



MgB₂ Külçe Örneklerine SiC Eklenmesi ile Manyetik Kaldırma ve Kılavuzlama Kuvvetinin İyileştirilmesi

The Improvement of Magnetic Levitation and Guidance Force of SiC added to MgB₂ Bulk Samples

Burcu Savaşkan^{1*}, Sait Barış Güner², Ezgi Taylan Koparan³

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Trabzon, Türkiye

²Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Rize, Türkiye

³Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Ereğli Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Ereğli, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada Katıhal Tepkime yöntemiyle üretilen silindirik külçe MgB₂ süperiletken örneklerine SiC eklenmesinin manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvvetleri üzerine etkisi araştırıldı. SiC miktarı, toplam MgB₂'nin ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 olarak seçildi. Manyetik kaldırma kuvveti ölçümleri sıfır alan altında soğutma (ZFC) ve alan altında soğutma (FC) rejimleri altında, 20 K sıcaklığında; kılavuzlayıcı (yanal) kuvvet ölçümü ise FC rejiminde, 25 K sıcaklığında gerçekleştirildi. Örneklerin yapısal ve elektriksel özellikleri X-ışını kırınımı (XRD) ve düşük sıcaklık direnç ölçümü ile incelendi. %5, %10, %15 ve %20 SiC eklenmiş örneklerde, saf MgB₂ örneğine kıyasla daha büyük manyetik kaldırma ve yanal manyetik (kılavuzlama) kuvvet değerleri elde edildi. Tüm örnekler içerisinde en büyük manyetik kaldırma ve yanal manyetik kuvvet %10 SiC eklenmiş MgB₂ örneğine ait olduğu bulundu.

Anahtar Kelimeler: MgB₂, SiC, Manyetik Kaldırma Kuvveti, Yanal Manyetik (Kılavuzlayıcı) Kuvvet

Abstract

The effect of SiC (from 0 to 25 wt% of the total MgB₂) addition on the magnetic levitation force and guidance (lateral) force properties of bulk MgB₂ superconductor has been investigated. The amount of SiC was varied between 0 and 25 wt% of the total of MgB₂. The vertical levitation force measurements were carried out under zero-field-cooled (ZFC) and field-cooled (FC) regimes at 20 K. Lateral (guidance) force measurements were carried out under FC regime at 25 K. The structural and electrical properties of samples were investigated with X-ray diffraction (XRD) and low temperature resistance measurement. It was obtained that 5 wt%, 10 wt%, 15 wt% and 20 wt% SiC added samples exhibit a higher levitation and guidance forces than pure sample. It was found that that 10 wt% SiC adding sample has the best magnetic levitation and guidance force performances.

Keywords: MgB₂, SiC, Magnetic levitation force, Lateral (Guidance) force

1. Giriş

1988 yılında süperiletken külçe ve kalıcı mıknatıs (PM) arasındaki askıda kalma özelliğinin keşfinden sonra bu fenomen olayı tanımlamak için çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapıldı. İki mıknatıs arasındaki manyetik kuvvet, kutup cinsine bağlı olarak çekici ya da itici olabilir ancak, kararlı dengeye sahip değildir. Süperiletken ve mıknatıs arasındaki etkileşim kuvveti, kararlı bir manyetik

kaldırma sağlayabilir. Bu durum süperiletken malzemenin manyetik geçmişine bağlıdır. Süperiletken malzeme kalıcı mıknatıs tarafından üretilen homojen olmayan bir manyetik alana maruz kaldığında, diamanyetik ve akı çivileme özelliği nedeniyle aktif ve pasif bir kaldırma elde edilebilir (Yıldız vd., 2016). Süperiletken malzemelerin bu eşsiz özelliği sayesinde günümüzde yüksek sıcaklık külçe süperiletkenleri (HTS), manyetik yataklarda ve manyetik olarak havalanmış ulaşım araçlarında (Maglev Trenleri) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamaların neredeyse tamamı manyetik alan altında yüksek kritik akım yoğunluğu (J_c) gerektirir. HTS süperiletkenlerinin J_c değeri, bu malzemelerin seramik karakteri, tanecik yapısı ve

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: bsavaskan@ktu.edu.tr

Burcu Savaşkan orcid.org/0000-0001-8757-4258

Sait Barış Güner orcid.org/0000-0001-7487-4817

Ezgi Taylan Koparan orcid.org/0000-0002-4762-2742

genellikle tane sınırlarında görülen zayıf bağ probleminden dolayı oldukça düşüktür.

2001 yılında J. Akimitsu ve ekibi, Magnezyum Diborür (MgB₂) metalik alaşımının 39 K sıcaklığında süperiletken olduğunu keşfetti (Akimitsu, 2001; Nagamatsu vd.,2001). İntermetalik bileşikler içerisinde bilinen en yüksek geçiş sıcaklığına sahip olması, basit hekzagonal yapısı, kolay ve ucuz sentezlenmesi ve taneler arası zayıf bağların yokluğu süperiletkenlik alanındaki ilginin bakır oksit içermeyen ve bor içeren bileşikler üzerine yoğunlaşmasını sağladı (Yamamoto vd., 2005). Düşük sıcaklık gerektirmesine rağmen süperiletkenlik ve mekaniksel özellikleri bu bileşiği çok sayıda teknolojik uygulamalar için yüksek sıcaklık süperiletkenlerine karşı alternatif hale getirdi.

İlk insan yüklemeli (man-loading) yüksek sıcaklık Maglev test aracının 2002 yılındaki başarısı (Wang vd.,2002) ve daha sonraki yıllarda, gerek kaldırma kuvveti özelliklerindeki iyileşmeler ve gerekse Maglev araçlarının elektromanyetik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan ölçüm sistemlerindeki gelişmeler süperiletken Maglev sistemlerinin pratik uygulanabilirliğini arttırmıştır (Sotelo vd., 2015). Maglev sistemlerinde daha fazla yük taşıma kapasitesi için kaldırma kuvvetinin büyük olması istenir. Büyük kaldırma kuvveti için malzemenin kritik akım yoğunluğu (J_c) ve malzemede indüklenen perdeleme akımlarının yarıçapının büyük olması gerekir (Ozturk vd., 2012; Ozturk vd., 2009). Maglev sistemlerinin kaldırma kuvveti kadar önemli olan bir diğer kuvvet ise manyetik rayların üzerinde aracın kararlı hareketini sağlayan yanal (kılavuzlayıcı) manyetik kuvvettir. Kılavuzlama kuvveti, sistemin yanal hareketine karşı oluşan kuvvet olup süperiletken malzeme ilk konumdan, yatay olarak uzaklaştıkça ortaya çıkan negatif kuvvet sistemin kararlılığına işaret eder. Bu nedenle, manyetik kaldırma kuvvetinin büyük olmasının yanında kılavuzlama kuvvetinin de büyük olması gerekmektedir (Savaşkan vd, 2015). Manyetik kaldırma ve yanal manyetik kuvvet süperiletkenin yapısal ve elektromanyetik özellikleridir ve yüksek süperiletken özelliklere sahip malzeme üretimi ile arttırılabilir (Deng vd., 2012). Magnezyum Diborür'ün süperiletkenlik ve manyetik özelliklerini konu alan birçok çalışma mevcut olmasına karşın çok azı kaldırma kuvveti ve kılavuzlama kuvveti ile ilgilidir.

Bu çalışmada MgB₂ süperiletkenine ağırlıkça farklı oranlarda SiC eklenmesinin, MgB₂ süperiletkeninin manyetik kaldırma kuvveti ve kılavuzlama kuvveti üzerine etkileri araştırıldı. Hem kılavuzlama hem de manyetik kaldırma kuvvetini birlikte arttıracak SiC ekleme oranları belirlenmeye çalışıldı.

2. Gereç ve Yöntem

Saf ve ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında SiC eklenmiş silindirik MgB₂ örnekleri “Katıhal Tepkime Yöntemi” ile üretildi. Magnezyum (Mg) tozu (44 µm tane boyutuna sahip % 99,8 saflıkta, Alfa-Aesar şirketi) ile amorf nano Bor (B) tozu (≥ %98 saflıkta, Pavezyum şirketi) kullanıldı. 2 g'lık Mg ve B toz karışımına, ısıl işlem süresince, Mg'nin yüksek buharlaşma özelliği nedeniyle yapıyı terk etmesi durumunda oluşacak stokiometrik kaymayı engellemek ve Mg'nin buhar basıncından yararlanmak için ağırlıkça % 10 oranında fazla Mg eklendi (Serquis vd., 2003; Savaskan vd., 2014). Toz karışım 18 mm çapında silindir kalıpta, 10 ton/cm² basınç altında preslendi. Preslenerek tablet haline getirilen örnekler, ısıl işlem için paslanmaz krom (Cr) tüp içerisine yerleştirildi. 20 dakika boyunca tüpün ve bağlantı borularının vakumu (10⁻² bar) alındı. Tüp içerisine ısıl işlem süresi boyunca 8 bar Ar gazı verildi. Paslanmaz Cr tüp içerisindeki örnekler, önceden 675 °C'ye ısıtılan silindirik fırında iki saat süresince ısıl işleme konuldu. Isıl işlemden sonra Cr tüpün, fırından çıkarılarak vakum altında ve 8 bar'lık Ar gazı basıncında oda sıcaklığına gelene kadar soğuması beklendi.

3. Yapılan Ölçümler

X-ışını kırınımı (XRD), örneklerin kristal özelliklerini ve faz kompozisyonlarını karakterize etmek için kullanıldı. MgB₂ külçe örneklerinin x-ışınları kırınım desenleri Rigaku D/ Max-III difraktometresinde CuKα ışınımı kullanılarak elde edildi. Tüm ölçümler, oda sıcaklığında, 20° ≤ 2θ ≤ 70° aralığında, 0.2 °/dk. tarama hızında yapıldı.

Düşük sıcaklıklardaki manyetik kuvvet ölçümleri, TÜBİTAK tarafından desteklenen 110T622 nolu proje ile tasarlanan, 2013/13638 patent numaralı “Düşük Sıcaklık Cryostat Sistemi” kullanılarak (Şekil 1) Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Katıhal Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi.

Alansız Soğutma Ölçümleri (ZFC): Süperiletken örnek, Nd-Fe-B mıknatısın (φ = 19.7 mm, h=9.8 mm, Manyetik Alan= 0.5 T) üst yüzeyiyle süperiletken alt yüzeyi arasındaki mesafe z = 50 mm iken soğutuldu. Bu ölçüm Alansız Soğutma (ZFC) olarak adlandırılır. Bu mesafede mıknatısın süperiletken örnek üzerindeki etkisinin olmadığı düşünülür. F_z-z ölçümlerinde:

- Süperiletken örnek z = -50 mm de soğutuldu.
- 20 K soğutma sıcaklığında mıknatıs, z = 0 → -50 mm → 0 mm döngüsü olacak şekilde harekete başlandı.

Alanlı Soğutma Ölçümleri (FC): Süperiletken örnek ile Nd-Fe-B mıknatısı arasındaki mesafe $z = 1.5$ mm iken, normal halden süperiletken hale geçerken mıknatısın manyetik alanı altında soğutulması Alanlı Soğutma (FC) olarak adlandırılır. Mıknatıs eksensel yönde manyetize olduğu için mıknatıs süperiletken örneğe maksimum manyetik alan uygulamaktadır. F_z - z ölçümlerinde:

- Süperiletken örnek $z = 1.5$ mm de soğutuldu.
- 20 K soğutma sıcaklığında mıknatıs $z = 1.5 \rightarrow -50$ mm $\rightarrow 1.5$ mm döngüsü olacak şekilde harekete başlandı.

Yatay Manyetik Kuvvet (Kılavuzlama) Ölçümleri:

Yatay manyetik kuvvet (F_x) – yatay uzaklık (x) ölçümlerinde; 25 K soğutma sıcaklığında FC rejimi altında mıknatıs; $x = 0$ mm $\rightarrow +10$ mm $\rightarrow -10$ mm $\rightarrow 0$ mm $\rightarrow +10$ mm ($z = 1.5$ mm) döngüsü olacak şekilde harekete başlandı.

Örneklerin direnç ölçümü için; Cryogenic Q-3398 Vibrating Sample Magnetometer (VSM) sistemi ve Leybold LT-10 kapalı devre He cryostat sistemi kullanılmıştır. Her iki sistemde tamamen bilgisayar kontrollü ve kontak noktalarında ısınmayı önlemek için belirli aralıklarla $\pm 1-10$ mA (örneklerin oda sıcaklıklarındaki dirençlerine göre değişmektedir) mertebesinde DC akım verilerek dirençler ölçüldü.

4. Sonuçlar

Saf ve ve SiC eklenmiş MgB₂ örneklerinin XRD kırınım desenleri, Şekil 2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüm

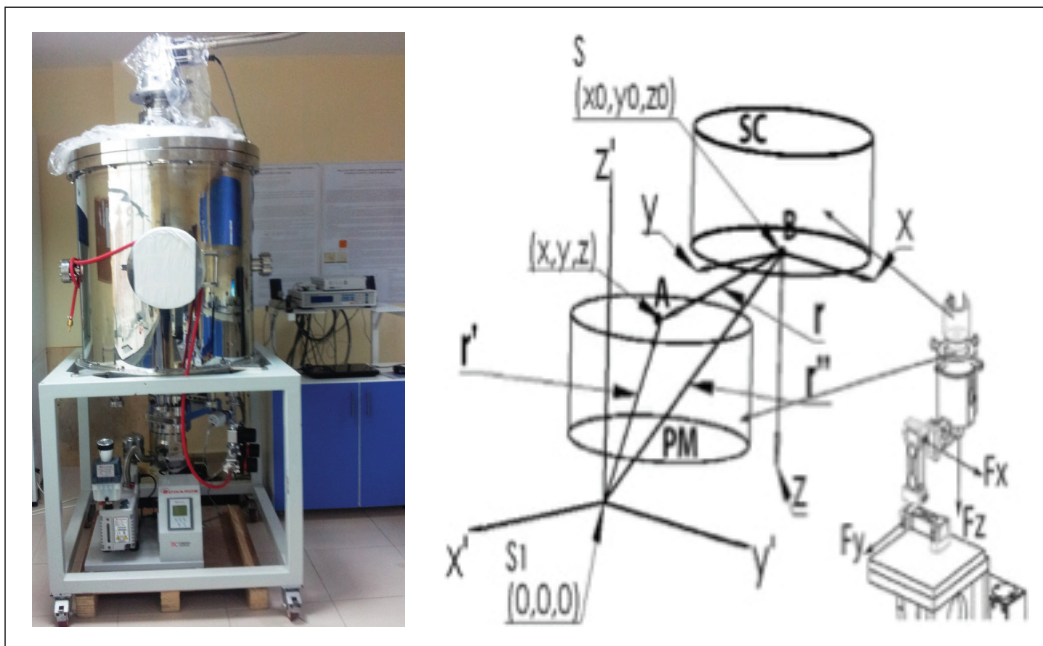
örneklerin kırınım deseninin ana fazı MgB₂ dir. Bununla birlikte Mg₂Si ve MgO safsızlık fazlarının 2θ 'nın 35° ile 42° arasında olduğu ve bu piklerin şiddetlerinin SiC ekleme oranına göre değişiklik gösterdiği görüldü. SiC eklenmiş örneklerde ekleme oranının artması ile MgB₂ fazına ait pik şiddetlerinde azalma ve yapıda MgO ve Mg₂Si piklerinin varlığı görüldü (Dou vd., 2007). %10 ve üzeri yapılan eklemelerde artık SiC'in yapıda açıkça varlığı gözlemlendi.

Bir süperiletken ve kalıcı mıknatıs (PM) arasındaki kaldırma kuvveti: süperiletkenin manyetik momenti ile PM'nin manyetik alan gradyentine bağlıdır ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır (Ozturk vd.,2009):

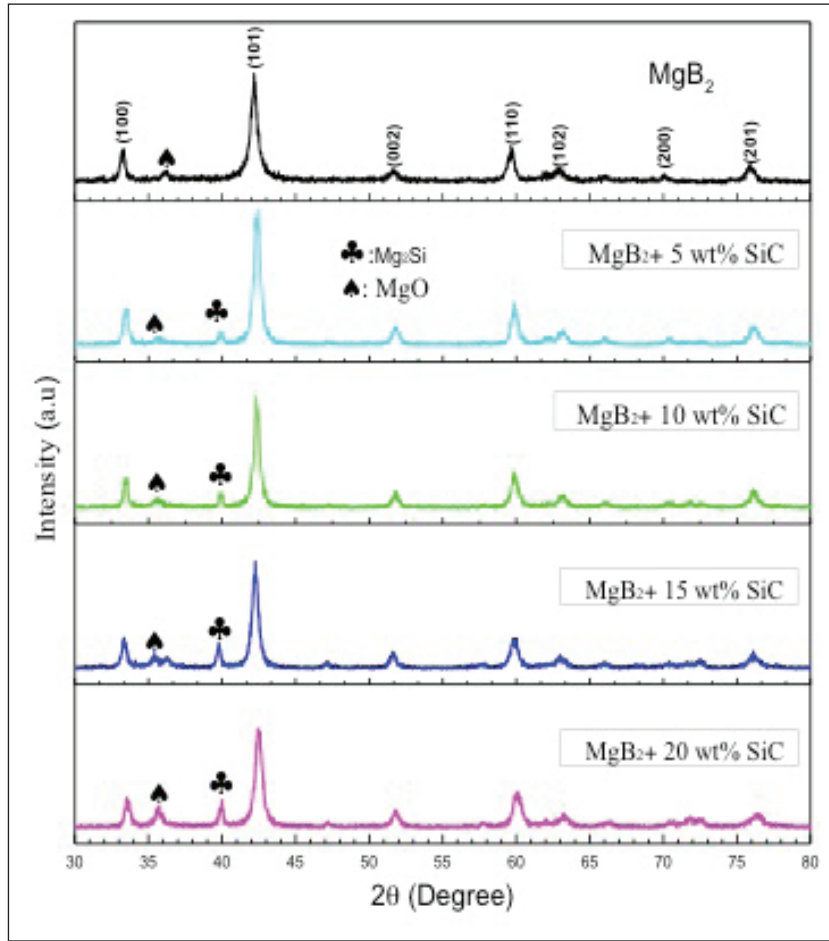
$$F = m \frac{dH}{dz} \text{ and } m = M \cdot V = (A J_c r) V \quad (1)$$

Burada m , süperiletkenin manyetik momenti; PM tarafından üretilmiş alan gradyenti (dH/dz) dir. Süperiletkenin manyetizasyonu $M = A J_c r$ dir. Burada birim hacim (V) başına manyetizasyon, $m = M V$ olarak tanımlanır, A örnek geometrisine bağlı sabittir, J_c süperiletkenin kritik akım yoğunluğudur, r ise perdeleme akım halkasının yarıçapıdır (Ozturk vd., 2009; Murakami vd., 1991). Bu eşitlik, yüksek kaldırma kuvveti için mümkün olduğunca büyük r , J_c ve dH/dz 'ye sahip olmak gerektiğini gösterir.

Literatürde MgB₂ süperiletkeninde; Mg, B konumlarına veya sistemin geneline yapılan çeşitli katkılarla süperiletkenin varolan çivileme merkezlerini arttırarak sistemin kritik akım yoğunluğunda artış sağlayabilmek için yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Karbon (C), MgB₂ sistemi için-



Şekil 1: Manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sistemi. Manyetik kaldırma kuvveti deney geometrisi ve süperiletken ile sürekli mıknatısın birbirine göre konumları (Celik, 2016).



Şekil 2: MgB₂ ve SiC katkılı MgB₂ numunelerinin x-ışını kırınım deseni.

de B ile yerdeğiştirebilen tek elementtir ve özellikle C ve C- li bileşikler ve bu bileşikler içerisinde de özellikle SiC kritik akım yoğunluğunu arttıran bir bileşiktir. MgB₂ süperiletkenine yapılan SiC katkılarında; nano-SiC'nin çivileme merkezi gibi davrandığı ve J_c 'de belirgin bir artışa neden olduğu bulunmuştur (Wang vd., 2004; Gozzelino vd., 2007; Shcherbakova vd., 2007; Zhang Xion Ping vd., 2007). Ancak yapılan çalışmalar SiC eklenmesinin süperiletkenin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkisi ile sınırlı olup, manyetik kaldırma ve özellikle de yanal manyetik kuvvete etkisi araştırılmamıştır.

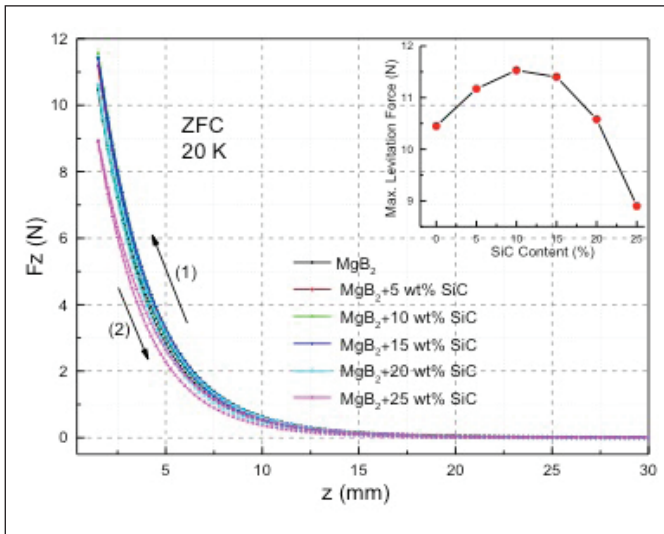
Katkısız ve SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerin 20 K sıcaklığında ZFC rejiminde, manyetik kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri Şekil 3'te verildi. Şekil 3'teki 1 ve 2 işaretleri sırasıyla, mıknatısın örneğe ve örnekten uzağa doğru hareketini gösterir. Mıknatıs süperiletkene doğru hareket ettiğinde, süperiletkenin hissettiği manyetik alan artar ve bu durum manyetizasyonu (M) arttırarak kaldırma kuvvetini eksponansiyel olarak arttırır (Murakami vd., 1991). Diğer bir deyişle mıknatıs örnekten uzağa hareket ettiğinde,

dış alan azalır. Şekil 3'te görüldüğü gibi mıknatıs, MgB₂ örneklerin yüzeyine doğru hareket ettiğinde dikey kaldırma kuvveti artar. Şekilde görüldüğü gibi, örnek ile mıknatıs arasındaki uzaklık değiştiğinde kaldırma kuvvetinin değişimi histeresis bir davranış sergiler. Histeresis eğrisi manyetik kaldırmanın en yaygın özelliği olarak bilinir ve süperiletken örneğin sahip olduğu çivileme (pinning) potansiyelini işaret eder (Savaşkan vd., 2014). Mıknatıs ile örnek arasındaki uzaklık minimum olduğunda (mıknatıs ve örnek arasındaki mesafe 1,5 mm) elde edilen maksimum kaldırma kuvveti değerleri ($F_{z,max}$) grafiğinin içerisinde büyütülerek tekrar çizildi. Saf, %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinde maksimum manyetik kaldırma (itici) kuvvet değerleri sırasıyla; 10.45, 11.18, 11.55, 10.57 ve 8.93 N olarak bulundu. ZFC rejiminde en yüksek maksimum kaldırma (itici) kuvveti %10 SiC eklenmiş MgB₂ örneğinde elde edildi. % 25 SiC eklenmiş örnekte ise manyetik kaldırma kuvvetinin keskin şekilde azaldığı gözlemlendi.

Saf ve %5, %10, %15, %20, %25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinin 20 K sıcaklığında FC rejiminde, manyetik

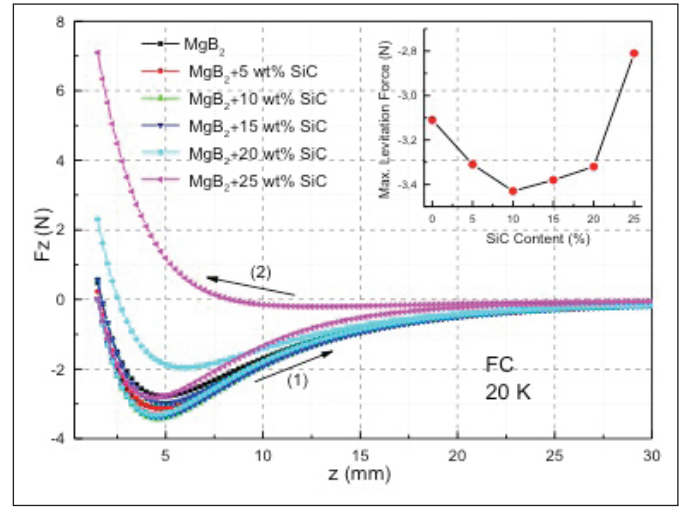
kaldırma kuvvetinin dikey harekete göre değişim grafikleri Şekil 4'te verildi. FC rejimi altında yapılan ölçümlerde manyetik akı, akı çivileme merkezleri içerisinde tuzaklanır. Çekici kuvvet FC rejiminde ZFC rejiminden daha güçlüyken, itici kuvvet ZFC rejiminde FC rejiminden daha güçlüdür (Sergeenkov vd., 2012). Maksimum çekici kuvvet değerleri, saf, %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC eklenmiş MgB₂ örneklerinde sırasıyla -3.09, -3.30, -3.44, -3.83, -3.31 ve -2.80 N olarak bulundu. FC ölçümünde, 20 K sıcaklıkta en yüksek çekici kuvvet ZFC ölçümündeki gibi % 10 SiC eklenmiş MgB₂ örneğinde elde edildi.

Yatay manyetik kuvvet, Maglev (Manyetik Olarak Havalanmış Ulaşım Araçları) araçlarında kılavuzlayıcı kuvvettir ve Maglev araçlarında yatay dengeyi sağlar (Yang vd., 2008). Maglev sistemlerinin teknolojik uygulamaları için manyetik kaldırma kuvvetinin yanında, kılavuzlama kuvvetinde artırılması gerekmektedir. Literatür incelendiğinde MgB₂ süperiletkeninde kılavuzlayıcı kuvvet ile ilgili çalışmalar dikey kaldırma kuvveti ile kıyaslandığında oldukça az olduğu görülür (Savaşkan vd., 2014; Erdem vd., 2014; Savaşkan vd., 2016). 25 K ölçüm sıcaklığında, en büyük kılavuzlayıcı kuvvet %10 SiC eklenmiş MgB₂ örneğinde elde edildi. %5, %10, %15 ve %20 SiC eklenmiş örneklerde saf örneğe kıyasla daha yüksek manyetik kaldırma ve yanal kuvvet elde edilmesi, SiC katkısının yapı içerisinde yabancı faz gibi davranarak tuzaklama merkezi sayısını artırdığını gösterir. Bu durum kritik akım yoğunluğunu ve dolayısıyla manyetik kaldırma kuvvetini arttırmıştır.

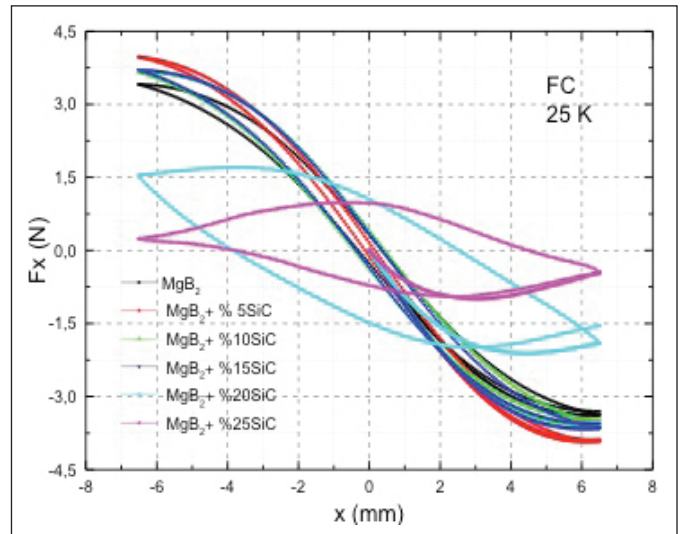


Şekil 3: Katkısız, %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinin ZFC rejiminde 20 K sıcaklıkta ölçülmüş, kalıcı mıknatıs ve örnekler arasında dikey mesafeye (z) karşı dikey kaldırma kuvveti (F_z) grafikleri.

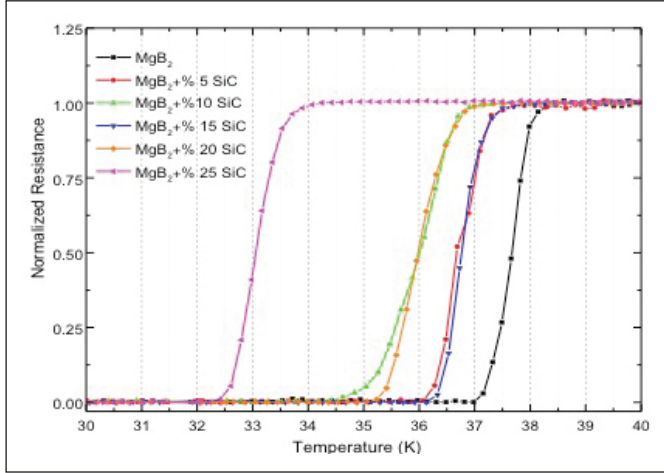
Şekil 6, saf, %5, %10, %15, %20 ve % 25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinin sıfır manyetik alan altında direncin sıcaklığa göre değişimini göstermektedir. SiC eklenmiş örneklerin hem $T_{c, \text{başlangıç}}$ hem de $T_{c, \text{sıfır}}$ değerlerinin düştüğü ve geçiş sıcaklığı aralığının genişlediği ($\Delta T = T_{c, \text{başlangıç}} - T_{c, \text{sıfır}}$) açıkça görülür. Saf MgB₂ örneği SiC eklenmiş örneklere kıyasla daha keskin bir geçiş sıcaklık aralığına sahiptir ve $T_{c, \text{başlangıç}}$ değeri 38,29 K olduğu ölçüldü. SiC eklenmiş örneklerde geçiş sıcaklık aralığının artması, geçiş sıcaklığının



Şekil 4: Katkısız, %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinin FC rejiminde 20 K sıcaklıkta ölçülmüş, kalıcı mıknatıs ve örnekler arasında dikey mesafeye (z) karşı dikey kaldırma kuvveti (F_z) grafikleri.



Şekil 5: Katkısız, %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinin FC rejiminde 25 K sıcaklıkta ölçülmüş, kalıcı mıknatıs ve örnekler arasında yanal mesafeye (x) karşı kılavuzlayıcı kuvvet (F_x) grafikleri.



Şekil 6: Katkısız, %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC eklenmiş külçe MgB₂ örneklerinin sıfır manyetik alanda direnç sıcaklık eğrisi.

daha düşük sıcaklık değerlerine düşmesi, yapı içerisinde iletkenliği engelleyen Mg₂Si ve MgO fazlarına işaret eder. Bu sonuç örneklerin XRD analizinde ortaya çıkan ve taneler arasında zayıf bağ görevi yapan safsızlık fazlarının varlığını doğrular.

5. Tartışma ve Öneriler

Bu çalışmada manyetik olarak havalanmış ulaşım araçları (Maglev Trenleri) için gerekli olan yüksek manyetik kaldırma kuvveti ve yüksek kılavuzlayıcı kuvvete sahip silindirik külçe MgB₂ örneklerinin üretimi amaçlanmıştır. Bu amaçla MgB₂ örneği içerisine ağırlıkça farklı oranlarda SiC (%5, %10, %15, %20 ve % 25) eklemesi yapıldı ve dikey kaldırma kuvveti, kılavuzlayıcı kuvvet ile kritik sıcaklık (T_c) üzerine etkileri araştırıldı. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralandı:

- ZFC rejiminde, 20 K sıcaklıktaki 1,5 mm mesafedeki maksimum dikey itici kuvvet, saf örnek için 10,45 N ve ağırlıkça % 10 SiC eklenmiş MgB₂ örneği için 11. 53 N olarak bulundu.
- FC rejiminde 20 K sıcaklıktaki 1,5 mm mesafedeki maksimum dikey çekici kuvvet kuvvet, saf örnek için -3.11 N ve ağırlıkça % 10 SiC eklenmiş MgB₂ örneği için -3.43 N olarak bulundu.
- Dikey manyetik kaldırma kuvveti ölçüm sonuçları ile benzer şekilde, %10 SiC eklenmiş MgB₂ örneğin en yüksek kılavuzlayıcı kuvvet değerine sahip olduğu görüldü.
- Yüksek manyetik kaldırma ve kılavuzlama kuvveti için en iyi SiC ekleme oranı %10 olarak bulundu. % 20 oranına

kadar SiC eklenmesinin hem manyetik kaldırma hem de kılavuzlama kuvvetini arttırdığı gözlemlendi.

6. Teşekkür

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi FBA-2016-5450 no'lu proje kapsamında yapılmış olup, bu projenin maddi olanakları kullanılmıştır.

7. Kaynaklar

- Akimitsu, J., 2001.** Superconductivity of metallic boron in MgB₂, Symposium on Transition Metal Oxides, January, Sendai, Japan.
- Celik, S. 2016.** Design of magnetic levitation force measurement system at any low temperatures from 20 K to room temperature. *J. Alloys and Compd.*, 662: 546-556.
- Deng, Z., Izumi, M., Felder, B., Tsuzuki, K., Hara, S., Uetake, T., Floegel-Delor, U., Werfel, F. N., 2012.** Trapped Flux and Levitation Properties of Multiseeded YBCO Bulks for HTS Magnetic Device Applications-Part I: Grain and Current Features. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 6800110: 1-10.
- Dou, S. X. et al 2007.** Mechanism of Enhancement in Electromagnetic Properties of MgB₂ by Nano SiC Doping. *Physical Review Letters*, 98: 097002.
- Erdem, O., Ozturk, K., Guner, S. B., Celik, S., Yanmaz, E. 2014.** Effects of Initial Cooling Conditions and Measurement Heights on the Levitation Performance of Bulk MgB₂ Superconductor at Different Measurement Temperatures. *J Low-Temp Phys*, 177: 28-39.
- Gozzelino, L., Minetti, B., Gerbaldo, R., Ghigo, G., Laviano, F., Lopardo, G., Giunchi, G., Perini, E., Cavallin, T. ve Mezzetti E., 2007.** Pinning properties in pure and SiC doped MgB₂ bulk obtained by reactive Mg liquid infiltration technique. *Physica C*, 1: 604-605.
- Murakami, M., Oyama, T., Fujimoto, H., Gotoh, S., Yamaguchi, K., Shiohara, Y., Koshizuoka, N., Tanaka, S. 1991.** Melt Processing Of Bulk High T_c Superconductors and Their Application. *IEEE Transactions on Magnetism* 27: 1479-1486.
- Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y. and Akimitsu, J., 2001.** Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. *Nature*, 410: 63-64.
- Ozturk, K., Celik, S. ve Cansız, A., 2009.** Determination of levitation force and pinning properties of (Sm123)_{1-x}(Yb211)_x bulk superconductor depending on Yb211 doping ratio. *Phys. Status Solidi A*, 11: 2569-2575.
- Ozturk, K., Celik, S., Cansız, A., 2009.** Determination of levitation force and pinning properties of (Sm123)_{1-x}(Yb211)_x bulk superconductor depending on Yb211 doping ratio. *Phys. Status Solidi A*, 206: 2569-2575.

- Ozturk, K., Akbulut, S., Kutuk, S., Bolat, S., Celik, S. ve Başoğlu, M., 2012.** Comparative study of critical current density, pinning force and levitation force behavior in Yb211 doped -Sm123 bulk superconductors. *J. Alloys. Comp.*, 516: 167-171.
- Savaskan, B., Taylan Koparan, E., Güner, S. B., Celik, S., Öztürk, K. and Yanmaz, E. 2015.** Effect of C₄H₆O₅ Adding on the Critical Current Density and Lateral Levitation Force of Bulk MgB₂. *J. Low Temp. Phys.* 181: 38-48.
- Savaskan, B. , Taylan Koparan, E., Çelik, Ş. , Öztürk, K. ve Yanmaz, E. 2014.** Investigation on the Levitation Force Behaviour of Malic Acid Added Bulk MgB₂ Superconductors. *Physica C*, 502: 63–69.
- Savaskan, B. , Taylan Koparan, E., Güner, S. B., Celik, S., Yanmaz, E. 2014.** The size effect on the magnetic levitation force of MgB₂ bulk superconductors , *Physica C*, 502: 63–69.
- Sergeenkov, S., Sanchez, E. S., Salla, R. V. F., Rivera, V. A. G., Cichetto Jr., L., Araujo-Moreira, F. M., 2012.** *Journal of Applied Physics*, 112: 033908.
- Serquis, A., Liao, X. Z., Civale, L., Zhu, Y. T., Coulter, J. Y., Peterson, D. E. ve Mueller, F. M. 2003.** The Influence of Structural Defects on Intra-Granular Critical Currents of Bulk MgB₂. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2: 3068-3071.
- Shcherbakova, O.V., Pan, A. V., Soltanian, S. ve Dou, S. X. 2007.** Cooling rate effect on microstructure and superconducting properties of pure and SiC doped MgB₂ superconductors, *Physica C*, 460: 579–580.
- Sotelo, G., G., de Oliveira, R. A. H., Costa, F. S., Dias, D. H. N., de An Jr, R. ve Stephan, R. M., 2015.** A Full Scale Superconducting Magnetic Levitation (MagLev) Vehicle. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 3601005;:1-5.
- Wang, J., Wang, S., Zeng, Y., Huang, H., Luo, F., Xu, Z., Tang, Q., Lin, G., Zhang, C., Ren, Z., Zhao, G., Zhu, D., Wang, S., Jiang, H., Zhu, M., Deng, C., Hu, P., Li, C., Liu, F., Lian, J., Wang, X., Wang, L., Shen, X. ve Dong, X., 2002.** The First Man-Loading High Temperature Superconducting Maglev Test Vehicle in the World. *Physica C*, 378-381, 809-814.
- Wang, X. L., Soltanian, S., James, M., Qin, M. J., Horvat, J., Yao, Q. W., Liu, H. K. ve Dou, S. X., 2004.** Significant enhancement of critical current density and flux pinning in MgB₂ with nano-SiC, Si, and C doping. *Physica C*, 408: 63–67.
- Yamamoto, A., Shimoyama, J., Ueda, S., Iwayama, I., Horii, S., Kishio, K. 2005.** Effects of B4C doping on critical current properties of MgB₂. *Supercond. Sci. Technol.*, 18: 1323-1328.
- Yıldizer, I., Cansız A., Ozturk K. 2016.** Optimization of levitation and guidance forces in a superconducting Maglev system. *Cryogenics*, 78: 57-65.
- Zhang, X. P., Ma, Y. W., Gao, Z. S., Yu, Z. G., Wang, D. L., Watanabe, K. ve Guo, J. D., 2007.** Fabrication and superconducting properties of nano-SiC doped MgB₂ tapes. *Chinese Science Bulletin*, 18: 2477-2480.