



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



NdFeB mıknatısların üretimine yönelik sanal platform modeli

Virtual platform model for production of NdFeB magnets

Yazar(lar) (Author(s)): Musa Faruk ÇAKIR¹, Mustafa KARHAN²

ORCID¹: 0000-0003-2406-372X

ORCID²: 0000-0001-6747-8971

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çakır M. F. ve Karhan M., “NdFeB mıknatısların üretimine yönelik sanal platform modeli”, *Politeknik Dergisi*, 23(3): 763-770, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.560944

NdFeB Mıknatısların Üretimine Yönelik Sanal Platform Modeli

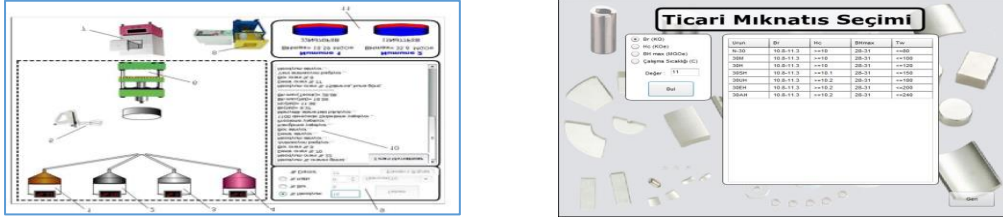
Virtual Platform Model for Production of NdFeB Magnets

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Sanal platform modelinin tasarımı ve oluşturulması. / Design and creation of virtual platform model.
- ❖ B_r , H_c , BH_{max} ve Curie sıcaklığı ile ilgili verilerden matematiksel fonksiyonların elde edilmesi. / Obtaining mathematical functions from data related to B_r , H_c , BH_{max} and Curie temperature.
- ❖ Elde edilen fonksiyonların ayrıntılı değerlendirilmesi. / The detailed evaluation of the obtained functions.
- ❖ Elde edilen fonksiyonlarla sanal laboratuvar platformunun hazırlanması. / Preparing the virtual laboratory platform with the obtained functions.
- ❖ Sanal platform ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması. / Comparison of virtual platform and simulation results.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, gerçek laboratuvarında farklı NdFeB alaşımları üzerine yapılan araştırmalarda elde edilen B_r (kalıcı mıknatıslık), H_c (manyetik koersivite), BH_{max} (maksimum enerji çarpımı) ve Curie sıcaklığı ile ilgili verilerden elde edilen fonksiyonlar ile sanal laboratuvar platformu hazırlanmıştır. / In the study, mathematical functions were obtained from data related to B_r (permanent magnetism), H_c (magnetic coercivity), BH_{max} and Curie temperature obtained in researches on different NdFeB alloys in real laboratory. The virtual laboratory platform was prepared with the obtained functions.



Şekil. Sanal platformun grafiksel kullanıcı arayüzü ve ticari mıknatıs seçimi bölümü. / Figure. The graphical user interface (GUI) of the virtual platform and commercial magnet selection section.

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, NdFeB mıknatısların üretimi öncesinde AR-GE çalışmalarında ve üretimde kullanılacak sanal bir laboratuvar platformunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to develop a virtual laboratory platform that can be used in research and development studies and production before the production of NdFeB magnets.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sanal laboratuvar platformu elde edilen fonksiyonlarla (F_{B_r} , F_{H_c} , $F_{BH_{max}}$) hazırlanmıştır. Bu platform, Action Script 3.0 programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. / The virtual laboratory platform was prepared with the obtained functions (F_{B_r} , F_{H_c} , $F_{BH_{max}}$). It was developed using Action Script 3.0 programming language.

Özgünlük (Originality)

Bu hazırlanan sanal platformda Nd, Fe ve B elementleri kullanılarak kompozit NdFeB mıknatıs üretimi sanal olarak gerçekleştirilmiştir. / In this prepared virtual platform, composite NdFeB magnet production was performed using Nd, Fe and B elements in a virtual way.

Bulgular (Findings)

Çalışmada, gerçek laboratuvarında farklı NdFeB alaşımları üzerine yapılan araştırmalarda elde edilen B_r , H_c , BH_{max} ve Curie sıcaklığı ile ilgili verilerden matematiksel fonksiyonlar elde edilmiştir. / In the study, mathematical functions were obtained from data related to B_r , H_c , BH_{max} and Curie temperature obtained in researches on different NdFeB alloys in a real laboratory.

Sonuç (Conclusion)

NdFeB mıknatıs üretimine yönelik olarak düşük hata oranına sahip bir sanal platform modeli geliştirilmiştir. / A virtual platform model with a low error rate has been developed for NdFeB magnet production.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

NdFeB Mıknatısların Üretimine Yönelik Sanal Platform Modeli

Araştırma Makalesi / Research Article

Musa Faruk ÇAKIR, Mustafa KARHAN*

Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Çankırı, Türkiye

(Geliş/Received : 06.05.2019 ; Kabul/Accepted : 26.08.2019)

ÖZ

Bilgi ve iletişim teknolojisi alanındaki son gelişmeler, eğitim ve üretim teknikleri üzerinde büyük bir etkiye neden olmuştur. Sanal enstrüman kavramı, ölçüm ve üretim sistemleri tasarımı alanında yeni tekniklerin uygulanmasına yol açmıştır. Sanal enstrümanlar, gerçek laboratuvarların ana parçası olan pahalı ve karmaşık gerçek enstrümanların yerini almaya başlamıştır. Böylece laboratuvarların tasarlanması, gerçekleştirilmesi ve modernleştirilme süreci kolaylaşmıştır. Günümüzde NdFeB mıknatıslardaki gelişmeler, birçok teknoloji alanında vazgeçilmez unsur haline gelmelerine sebep olmuşlardır. NdFeB mıknatıslar, maksimum enerji çarpımı BH_{max} sayesinde hibrit elektrikli araçların motorlarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca manyetik rezonans görüntüleme, elektrikli motorlar, çeşitli jeneratörler gibi uygulamalarda, büyük ölçekli veya küçük ölçekli rüzgar enerjisi jeneratörlerinde kullanımları önemli ölçüde artmıştır. Bu çalışmada NdFeB mıknatısların üretimi öncesinde AR-GE çalışmalarında ve üretimde kullanılabilecek sanal bir laboratuvar platformu gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sanal platform masaüstü uygulaması olarak tasarlanıp çalıştırılmıştır. İleriki çalışmalarda açık kaynak donanımlar kullanılarak web tabanlı uygulamalar geliştirilecektir. Çalışmada, gerçek laboratuvarlarda farklı NdFeB alaşımları üzerine yapılan araştırmalarda elde edilen B_r (kalıcı mıknatısiyet), H_c (manyetik koersivite), BH_{max} (maksimum enerji çarpımı) ve Curie sıcaklığı ile ilgili verilerden matematiksel fonksiyonlar elde edilmiştir. Elde edilen fonksiyonlar ile sanal laboratuvar platformu hazırlanmıştır. Oluşturulan laboratuvar sistemi çok amaçlı olarak endüstride kullanılabileceği gibi eğitim amaçlı da kullanılabilir. Mıknatıs tasarımındaki AR-GE çalışmalarını sırasında maliyet ve zaman tasarrufu sağlanması ve yeni mıknatıs çalışmalarının önünün açılması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: NdFeB, BH_{max} (maksimum enerji çarpımı), B_r (kalıcı mıknatısiyet), H_c (manyetik koersivite), sanal platform.

Virtual Platform Model for Production of NdFeB Magnets

ABSTRACT

Recent developments in information and communication technology have caused a major impact on training and production techniques. The concept of virtual instrument has led to the application of new techniques in the area of measurement and production systems design. Virtual instruments have begun to replace the expensive and complex instruments that are the main part of real laboratories. Thus, the process of designing, realizing and modernizing laboratories has been facilitated. Today, developments in NdFeB magnets have caused these magnets to become essential elements in many technology fields. NdFeB magnets are widely used in the engines of hybrid electric vehicles due to the maximum energy product (BH_{max}). In addition, usage of NdFeB in applications such as magnetic resonance imaging, electric motors, various generators and in large-scale or small-scale wind energy generators have increased significantly. In this study, before the production of NdFeB magnets, a virtual laboratory platform which can be used in research and development studies and production is realized. The developed virtual platform is designed and run as a desktop application. In future studies, web based applications will be developed by using open source hardware. In the study, mathematical functions were obtained from data related to B_r (permanent magnetism), H_c (magnetic coercivity), BH_{max} , and Curie temperature obtained in researches on different NdFeB alloys in real laboratory. The virtual laboratory platform was prepared with the obtained functions. The laboratory system can be used in industry for multi-purpose. In addition, it also allows for use for educational purposes. It is aimed to save cost and time during the the research and development studies in magnet design and to perform different magnet works.

Keywords: NdFeB, BH_{max} (maximum energy product), B_r (permanent magnetism), H_c (magnetic coercivity), virtual platform.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalıcı mıknatıslar, son yirmi yıl boyunca performans açısından çarpıcı bir şekilde gelişmiştir ve modern yaşamda önemli hale gelmiştir. Halihazırda çeşitli endüstriyel ekipmanlarda kullanılan kalıcı mıknatıslar genel

olarak ferrit mıknatıs ve nadir toprak mıknatısı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Ferrit mıknatıslar, başlıca demir oksitten oluşan oksit mıknatıslardır. İyi manyetik özelliklere sahip olmalarına rağmen, düşük maliyetlerinden dolayı büyük miktarlarda üretilirler ve sonuç olarak iyi bir fiyat performansı özelliğine sahiptirler. Buna karşın, nispeten yüksek maliyete rağmen, günümüzde nadir toprak mıknatısları, üstün manyetik

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mustafakarhan@gmail.com

özelliklerinden dolayı çeşitli yüksek performanslı cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nadir toprak mıknatısların mukavemeti, ferrit mıknatıslarinkinden yaklaşık 10 kat daha fazladır [1]. Nadir toprak mıknatısları SmCo tipi ve NdFeB mıknatıslar olarak iki sınıfa ayrılırlar. Mevcut üretimle ilgili olarak, nadir toprak mıknatıslarının %98'inden fazlası NdFeB mıknatıslardır. Günümüzde NdFeB mıknatıslar, üstün manyetik özelliklerinden dolayı çeşitli yüksek performanslı cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Nadir toprak mıknatısların en önemli bileşenleri Nd (Neodimyum), Fe (Demir) ve B (Bor) elementleridir. Bu üç elementten oluşan ve katkı maddeleriyle zenginleştirilen NdFeB mıknatıslarının geliştirilmesiyle nadir toprak mıknatısları güçlü bir manyetik akı sağlama kabiliyeti kazanmıştır. Bu yeteneklerinden dolayı birçok teknoloji alanında vazgeçilmez unsur haline gelmişlerdir [1,2,3].

NdFeB mıknatıslar, tüketici elektroniği ve görsel-işitsel sistemler gibi çeşitli ürünlerde de kullanılmaktadır. Buzdolaplarında, çamaşır makinelerinde ve ayrıca klimalardaki en küçük kompresörlerde kullanılırlar. Geleneksel ana ferrit mıknatısların NdFeB mıknatıslarına geçişi performans iyileştirme ve daha büyük güç tasarruflarından kaynaklanmıştır. Klimalarda kullanılan ısı pompalarında NdFeB mıknatısların kullanımıyla, enerji konservasyonu, CO₂ emisyonunun azaltılması ve küresel ısınmanın önlenmesi konusunda büyük faydalar sağlanacaktır. [3,4,5,6,7].

NdFeB mıknatıslar; asansörler, endüstriyel robotlar, enjeksiyon kalıplama makineleri yüksek güçlü AC servo motorlarında da kullanılması anlamında çok önemli bir yere sahiptir. Ayrıca, otomobil uygulamalarında NdFeB mıknatısların kullanımı son zamanlarda büyük ölçüde artmıştır [2].

NdFeB mıknatıslar sadece elektrikli araçlarda veya hibrit elektrikli araçlarda değil, aynı zamanda konvansiyonel benzin ve dizel araçlarda da, örneğin çeşitli sensörlerde, ateşleme bobinlerinde ve hoparlör sistemlerinde kullanılır. NdFeB mıknatısların elektrikli direksiyon sistemlerine uygulanmasının hızla genişlemesi beklenmektedir. Otomobil endüstrisinin yakıt verimliliğinin iyileştirilmesi ve CO₂ emisyonunun yeniden üretilmesi gibi çevresel problemlerle başa çıkma sorumluluğu olduğu göz önüne alındığında, NdFeB mıknatısların otomobil endüstrisinin gelişiminde daha önemli bir rol oynayacağı beklenmektedir [8].

Ayrıca NdFeB mıknatıs ürünleri; görüntüleme sistemlerinde, elektrikli motor teknolojisinde, jeneratör uygulamalarında kullanılmaktadır. NdFeB mıknatıslarının büyük ölçekli veya küçük ölçekli rüzgar enerjisi jeneratörlerinde kullanılmaya başlanmış ve çok yüksek verimler elde edilmiştir [7]. Bu açıklamalardan da anlaşılacağı üzere NdFeB mıknatıslar enerji verimliliğini artırmak, enerji tasarrufu sağlamak ve ekonomik verimliliği artırmak için yüksek performanslı cihazlarda kullanılmaktadır.

Mıknatıs tasarımında önemli kriterlerden biri küçük hacimde yüksek kalıcı (artık) mıknatısiyet yoğunluğuna (B_r) sahip olmaktır. Böylece mıknatıs kuvvetli olur ve istenen akıyı sağlar. Ayrıca büyük bir giderici kuvvete (H_c) (kalıcı mıknatısiyeti yok edici kuvvet) sahip olmalıdır. Böylece dış etkiler tarafından kolaylıkla mıknatısiyeti yok edilemez. Bu iki önemli kriter sonucunda BH_{max} adını verdiğimiz mıknatısın maksimum enerji çarpımı elde edilmektedir. BH_{max} değeri mıknatısların gücünü temsil etmektedir. Mıknatıslar için B_r , H_c ve BH_{max} değerleri çok önemlidir. Kullanım alanlarında bu değerler göz önüne alınarak seçimler yapılır [9-14].

Literatürde elektrik motorları [15,16,17,18], elektromanyetik [19,20], elektrik devreleri [21, 22], yüksek gerilim[23], güç elektroniği [24,25,26] alanlarında birçok bilgisayar destekli çalışmalar bulunmaktadır. Daha spesifik olarak ele alındığında mıknatısların üretimi ile ilgili bilgisayar destekli çalışmalarda genellikle üretilmiş mıknatısların dataları kaydedilerek veri tabanına dayalı ölçüm platformları oluşturulmuştur [27]. Bu hazırlanan sanal platformda ise Nd, Fe ve B elementleri kullanılarak kompozit NdFeB mıknatıs üretimi sanal olarak gerçekleştirildi. Mıknatıs tasarımı yapılırken malzeme ve zamanın önemli etkenler olmasından dolayı, yapılacak çalışmaları bir sanal ortamda tasarlayıp sonra gerçek laboratuvar ortamında denemenin önemli olduğu düşüncesiyle sanal bir üretim platformu gerçekleştirildi.

2. SANAL PLATFORM VERİLERİ VE MATEMATİKSEL FONKSİYONLAR (VIRTUAL PLATFORM DATA AND MATHEMATICAL FUNCTIONS)

Tasarımını gerçekleştirdiğimiz sanal platformun hazırlanmasında 5,183,516 United States patent numaralı çalışma referans alınarak gerekli veriler elde edilmiştir. Referans aldığımız patentte NdFeB mıknatısların üretiminde kullanılan maddelerin toz boyutları 0,3 - 0,8 µm arasındadır [28]. Bu maddelerle çalışırken ortamın inert (oksijensiz) olması gerekmektedir. Kullanılan maddeler aktif elementler olduğu için çok çabuk oksitlendiklerinden dolayı havasız ortamda çalışmalıdır. Bu tür sistemler genelde glovebox adını verdiğimiz sistemlerdir.

Hazırlanan mıknatıs numunelerinin sinterlenmesi (pişirme) için sıcaklığı 700 °C ile 1500 °C arasında değişen fırınlar kullanılmaktadır [29].

NdFeB mıknatısların üretilmesinde Nd (Neodymium) atomik yüzde olarak % 8-30, B(Bor) % 2-28 ve diğer kalan atomik yüzde bölümü de Fe (Demir)'den oluşmaktadır. Referans aldığımız patent çalışmasında yukarıdaki atomik yüzde değerleri kullanılmıştır. Katkı maddeleri olarak da Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, W, Mo, Mn, Ni, Sb, Sn, Ge, Al ve Bi eklenmiştir.

Sanal platformun hazırlanmasında matematiksel fonksiyonlara ihtiyaç vardır. Bu fonksiyonların elde edilmesinde laboratuvar ortamlarının ve kullanılan parametrelerin aynı olması gerekmektedir. Bu konulara dikkat ederek fonksiyonları elde edebilmek için verilere

ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler ilgili referans kaynak-tan alınmıştır.

2.1. Sanal Platformun Oluşturulmasında Kullanılan Veriler (Data for Preparing Virtual Platform)

Çizelge 1'de $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alaşımına ait B_r , H_c ve BH_{max} değerleri verilmiştir. Burada B (Bor) elementinin ilgili alaşımda manyetik özelliklere (B_r , H_c ve BH_{max}) etkisi incelenmiştir. B (Bor) elementi %6 kullanıldığında B_r , H_c ve BH_{max} değerleri en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 1. % B değişimine göre $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alaşım için B_r , H_c ve BH_{max} değerleri [16] (B_r , H_c and BH_{max} values for $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alloy according to B % change [16])

Alaşım Adı: $15Nd-(85-x)Fe-xB$			
%B	Br (KG)	Hc (KOe)	BHmax (MGOe)
0	0,0	0,0	0
2	7,5	1,3	4,1
3	10,4	1,8	7,0
4	10,8	2,8	13,4
6	13,0	8,0	36,5
7	12,9	8,2	36,0
8	12,1	7,3	32,1
10	11,9	8,0	31,9
12	10,5	8,2	25,2
17	8,7	7,6	17,6
23	6,8	11,3	10,9
30	4,2	10,7	4,0
32	3,0	10,2	1,8

Çizelge 2'de $xNd-(92-x)Fe-8B$ alaşımına ait B_r , H_c ve BH_{max} değerleri verilmiştir. Burada Nd (Neodmiyum) elementinin ilgili alaşımda manyetik özelliklere (B_r , H_c ve BH_{max}) etkisi incelenmiştir. Nd (Neodmiyum) elementi %14 kullanıldığında B_r , H_c ve BH_{max} değerleri en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu değerlerde üretilen mıknatıs en küçük hacimde en yüksek manyetik özelliklere sahip olmaktadır. Bu değerlerin dışında grafiklerden de görüleceği manyetik değerlerde azalma görülmektedir.

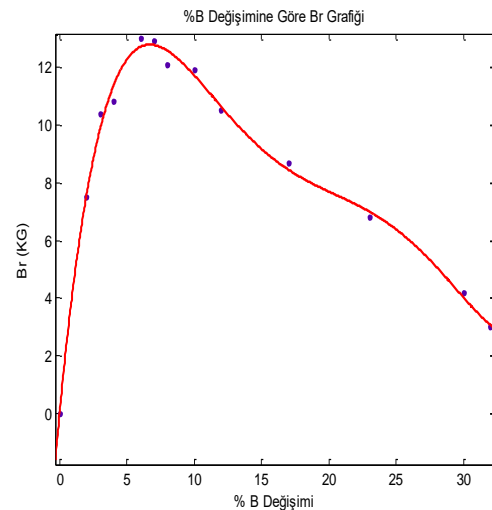
Çizelge 2. % Nd değişimine göre $xNd-(92-x)Fe-8B$ alaşımının B_r , H_c ve BH_{max} değişimi [16] (B_r , H_c and BH_{max} values for $xNd-(92-x)Fe-8B$ alloy according to Nd % change [16])

Alaşım Adı: $xNd-(92-x)Fe-8B$			
%Nd	Br (KG)	Hc (KOe)	BHmax (MGOe)
6	0	0	0
13	13,1	4,8	29,3
14	12,8	7,8	36,5
17	11,6	9,2	31,1

19	10,9	11,4	28,0
25	5,8	12,6	8,8
35	1,9	14,6	≤1

2.2. Sanal Platformun Oluşturulmasına İlişkin Matematiksel Fonksiyonlar (Mathematical Functions for Preparing Virtual Platform)

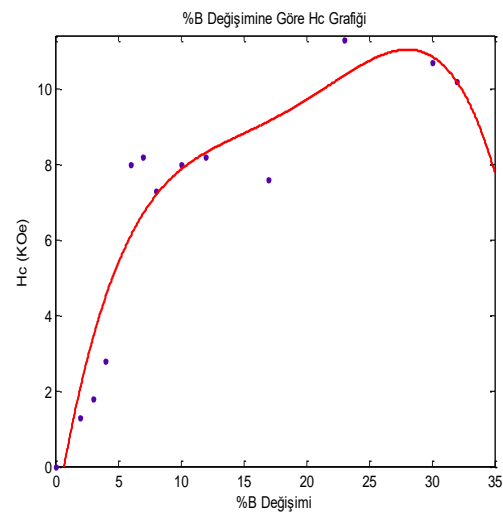
Çizelge 1 kullanılarak $F_{Br}(x=\%B)$, $F_{Hc}(x=\%B)$ ve $F_{BHmax}(x=\%B)$ grafikleri (Şekil 1,2,3) ve fonksiyonları (Denklemler 1,2,3) elde edilmiştir.



Şekil 1. $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alaşımında % B değişimine göre B_r değişimi (B_r change in $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alloy relative to B % change)

$$F_{Br}(x = \%B) = 9,754 \cdot 10^{-6} \cdot x^5 - 0,0009972 \cdot x^4 + 0,03813 \cdot x^3 - 0,6705 \cdot x^2 + 4,959 \cdot x + 0,0536 \quad (1)$$

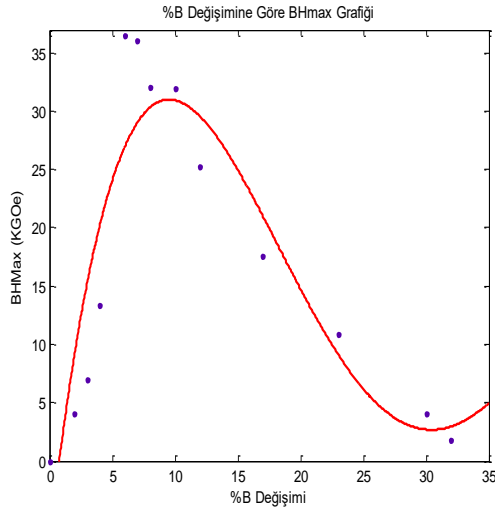
Şekil 1 incelendiğinde $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alaşımında B (Bor) oranı %5 ile % 10 arasında değiştiğinde B_r değeri en yüksek değerleri almaktadır.



Şekil 2. $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alaşımında % B değişimine Göre H_c değişimi (H_c change in $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alloy relative to B % change)

$$F_{H_c}(x = \%B) = -8,322 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,006099 \cdot x^3 - 0,1613 \cdot x^2 + 2,004 \cdot x - 1,316 \quad (2)$$

Şekil 2 incelendiğinde B(Bor)'un %10-%25 aralığında değişimi H_c 'yi 8-10 KOe aralığında değiştirmektedir. Ancak B_r 'nin de değeri düşünüldüğünde (%6 B(Bor) için) H_c 'nin değeri en uygun 8 KOe görülmüştür.

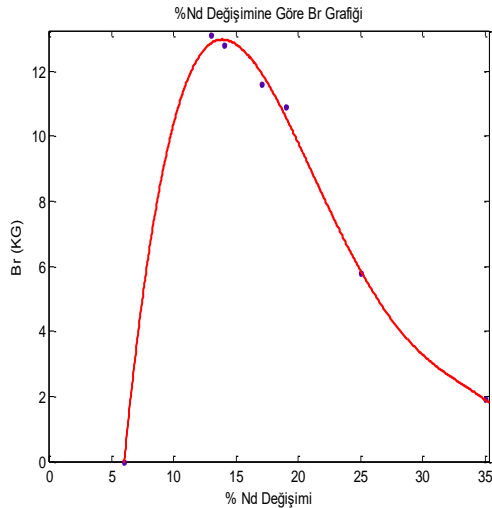


Şekil 3. $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alaşımında % B değişimine göre BH_{max} değişimi (BH_{max} change in $15Nd-(85-x)Fe-xB$ alloy relative to B % change)

$$F_{BH_{max}}(x = \%B) = -0,0001754 \cdot x^4 + 0,02022 \cdot x^3 - 0,7541 \cdot x^2 + 9,474 \cdot x - 6,858 \quad (3)$$

Şekil 3 incelendiğinde B(Bor)'un % değişimi 5-10 aralığında BH_{max} en yüksek değerleri almıştır. B(Bor) %6 olduğunda BH_{max} en yüksek değer olarak 36,5 MGOe değerine ulaşmıştır.

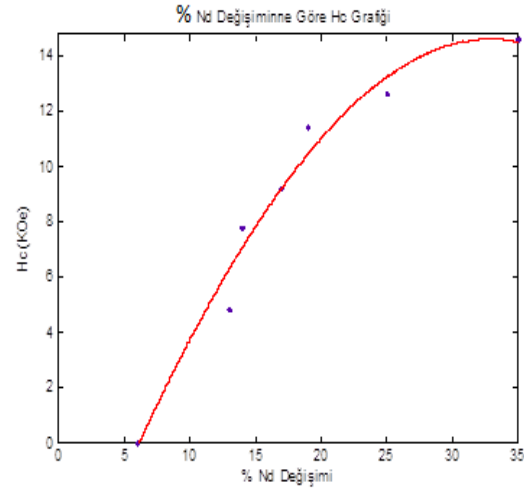
Nd (Neodmiyum) elementinin NdFeB mıknatıslar üzerine etkisini incelemek ve matematiksel fonksiyonları elde etmek için Çizelge 2 'deki veriler kullanılmıştır. Çizelge 2 kullanılarak $F_{B_r}(x = \%Nd)$, $F_{H_c}(x = \%Nd)$ ve $F_{BH_{max}}(x = \%Nd)$ grafikleri (Şekil 4,5,6) ve fonksiyonları (Denklem 4,5,6) elde edilmiştir.



Şekil 4. $xNd-(92-x)Fe-8B$ alaşımında % Nd değişimine göre B_r değişimi (B_r change in $xNd-(92-x)Fe-8B$ alloy relative to Nd % change)

$$F_{B_r}(x = \%Nd) = -0,0001578 \cdot x^4 + 0,01715 \cdot x^3 - 0,6637 \cdot x^2 + 10,21 \cdot x - 40,84 \quad (4)$$

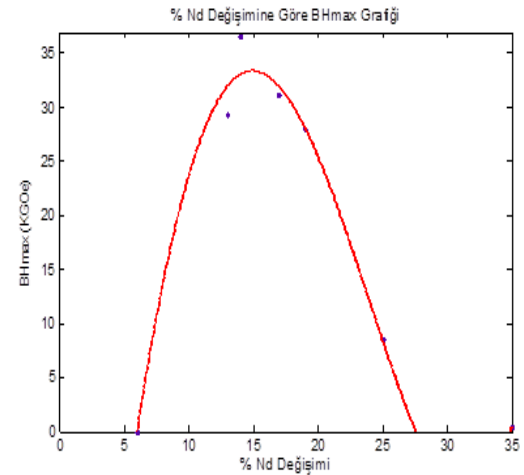
Şekil 4 incelendiğinde Nd'nin %8-15 aralığında değişiminde B_r değeri en yüksek değerlerini almıştır. Nd %13 alındığında B_r değeri 13,1 KG olarak görülmüştür.



Şekil 5. $xNd-(92-x)Fe-8B$ alaşımında % Nd değişimine göre H_c değişimi (H_c change in $xNd-(92-x)Fe-8B$ alloy relative to Nd % change)

$$F_{H_c}(x = \%Nd) = -8,242 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,01436 \cdot x^2 + 1,217 \cdot x - 6,966 \quad (5)$$

Şekil 5 incelendiğinde Nd'nin % olarak değişimi H_c 'yi arttırmaktadır. Ancak burada H_c artarken B_r 'nin ve BH_{max} 'in artış oranları da önemlidir. BH_{max} önemli bir manyetik özellik olduğundan, BH_{max} 'in en yüksek olduğu değeri referans değer olarak kabul edilebilir. Nd'nin %14 olduğu değer uygun bir değerdir.



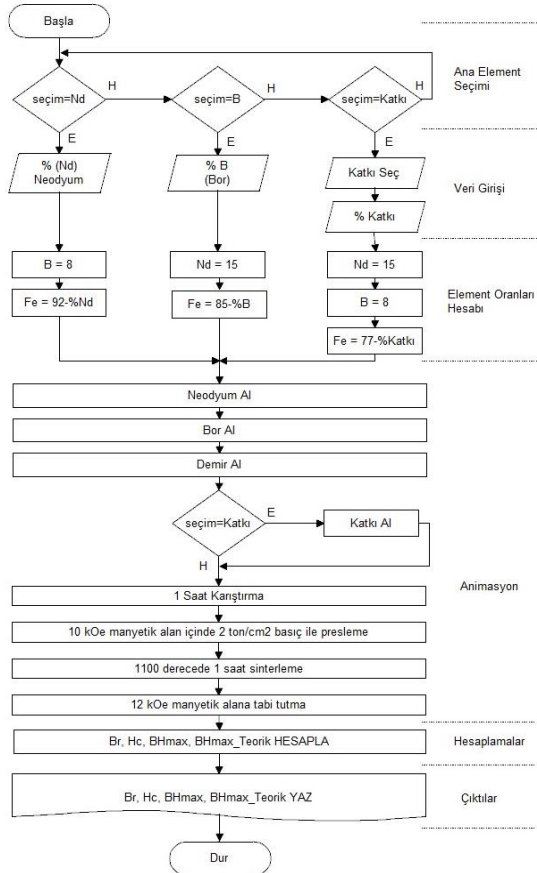
Şekil 6. $xNd-(92-x)Fe-8B$ alaşımında % Nd değişimine göre BH_{max} değişimi (BH_{max} change in $xNd-(92-x)Fe-8B$ alloy relative to Nd % change)

$$F_{BH_{max}}(x = \%Nd) = 0,00026 \cdot x^4 - 0,006882 \cdot x^3 - 0,4002 \cdot x^2 + 13,11 \cdot x - 63,16 \quad (6)$$

Şekil 6 incelendiğinde Nd'nin % olarak değişiminde %13-18 aralığında BH_{max} yüksek değerler almıştır. Nd %14 alındığında BH_{max} değeri 36.5 MGOe olarak görülmüştür.

3. NdFeB MIKNATISLARIN ÜRETİMİ İÇİN SANAL PLATFORM (VIRTUAL PLATFORM FOR PRODUCTION OF NdFeB MAGNETS)

Şekil 8'de arayüzü verilmiş olan laboratuvar platformunun animasyonlar Adobe Flash 8 programı ile hazırlanmıştır. Sanal platform, Action Script 3.0 programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sanal platform masaüstü uygulaması olarak tasarlanıp çalıştırılmıştır. İleriki çalışmalarda açık kaynak donanımlar kullanılarak web tabanlı uygulamalar geliştirilecektir. Geçleştirilen sanal platformun akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir.

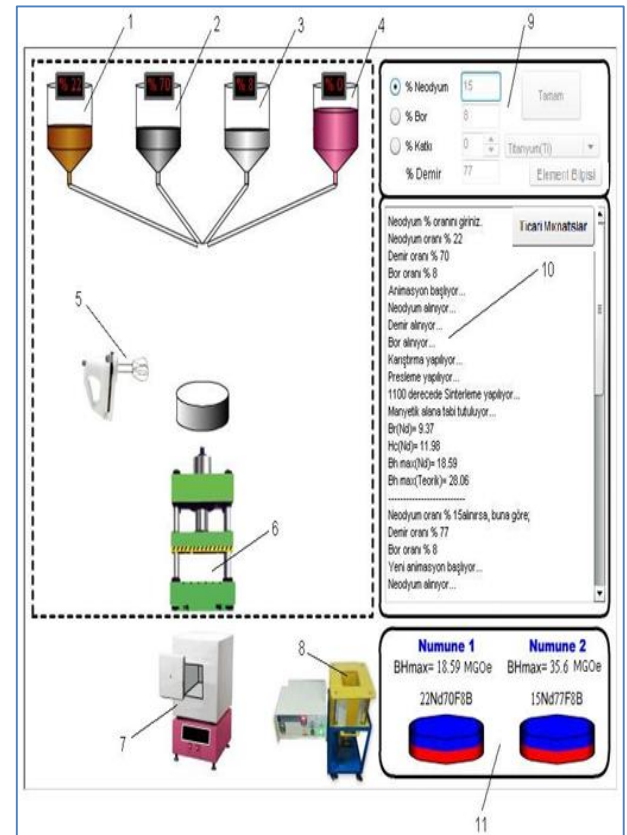


Şekil 7. Sanal platformun akış diyagramı (Flowchart of virtual platform)

Sanal platform, mıknatıs tasarımı üzerine çalışan araştırma ve üretim merkezlerinde, üniversitelerin ilgili araştırma merkezlerinde, lisans ve lisansüstü düzeydeki eğitim çalışmalarında kullanılabilir. Sanal platformu kullanacak araştırmacı ve/veya öğrenciler için platformun aşağıda verilen laboratuvar bölümlerini tanıyarak NdFeB mıknatıs tasarımı ve üretimi gerçekleştirebileceklerdir.

Laboratuvardaki bölümlerin açıklaması şu şekildedir;

- 1- Neodmiyum (Nd) elementinin bulunduğu kap,
- 2- Demir (Fe) elementinin bulunduğu kap,
- 3- Bor (B) elementinin bulunduğu kap,
- 4- Katkı maddelerinin (M=Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb, Cr, W, Mo, Mn, Ni, Sb, Sn, Ge, Al, Bi) bulunduğu kap,
- 5- Numunenin karışımının yapıldığı bölüm,
- 6- Numunenin preslendiği bölüm,
- 7- Numunenin sinterlendiği (1100 °C de fırımlandığı) bölüm,
- 8- Elde edilen numunenin 12 kOe'lik manyetik alana tabii tutulduğu bölüm,
- 9- Hazırlanacak nano mıknatıs için karıştırılacak elementlerin % olarak ağırlık değerlerinin girildiği bölüm,
- 10-Sanal platformun çalışması durumundaki işlem basamaklarının gösterildiği bölüm,
- 11-Elde edilen nano mıknatıs gösterildiği bölüm.



Şekil 8. Sanal platformun arayüz görüntüsü (User interface of virtual platform)

Nd elementini baz alarak mıknatıs üretmek istenildiğinde sanal laboratuvardaki 9. bölümde % olarak Nd değerini girip tamam denildiğinde, sistem çalışıp sonuçta numunenin alaşım formülü ve BH_{max} değerleri elde edilmektedir.

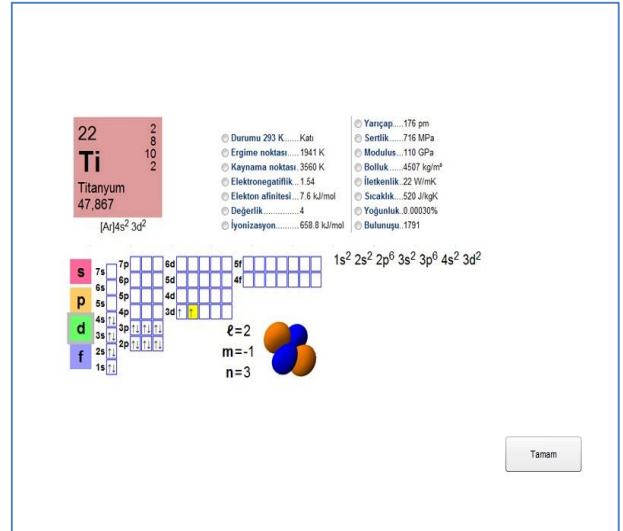
B elementi için de aynı işlemler yapıp istenilen NdFeB alaşımları oluşturabilmektedir. Bir NdFeB mıknatıs katkı maddelerinin artık mıknatısiyetine (B_r) etkisi incelemek için sanal laboratuvarda 9. bölümde katkı maddesini seçip % oranı girildiğinde 15Nd-Fe-8B-xM alaşımındaki artık mıknatısiyet değeri elde edilmektedir (M=katkı maddeleri).

Sanal laboratuvarda günümüz ticari mıknatıslara da yer verilmiştir. B_r , BH_{max} ve çalışma sıcaklıklarına göre ticari mıknatıs seçimleri Şekil 9'da görüldüğü gibi yapılabilmektedir. Sanal platformda üretimi gerçekleştirilen mıknatıslarla ticari mıknatısların özellikleri karşılaştırabilmektedir.



Şekil 9. Ticari mıknatıs seçimi bölümü (Commercial magnet selection section)

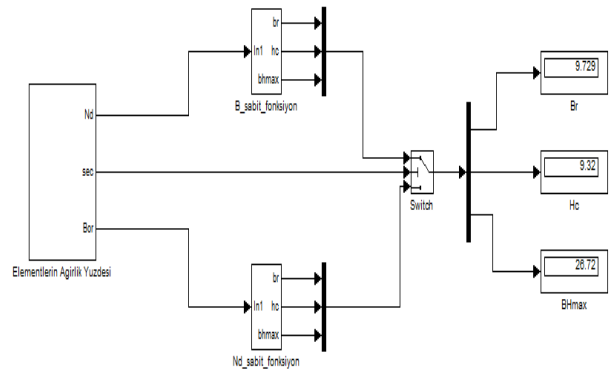
Kullanılan katkı maddelerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için element bilgisi adı altında bir bölüm oluşturulmuştur. Bu bölümde platformda kullanılacak elementlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Şekil 10'da elementlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi veren bölümün bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 10. Elementlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini veren bölüm (Section that provides chemical and physical properties of the elements)

4. SANAL PLATFORMUN SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRILMASI (RESULTS AND COMPARISON OF THE VIRTUAL PLATFORM)

Hazırlanan sanal platformun doğruluk kontrolünün yapılması için Şekil 11'deki blok diyagram oluşturulmuştur. Burada benzetim ile sanal platform sonuç değerlerinin karşılaştırılması ve platformun çalışması test edilmiştir.



Şekil 11. Laboratuvarın MATLAB/Simulink ile blok diyagramı (MATLAB/Simulink block diagram of laboratory)

Çizelge 3'te Sanal platform sonuçlarının doğrulukları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Çizelge dikkatle incelendiğinde sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Hazırlanan sanal platform bu sayede amacına uygun bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Sanal platformda elde edilen verilerdeki hata ihmal edilebilecek seviyelerdedir. Sonuçlar hesaplanırken iki farklı programlama platformu kullanılmış olup veri tipi farklılıkları nedeniyle, elde edilen eğri fonksiyonlarındaki üstel parametrelerin değerleri sonucu doğrudan az da olsa etkilediği

gözlemlenmiştir. Örnek olarak Çizelge 3'te de görüleceği üzere NdFeB mıknatıs üretimi için ağırlık oranının %10'u Nd, %8'i B ve diğer kalan %82 Fe elementi kullanıldığında 10Nd82Fe8 Alaşımı elde edilmektedir. Bu alaşımın manyetik özellikleri Sanal platform için $B_r=10.48$ KG, $H_c=3.68$ KOe ve $BH_{max}=23.63$ MGOe elde edilirken Simulinkte $B_r=10.46$ KG, $H_c=3.684$ KOe ve $BH_{max}=23.67$ MGOe olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Sanal laboratuvar ve Simulink sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of virtual laboratory and Simulink results)

Laboratuvar Sonuçlarının Karşılaştırılması	
Sanal	Simulink
Nd = 20, B=8 için 20Nd72Fe8B Alaşımı	
$B_r=10.15$ KG $H_c=10.97$ KOe $BH_{max}=25.5$ MGOe	$B_r=9.832$ KG $H_c=10.96$ KOe $BH_{max}=25.55$ MGOe
Nd = 10, B=8 için 10Nd82Fe8 Alaşımı	
$B_r=10.48$ KG $H_c=3.68$ KOe $BH_{max}=23.63$ MGOe	$B_r=10.46$ KG $H_c=3.684$ KOe $BH_{max}=23.67$ MGOe
Nd = 15, B=10 için 15Nd75Fe10B Alaşımı	
$B_r=11.72$ KG $H_c=7.86$ KOe $BH_{max}=30.93$ MGOe	$B_r=11.7$ KG $H_c=8.118$ KOe $BH_{max}=30.94$ MGOe
Nd = 17, B=8 için 17Nd75Fe8B Alaşımı	
$B_r=12.16$ KG $H_c=9.16$ KOe $BH_{max}=31.95$ MGOe	$B_r=12$ KG $H_c=9.159$ KOe $BH_{max}=31.99$ MGOe
Nd = 7, B=8 için 7Nd85Fe8B Alaşımı	
$B_r=3.61$ KG $H_c=0.82$ KOe $BH_{max}=7.26$ MGOe	$B_r=3.612$ KG $H_c=0.8205$ KOe $BH_{max}=7.287$ MGOe
Nd = 27, B=8 için 27Nd65Fe8B Alaşımı	
$B_r=5.75$ KG $H_c=13.8$ KOe $BH_{max}=1.78$ MGOe	$B_r=4.695$ KG $H_c=13.77$ KOe $BH_{max}=1.812$ MGOe
Nd=15, B=15 için 15Nd70Fe15B Alaşımı	
$B_r=9.18$ KG $H_c=8.82$ KOe $BH_{max}=24.94$ MGOe	$B_r=9.294$ KG $H_c=9.487$ KOe $BH_{max}=24.94$ MGOe

Mıknatısların tasarımı ve üretimi ile ilgili yapılan bilgisayar destekli çalışmalarda genellikle mıknatısların ölçüm değerleri kaydedilip veri tabanı oluşturulmuştur

[27]. Bu çalışma da ise Nd, Fe ve B elementleri kullanılarak kompozit NdFeB mıknatıs üretimi sanal olarak gerçekleştirilmiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bir sanal platformu gerçekleştirmeden önce, sistemin çalışma koşulları altında davranışının incelenmesi ve uygun verilerin belirli bir kurala uyması gerekmektedir. Yapılan gerçek laboratuvar çalışmalarının bir algoritmaya göre yapılması, sonraki çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilecek sistemi en doğru temsil eden matematiksel fonksiyonları elde etmek sanal laboratuvarın temelini oluşturur. Yapılmak istenen laboratuvar çalışmalarının matematiksel fonksiyonlarla benzetimi gerçekleştirilebilir. Hazırlanan sanal laboratuvarın doğruluk kontrolü MATLAB/Simulink ile yapılmıştır. Sonuçlar birbirine çok yakın değerlerdedir hatta bazı durumlarda aynı değerler elde edilmiştir. Platformun çalışması sonucundaki çıktı hataları, fonksiyonların hazırlanmasında seçilen eğri uydurma metodlarından ve veri tipi farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu tür hatalar, üretilen mıknatısların çalışma ortamlarındaki mıknatısiyet parametrelerini ihmal edilebilecek seviyelerde etkilemektedir.

Sanal platform sayesinde, malzemeleri istenen oranda karıştırarak mıknatıs tasarımı ve üretimi ile ilgili AR-GE çalışmaları yapmak mümkündür. Platform şu anda üretilmiş ticari mıknatıs alaşımları için istenilen ara değer çalışmaları yapabilir. Ayrıca mıknatıs tasarımı AR-GE çalışmalarına katkıda bulunarak, hem numune mıknatısların üretiminde harcanan süre hem de malzeme maliyetlerinden büyük tasarruflar sağlanabilecektir.

Platformun hazırlanmasında kullanılan veriler çoğaltıldıkça, sistemin çalışma aralığı genişleyerek sonuçların daha kararlı olması sağlanmış olacaktır. Platform gelişmeye ve yeniliklere açık olmakla birlikte gerek ticari gerek akademik uygulamalara entegre olabilme esnekliğine sahiptir. Hazırlanan platform eğitimde, üretimde ve AR-GE çalışmalarında büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Minowa T., "Rare Earth Magnets: Conservation of Energy and the Environment", *Resource Geology*, 58(4): 414 – 422. (2008).
- [2] Sugimoto S., "Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets" *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(6): 064001, (2011).
- [3] Xu X.D., Sasaki T.T., Li J.N., Dong Z.J., Sepehri-Amin H., Kim T.H., Ohkubo T., Schrefl T., Hono K. "Microstructure of a Dy-free Nd-Fe-B sintered magnet with 2 T coercivity" *Acta Materialia*, 156: 146-157, (2018).
- [4] Zhang S., Zhao D.L., "Advances in Magnetic Materials: Processing, Properties, and Performance", *CRC Press*, 315, (2017).

- [5] Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S.G., Liu J.P., “Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient”, *Advanced Materials*, 23: 821-842, (2011).
- [6] Coey J.M.D., “Permanent Magnets: plugging the gap”, *Scripta Mater.*, 67(6): 524-529, (2012).
- [7] Hono K., Sepehri-Amin H., “Strategy for high-coercivity Nd-Fe-B magnets”, *Scripta Mater.*, 67 : 530-535, (2012).
- [8] Kaneko Y., “Highest Performance of Nd-Fe-B Magnet Over 55 MGOe” *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5):3275-3278, (2000).
- [9] Wang Z., Zhang J., Wang J., Ju J., Chen R., Tang X., Yin W., Lee D., Yan A., “Coercivity improvement of hot-deformed Nd-Fe-B magnets by stress-induced Pr-Cu eutectic diffusion”, *Acta Materialia*, 156:136-145, (2018).
- [10] Lee R.W., “Hot-pressed neodymium-iron-boron magnets”, *Appl. Phys. Lett.*, 46: 790-791, (1985).
- [11] Grünberger W., Hinz D., Kirchner A., Müller K.H., Schultz L., “Hot deformation of nanocrystalline Nd-Fe-B alloys”, *J. Alloy. Comp.*, 257: 293-301, (1997).
- [12] Pathak A.K., Khan M., Gschneidner K.A., McCallum R.W., Zhou L., Sun K., Dennis K.W., Zhou C., Pinkerton F.E., Kramer M.J., Pecharsky V.K., “Cerium: an unlikely replacement of dysprosium in high performance Nd-Fe-B permanent magnets”, *Adv. Mater.*, 27: 2663-2667, (2015).
- [13] Lewis L.H., Zhu Y., Welch D.O., “Evidence for reversal by nucleation in RE-Fe-B die-upset magnets”, *J. Appl. Phys.* 76: 6235-6237, (1994).
- [14] Liu J., Sepehri-Amin H., Ohkubo T., Hioki K., Hattori A., Schrefl T., Hono K., “Effect of Nd content on the microstructure and coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets”, *Acta Materials*, 61: 5387-5399, (2013).
- [15] Colak I., Irmak E., Kabalcı E., and Issi F., “Design and implementation of a remote laboratory platform using MATLAB builder for NE”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 22: 617-629, (2014).
- [16] Gencer C. and Gedikpinar M., “A computer-aided educational tool for induction motors”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 20: 503-509, (2012).
- [17] Idowu P. and Root C., “Real-time motor current signature analysis tool for undergraduate laboratory”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 18: 634-639, (2010).
- [18] Tekin A., Ata F., and Gokbulut M., “Remote control laboratory for DSP-controlled induction motor drives”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 20: 702-712, (2012).
- [19] Bjekić M., Šučurović M., Božić M., Rosić M., and Antić S., “Using computer for measurement and visualization of rotating magnetic field in AC machines”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 25: 608-624, (2017).
- [20] Iskander M. F., “Technology-based electromagnetic education” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3): 1015-1020, (2002).
- [21] Reyes-Aviles F. and Aviles-Cruz C., “Handheld augmented reality system for resistive electric circuits understanding for undergraduate students”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 26: 602-616, (2018).
- [22] Svoboda J. A., “ELab: A circuit analysis program for engineering education”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 5: 135-149, (1997).
- [23] Vahidi B. and Taherkhani M., “Teaching short circuit breaking test on high-voltage circuit breakers to undergraduate students by using MATLAB-SIMULINK”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 21: 459-466, (2013).
- [24] Bonisławski M. and Hołub M., “Teaching modern power electronics—Computerized test stand design”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 26: 928-937, (2018).
- [25] Yalcin N. A. and Vatanserver F., “A web-based virtual power electronics laboratory”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 24: 71-78, (2016).
- [26] Yamin H. Y., Altawil I. A., Al-Ajlouni A. F., and Al-Fahoum A. S., “A new developed educational approach to improve conventional teaching methodology of the power electronics laboratory”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 19: 193-200, (2011).
- [27] Sim J. W., Baiod R., Brown B. C., Desavouret E., Glass H. D., Hall P. J., ... & Russell, A., “Software for a database-controlled measurement system at the Fermilab” *Proceedings Particle Accelerator Conference, IEEE*, 4: 2285-2287, (1995).
- [28] Sagawa M., Furimuro S., Matsuura Y., “Magnetic materials and permanent magnets”, *United States Patent*, Patent. No:5183516.,feb.2, (1993).
- [29] Kaneko Y. and Ishigaki N., “Recent developments on high-performance NEOMAX magnets,” *JMEPEG*, 3(2): 228-233, (1994).