

MIKNATIS BOYUTLARI ARTTIRILAN DAHİLİ KALICI MIKNATISLI FIRÇASIZ DC MOTORUN YENİDEN ANALİZİ

RE-ANALYSIS OF INTERNAL PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR WITH INCREASED MAGNET DIMENSIONS

Yıldırım ÖZÜPAK

Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Programı, Diyarbakır, 21000, Türkiye

ORCID: 0000-0001-8461-8702

ÖZET

Fırçasız DC (BLDC) Motorlar, son yıllarda, yüksek verim ve hızlarından dolayı endüstri alanında büyük ilgi görmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Endüstride kullanılan diğer makineler ile karşılaştırıldığında çıkış güçlerinin ve verimlerinin yüksek olması, güvenilirliklerinin yüksek olması, ağırlıklarının daha az olması ve yüksek hızlı uygulamalar için kullanılabilir olması gibi özelliklerinden dolayı bu motorları diğer motorlardan daha cazip hale getirmiştir. Makinenin tasarım prosedürleri birçok farklı kaynağın birleşimi olarak mevcut olsa da elektromanyetik yönden adım adım bir tasarım prosedürüne duyulan ihtiyaç mutlak bir gerekliliktir. Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Yöntemine (SEY) dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS-RMxpert-Maxwell bütünlük yapısı kullanılarak Dahili Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız DC (DKMFDC) Motorun tasarımını ve analizini gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Tasarım için stator ve rotor için hangi materyallerin kullanılacağı ve bu materyallerin hangi boyutlarda olması gerektiği belirlendikten sonra, makinenin diğer tüm parametreleri belirlenir ve tanımlanır. Çalışmada genel radyal akı konsepti kullanılarak tasarım iyileştirilmiştir. Ayrıca ANSYS yazılım aracı olan RMxpert, motorun geometrisini oluşturmak ve temel tasarım parametrelerini hesaplamak için kullanılmıştır. Daha sonra bu tasarım, motorun elektromanyetik alan analizleri gerçekleştirilmek üzere Maxwell 2D ortamına aktarılmıştır. Analiz sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında sonuçların tatmin edici ve verimin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Motor, SEY, Verim, Güç

ABSTRACT

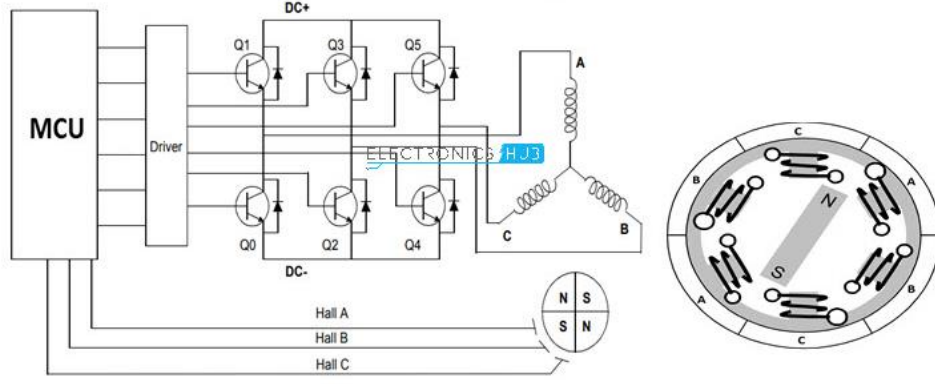
Brushless DC (BLDC) Motors have started to attract great attention and use in the industry in recent years due to their high efficiency and speed. Compared to other machines used in the industry, these motors have made these motors more attractive than other motors due to their features such as high output power and efficiency, high reliability, less weight and being usable for high speed applications. Although machine design procedures exist as a combination of many different sources, the need for a step-by-step design procedure from the electromagnetic side is an absolute necessity. In this study, it is aimed to design and analyze Internal Permanent Magnet Brushless DC (IPMBLDC) Motor by using

ANSYS-RmExpert-Maxwell integrated structure that performs a solution based on Finite Element Method (FEM). After determining which materials will be used for the stator and rotor for the design and what dimensions these materials *should* be, all other parameters of the machine are determined and defined. The design was improved by using the general radial flux concept in the study. In addition, RMxpert, an ANSYS software tool, was used to create the geometry of the engine and calculate the basic design parameters. Later, this design was transferred to Maxwell 2D environment to perform electromagnetic field analysis of the motor. When the results of the analysis were compared with the results in the literature, it was concluded that the results were satisfactory and the efficiency was high.

Keywords: Motor, FEM, Efficiency, Power.

1. GİRİŞ

Doğru akım motorları endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fırçalı modellerin bazı alanlarda kullanımının kısıtlı olması Fırçasız Doğru Akım Motorlarının öne çıkmasını sağlamıştır. Fırçalı tipteki motorların sürekli olarak bakıma ihtiyaç duyması, değişken koşullarda ve sürekli kullanılan alanlarda dezavantaj sağlamaktadır. Bu sebeple fırçasız doğru akım motorlarının geniş kullanım alanları vardır. Fırçasız doğru akım motorları yüksek performans değerleri ile ön plana çıkmaktadır. Yüksek moment ve eylemsizlik gerektiren uygulamalarda, dış rotorlu tipi olan fırçasız doğru akım motorları kullanılmaktadır. Araç silecek motoru, otomatik camlar, robotik, jeneratör, elektrikli araçlar, insansız hava araçları, beyaz eşya sektörü gibi birçok alanda bu tipteki motorlar kullanılmaktadır (Yedemle, 2003). Dış rotorlu uygulamalarda motor koruması ve sarsıntılara karşı görülen direnç gibi çeşitli dezavantajlar olmasına rağmen momentin doğrudan aktarımını (direct drive) sağlamaları nedeniyle herhangi bir aktarım organına ihtiyaç duyulmaması diğer tip motorlara göre daha yüksek verim ihtiyacı olan uygulamalarda (özellikle elektrikli araçlarda) tercih edilmektedir. Bunun haricinde fırçasız doğru akım motorları için kullanılan motor sürücüler diğer motorlara nazaran daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarının moment değerlerinin yüksek olması sebebiyle özellikle elektrikli araçlarda kullanılmalarına olanak sağlanır. Adından da anlaşılacağı gibi fırçasız motor, geleneksel DC, Slip Ring Endüksiyon ve Senkron motorlardan farklı olarak fırçasız bir motordur. Fırçasız Kalıcı Mıknatıslı (BLPM) motorlar, son birkaç yılda endüstrilerde geniş uygulamalar buluyor ve insanlar dayanıklı Asenkron motorları BLPM motorlarla değiştirmeye çalışıyorlar. Bu motorların en önemli ana avantajlarından biri, amper başına torkunun çalışma sırasında değişmemesi ve özellikle yüksek hassasiyetli hareket kontrol uygulamalarında kontrol edilmesinin kolay olmasıdır. BLPM makineleri ile ilgili bir diğer önemli özellikte, kayma gibi bir şey olmamasıdır [1-2]. Şekil 1’de, genel bir KMFDC motorunun şematik bir diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. KMFDC bir motorunun şeması.

Sabit mıknatısların ve sabit bobinlerin konumuna, yani dış rotor ve iç rotor konfigürasyonuna bağlı olarak KMFDC motorlarının birkaç farklı konfigürasyonu vardır. Bir uygulamada, yükün hızlı bir şekilde hızlanması ve yavaşlaması gerektiriyorsa, tork/moment oranı mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Bu durum, iç rotor motor konfigürasyonunun kullanılmasını gerektirir. Bu motor, klasik AC motora en yakın konfigürasyona sahiptir. Benzer şekilde bir uygulama eğer orta ile yüksek hızda sabit hız gerektiriyorsa, dıştan rotorlu motor kullanmak daha mantıklı olabilir. Bu türün en yaygın örneği sabit disk sürücüsü motorudur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Motor Boyutu

Motor boyutu, herhangi bir motorun tasarımına başlamadan önceki ön tasarım gereksinimidir. Boyuta bağlı olarak da değişen torku ifadesi Denklem (1) ile verilmiştir.

$$T = kD^2L \quad (1)$$

Bu denklemde T, motor tarafından verilen torku, k bir sabiti, D rotor çapını ve L motorun aksel uzunluğunu ifade etmektedir. Denklem 1'den, rotor çapı veya aksel uzunluğu arttıkça torkun ve motorun güç çıkışının arttığı anlaşılabilir. Buna göre, motorun uzunluğu iki katına çıkarsa, güç çıkışı da iki katına çıkarılmalıdır. Diğer yandan, rotorun çapı iki katına çıkarsa, rotor çapının artması rotorun çevresini önemli ölçüde arttırdığından, rotor üzerinde mıknatıslar için daha fazla alan meydana gelir. Bu durum göz önüne alındığında dalgıç pompa uygulamalarında kullanılan motorlar rotor çaplarına göre çok daha fazla aksel uzunluğa sahip olmaktadır.

2.2 Manyetik Devrelerin Temelleri

Manyetik alan, iki önemli nicelik ile tanımlanır. Bunlardan birincisi birimi wb/m^2 veya Tesla olan, birim alan başına mevcut olan manyetik akı olan B manyetik akı yoğunluğu, diğeri ise manyetik alandaki değişim olan ve birimi A/m olan H manyetik alan şiddeti yoğunluğudur [10]. Bu iki nicelik tüm manyetik malzemeler için doğrusaldır. Manyetik malzemeler çok büyük bir çalışma noktasında çalıştırıldığında, bu iki nicelik arasındaki ilişki Denklem (2) ile ifade edilebilir.

$$B = \mu H \quad (2)$$

Burada μ havanın geçirgenliğidir. Manyetik devre analizi iki temel denklem etrafında toplanmaktadır. Birincisi manyetik akı yoğunluğunu manyetik akı ile (B- Φ) ve diğeri alan yoğunluğunu manyeto motor

kuvveti (H-MMF) ile ilişkilendirilmektedir. Belirli bir hacimdeki toplam akı, verilen alandaki tüm akı yoğunluklarının entegrasyonu olarak tanımlanabilir.

$$\Phi = BA \quad (3)$$

Burada Φ akıyı, B manyetik akı yoğunluğunu ve A kesim alanını ifade etmektedir.

$$F = Hl \quad (4)$$

Burada F kuvvet, l kullanılan malzemenin uzunluğu

Denklem (3) ve Denklem (4)'ü Denklem (2)'de terimleri yeniden yazarsak bize Denklem (5)'i verir.

$$\Phi = PF \quad (5)$$

Denklem (5)'te verilen P , malzemenin geçirgenliği olarak bilinir ve P ifadesi Denklem (6)'da formülize edilmiştir. Daha yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler daha yüksek performansa sahiptir ve içlerinden daha fazla akı geçer.

$$P = \mu \frac{A}{l} \quad (6)$$

$$R = 1/P = l/\mu A \quad (7)$$

$$F = \Phi R \quad (8)$$

2.3 Manyetik Alan Kaynakları

Manyetik alanın iki kaynağı vardır, birincisi telin yumuşak bir demir parçanın etrafına sarıldığı bir elektromıknatıs, diğeri ise kalıcı bir mıknatıstır.

2.4 Akı Bağlantısı Kavramı

Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşme şekli, manyetik alan nedeniyle ne kadar akının yaratıldığına ve bu akının çevresinde mevcut olan malzemelerle nasıl bağlantı kurduğuna çok yakından ilişkilidir.

2.5 Radyal akı topolojisi

Tasarım sürecindeki temel yaklaşım, motorun temel fiziksel kısıtlamalarını, çalışma noktasını, akı akışını tanımlayan manyetik devresini, istenen zıt emk ile nominal hızda belirli motor çıkış gücünü üretmek için gereken motor boyutlarını ve akımını kapsamaktadır [4]. Radyal akı topolojisi, motor yapımında en yaygın kullanılan stratejidir. Bazı güçlü ve zayıf yönler şu şekilde verilebilir:

2.6 1) Güçlü Yönler

- Rotor-Stator çekici kuvvetleri rotor etrafında dengelenir, böylece rotor üzerinde net radyal kuvvet olmaz.
- Stator sargısı tarafından üretilen ısı, stator arka demirinin etrafındaki geniş yüzey alanı nedeniyle kolaylıkla uzaklaştırılır.
- Eğrilik dışında, rotor ve stator eksenel yönde aynıdır.
- Rotor mekanik olarak sabittir ve her iki uçtan da kolayca desteklenir.

2.7 2) Zayıf Yönler

- Mıknatısı yüzeye monte edilen rotor için dikdörtgen şekilli mıknatısların kullanılması mümkün değildir; en az bir yüzey kavisli olmalıdır.
- Motor yüksek hızlarda çalışacaksa, mıknatısları rotora sabit tutturmanın bazı yolları gereklidir, bu nedenle manşon veya çemberleme hava boşluğu uzunluğu artar.
- Motor montajı sırasında veya sonrasında hava boşluğu ayarlanamaz.
- Rotor mıknatıslarını rotor arka demirine bağlayan yapıştırıcı manyetik olmadığı için başka bir hava boşluğu oluşturur.

2.8 Motor Tasarımı

Bu bölümde, Ansys Maxwell'in-RMxprt modülünde motorun temel tasarımına odaklanılmıştır. Aşağıdaki Tabloda bulunan sabit parametreler bu yazılıma tasarım için giriş verisi olarak kullanılır. Burada önce RMxprt'e kısa bir giriş yapılmış, ardından tasarımla ilgili ayrıntılara yer verilmiştir. Tablo 1'de tasarım için analiz kurulum parametreleri verilmiştir. Bu parametrelere dayanarak RMxprt ortamında diğer parametreler çözülecektir.

Tablo 1. Analiz kurulum parametreleri

Parametre	Değer
Nominal Güç (W)	1500
Nominal Gerilim (V)	48
Kutup Sayısı	36
Sürtünme Kaybı (W)	20
Rüzgar Kaybı (W)	10
Yük Tipi	Const power
Çalışma Sıcaklığı (°C)	75
Rotor Pozisyonu	İçten

2.9 RMxprt

Ansys-RMxprt, şablon tabanlı bir tasarım aracıdır. Elektrikli makine ve jeneratör tasarımcıları bu araçla tasarımlarını geliştirebilmektedirler. Maxwell ve RMxprt birlikte, daha yüksek verimliliğe ve daha düşük maliyetli makinelere yönelik pazar talebini karşılamak için gerçekten özelleştirilmiş bir makine tasarım ve analiz olanağı sağlamaktadır. RMxprt, klasik analitik motor teorisi ve eşdeğer manyetik devre yöntemlerini kullanarak makine performansını hesaplayabilir, ilk boyutlandırma kararlarını verebilir ve birçok analizi saniyeler içinde gerçekleştirebilir. RMxprt daha sonra geometri, malzemeler, uygun simetrisi dahil sınır koşulları ve titiz elektromanyetik geçici analiz için kuplaj devresi topolojisi ile uyarılar dahil olmak üzere projenin tamamını Maxwell (2-D/3-D)'ye otomatik olarak aktarabilmektedir.

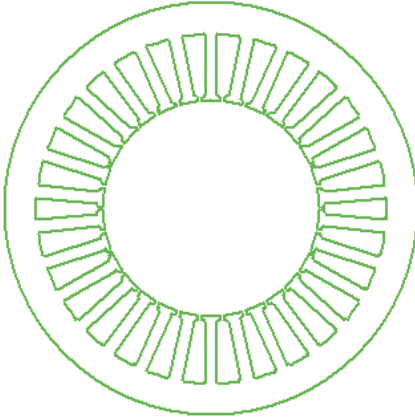
Tasarım sayfaları, ilgili tüm girdileri ve hesaplanan parametreleri, akım, voltaj, tork ve zıt emk gibi dalga biçimlerinin grafiksel görüntüsünü listeler. Performansı hesaplamak için klasik elektrik-makine teorisini manyetik devre yaklaşımıyla birlikte kullanır.

2.10 Stator Tasarımı

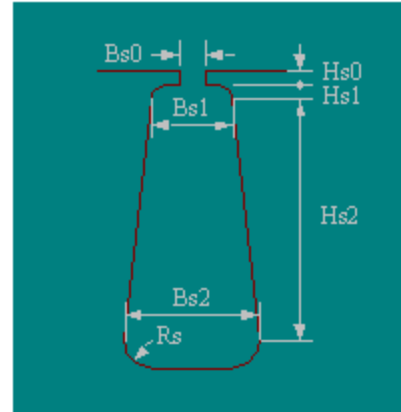
Tablo 2’de stator tasarımı kullanılan parametreler ve değerleri, Şekil 2’de ise statora ait geometri verilmiştir. Bu parametrelere dayanarak RMXprt diğer parametreleri çözecektir. Oluk boyutları ile ilgili detaylar Şekil 3 ve Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2. Stator verileri

Parametre	Değer
Oluk Sayısı	30
Dış Yarıçap	210 mm
İç Yarıçap	110 mm
Uzunluk	50 mm
İstifleme Faktörü	0.95
Malzeme	M19_24G
İletken Tipi	Bakır



Şekil 2. Statorun RMXpert geometrisi



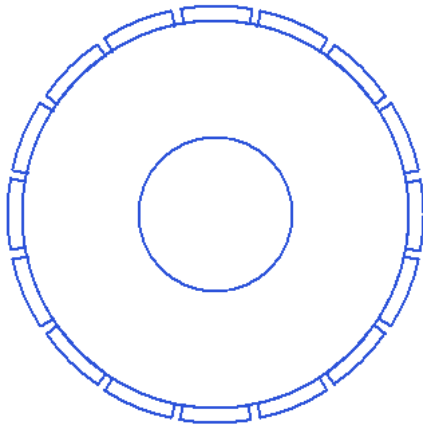
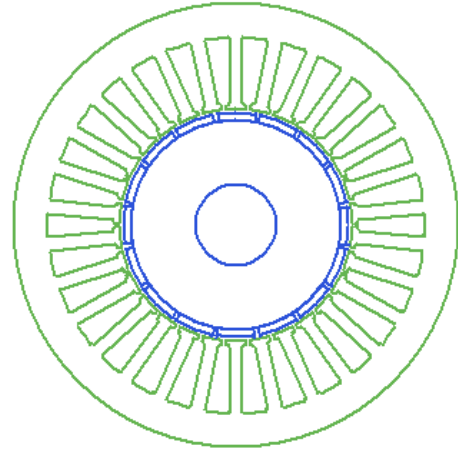
Şekil 3. Oluk geometrisi ve detayları

Tablo 3. Oluk parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Hs0	2	mm
Hs1	1	mm
Hs2	30	mm
Bs0	2	mm
Bs1	6	mm
Bs2	12	mm
Rs	0.6	mm

2.11 Rotor tasarımı

Rotor, Şekil 4'te gösterildiği gibi dahili kalıcı mıknatlara sahiptir. Bu rotor kutup şablonu RMxprt'de mevcuttur. Yalnızca mıknatis boyutları ve rotor dış çapı girilecektir. Tasarlanan rotora ait parametreler Tablo 4'te verilmiştir

**Şekil 4. Rotorun geometrik****Şekil 5. Motorun kesit görünümü****Tablo 4. Rotor parametreleri**

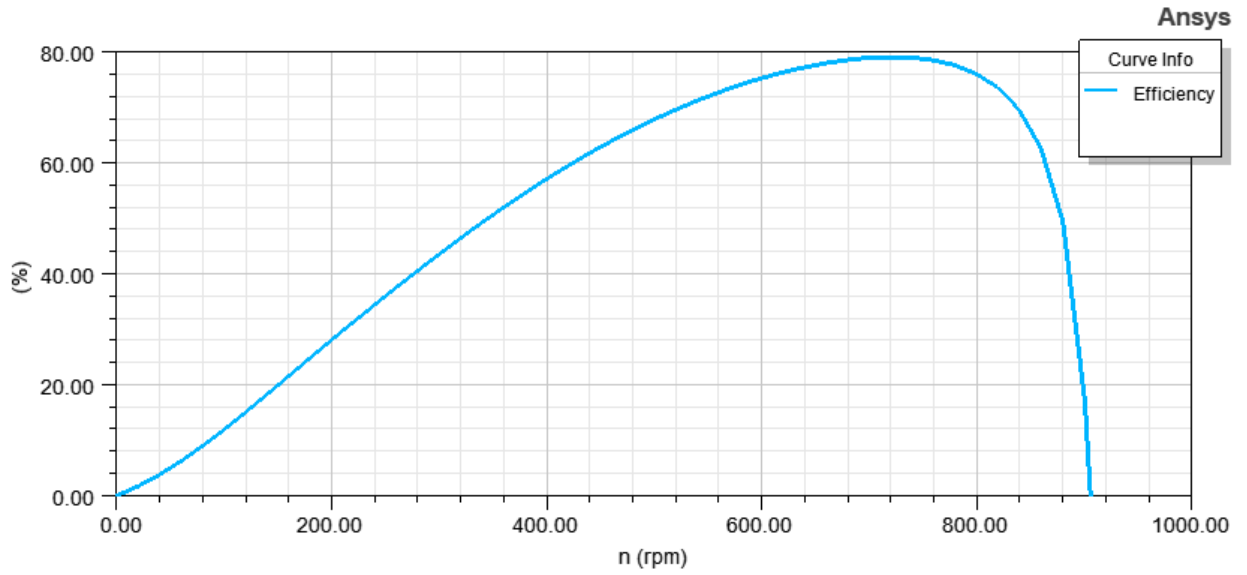
Parametre	Değer
Dış Yarıçap	108 mm
İç Yarıçap	40 mm

İstifleme Faktörü	0.95
Uzunluk	50 mm
Malzeme	M19_24G
Mıknatıs Kalınlığı	4 mm
Mıknatıs Tipi	NdFe35

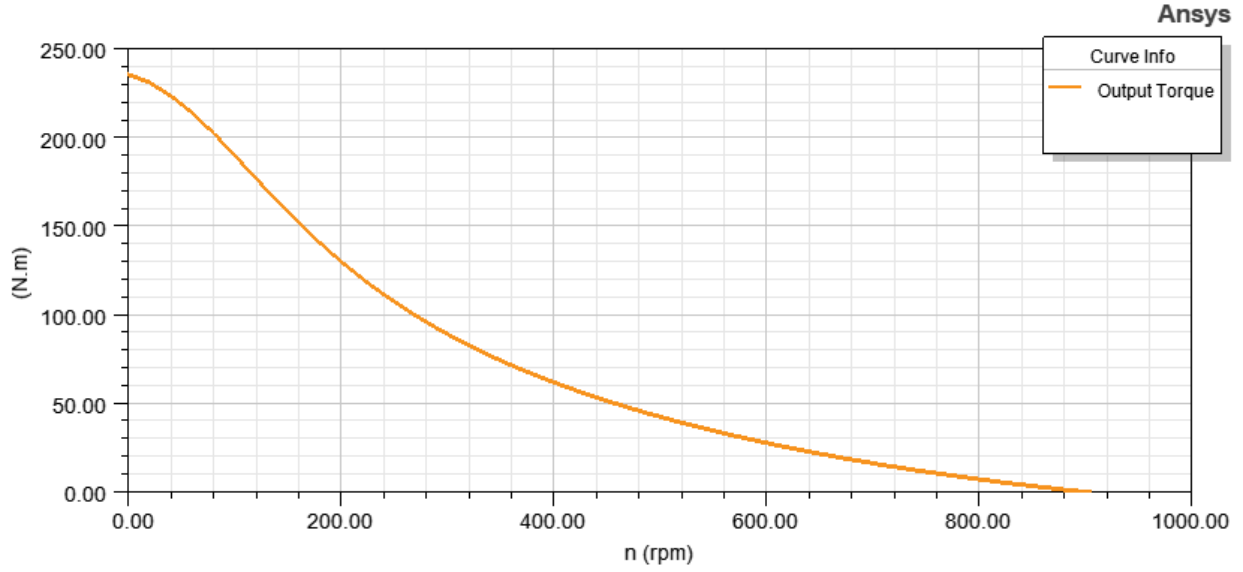
3. BULGU VE TARTIŞMALAR

3.1 Rmxprt Sonuçları

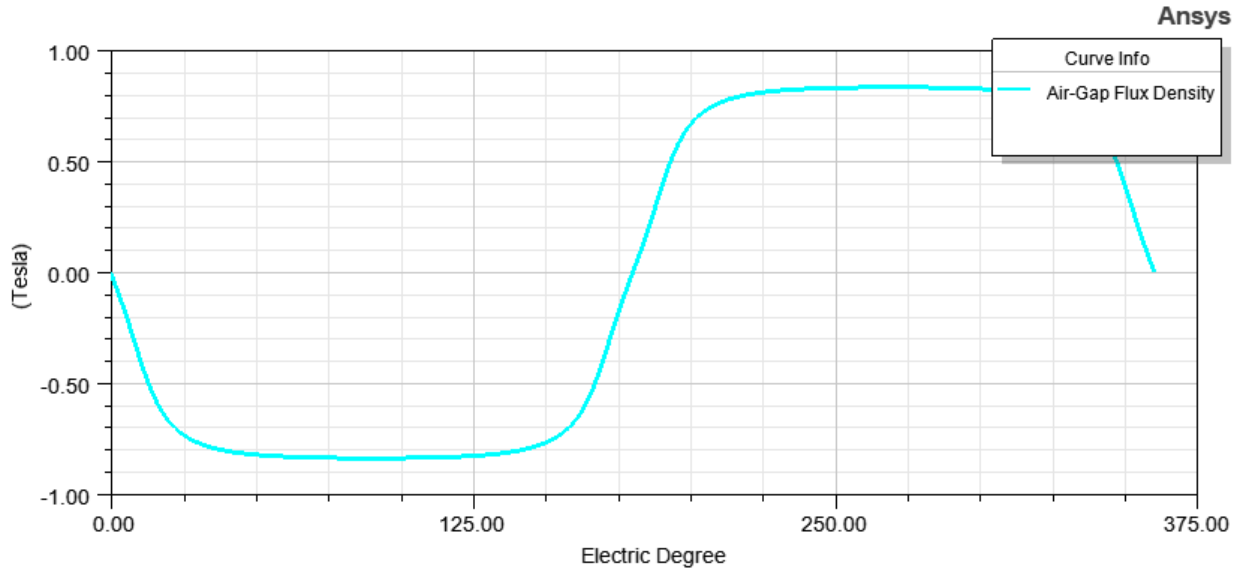
Rmxprt, yazılımın bir parametreyi başka bir parametreye göre çözmesini talep edebilen parametrik çözüm adı verilen bir araca sahiptir. Burada, maksimum verim ve nominal hızda çıkış gücünün alınabileceği sayıyı elde etmek için yuva başına iletkenler belirli bir aralıkta çözüldü. Sonuçlar gösterilmiştir. Aşağıdaki Şekil 6-8'de tasarlanan motor Rmxprt'de simüle edildikten sonra elde edilen bazı önemli değerler verilmiştir.



Şekil 6. Verimlilik-hızı gösteren grafik



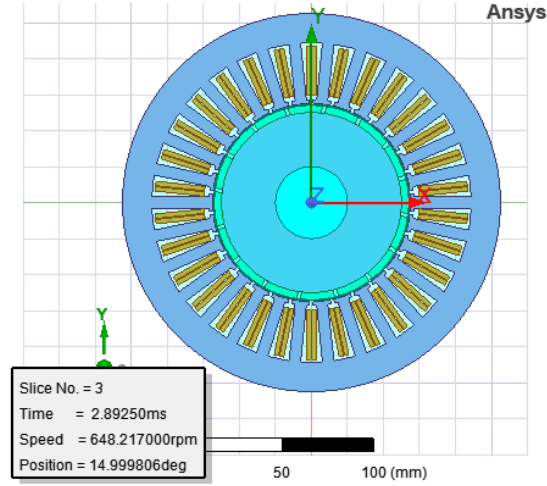
Şekil 7. Torkun hıza bağlı grafiği



Şekil 8. Hava boşluğu akı yoğunluğu grafiği

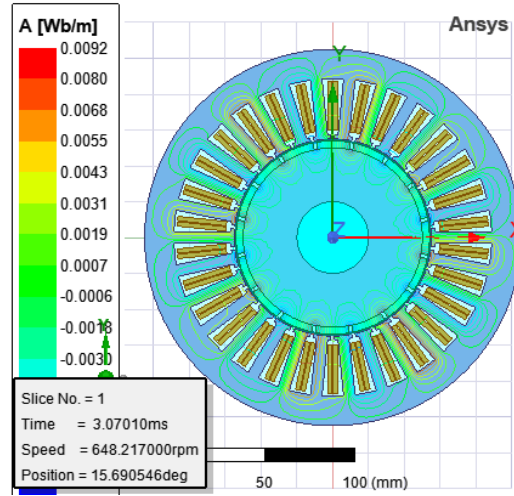
3.2 Motorun Maxwell-2D Analiz Sonuçları

RMxprt ortamında verilen boyutlara göre tasarlanan motor analizinden performans değerleri elde edilir. Motorun performansını tam olarak kontrol etmek için, Sonlu Elemanlar Yöntemine göre çözüm gerçekleştiren Maxwell gibi bir yazılımda 2D'de olarak motoru tekrar analiz etmek gerekir. Bunu için RMxprt'de hazırlanan geometri Maxwell-2D ortamına aktarılır. Burada yazılımın kendisi SEY için gerekli olan ağı oluşturur. Ayrıca geometrinin çözüleceği sınır koşullarını otomatik olarak seçer. Sargı uyarıları da burada otomatik olarak atanır ve yazılımın kendisi geometrideki simetriye karar vererek buna göre işlemleri yapar. Şekil 9'da Maxwell-2D ortamına aktarılan motor sunulmuştur.

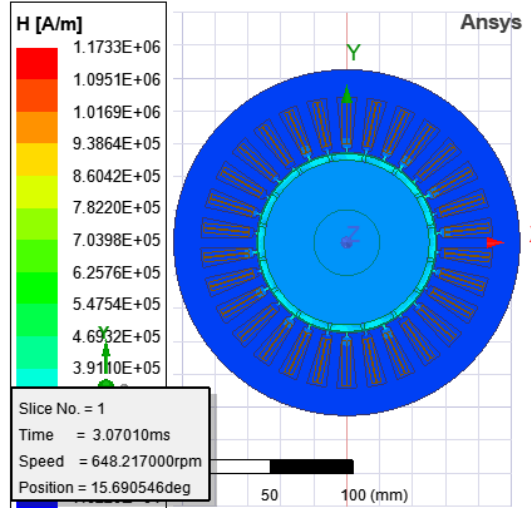


Şekil 9. Maxwell 2D'de Motor geometrisi

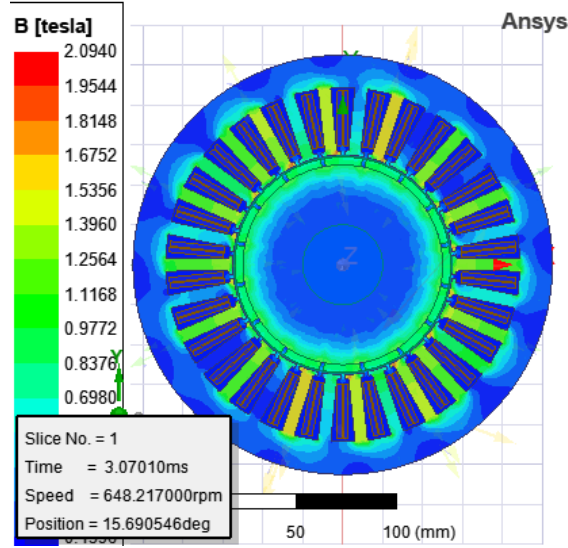
Motoru Maxwell 2D'de simüle ettikten sonra elde edilen bazı önemli grafikler aşağıda verilmiştir. Aşağıda, simülasyonları çalıştırarak ve alanları uygun bir adım zamanında kaydederek Maxwell 2D'de yapılan bazı analizler yer almaktadır. Şekil 10 stator ve rotordaki akı çizgilerini, Şekil 11 stator ve rotordaki alan yoğunluğunu ve Şekil 12 stator ve rotor arka demirindeki akı yoğunluğunu temsil etmektedir.



Şekil 10. Stator ve rotordaki akı çizgileri



Şekil 11. Stator ve rotordaki manyetik lan şiddeti



Şekil 12. Stator ve rotordaki manyetik akı yoğunluğu

3.3 Mıknatısın Genişliğini Artırarak Tasarlanan Motorun Analizi

Yukarıda tasarımı verilen motordan yaklaşık 1500 W çıkış gücü elde edilebilmektedir. Bu kadar düşük çıkış gücünün elde edilmesinin ana nedeni rotorda kullanılan mıknatısın genişliğinin az olmasıdır. Nihayetinde rotor üzerinde bulunan mıknatıslar, rotor tarafındaki manyetik alanın kaynağıdır. Ayrıca mıknatıstan gelen akı çıkışı da mıknatıs hacmine bağlıdır. Aynı motor geometrisinden daha fazla güç elde edebilmek için sadece mıknatıs genişliğinin artırılması yeterli olabilmektedir. Bu çalışmada mıknatıs genişliği 18 mm'den 26.5 mm'ye çıkarılmaya çalışılmış, diğer tüm geometrik ölçüler aynı tutularak yuva biraz değiştirilmiştir. Mıknatıs genişliği arttıkça, mıknatıs rotorun alanını daha fazla kaplar ve hava boşluğundan geçen akı daha düzgün hale geldiğinden, motordan elde edilen gücün arttığı ve tork dalgalanmalarının azaldığı görülmüştür. Hava boşluğu akı yoğunluğu da artarak motor güç çıkışını iyileştirmeye yardımcı olur. Fakat armatür iletken kayıpları artacağından verimlilik biraz tehlikeye girmiştir. Tablo 5'te mıknatıs genişliği artırıldıktan sonra geliştirilmiş bazı parametreler verilmiştir. Aşağıdaki tork grafiğinden, burada motorun önceki tasarıma göre daha az tork

dalgalanmasında daha yüksek güç çıkışı sağlayabildiği görülmektedir. Sadece mıknatıs genişliği artırılarak motor performansının iyileştirilebileceği görülmüştür.

Tablo 5. Mıknatıs boyutları artırıldığında elde edilen değerler

Parametre	Mıknatıs Boyutu artırıldıktan sonraki değer	Mıknatıs boyutu değiştirilmeden önceki değer
Nominal Moment (N.m)	22.1	20.3
Çıkış Gücü (W)	2855.24	1504
Toplam Kayıp (W)	575.57	375.3
Verimlilik (%)	76.4	80.1

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fırçasız DC motor tasarımına ve bunu analiz etmeye yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. Tasarlanan motorun verilen laminasyon ve mıknatıs boyutlarına göre daha az tork dalgalanması ile yaklaşık 1500 W güç verebildiği görülmüştür. SEY'e dayanan ANSYS'in-RMxpert aracı ile motorun temel tasarım denklemleri çözülerek tasarım verileri elde edilmiştir. Bu veriler optimize edilmiş motor tasarım parametreleri olarak kabul edilmemelidir. Optimizasyon için ANSYS'in Maxwell-2D olan SEY aracı ile motorun simülasyona tabi tutulması gerekmektedir. Bu tasarıma göre motor, nominal hız ve torkta oldukça verimi iyi olur. Ayrıca torktaki dalgalanmalar limitler dahilinde ve sargıdaki akımlar nominal değeri aşmamaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, dahili sabit mıknatıslı motor olması durumunda, tork dalgalanmalarına karar vermede mıknatıs genişliğinin önemli bir rol oynadığıdır. Mıknatıs maksimum alanı kaplamalıdır, böylece mıknatıstan gelen akı maksimum hava boşluğu alanını kaplamalıdır. Yine belirtmekte fayda var ki, belirli büyüklükte bir mıknatıs kullanan bir motorun üreteceği bir güç sınırı vardır. Burada görüldüğü gibi 15 mm genişliğindeki bir mıknatıs daha düşük armatür akım yoğunluğunda oldukça iyi bir verimle 1500 W güç üretebilmektedir. Motorun mıknatıs boyutu artırıldığında motorun çıkış gücünün önemli ölçüde arttığı ancak veriminin bir miktar azaldığı görülmüştür. Oluk optimize edilerek mıknatıs boyutu artırıldığında neredeyse 2855 W güç çıkışı elde edilmiştir. Mıknatıs genişliği arttıkça hava boşluğu akı yoğunluğunun ve motor çıkış gücünün arttığı görülmüştür. Ayrıca, hava boşluğu akışı daha düzgün hale geldikçe torktaki dalgalanma azalmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan ANSYS EM 22.0, Dicle Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası Silvan MYO.220001.

KAYNAKÇA

- [1] G. Dajaku and D. Gerling, “Design of Permanent Magnet Machines for Hybrid Vehicles,” ANSYS Conference & 25th CADFEM Users’ Meeting 2007.
- [2] P. M. Dusane ,2016, Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS - Maxwell 3D, Prague: MSc. Thesis, Czech Technical University in Prague.
- [3] Lee Ji Young, Geun Ho Lee, Jung Pyo Hong and Jin Hur,“comparative study of line start permanent magnet, skeleton type brushless and Snailcam type switched reluctance motor for a fan”, Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003.ICEMS 2003, Vol. 1, pp.183-186.
- [4] Y. Li , T.A. Walls, J.D. Loyd, and J.L. Skinner,“A novel two- phaseBPM drive system with high power density and low cost”, IEEE Transaction On Industry Applications, Vol. 34, No. 5, Sept/Oct 1998,pp.1072- 1080.
- [5] Chang-liang Xia, “Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls,”John Wiley Sons Singapore Pvt. Ltd,2012.
- [6] Prasanth Pathiyil, “Design Optimisation using Genetic Algorithm and Finite Element Analysis Of a Three Phase Outer Spin Brushless DC Motor”, International Conference on Mathematical Modeling and Application in Industrial Process,March 31, 2011.
- [7] Tushar Waghmare,P.R.Choube, “Design Of Internal Permanent Magnet Brushless Dc Motor Using Ansys”, International Journal Of Research Publications In Engineering And Technology,ISSN: 2454-7875 VOLUME 2, ISSUE 4, April 2016.
- [8] Agus Mujianto , Muh. Nizam ,Inayati, “Comparison of the slotless brushless DC motor (KMFDC) and slotted KMFDC using 2D modeling”, IEEE Int. Conf. on Elec EngG and Comp Sci (ICEECS), DOI: 10.1109/ICEECS.2014.7045248.
- [9] Durmus Uygun, Selim Solmaz, “Design and Dynamic Study of a 6 kW External Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Drivetrains”, 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.
- [10] Nishtha Shrivastava, Anil Brahmin, “Design of 3-Phase KMFDC Motor for Electric Vehicle Application by Using Finite Element Simulation”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, Issue 1, January 2014.
- [11] Malik Sameeullah, Sunita Chandel, “ Design and Analysis of Solar Electric Rickshaw: A Green Transport Model”.2016 IEEE.
- [12] Mehdi Ouada, M.S Meridjet , M Saad Saoud, Talbi N, “Increase Efficiency of Photovoltaic Pumping System Based KMFDC Motor Using Fuzzy Logic MPPT Control”, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, Issue 3, Volume 8, July 2013.