan tozlar hidrolik preste 600 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Sinterleme işlemleri, 800-850-900 °C sıcaklıklarda 1 er saat süre ile atmosfer kontrollü tüp fırında gerçekleştirilmiş olup, koruyucu gaz olarak argon kullanılmıştır. ASTM B-312 standardına göre hazırlan blok numunelerin çapraz kırılma testleri yapılmıştır. Wickers sertlik yöntemi ile numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Metalografik incelemeler SEM cihazında ve optik mikroskopta yapılmıştır.

Tablo 1. Amerikan ASTM Tarafından Kabul Edilen Ferro Bor sınıfları ve kompozisyonları (Ağırlık Yüzdesi).

Sınıf	B (min.-max.)	C (max.)	Si (max.)	Al (max.)
A1	12.0-14.0	1.5	4.0	0.5
A2	12.0-14.0	1.5	4.0	8.0
B1	17.5-19.0	1.5	4.0	0.5
B2*	17.5-19.0	1.5	4.0	8.0
C1	19.0-24.0	1.5	4.0	0.5
C2	19.0-24.0	1.5	4.0	8.0

\*Deneysel çalışmada kullanılan Ferrobor numunesinin sınıfıdır.

Presleme sonrası elde edilen numunelerin karışım konsantrasyonları Tablo 2. de verilmiştir.

Tablo 2. Deneysel çalışmada kullanılan numunelere ait Cu-FeB oranları.

Numune Numarası	Cu oranı (%)	FeB Oranı (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
C01	99	1	800
C02	99	1	850
C03	99	1	900
C04	98.5	1.5	800
C05	98.5	1.5	850
C06	98.5	1.5	900
C07	98	2	800
C08	98	2	850
C09	98	2	900
C10	97.5	2.5	800
C11	97.5	2.5	850
C12	97.5	2.5	900
C13	97	3	800
C14	97	3	850
C15	97	3	900
C16	96.5	3.5	800
C17	96.5	3.5	850
C18	96.5	3.5	900
C19	100	0	800
C20	100	0	850
C21	100	0	900

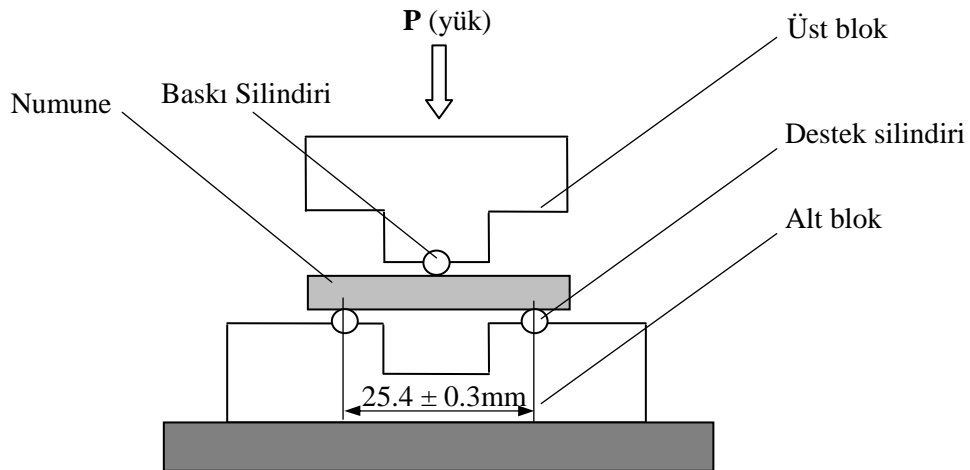
$$\zeta.K.M. = \frac{3.P(N).l(mm)}{2.b(mm).h^2(mm)} = (Mpa)$$

P(N) : Deneysel parçasının kırıldığı anda ölçülen yük (N)

L(mm): Destekler arası uzaklık ( 25.40 ± 3.00 mm)

b(mm): Deneysel parçasının genişliği (12.70 mm)

h(mm): Deneysel parçasının yüksekliği ( 6.35 mm)



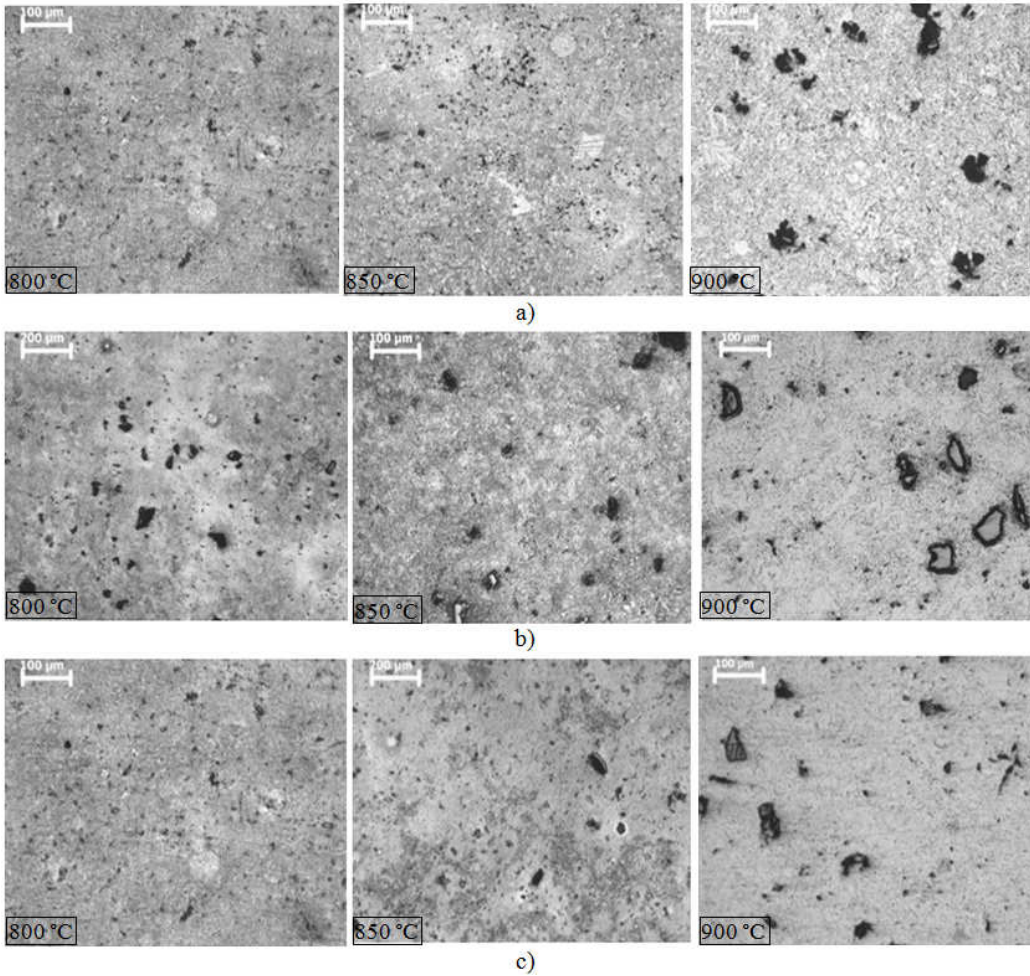
Şekil 1. Çapraz kırılma test düzeneği.

Yoğunluk ölçümü arşimet prensibine göre yapılmıştır. Deneysel numunelerinin yüzey sertlik değerleri, çapraz kırılma deneyi öncesinde dijital ekran sertlik ölçüm cihazında

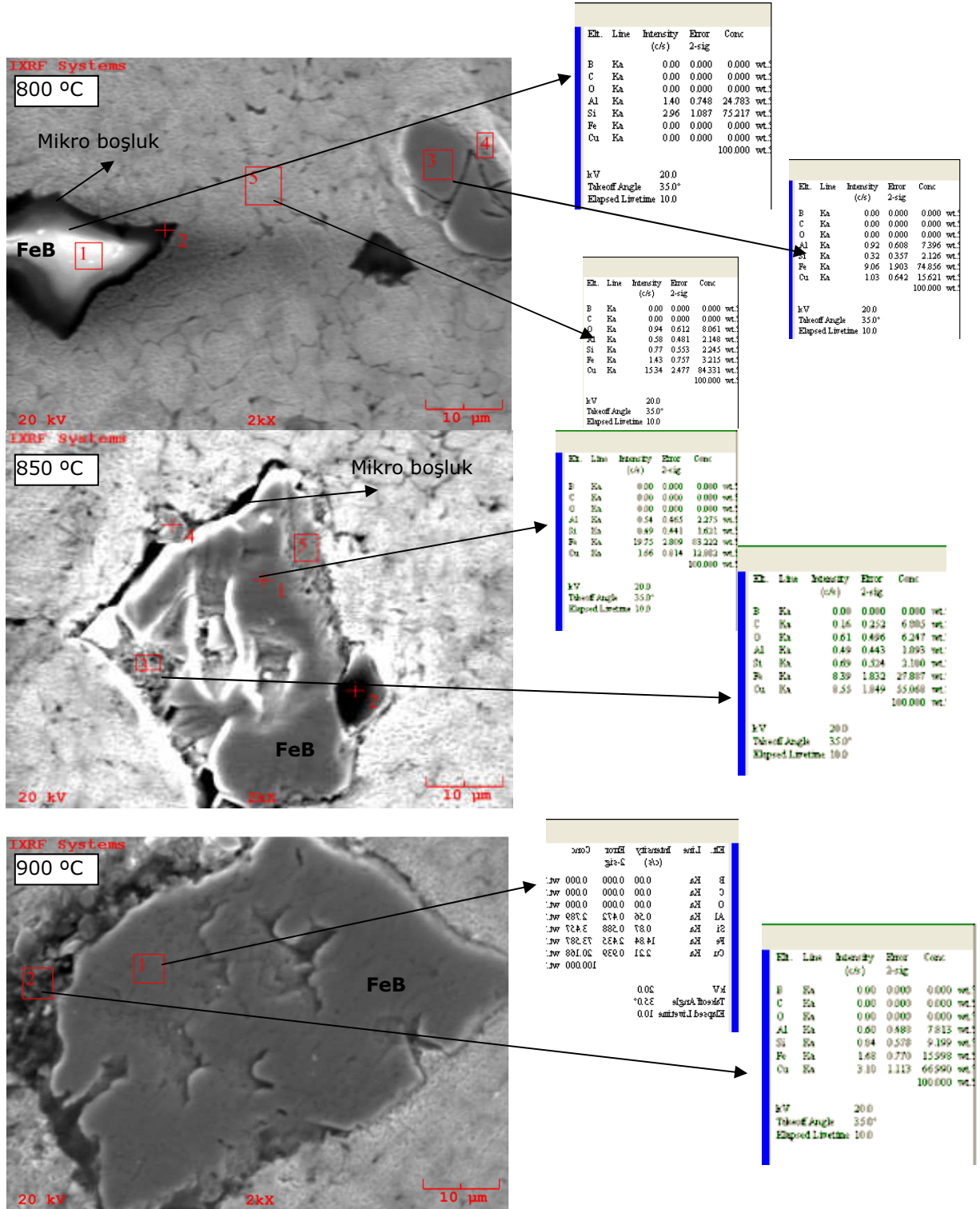
elde edilmiştir. Daha sonra bu numuneler standart çapraz kırılma aparatında çapraz kırılma deneyine tabi tutulmuşlardır. Uygulamada kullanılan çapraz kırılma aparatı Şekil 1’de şematik olarak verilmiştir.

### 3. Tartışma

Şekil 2a’da verilen mikroyapı resimlerinden 800 °C de sinterlenen numunelerin gözeneklik dağılımının düzenli olduğu ve takviye partikülü çevresinde biraz daha geniş bir dağılım gösterdiği, 850 °C da sinterlenen numuneler söz konusu olduğunda sinterleme sıcaklığının artışına bağlı olarak gözeneklerin birleştiği ve küreselleşme eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Sinterleme sıcaklığının 900 °C olarak seçildiği numuneler incelendiğinde yüksek ısı girdisi etkisi daha net bir biçimde sonuçlar ortaya koymuştur. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde porozitelerde birleşme ve küreselleşme eğilimi göstermişlerdir. Küreselleşerek birleşen porozitelerin olduğu aynı zamanda takviye partikülü çevresindeki porozite miktarının da azaldığı gözlenmektedir. Artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak poroziteler küreselleşerek birleşme eğilimi göstermektedirler. Aynı zamanda porozite ebatları küçülmekte böylece malzeme içerisinde yoğunluk artışına sebep olmaktadır.



Şekil 2. Sinterleme sıcaklığına bağlı mikroyapı değişimleri a) %1 FeB Takviyeli 800-850-900 °C sinterleme b) % 2 FeB takviyeli 800-850-900 °C sinterlenmiş numuneler, c) %3 FeB takviyeli 800-850-900 °C sinterleme sıcaklığına sahip numuneler.

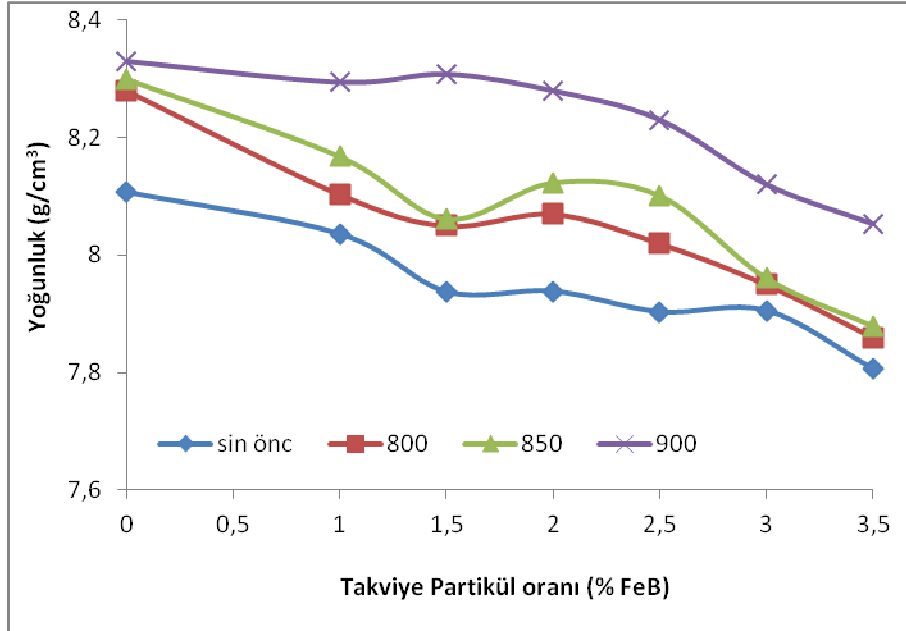


Şekil 3. %2.5 FeB takviyeli 900 °C’de sinterlenen numuneye ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Şekil 3’te farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş % 2.5 oranında FeB takviye edilmiş Cu numunelerin SEM ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. 800 °C sıcaklıkta yapılan sinterleme işleminde matris ile partikül arayüzeylerinde mikro boşlukların olduğu görülmüştür. 850 °C sıcaklıkta yapılan sinterleme işleminde ise matris ile partikül arayüzeylerinde oluşan mikro boşlukların azaldığı ve bazı partikül ile matris arasında birleşmelerin olduğu tespit edilmiştir. sinterleme sıcaklığının 900 °C’ye çıkarılması,

partikül ile matris arayüzeyinde oluşan mikro boşlukların daha da azalmasına ve partikül/matris arayüzey geçişlerinin arttırmasına neden olmuştur.

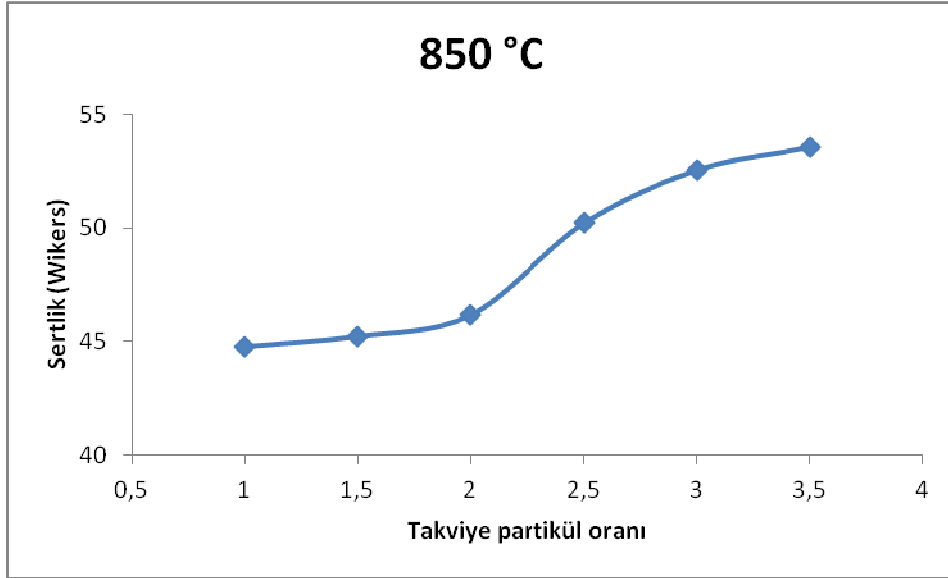
Şekil 4'te FeB oranının ve sıcaklığın yoğunluk değerlerine etkilerini gösteren grafik verilmiştir. Grafiklerden artan FeB oranının yoğunluk değerlerini azalttığı anlaşılmaktadır. Artan sinterleme sıcaklığı ise yoğunluk değerlerini arttırıcı rol oynamıştır. Bununla birlikte, artan sinterleme sıcaklığı FeB oranının artışına bağlı olarak azalan yoğunluk değerlerinde artmasına neden olmuştur. Zira 800 °C sinterleme sıcaklığında FeB ilave edilmeyen numunelerin yoğunluk değerleri ile % 3.5 FeB ilave edilen numunelerin yoğunluk değerleri arasında %5.4 fark oluşmuşken 900 °C sıcaklıkta bu fark % 3.6 olmuştur. Artan sıcaklık, atomların aktivasyon enerjilerini arttıracığından atomların komşu atomlardan koparak yeni alanlara yönelmesi kolaylaşacaktır. Bu nedenle artan sinterleme sıcaklığının Cu partikülleri arasında daha fazla difüzyona sebep olacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda gözenekler birleşerek daha düşük enerji seviyesi konumuna geçtikleri sonucu değerlendirilmiştir. Bu durum Xu ve diğ. [10], Rahimian ve diğ [11], Kim [12] tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır.



Şekil 4. FeB oranına bağlı yoğunluk değişim grafiği.

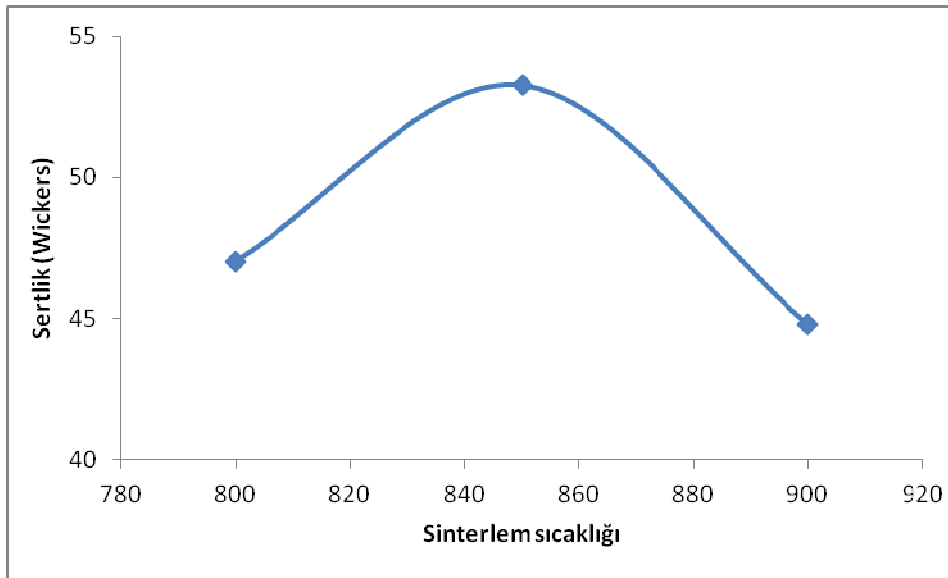
Şekil 5'te verilen 850 °C'de sinterlenen takviye partikül oranına bağlı olarak sertlik değişim grafiği incelendiğinde, % 2 FeB takviye partikülü oranına kadar numune sertlik değerlerinde kayda değer bir değişimin gözlenmediği % 2 nin üzerindeki takviye partikül ilavesinde sertlik oranının önemli oranda arttığı görülmektedir. FeB partikül oranının artması ile sertlik değerinin artması beklenen bir sonuçtur. Bu durumu destekleyen çalışmalar Arık [13], Rahimian vd. [10]. tarafından literatürde belirtilmiştir. FeB partiküller sertliklerinin ana matrisden yüksek olmasının yanı sıra bakır matris yapısında da gerilimlere sebep olduğu düşünülmektedir. En yüksek sertlik değerinin %3.5 FeB ilaveli malzemede olduğu görülürken, esas itibarı ile %2 FeB ilave partikülden %3 FeB ilave partikül oranına kadar yüksek bir artışın olduğu, görülmektedir. Turhan [14], yaptığı çalışmada, demirin bir miktar matris içinde çözüldüğünü ve sertlik değerinde artışa sebep olduğunu ifade etmiştir.





Şekil 5. FeB oranına bağlı sertlik değişimi grafiği.

%1 FeB takviyeli MMC malzemelerin 800 °C'de yapılan sinterleme sıcaklığında ortalama sertlik değeri yaklaşık 47 HV, 850 °C'deki yaklaşık ortalama sertlik değeri 53 HV iken 900 °C'deki yaklaşık ortalama sertlik değeri 45 HV olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6). 800 °C'den 850 °C'a kadar olan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış olurken, 850 °C'den 900 °C'ye yükselen sinterleme sıcaklığında sertlik değeri önemli oranda azalma olmuştur. Bunun sebebi olarak, sinterleme sıcaklığı nedeniyle mikroyapıda oluşan intermetalikler gösterilebilir. Takviye partikülü çevresinde bulunan poroziteler ve difüzyon etkisi ile ortaya çıkan yeni intermetalikler ve silisyum tabanlı muhtemel kovalent bağlı bileşiklerin artması sonucu, takviye partikülü ana yapı içinde daha fazla dağılım göstererek sertlik değerinde bir miktar düşme gerçekleştirdiği düşünülmektedir.

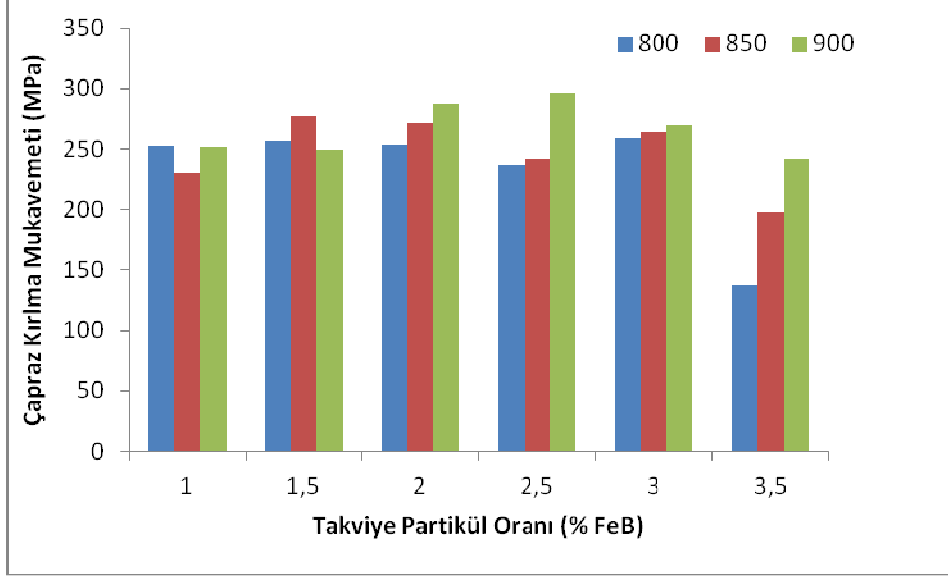


Şekil 6. FeB oranına bağlı sertlik değişimi grafiği.

Çapraz kırılma deneyi sonucunda numunelerin kırılma enerjileri MPa cinsinden bileşim oranına bağlı olarak şekilde verilmiştir. 800-850-900 °C sıcaklıklarda sinterlenerek sınıflandırılan numunelerin kırılma enerjileri incelendiğinde yapı içerisinde FeB



oranının artışıyla %2 bileşim oranında maksimum çapraz kırılma dayanımının gözlemlendiği görülmektedir. Ayrıca genel olarak takviye partikül oranının artışı ile dayanımın düştüğü tespit edilmiştir. Gruplandırılan numuneler içerisinde en yüksek çapraz kırılma mukavemeti 900 °C sıcaklıkta sinterlenen numunelerde gözlenmiş, bu numuneler içerisinde bileşim oranına bağlı mukavemet değerleri incelendiğinde %2.5 FeB içeren numunelerin en iyi mukavemet değerlerini verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 7. FeB miktarına bağlı çapraz kırılma mukavemeti eğrisi.

Genel olarak çapraz kırılma dayanımları incelendiğinde sinterleme sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık artışıyla birlikte çapraz kırılma dayanımların da arttığı gözlenmiştir. Bu durumu artan sıcaklıkla birlikte toz partiküllerinin yüzey gerilimlerinin düşeceği ve ıslatma kabiliyetinin artacağı ve daha kuvvetli arayüzey bağlarının oluşacağı düşünülmektedir. Bu durumda Çapraz kırılma mukavemeti artışının sebebi, artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte toz partikülleri arasında gelişen boyun çapının (X) toz partikül çapına (D) oranı (X/D) nin artışı olarak oluşmuş parçacıklar arası yük transferinin daha rahat gelişmesi olarak düşünülmüştür [10]. Buna benzer sonuçlara Arık [13], da ulaşmıştır.

#### 4. Sonuçlar

- Cu matris içerisinde takviye partikülü artışı yoğunluk değerlerini düşürmüştür.
- En iyi yoğunluk değerleri %2 ile %2.5 FeB oranına sahip numunelerde ve 900 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.
- Sinterleme sıcaklığı etkisi ile değişim gösteren matris arayüzey difüzyon ve geçişleri tespit edilmiş, artan sinterleme sıcaklığının matris takviye partikülü arasındaki mikro boşlukların azalmasına neden olmuştur.
- Takviye partikülü oranı artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde kaydedilen düşme eğilimi, porozitelerin takviye partikülü çevresinde toplanmalarına bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir. Takviye partikülü matris arayüzeyinde kalan poroziteler sinterleme işlemi esnasında yapıdan uzaklaşmadıklarından, porozitelerin takviye partikülleri çevresinde toplandığını mikroyapı fotoğrafları açıkça göstermektedir.

- FeB oranı arttıkça kırılma enerjisinin düştüğü açıkça görülmektedir. Bu grup içinde FeB oranları %1-1.5-2-2.5-3-3.5 olarak belirlenmiş ferrobör oranına göre en iyi sonucu %2.5 ferrobör oranına sahip numune vermiştir.
- Kırılma enerjisi, için numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde optimum değeri 900 °C derecede sinterlenmiş numune vermektedir.

## Kaynaklar

- [1] Meriç, C., Atik, E. ve Türüdü, T., Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 2, 4, 1-11, (2005).
- [2] Bolay, K. A., Microstructural study of hot pressed pm aluminum-copper and aluminum-copper-siliconcarbide composites, M. Sc. Thesis, METU, Ankara, (1998).
- [3] Somunkıran, İ. ve Çelik, H., Demir esaslı molibden, nikel, bakır katkılı toz metal alaşımlarının mekanik özelliklerine bakır oranının etkisi, **2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı**, 729-736, Ankara, (1999).
- [4] Öveçoğlu, M. L. Toz metalürjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler, **9. Uluslararası Metalürji Ve Malzeme Kongresi**, 449-475, İstanbul, (1997).
- [5] Yılmaz, R. ve Özyürek, D., Toz metalürjisi ile üretilen Fe-Cu-C esaslı malzemelerin aşınma özellikleri, **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, Karabük, (2009).
- [6] Gething, B. A., Heaney, D. F., Koss, D. A. and Mueller, T.J., The effect of nickel on the mechanical behavior of molybdenum P/M steels, **Materials Science and Engineering**, 390, 19-26, (2005) .
- [7] Davala, A. B., Graham, A. H. and Causton, R. J., Application of high performance materials and processes-alloy systems, **International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials**, Nevada USA, (1998).
- [8] Xiong, X., Sheng, H. C., Chen, J. and Yao, P. P., Effects of sintering pressure and temperature on microstructure and tribological characteristic of Cu-based aircraft brake material, **Trans. Nonferrous Met. Soc. of China**. 17, 669-675. (2007),
- [9] Tjong, S. C. and Lau, K. C., Tribological behaviour of SiC particle-reinforced copper matrix composites, **Materials Letters**, 43, 274-280, (2000).
- [10] Xu, X., Lu, P. and German R. M., Densification and strength evolution in solid-state sintering, **Journal of Materials Science**, 37, 117-126, (2002).
- [11] Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N. and Baharvandi, H. Z., The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, made by powder metalurgy, **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 5387-5393, (2009).
- [12] Kim, T. W., Determination of densification behavior of Al-SiC metal matrix composite during consolidation processes, **Materials Science and Engineering**, 483-484, 648-651, (2008).
- [13] Arık, H., Effect of mechanical alloying process on mechanical properties of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforced aluminum-based composite materials, **Materials and Design**, 26, 1856-1861, (2008).

- [14] Turhan, H. and Özel, S., Properties of Cu/Fe-Mn and Cu/Fe-Cr Metal Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy, **Materials Testing**, 51,3, 141-146, (2009).