



## Investigation of the effect of different power degree NdFeB magnets used in interior permanent magnet brushless direct current motor (IPMBLDC) on motor performance

Murat Tören\*<sup>ID</sup>, Hakkı Mollahasanoğlu<sup>ID</sup>

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdogan University, 53100, Rize, Türkiye

### Highlights:

- Simple Permanent magnet BLDC motor design for electric vehicles
- The advantages of NdFeB type magnets used in BLDC motors compared to other magnets
- Effects of NdFeB magnet types on IPMBLDC motor performance

### Keywords:

- Interior Pmbldc
- Finite element method
- Permanent magnets
- Motor performance
- BH<sub>max</sub>

### Article Info:

Research Article  
Received: 31.08.2021  
Accepted: 16.06.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.988877

### Correspondence:

Author: Murat Tören  
e-mail: murat.toren@erdogan.edu.tr  
phone: +90 464 228 7518 / 1143

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the types of NdFeB magnets used to provide better performance in BLDC motors with permanent magnet rotor structure and the effects of these magnets on motor performance parameters were investigated. For BLDC motor performance, magnet types are compared considering speed, efficiency and torque. The effects of NdFeB magnets and magnets of different power degrees (N28-N38-N42-N52) in the motor used on the performance of the motor were determined as seen in Figure A at different temperatures (20°C, 60°C, 80°C). Here, it was determined that the performance effect of N52 magnet, which is the low temperature power density type of NdFeB magnets, is higher than the others. In addition, the effects of the NdFeB magnet types used in the study on the motor heat transfer were determined using a 2.45 kW in-mounted rotor permanent magnet BLDC motor (IPMBLDC) and analysis was made using the finite element method (FEM) for this motor.

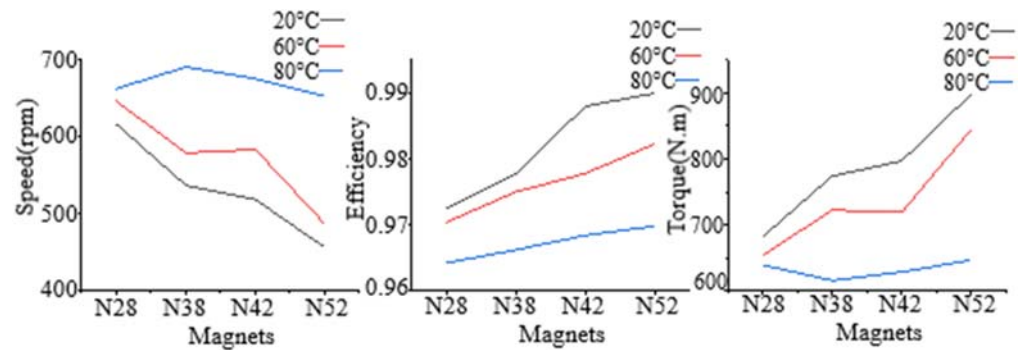


Figure A. The effect of different magnets used in IPMBLDC motor on motor performance parameters

**Purpose:** In this study, it is aimed to determine the effects of magnets used in BLDC motors on the motor performance of NdFeB type magnets with different power densities at different temperatures.

**Theory and Methods:** The magnetic properties of the magnet together with the physical and mechanical properties are also decisive in the choice of magnet. The effects of AlNiCo, SmCo and NdFeB magnets used in BLDC motors and different power rating types of NdFeB magnets on motor performance parameters were analyzed and compared with FEM. In addition, the effects of NdFeB magnet types on heat transfer were analyzed with Ansys-Motorcad.

**Results:** In the comparison of different magnet types, it was determined that the motor performance effects of the NdFeB type were better. In the NdFeB type magnet, it was determined that the N52 type magnet provided the best performance parameters compared to the other types.

**Conclusion:** It has been determined that NdFeB types can be determined in terms of temperature, efficiency, torque and speed performance and better effects can be created in the design according to the best NdFeB magnet type and power rating used in IPBLDC motor design, which is used in different areas such as electric vehicles. In addition, it has been investigated that NdFeB magnet types have better results in the effect of heat transfer, as well as N52s with higher power degrees.



## Gömülü kalıcı mıknatıslı-fırçasız doğru akım motorda (IPMBLDC) kullanılan farklı güç dereceli NdFeB mıknatısların motor performansına etkisinin incelenmesi

Murat Tören\*<sup>ID</sup>, Hakkı Mollahasanoğlu<sup>ID</sup>

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Merkez, Rize, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Basit yapıli Elektrikli araçlar için Kalıcı mıknatıs bir BLDC motor tasarımı
- BLDC motorda kullanılan NdFeB türü mıknatısların diğeri mıknatıslara göre üstünlükleri
- NdFeB mıknatıs türlerinin IPMBLDC motor performansına etkileri

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 31.08.2021  
Kabul: 16.06.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.988877

### Anahtar Kelimeler:

Fırçasız DA motoru,  
sonlu elemanlar metodu,  
kalıcı mıknatıslar,  
NdFeB Mıknatıslar,  
 $BH_{max}$

### ÖZ

Fırçasız doğru akım motorları (Brushless Direct Current-BLDC) senkron motorlar grubunda sınıflandırılan ve endüstriyel alanlarda avantajlı özellikleri dolayısıyla tercih edilen elektrik motorlarıdır. BLDC motorlarının yapısında bulunan sabit manyetik alan üreten mıknatıslar, motor performansına doğrudan katkı sağlamaktadır. BLDC motorlarda kullanılan ve nadir toprak elementlerinin farklı güç derecelerinde üretilen NdFeB mıknatıslar, mükemmel manyetik özellikleri dolayısıyla tercih edilmektedirler. Kalıcı mıknatıslarda, fiziksel etkenler ve çevresel durumun etkisi olmasına rağmen, performans değerleri, maksimum enerji verimi  $BH_{max}$ , artık akı yoğunluğu  $B_r$ , ve içsel zorlayıcı kuvvet  $H_{ci}$  parametreleri ile belirlenmektedir. Bu çalışmada, kalıcı mıknatıslı rotor yapısındaki BLDC motorlarda kullanılan Alnico, Seramik, SmCo ve NdFeB mıknatıs türleri ve bu mıknatısların motor performans parametrelerine etkileri analiz edilmektedir. Motor performansı için, hız, verim ve tork değerlerine göre mıknatıs türleri karşılaştırılmaktadır. NdFeB manyetik özellikleri yapılan analiz karşılaştırmalarında belirlenmektedir. Dolayısıyla çalışmaya bu mıknatısların farklı güç derecelerinde (N28-N38-N42-N52) elde edilen tiplerinin de motor performansına etkileri farklı sıcaklıklardaki (20°C ,60°C ,80°C ) çalışma durumları göz önünde bulundurularak eklenmektedir. Çalışmada 2,45 kW gücünde gömülü monteli rotora sahip kalıcı mıknatıslı BLDC motor (IPMBLDC) kullanılarak, bu motor için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz ile NdFeB mıknatıs tiplerinin motor ısı transferine etkileri de belirlenmektedir.

## Investigation of the effect of different power degree NdFeB magnets used in interior permanent magnet brushless direct current motor (IPMBLDC) on motor performance

### HIGHLIGHTS

- Simple Permanent magnet BLDC motor design for electric vehicles
- The advantages of NdFeB type magnets used in BLDC motors compared to other magnets
- Effects of NdFeB magnet types on IPMBLDC motor performance

### Article Info

Research Article  
Received: 31.08.2021  
Accepted: 16.06.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.988877

### Keywords:

Brushless DC motor,  
finite element method,  
permanent magnets,  
NdFeB magnets,  
 $BH_{max}$

### ABSTRACT

Brushless Direct Current (BLDC) motors are known as synchronous motors and used in industrial areas due to their advantageous features. NdFeB magnets used in BLDC motors and produced at different power levels of rare earth elements are preferred due to their excellent magnetic properties. Although physical factors and environmental conditions have an effect on permanent magnets, the performance values are determined by the maximum energy efficiency ( $BH_{max}$ ), residual flux density ( $B_r$ ) and intrinsic coercive force ( $H_{ci}$ ) parameters. In this study, Alnico, Ceramic, SmCo and NdFeB magnets used in BLDC motors with permanent magnet rotor structure and the effects of these magnets on motor performance parameters are analyzed. For motor performance, magnet types are compared by considering speed, efficiency and torque values. The magnetic properties of the NdFeB are determined by analysis comparisons. Therefore, the effects of the types of these magnets obtained at different power degrees (N28-N38-N42-N52) on the engine performance are included in the study by considering the operating conditions at different temperatures (20°C ,60°C ,80°C ). In the study, the effects of NdFeB on motor heat transfer are determined by an inner mounted rotor IPMBLDC motor with 2.45 kW power, the analysis made with finite element method (FEM).

## 1. Giriş (Introduction)

Elektrikli araçlar da dâhil olmak üzere, endüstriyel birçok uygulamada çeşitli elektrikli motorları kullanılmaktadır. Bu motorlardan bazıları; asenkron motorlar, senkron motorlar, relüktans motorlar, doğru akım motorları, fırçasız doğru akım motorlarıdır. Özellikle, fırçasız doğru akım motorları (BLDC) olarak bilinen elektrik motorları, kalıcı mıknatıslı senkron motor yapısına benzer olduklarından diğer motorlara kıyasla daha fazla tercih edilmektedir [1]. Bunun nedeni, kullanıldıkları alana göre, güç yoğunluğu ve verimlerinin yüksek olmasıdır. Bu motorlarda kullanılan kalıcı mıknatıs seçimi de bu yönüyle motor performans analizleri için önem arz etmektedir.

Kalıcı mıknatıslarda kullanılan nadir toprak elementleri, herhangi bir manyeto motor kuvvet (MMK) uyarımı olmaksızın manyetik alan oluşturabilen malzemeler olarak bilinmektedirler. Nadir toprak elementlerinin konsantrasyonu ile elde edilen NdFeB türü mıknatısların uygulama alanı çoğunlukla rüzgâr enerjisi [2], okyanus-dalga enerjisi [3], elektrikli araçlar [4] gibi temiz enerji teknolojileri ile ilişkilendirilmektedir. NdFeB mıknatıslar, üstün manyetik özelliklerinden dolayı yüksek performanslı cihazlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Ayrıca NdFeB mıknatıslar; otomobil uygulamalarında, yenilenebilir enerji kaynaklarında enerji üreten sistemlerde, asansörler, endüstriyel robotlar, enjeksiyon kalıplama makineleri yüksek güçlü AC servo motorlarında da kullanılmış, NdFeB mıknatısların kullanımını son zamanlarda daha popüler hale getirmiştir [6]. Elektrikli sistemlerde NdFeB kullanımının artışı NdFeB mıknatısların farklı konsantrasyonlarda, farklı alaşımlarla manyetik parametrelerinin pozitif ve negatif değişimlerinin incelenmesini sağlamıştır [7]. Ayrıca sistemlerdeki mıknatıs kullanımının sistem performans etkilerini artırılabilmesi için araştırma çalışmaları yapılmasına olanak sağlamıştır [8].

Bu çalışmada ise, BLDC motorlarda yoğun olarak kullanılan nadir toprak elementi mıknatıslar SmCo ve NdFeB mıknatısların yanı sıra diğer kalıcı mıknatıs türleri AlNiCo, Seramik mıknatıslarının da motor performans parametrelerine etkileri karşılaştırılmaktadır. Ayrıca manyetik özellikleri ile diğerlerinden daha iyi performansa sahip olan NdFeB mıknatısların farklı güç derecelerindeki N28, N38, N42 ve N52 tip kalıcı mıknatıslarının, farklı sıcaklıklardaki manyetik etkileri, gömülü kalıcı mıknatıslı-fırçasız doğru akım motorun (IPMBLDC) performansına ve motor ısı transferine etkisi incelenecektir. Böylece motor tasarımı için optimum performans değerlerine sahip mıknatısın belirlenmesi amaçlanmaktadır.

## 2. Teorik Altyapı (Theoretical Background)

### 2.1. Kalıcı Mıknatıslar (Permanent Magnets)

Kalıcı mıknatıs, bir uyarım akımı yoluyla, üzerinde manyeto motor kuvveti oluşturulmadan manyetik alan üretebilen malzemelere denilmektedir. Endüstriyel birçok uygulamada kullanılan, kimyasal bileşenlerine ve yapılaş teknolojilerine göre genelde metal ve seramik olarak iki gruba ayrılan, kalıcı mıknatısların yaygın olarak kullanılan türleri şunlardır:

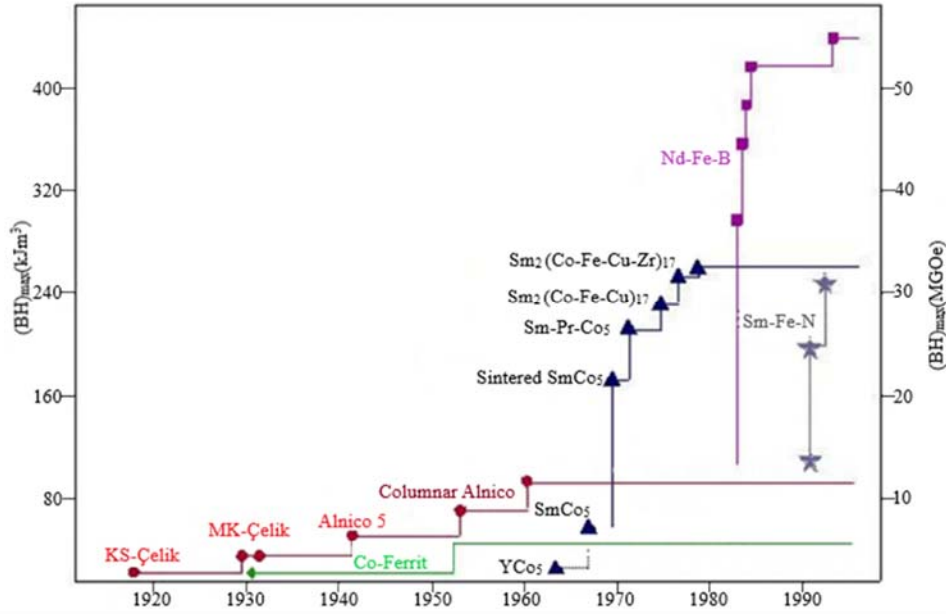
AlNiCo mıknatıslar, alüminyum, nikel ve kobalt alaşımlarından oluşturulup, döküm teknolojisi yöntemiyle üretilirler. Bu mıknatıslar, yüksek kalıcı indüksiyon ve yüksek sıcaklıklara karşı büyük direnç göstermelerine ve yüksek enerji üretmelerine rağmen düşük koersif kuvvetleri nedeniyle sınırlı kullanım alanına sahiptir. Bazı uygulama

alanları olarak; işitme cihazları, manyetik sensörler, ısı ve basınç algılayıcıları ve küçük hoparlörler örnek verilebilir [9]. Sert Ferrit mıknatıslar, demir oksit tozu kullanılarak üretilirler. Bu mıknatıslar, diğer mıknatıs malzemelere göre çok ucuz olmaları nedeniyle geniş uygulama alanına sahiptir. DA motorları, manyetik filtreler, jeneratörler, telefon zilleri, oyuncaklar, radyolar ve manyetik rezonans gibi uygulamalar, ferrit mıknatısların kullanıldığı alanlardan bazılarıdır. Sert ve kırılğan olmalarına rağmen bu mıknatısların manyetik akı yoğunluğu, koersif kuvveti ve mıknatıslığının giderilmesine karşı gösterdiği direnç oldukça yüksektir [10]. Akı yoğunluğu AlNiCo mıknatıslardan daha azdır. Zayıf yapısal karakteristiklerine rağmen yaygın mıknatıslar içinde en hafif olan mıknatıstır. Bu mıknatısların enerji üretimi diğer mıknatıslarla kıyaslandığında daha düşüktür [11].

Nadir toprak elementli mıknatıslar, Lantanitler olarak da adlandırılan ve periyodik tabloda 57 ile 71 arasında numaralandırılmış 15 elementin, diğer elementlerle (Demir, Bor, vb.), farklı oranlı güç derecelerinde oluşturulan mıknatıslardır. Cam, çelik üretimi için Seryum, X-ray film üretimi için Lantanyum, TV ekranlarındaki kırmızı rengi görünür kılmak için Europium, yüksek enerji ürünü değerlerine sahip mıknatıs malzemelerinin üretimi için Samaryum (Sm) ve Neodimyum (Nd) başlıca nadir toprak elementleridir. Özellikle, Neodimyum, nadir toprak elementleri içinde büyük bir yüzdeye sahip olup, Demir ve Bor elementleri ile farklı oranlı güç derecelerinde alaşım oluşturarak çeşitli mıknatıslar (NdFeB) üretilmektedir. Mıknatıs türlerinde NdFeB mıknatısları ve diğer kalıcı mıknatısların gelişimi Şekil 1'de görülmektedir [12]. Neodimyum mıknatısların tümü, yapıldıkları malzemeye göre derecelendirilir. Mıknatısın derecesi ne kadar yüksek olursa ('N'den sonraki sayı), mıknatıs o kadar güçlü olmaktadır. Mevcut endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yüksek Neodimyum mıknatıs sınıfı N52'dir. Dereceyi takip eden herhangi bir harf, mıknatısın sıcaklık derecesini ifade etmektedir. Dereceyi takip eden harf yoksa mıknatıs standart sıcaklıkta demektir. Sıcaklık değerleri standartları ise; M-H-SH-UH-EH ve AH olarak belirlenmektedir [13]. Her bir sınıfın sıcaklık derecesi maksimum çalışma sıcaklıkları ve Curie sıcaklığı adı verilen, mıknatısın kalıcı mıknatıslanma özelliğini kaybettiği maksimum sıcaklık değerlerine göre farklılık içermekte olup, bu değerler Tablo 1'de verilmektedir.

Kalıcı mıknatıslar endüstriyel alanda kullanıldıkları yere göre, çalışma ve en iyi performans gösterdikleri sıcaklıklarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu sınıflar (AH, EH, H, M, MX, SH, SHX, UH, X vs.) mıknatısın manyetik alandaki gücünü de göstermektedir. Ancak bu mıknatısların dışında sınıflandırılmamış mıknatısların (sadece N28, N38, N42 veya N52 olarak) gücünü belirlemek için çalışmada kullanılan mıknatısların en iyi performans sıcaklığı ve performansının en iyi olan değerine göre kıyaslanabileceği sıcaklık değerlerine göre ele alınıp analizler yapılarak bu mıknatısların kullanım yerindeki etkileri belirlenmektedir. Bu sıcaklık değerlerine göre üretilen ve yaygın kullanımı olan nadir toprak elementli mıknatıslar sınıfındaki en iyi manyetik etkilere sahip NdFeB mıknatısların fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'deki gibi verilmektedir.

Tablo 2'de verilen fiziksel ve mekanik özellikleri ile birlikte mıknatısın manyetik özellikleri de mıknatıs tercihinde belirleyicidir. Kalıcı mıknatısların manyetik olarak kullanıldıkları sistemde bir gerilim indüklenmesinde etkili oldukları yer Faraday yasasında verilen ve Eş. 1'de yer alan manyetik akı oluşumu esnasındaki durumudur.



Şekil 1. Kalıcı mıknatısların tarihsel gelişimi (Historical development of permanent magnets)

**Tablo 1.** NdFeB mıknatısların termal özellikleri  
(Thermal properties of NdFeB magnets)

Malzeme Türü	Maks. Çalışma Sıcaklığı (°C)	Curie Sıcaklığı (°C)
N	80	310
NM	100	340
NH	120	340
NSH	150	340
NUH	180	350
NEH	200	350
NAH	220	350

**Tablo 2.** NdFeB mıknatısların fiziksel ve mekanik özellikleri  
(Physical and mechanical properties of NdFeB magnets)

Parametreler	Değerler
Yoğunluk	7,4-7,5 g / cc 3.
Sıkıştırma mukavemeti	950 MPa (137.800 psi)
Gerilme direnci	80 MPa (11.600 psi)
Vickers sertliği (Hv)	560-600
Young modülü	160 GPa (23.200 ksi)
Geri tepme geçirgenliği	1,05 µrek
Elektriksel direnç (ρ)	160 µ-ohm-cm
Isı kapasitesi	350-500 J/(kg.°C)
Mıknatıslanma yönüne paralel termal genişleme katsayısı (0 ila 100°C)	5,2 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Mıknatıslanma yönüne dik termal Genleşme Katsayısı (0 ila 100°C)	-0,8 x 10 <sup>-6</sup> /°C

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ (Volt)} \quad (1)$$

Burada,  $U$  indüklenen gerilimi,  $N$  bobindeki sarım sayısını ve  $d\Phi/dt$ , mıknatıslar tarafından indüklenilen ve zamanla değişen manyetik akıdır. Çalışma bölgesinde sabit geçirgenliğe sahip sert manyetik malzemelerin manyetik akı yoğunluğu Eş. 2 ile belirlenmektedir.

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \text{ (Gauss)} \quad (2)$$

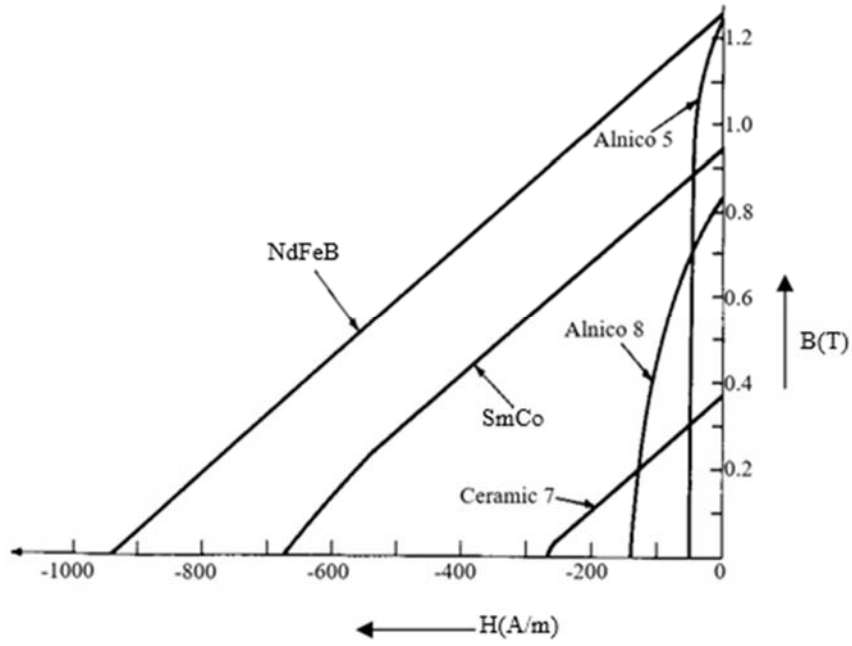
Burada,  $\mu_0$  havanın manyetik geçirgenliği,  $\mu_r$  malzemenin bağlı geçirgenliğini ve  $H$  uygulanan manyetik alan şiddetini ifade etmektedir [14]. Manyetik akı oluşumunda malzeme manyetik eğrisi, kritik bir demanyetizasyona ulaştıktan sonra, lineer olmayan geçirgenliğe sahip mıknatıslar demanyetizasyon eğrisi üzerinde çalışır ve küçük bir döngü meydana getiren geri tepme eğrisi oluşturur. Bu eğri genellikle bir geri tepme çizgisiyle, yani küçük bir döngünün lineer modeliyle yaklaşık olarak belirlenir. Tersine çevirme eğrisinin yörüngesi, yeni ve daha düşük artık manyetik akı yoğunluğuna (kalıntı) karşılık gelir. Manyetik alan sıfıra kadar değiştirildiğinde, yeni bir düşük kalıcı akı yoğunluğuna ulaşır. Şekil 2'de kalıcı mıknatısların demanyetizasyon eğrisinde manyetik değerlerine göre yerlerinin gösterimi verilmektedir [15]. Bu demanyetizasyon eğrisinde en iyi performansın NdFeB olduğu görülebilmektedir. NdFe B türü kalıcı mıknatısların 1.2 T değerinden yüksek bir manyetik akı yoğunluğu olduğu incelenmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, kullanımı yaygın ve manyetik özellikleri diğer kalıcı mıknatıslara göre daha iyi olan NdFeB mıknatısın farklı güç derecelerindeki türleri de incelenmektedir. Bu incelemede ise kalıcı mıknatıslar içerisinde üstünlüğü belirlenen NdFeB mıknatısların farklı güç derecelerindeki tiplerinin demanyetizasyon eğrileri ve demanyetizasyon çizgilerine göre elde edilen maksimum çalışma değerleri gösterilmektedir.

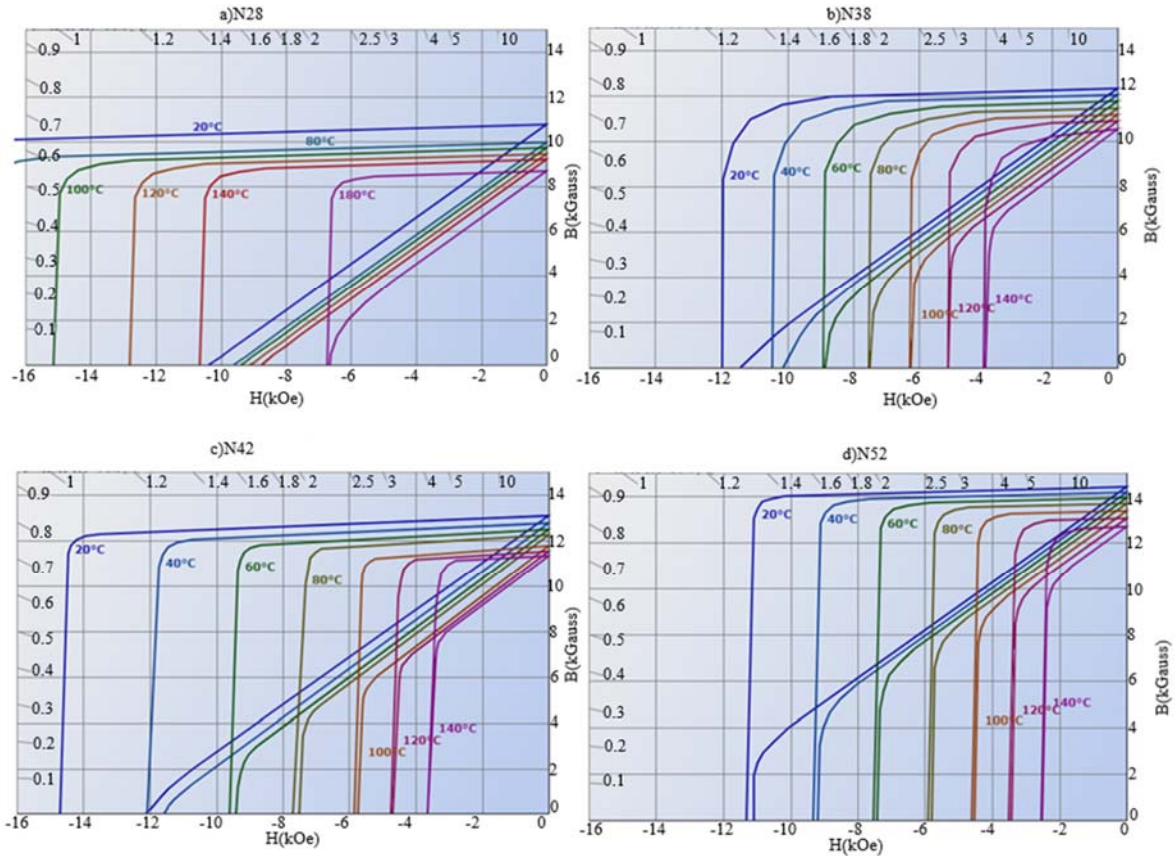
Şekil 3'te NdFeB türü mıknatısların farklı güç yoğunluklu tiplerinden N28-N38-N42 ve N52 tip mıknatısların demanyetizasyon eğrilerinden elde edilen manyetik değerlerin maksimum olduğu sıcaklığın 20°C olduğu belirlenmektedir.

Bu demanyetizasyon grafikleri NdFeB mıknatısların maksimum enerji yoğunluklarına göre adlandırılmış olan N28,N38, N42 ve N52 tipi mıknatıslarının grafikleridir. Bu mıknatısların manyetik karakteristik özellikleri ise Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3'te manyetik karakteristikleri belirlenen mıknatısların demanyetizasyon grafikleri kullanılarak elde edilen manyetik parametre değerleri Tablo 4'te verilmektedir. NdFeB türü mıknatısların farklı güç yoğunluklarındaki tipleri N28,N38,N42,N52 mıknatıslarının en iyi manyetik değerlerinin olduğu Şekil 3 eğrilerinden incelenmektedir.



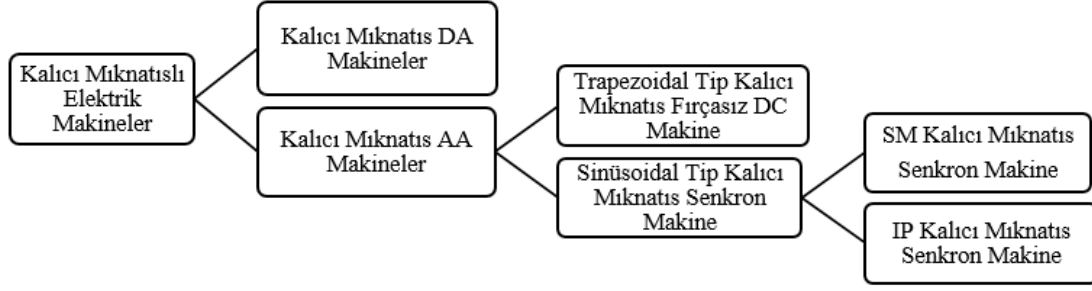
Şekil 2. Kalıcı mıknatısların demanyetizasyon eğrileri (Demagnetization curves of Permanent magnets)



Şekil 3. NdFeB mıknatısların farklı konsantrasyondaki demanyetizasyon eğrileri (Demagnetization curves of NdFeB magnets at different concentrations)

Buna göre bu mıknatıs tiplerinin Tablo 4'te 20°C'de elde edilen manyetik değerleri verilmektedir [19]. Tabloda verilen parametreler;  $P_c$  (permeans) manyetik iletkenlik katsayısı,  $B_r$  manyetik akı yoğunluğu,  $H_c$  manyetik alan şiddeti ve  $BH_{max}$  maksimum enerji

ürünü değerleridir. Bu değerler göz önünde bulundurularak mıknatısların farklı güç yoğunluğundaki performansları belirlenebilmektedir.



Şekil 4. Kalıcı mıknatıslı elektrik makinelerinin sınıflandırılması (Classification of permanent magnet electric machines)

Tablo 3. NdFeB mıknatısların manyetik karakteristiği (Magnetic characteristic of NdFeB magnets)

Malzeme	$B_r$ (kG)	$H_c$ (kOe)	$H_{ci}$ (kOe)	$BH_{max}$ (MGOe)
N28	10,3-10,9	>9,8	>25	26-29
N38	12,2-12,6	>11,0	>12	36-38
N42	13,0-13,2	>11,0	>12	40-42
N52	14,5-14,8	>11,2	>11	49,5-52

Tablo 4. Farklı güç derecesindeki NdFeB mıknatısların 20°C'de manyetik değerleri (Magnetic values of NdFeB magnets at different concentrations)

Malzeme	$P_c$	$B_r$ (kG)	$H_c$ (kO)	$BH_{max}$ (MGO)
N28	0,83	4,77	-5,76	27,49
N38	0,83	5,45	-6,59	35,93
N42	0,83	5,81	-7,02	40,81
N52	0,83	6,39	-7,72	49,28

## 2.2. Fırçasız DA Motorları (Brushless DC Motors-BLDC)

Fırçasız doğru akım motorları, kalıcı mıknatıslı elektrik makineleri sınıfındaki alternatif akım makineleri türüne ait elektrikli motorlardır. Kalıcı mıknatıslı makinelerin sınıflandırılması Şekil 4'te verilmektedir.

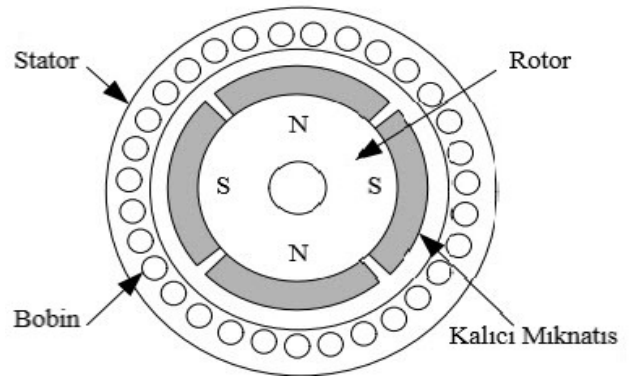
BLDC motor endüstriyel alanda otomotiv, uçak, elektrikli ev aletleri, ısıtma, soğutma, havalandırma sistemleri, sağlık, robot teknolojisi ve uzay teknolojisinin geliştirilmesinde kullanılan özel amaçlı elektrik motorlarından. Bu motorların; uzun çalışma ömrü, geleneksel fırçalı doğru akım motora oranla çok küçük RF gürültüsü olması, bakım maliyetinin az olması ve ark oluşturmaması, daha yüksek verimli olması ve çok yüksek hızlara çıkabilme, yüksek dinamik cevap verme gibi avantajları vardır [16]. BLDC motorlar, Şekil 5'te de genel görünümü verilen hali ile sabit mıknatıslı rotor ve üzerinde sargılar olan stator dan meydana gelir. Bununla birlikte, makinenin hava boşluğunda sinüsoidal bir akı yoğunluğu üretmek üzere yapılmış sargılara sahip stator yapısı, bir asenkron motorun statoruna benzerdir.

Stator yapısı, bir dış gövdeden ve sarımları olan bir çekirdekten oluşur. Sarımlar stator tasarımına göre dağıtılmış sargılı veya dağıtılmamış sargılı olabilir.

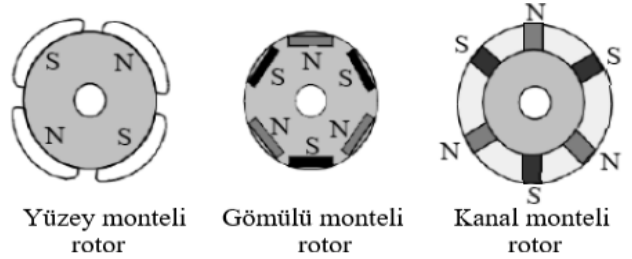
Statorda, 3 fazlı sargılar stator çekirdeğinde sarılır. BLDC motordaki stator sargılarından üç fazlı indüksiyon motorlarında olduğu gibi, alternatif akım geçtiğinde dönen bir manyetik alan üretilerek rotorun dönmesi sağlanır.

BLDC motorlarında rotor yapısı ise mıknatısların rotora yerleştirilme durumuna göre Şekil 6'da görüldüğü gibi adlandırılır [17]. Mıknatıslar rotorun yüzeyine yerleştirilirse, yüzeye monteli,

mıknatıslar önceden kesilmiş yuvalarda rotorun içine yerleştirilirse, gömülü monteli ve kanal şeklinde monteli olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5. BLDC motor genel yapısı (BLDC motor general structure)



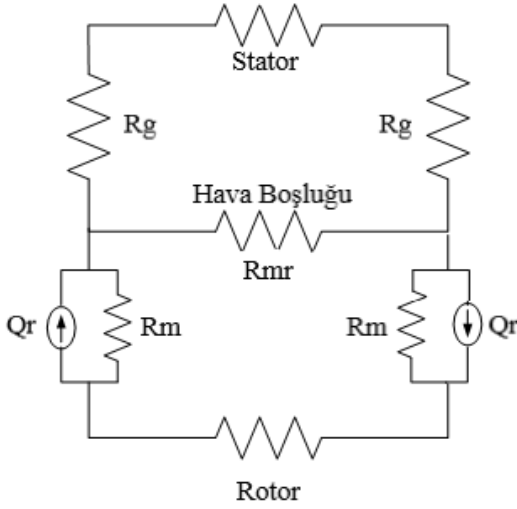
Şekil 6. BLDC motorlarda kullanılan rotor yapıları (Rotor structures used in BLDC motors)

BLDC motorlarda kullanılan mıknatısların performans değerlendirmesinde motorun manyetik eşdeğer elektrik devresinden faydalanılır. Şekil 7'de kalıcı mıknatıslı BLDC motorun manyetik eşdeğer devresi verilmiştir. Bu eşdeğer devreden faydalanılarak elde edilen eşitlikler sayesinde kalıcı mıknatısın motor üzerindeki etkisi belirlenebilmektedir [18].

Mıknatısın, kalıcı mıknatıslı bir elektrik motorundaki tasarımı önemlidir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, mıknatısın bulunduğu konumda eşdeğeri, bir akı kaynağı ( $\Phi_r$ ) ve buna paralel bir iç relüktans değerinden ( $R_m$ ) oluşmaktadır. Bu eşdeğer ifadedeki manyetik akı değeri Eş. 3 ile ifade edilmektedir.

$$\Phi_r = B_r * A_{mk} \quad (3)$$

Burada,  $\Phi_r$  mıknatıs tarafından üretilen manyetik akıyı,  $B_r$  mıknatısın kalıcı akı yoğunluğunu ve  $A_{mk}$  mıknatısın kesit alanını ifade etmektedir. Kesit alanı ise Eş. 4 ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 7. Kalıcı mıknatıslı BLDC motor manyetik eşdeğer devresi (Permanant magnet BLDC motor magnetic equivalent circuit)

$$A_{mk} = W_{mk} * L \quad (4)$$

Eşitlik 4'te,  $W_{mk}$  mıknatısın genişliğini ve  $L$  paket uzunluğunu ifade etmektedir. Mıknatısın eşdeğer devresinde manyetik akıya paralel bağlanan relüktans değeri ise Eş. 5 ile belirlenmektedir.

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_{mk}} \quad (5)$$

Burada,  $h_m$ , mıknatıs uzunluğu,  $\mu_0$  hava aralığı manyetik geçirgenliği,  $\mu_r$  mıknatısın manyetik geçirgenliğidir. Manyetik eşdeğer devrede hava aralığı relüktans değeri ise Eş. 6'da verilmiştir.

$$R_g = \frac{g * k_{cs}}{\mu_0 \left( \frac{1}{2} D_{ms} \cdot \alpha_{mk} + 2 * g \right) * L} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da,  $R_g$ ,  $g$ ,  $k_{cs}$ ,  $D_{ms}$  ve  $\alpha_{mk}$  sırasıyla; hava aralığı relüktansı, hava aralığı uzunluğu, karter katsayısı, mıknatıs yüzey çapı ve mıknatıs yüzey açısını ifade etmektedir. Bu ifadeden elde edilen relüktans değeri ve mıknatıs manyetik akı değerine bağlı olan hava aralığı akısı  $\Phi_g$  ise Eş. 7 ile elde edilmektedir.

$$\Phi_g = \frac{\Phi_r}{1 + \frac{R_g}{R_m}} \quad (7)$$

Eş. 5'te görüldüğü gibi mıknatısın manyetik geçirgenliğinin fazla olması mıknatıs relüktans değerini ters orantılı etkilemektedir. Yüksek geçirgenlik düşük relüktans değeri anlamına gelmektedir. Bu durumda elektrik devreleri gibi çözümlenen manyetik devrelerin çözümü, mıknatıs tarafında üretilen manyeto motor kuvvetinin, toplam harcanan manyeto motor kuvvetine eşitlenmesi şeklinde yapılmaktadır. Üretilen manyeto motor kuvveti motor nüve ve hava aralığında harcanılmaktadır. Ancak sacın relüktansı hava aralığı relüktansına göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilmektedir. Buna göre mıknatıs tarafından üretilen manyeto motor kuvveti Eş. 8'deki gibi elde edilmektedir.

$$F_m = (\Phi_r - \Phi_g) \cdot (R_m + R_{sac}) = \Phi_g \cdot R_g \quad (8)$$

Burada  $F_m$  mıknatısın ürettiği MMK,  $R_{sac}$  rotor kaçak relüktans değeridir. Bu ifadeler göz önüne alındığında üretilen manyeto motor

kuvveti ve oluşan manyetik akı değerlerine göre mıknatıstaki manyetik akı yoğunluğu ( $B_m$ ) Eş. 9 ile ifade edilmektedir.

$$B_m = \frac{1 + R_g/R_{sac}}{1 + R_g/R_m} \cdot B_r \quad (9)$$

Mıknatısın kalıcı mıknatıs akı yoğunluğuna ( $B_r$ ) bağlı olan diğer bir parametre ise hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ( $B_g$ ) olup, Eş. 10'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$B_g = \frac{A_m/A_g}{1 + R_g/R_m} \cdot B_r \quad (10)$$

Burada  $A_m$  ve  $A_g$  sırasıyla, mıknatıs alanı ve hava aralığı alanını ifade etmektedir. Tüm bu ifadelerden, mıknatısın tasarım parametrelerinin; motor hava aralığını ve üretilen manyeto motor kuvveti değerlerini önemli oranda etkilediği belirlenebilmektedir. Mıknatıs manyetik değerleri motor performans parametreleri olan hız, tork ve verim gibi parametreleri etkileyen hava aralığı parametrelerini ve mıknatıslanma ile elde edilen manyeto motor kuvvetini de etkilemektedir. Bu etki ayrıca, motor performans parametrelerinden zıt elektromotor kuvveti ve elektromanyetik moment değerleri ile ilişkili olup, Eş. 11-12'de ifade edilmektedir.

$$\overline{E}_0 = \frac{P}{2} * N_{tf} * w_m * \Phi_g * k_w * k_{st} \quad (11)$$

$$\tau_e = 3 * \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{P}{2} * N_{tf} * B_g * A_k * k_w * k_{st} * I \quad (12)$$

Bu ifadelerde,  $\overline{E}_0$  zıt elektromotor kuvvetini,  $\tau_e$  elektromanyetik momenti,  $P$  çıkış gücünü,  $N_{tf}$ , faz başına toplam sarım sayısı,  $A_k$ , kutup kesit alanı,  $k_w$  sargı faktörünü,  $k_{st}$ , yığın faktörü ve  $I$  ise q eksenini yönünde akımı göstermektedir.

Tüm bu denklemler incelendiğinde, BLDC motorlardaki performans değerlerinin, motorlarda kullanılan kalıcı mıknatıs parametrelerine bağlı olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada, farklı konsantrasyonlardaki (farklı manyetik parametrelere sahip) kalıcı mıknatıslarla (N28, N38, N42 ve N52) tasarlanan ve farklı çalışmalarda iyi performans vermiş [19] BLDC motorun performansı ve motor çalışma karakteristiğini etkileyen [20] ısı transferi etkileri incelenmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada, endüstriyel alanda ve orta güçteki bir elektrikli araç çekiş motoru olarak kullanılmak üzere tasarlanan, IPMBLDC motor kullanılmıştır. Bu motorda kullanılan kalıcı mıknatısların, manyetik özelliklerinin motor performansına etkilerinin karşılatılmalı bir analizi ve değerlendirilmesi yapılmaktadır. Tablo 5'te, çalışmada kullanılan IPMBLDC motorun özellikleri verilmektedir.

Tablo 5. IPMBLDC motor parametreleri (IPMBLDC motor parameters)

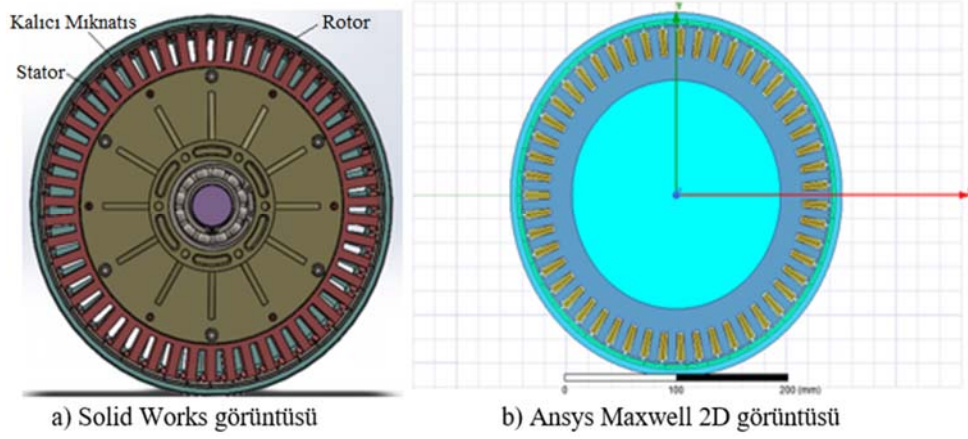
Parametreler	Değerler
Akım	24 A
Gerilim	110 V
Anma Gücü	2,45 kW
Tepe Güç	10 kW
Anma Torku	52 Nm
Tepe Torku	746 Nm
Frekans	400 Hz
Referans Hız	440 rpm
Maksimum Hız	556 rpm
Kutup Sayısı	46

Anma gücü 2,45 kW olan IPMBLDC motorun tasarım programında elde edilen SolidWorks görüntüsü (a) ve motorun sonlu elemanlar analizi için Ansys Maxwell 2D görüntüsü (b), Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 8a'da görüldüğü gibi, rotor dışarda ve mıknatısın yüzeyi gömülü olduğu solid çizimi, aynı ölçülerle çizilmektedir. Şekil 8b'de ise aynı üretim ölçüleri ile 2D manyetik analiz çizimi elde edilmektedir. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz, bu 2D çizim üzerinden gerçeğine uygun şekilde gerçekleştirilmektedir.

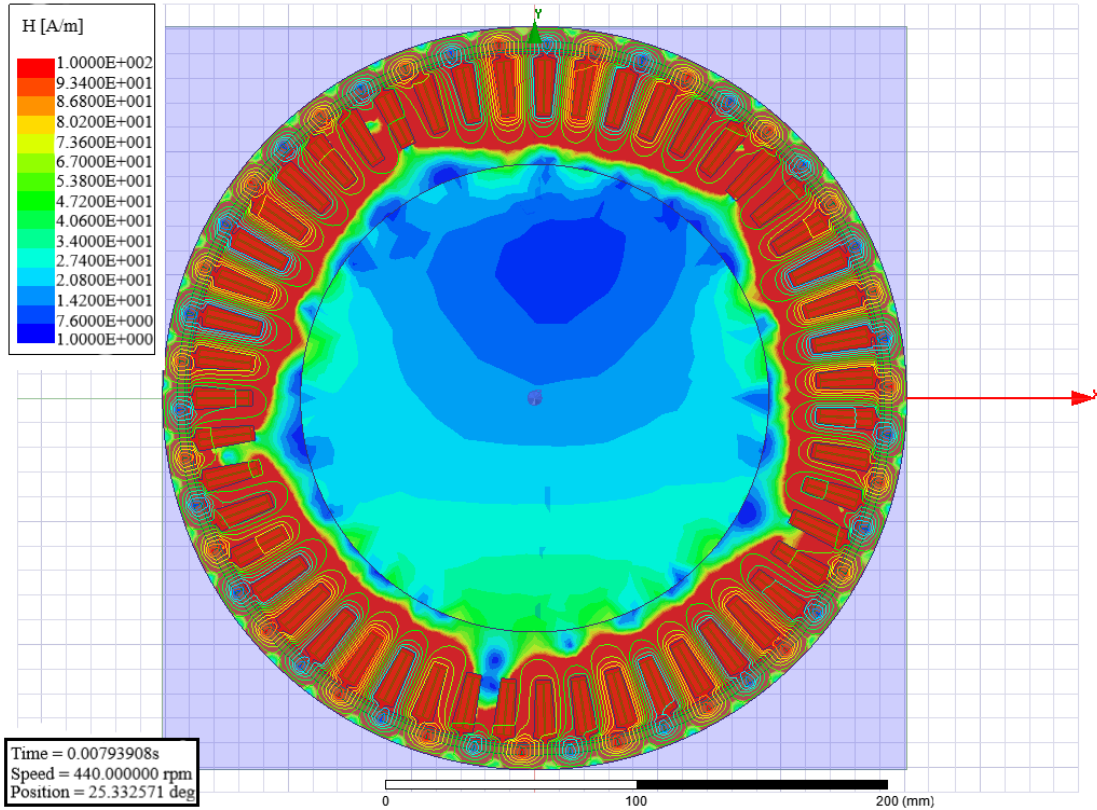
IPMBLDC motorun sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan elektromanyetik analizinde elde edilen manyetik alan şiddeti grafikleri Şekil 9'da görüldüğü gibi elde edilmektedir.

Şekil 9'da gerçek üretim değerlerine göre tasarlanan IPMBLDC motorun, sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizi ile elde edilen 440 rpm hız değeri ile 100 A/m manyetik akı şiddetinin oluştuğu bölgelerin görüntüsü verilmektedir.

Analiz edilen IPMBLDC motorun rotor iç kısmına önce, kalıcı mıknatısların farklı türleri olan AlNiCo5, Seramik ile nadir toprak elementi mıknatıs grubundan SmCo24 ve NdFeB mıknatıs türünün N28, N38, N42 ve N52 kalıcı mıknatıs çeşitleri eklenmektedir. Bu mıknatısların her biri ile ayrı ayrı yapılan elektromanyetik performans analizinde elde edilen değerlere göre; motorun hız, tork ve verim parametrelerindeki ulaşabildikleri maksimum değerlere göre Şekil



Şekil 8. IPMBLDC motor Solid Works ve Ansys Maxwell 2D görüntüleri (IPMBLDC motor Solid Works and Ansys Maxwell figures)



Şekil 9. Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılan IPMBLDC motor manyetik alan şiddeti oluşumu (IPMBLDC motor magnetic field intensity formation by FEM analysis)



10'da görüldüğü gibi karşılaştırmalı olarak elde edilmektedir. Analizde NdFeB türü mıknatısların farklı güç yoğunluklu tiplerinin 20°C'deki değerleri referans alınmıştır.

Şekil 10'da görüldüğü üzere BLDC motorlarda ve diğer elektrikli motorlarda kullanılan kalıcı mıknatıs türlerinin 2,45kW gücündeki bir prototip IPMBLDC motorda rotor kısmında kullanılması durumunda aynı parametrelerle yapılan analizlerde Alnico5 mıknatısın hızı çok yüksek değerlerde elde edilirken, düşük zorlayıcılık (coercivity) kuvvetlerinden dolayı verim ve çıkış tork değerleri diğer kalıcı mıknatıslara göre çok düşük olmaktadır. Kalıcı mıknatısların verim ve tork değerlerinin NdFeB türü mıknatıslarda diğer kalıcı mıknatıs türlerine göre daha yüksek olduğu belirlenmektedir.

Kalıcı mıknatıslar içinde nadir toprak elementi mıknatıs grubunun (SmCo24, N28,N38,N42,N52) hız değerlerinin birbirine orantılı oldukları hızın SmCo mıknatısta NdFeB mıknatıslara göre ortalama %2-36 arasında fazla değere ulaştığı görülmektedir. Bu mıknatıslarda NdFeB mıknatısların daha verimli oldukları ve çıkış tork değerlerinde ise NdFeB mıknatıslardan ortalama %2-32 arasında daha fazla değer elde edildiği belirlenmektedir.

IPMBLDC motora eklenen NdFeB türü mıknatısların performans parametrelerinin diğer kalıcı mıknatıs türlerine göre daha iyi olması tercih edilebilirliğini arttırmaktadır. Ancak bu mıknatıslar endüstriyel alanda farklı çalışma sıcaklık değerleri ve farklı güç yoğunluk değerlerine göre sınıflandırılarak sunulmaktadır. Buna göre NdFeB mıknatısların güç yoğunluğu değerleri kullanılarak, farklı güç yoğunluklu mıknatıs tiplerinin (N28,N38,N42,N52), manyetik

özelliklerini gösteren mıknatıs tiplerinin demanyetizasyon eğrilerinde en iyi çalışma sıcaklıklarındaki değerlerinin motor performansına etkileri belirlenmektedir. NdFeB mıknatıs türünün farklı güç yoğunluklu N28,N38,N42,N52 tiplerinin aynı motor parametreleri ve ortam koşullarında motora eklenmeleri durumunda motor hızındaki farklı çalışma sıcaklığındaki değişim değerlerinin karşılaştırılması Şekil 11'de verildiği gibidir.

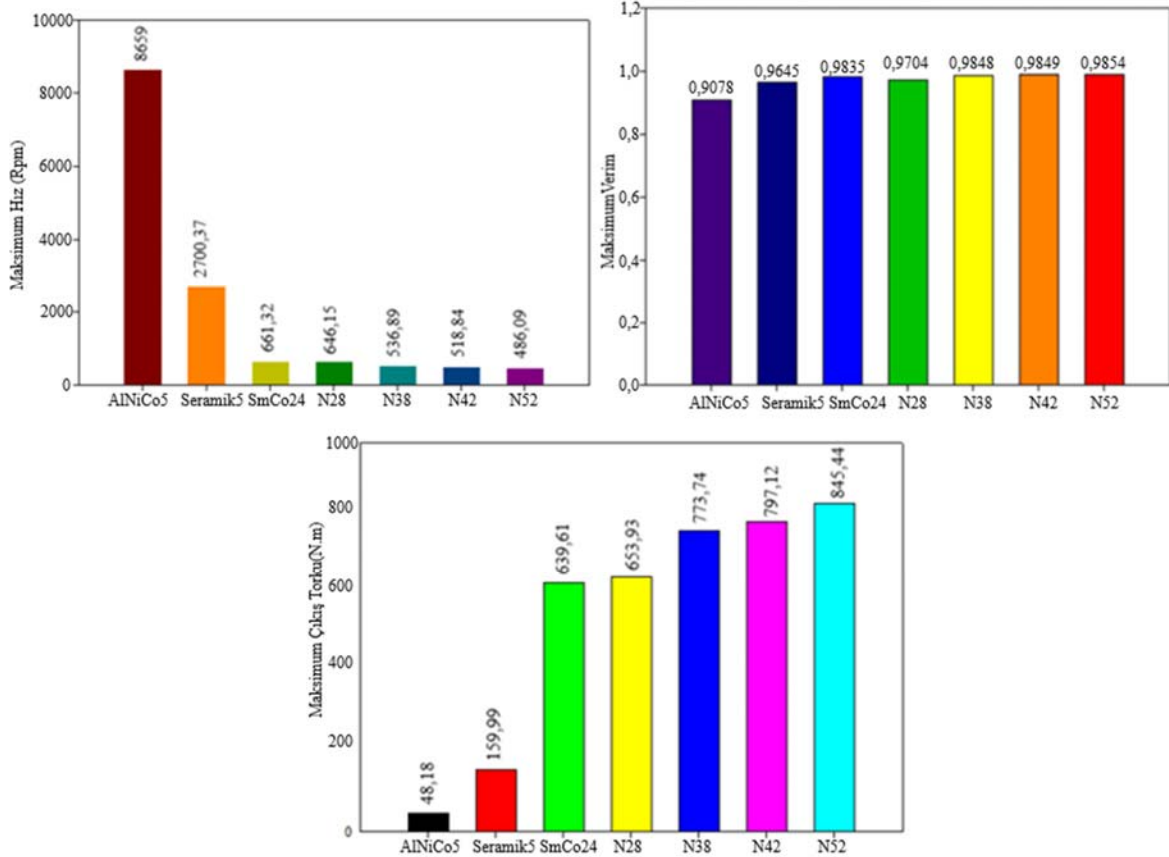
Şekil 11'de verilen değerlere göre, NdFeB türü farklı güç yoğunluklu N28, N38, N42 ve N52 mıknatıslarının sıcaklık arttıkça motor hızını arttırdıkları ve en yüksek hız değerlerinin genel olarak güç yoğunluğu en düşük olan N28 tip mıknatısla sağlandığı belirlenmektedir.

N28,N38,N42 ve N52 mıknatıs tiplerinin motor verimindeki farklı çalışma sıcaklığındaki değişim değerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 12'de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

Şekil 12'e göre, N28, N38, N42 ve N52 mıknatıslarının sıcaklık arttıkça motor veriminin azaldığı ve her farklı sıcaklıkta en yüksek verimin güç yoğunluğu en yüksek olan N52 tip mıknatısla sağlandığı belirlenmektedir.

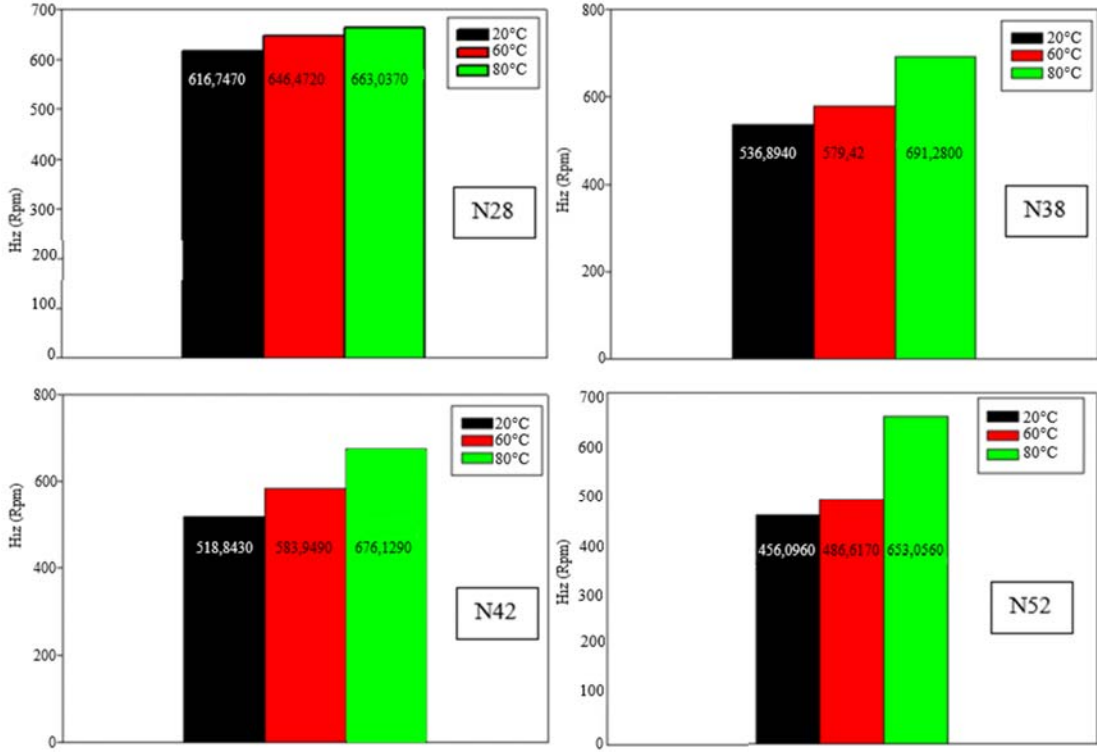
IPMBLDC motorun çıkış torkunda ki N28,N38,N42 ve N52 mıknatıs tiplerinin etkisiyle elde edilen farklı çalışma sıcaklığındaki değişim değerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 13'te elde edilmektedir.

Şekil 13'te N52 tip NdFeB türü mıknatısın çıkış tork değerlerinin diğer tip mıknatıslara göre daha yüksek olduğu belirlenmektedir. Ancak grafiklerden sıcaklığın artmasının motor tork değerinde azalmaya

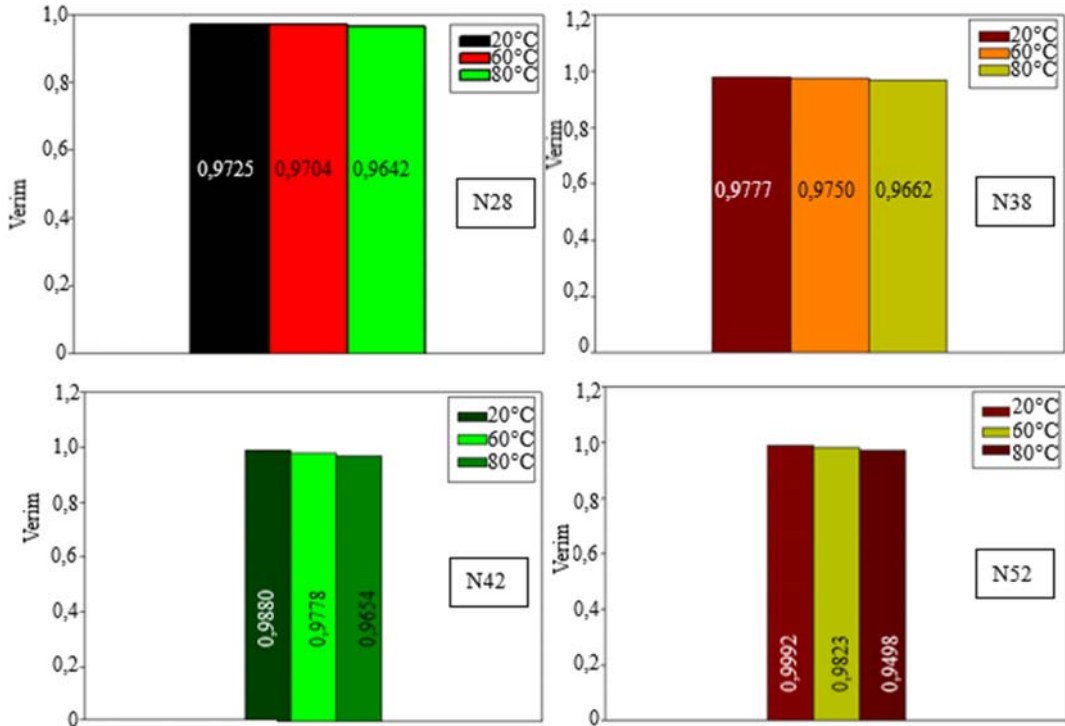


Şekil 10. IPMBLDC motorda kullanılan farklı mıknatıs türleri ve NdFeB türünün farklı güç yoğunluklu tiplerinin motor performansına etkilerinin grafikleri

(Graphs of the effects of different magnet types used in IPMBLDC motor and different power density types of NdFeB type on motor performance)



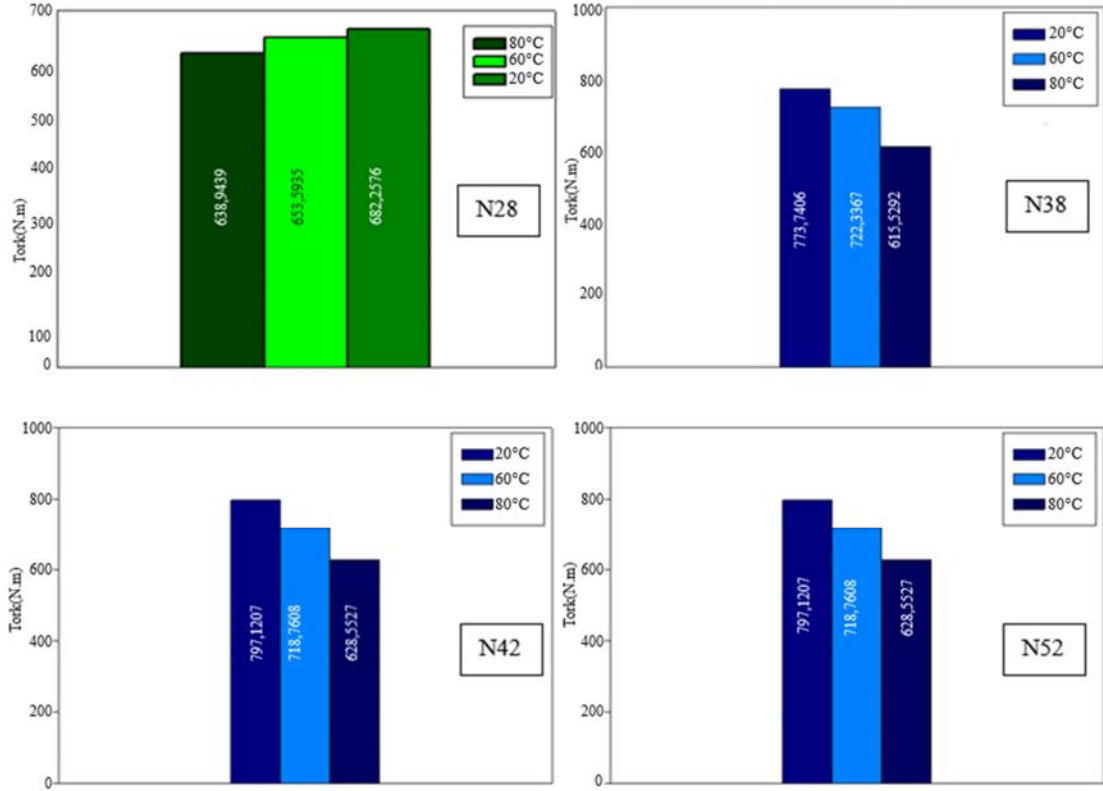
Şekil 11. IPMBLDC motorda kullanılan NdFeB türü farklı güç yoğunluklu mıknatısların farklı sıcaklıklarda motor hızına etkilesinin grafikleri (Graphs of the effect of NdFeB type magnets with different power density used in IPMBLDC motor on motor speed at different temperatures)



Şekil 12. IPMBLDC motorda kullanılan NdFeB türü farklı güç yoğunluklu mıknatısların farklı sıcaklıklarda motor verimine etkilesinin grafikleri (Graphs of the effect of NdFeB type magnets with different power density used in IPMBLDC motor on motor efficiency at different temperatures)

neden olduğu ve en iyi tork değerinin 20°C de alındığı görülmektedir. Bu değerler mıknatısların manyetik performanslarını yansıtan ve Şekil 3'te verilen demanyetizasyon eğrisi değerleri ile örtüşmektedir.

Bu analizler ile elde edilen değerler Tablo 6'da özet çizelge halinde verilmektedir. Tablo 6'ya göre NdFeB türü kalıcı mıknatısların farklı güç yoğunluklu mıknatıs tiplerinin IPMBDC motorda performans



Şekil 13. IPMBLDC motorda kullanılan NdFeB türü farklı güç yoğunluklu mıknatısların farklı sıcaklıklarda motor torkuna etkilesinin grafikleri

(Graphs of the effect of NdFeB type magnets with different power density used in IPMBLDC motor on motor torque at different temperatures)

Tablo 6. IPMBLDC motorda kullanılan farklı tip NdFeB türü mıknatısların motor performans parametrelerine etkisi  
(The effect of different magnets used in IPMBLDC motor on motor performance parameters)

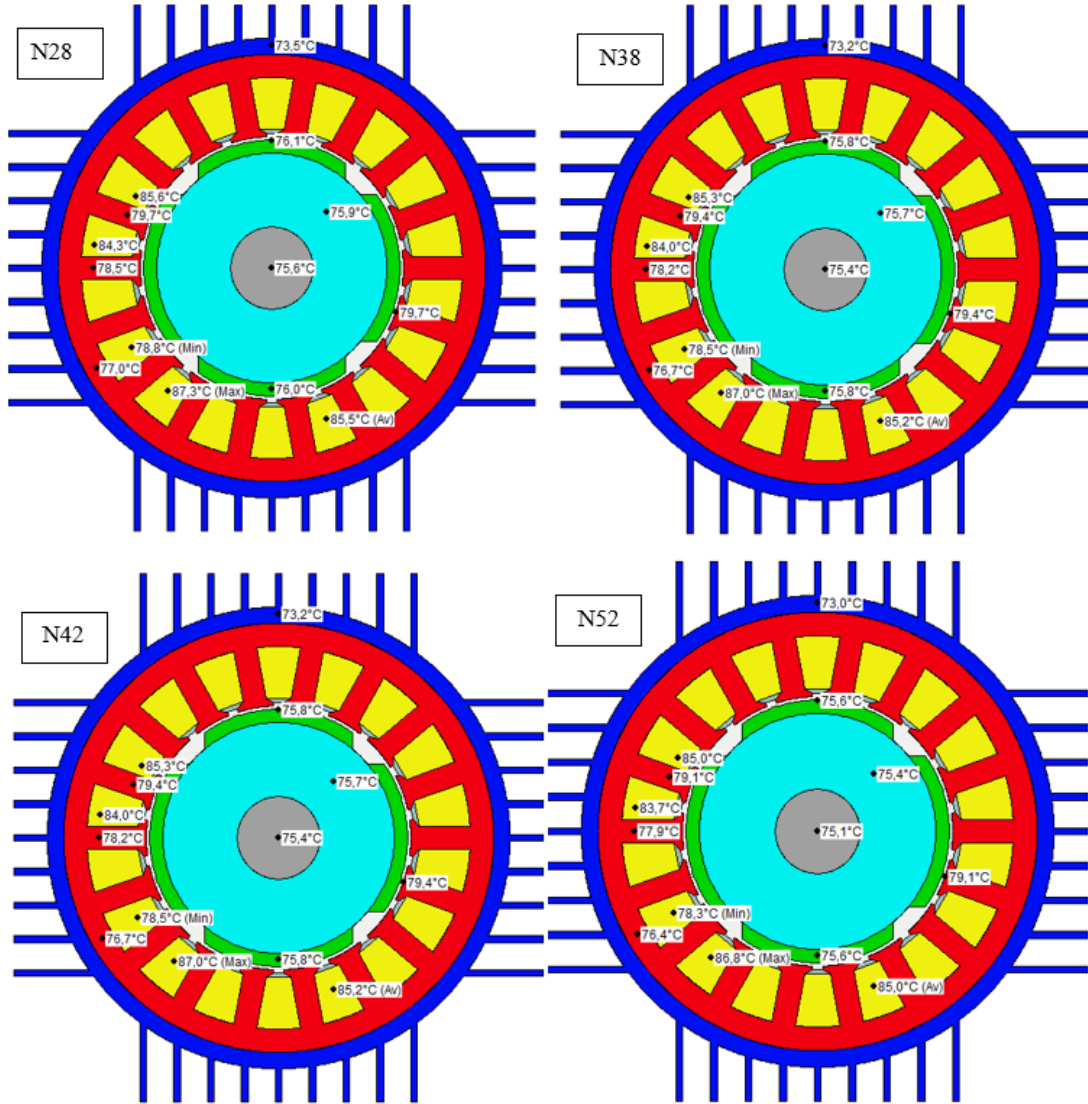
Sıcaklık (°C)	Malzeme	Verim (%)	Hız (rpm)	Tork (Nm)
20°C	N28	97,25	616,74	682,25
	N38	98,48	536,89	773,74
	N42	98,49	518,84	797,12
	N52	98,50	486,09	845,44
60°C	N28	97,04	646,47	653,59
	N38	97,50	579,42	722,33
	N42	97,78	583,94	718,76
	N52	98,23	486,61	845,01
80°C	N28	96,42	663,03	638,94
	N38	96,62	691,28	615,52
	N42	96,84	676,12	628,55
	N52	96,98	653,05	646,53

etkileri en yüksek olan mıknatıs tipi mıknatısın en iyi manyetik değerler aldığı 20°C sıcaklığında en yüksek güç yoğunluklu N52 mıknatısı olduğu belirlenmektedir.

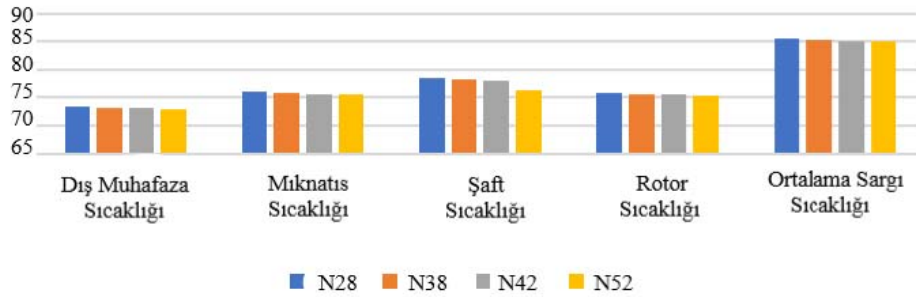
Yapılan bu çalışmada, gerçekleştirilen diğer bir analiz ise, N28,N38, N42 ve N52 mıknatıslarının ısı transfer etkilerini gözlemlemek için, Ansys-MotorCAD yazılımında yapılan termal analizdir. Bunun için [20]'de verilen teorik veriler dikkate alınarak elde edilen sonuçlar Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmektedir.

Şekil 14 ve Şekil 15 incelendiğinde, N52 tip kalıcı mıknatısın ısı transferinin daha iyi olduğu değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, IPMBLDC motorun dış muhafazadaki sıcaklığı; N28 tip mıknatıs kullanılması durumunda 73,5°C, iken N38 de 73,2°C, N42 tip mıknatısta 73,1°C, ve N52 tip mıknatıs kullanılması durumunda'de 73°C olmaktadır.

Motor tasarımında kullanılan N28, N38, N42 ve N52 tip kalıcı mıknatıs sıcaklıkları ise sırasıyla, 76°C, 75,8°C 75,7°C ve 75,6°C'dir.



Şekil 14. IPMBLCCD motorda kullanılan farklı mıknatısların motorun ısı transferine etkisinin grafiği  
(Graph of the heat transfer effect of different magnets used in IPMBLCCD motor)



Şekil 15. IPMBLCCD motorda farklı güç derecesindeki mıknatısların sıcaklık etkileri parametreleri  
(Graph of the heat transfer effect of different magnets used in IPMBLCCD motor)

### 3. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, endüstriyel alanlarda avantajlı özellikleri dolayısıyla tercih edilen BLDC motorun performansına, motor yapısında bulunan kalıcı mıknatısların etkisi incelenmektedir. Bu amaçla; önce kalıcı

mıknatıs türlerinin performansı değerlendirilmesi için analiz yapılmıştır. Analizde IPMBLCCD motor için Alnico5, Seramik5, SmCo24, NdFeB kalıcı mıknatıs türleri kullanılmıştır. Bu mıknatısların motor performans parametrelerine etkilerine bakılarak genel olarak en iyi performans sağlayan kalıcı mıknatısların NdFeB türü mıknatıslar

olduğu belirlenmiştir. Mıknatıs türlerinden Alnico5 motor hız değerlerinde maksimum değere ulaşan tür olmasına rağmen düşük koersif değerleri dolayısıyla motor verim ve tork değerlerine diğer mıknatıslara göre çok düşük etki etmektedir. Nadir toprak elementi mıknatıslar grubunda yer alan SmCo mıknatısı da motor performans parametrelerine Alnico ve Seramik mıknatıslara göre iyi derecede etki etmektedir. Ancak diğer nadir toprak elementi mıknatıs olan NdFeB türüne göre değerleri ortalama %2-32 oranında daha düşüktür. Bu verilere göre kalıcı mıknatıs türleri içerisinde iyi performans etkileri sağlayan NdFeB türü mıknatısların endüstriyel alanda kullanılan farklı güç yoğunluklu mıknatıs tiplerinin de farklı sıcaklıklardaki manyetik etkileri göz önünde bulundurularak analizi yapılmıştır. NdFeB türü mıknatısın N28, N38, N42 ve N52 mıknatısları, tasarlanan IPMBLDC kullanılarak elektromanyetik ve termal analiz yapılmıştır. NdFeB türü için gerçekleştirilen tüm analizlerde, kalıcı mıknatıs tiplerinin 20°C - 60°C- 80°C sıcaklıklarındaki manyetik değerleri incelenerek değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen değerlere göre, IPMBLDC motorun, 20°C'de N28 tip mıknatısta 616,747 rpm ile en yüksek hız değerine, N52 tip kalıcı mıknatıs ile de sırasıyla; 898,4456 Nm tork ve % 99,02 verim değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Kalıcı mıknatısların çalıştığı sıcaklık değeri arttıkça motor performansını etkileyen parametrelere etkisinin azaldığı değerlendirilmektedir.

Bu analizlere göre, motor yapısında bulunan kalıcı mıknatısın manyetik konsantrasyonu yüksek ise, tork ve verim açısından daha etkili olduğu, sıcaklık değeri arttıkça bu etkinin azaldığı ve düşük güç yoğunluğu derecesine sahip kalıcı mıknatısın motor hızına maksimum etki oluşturduğu belirlenmektedir. Ayrıca; N28, N38, N42 ve N52 mıknatıslarının ısı transfer etkilerini gözlemlemek için, Ansys-MotorCAD'de yapılan termal analiz sonucunda, güç yoğunluğu yüksek olan N52 tip kalıcı mıknatısın ısı transferinin daha iyi olduğu elde edilen sıcaklık değerlerinden gözlemlenmiştir.

#### Kaynaklar (References)

1. Maani T., Mathur N., Singh S., Rong C., Sutherland J.W., Potential for Nd and Dy Recovery from End-of-Life Products to Meet Future Electric Vehicle Demand in the U.S., *Procedia CIRP*, 98, 109–114, 2021.
2. Prashanth N.A., Flux maximization in wind turbine permanent magnet synchronous generator made of NdFeB permanent magnets, *Materials Today: Proceedings*, 49 (3), 731-737, 2021.
3. Parveen, S.M., Nelson I., Murugan S.S., Performance Analysis of N40 Permanent Magnet Using PMSLG for Wave Energy Conversion, *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, Trivandrum-India, 1-6, 02-05 January, 2022.
4. Araz H.K., Yılmaz M., Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnetmass and torque-ripple for electric vehicles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 1089–1110, 2019.
5. He Y., Yu C., Haidar S., Zaeimbashi M., Stephen G. M., Heiman D., Sun N. X., High-performance on-chip hot-pressed NdFeB hard magnets for MEMS applications, *IEEE Transactions on Magnetics*, 57 (4), 1-4, 2021.
6. Ergene L.T., Polat A., Bakhtiarzadeh H., Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 757-770, 2018.
7. Wong Y.J., Chang H.W., Lee Y.I., Chang W.C., Chiu C.H., Mo C.C., Comparison on the coercivity enhancement of sintered NdFeB magnets by grain boundary diffusion with low-melting (Tb, R) 75Cu25 alloys (R= None, Y, La, and Ce), *AIP Advances*, 9(12), 125238, 2019.
8. Karhan M., Çakır M. F., Ann (Artificial neural network) controlled virtual laboratory design for NdFeB magnet production, *Teh. Vjesn.*, 28(1), 334–339, 2021.
9. Maroufian S.S., Pillay P., Design and analysis of a novel PM-assisted synchronous reluctance machine topology with AlNiCo magnets, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55 (5), 4733-4742, 2019.
10. Stanford Magnets. Custom Rare Earth Magnets and Magnetic Assemblies. <https://www.stanfordmagnets.com/>. Erişim tarihi Mayıs 11, 2022.
11. Ozgenel M. C., Control of vector controlled permanent magnet synchronous motor, PhD Thesis, Gazi University Institute Of Science And Technology, Ankara, 2003.
12. Şabciyan A. İ., Özel Mıknatıslayıcı Tasarımı, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul, 2007.
13. K&J Magnetics, Inc. Strong Neodymium Magnets, Rare Earth Magnets. <https://www.kjmagnetics.com/specs.asp>. Erişim tarihi Mayıs 11, 2022.
14. Riba J.R., López-Torres C., Romeral L., Garcia A., Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367-379, 2016.
15. Ranjan C., Modelling Theory and Applications of the Electromagnetic Vibrational Generator, *Sustainable Energy Harvesting Technologies: Past, Present and Future*, Yen Kheng Tan, Intechopen, Rijeka-Croatia, 55-109, 2011.
16. Çabuk A. S., Sağlam S., Üstün Ö., Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1975–1986, 2019.
17. Çağışlar A. S., İn S., Tiryaki H., Effects of Magnet Type and Thickness on Outer Rotor Brushless Direct Current Motor Designed by Calculating the Required Motor Power for an Electric Vehicle Prototype, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Dergisi*, 13 (3), 1025–1041, 2020.
18. Nory H., Fırçasız Doğru Akım Motorunun Tasarımı ve Denetimi, M.Sc. Thesis Fırat University, Institute of Science and Technology, Elazığ, 2018.
19. Çabuk A. S., Tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının en iyi tasarımı için yeni bir yaklaşım, PhD Thesis, Marmara University, Institute of Science and Technology, İstanbul, 2016.
20. Çabuk A. S., Tekerleğiçi Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Sıcaklık Dağılımlarının Toplu Parametrelili Devre Modeli Şeması ile İncelenmesi, *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci*, 32 (2), 128–136, 2020.

