



Makale / Research Paper

Al-Mg-SiC Kompozitlerin Görünür Yoğunluklarının Taguchi Analizi

Abdulaziz KAYA^{1*}, Mikail ASLAN¹, Necip Fazıl YILMAZ² Halil İbrahim KURT¹

^aGaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 27310 Gaziantep/TÜRKİYE

^bGaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 27310 Gaziantep/TÜRKİYE

Received/Geliş: 26.02.2020

Accepted/Kabul: 21.04.2020

Özet: Toz metalurjisi yöntemi, alüminyum alaşımı esaslı metal matris kompozitlerinin üretimi için diğer geleneksel yöntemlere göre umut vadeden alternatif bir yöntemdir. Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanan SiC içeren alüminyum alaşım esaslı metal matris kompozitlerin işlem parametrelerinin Taguchi ve Varyans Analizi (ANOVA) yaklaşımı ile görünür yoğunluk üzerine etkisi araştırılmıştır. Taguchi'nin L16 dikey dizisi, minimum görünür yoğunluk elde etmek amacıyla işlem parametrelerini optimize etmek için kullanılmıştır. Dikkate alınan parametreler; ağırlıkça SiC oranı (%15 ve 30), sıkıştırma basıncı (260 ve 520 MPa), sinterleme sıcaklığı (300 ve 500°C) ve sinterleme zamanı (30 ve 90 dk.) ve bununla birlikte çıkış parametresi de görünür yoğunluktur. ANOVA, her bir parametrenin çıkış parametresi üzerindeki etkisini belirlemek için deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sinyal-gürültü oranlarının ve ANOVA analizine dayanarak, toz metalurjisi işlem parametrelerinin (yani ağırlıkça SiC oranı, sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme zamanı) optimum değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, ağırlıkça SiC oranının görünür yoğunluk üzerinde en fazla etkiye sahip faktör olduğunu göstermektedir. İşlem parametrelerinin görünür yoğunluk üzerindeki etkileşim etkisini incelemek için etkileşim grafikleri oluşturulmuştur. Buna ek olarak; görünür yoğunluğu tahmin etmek için, regresyon analizi kullanılarak deneysel bir model geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Taguchi, Toz metalurjisi, Kompozit, SiC.

Taguchi Analysis of Apparent Densities of Al-Mg-SiC Composites

Abstract: Powder metallurgy processing is a promising alternative to other conventional methods for the production of aluminum alloy based metal matrix composites. In this study, the influence of process parameters on the apparent density values of the aluminum alloy based metal matrix composites containing SiC prepared via powder metallurgy method was investigated using the Taguchi and Analysis of Variance (ANOVA) approach. A Taguchi's L16 orthogonal array was used to optimize process parameters to obtain minimum apparent density. The parameters considered were wt.% of SiC (15 and 30%), compaction pressure (260 and 520 MPa), sintering temperature (300 and 500°C) and sintering time (30 and 90 min) with apparent density as the response factor. ANOVA was performed using the experimental data to determine the effect of each parameter on the response parameter. Based on an analysis of the signal-to-noise ratios and ANOVA, the optimal values of powder metallurgy processing parameters (i.e., wt.% of SiC, compaction pressure, sintering temperature and time) were determined. The results indicate that wt.% of SiC is the factor having the most effect on apparent density. Interaction plots were generated to study the interaction effect of process parameters on apparent density. In addition to this, an empirical model for predicting apparent density was developed by using regression analysis.

Keywords: Taguchi, Powder metallurgy, Composite, SiC.

1. Giriş

Metal matris kompozit malzemelerin tasarımındaki amaç, metallerin ve seramiklerin istenilen özelliklerini bir araya getirmektir. Sünek metal matrisine, yüksek mukavemet ve yüksek esneklik

Bu makaleye atıf yapmak için

Kaya, A., Aslan, M., Yılmaz, N. F., Kurt, H. İ., "Al-Mg-SiC Kompozitlerin Görünür Yoğunluklarının Taguchi Analizi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (2); 773-780.

How to cite this article

Kaya, A., Aslan, M., Yılmaz, N. F., Kurt, H. İ., "Taguchi Analysis of Apparent Densities of Al-Mg-SiC Composites" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2); 773-780.

modülüne sahip refrakter parçacıkların eklenmesi, mekanik özellikleri matris alaşım ve seramik takviyenin mekanik özelliklerinin birleşimi olan kompozit bir malzeme üretilmesine yol açar [1]. Alüminyumun metal matris kompozitlerin kullanımında üretilen kompozitin mukavemet artışının diğer metallerin kullanımındaki mukavemet artışına göre daha fazla olması, metal matris kompozitlerde genellikle matris malzemesi olarak alüminyum ve alaşımları kullanılmasına yol açmıştır [2]. Ayrıca, alüminyum ve alaşımları bakır, çelik ve titanyum alaşımlarına göre düşük yoğunluk değerlerine sahiptir [3]. Matrisin özelliklerinin yanı sıra, güçlendiricinin morfolojisi, özellikleri, oranı ve dağılımı kompozitin özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir [4-6]. Yani, güçlendirici ile matrisin uyumluluğu da önemli bir konudur. SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitler, düşük ısıl genişleme katsayısı, yüksek özgül mukavemet ve ısıl iletkenliği sayesinde elektronik alanlardaki ambalajlarda, havacılık, askeri ve otomotiv gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [7-9].

Kompozit üretiminde birçok yöntem kullanılmakta olup bu yöntemler birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir [11-12]. Toz metalurjisi yöntemi; düşük üretim maliyetine ve yüksek toleransa sahip olması, yoğunlukları farklı matris ve takviyenin homojen karışımının sağlanması ve üretim sonrasında ikinci işleme sürecine ihtiyaç duyulmaması gibi önemli avantajlara sahip bir yöntemdir [11]. Bütün üretim yöntemlerinde karşılaşılan ve engellenmek istenen en önemli sorunlardan biri porozite içeriği olup bu da doğrudan yoğunlukla ilgilidir. Yeni mühendislik çalışmalarında en önemli hedeflerden biri ise malzemenin iyi olan özelliklerinin korunarak zayıf özelliklerini geliştirmek ve tüm bunları yaparken minimum yoğunluk değerleri elde etmektir. Bu nedenle son yıllarda en çok çalışılan konu, alüminyum ve artan bir şekilde magnezyum alaşımlarıdır [14, 15]. Bu çalışmada, toz metalurji yöntemiyle üretilen SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin yoğunluklarının, Taguchi ve ANOVA yöntemleriyle analiz edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Ağırlıkça %15 ve %30 oranında SiC katkılı alüminyum alaşımlı matris kompozitler (Al-Mg-SiC) toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanmıştır. Metal matris ile takviye arasındaki ıslatılabilirliği sağlamak için alüminyum alaşımına, matris malzemesinin ağırlıkça %7,5'ini oluşturacak şekilde magnezyum ilave edilmiştir.

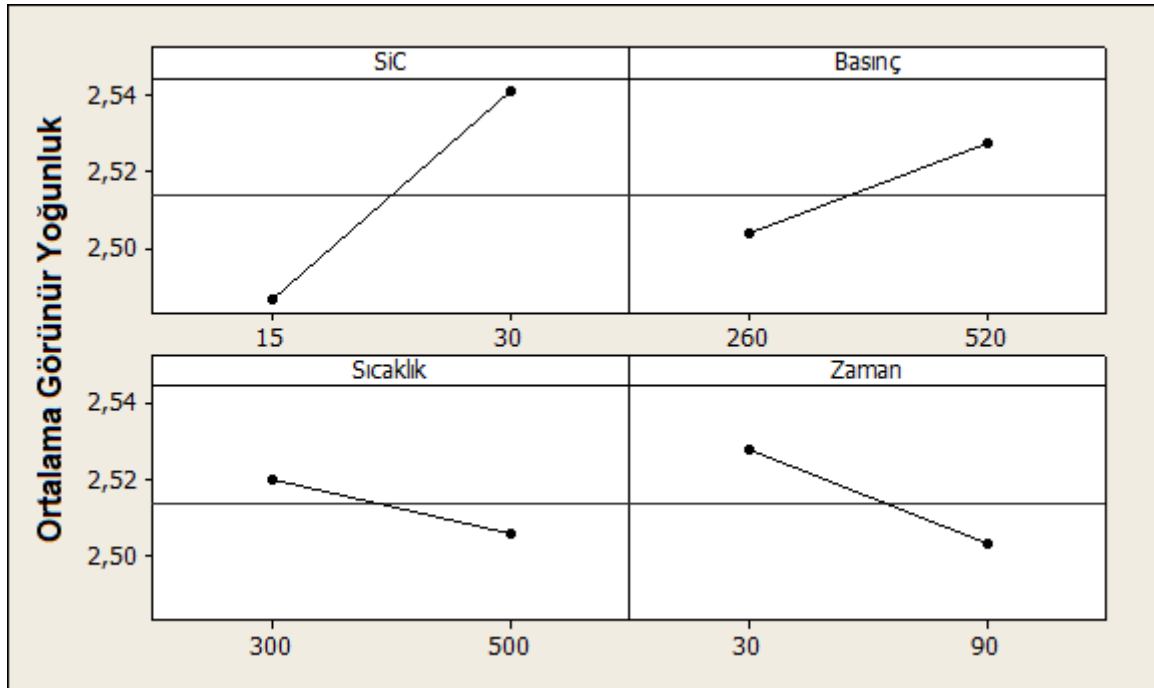
Tablo 1. Sistemde kullanılan parametreler

| Ağırlıkça SiC oranı (%) | Basınç (MPa) | Sıcaklık (°C) | Zaman (dk.) | Görünür yoğunluk (g/cm ³) |
|-------------------------|--------------|---------------|-------------|---------------------------------------|
| 15 | 260 | 300 | 30 | 2,510 |
| 15 | 260 | 300 | 90 | 2,445 |
| 15 | 260 | 500 | 30 | 2,359 |
| 15 | 260 | 500 | 90 | 2,541 |
| 15 | 520 | 300 | 30 | 2,538 |
| 15 | 520 | 300 | 90 | 2,439 |
| 15 | 520 | 500 | 30 | - |
| 15 | 520 | 500 | 90 | 2,574 |
| 30 | 260 | 300 | 30 | 2,619 |
| 30 | 260 | 300 | 90 | 2,539 |
| 30 | 260 | 500 | 30 | 2,547 |
| 30 | 260 | 500 | 90 | 2,473 |
| 30 | 520 | 300 | 30 | 2,595 |
| 30 | 520 | 300 | 90 | 2,474 |
| 30 | 520 | 500 | 30 | - |
| 30 | 520 | 500 | 90 | 2,542 |

Üretilen Al-Mg-SiC kompozitlerin görünür yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür [16]. Bu çalışmada, Al-Mg-SiC kompozitlerin toz metalurjisi işlem parametreleri Taguchi ve ANOVA yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir [17, 18]. Al-Mg-SiC kompozitlerinin görünür yoğunluklarını etkileyen dört işlem parametresi, ağırlıkça SiC oranı (%), basınç (MPa), sinterleme sıcaklığı (°C) ve zamanı (dk.) olarak belirlenmiştir. Tablo 1, toz metalurjisi işlem parametrelerinin (ağırlıkça SiC oranı, basınç, sinterleme sıcaklığı ve zamanı) parametrik değerlerini ve her deneysel çalışmaya karşılık gelen çıkış parametresine (görünür yoğunluklarını) ait değerleri göstermektedir. Tasarım matrisini geliştirmek için Minitab istatistik yazılımı kullanılmıştır. Analiz için Taguchi L16(2**4) ortogonal dizi tasarımı seçilmiştir. Bu tasarım 2 seviye ve 4 faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Ortogonal dizi az sayıda deney ile tüm parametre alanını belirlemek için özel bir tasarım oluşturmak amacıyla kullanılır. S/N oranı (Sinyal/Gürültü), ortogonal dizi tasarımından elde edilen deneysel sonuçları analiz etmek için kullanılır. S/N oranlarının hesaplamasında karakteristik tipine bağlı olarak “daha küçük daha iyidir”, “daha büyük daha iyidir” veya “nominal daha iyidir” yöntemleri kullanılır [19]. Bu çalışmadaki S/N oranlarının belirlenmesinde, minimum görünür yoğunluk değerleri istenildiği için “daha küçük daha iyidir” yöntemi kullanılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

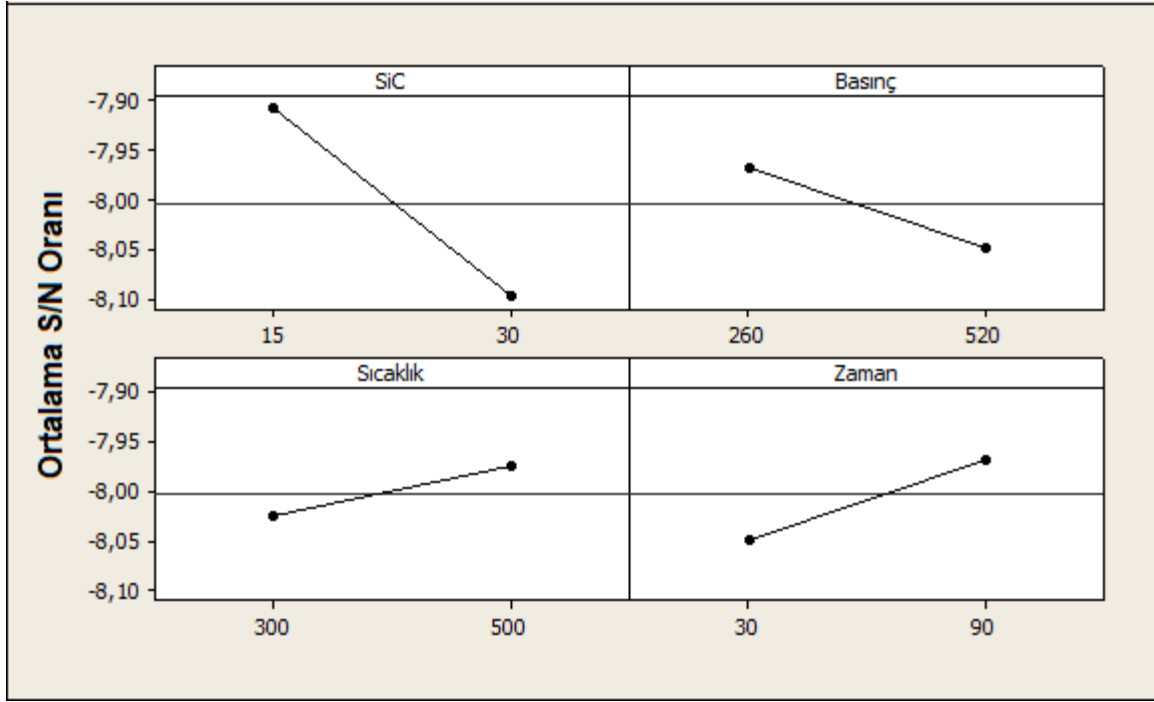
Veri grupları arasındaki farklılıkları veya benzerlikleri düzeltmek için kullanılan istatistiksel bir araç olan deneysel tasarım (DOE) ve ANOVA, işlem parametrelerinin çıktı değeri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak için kullanılmaktadır. Deneylerin tasarlanmasında, Taguchi yöntemi kullanılmıştır. S/N oranındaki sinyal ve gürültü istenen ve istenmeyen değerlerdir. Bu oran, sürecin performansını ve önemini hesaplamak için yaygın olarak kullanılır. Görünür yoğunluk için kontrol faktörlerinin yani toz metalurjisi işlem parametrelerinin optimum değerlerini gösteren ortalama görünür yoğunluk ve S/N oranlarının ana etki grafiği sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Ortalama görünür yoğunluk değeri için ana etki grafiği

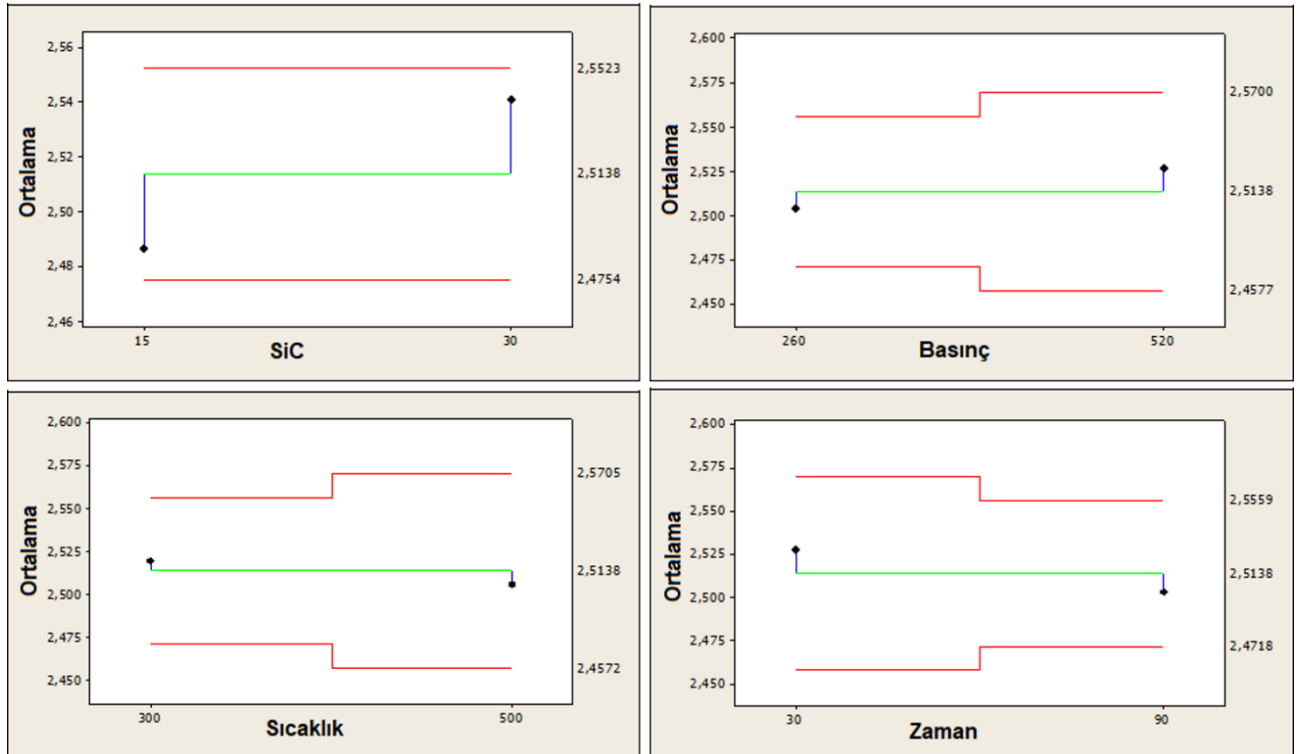
S/N oranı ne kadar yüksek olursa, o kadar doğru veri ve herhangi bir giriş parametresi ile çıkış parametresi arasındaki yakın ilişki anlamına gelir. Özellikleri ne olursa olsun, herhangi bir parametrenin tüm seviyeleri içerisinde en büyük S/N oranına sahip seviye, o parametre için en iyi performans elde edilen seviye anlamına gelmektedir. Bu nedenle, bu seviyeye o parametre için optimum seviye denir. Taguchi metodu ile Şekil 2’den, Tablo 1’de verilen kontrol parametrelerinin

optimum seviyeleri belirlenmiştir. Buna göre Al-Mg-SiC kompozitlerinde optimum görünür yoğunluk değeri; ağırlıkça SiC oranının birinci seviyesinde (15%), basıncın birinci seviyesinde (260 MPa), sinterleme sıcaklığının ikinci seviyesinde (500°C) ve sinterleme zamanının ikinci seviyesinde (90 dk.) elde edilmiştir.



Şekil 2. Görünür yoğunluk değerinin S/N oranları için ana etki grafiği

Verilen grafikler ışığında, düşük yoğunluk elde edebilmek için ağırlıkça %15 SiC oranının, uygulanacak basıncın 260 MPa, sinterleme sıcaklığının 500°C ve sinterleme zamanının 90 dk. olması gerektiği tespit edilmiştir. Bu varsayım ANOM analizi (Şekil 3) ile doğrulanmıştır. Sonuçlar benzer çalışmalarda da görülmektedir [20, 21].



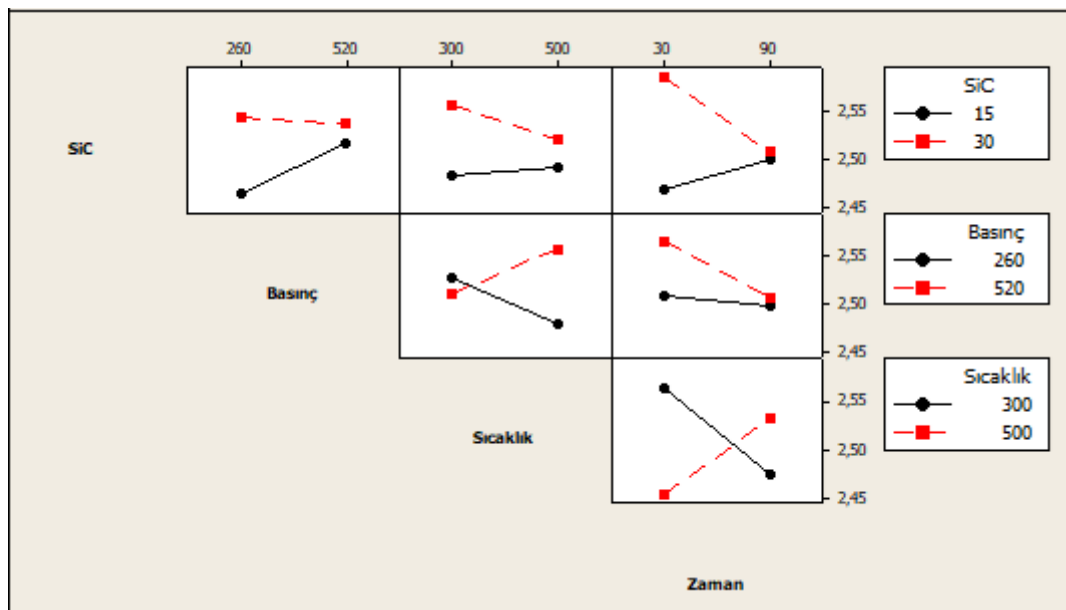
Şekil 3. Görünür yoğunluk için ANOM analizi, α=0,05

Tablo 2, deney değişkenlerinin Delta ve Rank (sıra) değerlerini göstermektedir. Delta S/N deki maksimum ve minimum arasındaki fark olup, Rank ise üretilen kompozitlerin yoğunlukları üzerinde hangi değişkenin daha etkili olduğunu göstermektedir. Ağırlıkça SiC oranı görünür yoğunluk üzerinde en büyük etkiye sahipken sıcaklık diğer değişkenlere göre en düşük etkiye sahip olduğu görülebilir.

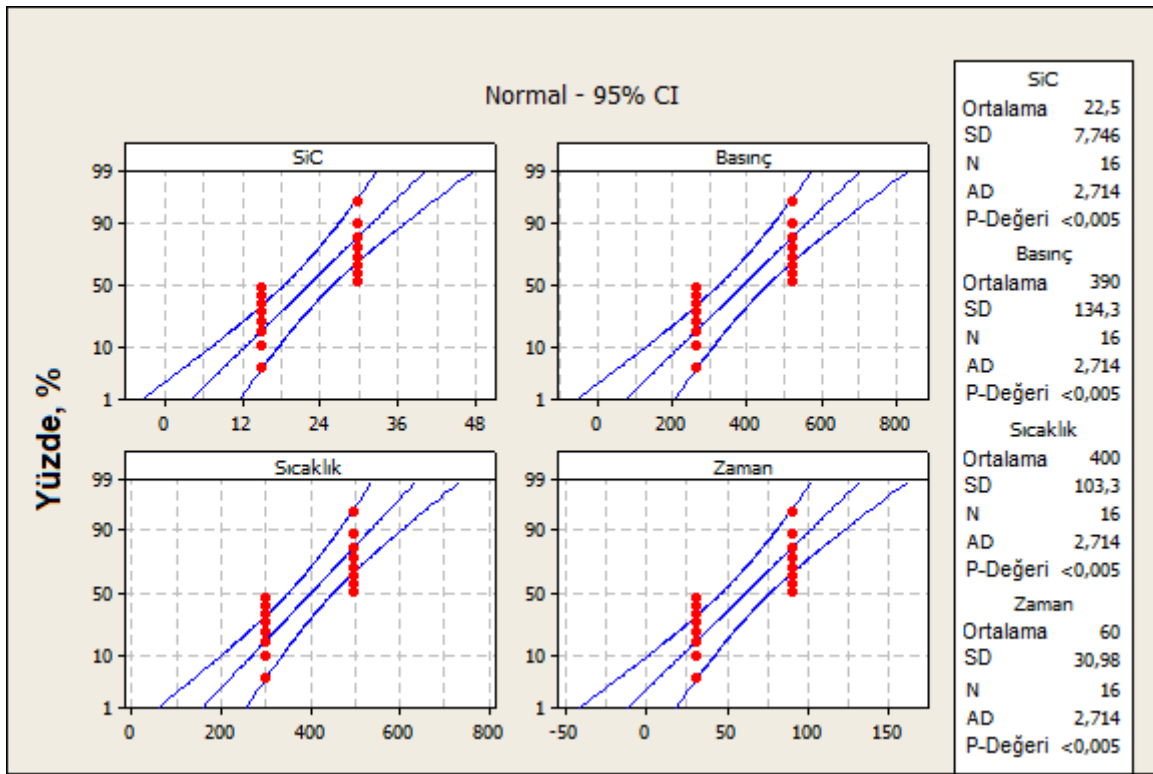
Tablo 2. Değişkenlerin etkisi

| | Ağırlıkça SiC Oranı | Basınç | Sıcaklık | Zaman |
|-------|---------------------|--------|----------|-------|
| Delta | 0,055 | 0,023 | 0,014 | 0,024 |
| Rank | 1 | 3 | 4 | 2 |

Etkileşim grafiği, diğer değişkenleri optimize seviyelerinde sabitleyerek iki değişken arasındaki etkileşimin Al-Mg-SiC kompozitlerinin görünür yoğunluk değerleri üzerindeki etkisini analiz etmeye yardımcı olur. Herhangi bir bireysel faktör, diğer faktörlerin herhangi biri veya tümü ile etkileşime girerek çok sayıda etkileşim olasılığını yaratır. Giriş parametrelerinin etkileşim grafiği Şekil 4'te gösterilmektedir ve herhangi iki değişkenin olası tüm kombinasyonlarındaki ortalama etkisini temsil etmektedir. Bu grafiklerden, parametreler arasındaki etkileşimin görünür yoğunluk değerleri ve parametreler arasındaki ilişkiyi nasıl etkilediğini değerlendirmek daha kolaydır. Bu grafikleri yorumlarsak, parametreler arasında herhangi bir etkileşim meydana gelmediğini gösteren paralel olan çizgiler ve parametreler arasında bir etkileşim olduğunu gösteren paralel olmayan çizgiler olarak iki tür grafik çizgisi vardır. Gerçekte, çizgiler ne kadar paralel değilse, etkileşimin gücü o kadar fazla olur. Şekil 4'deki parametre etkileşim grafikleri incelendiğinde; ağırlıkça SiC oranı-zaman, basınç-sıcaklık ve sıcaklık-zaman etkileşimlerine ait eğrilerin yüksek eğime sahip olması bu etkileşimlerin güçlü olduğunu göstermektedir. Ağırlıkça SiC oranı ve basınç arasında ağırlıkça %15 SiC oranında güçlü bir etkileşim mevcuttur fakat ağırlıkça %30 SiC oranında orta düzeyde bir etkileşim mevcuttur. Tersine, ağırlıkça SiC oranı ve sıcaklık arasındaki etkileşimi incelersek, ağırlıkça %15 SiC oranında orta düzeyde bir etkileşim mevcuttur fakat ağırlıkça %30 SiC oranında güçlü düzeyde bir etkileşim mevcuttur. Son olarak, basınç ve zaman arasında 260 MPa basınçta orta düzeyde bir etkileşim mevcuttur fakat 520 MPa basınçta güçlü bir etkileşim mevcuttur.



Şekil 4. Giriş parametrelerinin etkileşim grafiği



Şekil 5. Giriş parametrelerinin olasılık grafikleri

Yapılan istatistiksel ve Taguchi analizleri sonucunda çıkış parametresi yani görünür yoğunluğunun giriş parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiğini modelleyen regresyon denklemi olarak Eşitlik 1'de verilen denklem elde edilmiştir. Burada; “ ρ ” yoğunluk değerini, “ w ” ağırlıkça SiC oranını, “ P ” basınç değerini, “ T ” sıcaklık değerini ve “ t ” zaman değerini ifade etmektedir.

$$\rho = 2,43 + 0,00364w + 0,000104P - 0,00002t \quad (1)$$

Bu regresyon denklemi Tablo 1’ de verilen aralıklar dahilinde seçilen giriş parametrelerinin herhangi bir kombinasyonu için görünür yoğunluk değerini tahmin etmek için yararlıdır.

Şekil 5, giriş parametrelerinin (ağırlıkça SiC oranı, basınç, sıcaklık ve zaman) modellenmiş veriyi ne derecede takip ettiğini veya ne kadar uyduğunu gösteren olasılık grafikleridir. Genel anlamda uyumluluk değişimleri büyük benzerlik göstermektedir. Standart sapma değeri ağırlıkça SiC oranı için minimum seviyede ve basınç için maksimum seviyededir. P-değerleri ise 0,005 den küçük olmakta ve sistem değişkenlerinin anlam seviyesini göstermektedir. Beklediğimiz gibi bu değişkenlerin birbiri ile uyumunun anlamlı olduğunu söyleyebiliriz.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-Mg-SiC kompozitlerin görünür yoğunluk değerleri Taguchi ve ANOVA yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Toz metalurjisi işlem parametreleri olan ağırlıkça SiC oranının, basıncın, sıcaklığın ve zamanın 2 farklı seviyesi için Minitab programında Taguchi metodu kullanılarak L16 ortogonal dizilim elde edilmiştir. Bu sayede tam faktöriyel 64 deney yerine 16 deney yapılarak optimum performans kriterleri daha kısa süre içerisinde belirlenmiştir. Taguchi analizi sonucu elde edilen ortalama S/N oranlarının en yüksek değerlerinin alınmasıyla; ağırlıkça SiC oranının birinci seviyesi olan %15, basıncın birinci seviyesi olan 260 MPa, sıcaklığın ikinci seviyesi olan 500°C ve zamanın ikinci seviyesi olan 90 dk. değerleri optimum değerler olarak tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, görünür yoğunluk üzerindeki

en etkili parametrenin ağırlıkça SiC oranının, daha sonra sırasıyla zaman, basınç ve sıcaklığın etkili olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin birbiri üzerindeki etkileşiminin de etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar tasarımın güvenilir ve uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Teşekkür

10-12 Ekim 2019 tarihlerinde Gaziantep Üniversitesi'nde düzenlenen konferansta sunulan çalışmamızın seçimi dolayısıyla TICMET'19 organizasyon komitesine en derin teşekkürlerimizi sunmak istiyoruz.

Kaynaklar

- [1]. Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M.S.J., “Metal matrix composites: production by the stir casting method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999. 92: p. 1-7.
- [2]. Altunpak, Y. ve Akbulut, H., “ δ -Al₂O₃ Kısa Fiber Takviyeli LM 13 Alüminyum Alaşımının Eğilme Dayanımına Yaşlandırma Isıl İşleminin Etkisi”, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2019. 6(1): p. 175-180.
- [3]. Kurt, H. İ. “Optimization of Tensile Strength of Al Alloys with Mg and Ti”, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2017. 4(1): p. 25-31.
- [4]. Casati, R. ve Vedani, M. “Metal matrix composites reinforced by nano-particles—a review”, *Metals*, 2014. 4: p. 65-83.
- [5]. Tjong, S.C., “Novel nanoparticle-reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties”, *Advanced engineering materials*, 2007. 9(8): p. 639-652.
- [6]. Tjong, S.C., “8- Processing and Deformation Characteristics of Metals Reinforced with Ceramic Nanoparticles”, in *Nanocrystalline Materials (Second Edition)*, S.-C. Tjong, Editor. 2014, Elsevier: Oxford. p. 269-304.
- [7]. Molina, J.M., Saravanan, R.A., Arpon, R., Garcia-Cordovilla, C, Louis, E. ve Narciso, J., “Pressure infiltration of liquid aluminium into packed SiC particulate with a bimodal size distribution”, *Acta Materialia*, 2002. 50(2): p. 247-257.
- [8]. Zhang, Q., Ma, X. ve Wu, G., “Interfacial microstructure of SiCp/Al composite produced by the pressureless infiltration technique”, *Ceramics International*, 2013. 39(5): p. 4893-4897.
- [9]. Geiger, A.L., Hasselman, D.P.H., ve Welch, P., “Electrical and thermal conductivity of discontinuously reinforced aluminum composites at sub-ambient temperatures”, *Acta Materialia*, 1997. 45(9): p. 3911-3914.
- [10]. Abbasipour, B., Niroumand, B. ve Monir Vaghefi, S.M., “Compcasting of A356-CNT composite”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010. 20(9): p. 1561-1566.
- [11]. Abdizadeh, H., Vajargah, P. ve Baghchesara, M., “Fabrication of MgO nanoparticulates reinforced aluminum matrix composites using stir-casting method”, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2015. 53(5): p. 319-326.
- [12]. Anvari, S.R., Karimzadeh, F. ve Enayati, M.H., “Wear characteristics of Al–Cr–O surface nano-composite layer fabricated on Al6061 plate by friction stir processing”, *Wear*, 2013. 304(1–2): p. 144-151.
- [13]. Şimsek, İ. “Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Üretilen Farklı Miktarlarda ZrO₂ Takviyeli Al-2Gr Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performanslarının İncelenmesi”, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 2019. 6(3): p. 594-605.
- [14]. Jia, H., Feng, X. ve Yang, Y., “Effect of grain morphology on the degradation behavior of Mg-4 wt% Zn alloy in Hank's solution”, *Materials Science and Engineering: C*, 2020. 106: p. 110013.
- [15]. Zhang, Y.H., Ye, C.Y., Shen, Y.P., Chang, W., StJohn, D.H., Wang, G. ve Zhai, Q.J., “Grain refinement of hypoeutectic Al-7wt.%Si alloy induced by an Al–V–B master alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020. 812: p. 152022.

- [16]. Kurt, M., “SiC ve Al₂O₃ takviyeli Al-Mg kompozitin toz metalurjisi yöntemi ile üretiminin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [17]. Roy, R.K., “A primer on the Taguchi method”, 2010: Society of Manufacturing Engineers.
- [18]. Rama, R.S. ve Padmanabhan, G., “Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5% SiC composites”, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2012. 2(3): p. 192-197.
- [19]. Masmiafi, N. ve Sarhan, A.A.D., “Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress – Taguchi approach”, Measurement, 2015. 60: p. 267–275.
- [20]. Yilmaz, N.F., Kurt, H.İ., Oduncuoglu, M. ve Ergul, E., “Experimental and theoretical analysis of the welding process parameters for UTS with different methods”, Materials Research Express, 2018. 6(1): p. 016524.
- [21]. Rosa, J.L., Robin, A., Silva, M.B., Baldan, C.A. ve Peres, M.P., “Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach”, Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209(3): p. 1181-1188.