



Toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanan AlCu-B₄C kompozitlerin yoğunluğuna imalat değişkenlerinin etkisinin incelenmesi

Demet Zalaoglu¹, Mehmet Eker^{2,*}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, 80000, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mersin, 33400, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 11 Mart 2023

Kabul 17 Temmuz 2023

Online 30 Eylül 2023

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1263860

Anahtar kelimeler:

AlCu anayapı

B₄C takviye

Toz metalurjisi

Kompozit malzeme

Sinterleme sonrası yoğunluk

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanan, farklı oranlarda (hacimce % 0, 10 ve 20) B₄C parçacık takviyeli Al-%10Cu ana yapı kompozit malzemenin sinterleme sonrası yoğunluğuna, takviye oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Kompozit üretimi için yüksek saflıkta alaşım ve seramik tozları kullanılmış, elde edilen homojen karışım soğuk preste sıkıştırılmış ve tüp fırında sinterlenmiştir. Tayin edilen değişkenlerin sinterleme sonrası yoğunluğa etkisi Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu amaç ile sürece en uygun Taguchi tasarımı olan, L9 ortogonal deney tasarımı seçilmiş ve deneyler bu matrise göre gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım ile yapılan analizler sonucunda elde edilen S/N oranı yanıtlarına göre, sıkıştırma basıncının en yüksek etkiye, takviye oranının da görece düşük etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Taguchi deney tasarımı ve yapılan regresyon analizi sonucunda, oluşturulan regresyon modelinin ise %95 güven aralığının içinde olduğu sonucu elde edilmiştir.

Effect of B₂O₃ additive on chemical decomposition behavior, thermal and mechanical performance of PET

ARTICLE INFO

Article History:

Received March 11, 2023

Accepted July 17, 2023

Available online December 30, 2023

Research Article

DOI: 10.30728/boron.1263860

Keywords:

AlCu matrix

B₄C reinforcement

Powder metallurgy

Composite material

Density after sintering

ABSTRACT

In this study, the effect of reinforcement ratio, compression pressure and sintering temperature on the post-sintering density of Al-10%Cu matrix composite material with B₄C particle reinforcement at different ratios (0, 10 and 20% by volume) prepared by powder metallurgy method was investigated. High purity alloy and ceramic powders were used for composite production, the obtained homogeneous mixture was compressed in a cold press and sintered in a tube furnace. The effect of the variables on the density after sintering was investigated using the Taguchi experimental design method. For this purpose, the L9 orthogonal experimental design, which is the most suitable Taguchi design for the process, was chosen and the experiments were carried out according to this matrix. According to the S/N ratio responses obtained as a result of the analyzes made with this design, it was observed that the compression pressure had the highest effect and the reinforcement ratio had a relatively low effect. As a result of the Taguchi experimental design and the regression analysis, it was concluded that the regression model was within the 95% confidence interval.

1. Giriş (Introduction)

Metal esaslı kompozitler sahip oldukları yüksek tokluk, dayanım ve ısıl kararlılıkları ve üstün yüksek sıcaklık özellikleri ile yeni nesil mühendislik malzemeleri arasında öne çıkmaktadır [1-6]. Metal esaslı kompozitlerde, sürekli/kısa elyaflar, özlef (visker) ve seramik parçacıklar (bor, karbon, silisyum karbür ve alümina) takviye malzemesi olarak kullanılırken, ana yapı malzemesi olarak alüminyum, magnezyum, titanyum alaşımları gibi hafif metaller ya da bazı süper alaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Parçacık

takviyeli metal esaslı kompozitler, sağladıkları iyi aşınma direnci, yüksek yük taşıma kapasitesi ve düşük yoğunluk gibi avantajlarından dolayı özellikle tribolojik uygulamaları olmak üzere havacılık, elektrik-elektronik, otomotiv, savunma gibi birçok farklı alanda da tercih edilmektedir [7-14].

Alüminyum (Al) esaslı kompozitler, Al alaşımlarına kıyasla çok daha düşük ısıl genleşme katsayısına ve yüksek özgül mukavemete, aşınma ve ısıl dirence sahip malzemelerdir [15-18]. Bunun yanında Al esaslı kompozitler hafiflik, montaj dayanımı, süneklik,

*Corresponding author: mehmeteker@tarsus.edu.tr

yüksek young modülü ve iyi ısı iletkenliklerinden dolayı elektronik ve havacılık uygulamalarında da yer bulmaktadır. [19,20]. Al esaslı kompozitlerde, üstün mekanik özelliklere ve son derece yüksek sertliğe sahip alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve silisyum karbür (SiC) gibi seramik parçacıklar takviye malzemesi olarak tercih edilmektedir [21]. Bunlar arasında B_4C parçacıkları ile elde edilen Al esaslı kompozitler de yüksek sertlik ve mukavemet, düşük yoğunluk, iyi erozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi özellikler ile mükemmel yapısal başarıma sahip parçacık takviyeli metal esaslı kompozit malzemelerdir [22-24]. Al esaslı kompozitlerde ana yapı alaşımı olarak kullanılan Al-Cu alaşımları ise düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve işlenebilirlikleri ile havacılık ve otomotiv endüstrisinde bazı uygulamalarda kullanılan çeliğin yerini almak için önemli bir aday olarak kabul edilmektedir [25,26]. Ayrıca TiC, TiN, SiC gibi nano parçacık takviyeli ve Al-Cu ana yapı kompozitler, Al-Cu alaşımına göre daha yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahip malzemelerdir [27-30].

Kompozit malzemelerin üretiminde, istenilen en iyi özelliklerin elde edilmesi için değişkenlerin optimum değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Üretim yöntemi, ana yapı, sinterleme sıcaklığı, takviye türü ve oranı, sıkıştırma basıncı gibi çok sayıda belirlenmesi gereken değişken bulunmaktadır. Bu değişkenlerin birçoğu birbirileri ile etkileşim halinde olduğundan kompozit malzeme özelliklerinin nasıl etkilendiğini analiz etmek gerekmektedir. Bu amaç ile bağımlı değişkenin, bir ya da birden fazla bağımsız değişkenden nasıl etkilendiğini incelememizi sağlayan ve bir süreç tasarımı olan Deney tasarımı (Design of Experiment, DoE) teknikleri kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi ise temeli deney tasarımı tekniklerine dayanan, deneylerin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesi ile verimliliği arttıran bir yöntemdir. Ayrıca geleneksel deney tasarımında kontrol edilemeyen ve açıklanamayan değişkenlerin kontrolünü sağlamaktadır. Taguchi yönteminin amacı ise, en az deney ve en düşük maliyetle kaliteli ürün ve süreç geliştirmektir [31]. Taguchi yönteminde sinyal (S) gürültü (N) oranı adı verilen bir katsayı ile yapılan deney sonuçları yorumlanmaktadır. Sinyal/Gürültü (S/N) analizi, sonuçların değişimleri yoluyla işlem koşulları için en sağlıklı grubu belirler. Taguchi, değişkenlerin en uygun seviyelerinin belirlenmesi için uygulamadaki problemleri hedefin türüne göre; en küçük en iyi, en büyük en iyi, hedef değer en iyi olmak üzere üçe ayırmıştır. Bu sayede, S/N oranını üç problemin hepsinde en yüksek değere çıkarırken, bir yandan sinyali arttırmak, diğer yandan ise varyasyonu azaltmak amaçlanmaktadır [32].

Yapılan çalışmada, AlCu- B_4C kompozitlerin sinterleme sonrası deneysel yoğunlukları üzerine, takviye hacim oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklıkları değişkenlerinin etkileri analiz edilmiştir. Analiz işlemleri için Taguchi deney tasarımından faydalanılmış ve analizleri gerçekleştirmek amacıyla tanımlanan hacimce B_4C takviye oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme

sıcaklığı parametreleri bağımsız değişken, ortalama sinterleme sonrası deneysel yoğunluk ise bağımlı değişken olarak alınarak deneyler planlanmıştır. B_4C parçacık takviyeli AlCu ana yapı kompozitler toz metalürjisi yöntemlerinden biri olan soğuk sıkıştırma ve sinterleme yöntemiyle elde edilmiştir.

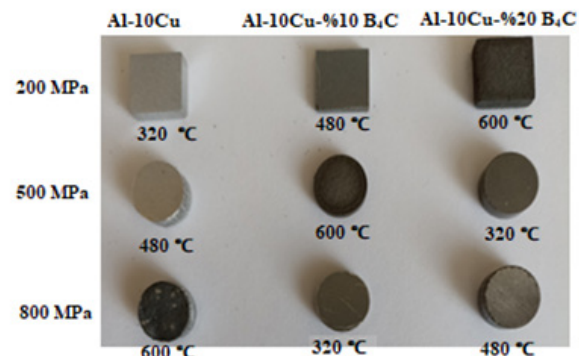
2. Malzemeler ve Yöntemler (Materials and Methods)

2.1. Malzemeler (Materials)

Yapılan çalışmada, Al-10Cu (ağırlıkça %10 Cu) ana yapı ve hacimce %0, 10 ve 20 B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemeler, toz metalürjisi yöntemi ile hazırlanmıştır. Kompozit numunelerin üretiminde kullanılan, Sigma Aldrich ve Alfa Aesar firmalarından tedarik edilmiş Al (-325 mesh), Cu (<75 μm) ve B_4C (-325 mesh) tozları, %90 üzeri saflığa ve sırası ile 2,7 g/cm³, 8,96 g/cm³ ve 2,52 g/cm³ yoğunluk değerlerine sahiptir. Hazırlanan kompozit numunelerin teorik yoğunlukları hesaplanmıştır. Buna göre, Al-10Cu, Al-10Cu-%10 B_4C ve Al-10Cu-%20 B_4C için teorik yoğunluk değerleri sırası ile 2,903 g/cm³, 2,865 g/cm³ ve 2,826 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntemler (Methods)

Üretim aşamasında ise ilk olarak, RADWAG marka hassas terazi ile tozların belirlenen oranlarda tartılmış ve hazırlanan tozların homojen hale getirilmesi amacı ile TURBULA T2F karıştırıcıda 3 saat karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, belirlenen oranlarda hazırlanan toz karışımları, farklı sıkıştırma basınçlarında (200, 500 ve 800 MPa) soğuk pres ile sıkıştırılmıştır. Soğuk pres esnasında Ø1,3 cm'lik yuvarlak ve 1,3x1,3 cm boyutlarında kare olmak üzere iki farklı kalıp kullanılmıştır. Kullanılan masa tipi soğuk preste yuvarlak kalıpta 200 MPa sıkıştırma basıncına düşülemediğinden dolayı bu basınç için daha fazla yüzey alanına sahip kare kalıp tercih edilmiştir. En son aşamada ise sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İşlemler, argon atmosferinde PROTHERM marka laboratuvar tipi tüp fırın ile yapılmıştır. Sinterleme işlemleri, her sıkıştırma basıncı için 320, 480 ve 600°C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sonrası elde edilen bazı numunelere ait görüntüler ise Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Sinterleme işlemi sonrası elde edilen numuneler (Samples obtained after sintering process).

Taguchi yöntemine göre tasarlanan ve tamamlanan üretim aşamasından sonra sinterlenmiş numunelerin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri, ASTM B962-17 [33] standardına göre hassas teraziye bağlı bir Arşimet kiti yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Al-10Cu ana yapılı B₄C parçacık takviyeli kompozit numuneleri için tanımlanan değişkenlerin sinterleme sonrası deneysel yoğunluk üzerindeki etkilerinin analizi için Taguchi deney tasarımından faydalanılmıştır. Hacimce B₄C takviye oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığı parametreleri, bağımsız değişken ve sinterleme sonrası ortalama deneysel yoğunluk ise bağımlı değişken alınarak deneyler planlanmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 1'de listelenmiştir. Bu parametrelerin en uygun değerlerinin seçilmesi ile kompozit yoğunluğunun iyileştirilmesi mümkün olabilecektir.

Tablo 1. Deney parametreleri ve seviyeleri (Experimental parameters and levels).

| Parametre | Sem- bol | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Hacimce % B ₄ C Oranı | A | 0 | 10 | 20 |
| Sıkıştırma Basıncı (MPa) | B | 200 | 500 | 800 |
| Sinterleme Sıcaklığı (°C) | C | 320 | 480 | 600 |

Tablo 1'de verilen parametre ve seviyelere en uygun Taguchi tasarımı olan L9 ortogonal deney tasarımı seçilmiştir. L9 deney tasarımı ve uygun olarak yapılan deneylere ait sonuçlar, Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Taguchi L9 deney tasarımı ve sonuçları (Taguchi L9 design of experiment and results).

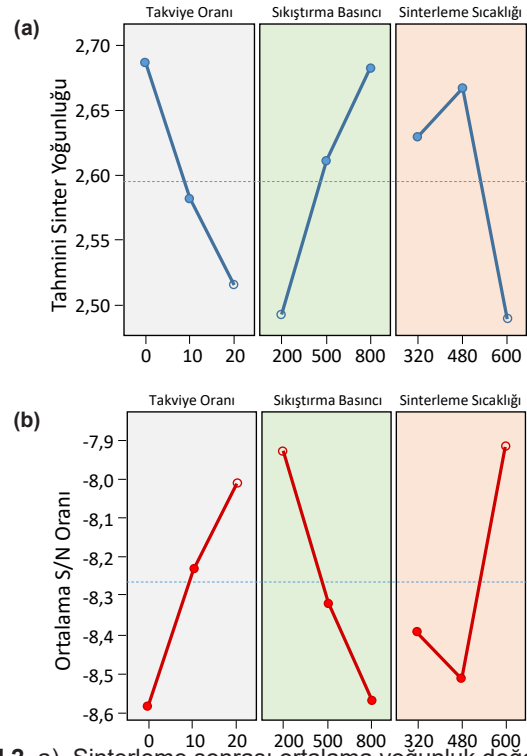
| Deneysel Numarası | A | B | C | Sinter Yoğunluğu (g/cm ³) |
|----------------------|----|-----|-----|--|
| 1 | 0 | 200 | 320 | 2,5749 |
| 2 | 0 | 500 | 480 | 2,8405 |
| 3 | 0 | 800 | 600 | 2,6479 |
| 4 | 10 | 200 | 480 | 2,5306 |
| 5 | 10 | 500 | 600 | 2,4481 |
| 6 | 10 | 800 | 320 | 2,7695 |
| 7 | 20 | 200 | 600 | 2,3700 |
| 8 | 20 | 500 | 320 | 2,5450 |
| 9 | 20 | 800 | 480 | 2,6308 |

Tablo 3. Ortalama sinter yoğunluğu ve sinyal/gürültü oranları için yanıtlar (Responses for average sinter density and signal-to-noise ratios).

| Ortalama Sinter Yoğunluğu | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| Ortalama yoğunluklar için yanıtlar | | | | Sinyal/Gürültü oranları için yanıtlar | | | |
| Seviye | Takviye Oranı | Sıkıştırma Basıncı | Sinterleme Sıcaklığı | Seviye | Takviye Oranı | Sıkıştırma Basıncı | Sinterleme Sıcaklığı |
| 1 | 2,688 | 2,492 | 2,630 | 1 | -8,580 | -7,925 | -8,392 |
| 2 | 2,583 | 2,611 | 2,667 | 2 | -8,230 | -8,319 | -8,511 |
| 3 | 2,515 | 2,683 | 2,489 | 3 | -8,004 | -8,569 | -7,910 |
| Delta | 0,172 | 0,191 | 0,179 | Delta | 0,577 | 0,644 | 0,602 |
| Rank | 3 | 1 | 2 | Rank | 3 | 1 | 2 |

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Taguchi yöntemi ile önerilen matrise uygun deneyler gerçekleştirilmiş ve sinterleme işlemi sonrası deneysel yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkinliğini belirlemek için S/N oranlarından faydalanılmıştır. Buna göre sinterleme sonrası ortalama deneysel yoğunluk değerleri ve sinterleme işlemi sonrası ortalama deneysel yoğunlukların S/N oranları için ana etki grafikleri sırası ile Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. a). Sinterleme sonrası ortalama yoğunluk değeri için ana etki grafiği, (a).Main effect plot for average density value after sintering, b).Sinterleme sonrası ortalama yoğunlukların S/N oranları için ana etki grafiği (b). Main effect plot for S/N ratios of average densities after sintering).

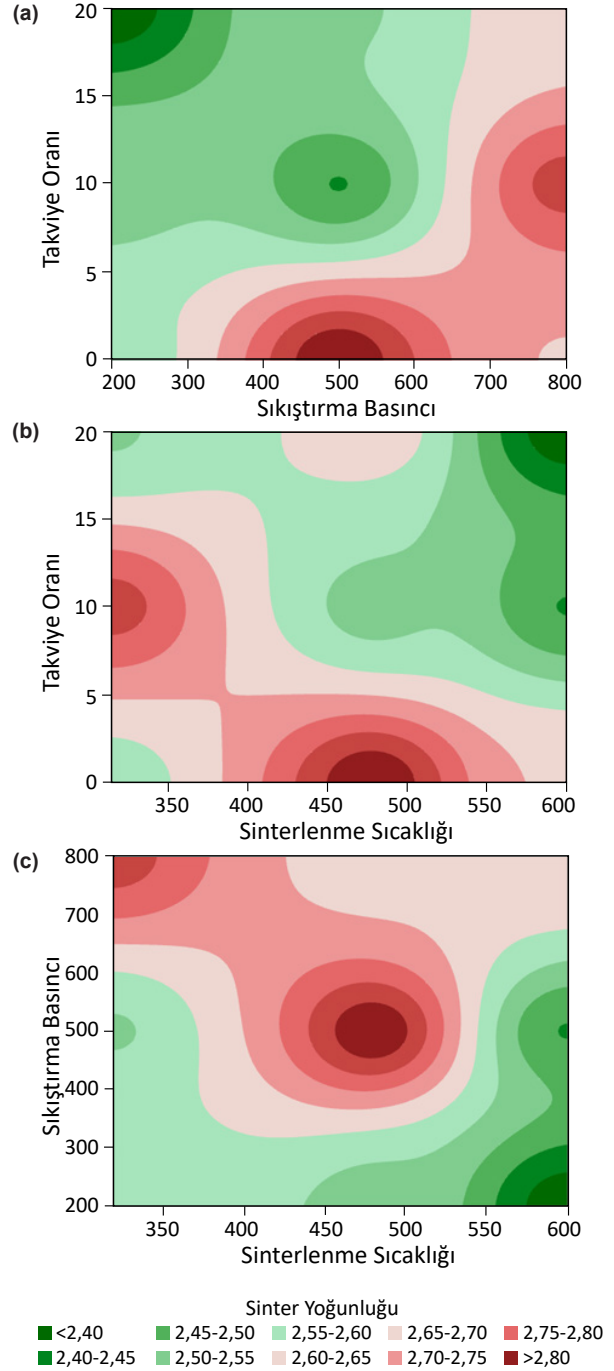
Ayrıca, sinterleme işlemi sonrası deneysel yoğunluk değerleri ve sinyal/gürültü oranları için elde edilen yanıtlar Tablo 3'te verilmektedir. Taguchi yöntemi ile tasarlanan deneyler sonucu elde edilen kompozitler için sinterleme sonrası ortalama deneysel

yoğunluklar Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür. Tüm istatistiksel analizler Minitab 19 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Etki önceliği sıralamaları (rank) delta değerlerine göre verilmiştir. Delta değerleri, kontrol faktörünün değerindeki genel değişikliği temsil eder. Ortalama sinterleme sonrası deneysel yoğunluk ve S/N oranı yanıtları bakımından sıkıştırma basıncının delta değeri en büyük olduğu süreçte en fazla etkiye sahip olduğu söylenebilir. Elde edilen kompozitin sinterleme sonrası deneysel yoğunluğu üzerinde sıkıştırma basıncının en yüksek etkiye, takviye oranının da diğer değişkenlere göre daha düşük etkiye sahip olduğu gözlenmektedir. Her bir faktör için elde edilen en iyi sonuçlar koyu renkle belirtilmiştir. Buna göre, A3B1C3 denklemi (eşleşme) optimum şartların sağlandığı değerlerdir. Dolayısıyla, takviye oranının 3. seviyesi olan hacimce %20, sıkıştırma basıncının 1. seviyesi olan 200 MPa ve sinterleme sıcaklığının 3. seviyesi olan 600°C seçilmesi halinde optimum seviyeye ulaşılmaktadır. En önemli faktör olan B faktörünün (sıkıştırma basıncı) seviyesi değiştiğinde yanıtta da önemli bir değişim meydana gelecektir. Ortalama yoğunluk ve S/N oranı yanıtlarına bakıldığında Delta değeri (maksimum ve minimum değerler arasındaki fark) en düşük olan faktör göreceli olarak daha az etkiye sahip faktördür. Başka bir deyişle, bu faktörün seviye değerleri arasındaki değişim, yanıtları en az seviyede etkilemektedir. Yapılan deneylere göre en az etkiye sahip faktör 0,172 ve 0,577 değerleri ile A faktörü (hacimce %B₄C oranı) olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 2'de sinterleme sonrası ortalama deneysel yoğunluk değeri için ana etki grafiğinde en düşük yoğunluk değerlerini işaret etmektedir. Benzer şekilde, değişken için hesaplanan S/N oranlarının en yüksek olduğu durumları gösteren seviyeler Şekil 2'de verilmektedir. Her bir faktör için en düşük deneysel yoğunluğu ve en yüksek S/N oranını veren seviyeler (ortalama deneysel yoğunluğun en düşük olduğu deney sonucu) içi boş daireler ile gösterilmiştir.

Faktörler arasındaki etkileşimin sinterleme sonrası deneysel yoğunluk üzerindeki etkisinin görülebilmesi için Şekil 3'te verilen iki boyutlu (2D) kontur grafikleri çizdirilmiştir. Takviye oranı-sıkıştırma basıncı etkileşim grafiğine (Şekil 3a) göre %20'lik takviye oranı ve 200 MPa sıkıştırma basıncında, takviye oranı sinterleme sıcaklığı etkileşim grafiğine (Şekil 3b) göre %20'lik takviye oranı ve 600°C sinterleme sıcaklığında ve sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığı etkileşim grafiğine (Şekil 3c) göre de 200 MPa ve 600°C sıcaklıkta en düşük sinterleme sonrası deneysel yoğunluk elde edildiği gözlenmektedir. Ayrıca kontur grafiklerindeki dağılımlar incelendiğinde, sıkıştırma basıncı-sinterleme sıcaklığı faktörlerinin en çok etkileşimde, takviye oranı-sıkıştırma basıncı faktörlerinin ise en az etkileşimde olduğu sonucu elde edilmiştir.

İncelenen literatür çalışmalarında da parçacık takviyeli kompozit numunelerin toz metalurjisi üretiminde değişkenlerin yoğunluk, sertlik ve başka mekanik



Şekil 3. Faktörlerin sinterleme işlemi sonrası ortalama yoğunluk üzerine etkisi (Effect of factors on average density after sintering) of average densities after sintering).

özellikler üzerindeki etkisi Taguchi yöntemi ile araştırılmıştır. Özellikle Taguchi ve Varyans Analizinin birlikte kullanımı ile en iyi yoğunluk ve sertlik gibi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerin elde edilebileceği ifade edilmiştir [34-37]. Hussain ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında Al₂O₃/Cu kompozitinin sinterleme sonrası deneysel yoğunluğu ve sertliği üzerine toz metalurjisi parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Öğütme süresi, sıkıştırma basıncı, sinterleme süresi ve zamanını değişken olarak belirledikleri çalışmalarında, Gri ilişkiler analizi ile birleştirilmiş Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Taguchi'nin L18 ortogonal dizisine dayalı olarak

gerçekleştirdikleri analizlerinde, sıkıştırma basıncının % katkısının diğer ana etkilere kıyasla daha anlamlı (%80,22) olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Al_2O_3/Cu kompozitinin yoğunluğunun ve sertlik değerinin Gri tabanlı Taguchi yöntemi kullanılarak iyileştirildiğini ifade etmişlerdir [36]. Benzer şekilde Kaya ve arkadaşları da SiC takviyeli Al-Mg alaşım ana yapı kompozitlerin sinter işlemi sonrası yoğunluğu üzerine; takviye oranı, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresinin etkisini Taguchi yöntemi ve Varyans Analizi (ANOVA) ile incelemişlerdir. Taguchi'nin L16 dikey dizisini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmaları sonucunda, ağırlıkça SiC oranının sinterleme işlemi sonrası deneysel yoğunluk üzerine en fazla etkiye sahip değişken olduğunu belirtmişlerdir [37].

3.1. Taguchi Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar için Regresyon Analizi (Regression Analysis for Results from Taguchi Experiments)

Regresyon analizi, amaca en uygun değerlerin tespitinde kullanılan bir analiz tekniğidir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi, tahminler yapabilmek için matematiksel bir denklem olarak sunar. Deney verilerini temsil eden en iyi eğriyi bulma işleminde genellikle en küçük kareler yöntemi kullanılır. En küçük kareler yöntemi, hataların kareleri toplamı minimum olacak şekilde bir eğri denklemini bulma esasına dayanmaktadır [38].

Yapılan çalışmada $AlCu-B_4C$ kompozitlerin sinterleme işlemi sonrası yoğunluklarının tahminini gerçekleştirmek amacıyla bir denklem modellenmiştir. Regresyon analizi kullanılarak modellenen denkleme ait değişkenler ise takviye hacim oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığı olarak ifade edilebilir. Yoğunluk tahmini için elde edilen lineer regresyon denklemi, Eş. 1'de verilmiştir. Buna göre; ρ ham yoğunluk, V hacimce $%B_4C$ oranını, P sıkıştırma basıncı ve T ise sinterleme sıcaklığıdır.

$$\rho = 2,739 - 0,00862V + 000318P - 0,000464T \quad (1)$$

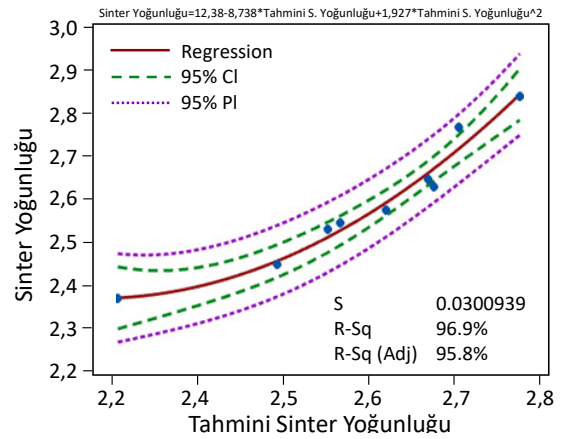
R-sq = 71,70%, R-sq(adj) = 54,73%

Eş. 1 kullanılarak, faktörlerin sayısal değerleri için deney yapmadan tahmini bir yoğunluk değeri elde edilebilir. R-squared (R-sq), veri noktalarının bir regresyon modeline ne kadar iyi uyduğunu gösteren istatistiksel bir ölçüdür. Düzeltilmiş R-squared (R-sq(adj))'de R-squared'e benzer bir ölçüt olmakla birlikte modeldeki bağımsız değişkenlerin sayısını dikkate alır. Çalışmadan bağımsız değişkenlerin sayısı görece düşük belirlendiği için R-sq değeri verilerin uyumunu daha iyi temsil edecektir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, R-sq değerlerine göre faktörler arasında orta düzeyde bir ilişki olduğu görülmektedir.

Taguchi deneylerinden alınan sonuçlar ve regresyon analizi kullanılarak, yoğunluk kestirimi yapabilmek için edilen regresyon modeli oluşturulmuştur. Buna göre, sinterleme işlemi sonucu yoğunluk için ikinci dereceden bir ilişki (Eş. 2) elde edilmiştir.

$$12,38 - 8,783 * (\text{tahmini sinter yoğunluğu}) + 1,927 * (\text{tahmini sinteryoğunluğu})^2 \quad (2)$$

Deney sonuçlarından elde edilen ve Şekil 4'te verilen regresyon modeli, deney sonuçlarına ait sinterleme sonrası deneysel yoğunluklarının, %95 güven aralığı içinde olduğunu göstermektedir. Modele göre, mor kesikli çizgiler tahmini değerlerin sınırlarını, yeşil kesikli çizgiler güven aralığını ve kırmızı düz çizgi ise deney sonuçlarının regresyon modelini temsil etmektedir [39]. Modele göre tahmini yoğunluk için R-sq değeri 96,88% olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Deney sonuçlarından tahmini yoğunluk belirlenebilmesi için ikinci dereceden regresyon modeli (Second-order regression model to determine the estimated density from the test results).

4. Sonuçlar (Conclusions)

$Al-10Cu$ ana yapı ve hacimce $%0, 10$ ve $20 B_4C$ parçacık takviyeli kompozit numunelerin, sinterleme sonrası deneysel yoğunluğuna; takviye oranı, sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığının etkisi Taguchi deney tasarımı kullanılarak incelenmiştir. Toz metalürjisi ile hazırlanan kompozit numunelerin deneysel tasarımı için verilen parametre ve seviyelere göre en uygun Taguchi tasarımı olan L9 ortogonal deney tasarımı seçilmiştir. Seçilen deney tasarımına göre analizler yapılmış ve analizler sonucunda, S/N oranı yanıtları incelendiğinde, sıkıştırma basıncının en yüksek etkiye, takviye oranının da görece olarak daha düşük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek etkiye sahip olan sıkıştırma basıncının değişimi ile sonuçlarda belirgin bir şekilde değişimin olduğu gözlemlenmiştir. Deney tasarımına göre ise optimum değere $%20$ parçacık takviye oranı, 200 MPa sıkıştırma basıncı ve $600^\circ C$ sinterleme sıcaklığında ulaşıldığı belirlenmiştir. Taguchi deney tasarımı ve buna uygun yapılan regresyon analizi sonucunda, oluşturulan regresyon modelinin ise $%95$ güven aralığının içinde olduğu sonucu elde edilmiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Chang, Y., Yao, X., Chen, Y., Huang, L., & Zou, D. (2023). Review on ceramic-based composite phase change

- materials: Preparation, characterization and application. *Composites Part B: Engineering*, 254, 110584. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110584>.
- [2] Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2012). The GA optimization performance in the microstructure and mechanical properties of MMNCs. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65(1), 77-83. <https://doi.org/10.1007/s12666-011-0110-9>.
- [3] Mazahery, A., & Shabani, M. O. (2012). Tribological behaviour of semisolid-semisolid compocast Al-Si matrix composites reinforced with TiB₂ coated B₄C particulates. *Ceramics International*, 38(3), 1887-1895. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.10.016>.
- [4] Shabani, M. O., Mazahery, A., Rahimpour, M. R., & Razavi, M. (2012). FEM and ANN investigation of A356 composites reinforced with B₄C particulates. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 24(2), 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.05.001>.
- [5] Mazahery, A., & Shabani, M. O. (2012). Nano-sized silicon carbide reinforced commercial casting aluminum alloy matrix: Experimental and novel modeling evaluation. *Powder Technology*, 217, 558-565. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.11.020>.
- [6] Yang, Q. S., He, X. Q., Liu, X., Leng, F. F., & Mai, Y. W. (2012). The effective properties and local aggregation effect of CNT/SMP composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(1), 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.027>.
- [7] Kumar, S., & Ghosh, S. K. (2023). Comparative study of airborne particles on new developed metal matrix composite and commercial brake pad materials with ANN and finite element analysis. *Computational Particle Mechanics*, 10(2), 273-287. <https://doi.org/10.1007/s40571-022-00491-9>.
- [8] Chatterjee, A., Sen, S., Paul, S., Roy, P., Seikh, A. H., Alnaser, I. A., ... & Ghosh, M. (2023). Fabrication and characterization of SiC-reinforced aluminium matrix composite for brake pad applications. *Metals*, 13(3), 584. <https://doi.org/10.3390/met13030584>.
- [9] Biyik S. (2019). Investigation of the effect of different process control agents on the production of Cu25W composite powder via ball milling technique. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology*, 9(2), 222-228. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.426995>.
- [10] Biyik, S., Arslan, F., & Aydin, M. (2015). Arc-erosion behavior of boric oxide-reinforced silver-based electrical contact materials produced by mechanical alloying. *Journal of Electronic Materials*, 44(1), 457-466. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3399-4>.
- [11] Guler, O., Varol, T., Alver, U., & Biyik, S. (2021). The wear and arc erosion behavior of novel copper based functionally graded electrical contact materials fabricated by hot pressing assisted electroless plating. *Advanced Powder Technology*, 32(8), 2873-2890. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.05.053>.
- [12] Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yıldırım, R. O., & Keleş, Ö. (2014). The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy. *Materials & Design*, 56, 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.092>.
- [13] Ansari, A., Akbari, T., & Pishbijari, M. R. (2023). Investigation on the ballistic performance of the aluminum matrix composite armor with ceramic balls reinforcement under high velocity impact. *Defence Technology*, Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.01.015>.
- [14] Karabulut, Ş., Karakoç, H., Bilgin, M., Canpolat, H., Krolczyk, G. M., & Sarıkaya, M. (2023). A comparative study on mechanical and ballistic performance of functionally graded Al6061 composites reinforced with B₄C, SiC, and Al₂O₃. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5050-5065. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.116>.
- [15] Saravanan, R., Gnanavel, C., Daniel, S. A. A., Rajesh, S., Kamatchi, T., Anbuhezhiyan, G., & Sreekanth, S. (2023). Analysis of mechanical properties enhancement on composites of AA7175 by multi walled carbon nano tube (MWCNT). *Materials Today: Proceedings*. Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.788>.
- [16] Ibrahim, T. K., Yawas, D. S., Dan-Asabe, B., & Adebisi, A. A. (2023). Taguchi optimization and modelling of stir casting process parameters on the percentage elongation of aluminium, pumice and carbonated coal composite. *Scientific Reports*, 13(1), 2915. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29839-8>.
- [17] Mazahery, A., Abdizadeh, H., & Baharvandi, H. R. (2009). Development of high-performance A356/nano-Al₂O₃ composites. *Materials Science and Engineering: A*, 518(1-2), 61-64. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.04.014>.
- [18] Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2011). Prediction of wear properties in A356 matrix composite reinforced with B₄C particulates. *Synthetic Metals*, 161(13-14), 1226-1231. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.04.009>.
- [19] Abbasipour, B., Niroumand, B. & Vaghefi, S. M. (2010). Compocasting of A356-CNT composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(9), 1561-1566. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60339-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60339-3).
- [20] Pérez-Bustamante, R., Pérez-Bustamante, F., Estrada-Guel, I., Licea-Jiménez, L., Miki-Yoshida, M., & Martínez-Sánchez, R. (2013). Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/Al₂O₃ composites produced by mechanical alloying. *Materials Characterization*, 75, 13-19. (<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.09.005>).
- [21] Uzun, A., Karakoc, H., Gökmen, U., Cinici, H., & Türker, M. (2016). Investigation of mechanical properties of tubular aluminum foams. *International Journal of Materials Research*, 107(11), 996-1004. <https://doi.org/10.3139/146.111430>.
- [22] Chen, H. S., Wang, W. X., Nie, H. H., Zhou, J., Li, Y. L., Liu, R. F., & Zhang, P. (2018). Microstructure evolution and mechanical properties of B₄C/6061Al neutron absorber composite sheets fabricated by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 730, 342-351. (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.312>).
- [23] Gökmen, U. (2016). Fabrication and Characterization of Hot Extruded Hybrid Composites Al 2024 Matrix Reinforced With B₄C/Al₂O₃. *Journal of Polytechnic*,

- 19(4), 445-453. <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33093/368268>.
- [24] Şimşek, İ., Şimşek, D., & Özyürek, D. (2019). The corrosion behaviours in different solutions of B4C reinforcement aluminium matrix composites. *Journal of Boron*, 5(1), 23-28. <https://doi.org/10.30728/boron.659969>.
- [25] Polmear, I. J. (2006). *Light alloys: From traditional alloys to nanocrystals*. Elsevier. ISBN 9780750663717.
- [26] Zolotarevskii, V., Belov, N., Glazoff, M., & Davis, J. (2007). *Casting aluminum alloys*. Elsevier. ISBN 9780080550237.
- [27] Zhou, D., Qiu, F., & Jiang, Q. (2015). The nano-sized TiC particle reinforced Al-Cu matrix composite with superior tensile ductility. *Materials Science and Engineering: A*, 622, 189-193. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.006>.
- [28] Zhou, D., Qiu, F., & Jiang, Q. (2014). Simultaneously increasing the strength and ductility of nano-sized TiN particle reinforced Al-Cu matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 596, 98-102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.12.049>.
- [29] Tian, W. S., Zhao, Q. L., Zhang, Q. Q., Qiu, F., & Jiang, Q. C. (2018). Simultaneously increasing the high-temperature tensile strength and ductility of nano-sized TiCp reinforced Al-Cu matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 717, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.069>.
- [30] Zhang, L. J., Qiu, F., Wang, J. G., & Jiang, Q. C. (2015). High strength and good ductility at elevated temperature of nano-SiCp/Al2014 composites fabricated by semi-solid stir casting combined with hot extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 626, 338-341. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.089>.
- [31] Özdemir, İ. (2018). *Fractional factorial design and Taguchi method application on the production of composite material*. (M. Sc. Thesis, Ondokuz Mayıs University) Council of Higher Education Thesis Center (Thesis Number 494867).
- [32] Şirvancı, M. (1997). *Kalite için deney tasarımı "Taguchi yaklaşımı"* [Experimental design for quality "Taguchi approach"]. Literatür. ISBN:9789757860877.
- [33] ASTM B962-17. (2017). Standard test methods for density of compacted or sintered powder metallurgy (PM) products using Archimedes' principle. *ASTM International*.
- [34] Vairamuthu, J., Senthil Kumar, A., Stalin, B., & Ravichandran, M. (2020). Optimization of powder metallurgy parameters of TiC-and B4C-reinforced aluminium composites by Taguchi method. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 45(2), 249-261. (<https://doi.org/10.1139/tcsme-2020-0091>).
- [35] Usca, Ü. A., Uzun, M., Kuntoğlu, M., Şap, S., Giasin, K., & Pimenov, D. Y. (2021). Tribological aspects, optimization and analysis of Cu-B-CrC composites fabricated by powder metallurgy. *Materials*, 14(15), 4217. <https://doi.org/10.3390/ma14154217>.
- [36] Hussain, M. Z., Khan, S., & Sarmah, P. (2020). Optimization of powder metallurgy processing parameters of Al2O3/Cu composite through Taguchi method with Grey relational analysis. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(4), 274-286. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.01.003>.
- [37] Kaya, A., Aslan, M., Yilmaz, N. F., & Kurt, H. (2020). Taguchi Analysis of Apparent Densities of Al-Mg-SiC Composites. *El-Cezeri*, 7(2), 773-780. (<https://doi.org/10.31202/ecjse.695249>).
- [38] Çetin, M. H. (2010). *Investigation of vegetable-based cutting fluids performance in turning*. (M.Sc. Thesis, Gebze Institute of Technology) Council of Higher Education Thesis Center (Thesis Number 271585).
- [39] Nas, E., Altan Özbek, N. (2020). Optimization of the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools. *Surface Review and Letters*, 27(5), 1950177. <https://doi.org/10.1142/S0218625X19501774>.