

Effect on the Mechanical Properties of Sintering Process of Aluminium Alloys

Onur Akkurt^a, Ayberk Altıntaş^a, Pınar Sarı Çavdar^b, Uğur Çavdar^{c,1}

^aMechanical Engineering Department, Manisa Celal Bayar University, Manisa, 45140, Turkey

^bCivil Engineering, İzmir Demokrasi University, İzmir, 35140, Turkey

^cMechanical Engineering Department, İzmir Demokrasi University, İzmir, 35140, Turkey

Abstract

Powder metallurgy (PM) compared with other known and conventional manufacturing technologies, machining process should not or less necessary requirement, as standard parts with complex geometry in a wide composition range can be manufactured serially, parts having mechanical properties desired material can be produced easily, such as being minimal losses as for these reasons finds widely used in industry. In addition, this production method has many advantages such as low investment costs, the equipment used in flexibility, high productivity, easy to produce materials with different properties. A large majority of product produced by powder metallurgy is used in the automotive industry. Powder metallurgy production method is developing in time in our country as well as all over the world. Sintering is one of the most complex issues of powder metallurgy. Sintering is heating process which causes substantially increased strength and improvement mechanical properties of particles will bond together. Sintering enables the connection to particles of contacting each other at high temperature. This connection may consist of solid atomic movements below the melting temperature but in many cases, it is accompanied by generation liquid phase. Sintering occurs with diffusion of atoms at high temperature and reduction of small particles surface energy. The purpose of this work that we have done, in aluminium alloys that is widely used in daily life and therefore in industry, it is to show the effects of the sintering process

Keywords: “Aluminium, Industry, Sintering, Manufacturing Technologies, Powder Metallurgy”

1. Giriş

Seramik ve metal tozlarının sıcaklık ve basınç ayrı ayrı ya da birlikte mukavim katı parça haline getirilmesi işlemine toz metalürjisi (T/M) yöntemi olarak adlandırılır. İstenilen özelliklerde ve şekillerde parçaların üretilmesi için kullanılır [1]. T/M, dökümde olduğu gibi net şekilli parça üretimini sağlayabilir. Döküm tekniği her malzemeye uygulanamayabilirken toz teknikleri hemen hemen her malzemeye uygulanabilir [2]. T/M, geleneksel toz üretim metodları ve teknolojileri ile karşılaştırıldığında; nihai ürünü üretirken talaşlı işleme ihtiyacına gerek duyulmaktadır, ya da sadece sonlanma işlemlerindeki ufak detayların düzeltilmesi için gerek duyulmaktadır. Döküm yöntemi ile kıyaslandığında, karmaşık geometriye sahip parçaların istenilen malzeme özellikleri elde edilebilmesi için istenilen katkı oranlarındaki tozların homojen olarak ve sinterlenerek seri olarak üretilmesiyle, ihtiyaç duyulan mekanik özellikler de neredeyse kayıpsız malzemeler üretilmediği için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [3-5]. Ayrıca T/M yöntemi kullanılarak parça üretimi ile nispeten düşük yatırım maliyetleri sayesinde, üretilen malzemelerde esneklik, tokluk, sertlik, yoğunluk gibi birçok özelliği kontrol etmemiz mümkündür [6]. T/M ile üretilen ürünler otomotiv, uçak, uzay, makine ve ekipmanları sektörlerinde kullanılmaktadır. Özellikle otomobil transmisyon millerinde, dişli çarklarında, burçlarında bu üretim tekniğinin kullanılmaktadır [7]. Ayrıca, elektrik kontakları, ofis makine parçaları, ortopedik gereçler, yağlamasız yataklar, tungsten lamba filamentleri, dişli çarklar, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak ve kara araçlarının fren balataları, jet motor parçaları, katalizörler, lehimleme aletleri, nükleer güç yakıt elemanları, kaynak elektrotları, devre levhaları, dişçilik gibi uygulama alanları vardır. [8]

¹ Sorumlu Yazar. Tel.: +0-232-260-1001 ; fax: +0-232-260-1004 .
E-posta adresi: ugur.cavdar@idu.edu.tr

1.1. T/M Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Günümüzde üretim metotları arasında en çok kullanılan döküm ile üretilmesi, talaşlı imalat ile işlenmesi ve plastik şekil verme ile şekillendirilmesi zor olan parçaların daha hızlı ve daha ekonomik olarak üretilmesi T/M yöntemi ile sağlanmaktadır. Bu yüzden birçok yöntem yerine günümüzde tercihe edilmeye başlamıştır. T/M ile diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında avantajları aşağıda verilmiştir;

- Üretim hızı yüksektir, işgücü ihtiyacı azdır,
- Hassas ve karmaşık şekilli parçaların kolay üretilmesini sağlar,
- Birbiri içinde çözünmeyen malzemelerin bile bu yöntem ile bir araya getirilerek üretilmesi mümkündür,
- Kayıp malzeme miktarı çok azdır ve 10.000 parçadan fazla üretim yapılacaksa çok düşük maliyetlerde üretim sağlanabilir,
- Üretim hızı yüksektir, işgücü ihtiyacı azdır,
- Filtre gibi malzemelerin üretiminde istenilen boşluk miktarı kolaylıkla sağlanmaktadır.

T/M yönteminin dezavantajları aşağıda verilmiştir;

- T/M malzemelerin gözenekli yapısından dolayı bazı yöntemlere göre zaman düşük mekanik özellikler elde edilebilir.
- T/M parçaların kompakt hale getirilmesi için kullanılan kalıpların maliyeti yüksektir, bu yüzden en az 10.000 paça için kalıp tasarımı yapılmaktadır.
- Kompakt hale getirilen parçaların, kalıp içerisinden zarar görmeden çıkartılabilmesi için kalıp geometrisi kısıtlayıcı bir etkidir.
- Preslenen parçaların tüm kesitinde heterojen basınç dağılımı meydana gelmesi durumunda parçanın homojen bir yoğunluk oluşturamaması durumu meydana gelebilir [9-10].

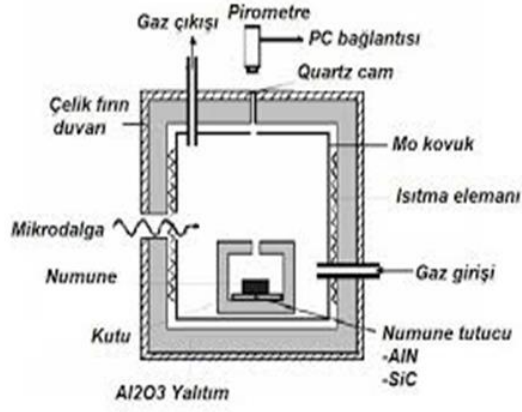
2. Sinterleme

Sinterleme, çok yüksek sıcaklıklarda toz partiküllerinin birbirine sağlayan ve malzemenin mukavemet kazanmasını sağlayan ısıl işlemdir. Bu işlem ergime noktası altındaki sıcaklıklarda katı-hal atom taşınım olaylarıyla meydana getirilebilir. Mikro yapısal boyutlarda incelenirse bu bağlanmanın partiküller arasında gerçekleşen boyun verme işlemiyle gerçekleştiği görülebilir. Böylece boyun büyümesi meydana gelir. Bu boyun büyümesi ile malzemenin özelliklerinde değişimler meydana gelebilir [11].

Sinterleme ile birleştirme işlemlerinde genellikle demir esaslı toz metal parçalar ile düşük alaşımlı karbon çelikleri birlikte kullanılmaktadır. Avşar et al. (2010) yaptığı çalışmada toz alaşımlarının ve toz tane boyutlarının dayanımları incelemiş ve bağ dayanım değerlerinin 50-270 MPa arasında değiştiğini görmüşlerdir [12]. Sinterleme işlemi günümüzün popüler konularından olup bu konu hakkında, yapay sinir ağlarından, stres modellemelerine kadar pek çok çalışma alanı oluşturulmuştur [13-16]

2.1. Günümüzde Kullanılan Yeni ve Hızlı Sinterleme Metodları

İlk yöntem olan mikrodalga sinterleme metodu en çok seramik malzemelerin sinterlenmesi için kullanılmıştır. Elektromanyetik dalga yardımıyla çok yüksek frekans üretilmektedir. Ev tipi mikrodalga fırınlarından çok daha yüksek güce sahiptir. Bu yöntemle sadece seramik malzemeler değil metalik malzemeler de sinterlenebilmektedir [17]. Yaygın olarak kullanılan mikrodalga sinterleme prosesinin şematik görünümü Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Mikrodalga sinterleme sistemi şematik görünümü

Menezes et al. (2010) [18], Lefevre et al. (2010) [19], Cheng et al. (2002) [20], Sujith et al. (2009) [21] seramik malzemelerin mikrodalga sinterlenmesi ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

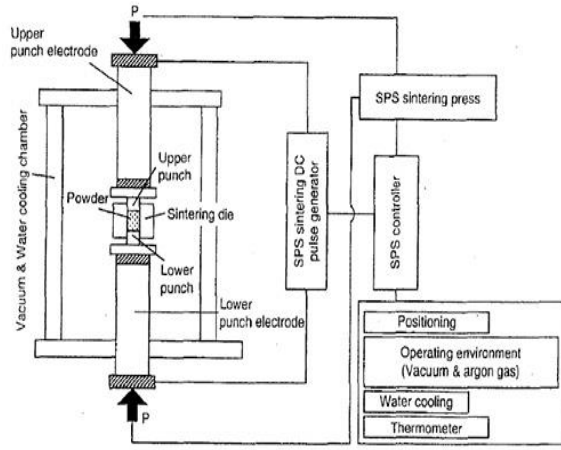
İndüksiyonla sinterleme metodunda ise çok kısa sürelerde çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılabilir. Geleneksel sinterleme metoduyla kıyaslandığında sinterleme esnasında malzemede oluşabilecek tane büyümeleri indüksiyonla sinterleme esnasında gerçekleşmeyebilir. Isı transferi diğer ısıtma sistemlerinden kat kat çok daha iyidir [22].

Çavdar ve Atik (2008) [23], Kim et al. (2015) [24], Sarı Çavdar ve Çavdar (2015) [25] malzemelerin yüksek frekanslı indüksiyonla sinterlenmesiyle ilgili çalışmalar yapmıştır. Yüksek frekanslı indüksiyonla sinterleme sisteminin resmi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yüksek frekanslı indüksiyonla sinterleme sistemi [26]

Plazma sinterleme metodu da yaygın olarak kullanılan ısıl işlem metodlarından biridir. Uygulama olarak mikrodalga sinterlemeye benzer ancak kendisi has termal ortamıyla kısa sürelerde sinterleme işleminin yapılmasına ortam hazırlar. Genellikle alumina gibi belli başlı seramik malzemelerde uygulamaları vardır [25-29]. Spark plazma sinterleme işleminin şematik görünümü Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Spark plazma sinterleme prosesi şematik görünümü [28]

Bu sinterleme metoduyla ilgili Santanach et al. (2011) [29], Nieto et al. (2015) [30], Liu et al. (2013) [31] çalışmalar yapmış kompozit malzemeler üreten malzemelerin mekanik ve diğer özelliklerini incelemişlerdir.

Bu metodlar dışında ayrıca deşarj sinterleme ve lazer sinterleme gibi farklı metodlar da bulunmaktadır.

3. Alüminyum Alaşımları ve Özellikleri

Alüminyum ve alaşımları demir esaslı malzemelerden sonra en yaygın bir biçimde kullanılan endüstriyel malzemelerdendir. İleri teknolojinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanıldığı kadar en basit, günlük hayatta ihtiyaç durumlarında da kullanılabilir. Tercih edilmesinde birçok neden olmakla birlikte, kullanım alanlarının çok geniş olması da bu nedenlerin başında gelmektedir. Bunun dışında da sahip olduğu önemli özellikler de kullanım için seçilmesinde etkilidir. Bunlardan bazıları;

- Oldukça hafif malzemelerdir (Özgül ağırlığı: $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür),
- Genel olarak korozyon dayanımları yüksektir,
- Elektrikçi oldukça iyi iletir,
- Sünek malzemelerdir, plastik deformasyona uğrama kabiliyetleri iyidir,
- Alüminyum ve alaşımlarına yaşlandırma sertleştirilmesi uygulanabilir,
- Alüminyum alaşımlarının "mukavemet/yoğunluk" değerleri yüksektir [32].

3.1. Alüminyum ve Alaşımları ile ilgili Yapılan Çalışmalar

Garbiec et al. (2015) [33] alüminyum ve alumina tozlarını hacimce farklı oranlarda oranlarda karıştırmıştır. Kullanılan tozlardan alumina metal esaslı yumuşak ve sünek bir malzeme iken alumina ya da alüminyum oksit sert ve gevrek bir malzemedir. Karıştırılan malzemeler vakum altında 2,5 dakika süreyle 50 MPa basınçla $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de spark plazma sinterleme metoduyla sinterlenmiş ve alüminyumun mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

Rahimian et al. (2011) [34] farklı tane boyutlarına sahip alüminyum ve alumina tozlarını ağırlıkça % 0 ile % 20 arasında değişik oranlarda alumina içermek suretiyle karıştırmıştır. Karıştırılan tozlar tek eksenli preste 440 MPa basınç altında preslendikten sonra argon atmosferinde 500, 550 ve $600 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklarında 30, 45, 60 ve 90 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin mikroyapıları, aşınma dayanımları ve diğer özellikleri incelenmiş ve alüminyumun kompozit malzeme üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Kim et al. (2014) [35] Al-Si-Fe bazlı (Al-17Si-5Fe-2Cu-1Mg-1Ni-1Zr) toz metal alaşımını bir gaz atomizasyon prosesi kullanarak hazırlamışlar ve spark plazma sinterleme metoduyla da sinterlemişlerdir. Üretilen alaşımın mikroyapı, sıkışma deformasyonu ve diğer özellikleri incelenmiş, yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılarak yapıya eklenen alaşım oranlarının etkileri araştırılmıştır.

7075 serisi Al alaşımına (% 5,2 Zn, % 2,28 Mg, % 1,53 Cu, % 0,21 Cr, % 0,21 Fe % 90,57 Al) Wu et al. (2014) [36] ağırlıkça % 7,5 oranında B₄C ekleyip 3 Pa'da 20 MPa tek eksenli yüklemeye altında plazma aktif sinterleme metoduyla 450, 480, 510, 530 ve 540 °C sıcaklıklarında 0-7 dakika bekleme süresinde sinterlemiştir. Sinterlenen numunelerin yoğunluk, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir ve sıcaklığın ve bekleme süresinin kompozit malzemeye etkileri belirlenmiştir.

Rodriguez et al. (2013) [37] alüminyumun yapısına ağırlıkça % 0,5, % 1 ve %1,5 oranlarında Zr eklemiş ve 625 °C sıcaklıkta farklı bekleme sürelerinde (3 dakika, vakum altında, ayrıca 30 mbar dinamik nitrojen sıvısı altında ve 1 saat vakum altında) spark plazma sinterleme metoduyla sinterlemiştir. Üretilen numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Alüminyumun yapısına Madej (2013) [38] tarafından farklı oranlarda (% 0, % 5, % 10 oranlarında) SiC eklenmiştir. Oluşturulan karışımlar 300 MPa basınç altında soğuk preslenmiş ve 580 ile 620 °C'de sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin mekanik davranışları incelenmiştir.

Shani et al. (2016) [39] tarafından SiC-B₄C yapısının içerisine ağırlıkça %5, %10, %20 oranlarında Al eklenmiş ve geleneksel sinterleme ile spark plazma sinterleme metoduyla sinterlenmiştir. Geleneksel yöntemle 1950 °C'de argon atmosferi altında 30 dakika, spark plazma yöntemiyle 1300 °C'de 50 MPa basınç altında 3 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin sinterleme metodları ve içerdiği farklı oranlardaki Al oranlarına göre mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

İncelenen akademik çalışmalarda Al esaslı toz metal malzemelerin sinterleme parametreleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Al bazlı malzemelerin sinterleme parametreleri

Referanslar	Presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığı	Sinterleme süresi
Ref. [33]	50 MPa basınçta ve 600 °C	2,5 dakika
Ref. [34]	440 MPa basınçta; 500, 550 ve 600 °C	30, 45, 60 ve 90 dakika
Ref. [35]	-	-
Ref. [36]	20 MPa tek eksenli yüklemeye ve 450, 480 ve 510 °C	0-7 dakika
Ref. [37]	80 MPa tek eksenli basınçta ve 625 °C	3 dakika ve 30 mbar dinamik nitrojen sıvısı altında 1 saat
Ref. [38]	300 MPa soğuk preslemeye 580 ve 620 °C	1 saat
Ref. [39]	1300 °C (SPS) ve 1950 °C (GS)	30 dakika (GS) ve 5 dakika (SPS)

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmalar sonucu bize göstermiştir ki;

- Alüminyuma alumina eklendiğinde yapıdaki porozite oranı % 1,27 ile % 5,07 arasında değişen oranlarda artış göstermiştir [33-34],
- Ayrıca yoğunluk, sertlik ve gerilme mukavemetinde iyileşme meydana gelmiş % 20 oranında sertlikte artış meydana gelmiştir [33-34],
- Alüminyumun yapısındaki alüminyumun artışı kompozitin aşınma dayanımının arttırmaktadır [34],
- Alüminyumun yapısına katılan farklı oranlarda farklı alaşımlar alüminyumun başta mukavemet olmak üzere yoğunluk, mikroyapısında gelişmeler olmuştur. Yapısına B₄C katılan alüminyum alaşımının mikroyapısı incelendiğinde artan sıcaklıkla birlikte gözenekliliğin azaldığı teyit edilmiştir. Ayrıca sıcaklığın artışıyla kompozit malzemenin yoğunluğu % 96,65'ten % 99,18'e çıkmıştır [35-36],
- Alüminyumun yapısına eklenen zirkonyum 1 saatte ve vakum altında spark plazma sinterlemeye tabi tutulduğunda sertlik ve akma dayanımı artarken sünekliği ve tokluğu da azalmıştır [37],
- Alüminyumun içine farklı oranlarda SiC eklendiğinde ve yüksek sıcaklıkta sinterlendiğinde (620 °C'de) daha iyi mekanik özellikler ve yoğunluk değeri elde edilmiştir [38],
- Farklı oranlarda karışan Al-SiC-B₄C kompoziti sinterlenirken incelendiğinde 700 C'de Al₈B₄C₇ ile 1000 C'de AlB₁₂ fazları iyi bir şekilde görülmüştür [36],

- Sahani et al. (2016) yaptığı çalışmada en iyi özellikler spark plazma sinterleme ile sinterlenen SiC-B₄C-10Al kompozitinde tespit edilmiştir (yoğunluk % 97, mikrosertlik 23,80 GPa, kırılma direnci 3,28 MPa.m^{1/2}) [39].

5. Referanslar

- [1] U. Çavdar, “Demir esaslı toz metal parçaların indüksiyonla sinterlenmesinde parametrelerin belirlenmesi”, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2009.
- [2] A.A. Cerit, Toz metalurjisi, Türkiye, 2-3, 2016. <http://kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2016/03/toz-metalurjisi-afsin-alper-cerit.pdf>
- [3] R.M. German, “Powder Metallurgy of Iron and Steel”, Jhon Willey and Sons, USA, 1998.
- [4] Metals Handbook vol.1, “Properties and selection: iron, steels and high performance alloys”, 10th Edition, American Society of Metals, Materials Park OH, 1990.
- [5] Bocchini G.F., Lindskog P.F., “Applications and developments of sintered ferrous materials, powder metallurgy-an overview”, The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy, 287, (ed: I. Jenkins and J.V. Wood), 1991.
- [6] G.S. Upadhyaya, “Sintered metallic and ceramic materials-sintered low-alloy ferrous materials”, John Wiley & Sons LTD, West Sussex, England, 2000.
- [7] Fujiki A., “Present state and future prospects of powder metallurgy parts for automative applications”, Materials Chemistry and Physics, 67, 298-306, 2001.
- [8] S. Sarıtaş, “Yayınlanmamış Rapor”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ankara 1991.
- [9] A. Demir, “Toz metal bir çeliğin mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1992.
- [10] Ö. Özgün, “Toz metalurjisi ile üretilen alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
- [11] M. Zeren, Toz Metalurjisi, Teknik Seçmeli Ders I.
- [12] Avşar E., Durlu N., Ataş A., Bozacı C., Özduval H., “Demir esaslı toz metal parçaların sinterleme ile birleştirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 713-718, 2010.
- [13] Bhuiyan M.R.A., Mamur H., “Bismuth Telluride (Bi₂Te₃) Nanostructure for thermoelectric applications” International Scientific and Vocational Journal, 3, 2019
- [14] Demirbaş M.D., Çakır D., Arslan S., Öztürk C., “Equivalent stress analysis of functionally graded rectangular plates by genetic programming”, International Scientific and Vocational Studies Journal, 2, 67 – 80, 2018.
- [15] Demirbaş M.D., Sofuoğlu D., “Thermal stress control in functionally graded plates with artificial neural network”, International Scientific and Vocational Studies Journal, 2, 39 – 55, 2018.
- [16] Çakır D., Demirbaş M.D., “modelling of one-directional functionally graded circular plates with artificial neural network”, International Scientific and Vocational Studies Journal, 3, 42 – 50, 2019.
- [17] Çavdar U., Atik E., “Geleneksel ve hızlı sinterleme yöntemleri”, Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu, Teknik Bilimler Dergisi, 15, 2011
- [18] Menezes R.R., Souto P.M., Kiminami R.H.G.A., “Microwave fast sintering of submicrometer alumina”, Material Research, 13, 345-350, 2010.
- [19] S. Lefeuvre, E. Fedorova, O. Gomonova, J. Tao, “Microwave sintering of micro-and nano-sized alumina powder”, 12th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering & Applications, Grenoble, France, 2010.
- [20] Cheng J., Agrawal D., Zhang Y., Roy R., “Microwave sintering of transparent alumina”, Materials Letters 56, 587-592, 2002.

- [21] Sujith A.V., Kumar N.A., Sharan N., "Microwave sintering of zirconia and alumina", *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1, 320-323, 2009.
- [22] German R.M., "Sintering theory and practise", The Pennsylvania State University Park, A Willey-Interscience Publication, Jon Willey & Sons, INC., 313-362, 1996.
- [23] U. Çavdar, E. Atik, "Sintering with induction" Euro PM 2008 Proceedings, Mannheim, Germany, 2008.
- [24] Kim W., Oh H., Shon I., "The effect of graphene reinforcement on the mechanical properties of Al_2O_3 ceramics rapidly sintered by high-frequency induction heating", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48, 376-381, 2015.
- [25] Sarı Çavdar, P., Çavdar U., "The evaluation of different environments in ultra-high frequency induction sintered powder metal compacts", *Revista De Metalurgia*, 51, 2015.
- [26] Karaca B., Çavdar U., "Saf ve bor karbür takviyeli alüminyum tozlarının ultra yüksek frekanslı indüksiyon jeneratörü ile sinterlenmesi", *Mühendis ve Makina*, 657, 59-64, 2014.
- [27] Upadhy K., "Sintering kinetics of ceramics and composites in the plasma environment", *J.Metal*, 39, 12, 11-13, 1987.
- [28] Total Materia: Dünyanın En Kapsamlı Veri Tabanı, "Iron Spark Plasma Sintering:Part Two", SPS System Configuration, 2018.
- [29] Santanach J., Weibel A., Estournes C., Yang Q., Laurent Ch., Peigney A., "Spark plasma sintering of alumina: Study of parameters, formal sintering analysis and hypotheses on the mechanism(s) involved in densification and grain growth", *Acta Materialia*, 59, 1400-1408, 2011.
- [30] Nieto A., Huang L., Han Y., Schoenung J. M., "Sintering Behavior of Spark Plasma Sintered Alumina with Graphene Nanoplatelet Reinforcement", *Ceramic International*, 41, 5926-5936, 2015.
- [31] Liu J., Yan H., Jiang K., "Mechanical properties of graphene platelet-reinforced alumina ceramic composites", *Ceramic International*, 39, 6215-6221, 2013.
- [32] A.H. Demirci, *Mühendislik Malzemeleri Önemli Endüstriyel Malzemeler ve Isıl İşlemleri*, İstanbul, 123-124, 2004.
- [33] Garbiec D., Jurczyk M., Levintant-Zayonts N., Moscicki T., "Properties of Al- Al_2O_3 composites synthesized by spark plasma sintering method", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15, 933-939, 2015.
- [34] Rahimian M., Parvin N., Ehsani N., "The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al- Al_2O_3 composite", *Materials and Design*, 32, 1031-1038, 2011.
- [35] Kim J., Jang G., Kim M., Lee J., "Microstructure and compressive deformation of hypereutectic Al-Si-Fe based P/M alloys fabricated by spark plasma sintering", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 2346-2351, 2014.
- [36] Wu C., Fang P., Luo G., Chen F., Shen Q., Zhang L., Lavernia E., "Effect of plasma activated sintering parameters on microstructure and mechanical properties of Al-7075/ B_4C composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 276-282, 2014.
- [37] Rodriguez C., Belzunce F.J. Betegon C., Goyos C., Diaz L.A., Torrecillas R., "Nanostructured Al-Zr Al_3 materials consolidated via spark plasma sintering: Evaluation of their mechanical properties", *Journal of Alloys and Compounds*, 550, 402-405, 2013.
- [38] Madej B., "The effect of sintering temperature on microstructure and properties of Al-SiC composites", *Archives of Metallurgy and Materials*, 58, 2013.
- [39] Sahani P., Karak S.K., Mishra B., Chakravarty D., Chaira D., "Effect of Al addition on SiC- B_4C cermet prepared by pressureless sintering and spark plasma sintering methods", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 57, 31-41, 2016.