



# Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilen Cu-Cr Alaşımlarının Sertlik ve Elektriksel İletkenlik Özellikleri Üzerine Mekanik Alaşımlama Süresinin Etkisi

*The Effect of Mechanical Alloying Time on the Hardness and Electrical Conductivity Properties of Cu-Cr Alloys Produced by Hot Pressing Method*

Hamza Çolak , Serhatcan Berk Akçay , Temel Varol\* , Onur Güler , Hüseyin Can Aksa

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

## Öz

Yapılan bu çalışmada ağırlıkça %0,5 krom takviyeli bakır partiküllerin mekanik alaşımlama yöntemi ile farklı alaşımlama süreleri kullanılarak alaşımlandırılması ve üretilen tozların sıcak pres yöntemiyle yoğunlaştırılması çalışmaları yer almaktadır. Mekanik alaşımlama parametreleri olarak 10:1 bilye:toz oranı, 400 dev/dk dönüş hızı seçilmiştir süreler ise değişken olarak 0, 0,5, 1, 2 ve 4 saat olacak şekilde belirlenmiştir. Sıcak presleme parametreleri tüm deneylerde sabit olarak kullanılmıştır ve 500 °C ve 600 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde başlangıçta küresel ve düzensiz morfolojiye sahip tozların 0,5 saat mekanik alaşımlama işlemi sonrasında pulsu benzeri morfolojiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda en yüksek spesifik yüzey alanı 1 saat mekanik alaşımlama işlemi neticesinde elde edilmiştir ve 0,0667 m<sup>2</sup>/g olarak ölçülmüştür. Bu çalışma kapsamında üretilen kompakt numunelerin en düşük ve en yüksek sertlik değerleri sırasıyla mekanik alaşımlama işlemi uygulanmamış ve 1 saat mekanik alaşımlama işlemine tabii tutulmuş numunelere aittir ve 71,97 HB ve 99,12 HB olarak ölçülmüştür. En yüksek elektriksel iletkenlik değeri de 4 saat mekanik alaşımlama işlemine tabii tutulmuş numuneye aittir ve 91,27 %IACS olarak ölçülmüştür. Yapılan bu çalışma ile mekanik alaşımlama işlem parametrelerinden biri olan sürenin parçacıkların morfolojisi ve boyutu ile kompakt malzemenin mikroyapısı ve fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bakır, Krom, Mekanik alaşımlama, Sıcak presleme, Toz metalurjisi

## Abstract

This study concentrated on alloying 0.5% chromium reinforced copper particles by weight by mechanical alloying method according to different alloying times and intensifying the produced powders by hot press method. 10:1 ball:powder ratio and 400 rpm rotation speed were selected as mechanical alloying parameters and the times were determined as 0, 0.5, 1, 2 and 4 hours as variable. Hot pressing parameters were used as constant in all experiments and were determined as 500 °C and 600 MPa. As a result of the experiments, it was determined that the powders with initially spherical and irregular morphology had a flake-like morphology after 0.5 hours of mechanical alloying. In addition, as a result of the experiments, the highest specific surface area was obtained after 1 hour of mechanical alloying and was measured as 0.0667 m<sup>2</sup>/g. The lowest and highest hardness values of the compact samples produced within the scope of this study belong to the samples that were not mechanically alloyed and subjected to 1 hour mechanical alloying, respectively, and were measured as 71.97 HB and 99.12 HB. The highest electrical conductivity value belongs to the sample subjected to mechanical alloying process for 4 hours and it was measured as 91.27% IACS. In this study, the effects of time, which is one of the mechanical alloying process parameters, on the morphology and size of the particles, the microstructure and physical and mechanical properties of the compact material were determined.

**Keywords:** Copper, Chromium, Mechanical alloying, Hot-pressing, Powder metallurgy

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [tvarol@ktu.edu.tr](mailto:tvarol@ktu.edu.tr)

Hamza Çolak [orcid.org/0000-0002-3032-5370](https://orcid.org/0000-0002-3032-5370)

Serhatcan Berk Akçay [orcid.org/0000-0002-7492-4287](https://orcid.org/0000-0002-7492-4287)

Temel Varol [orcid.org/0000-0002-1159-5383](https://orcid.org/0000-0002-1159-5383)

Onur Güler [orcid.org/0000-0002-9696-3287](https://orcid.org/0000-0002-9696-3287)

Hüseyin Can Aksa [orcid.org/0000-0001-9086-6526](https://orcid.org/0000-0001-9086-6526)



Bu eser "Creative Commons Atıf-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

## 1. Giriş

İletken malzemeler elektrik devresini tamamlamaya ya da kesmeye yarayan, termal enerjinin iletimini sağlayan malzemeler olarak kullanılmaktadırlar (Holm 1981). İletken malzemelerin ana amacı, elektriksel ya da termal iletkenliğin kesintisiz bir şekilde sürdürülebilmesini sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda iletken malzemeler, radyo ve veri iletişimi, telekomünikasyon sistemleri, otomotiv sektörü ve uzay ve havacılık gibi birçok sektörde yaygın bir kullanıma sahiptir (Braunovic vd. 2017).

İletken malzemelerin seçimi iletkenliğin sürekliliğinin sağlanması açısından önemli bir husustur. Malzemelerin seçiminde, malzemenin elektriksel ve termal iletkenliği, oksidasyon direnci, mekanik özellikleri ve ekonomikliği göz önüne alınması gereken parametrelerdendir (Chapman 2015). İletken malzemelerde öncelikli olarak, elektriksel ve termal iletkenliğinin yüksek olması beklenmektedir. Gerekli olan bu elektriksel ve termal iletkenlik özelliğinin sağlanması ile iletken malzemeler, devrenin tamamlanmasındaki köprü görevini verimli bir şekilde yerine getirebilecektir (Rooy ve Linden 1990, Güler ve Evin 2009, Slade 2017). İletken malzemeler karşılaştırıldığında en yüksek elektriksel iletkenliğin 106 %IACS (Uluslararası tavlı bakır standardı) değeri ile gümüşte (Ag) olduğu görülmektedir. Ancak gümüş yüksek maliyetli bir metal olduğu için kullanımı sınırlanmaktadır. İkinci en yüksek elektriksel iletkenliğe sahip iletken malzeme ise 100 %IACS ile bakırdır (Cu) (Mesina vd. 2002). Bakırın elektriksel iletkenliğinin iyi olması ve nispeten maliyetinin daha düşük olması nedeniyle iletken malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektriksel iletkenlikte olduğu gibi, gümüşün termal iletkenlik değerinden sonra (419 W/mK) metaller arasında en yüksek termal iletkenlik değerini (394 W/mK) sağlaması bakırın kullanımının önünü açan diğer bir parametredir (Gale ve Totemeier 2003, Varol vd. 2021a).

İletken malzemeler çalışma sırasında sürekli aç-kapa hareketlerine maruz kalmakta ve kullanım sırasında oluşan dirençten dolayı ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle zamanla oksitlenme meydana gelmektedir (Çanakçı vd. 2014). Bu durum elektriksel ve termal iletkenlikte azalmaya, direnç oluşumu ve bunu takiben ısı artışına ve bölgesel kopmalara neden olmaktadır (Chapman 2015). Bu bağlamda, iletken malzeme olarak sıklıkla kullanılan, ancak bazı uygulamalarda yetersiz kalan bakırın da olumlu özelliklerinin yanı sıra oksidasyon direnci ve sertlik gibi geliştirilebilecek özellikleri mevcuttur (Neikov vd. 2019). Bu nedenle, şimdiye kadar birçok araştırmacı bakıra ikinci bir faz elemanı (Sn, Zn, Si,

Cr, Ni, Al, vs.) ilave ederek bakırın mekanik özelliklerini ve oksidasyon direncini iyileştirmeye çalışmıştır (Gao vd. 2003, Zhao vd. 2014, Shkodich vd. 2014, Patra ve Mondal 2014).

Bu alaşım elementleri içerisinde kromun (Cr) varlığı malzemenin mekanik özelliğini iyileştirir ve bakıra belirli oranlarda krom ilavesi ile yüksek sertlik, elektriksel iletkenlik ve termal iletkenliğe sahip Cu-Cr alaşımları elde edilir (Lahiri ve Bhargava 2009). Ancak geleneksel yöntemlerle üretim sürecinde kromun bakır içerisinde oldukça sınırlı ve yavaş çözünmesi, yoğunluk farkından dolayı bakır ile kromun karışma zorluğu ve yüksek sıcaklık nedeniyle çevreyle kimyasal reaksiyon oluşumu gibi olumsuzluklar mevcuttur (Shen vd. 2018, Baksan vd. 2020). Bu nedenle birçok çalışma geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak aşırı doymuş katı çözelti hazırlamanın mümkün olduğu mekanik alaşımlama (MA) ile üretim yöntemine odaklanmıştır (Lahiri ve Bhargava 2009, Zhao vd. 2014, Fang ve Kang 2015, Neikov vd. 2019).

MA, metal tozunun öğütülmesini, kaynaklanmasını ve bu sürecin tekrarlanmasını içeren katı hal toz üretimi için kullanımı yaygın olan bir tekniktir. Bakır ve krom tozları, bu teknik kullanılarak atomik boyutta birleştirilebilmektedir (Suryanarayana 2001). Üstün performansla sahip Cu-Cr alaşım tozları, öğütme bilyelerinin boyutu, öğütme süresi ve bilye-toz kütle oranı gibi MA'nın işlem parametrelerinin kontrol edilmesiyle üretilebilir (Lahiri ve Bhargava 2009, Zheng vd. 2009).

MA ile üretilen Cu-Cr alaşım tozlarının şekillendirilmesi için döküm, haddeleme, dövme ve toz metalurjisi ile şekillendirme gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında toz metalurjisi ile şekillendirme üstün özelliklere sahip yenilikçi malzemelerin üretilmesine olanak sağlaması nedeniyle tercih sebebi olmaktadır (Suryanarayana 2001, Varol vd. 2020). Toz metalurjisi ile şekillendirme yöntemleri arasında soğuk presleme, sinterleme ve sıcak presleme gibi yöntemler yer almaktadır. Sıcak presleme ile şekillendirme yöntemi literatür incelendiğinde ek bir sinterleme işlemine gerek duyulmadan istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerin üretilmesine olanak sağlaması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir (Varol vd. 2021b).

Literatür incelendiğinde MA yöntemi ile üretilen Cu-Cr alaşımlarının kimyasal kompozisyonu yüksek krom oranları içermektedir. Zhao ve diğerleri (2014), yapmış oldukları çalışmada ağırlıkça %25 Cr içeren Cu-Cr alaşımlarının 15:1 bilye:toz oranı ile 3 saat süre parametreleri ile MA yöntemiyle

üretimi üzerine çalışmalar yapmıştır. Fang ve Kang (2015) yapmış oldukları çalışmada ağırlıkça %8 Cr içeren Cu-Cr alaşımlarının üretimi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Ghorbani ve diğerleri (2018), yapmış oldukları çalışmada ağırlıkça %1 Cr ve %5 karbon nano tüp (CNT) içeren bakır alaşımı tozları MA yöntemi ile sentezlemişler ve bu tozları 25 °C, 300 °C ve 500 °C sıcaklıklarda ve 40 MPa, 80 MPa ve 120 MPa presleme basıncı altında sıcak presleme yöntemiyle kompakt hale getirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda artan presleme sıcaklığının sertlik değerini %65 oranında arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca bu çalışma kapsamında üretilen ağırlıkça %1 Cr içeriğine sahip alaşımların mikro sertlik değerlerinin artan presleme basıncı ve sıcaklığı ile arttığını ortaya koymuşlardır. Bu bağlamda yapılan bu çalışma ile düşük (%0,5 ağırlıkça) Cr içeriğine sahip Cu-Cr alaşımlarının MA yöntemiyle üretilmesinde MA süresinin etkilerini irdelenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca yapılan bu çalışmanın amacı, öğütme süresinin MA yöntemi ile üretilmiş olan, ağırlıkça %0,5 Cr içeren Cu-Cr alaşımı tozların sıcak pres yöntemi ile kompakt hale getirilmesi sonrasında düşük Cr takviye oranının ve MA işlemi süresinin üretilen kompakt malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerini araştırmaktır.

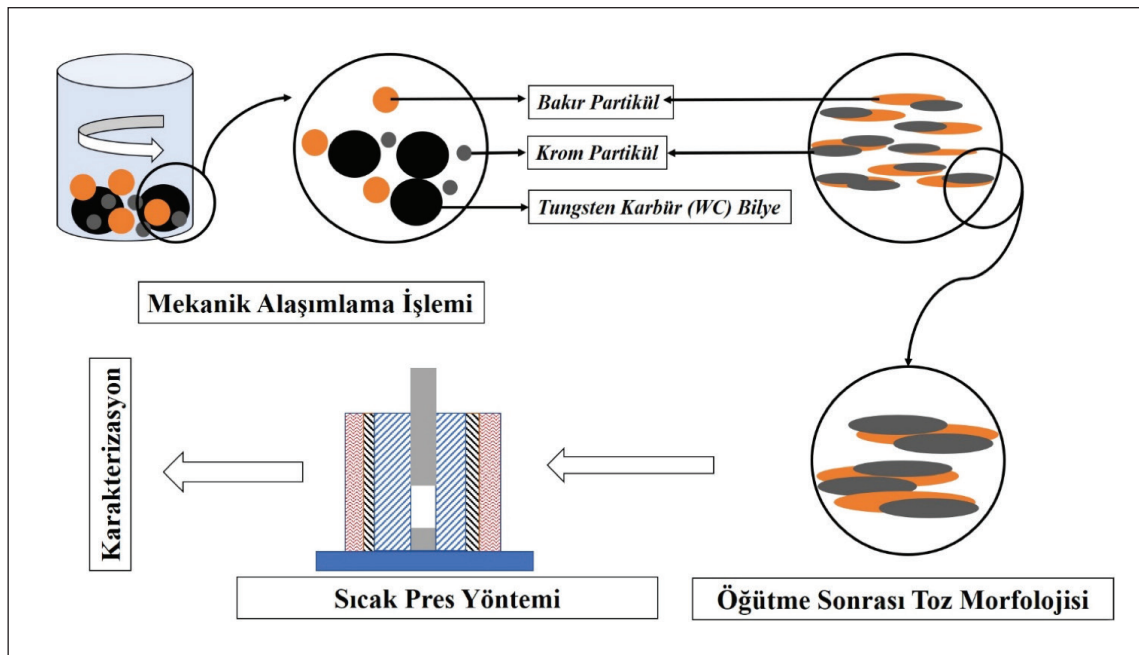
## 2. Gereç ve Yöntemler

Bu çalışma kapsamında kullanılan ortalama toz boyutu 68,55 µm olan küresel morfolojiye sahip bakır ve ortalama toz boyutu 39,75 µm olan düzensiz morfolojiye sahip

krom tozları (%99,9<saflık değeri) Nanografi, Ankara, Türkiye’den tedarik edilmiştir. Ayrıca, kullanılan kimyasal malzemeler analitik saflığa sahiptir (%99,9<saflık değeri) ve Merck Group, Almanya’dan tedarik edilmiştir. Şekil 1 bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların şematik gösterimini içermektedir.

MA işlemi Retsch marka PM200 model bilyeli öğütücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm deneylerde öğütme hızı 400 devir/dakika, bilye:toz ağırlık oranı 10:1 ve işlem kontrol takviyesi ağırlıkça %2 olarak seçilmiştir. MA işlemi için kullanılan deney parametreleri Çizelge 1’de gösterilmektedir. Çizelge 1 incelendiğinde, bu çalışma kapsamında 0, 0,5, 1, 2, 4 saat olmak üzere beş farklı öğütme süresinin kullanıldığı açıkça görülmektedir.

MA işlemi ile üretilen Cu-Cr alaşımı tozların yoğunlaştırılması ve kompakt hale getirilmesi için sıcak presleme yöntemi ile üretim gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme yöntemi metalik tozların sinterleme sıcaklığında basınç altında belirli bir kalıp içerisinde sıkıştırılması olarak tanımlanabilir. Bu yöntem ile hem üstün fiziksel ve mekanik özellikler elde edilmekte hem de ham presleme sonrasında gerçekleştirilecek sinterleme işlemi için gereken süreden tasarruf edilmektedir. Ayrıca, literatür incelendiğinde sıcak presleme yöntemi ile gerçekleştirilen üretim sonrasında parçacıklar arasında yüksek kenetlenme ve düşük gözeneklilik oranı tespit edildiği anlaşılmaktadır (Schubert vd. 2008, Çanakçı ve Varol 2014). Yapılan tüm sıcak presleme işlemine ait deney para-



Şekil 1. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmaların şematik gösterimi.

**Çizelge 1.** MA işlem parametreleri.

| Deney Kodu  | Cu<br>(%ağırlıkça) | Cr<br>(%ağırlıkça) | Öğütme Hızı<br>(devir/dakika) | Öğütme Süresi<br>(saat) | İşlem Kontrol Parametresi<br>(% ağırlıkça) |
|-------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| Cu0,5Cr0s   | 99,50              | 0,5                | 400                           | 0                       | 2                                          |
| Cu0,5Cr0,5s | 99,50              | 0,5                | 400                           | 0,5                     | 2                                          |
| Cu0,5Cr1s   | 99,50              | 0,5                | 400                           | 1                       | 2                                          |
| Cu0,5Cr2s   | 99,50              | 0,5                | 400                           | 2                       | 2                                          |
| Cu0,5Cr4s   | 99,50              | 0,5                | 400                           | 4                       | 2                                          |

metreleri Çizelge 2’de gösterilmektedir. Çizelge 2 incelendiğinde, tüm deneylerde kullanılan sıcaklık, presleme basıncı ve presleme süresi parametreleri görülmektedir. Literatür incelendiğinde bakır ve bakır esaslı malzemelerin sıcak pres yöntemiyle üretiminde 500 °C presleme sıcaklığı ve 600 MPa presleme basıncı ile elde edilen sonuçların üstün olduğu görülmektedir (Varol vd. 2021b). Bu nedenle yapılan bu çalışmada sıcak presleme parametreleri 500 °C ve 600 MPa olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 2.** Sıcak presleme işlem parametreleri.

| Deney Kodu  | Sıcaklık<br>(°C) | Basıncı<br>(MPa) | Süre<br>(saat) |
|-------------|------------------|------------------|----------------|
| Cu0,5Cr0s   | 500              | 600              | 2              |
| Cu0,5Cr0,5s | 500              | 600              | 2              |
| Cu0,5Cr1s   | 500              | 600              | 2              |
| Cu0,5Cr2s   | 500              | 600              | 2              |
| Cu0,5Cr4s   | 500              | 600              | 2              |

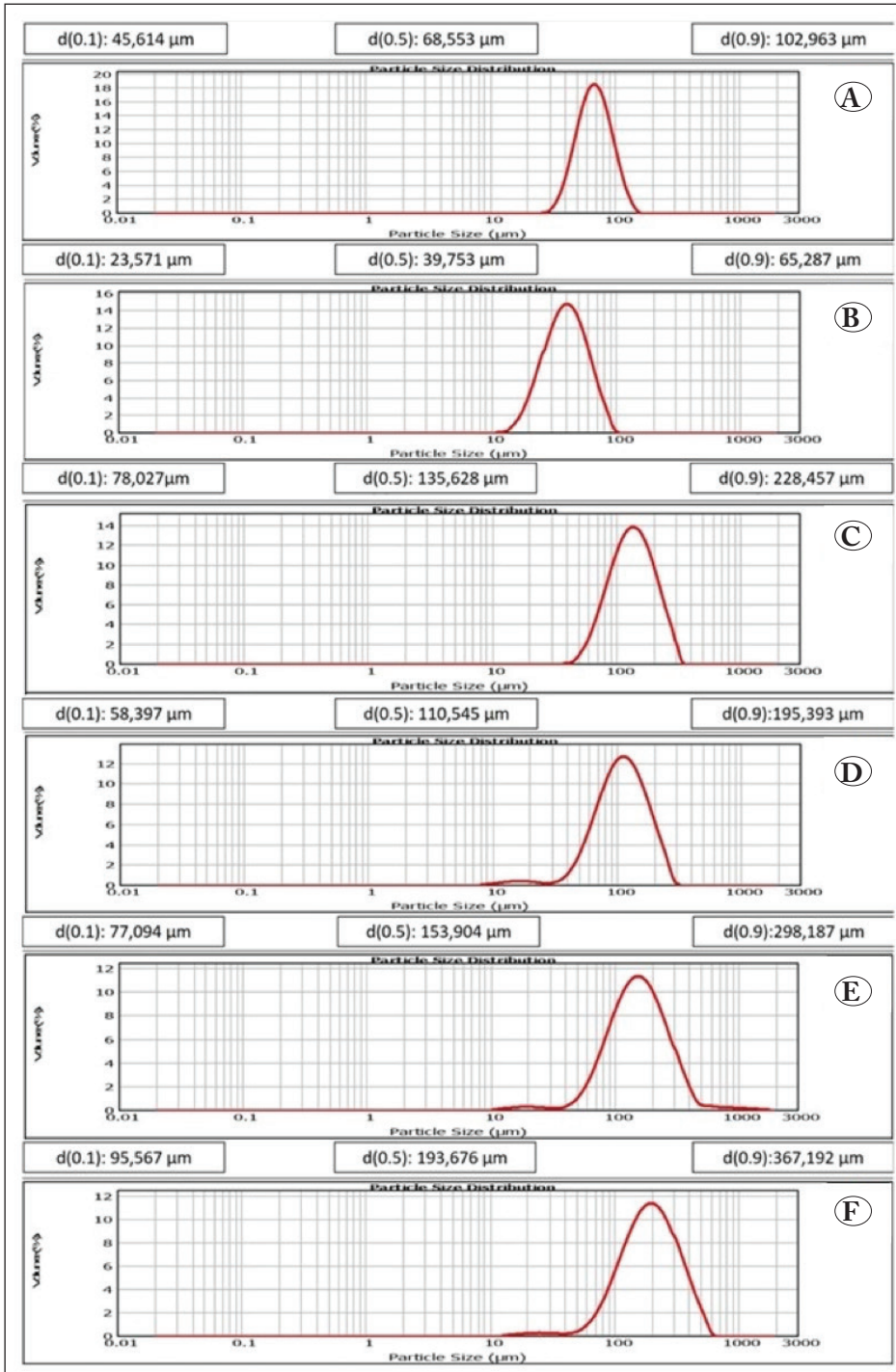
Bu çalışma kapsamında üretimi yapılan Cu-Cr alaşımı tozların ve kompakt malzemelerin malzeme karakterizasyonu deneyleri; partikül boyutu tayini deneylerinin gerçekleştirilmesi için MasterSizer 2000 model partikül boyut ölçüm cihazı, morfoloji ve mikroyapı incelemeleri için Zeiss Evo LS10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM), elementel analizlerin gerçekleştirilmesi için elementel haritalama deneylerinde AZtecOne system EDS elementel analiz cihazı, sertlik ölçümlerinin yapılabilmesi için NEMESIS 9000 model Brinell sertlik ölçüm cihazı ve elektriksel iletkenlik ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için Fischer marka SIGMASCOPE® SMP10 model masaüstü taşınabilir problu elektriksel iletkenlik ölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ve elektriksel iletkenlik ölçümü deneylerinin sonuçları, her bir numune için üç farklı noktadan üçer kez gerçekleştirilmiş olup elde edilen değerlerin aritmetik ortalamalarının alınması ile belirlenmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

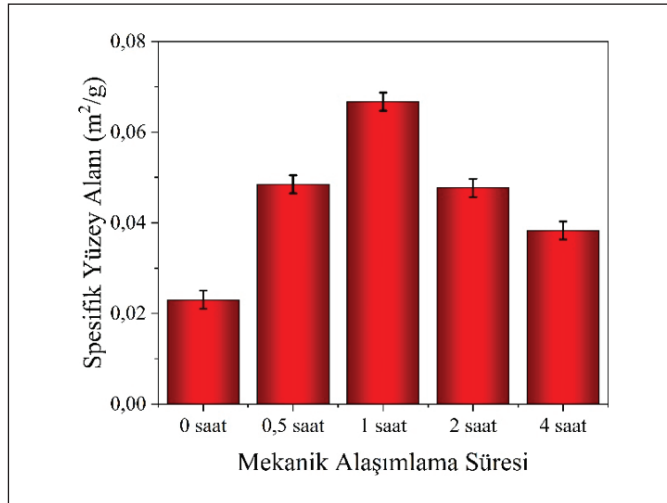
Partikül boyut ölçüm deneyleri MA işlemi uygulanmamış bakır ve krom, ağırlıkça %0,5 Cr takviyeli olarak 0, 0,5, 1, 2 ve 4 saat MA işlemi ile üretilen Cu-Cr alaşım tozları için gerçekleştirilmiştir. Partikül boyutu ölçüm deneyleri MasterSizer 2000 model partikül boyut tayin cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, bakır tozunun (Şekil 2A) başlangıçta 68,55 µm ve krom tozunun (Şekil 2B) başlangıçta 39,753 µm olduğu görülmektedir. Farklı öğütme süreleri için %0,5 Cr takviyeli Cu-Cr alaşımı tozların toz boyutu ölçümleri 0,5, 1, 2 ve 4 saat için sırasıyla Şekil 2C-F arasında gösterilmiştir. Bakırın sünek bir malzeme olması nedeniyle gevrek bilyeler ile öğütülmesi işlemi sırasında süre bağlı olarak yassılaşma, kırılma ve tekrar yassılaşma olayları gerçekleşmektedir (Zuo vd. 2009, Guerrero 2014, Wang vd. 2019). Bu bağlamda ilk olarak Şekil 2C ile gösterilmekte olan, 0,5 saat süren öğütme işlemi sonrasında gerçekleştirilen partikül boyut ölçümü sonucunun bakır ve krom tozlarının başlangıçtaki partikül boyutlarının çok daha üzerinde bir partikül boyutuna sahip olduğu (135,628 µm) açıkça görülmektedir. Mekanik öğütme işlem süresinin artmasıyla birlikte 1 saatlik öğütme işlemi neticesinde (Şekil 2D) 0,5 saatlik öğütme sonrasında elde edilen partikül boyutundan daha küçük ortalama partikül boyutu (110,545 µm) ölçümü mevcuttur. Bu durum yassılaşmış partiküllerin kırılıp tekrar yassılaşmaya başlaması ile açıklanabilir. Öğütme süresinin 2 ve 4 saat olarak seçildiği deneyler sonucunda yapılan ölçümler gittikçe artan bir partikül boyutu olduğunu göstermektedir (Şekil 2E, F). Şekil 3, MA işlemi sonrasında farklı süreler ile üretilen Cu-Cr tozların spesifik yüzey alanlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekil 3 incelendiğinde başlangıçtaki spesifik yüzey alanının 1 saatlik MA işlemine kadar artış gösterdiği ve sonrasında düşmeye başladığı görülmektedir. Spesifik yüzey alanı ölçümleri 0, 0,5, 1, 2 ve 4 saat MA alaşımlama işlemi sonrasında sırasıyla 0,023, 0,0485,

0,0667, 0,0477, 0,0383 m<sup>2</sup>/g olarak ölçülmüştür. Bu durum yüksek bilye:toz oranı ve yüksek MA süresinin sünek bakır parçacıkların soğuk kaynaklanması sonrasında partikül boyutlarının artması ve spesifik yüzey alanlarının da buna bağlı olarak azalması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca literatürde yapılan benzer bir çalışmanın sonucunda da benzer bulgular ile karşılaşılmıştır (Güler vd. 2019).

%0,5 Krom takviyeli bakır tozların farklı sürelerde MA işlemi sonrasında elde edilen morfoloji görüntüleri ve elementel spektrum deney sonuçları Şekil 4-8'de görülmektedir. Şekil 4 incelendiğinde, başlangıç morfolojisi küresel olan bakır tozlar ve düzensiz olan krom tozlar görülmektedir. Şekil 4C elde edilen toz karışımının yapısında yalnızca Cu ve Cr elementlerinin gözlemlendiğini kanıtlamaktadır. Şekil 5 incelen-



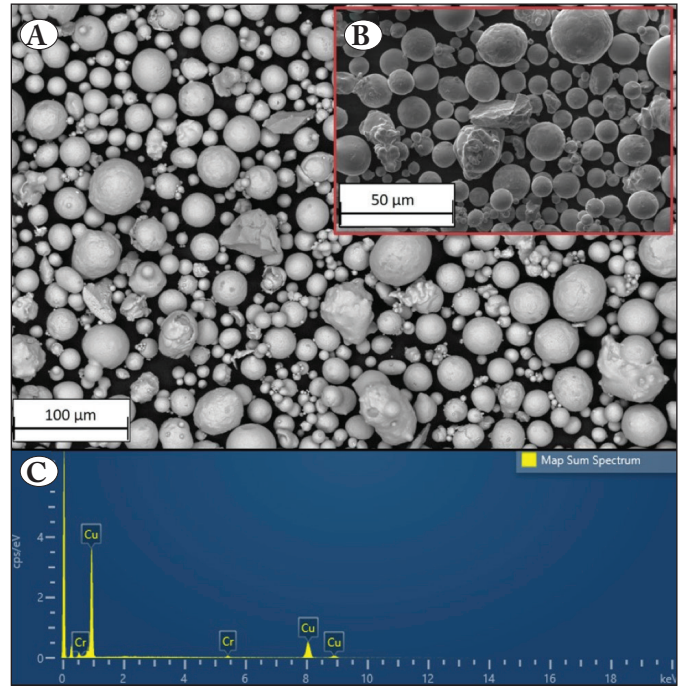
**Şekil 2.** Partikül boyut ölçümü deneyleri; bakır (A) ve krom (B) partiküller, Cu%0,5Cr takviyeli farklı öğütme sürelerinde mekanik alaşımlanmış Cu-Cr alaşım tozları; 0,5 saat (C), 1 saat (D), 2 saat (E) ve 4 saat (F).



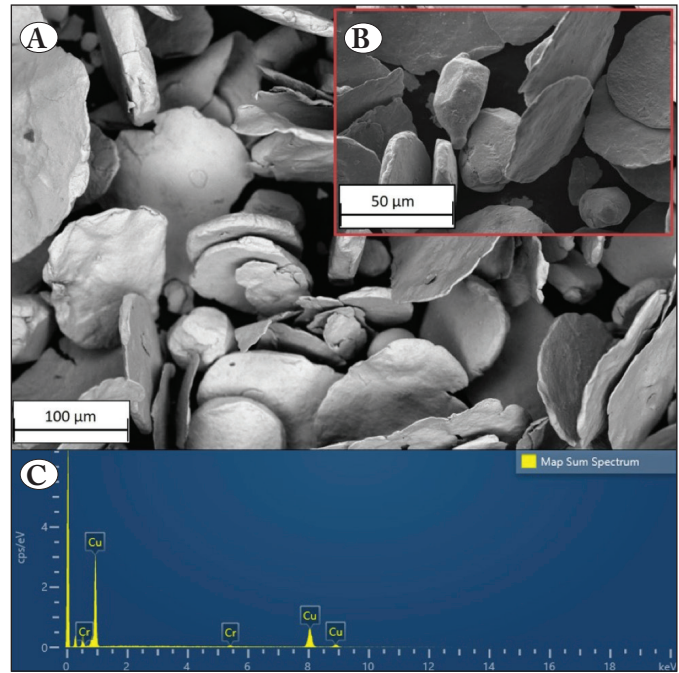
**Şekil 3.** Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen Cu-Cr tozların spesifik yüzey alanlarının kıyaslanması.

diğinde 0,5 saat MA işlemi sonrasında toz morfolojisinin pulsu benzeri morfoloji olarak değiştiği ve yapıda yalnızca Cu ve Cr elementlerinin varlığı (Şekil 5C) açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum bakırın sünek bir malzeme olması nedeniyle sert bilyeler ve bakırdan daha sert krom tozları ile çarpışması ile yassılaşması şeklinde açıklanabilir. Bu durum Şekil 6-8’de görüldüğü üzere artan mekanik alaşımlama süresi ile birlikte benzer olarak devam etmektedir. Böylece bu çalışmada irdelenen ve MA işlem parametrelerinden biri olan sürenin üretilen tozların morfolojisi üzerindeki etkisi net bir şekilde ortaya konulmuştur. Şekil 4-8 incelendiğinde bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerin elementel spektrum analizleri sonucunda yapıda yalnızca Cu ve Cr varlığı tespit edilmiştir. Spektrum deney sonuçlarının tümünde Cu elementine ait pik şiddetlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum bu çalışma kapsamında üretilen Cu-Cr alaşımlarının kimyasal kompozisyonu dikkate alındığında (ağırlıkça %99,5 Cu ve %0,5 Cr) Cu elementine göre oldukça düşük bileşime sahip Cr içeriğinden kaynaklanmaktadır.

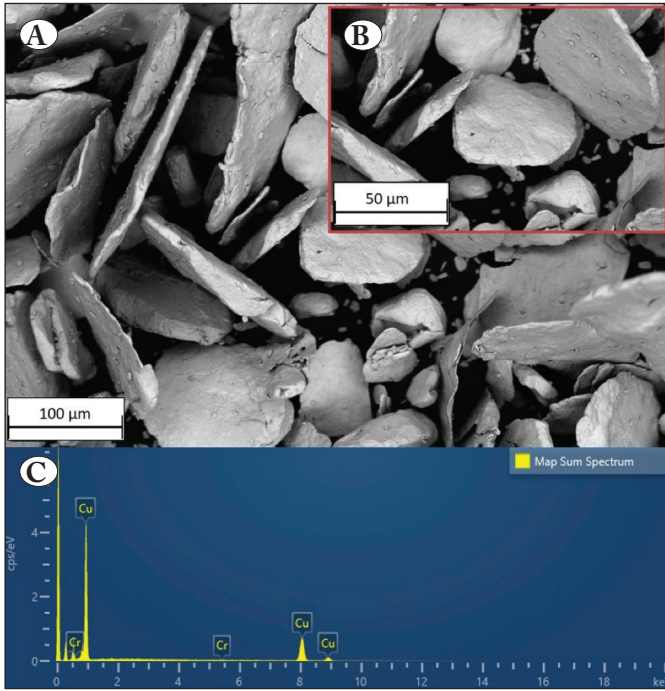
MA yöntemi ile farklı alaşımlama sürelerinde üretilen tozlar 500 °C sıcaklık ve 600 MPa presleme basıncı altında sıcak presleme işlemi ile yoğunlaştırılmışlardır. Yoğunlaştırma işlemi sonrasında elde edilen kompakt numunelere ait mikroyapı incelemeleri Şekil 9 -13 arasında gösterilmektedir. Şekil 9 incelendiğinde 0 saat MA sonrasında elde edilen Cu-Cr tozlar kullanılarak üretilmiş olan kompakt numunenin mikroyapısı görülmektedir. Artan MA süresi ile birlikte mikroyapı incelemelerinde tane sınırlarının düzensiz olarak dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durum pulsu benzeri morfoloji ile açıklanabilir.



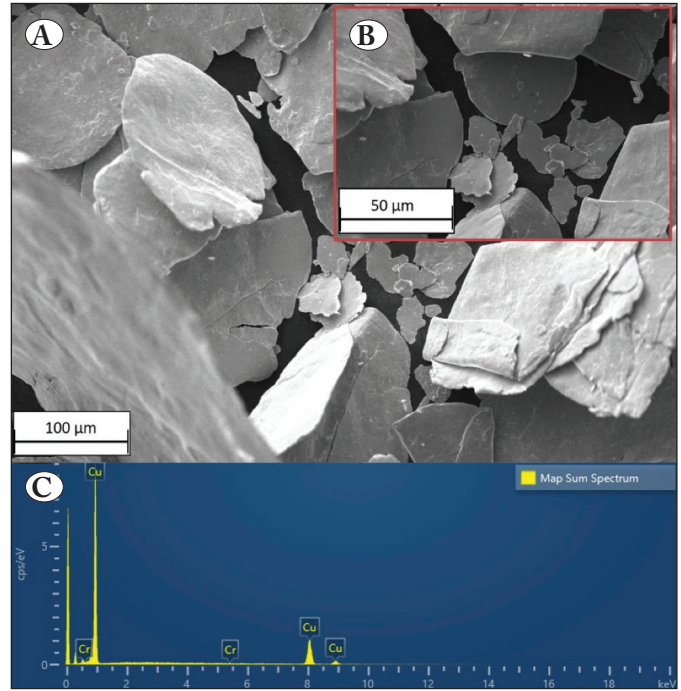
**Şekil 4.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>0s</sub> kodlu numuneye ait tozların SEM kullanılarak yapılan morfoloji incelemeleri; 500X (A), 1000X (B) ve elementel spektrum deney grafiği (C).



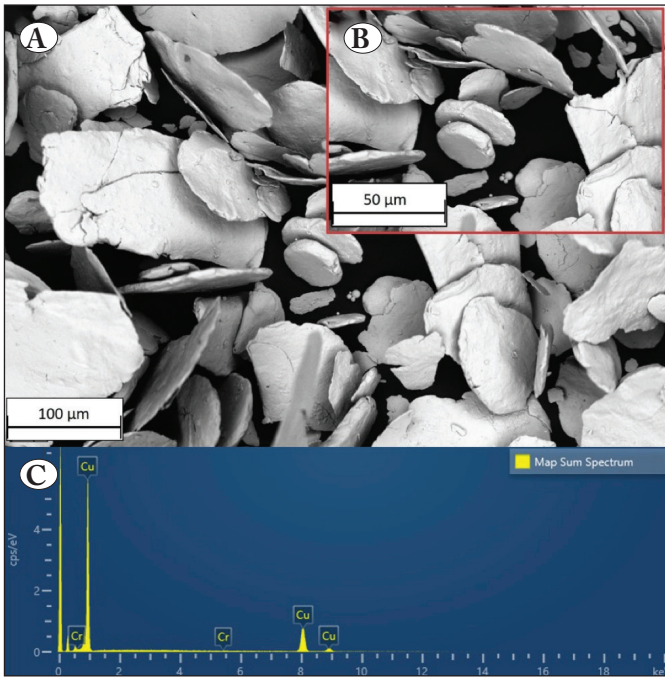
**Şekil 5.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>0,5s</sub> kodlu numuneye ait tozların SEM kullanılarak yapılan morfoloji incelemeleri; 500X (A), 1000X (B) ve elementel spektrum deney grafiği (C).



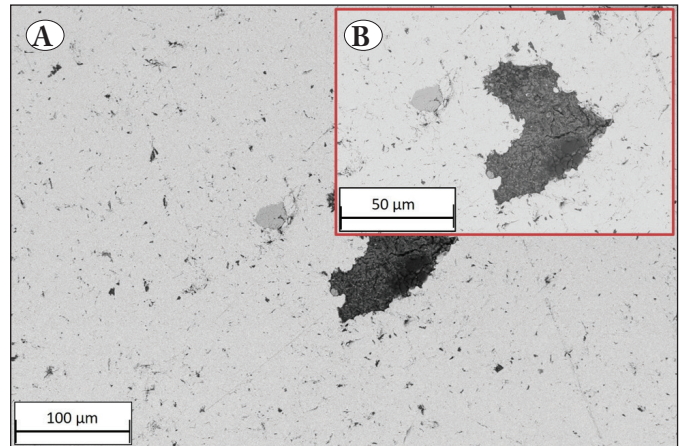
Şekil 6. Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>1s</sub> kodlu numuneye ait tozların SEM kullanılarak yapılan morfoloji incelemeleri; 500X (A), 1000X (B) ve elementel spektrum deney grafiği (C).



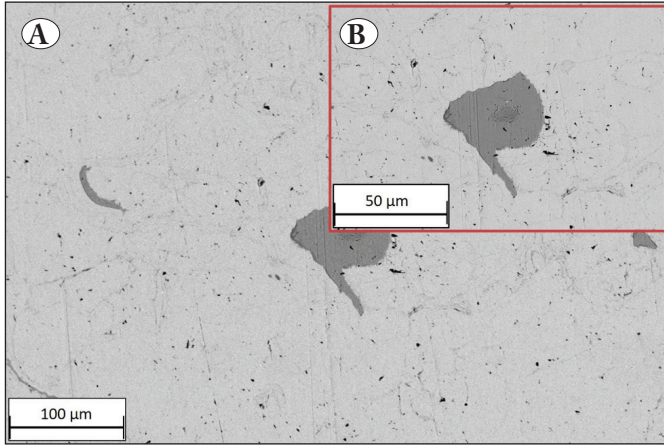
Şekil 8. Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>4s</sub> kodlu numuneye ait tozların SEM kullanılarak yapılan morfoloji incelemeleri; 500X (A), 1000X (B) ve elementel spektrum deney grafiği (C).



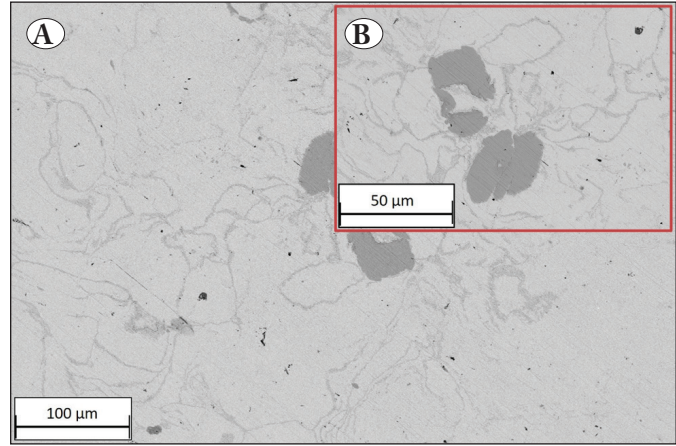
Şekil 7. Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>2s</sub> kodlu numuneye ait tozların SEM kullanılarak yapılan morfoloji incelemeleri; 500X (A), 1000X (B) ve elementel spektrum deney grafiği (C).



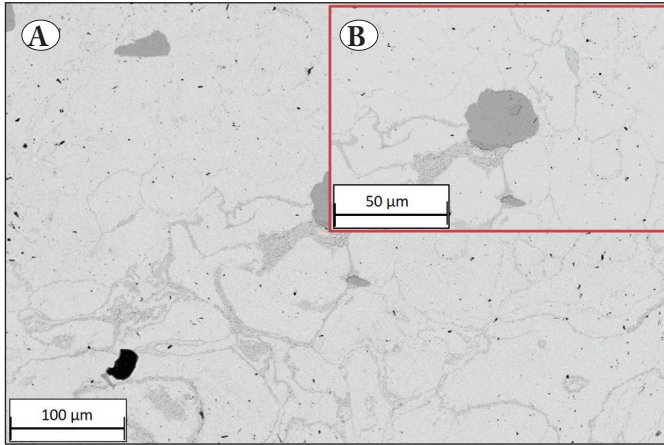
Şekil 9. Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>0s</sub> kodlu numuneye ait kompakt numunenin SEM kullanılarak yapılan mikroyapı incelemeleri; 500X (A) ve 1000X (B).



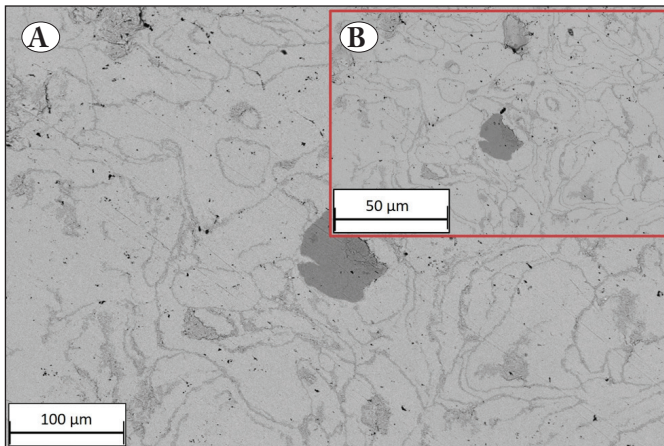
**Şekil 10.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>0,5</sub>s kodlu numuneye ait kompakt numunenin SEM kullanılarak yapılan mikroyapı incelemeleri; 500X (A) ve 1000X (B).



**Şekil 13.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>4</sub>s kodlu numuneye ait kompakt numunenin SEM kullanılarak yapılan mikroyapı incelemeleri; 500X (A) ve 1000X (B).



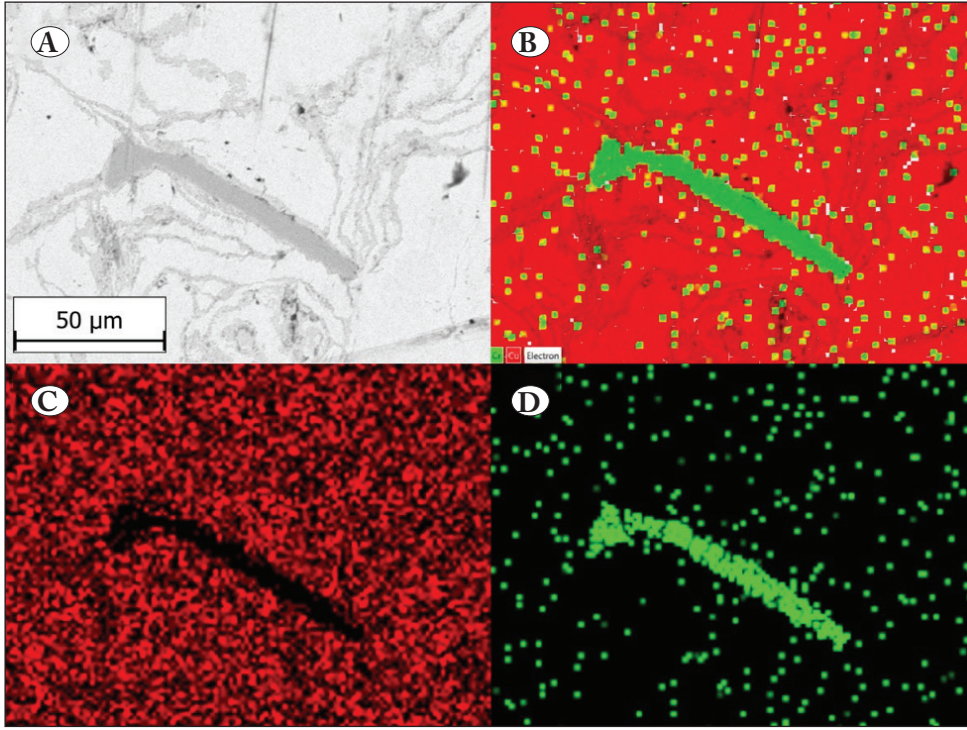
**Şekil 11.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>1</sub>s kodlu numuneye ait kompakt numunenin SEM kullanılarak yapılan mikroyapı incelemeleri; 500X (A) ve 1000X (B).



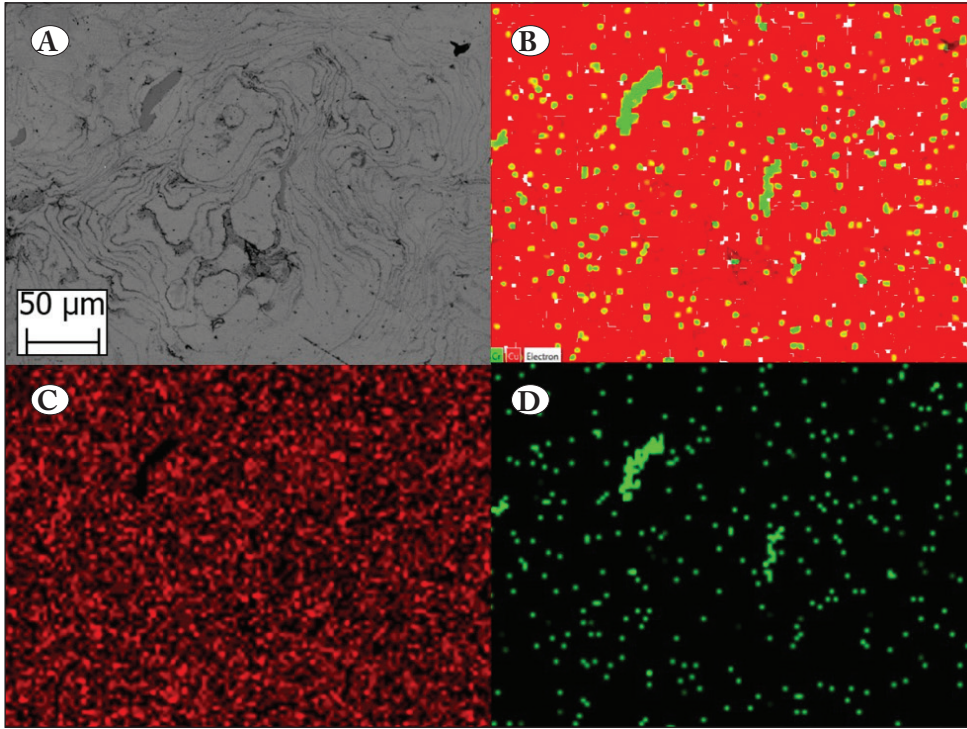
**Şekil 12.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>2</sub>s kodlu numuneye ait kompakt numunenin SEM kullanılarak yapılan mikroyapı incelemeleri; 500X (A) ve 1000X (B).

MA yöntemi ile 1 saat ve 4 saat alaşımlama süreleri ile üretilmiş olan kompakt numunelere ait mikroyapı ve elementel haritalama görüntüleri sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15’de gösterilmektedir. Elementel haritalama görüntüleri incelendiğinde sıcak presleme işlemi sonrasında yapıda yalnızca Cu ve Cr elementlerinin bulunduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

Üretimi yapılan kompakt numunelere ait sertlik ve elektriksel iletkenlik deneylerinin sonuçları sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17’te gösterilmektedir. Literatür incelendiğinde ağırlıkça %0,7 Cr oranına sahip Cu-Cr alaşımlarının yaşlandırma ve eş kanallı açısız ekstrüzyon (EKAP) işlemine tabii tutulması sonrasında elde edilen mikro sertlik değerlerinin yaşlandırma için 450 °C, EKAP için 500 °C üretim sıcaklığında en üstün değerleri gösterdiği, yaşlandırma işlemi için yaklaşık 1,7 GPa ( $\cong$  173,3 HV) ve EKAP için yaklaşık 1,5 GPa ( $\cong$  153 HV), anlaşılmaktadır (Bochvar vd. 2019). Literatürde yer alan başka bir çalışmada ağırlıkça %0,4 Cr ve %0,3 Zr içeren bakır alaşımlarının vakum indüksiyon yöntemi ile üretilmesi sonrasında elde edilen sertlik değeri yaklaşık olarak 115 HV ( $\cong$  110HB) olarak ölçülmüştür (Meng vd. 2019). Shen ve diğerleri (2018) yapmış oldukları çalışmada, ağırlıkça %0,57 Cr içeren bakır alaşımının %20 oranında soğuk şekillendirme sonrasında yaklaşık olarak 140 HV ( $\cong$  133 HB) sertlik değerine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Görüldüğü gibi 1 saat öğütme süresine kadar elde edilen numunelerin sertlik değerlerinde yaklaşık %50’lik artış gözlenirken, öğütmenin ilerleyen saatlerinde (4 saate kadar) düşüş eğiliminin meydana geldiği belirlenmiştir. İlerleyen öğütme saatlerinde sünek yapılı bakır tozları içerisinde sert krom parçacıkların batarak bakır tarafından çevrenmesi,



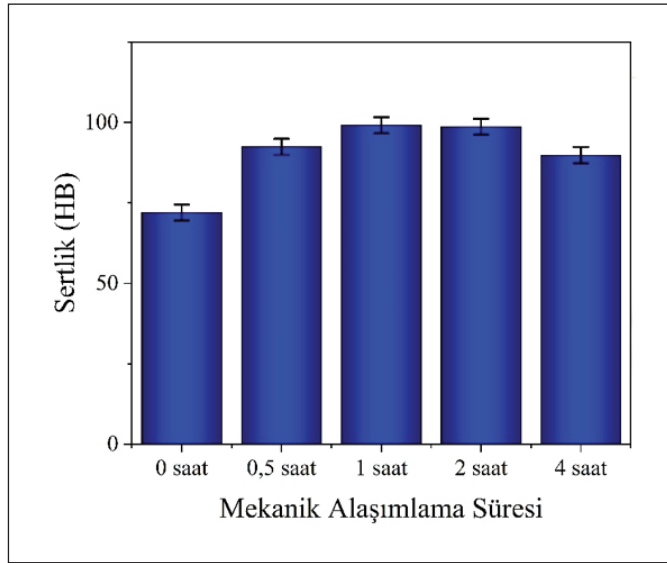
**Şekil 14.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>1s</sub> kodlu numuneye ait kompakt elementel analiz deney sonuçları; SEM görüntüsü (A), Cu ve Cr elementel haritalama (B), Cu elementel haritalama (C) ve Cr elementel haritalama (D).



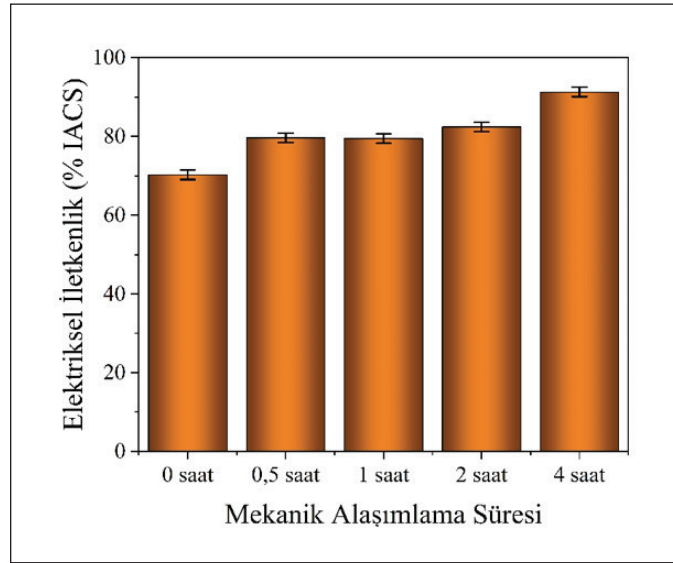
**Şekil 15.** Cu<sub>0,5</sub>Cr<sub>4s</sub> kodlu numuneye ait kompakt elementel analiz deney sonuçları; SEM görüntüsü (A), Cu ve Cr elementel haritalama (B), Cu elementel haritalama (C) ve Cr elementel haritalama (D).

mikroyapı içerisinde homojen olmayan bir dağılıma sebebiyet verebilmektedir. Öğütmenin ilerleyen saatlerinde bakır içeriğini gösteren EDS piklerindeki şiddet bu durumu destekler niteliktedir (Şekil 4-8). Mekanik öğütmenin 1 saate kadar uygulandığı durumda sert krom parçacıklarının ve öğütme sırasında soğuk kaynaklanma-kırılma mekaniz-

malarının etkisi ile kesme etkisi sayesinde homojen bir yapı eldesi sertlik değerlerinde önemli ölçüde artış sağlamıştır. Ayrıca MA ile birlikte tozlar üzerinde mikro çıkıntılar meydana gelmekte ve bu mikro çıkıntılar yüzey alanını arttırmaktadır. Bahsi geçen bu mikro çıkıntılar sıcak presleme sırasında uygulanan basınç ile birlikte birbirlerine kenetlen-



**Şekil 16.** Sıcak presleme yöntemiyle kompakt hale getirilmiş deney numunelerine ait sertlik deneyi sonuçları.



**Şekil 17.** Sıcak presleme yöntemiyle kompakt hale getirilmiş deney numunelerine ait elektriksel iletkenlik deneyi sonuçları.

mektedir ve böylece bu durum gözenekliliğin azalması ile sonuçlanmaktadır. Benzer şekilde sert parçacıkların öğütme sırasında gerçekleştirdiği kesme etkisi literatürde belirtilmiştir (Güler vd. 2019, Güler vd. 2021).

Şekil 15'ten anlaşıldığı gibi, öğütme süresinin 4 saat olmasına kadar malzemelerin elektriksel iletkenlik değerlerinde sürekli bir artış görülmüştür. Mekanik öğütme uygulanmayan numunelerde belirlenen elektriksel iletkenlik değeri yaklaşık 70 %IACS olarak belirlenirken, 4 saat öğütme sonucu elde edilen numunelerde bu değer yaklaşık 90 %IACS olarak tespit edilmiştir. Öğütme süresinin artması ile, daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi parçacıkların ince ve daha pulsu hale gelmesi toz boyutunun giderek artmasına neden olmaktadır. Sıcak presleme sonucu elde edilen nihai ürünlerin mikroyapısında daha yüksek boyutlu ve pulsu parçacıkların yüksek enerjili tane sınırı sayısında azalmaya neden olması, diğer bir deyişle tanelerin daha büyük hale gelmesi, iletkenliği sağlayan elektronların daha rahat hareket etmesine neden olduğundan, elektriksel iletkenlik değerlerinde artış gözlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda başlangıçta ortalama partikül boyutu sırasıyla 68,55  $\mu\text{m}$  ve 39,75  $\mu\text{m}$  olarak ölçülen bakır ve krom tozlarının, %0,5 krom takviyeli olarak hazırlanması ve 0,5 saat MA işlemi sonrasında ortalama partikül boyutu 135,628  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. En yüksek MA süresi olarak belirlenen 4 saat sonrasında ise bu tozların ortalama partikül boyutu 193.676  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Yapılan MA işlemleri sonrasında Cu-Cr partiküllere ait

spesifik yüzey alanı değerleri 1 saatlik MA süresine kadar artmakta ve sonrasında azalmıştır. MA uygulanmadan elde edilen numunelerin spesifik yüzey alanı 0,023  $\text{m}^2/\text{g}$ , 1 saat MA işlemi sonrasında 0,0667  $\text{m}^2/\text{g}$  ve 4 saat MA işlemi sonrasında 0,0383  $\text{m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir. Sıcak presleme işlemi sonrasında elde edilen numunelere ait sertlik değerleri artan öğütme süresine bağlı olarak artış eğiliminde olmakla birlikte en yüksek spesifik yüzey alanı değerine sahip 1 saatlik MA işlemi ile üretilmiş Cu%0,5Cr1s kodlu numunenin sertlik değeri 99,12 HB olmuştur. 2 ve 4 saatlik MA sonrasında üretilen numunelerde ise sırasıyla 98,65 ve 89,8 HB olacak şekilde azalış eğilimindedir. Bu durum spesifik yüzey alanının azalması ile açıklanabilir. En düşük elektriksel iletkenlik değeri Cu%0,5Cr0s kodlu numuneye ait olmakla birlikte bu değer 70,27 %IACS olarak ölçülmüştür. En yüksek elektriksel iletkenlik değeri (91,27 %IACS) ise Cu%0,5Cr4s kodlu numuneye aittir. Yapılan bu çalışma neticesinde parçacık boyutu ve spesifik yüzey alanının MA yönteminin işlem parametrelerinden biri olan süre ile doğrudan etkilendiği ve buna bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklere de etki ettiği anlaşılmaktadır. Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlara dayanarak MA parametrelerinin sıcak presleme ile üretilen Cu-Cr alaşımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerine doğrudan etki ettiği açıkça görülmüştür. Bu yüzden, bilye:toz oranı, devir sayısı, işlem kontrol katkısı gibi MA parametrelerinin değiştirilerek yeni tür Cu-Cr alaşımlarının geliştirilmesi sağlanabilir. Ayrıca, basınç, sıcaklık gibi sıcak presleme parametrelerinin etkisi

de detaylıca araştırılabilir. Elde edilen alaşımların aşınma özellikleri de araştırılarak kromun alaşımların aşınma mekanizmaları üzerine etkisi belirlenebilir.

#### 4. Teşekkür

Bu çalışmanın yazarlarından Hamza ÇOLAK, Yükseköğretim Kurulu tarafından desteklenen 100/2000 YÖK programında doktora bursiyeri olarak desteklenmektedir. Yazarlar, desteklerinden dolayı Yükseköğretim Kurulu 100/2000 YÖK programına teşekkür eder.

#### 5. Kaynaklar

- Baksan, B., Celikyurek, I., Torun, O. 2020. Secondary Aging Effects in Copper-Chromium Alloy. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 2020, *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 11:154-158, Antalya. Erişim: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/epstem/issue/58065/838204>
- Bochvar N.R., Rybalchenko O.V., Shangina D.V., Dobatkin S.V. 2019. Effect of equal-channel angular pressing on the precipitation kinetics in Cu-Cr-Hf alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 757:84-87. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.073>.
- Braunovic, M., Konchits, V.V., & Myshkin, N.K. 2007. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. 1. Baskı, CRC Press, Boca Raton, 672 pp. <https://doi.org/10.1201/9780849391088>.
- Canakci, A., Varol, T. 2014. Microstructure and properties of AA7075/Al-SiC composites fabricated using powder metallurgy and hot pressing. *Powder Technol.*, 268:72-79. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.016>.
- Chapman, D. 2015. Copper in Electrical Contacts, Copper Development Association Publication No:223, 4-20. Erişim: <http://copperalliance.org.uk/uploads/2018/02/tn-23-copper-in-electrical-contacts-pdf.pdf>
- Çanakçı, A., Çuvalcı, H., Varol, T., Erdemir, F., Özkaya, S., Yalçın E.D. 2014. Microstructure and Abrasive Wear Behavior of CuSn10-Graphite Composites Produced by Powder Metallurgy. *Powder Metall. Met. Ceram.* 53:275-287. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9614-2>.
- Fang, Q. ve Kang, Z. 2015. An investigation on morphology and structure of Cu-Cr alloy powders prepared by mechanical milling and alloying. *Powder Technol.*, 270:104-111. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.010>
- Gale, W.F. ve Totemeier, T.C. 2003. Smithells metals reference book. 8. Edition, Elsevier, 2080 pp.
- Gao, N., Huttunen-Saarivirta, E., Tiainen, T. ve Hemmilä, M. 2003. Influence of prior deformation on the age hardening of a phosphorus-containing Cu-0.61wt.%Cr alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 342,1:270-278. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00306-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00306-4)
- Ghorbani A., Sheibani S., Ataie A. 2018. Microstructure and mechanical properties of consolidated Cu-Cr-CNT nanocomposite prepared via powder metallurgy. *J. Alloys Compd.*, 732:818-827. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.282>.
- Guerrero-Paz, J. 2014. Ductile Powders Mechanically Alloyed in an Effective Way. *Adv Mat Res.*, 976:119-123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.976.119>
- Güler, Ö. ve Evin, E. 2009. The investigation of contact performance of oxide reinforced copper composite via mechanical alloying. *J. Mater. Process. Technol.*, 209,3, 1286-1290. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.034>
- Güler, O., Varol, T., Alver, Ü., Çanakçı, A. 2019. The effect of flake-like morphology on the coating properties of silver coated copper particles fabricated by electroless plating. *J. Alloy Compd.*, 782:679-688. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.229>.
- Güler, O., Varol, T., Alver, Ü., Kaya, G., Yıldız, F. 2021. Microstructure and wear characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced silver coated copper matrix composites by electroless plating and hot pressing methods. *Mater. Today Commun.*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102205>.
- Holm, R. 1981. Electric contacts: theory and application. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06688-1>
- Lahiri, I. ve Bhargava, S. 2009. Compaction and sintering response of mechanically alloyed Cu-Cr powder, *Powder Technol.*, 189,3:433-438. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.07.003>
- Meng A., Nie J., Wei K., Kang H., Liu Z., Zhao Y. 2019. Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of a Cu-Cr-Zr alloy by cold rolling and aging treatment. *Vacuum*, 167:329-335. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.027>.
- Mesina, M., de Jong, T., Kattentidt, H. ve Dalmijn, W. 2002. Non-ferrous metals characterisation and identification using an electromagnetic sensor, Proc. R'02 congress; recovery recycling re-integration, Geneva, Switzerland, pp. 335-340.
- Neikov, O.D., Naboychenko, S.S. ve Murashova, I.B. 2019. Handbook of Non-Ferrous Metal Powders (Second Edition), Chapter 19 - Production of Copper and Copper Alloy Powders, O.D. Neikov, S.S. Naboychenko, and N.A. Yefimov editors, Elsevier, Oxford, pp. 571-614. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-422-0.00016-1>
- Patra, S. ve Mondal, K. 2014. Densification behavior of mechanically milled Cu-8 at% Cr alloy and its mechanical and electrical properties. *Prog. Nat. Sci.*, 24,6:608-622. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.10.006>
- Rooy, E. ve Linden. 1990. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. In: ASM Metals Handbook. Ohio, pp. 2372-2373.

- Schubert Th., Trindade B., Weißgärber T., Kieback B. 2008.** Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. *Mater. Sci. Eng. A*, Volume 475(1-2):39-44. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.146>.
- Shen, D., Zhu, Y.J., Yang, X. ve Tong, W.P. 2018.** Investigation on the microstructure and properties of Cu-Cr alloy prepared by in-situ synthesis method. *Vacuum*, 149:207-213. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.035>
- Shkodich, N., Rogachev, A., Vadchenko, S., Moskovskikh, D., Sachkova, N., Rouvimov, S., Mukasyan. 2014.** Bulk Cu-Cr nanocomposites by high-energy ball milling and spark plasma sintering. *J. Alloy. Compd.*, 617:39-46. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.133>
- Slade, P.G. 2017.** Electrical contacts: principles and applications, CRC press, pp. 794-835.
- Suryanarayana, C. 2001.** Mechanical alloying and milling. *Prog. Mater. Sci.*, 46,1-2:1-184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Varol, T., Aksa, H. C. ve Güler, O. 2020.** Katmanlı Parçacıklar Kullanılarak Üretilen Bakır Esaslı Malzemelerin Karakterizasyonu . *K.F.B.D.* , 10 (2):346-359. <https://doi.org/10.31466/kfbd.777263>
- Varol, T.(a), Akçay, S. , Güler, O. 2021.** Akımsız kaplama yöntemi ile Cu-Ag bimetal parçacıkların üretimi ve karakterizasyonu. *GUFBED*, 11:586-596. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.770725>
- Varol, T.(b), Güler, O., Akçay, S.B. ve Aksa, H.C. 2021.** The effect of silver coated copper particle content on the properties of novel Cu-Ag alloys prepared by hot pressing method. *Powder Technol.*, 384:236-246. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.020>
- Wang, J., Wu, S., Suo, X.-K., and Liao, H. 2019.** Chapter 2 - The Processes for Fabricating Nanopowders. In *Micro and Nano Technologies*, G.-J. Yang and X. Suo [eds.], *Advanced Nanomaterials and Coatings by Thermal Spray*. pp.13-25. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813870-0.00002-4>
- Zhao, Q., Shao, Z., Liu, C.J., Jiang, M.F., Li, X., Zevenhoven, R., and Saxen, H. 2014.** Preparation of Cu-Cr alloy powder by mechanical alloying. *J. Alloy. Compd.*, 607:118-124. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.04.054>.
- Zheng, Z., Li, X.-j., Gang, T. ve Du, C.-X. 2009.** CuCr bulk alloy produced by mechanical alloying and explosive compaction. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 19:626-629. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60121-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60121-5)
- Zuo, K., XI, S., & Zhou, J. 2009.** Effect of temperature on mechanical alloying of Cu-Zn and Cu-Cr system. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 19(5): 1206-1214. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(08\)60430-6](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(08)60430-6)