

# Yüksek Atık Miknatis İçerikli NdFeB Alaşımalarında Manyetik Özelliklerin Değişimi

M. Fatih Kılıçaslan<sup>1</sup>

Ümit Yılmaz<sup>2</sup>

Bekir Akgül<sup>3</sup>

## Özet

Çalışma kapsamında, bir tür hızlı katılaştırma yöntemi olan ve şerit şeklinde amorf ve/veya yarı kristalin yapıya sahip alaşımların üretilmesini mümkün kılan Eriyik eğirme (melt spinning) yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı kalıcı miknatis alaşımlarının üretimini kapsamaktadır. Ayrıca manyetik özelliklerine 680 ve 710 °C sıcaklıklarda 10 dakika süreyle 290 K/s lik çok hızlı ısıtma ve soğutma hızları kullanılarak gerçekleştirilen flaş tavlama ısıl işleminin etkisini incelenmiştir. Çalışmamızda kullanılan NdFeB esaslı kalıcı miknatis alaşımına, ağırlıkça %30 oranında hurda miknatis eklenerek yeni alaşım elde edilmiştir. Çalışmamız ısıl işlemin etkisine ek olarak bir diğer amacı da atık miknatislerin tekrar kullanılması ile atık miknatislerden nadir toprak elementlerinin geri kazanılması amaçlanmıştır. Artan ısıl işlem sıcaklığı ile birlikte, kalıcı manyetikliği ortaya koyan, özellikle manyetik koerzivitelerde 16546 Oe'den 2349 Oe'ye, maksimum enerji ürününde, 136 kJ/m<sup>3</sup>'ten 10 kJ/m<sup>3</sup>'e, manyetik remanansa ise 56 emu/g'dan 22 emu/g'a doğru bir düşüş görülmüştür. Doyum manyetizasyonunda ise hatırı sayılır bir değişim olmamakla birlikte 93 emu/g'dan 90 emu/g'a doğru hafif bir artış görülmüştür.

- 1 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8507-390>, fatihklicaslan@sivas.edu.tr
- 2 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8922-2387>, uyilmaz@sivas.edu.tr
- 3 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4744-9097>, bekirakgul@sivas.edu.tr

## 1. GİRİŞ

NdFeB esaslı kalıcı manyetik malzemeler, sahip oldukları üstün sert manyetik özellikleri olan manyetik koerzivite ( $H_c$ ) ve maksimum enerji ürünü ( $(BH)_{max}$ ) sayesinde, elektronik endüstrisi, bilişim, medikal, hibrit elektrik araçlar ve rüzgar jeneratörleri gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1–3]. Bugün teknolojik olarak ileri seviyede olan birçok toplumlarda kullanılan elektrik, elektronik ve elektro-mekanik bileşenlerin vazgeçilmez unsurudur [4]. NdFeB kalıcı mıknatıslar; marş motorları, bilgisayar disk sürücülerini, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) cihazları nispeten düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemetli mıknatısların kullanıldığı diğer uygulamalarda kendine yer bulmaktadır [5]. Ayrıca güçlü NdFeB mıknatıslar otomotiv marş motorları, servo ve diğer motorlar, bilgisayarlar, el tipi taşınabilir aletler gibi birçok uygulamalar için daha küçük ve daha etkili mıknatısların üretimine olanak sağlamıştır. NdFeB mıknatıslar, manyetik ayırıcılar, askeri ve havacılık sistemlerinde ve seyir hızının yüksek olduğu demir yollarında yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

NdFeB mıknatıslar, düşük sıcaklıkta kararlı oldukları için oda sıcaklığında yüksek performansa sahip olabilmektedirler [7]. Ne yazık ki, bu tür kalıcı manyetik malzemelerin nispeten yüksek sıcaklıklardaki performansı tatmin edici değildir [8]. Dahası, uygulama alanlarındaki artışa bağlı olarak yüksek koerzivite ve yüksek sıcaklıkta kararlılıklarının artırılması bu malzemelerin geliştirilmesi gereken en önemli özelliklerindedir [7,9]. Bu noktada, kullanılacak üretim yönteminin seçimi ve daha sonraki aşamalarda ısıl işlem, tane sınırı difüzyonu prosesi (GBDP) gibi ikincil işlemlerin uygulanması oldukça önemlidir. Küçük tane boyutu ile yüksek performanslı NdFeB mıknatıslar elde edilebilmektedir. Tane boyutunu küçültmek, Dy gibi pahalı ağır nadir toprak elementleri olmadan koerziviteyi etkili bir şekilde artırabilir [10]. Üretim yöntemleri arasında bir tür hızlı katılaştırma prosesi olan eriyik eğirme prosesi ile oldukça yüksek soğuma hızlarına erişerek amorf ve/veya yarı amorf mikroyapı ile birlikte üstün manyetik özelliklerin elde edilmesi mümkündür [11–13]. Ayrıca, bazı ısıl işlemler ile NdFeB kalıcı mıknatısların manyetik performanslarının iyileştiği bilinmektedir [8].

NdFeB kalıcı mıknatıslar, ağırlıkça yaklaşık %32 oranında nadir toprak elementi içermektedir [14]. Nadir toprak elementlerinin geri dönüşümü hem çevresel açıdan hem de kaynakların etkili kullanımı açısından önemlidir. Rita Schulze ve arkadaşları yaptıkları NdFeB mıknatıslarının geri dönüşüm potansiyeli tahmini çalışmasına göre %18 Nd malzemesinin 2020–2030 yılları arasında geri dönüşüm yolu ile elde edileceğini ön görmüşlerdir [15]. Bu amaç ile çalışmamızda kullanılan NdFeB alaşımına ağırlıkça %28 Nd

yani nadir toprak elementi içeren ağırlıkça %30 oranında hurda mıknatıs eklenecek yeni bir alaşım elde edilmiştir.

Tüm bunlar göz önüne alındığı zaman, eriyik eğirme yöntemi ile yarı amorf bir yapı elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca alaşım içerisinde % 30 oranında atık mıknatıs kullanılarak atık mıknatısların etkin bir şekilde geri kazanımı konusunda cesaret verici bir sonuç ortaya konulmuştur. Atık mıknatısların geri kazanımı sayesinde piyasa değeri oldukça pahalı olan fakat NdFeB mıknatısları için nerdeyse vazgeçilmez olan Dy ve Pr gibi ağır nadir toprak elementlerinin alaşım içerisine doğrudan kazanılması sağlanmıştır. Çalışma kapsamında uygulanana flaş tavlama işlemi ile yarı amorf yapıdan nanokristalin bir yapıya geçişin sağlanması hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

NdFeB esaslı şerit alaşımlarının üretilmesinde birinci adım olarak yaklaşık  $10^{-4}$  mbar'lık yüksek bir vakumun yanı sıra 590 mbar kısmi basınçtaki argon atmosferi altında silindirik, ingot şeklindeki alaşımlar vakum indüksiyon ergitme (VIM) fırınında üretilmiştir. Alaşımların nominal kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %30 Nd, %67 Fe ve %3 B şeklinde ayarlanmıştır. Ayrıca her bir ingot alaşımına ağırlıkça %30 oranında ve kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %28 Nd, %64 Fe, %1 B, %3 Dy, %3.5 Co ve %0.5 Pr şeklinde olan atık mıknatıs dahil edilmiştir. Elementel homojenliğin istenilen seviyede sağlanabilmesi açısından ingot alaşımlarındaki ergitme işlemi 3 kez tekrarlanmıştır. Her bir ingot alaşımı, yaklaşık 250 g'lık bir ağırlığa sahip olacak şekilde üretilmiştir. Daha sonra bu ingotlardan yaklaşık 25 g'lık numuneler kesilerek, Eriyik eğirme işleminde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Eriyik eğirme prosesi ile NdFeB esaslı şerit alaşımları üretmek için vakum altında, ergitme işlemine tabi tutulan ingot alaşımları,  $1 \times 10$  mm<sup>2</sup>lik bir kesit alanına sahip nozül vasıtasıyla eriyik halde yaklaşık 30 m/s hızla dönen bakır bir disk üzerine 260 mbar püskürtme basıncı ile püskürtülmüştür. Bakır disk ile nozül arasındaki mesafe 0.6 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonuçta, üniform bir kalınlık (yaklaşık 30  $\mu$ m) ve yaklaşık 10 mm genişliğe sahip NdFeB esaslı şerit alaşımları üretilmiştir. Üretilen şerit alaşımların bir kısmına 290 K/s lik çok yüksek ısıtma ve soğutma hızı kullanmak suretiyle, 680 ve 710 °C lik sıcaklıklarda 10 dakika süreyle flaş tavlama ısıl işlemleri uygulanmıştır. Bilindiği gibi, bu sıcaklıklar NdFeB esaslı mıknatıs alaşımlarının yeniden kristalleşme sıcaklığına yakındır [16].

Alaşımlardaki amorf ve kristalin bölgeleri ortaya çıkarmak için X-ışın difraksiyon (XRD) analizi (Cu-K $\alpha$  radyasyonu ile) 2°/dakika tarama hızında

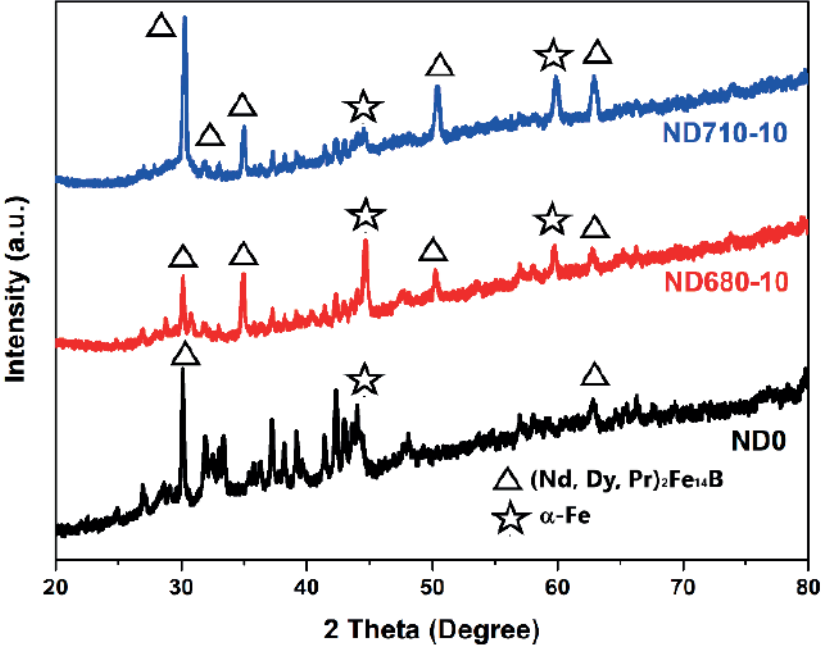
gerçekleştirilmiştir. Manyetik davranışların belirlenmesi amacıyla titreşimli numune manyetometri (VSM) analizi yapılmıştır. NdFeB esaslı alaşımların kristalizasyon sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla, her bir alaşıma diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi gerçekleştirilmiştir.

*Tablo 1. Isıl işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca flaş tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş eriyik eğirme yöntemi ile üretilen NdFeB esaslı alaşımların tanımlanması.*

Eriyik Eğirme Yöntemi ile Üretilen Alaşımların Kodu	Tanımlama
ND0	Eriyik eğirme yöntemi ile üretilmiş, ısıl işlem uygulanmamış
ND680-10	Eriyik eğirme yöntemi ile üretilmiş, 680 °C ta 10 dakika flaş tavllanmış
ND710-10	Eriyik eğirme yöntemi ile üretilmiş, 710 °C ta 10 dakika flaş tavllanmış

### 3. BULGULAR

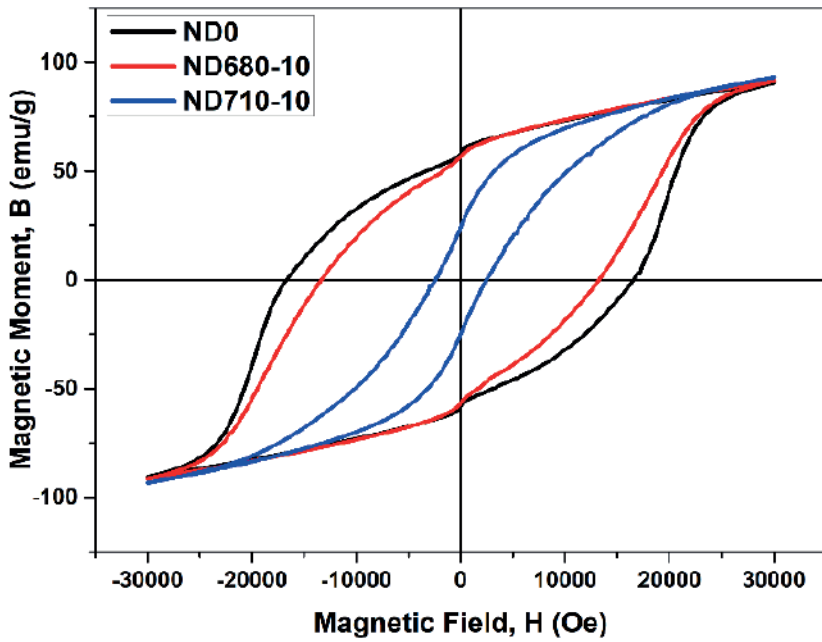
Şekil 1, de eriyik eğirme yöntemiyle üretilen, ısıl işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C ta 10 dakika boyunca flaş tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş NdFeB esaslı şerit alaşımlarının XRD paternleri gösterilmiştir. Buna göre, her bir alaşımların XRD paterninden büyük ölçüde amorf bir yapının yanı sıra eser miktarda kristalin bir yapı oluşumu göze çarpmaktadır. Amorf yapının oluşabilmesi, eriyik eğirme yönteminde kullanılan hızlı soğumanın (yaklaşık  $10^7$  °C/s) etkisi ile açıklanabilmektedir [17]. Isıl işleme tabi tutulmamış alaşımların XRD paterni incelendiğinde, NdFeB alaşımına dahil edilen atık miktarda içerisindeki Dy ve Pr ağır nadir toprak elementleri (HREE) nin etkisiyle, yaklaşık  $2\theta=30^\circ$  ve  $2\theta=45^\circ$  civarında sırasıyla kristalin yapıda sert manyetik (Nd, Dy, Pr)<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B ve yumuşak manyetik  $\alpha$ -Fe fazlarına ait piklerin görülmektedir. 680 ve 710 °C sıcaklıklarda 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısıl işlemi sonucunda yarı amorf yapıdan kristalin yapıya doğru bir dönüşüm meydana gelmiş olup, bu durum sert ve yumuşak manyetik fazlara ait daha fazla kristalin pikin ortaya çıkmasıyla kendini göstermektedir [18]. Daha yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen flaş tavlama ısıl işlemi ile birlikte de sert ve yumuşak manyetik fazlara ait piklerde artış görülmüştür. Bu durum, artan sıcaklıkla birlikte alaşımdaki atomların amorf bir yapıdan kristalin bir yapıya geçişini kolaylaştırması ile açıklanabilir [19].



Şekil 1. Eriyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısı işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi sonrasındaki XRD paternleri.

Şekil 2 ve 3'te, Eriyik eğirme yöntemiyle üretilen, ısı işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C'lik sıcaklıklarda 10 dakika boyunca flaş tavlama ısı işlemine tabi tutulmuş NdFeB esaslı alaşımların titreşimli numune manyetometri (VSM) analizi sonucunda elde edilen demanyetizasyon eğrileri ve demanyetizasyon eğrilerinin ikinci çeyrek (second quadrant) kısımları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, ısı işlem uygulanmamış alaşımda, sırasıyla manyetik koerzivite ( $H_c$ ) 16546 Oe, maksimum enerji ürünü ( $(\text{BH})_{\text{max}}$ ) 136 kJ/m<sup>3</sup>, manyetik remenans ( $B_r$ ) 56 emu/g ve doyum manyetizasyonu ( $B_s$ ) 93 emu/g dir. 680 °C'ta 10 dakika boyunca flaş tavlama ısı işlemine tabi tutulan alaşımların sırasıyla manyetik koerzivite ( $H_c$ ) 13360 Oe, maksimum enerji ürünü ( $(\text{BH})_{\text{max}}$ ) 97 kJ/m<sup>3</sup>, manyetik remenans ( $B_r$ ) 55 emu/g ve doyum manyetizasyonu ( $B_s$ ) 91.5 emu/g dir. 710 °C'ta 10 dakika boyunca flaş tavlama ısı işlemine tabi tutulan alaşımların ise sırasıyla manyetik koerzivite ( $H_c$ ) 2349 Oe, maksimum enerji ürünü ( $(\text{BH})_{\text{max}}$ ) 10 kJ/m<sup>3</sup>, manyetik remenans ( $B_r$ ) 22 emu/g ve doyum manyetizasyonu ( $B_s$ ) 90 emu/g dir. Burada, uygulanan flaş tavlama ısı işleminin sonucunda yumuşak  $\alpha\text{-Fe}$  fazı ile sert  $(\text{Nd, Dy, Pr})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  manyetik fazlarının daha fazla ortaya çıkması ile kalıcı manyetik özellikleri belirleyen  $H_c$  ve  $(\text{BH})_{\text{max}}$ 'ın artması beklenir [20]. Ancak,  $H_c$  ve

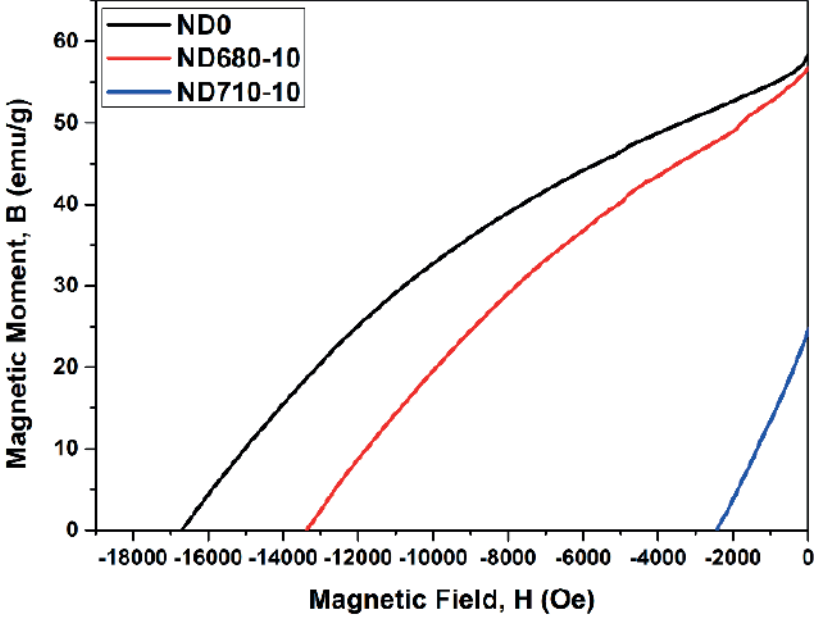
$(BH)_{\max}$ 'ta düşüş meydana gelmesi, uygulanan flaş tavlama ısıl işlemindeki sıcaklık ve sürenin etkisiyle daha çok  $\alpha$ -Fe yumuşak manyetik faz ve  $Nd_2Fe_{14}B$  sert manyetik fazın ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte bu manyetik fazların kristal boyutundaki kabalaşmaya bağlı olarak, aralarındaki kalıcı manyetik özelliği ortaya koyan değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasının istenen derecede gerçekleşmemiş olmasına atfedilebilir [21]. Çünkü kalıcı manyetik karakteri ortaya koyan manyetik özellik olan  $H_c$ , sert ve yumuşak manyetik fazlar arasındaki değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizması ile kendini gösterir [22]. Uygulanan flaş tavlama işleminde tane boyutunun beklenmedik bir şekilde artarak sert manyetiklelik özelliğine zarar verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2. Eriyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısıl işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısıl işlemi sonrasında VSM eğrileri.

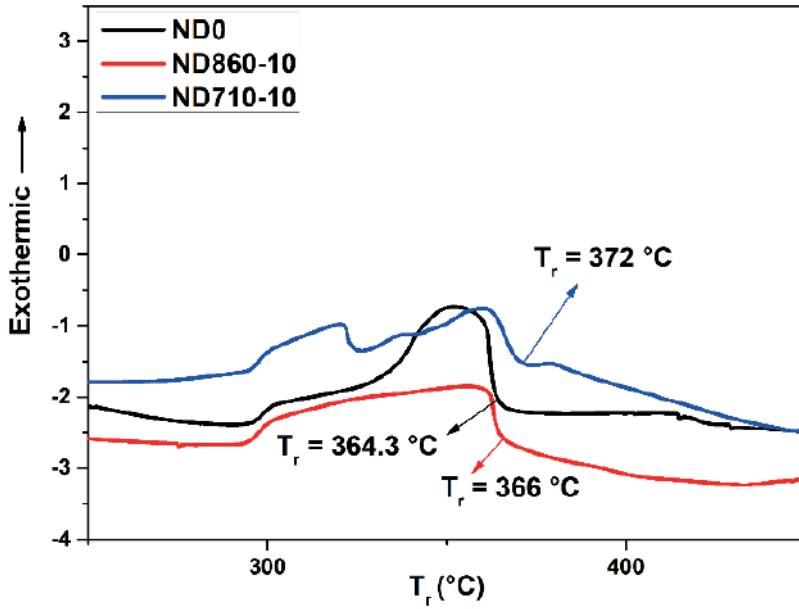
Ayrıca, NdFeB alaşımına dahil edilen atık mıknatısın içerdiği Dy ve Pr ağır nadir toprak elementleri (HREE)'nin, oluşturdukları  $(Nd, Dy, Pr)_2Fe_{14}B$  sert manyetik fazı içerisinde,  $\alpha$ -Fe fazı ile antiferromanyetik değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasının da  $H_c$  ve  $(BH)_{\max}$ 'ı artırması beklenir [9]. Ancak burada, böyle bir durum gerçekleşmemiştir. Doym manyetizasyonunda meydana gelen hafif bir artış, uygulanan flaş tavlama

ısı işlemi sonucunda  $\alpha$ -Fe yumuşak manyetik fazın miktarında meydana gelen artışa atfedilir [23] ki bu da alaşımların XRD paternlerinden açıkça görülmektedir. Bilindiği gibi  $\alpha$ -Fe yumuşak manyetik fazı yumuşak manyetik bir fazdır ve NdFeB sert manyetik alaşımlarında mıknatıs özelliklerinin zarar görmesi sebep olmaktadır.



Şekil 3. Eriyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısı işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi sonrasındaki VSM eğrilerinin ikinci çeyrek (second quadrant) kısımları.

Şekil 4'te, eriyik eğirme yöntemiyle üretilen, ısı işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C ta 10 dakika boyunca flaş tavllanmış NdFeB esaslı alaşımların diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizinden elde edilen eğriler gösterilmektedir. Buradan her bir alaşıma ait kristalizasyon sıcaklık değerleri sırasıyla 364.3, 366 ve 372 °C olarak ölçülmüştür. Uygulanan ısı işlemle birlikte kristalizasyon sıcaklığı hafif bir şekilde artma eğiliminde olmuştur. Isı işlem uygulanan numunelerde ısı işlemin etkisi ile yarı amorf yapıda bir miktar kristalizasyon oluştuğu için kristalizasyon sıcaklıkları hafif bir şekilde artmıştır.



Şekil 4. Eriyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısıl işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısıl işlemi sonrasındaki DSC eğrileri.

#### 4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, Eriyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların manyetik özellikleri, ısıl işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C'lik sıcaklıklarda 10 dakika boyunca ısıl işleme tabi tutulmuş durumda karşılaştırılmıştır. Alaşımların XRD paterni, yarı kristalin bir yapıyı göstermiştir. Uygulanan flaş tavlama ısıl işlemine bağlı olarak,  $\alpha$ -Fe yumuşak manyetik ve  $(Nd, Dy, Pr)_2Fe_{14}B$  sert manyetik kristalin fazlarda artış gözlenmiştir. Alaşımların kalıcı mıknatıslık özelliklerini belirleyen manyetik koerzivite ( $H_c$ ), manyetik remenans ( $B_r$ ) ve maksimum enerji ürünü  $((BH)_{max})$  özelliklerinde, uygulanan flaş tavlama ısıl işlemi ile birlikte düşüş meydana gelmiştir. Flaş tavlama ısıl işlemi ile birlikte özellikle  $(Nd, Dy, Pr)_2Fe_{14}B$  sert manyetik kristal fazının daha fazla ortaya çıkmaktadır. Fakat  $\alpha$ -Fe yumuşak manyetik faz ve  $(Nd, Dy, Pr)_2Fe_{14}B$  sert manyetik fazların kristal boyutlarındaki kabalaşma dolayısıyla kalıcı manyetik davranışı belirleyen değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasının istenen seviyede gerçekleşmediği düşünölmektedir. Böylece kalıcı manyetik davranışı ortaya koyan  $H_c$ ,  $(BH)_{max}$  ve  $B_r$  gibi manyetik özelliklerin azalmasına yol açtığı düşünölmektedir. Flaş



tavlama ısıl işleminde artan sıcaklığa bağlı olarak B<sub>s</sub> de meydana gelen hafif bir artışın da  $\alpha$ -Fe yumuşak manyetik fazın miktarındaki artıştan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

### **TEŞEKKÜR**

Bu çalışma, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörü tarafından finanse edilmiştir (Proje No: 2020-TDP-Mühe-0001).

**KAYNAKLAR**

- [1] D.E. Cygan, M.J. McNallan, Corrosion of NdFeB permanent magnets in humid environments at temperatures up to 150°C, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 139 (1995) 131–138. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(95\)90037-3](https://doi.org/10.1016/0304-8853(95)90037-3).
- [2] D. Brown, B.M. Ma, Z. Chen, Developments in the processing and properties of NdFeb-type permanent magnets, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 248 (2002) 432–440. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00334-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00334-7).
- [3] H. Nakamura, The current and future status of rare earth permanent magnets, *Scripta Materialia*. 154 (2018) 273–276. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.11.010>.
- [4] Z.Z. S. U. Rehman, Q. Jiang, L. He, M. Ghazanfar, W. Lei, X. Hu, S. U. Awan, A. Ma, Synthesis , microstructures , magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 466 (2018) 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.07.020>.
- [5] H. Zhao, H. Liu, J. Su, Influence of heat treatment on microstructures and properties of Nd8Fe78B6Co4 alloy, *Journal of Rare Earths*. 24 (2006) 379–381. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60406-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60406-2).
- [6] J.W. Lyman,, G.R. Palmer, Recycling of Rare Earths and Iron from NdFeB Magnet Scrap, *High Temperature Materials and Processes*. 11 (1993) 175–188. <https://doi.org/10.1515/HTMP.1993.11.1-4.175>.
- [7] W. Fu, S. Guo, C. Lin, R. Chen, X. Liu, D. Lee, A. Yan, Effect of Rare-Earth Content on Coercivity and Temperature Stability of Sintered Nd-Fe-B Magnets Prepared by Dual-Alloy Method, *IEEE Transactions on Magnetics*. 49 (2013) 3258–3261. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2252156>.
- [8] S.J. Z. Haofeng, L. Hongmei, Influence of Heat Treatment on Microstructures and Properties of Nd8Fe78B6Co4 Alloy, *Journal of Rare Earths*. 2 (2006) 4–6.
- [9] M. Lv, T. Kong, W. Zhang, M. Zhu, H. Jin, W. Li, Y. Li, Progress on modification of microstructures and magnetic properties of Nd-Fe-B magnets by the grain boundary diffusion engineering, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 517 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167278>.
- [10] B. Wei, G. Zhang, P. Song, D. Guo, Realizing texture in bulk nanocrystalline Nd-Fe-B magnet via high-stress low-temperature rapid deformation, *Journal of Rare Earths*. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.010>.

- [11] M.F. Kılıçaslan, S.I. Elburni, B. Akgül, The Effects of Nb Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Melt Spun Al-7075 Alloy, *Advances in Materials Science*. 21 (2021) 16–25. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0008>.
- [12] M.F. Kılıçaslan, Y. Yılmaz, B. Akgül, Effects of Heat Treatment and on Magnetic Properties of NdFeB Based Permanent Magnet Alloys, *European Journal of Science and Technology*. (2022). <https://doi.org/10.31590/ejosat.1142054>.
- [13] M.F. Kılıçaslan, Y. Yılmaz, B. Akgül & H. Tiryaki, Effects of flash annealing and external magnetic field on magnetic properties of relatively high Nd content (37% by weight) NdFeB alloy, *J Mater Sci: Mater Electron*. 33 (2022) 22728–22735. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08992-2>
- [14] Y. Yang, A. Walton, R. Sheridan, K. Güth, R. Gauß, O. Gutfleisch, M. Buchert, B.-M. Steenari, T. Van Gerven, P.T. Jones, K. Binnemans, REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review, *Journal of Sustainable Metallurgy*. 3 (2017) 122–149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>.
- [15] R. Schulze, M. Buchert, Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material, *Resources, Conservation and Recycling*. 113 (2016) 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.004>.
- [16] A. Hosokawa, K. Takagi, T. Kuriwa, Y. Inoue, K. Ozaki, Severe plastic deformation of Nd-Fe-B nanocomposite magnets at room temperature, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 473 (2019) 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.032>.
- [17] Z.Y. Zhang, L.Z. Zhao, X.C. Zhong, D.L. Jiao, Z.W. Liu, Phase precipitation behavior of melt-spun ternary Ce 2 Fe 14 B alloy during rapid quenching and heat treatment, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 441 (2017) 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.028>.
- [18] Y. Lin, B. Wu, S. Li, S. Mao, X. Liu, Y. Zhang, L. Wang, The quantitative relationship between microstructure and mechanical property of a melt spun Al-Mg alloy, *Materials Science and Engineering A*. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.047>.
- [19] R.E. Simpson, P. Fons, A. V. Kolobov, T. Fukaya, M. Krbal, T. Yagi, J. Tominaga, Interfacial phase-change memory, *Nature Nanotechnology*. 6 (2011) 501–505. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.96>.
- [20] S. Caglar, M.F. Kılıçaslan, A. Atasoy, H. Tiryaki, M. Erkovan, S. Jik Hong, Effect of heat treatment on magnetic properties of nanocomposite Nd-lean Nd7Fe73B20 ribbons, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32 (2021) 2338–2345. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04999-9>.

- [21] Z. Wang, H. Xu, J. Ni, Q. Li, B. Zhou, Effect of high magnetic field on the crystallization of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/ $\alpha$ -Fe nanocomposite magnets, *Rare Metals*. 25 (2006) 337–341. [https://doi.org/10.1016/S1001-0521\(06\)60064-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0521(06)60064-8).
- [22] T. Schrefl, J. Fidler, H. Kronmüller, Remanence and coercivity in isotropic nanocrystalline permanent magnets, *Physical Review B*. 49 (1994) 6100–6110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.49.6100>.
- [23] V. Swaminathan, P.K. Deheri, S.D. Bhamé, R.V. Ramanujan, Novel microwave assisted chemical synthesis of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B hard magnetic nanoparticles, *Nanoscale*. 5 (2013) 2718–2725. <https://doi.org/10.1039/c3nr33296a>.