



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Farklı Basınç Oranlarında Ham Pelet Haline Dönüştürülen Al-15Cu Alaşımının Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Mustafa DOĞAN^{a,*}, Uğur AVCI^b

^aMalzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, TÜRKİYE

^aMalzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mustafa4064@hotmail.com

DOI: 10.29130/dubited.985076

Öz

Bu çalışmada, toz metalürjisi tekniğinin en önemli aşamalarından biri olan ham pelet üretiminde uygulanan sıkıştırma basıncının, üretilen malzemenin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda, %99 saflığa sahip ortalama 44 µm boyutlarındaki Al ve Cu tozları kullanılarak, hafif olmasının yanı sıra dayanım bakımından etkili olan Al-15Cu alaşımı üretilmiştir. Mekanik olarak karıştırılan alaşım tozları, özel olarak tasarlanmış kalıp içerisine yerleştirilerek tek eksenli kuvvet uygulaması ile 350, 470 ve 600 MPa basınç altında ayrı ayrı sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi sonrasında ham pelet haline gelen üç farklı numune, tavlama fırınında 550 °C sıcaklıkta 45 dakika bekletilerek geleneksel sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretimi tamamlanan numunelerin mikro yapı, yoğunluk, mikro sertlik ve basma dayanımı özellikleri belirlenerek kendi aralarında kıyaslanmaları sağlanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, sıkıştırma basıncının artırılması ile numunelerin gözenek oranlarının azaldığı ve buna bağlı olarak deneysel yoğunluklarının arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak artan basınç oranının numunelerin mikro yapı özellikleri üzerinde değişime neden olduğu ve bu değişimin mikro sertlik (80→148 HV) ve basma dayanım değerlerinde (221→508 MPa) iyileşmeye neden olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde uygun basınç oranı ile ham pelet haline dönüştürülen numunelerin, geleneksel olarak sinterlenmesi günümüz teknolojisinde kullanıma uygun malzemelerin üretiminin gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalürjisi Yöntemi, Ham pelet, Al-Cu Alaşımları

Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Al-15Cu Alloy Converted to Green Compact with Different Pressure Ratios

ABSTRACT

In this study, the effects of the compression pressure applied in the production of green compact, which is one of the most important stages of the powder metallurgy technique, on the microstructure and mechanical properties of the produced material were investigated. In this context, Al-15Cu alloy, which is effective in terms of strength as well as being light, was produced by using Al and Cu powders with an average size of 44 µm with 99% purity. Mechanically mixed alloy powders were placed in a specially designed mold and compressed separately under 350, 470 and 600 MPa pressures with uniaxial force application. Three different samples, which became green compact after compaction, were subjected to conventional sintering process by keeping them in the annealing furnace at 550 °C for 45 minutes. The microstructure, density, microhardness and compressive strength properties of the manufactured samples were determined and compared among themselves. As a result of the evaluations, it was determined that the porosity ratios of the samples decreased and the experimental densities increased

1423

accordingly with the increase of the compression pressure. In addition, it was determined that the change in the microstructure properties of the samples with increasing pressure ratio caused an improvement in the microhardness (80→148HV) and compressive strength (221→508MPa) values. As a result of the results obtained, it was concluded that the conventional sintering of the samples, which were converted into green compact with the appropriate pressure ratio, could produce materials suitable for use in today's technology.

Keywords: Powder Metallurgy Technique, Green Compact, Al-Cu Alloys

I. GİRİŞ

Günümüzde toz metalürjisi (T/M) yöntemi, tasarım ve imalat özellikleri bakımından üretimi zor olan parçaların minimum tolerans değeri ile daha ekonomik halde üretilmesi işleminde kullanılan bir tekniktir. T/M yöntemi, imalatı planlanan malzemenin toz formuna getirilerek istenilen şekle dönüştürülmesine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların sıkıştırılması, belirlenen sıcaklık ve sürede sinterlenmesi ve çok az düzeyde çapak alma aşamalarından oluşan bir yöntemdir. Uygulama sırasında üretimi planlanan metalik alaşım tozlarının homojen olarak dağılımı sağlanarak, sinterlemenin etkisi ile daha rijit ve daha az gözenekli bir ürün elde edilmektedir [1], [2]. Çalışma koşullarına göre T/M yöntemi ile üretilen malzemelerin mukavemet, sertlik ve aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra, gözeneklilik ve yüzey hassasiyeti gibi fiziksel özelliklerinin istenilen düzeyde belirlenebilmesi, bu yöntemi esnek duruma getirmektedir [3].

Alüminyum ve alaşım tozlarının, düşük basınç ile şekillenebilirliğe, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına, yüksek elektrik ve ısı iletkenliklerinin yanı sıra iyi korozyon direncine sahip olmaları sayesinde, T/M yöntemi ile üretimlerde kullanımı oldukça yaygındır [4-7]. Özellikle hafif olması nedeniyle bir aracın ağırlığının 100 kg'a kadar hafifletilmesi mümkün olup, her 100km'de 0,3 - 0,4 litre arası yakıt tasarrufu sağlayabilmektedir [8]. Bu özelliklerinden dolayı Al otomotiv, uçak ve uzay endüstrisi başta olmak üzere birçok yapıda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat saf Al malzemenin yeterli mekanik özelliklere sahip olmaması birçok elementle alaşım haline getirilmesine neden olmuştur. Alüminyum içerisine değişen oranlarda Cu, Si, Mg, Nb, Ti gibi elementlerin ilave edilmesi ile elde edilen alaşımların mekanik özelliklerinde gelişmeler görüldüğü tespit edilmiştir [9], [10].

Cu esaslı malzemelerin yoğunluklarına göre dayanımlarının düşük olduğu bilinmektedir. Ancak alaşımlandırdıktan sonra yaşlandırma ile sertleştirilme kabiliyetinden dolayı, Al için birincil alaşım elementi olarak tercih edilmektedir. Ayrıca yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olan Cu elementinin, Al alaşımları üzerinde, dayanım ve fiziksel özellikler bakımından çok büyük etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu yüzden T/M yöntemi üzerinde yapılan çalışmalarda yaygın olarak Al-Cu alaşımları kullanılmıştır [11]. Bu çalışmada yüksek mukavemet ve fiziksel özelliklerin ön planda olması istenildiğinden Al-Cu alaşımı üzerinde durulacaktır.

Al-Cu alaşımlarının T/M yöntemi ile üretimi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Al içerisine %5 Cu ilavesine kadar alaşımın hem sertlik hem de aşınma direncinin çözelti sertleşmesi nedeniyle önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir [12]. Bunun yanı sıra Al-Cu alaşımlarında Cu içeriğinin %5'den fazla olması durumunda meydana gelen değişimleri inceleyen çalışmalarda bulunmaktadır. Geleneksel döküm yöntemi kullanılarak Cu içeriğinin artması ile Al-Cu alaşımlarında meydana gelen değişimleri inceleyen çalışmada, artan Cu içeriği ile alaşımların sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Sözü edilen çalışmada Al-15Cu, Al-33Cu ve Al-40Cu alaşımlarının mikro sertlik değerleri sırası ile 89, 193 ve 234 HV olarak belirlenmiştir [13]. T/M yöntemi kullanılarak 550°C sıcaklıkta 3 saat sinterleme yapılarak üretilen Al/Al-5-10-15Cu fonksiyonel dereceli malzeme üretimi üzerine yapılan çalışmada ise Cu içeriğinin artması ile Al₂Cu bileşiğinin oluşumunun arttığı belirlenmiştir [14].

Bilindiği gibi dayanım, süneklik ve iletkenlik gibi özellikler yoğunluğa yani gözeneklilik ve gözenek yapısına bağlıdır [15]. Bu nedenle T/M yöntemi ile üretilen numunelerin karakteristik özelliklerini etkileyen en önemli unsur sinterleme sonrası yoğunluk değerleridir. Yoğunluk değeri üzerinde yapılan çalışmada, Al ve Cu tozlarından üretilmiş olan (AA2014), elemental alaşım numunelerin sinterleme

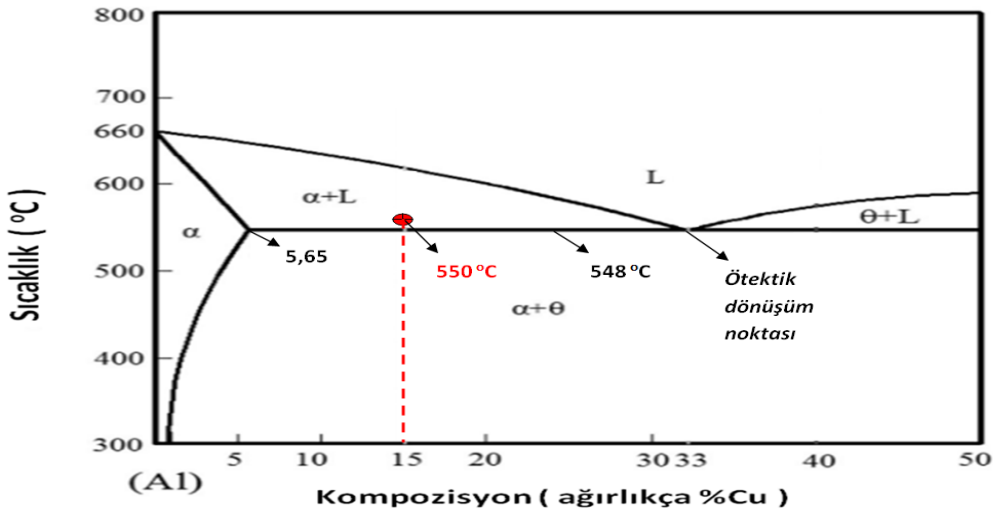
(600°C, 610°C, 620°C) sonrasında yoğunluklarının %3 ile %5 arasında arttığı gözlemlenmiştir [16]. Başka bir çalışmada ise Al-4Cu alaşım tozlarından üretilen malzemelerin sinterleme süresinin sertlik (HB) değerlerini etkilemediği, fakat eğme dayanımlarını değiştirdiği gözlemlenmiştir [17]. Bunun yanı sıra Al-4,5Cu-0,5Mg-0,7Si kullanarak elde edilen alaşım ile yapılan çalışmada, yoğunluk değerleri dikkate alınarak en uygun üretim parametrelerinin 400 MPa sıkıştırma basıncı ve 600°C sinterleme sıcaklığı ve 40 dk sinterleme süresi olduğu tespit edilmiştir [18].

Yoğunluğu etkileyen diğer bir unsur da sinterleme öncesi tozların sıkıştırılması işlemidir. Bu işlem için uygun sıkıştırma basıncı belirlenerek tozların kalıp içerisine düzgün bir şekilde paketlenmesi sağlanmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmada Al-4,5Cu alaşım tozlarından üretilen numuneler 200, 280 ve 350 MPa basınç altında sıkıştırdıktan sonra geleneksel sinterleme işlemine tabi tutulmuş ve basınç değerlerinin artmasıyla gözenek değerlerinin düştüğü kanıtlanmıştır [6]. Benzer bir çalışmada 400 MPa basınç altında preslenerek ham pelet hale getirilen Al-5Cu alaşımının, 590°C'de 1,5 saat nitrojen ortamında sinterlenmesi sonucu 50 HV sertlik değerine ulaşıldığı belirtilmiştir [8].

Yukarıda belirtilen özellikler göz önünde bulundurulduğunda, Al-Cu alaşımının farklı oranlarda sıkıştırılması ile elde edilen malzemelerin mikro yapı, mikro sertlik, yoğunluk ve basma dayanım değerlerinin araştırılması ve yapılan değerlendirmeler sayesinde T/M yöntemi kullanılarak daha verimli malzemelerin üretilmesine katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

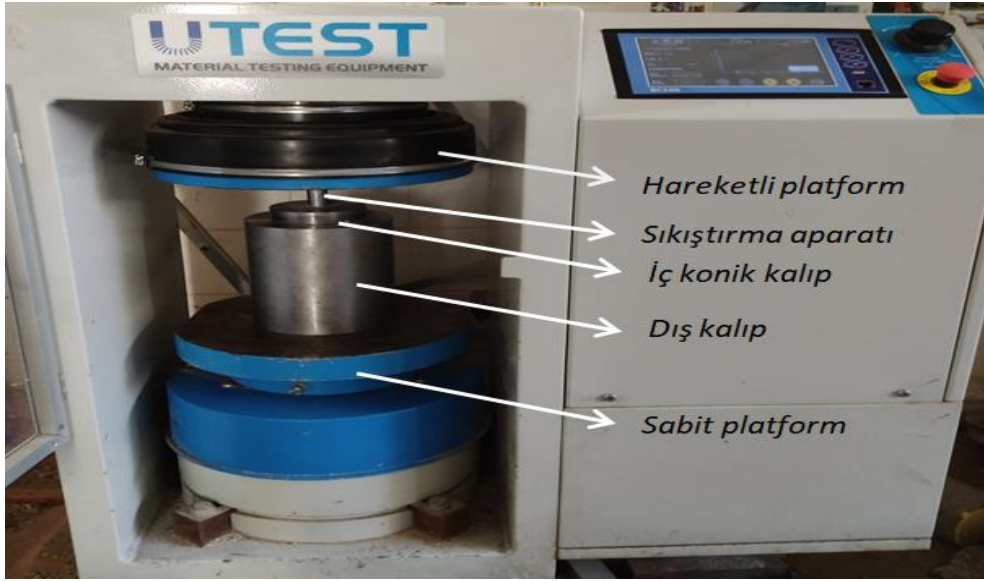
Bu çalışma, genel olarak ham pelet oluşturmak için uygulanan sıkıştırma basıncı oranının, T/M yöntemi ile üretilen Al-Cu alaşımının mikro yapı ve mekanik özelliklerindeki değişimi üzerine hazırlanmıştır. Bu nedenle, araştırmanın net bir şekilde yürütülebilmesi ve herhangi bir belirsizliğe yol açmaması için Al-Cu alaşımının Cu içeriği ve sinterleme sıcaklığı sabit bir değer olarak alınmıştır. Bu değerler belirlenirken Şekil 1'de gösterilen Al-Cu ikili faz diyagramından faydalanılmıştır. Diyagram incelendiğinde $\alpha \rightarrow (\text{Al}'\text{ce zengin faz})$ bölgesinin ağırlıkça maksimum %5,65 bakır içeriğini bünyesinde çözüldüğünü, Cu içeriğinin artması ile farklı sıcaklıklarda farklı faz oluşumlarının meydana geldiği görülmektedir. Kritik dönüşüm çizgisi olarak adlandırabileceğimiz 548 °C sıcaklıkta bulunan yatay çizgi takip edildiğinde, %33 bakır içeriğinde ötektik dönüşüm noktası ile karşılaşıldığı ve burada soğuma sırasında sıvı bölgeden iki ayrı katının oluştuğu bölgeye ($\alpha + \theta$) geçildiği gözlemlenmektedir. Bu noktanın sağ tarafında (ötektik üstü bölge) kritik dönüşüm çizgisinin üstünde kalan alan ($\theta (\text{Al}_2\text{Cu}) + \text{L}$) incelendiğinde, Cu elementinin belirli miktarda katı olarak bulunduğu faz görülmektedir. Sol tarafında (ötektik altı bölge) kritik dönüşüm çizgisinin üstünde kalan alanda ($\alpha + \text{L}$) ise Al elementinin belirli miktarda katı olarak bulunduğu faz görülmektedir.



Şekil 1. Al-Cu ikili denge diyagramı [19]

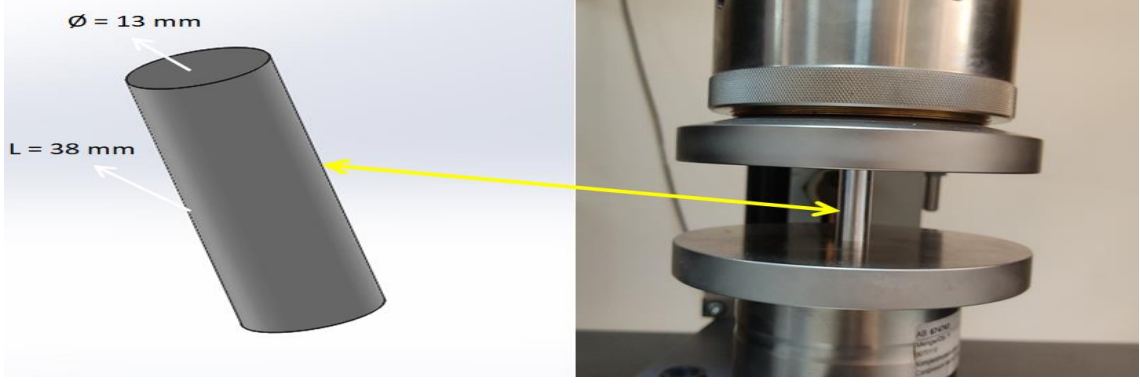
Yapılan çalışmada, sinterleme işlemi sırasında mümkün olduğu kadar numunelerin sıvı faza geçiş yapmamaları ve bu doğrultuda genleşmeye maruz kalmamaları istenmiştir. Geleneksel sinterleme sırasında sıvı faz oluşumunun baskınlığı durumunda alaşımın gözeneklilik oranı artar ve buna bağlı olarak yoğunluk değerleri düşer. Aynı zamanda mekanik özelliklerinde büyük bir kayıp meydana gelir. Bu nedenle T/M yönteminde Al-Cu alaşımlarının ham pelet oluşumunda sıkıştırma basıncının etkisi araştırılırken herhangi bir değişkenliğe yol açmaması için Al elementinin yüksek oranda katı olarak bulunması öngörülmüştür. Bu kapsamda Al-Cu alaşım oranının kritik dönüşüm çizgisinin hemen üstünde ve ötektik altı bölgenin merkezinde bulunması planlanmıştır. Bu plan doğrultusunda araştırmada, Al içerisine ağırlıkça %15 Cu ilavesi yapıp 550 °C/45dk geleneksel sinterleme işlemi uygulanarak Al-15Cu alaşımının üretilmesinin ve farklı sıkıştırma oranlarının bu alaşım üzerinde uygulanmasının doğru bir seçim olacağı kanaatine varılmıştır.

Al-Cu alaşım oranının ve sinterleme parametrelerinin belirlenmesi süreci sonrasında, ticari olarak elde edilen 44 µm boyutlarında ve % 99 saflıktaki Al ve Cu tozları mekanik olarak karıştırılmıştır. Bilyeli karıştırıcı vasıtasıyla kendi içerisinde homojen olarak dağılan toz partikülleri 300°C sıcaklıkta ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemle birlikte partiküller üzerinde bulunan oksit tabakasının kısmen kırılması ve nem içeriklerinin giderilmesi planlanmıştır. Ön ısıtma işlemi sonrasında elde edilen alaşım tozları, özel olarak tasarlanmış ve iç yüzeyleri çinko stearat ile yağlanmış olan kalıp içerisine sistemli bir şekilde istiflendirilmiştir. İstifleme işlemi sonrasında üst zımba kalıba yerleştirilerek şekil 2’de gösterildiği gibi 2000 kN kapasiteli UTEST marka basma cihazı vasıtasıyla sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Al-15Cu alaşım tozlarının sıkıştırılması işleminde, ayrı ayrı 350, 470 ve 600 MPa basınç uygulaması yapılarak üç farklı ham pelet numune elde edilmiştir. Elde edilen numuneler önceden belirlenmiş olan parametreler kullanılarak sinterlenerek havada soğutulmuştur. Üretim aşamalarının tamamlanması ile yaklaşık 80 mm uzunluğunda ve 20 mm çapında numuneler elde edilmiştir.



Şekil 2. Al-15Cu alaşım tozlarının sıkıştırılma işlemi

Uygulanan her aşamada alınan numuneler, zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında uygun görüldüğü yerde Keller kimyasalında (1 ml HF, 1,5 ml HCl, 2,5ml HNO₃, 95 ml H₂O) ve Weck kimyasalında (100ml su, 4gr KMnO₄, 1gr NaOH) dağlanmıştır. Dağlama işlemi sonrasında, numunelerin mikro yapısı Nikon marka optik mikroskop kullanılarak incelenmiş, sertlikleri ise Wellmess WM-MCV-1A cihazında 100gf yük altında en az 6 kez tekrarlanan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra malzemelerin deneysel yoğunluk değerleri Arşimet yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve teorik yoğunluk değerleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak Şekil 3’de gösterildiği gibi ASTM E 9 standartlarında hazırlanan numunelere, Zwick Z100 marka basma cihazında basma testi uygulanarak deneysel çalışmalar tamamlanmıştır.

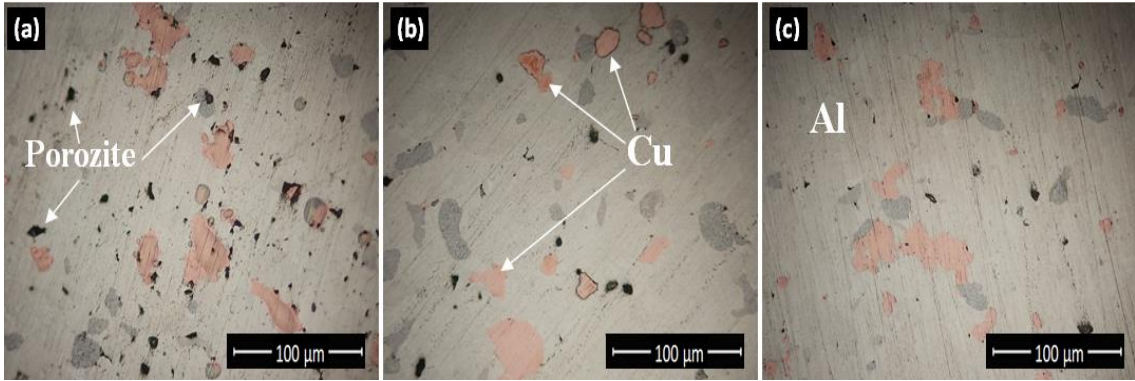


Şekil 3. Elde edilen numunelerin basma deneyi görüntüleri

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. MİKRO YAPI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLER

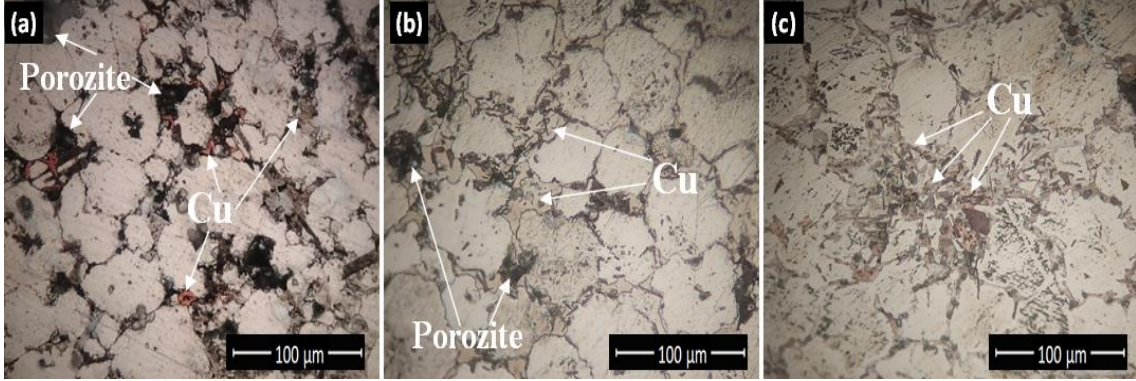
Şekil 4a-c’de Al-15Cu alaşım tozlarının 350, 470 ve 600 MPa basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen ham pelet numunelerin mikro yapı görüntüleri sergilenmektedir. Alınan görüntüler incelendiğinde, ortalama 44µm boyutuna sahip muhtemel Cu tozlarının Al içerisine dağıldığı ve uygulanan basıncın artmasıyla toz partiküllerinin birbirine yaklaştığı, hatta yakın konumda bulunan tozların birleştiği belirlenmiştir. Şekil 4a’da 350 MPa basınç altında sıkıştırılan numune görüntüsü ele alındığında, oklarla gösterilen gözeneklerin Cu partiküllerinin etrafında ve Al içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Sıkıştırma işleminin 470 MPa basınç altında gerçekleştirildiği şekil 4b’deki mikro yapı görüntüsünde, Cu partiküllerinin daha çok elipsel bir şekil aldığı ve azalan gözeneklerin kısmen Cu partiküllerinin etrafını sardığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra gözeneklerin Al içerisinde bir miktar irileştiği tespit edilmiştir. 600 MPa basınç altında sıkıştırılan numunede ise Cu partiküllerinin deforme olarak birbirlerine yaklaştığı ve gözeneklerin Al ve Cu partikülleri arasında çok az sayıda bulunduğu gözlemlenmiştir.



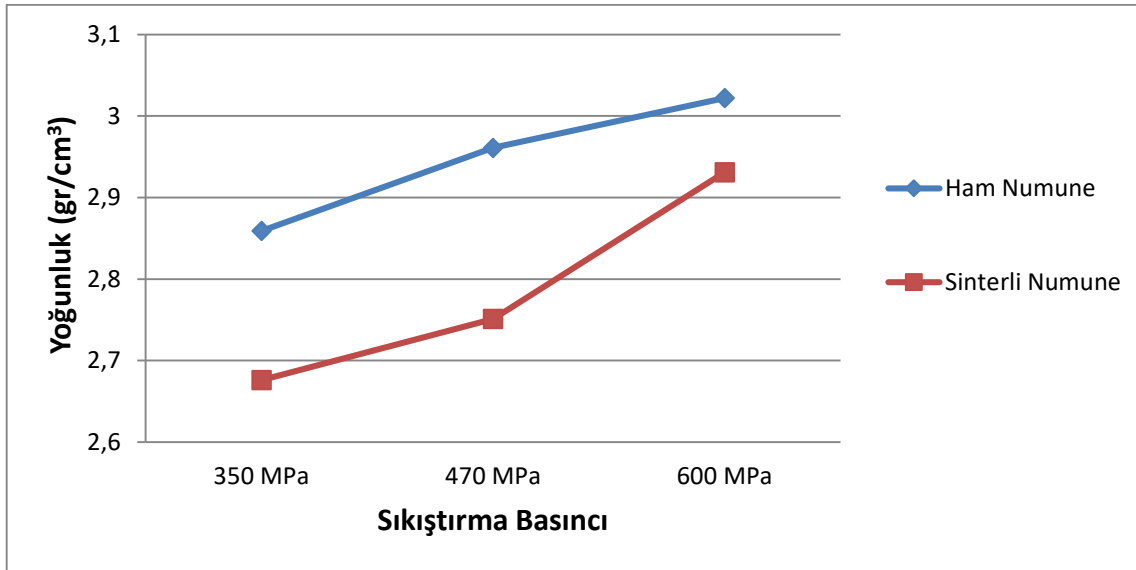
Şekil 4. Farklı basınç oranlarında sıkıştırılan ham pelet numunelerin mikro yapı görüntüleri, a) 350 MPa, b) 470 MPa, c) 600 MPa

Ham pelet hale getirilen numunelerin 550 °C/45 dk. sinterlenme işlemi sonrasında elde edilen mikro yapı görüntüleri Şekil 5a-c’de sergilenmektedir. Şekil 5a’da Cu tozlarının sinterleme işleminde uygulanan sıcaklığın etkisiyle parçalanarak Al tane sınırlarına yerleştiği gözlemlenirken, gözeneklerin varlığının devam ettiği bariz bir şekilde belirlenmiştir. Şekil 5b’de sergilenen mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, Cu partiküllerinin kısmi olarak ergimesi ile Al tane sınırlarına yayıldığı gözlemlenirken, Şekil 5c’deki mikro yapı görüntüsünde ise Cu partiküllerinin daha küçük parçalara ayrılarak Al tane

içlerine kadar dağıldığı belirlenmiştir. Aynı oranda alaşımlandırılan ve aynı parametrelerde sinterlenen Al-Cu alaşımında, Cu elementinin mikro yapı içerisinde farklı özelliklerde dağılım göstermesinin altında yatan en önemli neden, toz formlarının farklı basınç oranlarında sıkıştırılması olarak karşımıza çıkmaktadır. Alaşım tozlarının yüksek basınç oranlarıyla sıkıştırılarak ham pelet hale getirilmesi, sinterleme sırasında aktivasyon enerjilerini artırmaktadır [20]. Bu bağlamda Al tozlarından daha düşük deformasyon yeteneğine sahip olan Cu tozları, yüksek basınç altında sıkıştırıldıklarında, sıcaklığa karşı etkin bir enerjiye sahip olurlar. Bu enerji birikimi katı+sıvı bölgesinde bulunan bir sıcaklık değeri ile karşılaşarak, Al-Cu alaşımının kimyasal etkileşim özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmiştir. Böylelikle Al-Cu alaşım tozlarının 600 MPa basınç altında sıkıştırılarak sinterlenmesi işlemi sonucunda, Cu'nun mikro yapıda Al içerisine daha ince taneli bir yapı halinde dağılması beklenen bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5. Farklı basınç oranlarında sıkıştırılan ham pelet numunelerin 550 °C/45 dk. sinterlendikten sonra elde edilen mikro yapı görüntüleri a) 350 MPa, b) 470 MPa, c) 600 MPa



Şekil 6. Farklı basınç oranlarında sıkıştırılan numunelerin yoğunluk grafiği

Sinterleme öncesi ve sonrası elde edilen mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, sıkıştırma basıncının artması ile gözenek oluşumunun azaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemin netleştirilmesi ve üretilen malzemelerin kendi aralarında kıyaslanabilmesi açısından elde edilen numunelerin her aşamasında yoğunluk değerleri tespit edilmiştir. Şekil 6'da sergilenen ham ve sinterli numunelerin deneysel yoğunluk değerleri incelendiğinde, sıkıştırma basıncının artmasıyla yoğunluk değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Fakat sinterleme sonrası numunelerin yoğunluk değerlerinin (ρ_s), ham numunelerin yoğunluk değerlerinden (ρ_g) daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, sinterlemenin etkisiyle

Cu elementinin kısmen sıvı duruma geçerek numunelerin genişmesine yol açmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Al-15Cu alaşımının farklı süreçlerde elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 1’de verilmektedir. Al ve Cu elementinin kütle ve hacim değerlerinin bilinmesi ile elde edilen Eşitlik 1 kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda bu alaşımının teorik yoğunluk değerinin (ρ_t) $3,047 \text{ gr/cm}^3$ olduğu belirlenmiştir. 600 MPa basınç altında sıkıştırılan numunenin ρ_g değerinin, ρ_t değerine çok yaklaştığı tespit edilmiştir. Ancak uygulanan sinterleme işlemi, yoğunluk değerinde bir düşüşe yol açarak %3,8 oranında gözenek oluşumuna neden olmuştur. Bu oluşum 350 ve 470 MPa sıkıştırma basıncı sonrası üretilen numunelerde sırasıyla %12,17 ve %9,71 oranında belirlenmiştir.

$$\rho_t = \frac{m_{Al} + m_{Cu}}{V_{Al} + V_{Cu}} \quad (1)$$

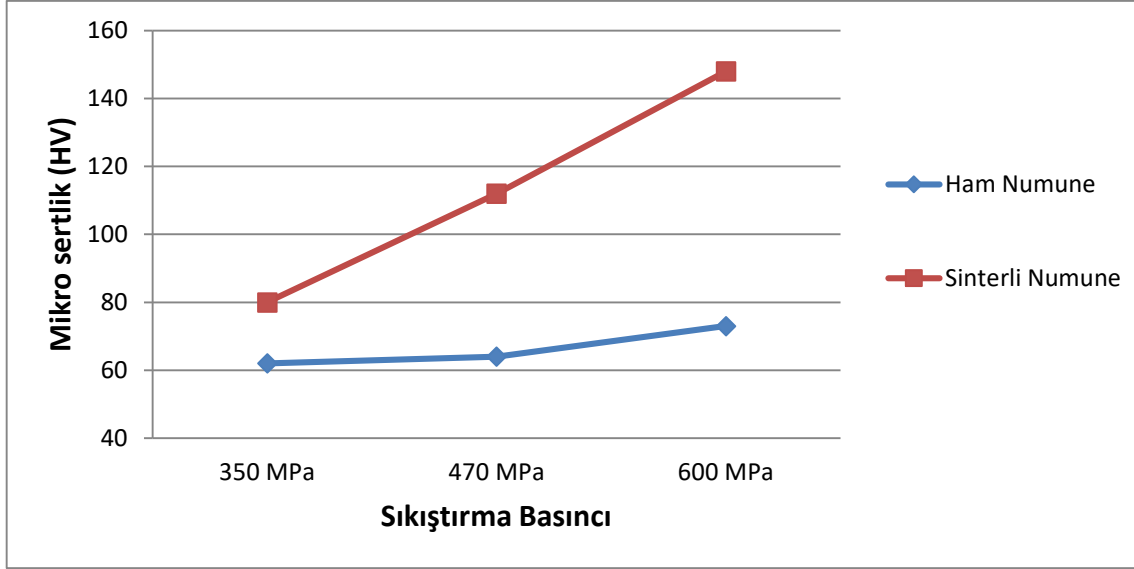
Tablo 1. Farklı basınç oranlarında sıkıştırılan numunelerin yoğunluk değerleri

Numuneler	ρ_t (gr/cm^3)	ρ_g (gr/cm^3)	ρ_s (gr/cm^3)
Al-15Cu (350 MPa)	3,047	2,859	2,676
Al-15Cu (470 MPa)	3,047	2,961	2,751
Al-15Cu (600 MPa)	3,047	3,022	2,931

B. MEKANİK ÖZELLİKLER

Mikro yapısal ve fiziksel incelemeler sonucunda elde edilen bulguların, numunelerin mekanik özellikleri ile örtüşüp örtüşmediğinin belirlenebilmesi için, üretim aşamalarında alaşımın mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 7’de oluşturulan mikro sertlik grafiği incelendiğinde, 350, 470 ve 600 MPa basınç altında sıkıştırılarak elde edilen ham numunelerin sinterleme işlemi sonrasında ölçülen sertlik değerleri sırasıyla 80, 112 ve 148 HV olarak belirlenmiştir. Farklı basınç oranlarıyla sıkıştırılarak elde edilen yüksek yoğunluğa sahip Al-15Cu alaşımlı ham numunelerin ortalama sertlik değeri ise 66 HV olarak belirlenmiştir. Sinterlemenin etkisiyle alaşım tozları arasında oluşan bağın ve kimyasal aktivasyonun artması sonucunda, sinterlenen numunelerin her basınç değeri için ölçülen sertlik değerleri ham numunenin sertlik değerinden fazla çıkmıştır. Tozların sıkıştırılması sonucunda oluşan ham numunelerin kohezyon etkileşimi sayesinde bir bütün oluşturdukları ve ölçülen sertlik değerlerinin büyük oranda sıkıştırma sırasında uygulanan basınca bağlı olarak değiştiği bilinen bir gerçektir. Bu nedenler doğrultusunda, Al-15Cu alaşımının T/M yöntemi ile üretim aşamalarında sinterleme sonrasındaki sertlik değeri, ham numunelerin sertlik değerinden yüksek ölçülmüştür.

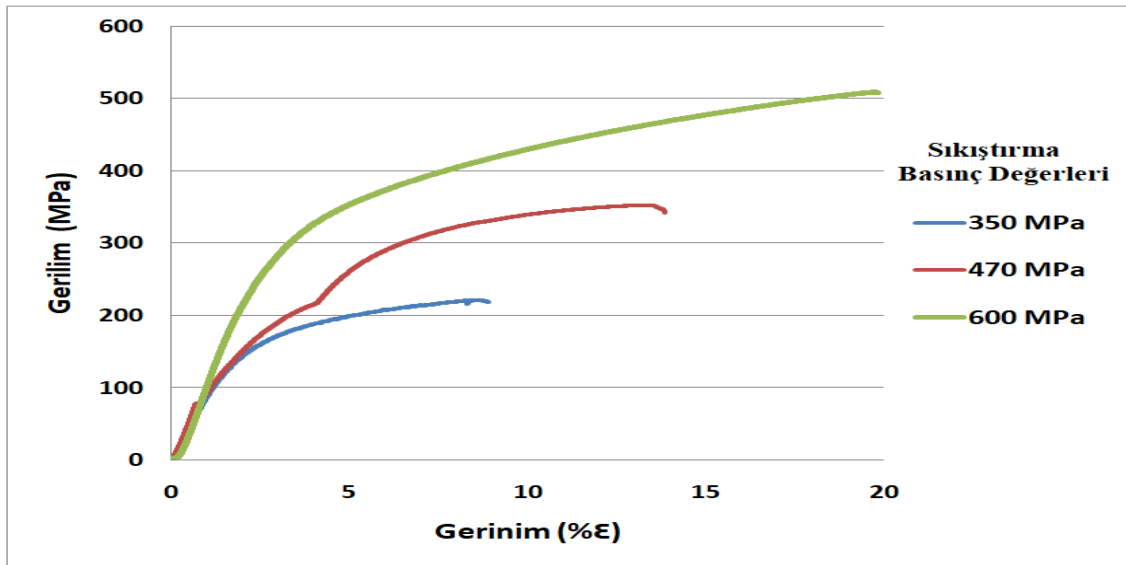
Elde edilen veriler ışığında, sıkıştırma basıncının etkisiyle sinterleme aşamasında Cu elementinin Al içerisinde ince taneler şeklinde dağılmasının bölgesel sertlik değerini artırdığı ve böylelikle sinterleme sonrası sertlik değerlerinin çarpıcı bir şekilde yükseldiği belirlenmiştir. Bu çerçevede, Cu dağılımının düzenli olduğu bölgelerden alınan sertlik değerleri incelendiğinde, ortalama sertlik değerlerinin yaklaşık %10’u kadar yüksek bir sertlik değeri ile karşılaşılmıştır.



Şekil 7. Sinterli ve ham numunelerin sıkıştırma basıncı-mikro sertlik grafiği

Farklı basınç parametreleri ile sıkıştırıldıktan sonra aynı parametrelerle sinterlenen numunelerin mikro sertlik ölçümleri değerlendirildikten sonra, bu ölçüm sonuçlarının desteklenebilmesi adına numunelere basma testi uygulanmış ve dayanım değerlerindeki değişimler araştırılmıştır. Şekil 8’de basma testi sonucunda elde edilen veriler grafik halinde sergilenmiş olup, 350, 470 ve 600 MPa basınç altında sıkıştırılan numunelerin sinterleme sonrası maksimum basma dayanımı değerleri (σ_{max}) sırasıyla 221, 352 ve 508 MPa olduğu tespit edilmiştir. 350 MPa sıkıştırma basıncı ile üretilen numune referans olarak kabul edildiğinde, artan basınç değerleri ile birlikte üretilen numunelerin σ_{max} değerleri sırasıyla %60 ve %45 oranında artmıştır. Bunun yanısıra numunelerin yüzde şekil değiştirme miktarı ($\% \epsilon$) incelendiğinde sıkıştırma basıncının artması ile şekil değiştirme miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Herbir basınç değeri için şekil değiştirme miktarı yaklaşık olarak 350 MPa - %8,5, 470 MPa - %13,5 ve 600 MPa - %19,7 olarak belirlenmiştir.

Böylelikle, Al-15Cu alaşımının sinterlenmesi sonrası test edilen basma dayanım değerleri, önceden tespit edilen yoğunluk ve mikro sertlik değerleri ile tam olarak örtüşmekte olup, sıkıştırma oranındaki artışın basma dayanım özelliklerini de geliştirdiği ortaya konulmuştur.



Şekil 8. Farklı basınç oranlarında sıkıştırılan numunelerin gerilim-gerinim grafiği

IV. SONUC

Bu çalışma, T/M yöntemi ile üretilen Al-15Cu alaşımının ham pelet hale dönüştürülmesi işleminde kullanılan sıkıştırma basıncının, üretim sonunda malzemelerin karakteristik özelliklerindeki değişimini incelemektedir. Bu kapsamda hazırlanan Al-15Cu alaşım tozları 350, 470 ve 600 MPa basınç altında ayrı ayrı sıkıştırılıp, 550°C sıcaklıkta 45 dk sinterlendikten sonra her üretim aşamasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

1. Sıkıştırma işlemi sonucunda elde edilen ham pelet numunelerin yoğunluk oranları, uygulanan basınç oranının artması ile artış göstermiştir. Aynı zamanda mikro yapı incelemelerinde, sıkıştırma basıncının artmasıyla Cu partiküllerinin elipsel şekle dönüştüğü ve Al içerisinde birbirlerine yaklaştığı tespit edilmiştir.
2. Elde edilen ham numunelerin sinterlenmesi sonucunda kısmi sıvılaşıma süreci nedeniyle yoğunluklarında bir azalma gözlemlenmiş olup, buna rağmen teorik yoğunluğa en yakın değere 600 MPa sıkıştırma basıncı işlemi sonucunda ulaşıldığı belirlenmiştir. Sinterleme işlemi sonrasında elde edilen mikro yapı incelemelerinde basınç oranındaki artış ile Cu partiküllerinin kimyasal aktivitesinin arttığı ve Al tane sınırlarından tane içlerine doğru dağıldığı gözlemlenmiştir.
3. Sinterlenen Al-15Cu alaşımının mekanik özellikleri incelendiğinde, sıkıştırma basıncındaki artış ile mikro sertlik ve basma dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Uygulanan en düşük ve en yüksek sıkıştırma basınç oranlarına göre mikro sertlik değerinin yaklaşık %80 oranında, basma deneyi sonrası σ_{max} ve $\% \epsilon$ değerinin %130 oranında artmış olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (2021/1-16 YLS).

V. KAYNAKLAR

- [1] Ö. Özgün and A. Erçetin, "Microstructural and mechanical properties of Cr - C reinforced Cu matrix composites produced through powder metallurgy method," Turkish J. Nat. Sci., vol. 6, no. 2, pp. 2–7, 2017.
- [2] S. Korucu ve G. Soy, "Alüminyum matrisli kompozitlerde tungsten karbür ve grafen takviyelerinin mekanik özelliklere etkileri üzerine bir araştırma," Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg., c. 5, ss. 538-547 Düzce, 2017.
- [3] N. S. Köksal, F. Taştan, "Demir esaslı malzemelere Cu ve Ni ilavesi ile mekanik özelliklerin değişimi," c. 1, ss. 55–64, 2008.
- [4] A. V Sameljuk, O. D. Neikov, A. V Krajnikov, Y. V Milman, and G. E. Thompson, "Corrosion behaviour of powder metallurgical and cast Al – Zn – Mg base alloys," Corros. Sci., vol. 46, pp. 147–158, 2004.
- [5] T. Qiu, M. Wu, Z. Du, G. Chen, L. Zhang, and X. Qu, "Microstructure evolution and densification behaviour of powder metallurgy Al-Cu-Mg-Si alloy" vol. 63, no. 1, pp. 54-63, 2020.
- [6] K. N. Manjunath and G. B. Krishnappa, "Mechanical characterization of Al-Cu alloy produced using conventional sintering process," Mater. Today Proc., vol. 5, no. 1, pp. 3019–3026, 2018.

- [7] U. Avcı and A. Güleç, "Effect of different sintering temperatures on microstructure and mechanical properties for pure Al material produced by powder metallurgy," *El-Cezeri J. Sci. Eng.*, vol. 2021, no. 1, pp. 462–470, 2021.
- [8] A. Gökçe, F. Findik, and A. O. Kurt, "Microstructural examination and properties of premixed Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy," *Mater. Charact.*, vol. 62, no. 7, pp. 730–735, 2011.
- [9] H. Wang, R. Zhang, X. Hu, C. A. Wang, and Y. Huang, "Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu-Al composite," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 197, no. 1–3, pp. 43–48, 2008.
- [10] K. Köprülü, N. Mutlu, A. Kurt, B. Gülenç, Y. Özçatalbaş, "Al + %4,5 Cu ön karışimli tozların alaşımlanmasına ısıl işlemlerin etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, c. 6, s. 2, ss. 283–293, 2018.
- [11] G. B. Schaffer, T. B. Sercombe, and R. N. Lumley, "Liquid phase sintering of aluminum alloys," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 67, no. 1–3, pp. 85–91, 2001.
- [12] A. M. Hassan, A. T. Mayyas, A. Alrashdan, and M. T. Hayajneh, "Wear behavior of Al-Cu and Al-Cu/SiC components produced by powder metallurgy," *J. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 15, pp. 5368–5375, 2008.
- [13] X. Liu, P. Ma, Y. D. Jia, Z. J. Wei, C. j. Suo, P. C. Ji, X. R. Shi, Z. S. Yu, K.G. Prashanth, "Solidification of Al-xCu alloy under high pressure," *Journal of Materials Research and Technology.*, vol. 9, no. 3, pp. 2983–2991, 2020.
- [14] K. Rajasekhar, V. S. Babu, M. J. Davidson, "Interfacial microstructure and properties of Al-Cu functionally graded materials fabricated by powder metallurgy method," *Material Today: Proceedings*, vol. 46, no. 1, pp. 9212-9216, 2021.
- [15] M. A. Erden, S. Barlak, B. Adalı ve Ö. Çelikkıran, "Toz metalurjisi ile üretilen Nb-V mikroyapılı çeliğine vanadyum ilavesinin mikroyapı mekaniksel özellikleri üzerine etkisi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, c. 9, s. 1, ss.629–636, 2018.
- [16] K. N. M. Al-Obaidi and R. Varol, "Experimental investigation of P/M parts manufacturing conditions using AA2014 and elemental Al and Cu powders," *Mühendislik Bilim. ve Tasarım Derg.*, vol. 6, no. 4, pp. 701–706, 2018.
- [17] A. Gökçe, F. Findik ve A. O. Kurt, "Alüminyum ve alaşımlarının toz metalurjisi işlemleri," *Engineer&Machinery*, c. 58, s. 686, ss. 21–47, 2017.
- [18] M. Çelik, M. Türker, "Al-Cu esaslı tozlardan toz metalurjisi yöntemi ile malzeme üretimi ve yaşlandırma tavrının incelenmesi," *Politek. Derg.*, c. 8, s. 3, ss. 275–279, 2005.
- [19] X. R. Shi, Z. S. Yu, and K. G. Prashanth, "Solidification of Al-xCu alloy under high pressures," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 2983–2991, 2020.
- [20] D. Wogaso, M. J. Davidson, and A. K. Khanra, "Constitutive modeling of powder metallurgy processed Al – 4 % Cu preforms during compression at elevated temperature," *J. Mater.*, vol. 65, pp. 83–93, 2015.