



Makale / Research Paper

**Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Minyatür Fırçasız DA Motorların
Tasarım Parametrelerinin Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi**

Selin EFE KAYABAŞI^{a*}, Elif ERZAN TOPÇU^b

^aBursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 16059 Bursa/ TÜRKİYE

^bBursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. 16059 Bursa/TÜRKİYE

^a501610083@ogr.uludag.edu.tr, ^berzan@uludag.edu.tr

Received/Geliş: 23.10.2018

Accepted/Kabul: 18.03.2019

Öz: Eyleyici eleman olarak tanımlanabilen elektrik motorlarının kullanılacağı alana ve sektöre göre maliyet avantajı, üretim kolaylığı, hız, verim ve çıkış gücü beklentileri değişmektedir. Dolayısıyla bu değişken beklentilerin istenen kısıtlar içinde karşılanması için motor tasarımında yapısal değişiklikler yapılmasını gerektirebilmektedir. Bu çalışmada, endüstrinin pek çok alanında kullanılan tipteki bir minyatür fırçasız doğru akım (DA) motoru yapısından yola çıkarak, bu motorun stator ve rotor kısmındaki çeşitli tasarım parametre değişimlerinin belirli bir çalışma devri aralığında motor çıkış gücü ve verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizler motorların endüstrideki kullanım alanlarına uygun boyutlar, işletim sıcaklığı, gerilim, güç ve hız değerleri dikkate alınarak ANSYS Maxwell programının ön tasarım modülünde (RMxprt) gerçekleştirilmiştir. Motorun stator kısmında laminasyon sac paketinin uzunluğu, sıkıştırma faktörü, slot tipinin değiştirilmesi ile ilgili analizler, rotor kısmında da mıknatıs malzemesi, mıknatıs dizilimi, rotorun yapısı ile ilgili analizler gerçekleştirilmiştir. Belirtilen analiz sonuçları hıza bağlı verim ve güç değişimleri açısından karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Minyatür fırçasız DA motor; mekatronik tasarım; RMxprt; Maxwell

**Investigation the Effect of Design Parameters of Miniature Brushless DC
Motors Used in Industrial Applications**

Abstract: Cost advantage, process ease, speed, efficiency and output power expectations of the electric motors used actuator elements can be changed according to the area and sector. Therefore, this variable may require structural changes in the motor design to meet the expectations in the desired constraints. In this study, the effects of various design parameter changes in the stator and rotor part of this motor on motor output power and efficiency in a certain operating speed range were investigated by starting from a miniature brushless direct current (DA) motor type used in many areas of industry. The analyzes were carried out in the preliminary design module (RMxprt) of the ANSYS Maxwell program, taking into account the dimensions, operating temperature, voltage, power and speed of the motors in the industry. In the stator part of the motor, the length of the laminating sheet package, stacking factor, the slot type, the magnet material in the rotor part, the magnet array, the analyzes of the structure of the rotor were carried out. The analysis results were compared with respect to speed-related efficiency and power changes.

Keywords: Small brushless DC motor; mechatronic design; RMxprt module; Maxwell

1. Giriş

Gelişen teknolojiyle birlikte insan hayatını kolaylaştıran yüksek performanslı ürünlerin sayısı her geçen gün artmaktadır. Artan akıllı teknolojiyle birlikte makine ve elektronik sektörden doğan bütünlük ürünler de ortaya konmaktadır. Bunlardan bir tanesi de fırçasız doğru akım (DA) motorudur. Sektördeki diğer paydaşları olan fırçalı DA ve step motorlara göre yüksek moment yoğunluğu, fırça kayıplarının olmaması, atalet momentlerinin düşük olması, hız kontrolünün iyi

Bu makaleye atıf yapmak için

Efe Kayabaşı, S., Erzan Topçu, E., "Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Minyatür Fırçasız DA Motorların Tasarım Parametrelerinin Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(2); 236-250.

How to cite this article

Efe Kayabaşı, S., Erzan Topçu, E., "Investigation the Effect of Design Parameters of Miniature Brushless DC Motors Used in Industrial Applications" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6(2); 236-250.

olması, bakım maliyetlerinin düşük olması, sessiz çalışması ve yüksek verimli olması gibi birçok avantaj sağlayarak sektörde pek çok uygulama alanında kullanım yeri bulmuştur [1]. Bunun yanı sıra kontrol devrelerinin karışık olması ve maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajları olsa da bu doğrultuda maliyeti azaltmaya yönelik çalışmalar sürmektedir.

Farklı güç ve boyutlara sahip fırçasız DA motorlarının kullanım alanlarından bazıları endüstriyel, ev gereçleri, ofis araçları, otomotiv, taşıma ve ulaşım, savunma sistemleri, sağlık, havacılık, inşaat-yapı araçları ve yenilenebilir enerji sistemleri uygulamaları olarak sayılabilir.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında konuyla ilgili çalışmaların genellikle motorların mühendislik sistemlerinde kullanımı, kontrolü, tasarım aşamaları ve üretim süreci yönünde olduğu görülmektedir. Dusane çalışmasında ANSYS Maxwell 3D programını kullanarak fırçasız DC motorun benzetimi ile ilgili çalışmalar yapmıştır. UNEP (Birleşmiş Milletler Çevre Programı) kapsamında yüksek performanslı elektrikli bisiklet için kullanılacak dört farklı tipteki motorun geçici ve kalıcı durum davranışını inceleyerek motorların performanslarını değerlendirmiştir [2]. Ocak ve ark. elektrikli bisikletler için dış rotorlu fırçasız bir senkron elektrik motoru tasarımı ve prototip üretiminin gerçekleştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Prototip testleri oluşturulan deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiş ve benzetim sonuçları ile büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür [3]. Elektrikli taşıtlarda elektrik motoru kullanımı, motor tasarımı ve analizi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Lequesne otomobillerdeki yakıt, süspansiyon, direksiyon ve fren sistemlerinin elektromekanik uygulamalarını incelemiştir [4]. Ocak çalışmasında elektrikli araçlar için üç kademeli fırçasız DA motorunun tasarımı, analizi ve üretimi üzerine çalışmıştır. Tasarladığı 46 kutuplu, üç kademeli fırçasız DA motorundan oluşan sistem yeni nesil yüksek verimli elektrikli araçlarda kullanılacak şekilde yapılandırılmıştır [5]. Tiryaki ve ark. elektrikli araçlar için fırçasız DA motorlarında değiştirilebilir manyetik alan uygulamasını incelemiştir. Çalışmalarında üniversitenin elektromobil takımının aracında kullanılan elektrik motoru referans alınarak, ANSYS Maxwell ortamında sistem performansını iyileştirmek için çalışmalar yapılmıştır [6]. Çetin ve Daldaban otomotiv uygulamalarında kullanılacak eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız DA motoru tasarımı için gerekli tasarım aşamalarını, tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususları yol haritası şeklinde adım adım sunmuşlardır [7]. Chaudhari ve Mahajan otomotiv uygulamalarında kullanılacak su pompası sistemi için mikrodenetleyici sistemi ile entegre edilmiş fırçasız DA tasarlanması üzerine çalışmışlardır [8]. Wijenayake ve ark. elektrikli taşıtlarda kullanılacak tipte eksenel akılı fırçasız DA motorlar için tasarım ve optimizasyon yöntemi üzerine çalışmışlardır [9]. Otomotiv uygulamalarının dışında, Dunkl ve ark. soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere küçük boyutlu fırçasız DA motor tasarımı ve tasarım kısıtlarını incelemiştir [10]. Ooshima ve Takeuchi küçük sıvı pompaları için yataksız fırçasız DA motor kullanım performansını incelemiştir. Tasarımın yaptıkları sistemin analizlerini sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirmişler ve deneysel çalışmalarla hedeflenen sistemin kullanılabilirliğini teyit etmişlerdir [11]. Arslan ANSYS-Maxwell paket programını kullanarak 75kW güce sahip dalgıç asenkron motorun sonlu elemanlar çözümünü Maxwell 2D kullanılarak gerçekleştirmiş ve elde ettiği sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmıştır [12]. Nekoubin 1 kW güce sahip bir fırçasız DA motorunun slot yapısının ve silindirik tek fazlı fırçasız DA motorunun anahtarlama açısının değişim etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle inceleyerek tork, verim ve güç ilişkisini araştırmıştır [13]. Çetin ve Daldaban eksenel akıllı motorlarda oluk açıklıklarındaki hatanın moment üzerine etkisini incelemişler, ortaya çıkan hatanın önlenmesi için bir öneri sunmuşlar ve prototip üretimini gerçekleştirmişlerdir [14]. İşler ve ark. fırçasız doğru akım motorlarındaki farklı mıknatıs dizilimlerinin vuru momentini, zıt elektromotor kuvveti ve moment karakteristikleri üzerindeki etkisini Flux2D programını kullanarak incelemiştir [15].

Bu çalışmada ülkemizde yerli üretimi henüz yapılmayan minyatür fırçasız DA motorların tasarım parametrelerinin devir sayısına bağlı olarak motor performansına etkisi incelenmiştir. ANSYS Maxwell programının "RMxprt" motor ön tasarım modülü kullanılarak analizler yapılmış, sonuçlar

her bir parametre için kendi arasında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu çalışma ile minyatür yapıdaki fırçasız DA motorun stator ve rotoru üzerindeki yapısal değişikliklerin motor çıkış gücü ve verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tasarımcıların bu motorları kullanacağı alana/sectöre göre değişim gösterebilen maliyet, üretim kolaylığı, güç ve verim gibi performans isteği önceliklerine göre bu tip bir eyleyicide hangi parametre değişimlerinin ön plana çıkabileceği hakkında fikir sahibi olması hedeflenmiştir. Bu çalışmada amaç ideal motor yapısını bulmak olmayıp, motorun yapısal değişikliklerinin motor performansı üzerinde ne gibi değişimler oluşturduğunun incelenmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

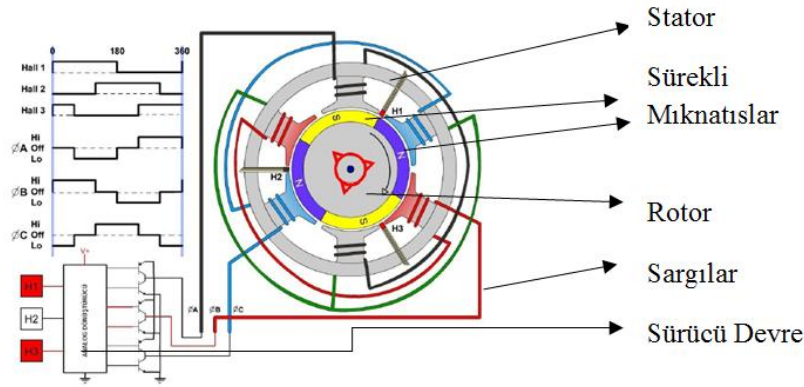
Bu kısımda fırça ve kolektör yapısı bulunmayan ve bundan dolayı fırçasız DA motoru olarak adlandırılan motorun yapısı, çalışma prensibi, ANSYS Maxwell programı ve analiz kısmında tercih edilen analiz metodu ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

2.1.1. Fırçasız DA motor yapısı, çalışma prensibi, avantaj ve dezavantajları

Fırçasız DA motoru Şekil 1’ de görüldüğü gibi genel olarak stator ve üzerinde kalıcı mıknatısların olduğu rotor kısmından oluşmaktadır. Stator fırçasız DA motorun duran, rotor ise dönme hareketini yapan kısımdır. Bir nüve ve içindeki oyuklara yerleştirilen üç fazlı sargılardan oluşur. Stator demir kayıplarının az olması için genellikle silisli saçlardan yapılmaktadır. Stator ve rotor kısmının birçok fiziksel parametresi mevcuttur. Bu parametrelerin her birinin değişimi motor performansında önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Fırçasız DA motorları klasik fırçalı doğru akım motorları ya da asenkron motorlar gibi doğrudan güç kaynağına bağlayarak çalıştırılmazlar. Bunun için Şekil 1’de görüldüğü gibi bir sürücü sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Fırçasız DA motoru bir DA güç kaynağının stator faz sargılarının mikrodenetleyici kontrolünde bir güç elektroniği devresi üzerinden tetiklenmesiyle çalışmaktadır. Sürekli mıknatıslar rotor akısını oluştururlar. Enerjilenen stator sargıları da oluşturduğu elektromanyetik alan ile rotor mıknatıslarını çekerek rotorun dönme hareketini sağlarlar. Uygun sırayla stator fazları enerjilenerek, döner alanın sürekliliği sağlanır. Döner alanın rotor tarafından takip edilmesiyle motorun çalışması gerçekleşmiş olur [5]. Fırçasız DA motorlar uygulama alanlarında sadece sürücü ile birlikte kullanılabilmesi gibi hız ve tork değerine göre kademe oluşturacak redüktör yapısı ile de kullanılabilir.

2.1.2. Elektrik motoru tasarımı ve ANSYS Maxwell programı

Günümüzde pek çok uygulama alanında yer almasıyla birlikte elektrik motoru tasarımı ve geliştirme çalışmaları önem kazanmıştır. Elektrik motorları elektrik, manyetik ve mekanik alt sistemlerden oluşan bir sistemdir. Elektromekanik bir sistemin manyetik alan dağılımının incelenmesinde manyetik devre analizi ve sonlu elemanlar analizi gibi farklı yöntemler vardır. Eğer geometrik yapılandırma uygun şekilde yapılırsa sonlu elemanlar analizi oldukça doğru sonuçlar vermektedir. Günümüzde kullanılan bilgisayarların kapasite ve güçleri de kısa bir zamanda analiz sonuçlarının elde edilmesine imkan sağlamaktadır [16].



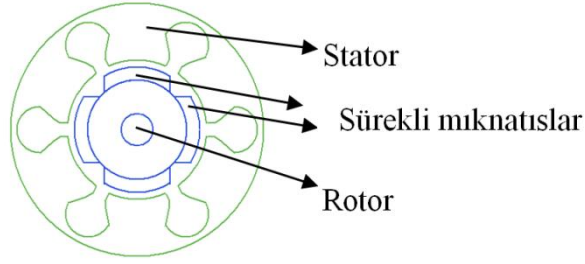
Şekil 1. Fırçasız DA motorun yapısı [5]

Motor tasarımında daha anlaşılır ve hızlı sonuçlar elde edebilmek adına günümüzde pek çok paket yazılımı kullanılmaktadır [2,3,5,6,13,14,15,17]. Bu yazılımların kullanılmasıyla prototip üretiminde kullanılacak parametrelere daha kısa sürede ulaşılarak, gereksiz maliyetlerin önüne geçilebilmektedir. Motor tasarım süreci; tasarım isterlerinin belirlenmesi analitik tasarım ve hesaplar, manyetik tasarım ve hesaplar, ısıl tasarım ve analizler olarak ilerlemektedir [5,7]. Bu süreçte motorun nominal ve maksimum gücü besleme gerilimi aralığı, motor momenti, hedef verimi, hedeflenen ağırlık ve hacim değerleri önem arz etmektedir.

Elektromanyetik bir alanı tanımlayan temel denklemler Maxwell denklemleridir [18,19]. ANSYS Maxwell programı da uygun sınır şartları ve kullanıcı tarafından belirlenen isterlere göre düşük frekanslı elektromanyetik devre problemlerini sonlu elemanlar yöntemiyle Maxwell denklemlerini çözerek gerçekleştirir [20]. Bu çalışmada motor performansını etkileyen birçok parametre ANSYS Maxwell programının motor ön tasarım modülünde (RMxprt) incelenerek, motor performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2.2. Metod

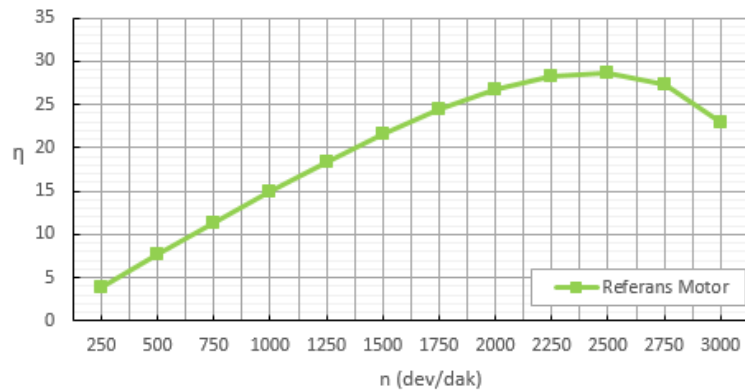
Çalışmada öncelikle motorun stator ve rotorundaki yapısal parametre değişimlerinin belirli bir hız aralığında verim ve çıkış gücü üzerindeki etkisinin incelenmesi için ANSYS Maxwell programının “RMxprt” modülünün kütüphanesinde bulunan, tipik fırçasız DA motorlarından olan “iç rotorlu fırçasız DA motor” yapısı seçilmiş ve bu motor “referans motor” olarak isimlendirilmiştir. Bu tip bir motor yapısı kontrol ve soğutma kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı endüstride çok kullanıldığı için tercih edilmiştir. Motora ait parametre bilgileri girilirken minyatür tipteki motorların kullanıldığı endüstriyel uygulamalar dikkate alınarak, bu sektörlerde kabul edilebilecek stator dış ve iç çapı, güç, gerilim, hız ve çalışma sıcaklığı parametre değerleri giriş olarak verilmiştir. Tablo 1’de verilen motor değerleri üzerinden analiz yapılarak, referans motorun Şekil 3 ve Şekil 4’te yer alan verim-hız ve motor çıkış gücü-hız grafikleri elde edilmiştir. İlerleyen analizlerde bu motorun anma çıkış gücü, anma gerilimi, kutup sayısı, yük türü, kayıplar, istenen anma hızı, çelik tipi, mıknatıs kalınlığı, sıcaklık ve çap değerleri (rotor konumu analizi hariç) değerleri sabit tutularak stator kısmında laminasyon sac paketinin uzunluğu, sıkıştırma faktörü, slot tipi; rotor kısmında mıknatıs malzemesi, mıknatıs dizilimi, rotorun konumu değiştirilerek her bir değişimin motor performansına olan etkisi “Bulgular ve Tartışma” bölümünde incelenmiştir.



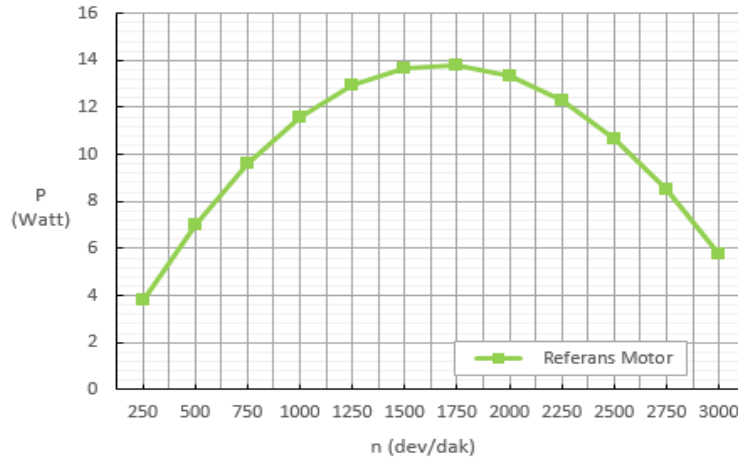
Şekil 2. "Referans motor" isimli motor yapısı

Tablo 1. Referans motorun parametre bilgileri

Parametreler	Değer
Anma Çıkış Gücü	14 W
Anma Gerilimi	12 V
Kutup Sayısı	4
İstenen Anma Hızı	3500 dev/dak
Sürtünme ve Rüzgar Kayıpları	2.6981 W
Rotor Pozisyonu	İçsel
Yük Türü	Sabit Güç
İşletim Sıcaklığı	100 °C
Statorun Dış Çapı	38 mm
Statorun İç Çapı	21 mm
Stator Nüvenin Uzunluğu	30 mm
Stator Nüvesinin Sıkıştırma Faktörü	0.95
Çelik Tipi	19_24G
Hava Boşluğu	1 mm
Rotor Dış Çapı	19 mm
Rotor İç Çapı	5 mm
Rotor Uzunluğu	30 mm
Çelik Tipi	19_24G
Mıknatıs Kalınlığı	2 mm
Mıknatıs Malzemesi	XG196/96



Şekil 3. Referans motorun devir sayısı- verim grafiği



Şekil 4. Referans motorun devir sayısı-çıkış gücü grafiği

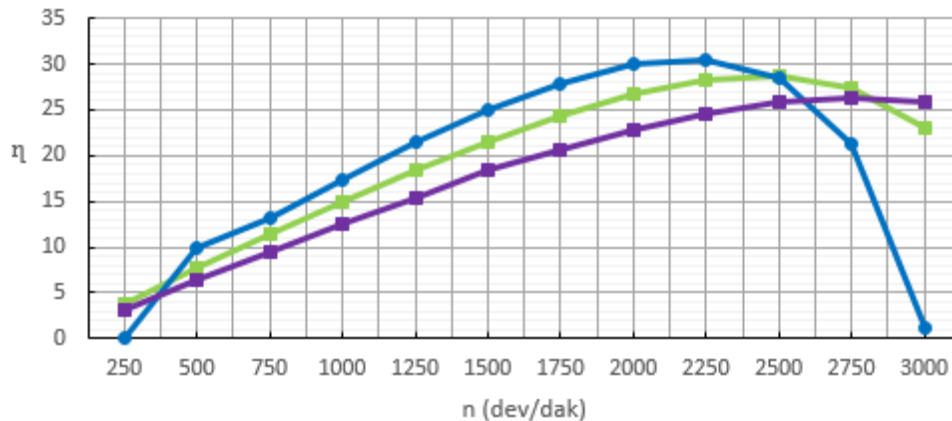
3. Bulgular ve Tartışma

Bu kısımda “referans motor” olarak isimlendirilen fırçasız motor yapısı üzerinde yapılan parametre değişimlerinin incelendiği analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Motorun sac laminasyon paketi uzunluğu, sıkıştırma faktörü, slot tipi, rotor mıknatıs malzemesi, mıknatıs dizilimi ve rotor konumu değişiminin sistem performansı üzerindeki etkileri sırasıyla incelenmiş, performans grafikleri karşılaştırılarak parametrelerin belirli bir devir aralığında verim ve çıkış gücüne etkisi incelenmiştir.

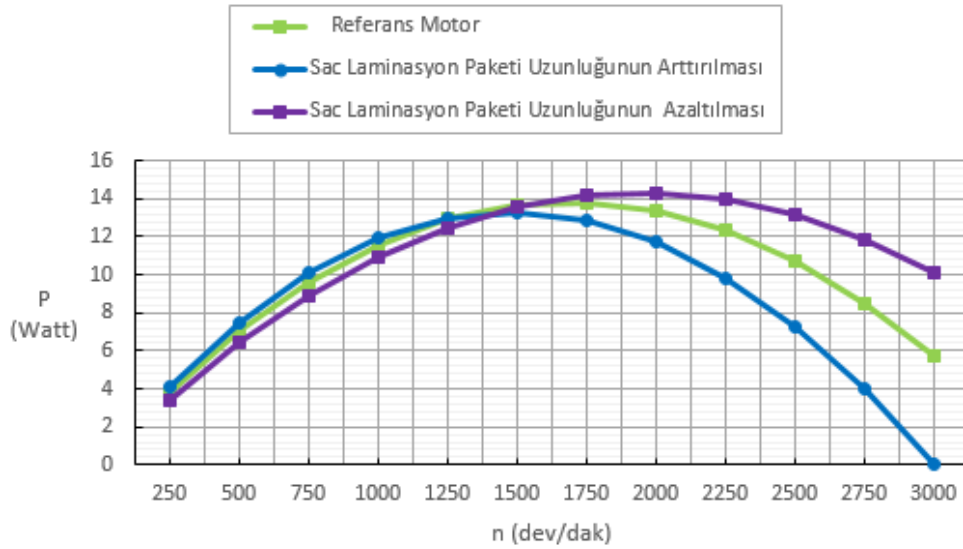
3.1. Stator analizleri

3.1.1. Stator ve rotor sac laminasyon paketi uzunluğu değişiminin incelenmesi

Bu kısımda motor stator ve rotor laminasyon sac paketi uzunluğunun referans motora göre 5 mm artırılması ve azaltılmasıyla elde edilen analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Şekil 5’ te verim-hız grafiği incelediğinde laminasyon sac paketi uzunluğu artırılan motorun verimi referans motordan fazla iken 2500 dev/dak’ dan sonra hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür. Laminasyon sac paketi uzunluğu azaltılan motorda ise 2750 dev/dak’ dan sonra motor veriminin azda olsa arttığı görülmüştür. Şekil 6’ da verilen çıkış gücü-hız grafiğinde ise sac laminasyon paketi uzunluğunun azaltıldığı durumda en iyi motor çıkış gücü sağladığı görülmektedir. 1500 dev/dak’ lık hız değerine kadar güç değerleri yakın değerlerde kalırken, bu değerden yüksek hızlarda çalışma durumunda sac laminasyon paketi uzunluğunun azaltıldığı durumda güç çıktısı daha iyi görünmektedir.



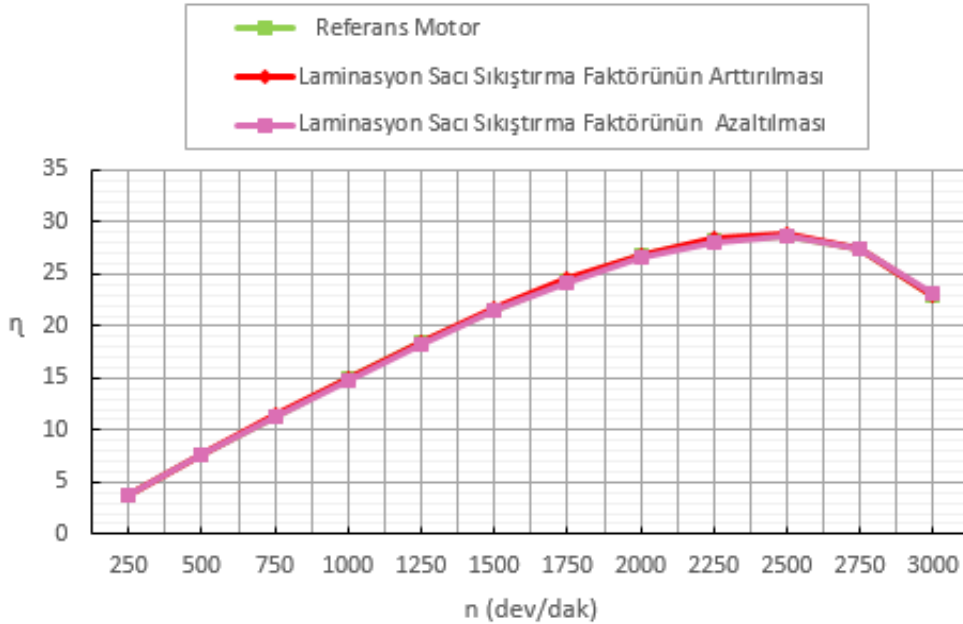
Şekil 5. Laminasyon paket uzunluğu değişiminin motor verimi üzerindeki etkisi



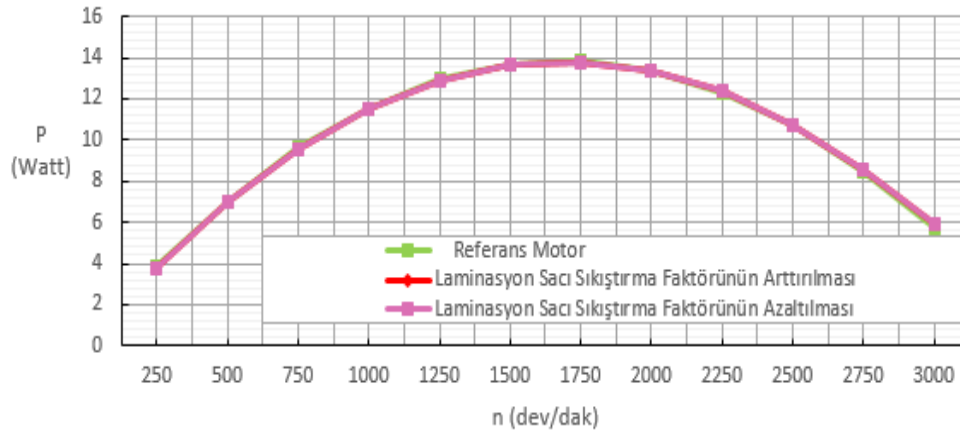
Şekil 6. Laminasyon paket uzunluğu değişiminin motor çıkış gücü üzerindeki etkisi

3.1.3. Laminasyon sacı sıkıştırma faktörü değişiminin incelenmesi

Bu kısımda da laminasyon sac paketi sıkıştırma faktörünün kullanılan motor için programın izin verdiği en büyük değer olan 0.03 değerinde arttırılması ve azaltılması ile elde edilen analiz sonuçları incelenmiştir. İletken sac paketinde yer alan sacların birim hacminin bir ölçüsü olan bu değer değişimi sonucunda performansında bir değişim beklenirken minyatür boyutlarda çalışıldığı için Şekil 7 ve Şekil 8' den de görüleceği gibi verim ve çıkış gücünde bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 7. Sac sıkıştırma faktörü değişiminin motor verimi üzerindeki etkisi



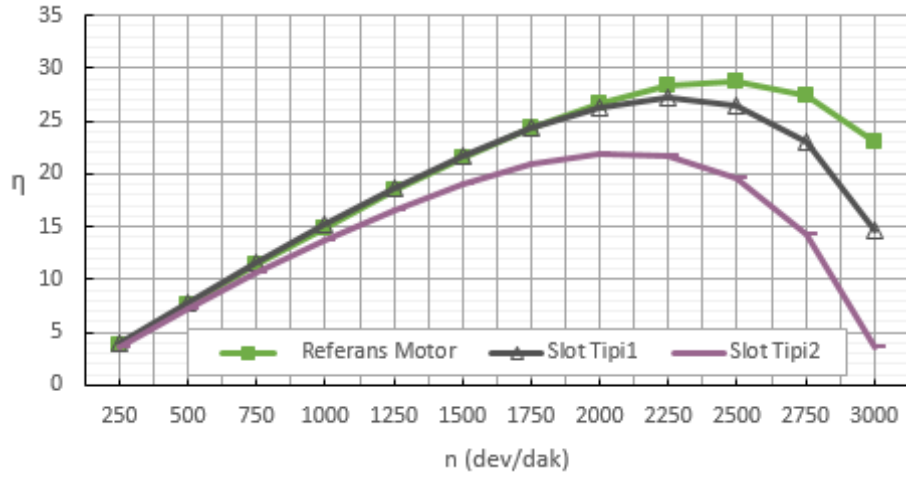
Şekil 8. Sac sıkıştırma faktörü değişiminin motor çıkış gücü üzerindeki etkisi

3.1.4. Slot yapısı değişim etkisinin incelenmesi

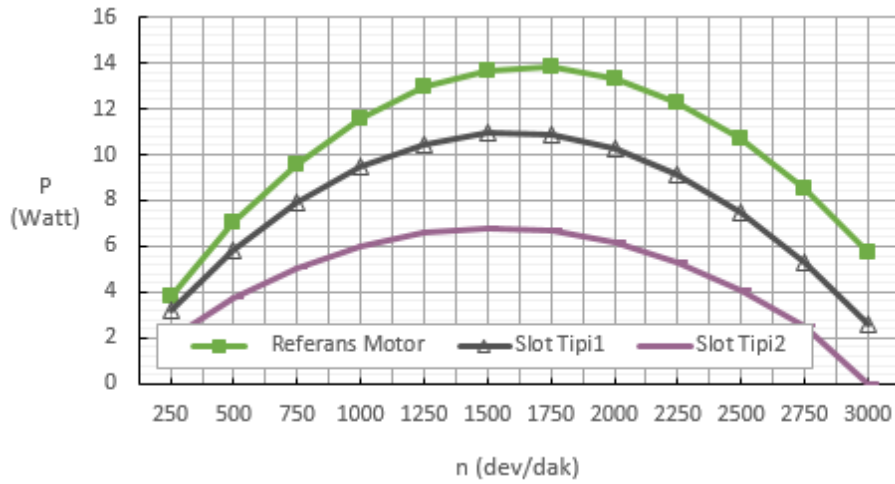
Referans motorda seçilen slot tipi Tablo 2’ de “a” ile belirtilen slot tipidir. Tablo 2’ de verilen “b” ve “c” seçenekleri ise incelenen diğer iki farklı slot tipidir. Bu slot tiplerinin boyutsal ölçüleri Tablo 2’ den de görüldüğü gibi aynı olup farklı formlara sahiptirler. Bu üç tip slot tipinin analiz sonuçları Şekil 9 ve Şekil 10’ da gösterilmiştir. Bu grafiklerden “a” tipi slot tipinin daha iyi verim ve çıkış gücü sağladığı görülmüştür. Bu yapı bobin telleri sarıldığında tam bobin formu oluşumunu destekleyecek, bobinlerin kaymasını önleyen bir yapıdır ve hava boşluğu da diğer slot tiplerine göre daha küçük bir değere sahip olduğundan motor performansı daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 2. Slot yapıları ve boyutları

	a. Referans Motor Slot Tipi	b. Slot Tipi 1	c. Slot Tipi 2
Hs0	1.08 mm	1.08 mm	1.08 mm
Hs1	1 mm	-	1 mm
Hs2	2 mm	2 mm	2 mm
Bs0	2.15 mm	2.15 mm	2.15mm
Bs1	3.5 mm	3.5 mm	3.5 mm
Bs2	7 mm	7mm	7 mm
Rs	-	-	0



Şekil 9. Slot tiplerine göre motorların devir sayısı-verim değişimi

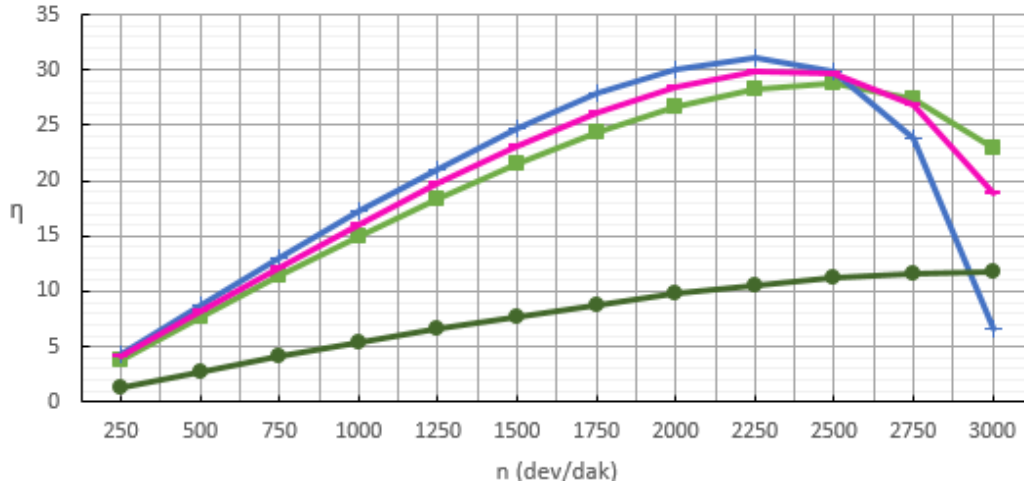


Şekil 10. Slot tiplerine göre motorların devir sayısı- çıkış gücü değişimi

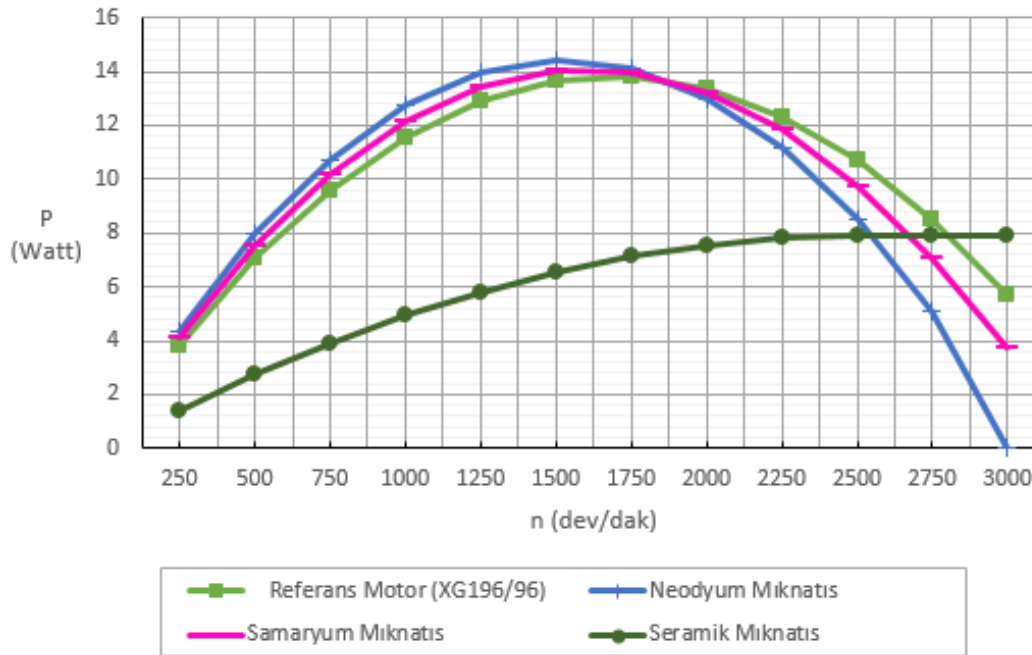
3.2. Rotor analizleri

3.2.1. Rotor kalıcı mıknatıs malzemesi değişiminin incelenmesi

Bu kısımda da referans motorda kullanılan XG196/96 kalıcı mıknatıs malzemesinin ve yine fırçasız DA motorlarda kullanılabilen Neodyum, Samaryum ve Seramik kalıcı mıknatıs malzemeleri ile analizler yapılmıştır. Enerji yoğunluğu olarak bakıldığında Samaryum, XG196/96, Neodyum ve Seramik mıknatıs olarak sıralanabilir. Fiyat açısından da Seramik mıknatısın en avantajlı olduğu söylenebilir. Şekil 11' deki verim grafiğinde 2500 dev/dak' ya kadar Neodyum ve Samaryum mıknatıslı motorun verimi daha yüksek iken 2500 dev/dak' dan sonra XG196/96 malzemesinin kullanıldığı motorun veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Şekil 12' de verilen güç eğrisinin 1800 dev/dak' ya kadar ve sonrası durum için verim grafiğine benzer bir karakteristik gösterdiği görülmüştür.



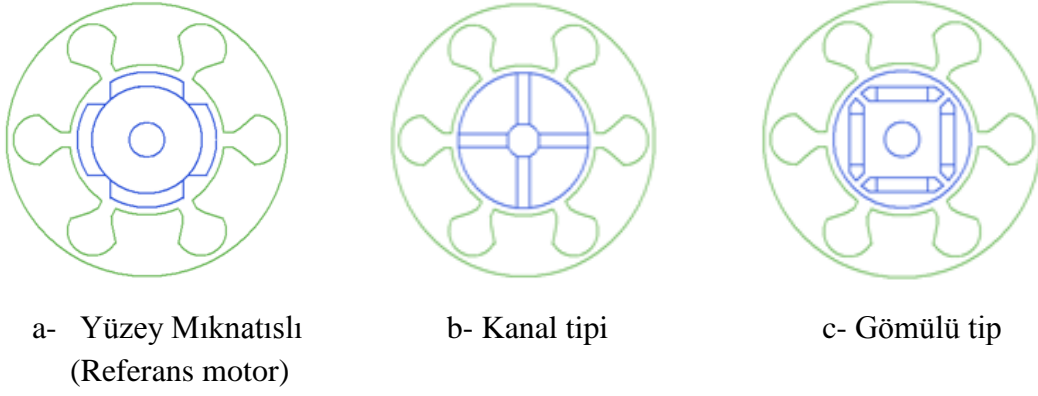
Şekil 11. Farklı kalıcı mıknatıs malzemesine sahip motorların devir sayısı-verim değişimi



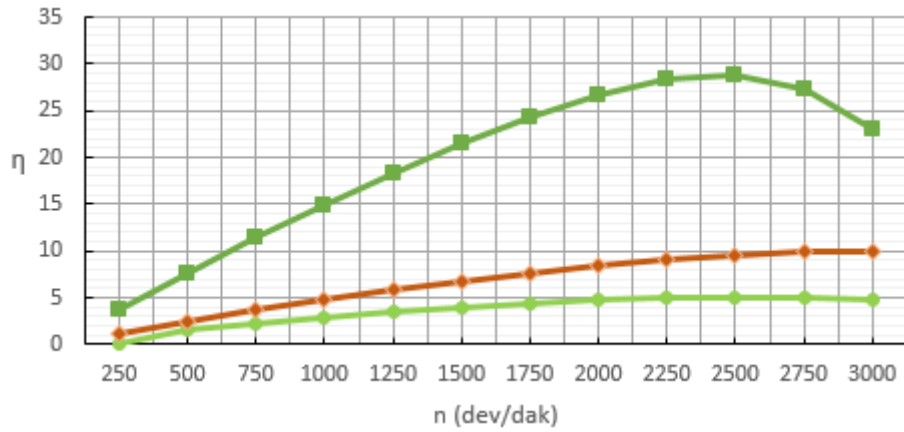
Şekil 12. Farklı kalıcı mıknatıs malzemesine sahip motorların devir sayısı-çıkış gücü değişimi

3.2.2. Rotor mıknatıs dizilimi değişiminin incelenmesi

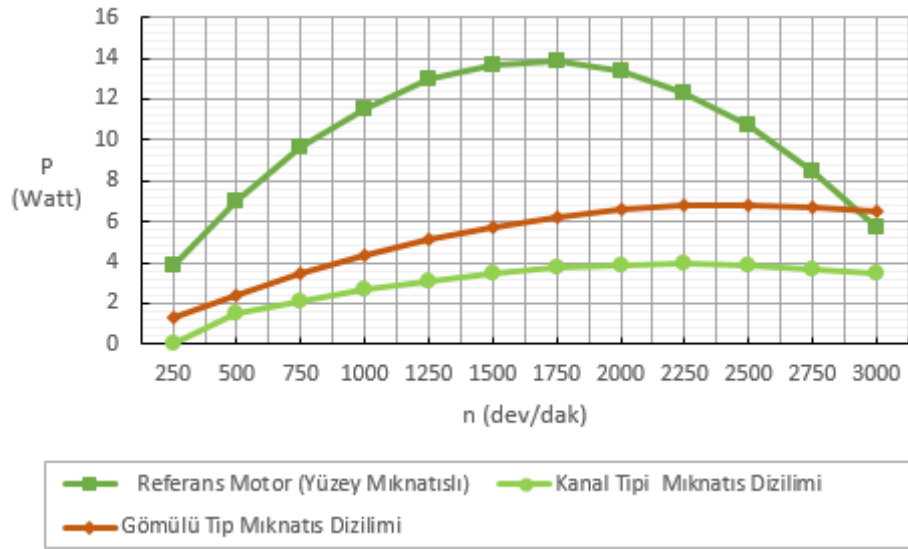
Bu kısımda rotor üzerindeki kalıcı mıknatısların dizilimlerinin performans üzerindeki etkisi üç farklı dizilim yapısı ile incelenmiştir. Bunlar Şekil 13’ de gösterilen “a” yüzey mıknatıslı tip, “b” kanal tipi ve “c” gömülü tip mıknatıs dizilimleridir. Bu dizilimlerden “a” ile belirtilen referans isimli motorda kullanılan dizilim şeklidir. Kalıcı mıknatıs malzemesi olarak üç tip için de referans motorun kalıcı mıknatıs malzemesi kullanılmıştır. Bu dizilimlerden “b” ve “c” tipi mıknatıs dizilimlerinde referans isimli motorun rotor dizilimine göre imalat zorluğu mevcuttur. Analiz sonuçları incelendiğinde Şekil 14’ den “b” ve “c” tipi mıknatıs dizilimlerinde motor veriminin “a” tipi dizilime göre daha düşük olduğu görülmüştür. Şekil 15 incelendiğinde çıkış gücü için de “a” tipi ile belirtilen yüzey mıknatıslı dizilimin daha iyi olduğu görülmüştür. Hem imalat kolaylığı hem performans özellikleri bakımından en ideal mıknatıs diziliminin yüzey mıknatıslı mıknatıs dizilimi olduğu söylenebilir.



Şekil 13. Referans ve alternatif rotor mıknatıs dizilimleri



Şekil 14. Farklı rotor mıknatıs dizilimlerine sahip motorların devir sayısı- verim değişimi

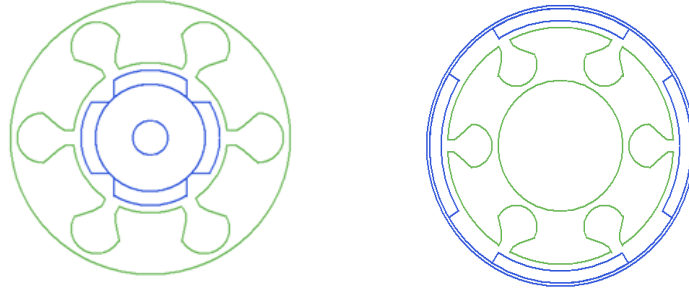


Şekil 15. Farklı rotor mıknatıs dizilimlerine sahip motorların devir sayısı- çıkış gücü değişimi

3.2.3. Rotor konumunun değişiminin incelenmesi

Motorlarda rotor konumu iç ve dış rotorlu olarak isimlendirilebilmektedir. Dış rotorlu ve iç rotorlu tasarıma göre stator olukları arasındaki hava boşluğu miktarı değişiklik gösterir. Referans isimli motor iç rotorlu motor yapısına sahiptir. Bu kısımda Şekil 16' de gösterildiği gibi aynı çaplarda stator boyutları kullanarak sadece mıknatıslı rotor yapısı dıştan konumlandırılmıştır. Şekil 17' da

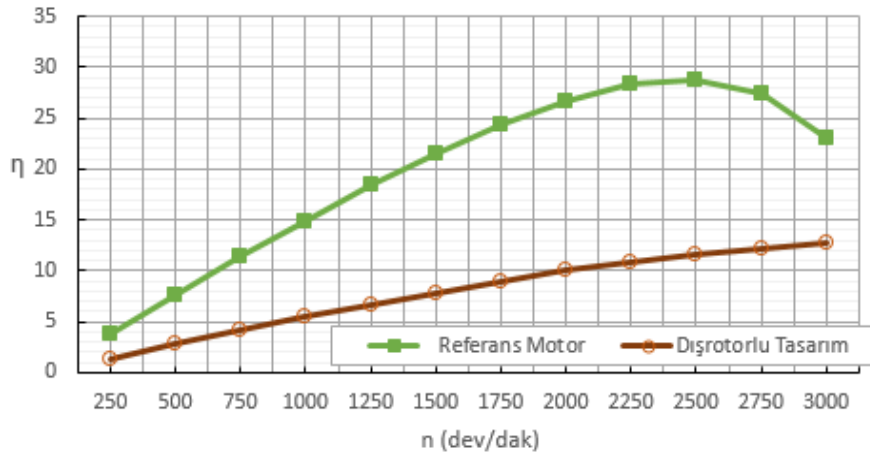
verilen verim-hız grafiğinden iç rotorlu yapının veriminin dış rotorlu motor verimine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 18 incelendiğinde referans motorun çıkış gücünün 2675 dev/dak' ya kadar dış rotorlu yapıya göre yüksek olduğu bu değerden sonra azaldığı görülmüştür.



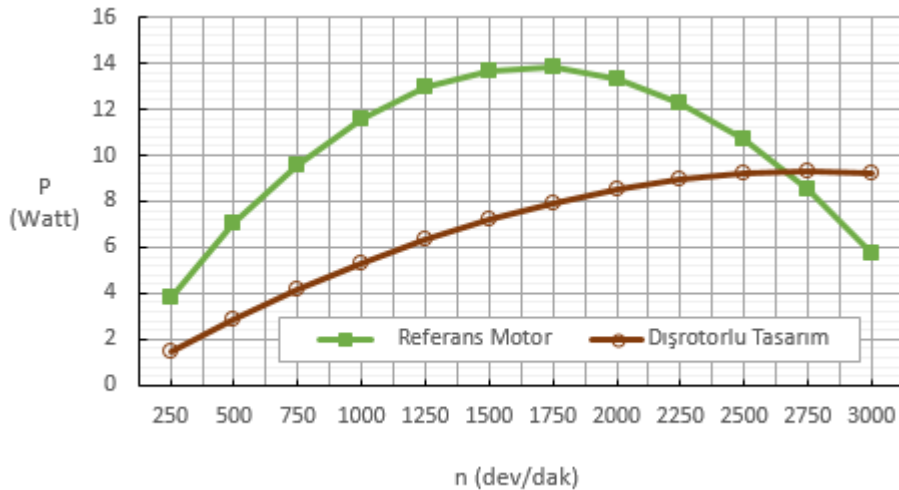
a- İç rotorlu motor
(Referans motor)

b- Dış rotorlu motor

Şekil 16. İç ve dış rotorlu motor yapısı



Şekil 17. İç ve dış rotorlu motorların devir sayısı- verim değişimi



Şekil 18. İç ve dış rotorlu motorların devir sayısı- çıkış gücü değişimi

Şekil 19' da fırçasız DA motorun stator ve rotor yapısı üzerinde yapılan analizler incelenen çalışma devri aralığında toplu halde grafiksel olarak sunulmuştur. Endüstrideki kullanım alanlarına göre motorların çalışacağı devir sayıları, istenen verim ve çıkış gücü değişebilmektedir. Kullanıcı

isterleri dikkate alınarak yapılacak tasarımlarda da isteri ön plana çıkaracak yapısal değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Örneğin Şekil 19’ da sunulan karşılaştırma grafiğinden referans isimli motorun tam yük altında en yüksek verimde olduğu 2500 dev/dak’lık devir sayısındaki çalışma şartları altında analiz sonuçları verim açısından değerlendirildiğinde; stator kısmında stator slot tipinin ve sac laminasyon uzunluğunun doğru seçiminin etkili olduğu, rotor kısmında ise kalıcı mıknatıs diziliminin uygun şekilde yapılmasının gerekliliği görülebilir. Yine aynı yapının en yüksek güç çıkışının alındığı 1750 dev/dak’lık devir sayısında ve maksimum devir sayısı olan 3000 dev/dak’lık devir sayısında elde edilen güç çıkışları incelendiğinde de slot tipi, sac laminasyon uzunluğu ve rotor mıknatıs diziliminin doğru yapılması gerektiği görülmüştür. İç rotorlu yapı verim ve güç açısından değerlendirildiğinde performans açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Seramik malzeme ise ucuz olmasına rağmen performans açısından diğer malzemelere göre düşük kalmıştır. Maliyetin ön planda olduğu tasarımlarda düşünülebilir malzeme olduğu söylenebilir.

		STATOR ANALİZLERİ							
		Sac Laminasyon Uzunluğu				Sıkıştırma Faktörü		Slot Yapısı	
	n (dev/dak)	Referans Motor	5 mm Arttırılmış	5 mm Azaltılmış	0.03 Arttırılmış	0.03 Azaltılmış	Slot Tipi 1	Slot Tipi 2	
n	250	3,818	4,48	3,156	3,842	3,790	3,945	3,616	
	500	7,612	9,923	6,299	7,659	7,558	7,846	7,156	
	750	11,339	13,272	9,394	11,408	11,261	11,641	10,540	
	1000	14,902	17,408	12,485	14,993	14,602	15,274	13,709	
	1250	18,380	21,408	15,305	18,489	18,261	18,677	16,569	
	1500	21,572	24,316	18,093	21,694	21,435	21,753	19,006	
	1750	24,409	27,869	20,564	24,540	24,253	24,359	20,857	
	2000	26,727	29,916	22,791	26,866	26,585	26,283	21,866	
	2250	28,297	30,504	24,605	28,427	28,143	27,164	21,640	
	2500	28,738	28,480	25,882	28,838	28,662	28,480	19,526	
	2750	27,389	21,216	26,376	27,414	27,373	23,072	14,338	
	3000	23,012	1,081	25,777	22,860	23,234	14,614	3,632	
p	250	3,816	4,132	3,428	3,838	3,790	3,170	2,015	
	500	7,033	7,512	6,416	7,070	6,990	5,820	3,690	
	750	9,601	10,094	8,301	9,645	9,552	7,919	5,021	
	1000	11,542	11,896	10,884	11,587	11,432	9,452	5,987	
	1250	12,927	12,975	12,477	12,966	12,886	10,461	6,582	
	1500	13,675	13,292	13,545	13,701	13,647	10,929	6,814	
	1750	13,818	12,859	14,144	13,828	13,801	10,860	6,689	
	2000	13,356	11,702	14,275	13,350	13,363	10,270	6,197	
	2250	12,308	9,839	13,972	12,277	12,345	9,126	5,334	
	2500	10,681	7,276	13,126	10,623	10,753	7,469	4,101	
	2750	8,485	4,043	11,857	8,398	8,597	5,292	2,493	
	3000	5,733	0,151	10,133	5,615	5,889	2,597	0,507	

a. Stator Analizleri

		ROTOR ANALİZLERİ						
		Rotor Kalıcı Mıknatıs Malzemesinin Değişimi			Rotor Mıknatıs Dizilimi			
	n (dev/dak)	Referans Motor	Neodyum Mıknatıs	Samarıyum Mıknatıs	Seramik Mıknatıs	Kanal Tipi	Gömitüli Tip	Diş Rotorlu
n	250	3,818	4,381	4,108	1,373	1,229	1,376	
	500	7,612	8,749	8,194	2,733	1,476	2,436	2,748
	750	11,339	13,047	12,265	4,062	2,178	3,608	4,095
	1000	14,902	17,205	16,038	5,351	2,827	4,732	5,408
	1250	18,380	21,091	19,766	6,583	3,429	5,796	6,665
	1500	21,572	24,694	23,166	7,745	3,979	6,783	7,857
	1750	24,409	27,845	26,138	8,804	4,410	7,668	8,969
	2000	26,727	30,051	28,478	9,748	4,762	8,453	9,988
	2250	28,297	31,118	29,852	10,554	5,026	9,086	10,895
	2500	28,738	29,796	29,677	11,192	5,096	9,570	11,660
	2750	27,389	23,822	26,806	11,635	5,043	9,855	12,250
	3000	23,012	6,591	18,788	11,847	4,844	9,912	12,650
p	250	3,816	4,342	4,090	1,421	0,800	1,278	1,479
	500	7,033	7,943	7,437	2,721	1,474	2,428	2,861
	750	9,601	10,738	10,170	3,885	2,118	3,457	4,132
	1000	11,542	12,755	12,129	4,917	2,644	4,355	5,284
	1250	12,927	13,973	13,456	5,815	3,099	5,119	6,316
	1500	13,675	14,426	14,060	6,556	3,478	5,748	7,191
	1750	13,818	14,142	13,982	7,136	3,714	6,232	7,916
	2000	13,356	12,283	13,231	7,560	3,873	6,582	8,493
	2250	12,308	11,134	11,818	7,825	3,944	6,779	8,929
	2500	10,681	8,501	9,755	7,328	3,859	6,834	9,192
	2750	8,485	5,108	7,046	7,928	3,687	6,733	9,286
	3000	5,733	0,976	3,739	7,866	3,413	6,479	9,204

b. Rotor Analizleri

Şekil 19. Stator ve rotor analiz sonuçlarının toplu halde karşılaştırılması

5. Sonuç ve Öneriler

Motor tasarımcıları tasarım çalışmalarına başlarken öncelikle fırçasız DA motorun kullanılacağı alanı ve ana beklentiyi iyi tespit etmelidirler. Motor tasarımı yapılırken kullanılacak alanın kısıtlamaları, üretim kolaylığı ve maliyet beklentileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Kullanılacak alana göre hız, çıkış gücü ve verim gibi performans beklentileri de değişiklik gösterebilir. Ayrıca çalışma sırasında değişken hız isteği gibi durumlar da ortaya çıkabileceği için motorun devir sayısına göre motor performansının tüm çalışma aralığında incelenmesi de önem arz edebilir. Bu noktada tasarımcının motorunu nasıl kullanacağı kurgusu önemlidir. Çıkış gücü yeterli ve verimin yüksek olduğu yerde hız değeri uygunsa buna uygun parametre tercih edilebilir. Maliyet kısıtlaması varsa ki sac paketinin uzunluğunun artırılması veya enerji yoğunluğu daha yüksek malzeme tercihi ekstra maliyet demektir. Buna uygun tasarım yapılmalıdır.

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek boyutlarda, minyatür yapılı fırçasız bir DA motoru kullanılmış ve bu motorun stator ve rotorundaki yapısal değişikliklerin motorun çıkış gücü ve verimi üzerindeki etkileri tanımlanan devir sayısı aralığında incelenmiştir. Burada sistem performansına etki edecek birçok farklı yapısal değişikliğin etkisi toplu bir şekilde incelenmiştir.

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde “Tip1” ve “Tip2” slot yapısı, kanal tipi ve gömülü tip rotor mıknatıs dizilimi yerine referans olarak tanımlanan motorun slot tipinin ve yüzey mıknatıslı dizilimin güç ve verim açısından tüm devir sayılarında daha uygun olduğu görülmüştür. Laminasyon sac paketinin uzunluğunun ve rotorda farklı mıknatıs malzemelerinin kullanımında hız değerine bağlı olarak performansın değiştiği görülmüştür. Rotor konumunun içte veya dışta olması durumunda da tüm devir sayılarında iç rotorlu motorun daha verimli çalıştığı gözlenmiş, güç açısından da maksimum devrine yakın (2750 dev/dak büyük) bölgede dış rotorlu tasarımın daha fazla çıkış gücü sağladığı görülmüştür. Dış rotorlu motor üretiminin zorluğu ve geniş bir aralıkta referans motorun daha iyi performans göstermesi iç rotorlu referans motoru avantajlı hale getirmektedir. Laminasyon sac paketinin uzunluğunun artırılmasında, dış rotorlu tasarımda ve farklı mıknatıs malzemelerinin kullanımında hız değerine bağlı olarak performans sonuçlarının değiştiği görülmüştür. Hız değerine göre belli bir noktadan sonra farklı karakter gösteren diğer bir parametre de mıknatıs malzemesidir. Burada da maliyet olarak Seramik mıknatıs diğerlerine göre daha avantajlıdır. Ancak performans grafiklerinden Seramik mıknatısın performansının diğer mıknatıslar ile tasarlanan motorların performansına göre daha düşük kaldığı görülmüştür. Diğer malzemelerin karakteristik olarak birbirlerine göre çok büyük farkları olmamakla birlikte, düşük hızlarda Neodyum ve Samaryum mıknatısla tasarlanan motorların, yüksek hızlarda ise XG196/96 mıknatısın daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu noktada eğer yüksek hız beklentisi yok ise uygun maliyetli ve diğerlerine çok yakın değerler verecek olan Neodyum mıknatısı kullanmak motor tasarımcıları için daha avantajlı bir tercih olacaktır. Performans kriterlerinin yanında tasarım yapılırken maliyet ve üretim kolaylığı da göz önüne alınmalıdır.

Üzerinde çalışmaların sürdüğü lisansüstü çalışmanın ilk aşaması olan bu makalenin motor tasarımcılarının ön tasarım aşamasına kaynak oluşturması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- [1] http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/141300/10/10_chapter%202.pdf
- [2] Dusane, P., Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D, Master Thesis, Czech Technical University and Department of Power Engineering, (2016).
- [3] Ocak, O., Yılmaz, D., Aydın, M., Aydın, M., Fırçasız Dış Rotorlu Elektrikli Bisiklet Motoru Tasarımı, Üretimi ve Deneysel Doğrulaması, Eleco 2014 Elektrik –Elektronik Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 2014, 178-182.

- [4] Lequesne B., Automotive Electrification: The Nonhybrid Story, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1), 40-53.
- [5] Ocak, C., Elektrikli Araçlar İçin Üç Kademeli Yeni Bir Fırçasız DA Motoru Tasarımı, Analizi ve Uygulaması, Doktora Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [6] Tiryaki, H., Çağışlar, A. S., Akgündoğdu, A., Kocaarslan, İ., Elektrikli Araçlar için Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Değiştirilebilir Manyetik Alan Uygulaması, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016, 8(2), 37-45.
- [7] Çetin, E., Daldaban, F., Otomotiv Uygulamalarında Kullanılacak Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı BLDC Motor Tasarım Modeli, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, 2014, 17-22.
- [8] Chaudhari, A., Mahajan, G., Implementation of BLDC Motor Based Water Pump for Automotive Vehicle, The International Journal of Engineering and Science, 2015, 4(6), 34-41.
- [9] Wijenayake, A., Bailey, J. M., McCleer, P.J., Design optimization of an axial gap Permanent magnet brushless DC motor for electric vehicle applications, Thirteenth IAS Annual Meeting in Industry Applications Conference, IEEE, 1995, pp. 685 -692.
- [10] Dunkl, S., Muetze, A., Schoener, G., Design constraints of small single-phase permanent Magnet brushless DC drives for a cooling application, IEEE Energy Conversion Congress And Exposition
- [11] Ooshima, M., Takeuchi, C., Magnetic suspension performance of a bearingless brushless DC motor for small liquid pumps, 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2010, 1-4.
- [12] Arslan, S., Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2016, 4(2), 403-415.
- [13] Nekoubin, A., Design a single-phase BLDC Motor and Finite Element Analysis of Stator Slots Structure Effects on the Efficiency, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 5(5), 685-692.
- [14] Çetin E., Daldaban F., Eksenel Akıllı Motorlarda Oluk Açıklıklarındaki Hatanın Moment Üzerine Etkisi, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2017, 4(3), 374-381.
- [15] İşler, A., Özçelik, N.G., Ergene, L.T., Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Farklı Mıknatıs Dizilimleri, TBMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Bülten, 329-333.
- [16] Hanselman, Duane C., "Brushless Permanent Magnet Motor Design, Second Edition" 2006.
- [17] Demir, U., Aküner, M. C., Using Taguchi method in defining critical rotor pole data of LSPMSM considering the power factor and efficiency, Tehnički vjesnik 24, 2(2017), 347 353.
- [18] Gieras, J. F., M. Wing, Permanent Magnet Motor Technology Design, and Applications, Marcel Dekker, N. Y., USA, 2002.
- [19] Jin, J., "The Finite Element Method in Electromagnetics", Second Edition, John Wiley& Sons, 2002.
- [20] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-rmxprt>