



Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures

Ali Sinan Çabuk^{1*}, Safak Sağlam², Özgür Üstün^{1,3}

¹Electrical & Electronics Eng. Faculty, Electrical Engineering Dept. Istanbul Technical University, İTÜ Ayazağa Campus 34469 Maslak, Istanbul, Turkey

²Technology Faculty, Electrical & Electronics Eng. Dept. Marmara University, Göztepe Campus 34722 Kadıköy, Istanbul, Turkey

³Mekatro Mechatronik Systems R&D Co., İTÜ Teknokent ARI-2 B-Blok 2-2F, 34469 Maslak, Istanbul Turkey

Highlights:

- Different winding design structures in BLDC motors
- Effects of winding design on performance and manufacturing cost
- Impact of winding design on BLDC motor efficiency

Graphical/Tabular Abstract

Windings which affect machine performance and efficiency significantly, are essential components of electric machines. Two main criteria are considered during winding design in electric machines: impacts on performance and manufacturing costs. In this study, different winding structure combinations are investigated by implementing in an in-wheel motor structure. The motor is a surface mounted permanent magnet BLDC motor which is intended to be used in light electric vehicles. According to the design data, the obtained optimum design is manufactured and tested. The accurately captured test results are compared to the calculated values. The direct drive in-wheel BLDC motor used in this study has the rated values of 2.5 kW, 900 min⁻¹ and 150 V. The effects of different winding topologies are studied by keeping unchanged the motor structure and materials. The validation of the optimized design is realized by conducting the performance experiments. The study shows that the winding topology has a great importance especially for in-wheel motors.

Keywords:

- In-Wheel BLDC Motor
- Efficiency
- Winding Shape
- Light Electric Vehicle
- Finite Element Method

Article Info:

Research Article

Received: 05.04.2018

Accepted: 28.09.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571649

Acknowledgement:

This project is supported by the Marmara University Scientific Research Committee. Project No: FEN-C-DRP-110412-0096

Correspondence:

Author: Ali Sinan Cabuk
e-mail: ascabuk@itu.edu.tr
phone:02122856779

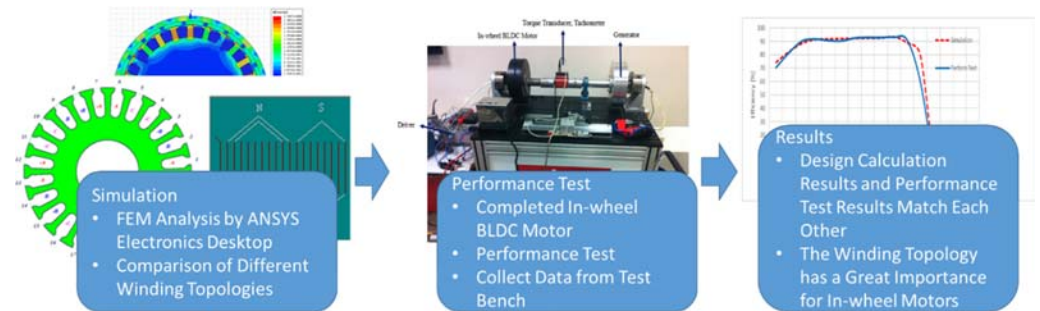


Figure A. Process of design study and experimental work.

Purpose: The main idea underlying the study is to investigate an in-wheel BLDC motor which is meant to be used in light electrical vehicles from efficiency point of view. The motors with different winding types are analyzed considering their contributions to overall performance.

Theory and Methods:

A Finite Element Method (FEM) based software is used for the design study, that is called ANSYS Electronics Desktop. The effects of different winding topologies are studied by keeping the motor main structure and materials unchanged. The verification of the optimized design is realized by conducting the performance experiments.

Results:

The motor with the single layer concentrated winding type is chosen after the analyses due to its improved efficiency. The manufactured motor is tested by using a special test bed. Numerous current, voltage, speed and torque measurements are captured for depicting the motor performance for different loadings. The results show that the prototype motor can provide the targeted efficiency values.

Conclusion:

In this study, the impact of winding type on in-wheel BLDC motors is exposed by means of design and experimental work. Due to predetermined sizes of those motors according to inner spaces of wheels and need for higher efficient motors in electrical vehicles, proper selection of winding type is an essential process.



Farklı sargı yapılarının tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Ali Sinan Çabuk^{1*}, Şafak Sağlam², Özgür Üstün^{1,3}

¹Istanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü İTÜ Ayazağa Kampüsü 34469 Maslak, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Göztepe Kampüsü 34722 Kadıköy, Türkiye

³Mekatro Mekatronik Sistemler Ar-Ge A.Ş., İTÜ Teknokent ARI-2 B-Blok 2-2F, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Fırçasız D.A. motorlarında farklı sargı yapıları tasarımı
- Fırçasız D.A. motoru sargı yapısının verime etkisi
- Fırçasız D.A. motoru sargı yapısının imalat maliyetlerine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.04.2018

Kabul: 28.09.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571649

Anahtar Kelimeler:

Tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru, verim, sargı yapısı, hafif elektrikli araçlar

ÖZET

Elektrik motorlarında sargıların yapısı, motor performansına ve verimine etki eden en önemli parametrelerden biridir. Sargılar üzerinde yapılacak olan iyileştirmelerin motor performansını yükseltmesinin yanı sıra imalat maliyetine de etkisi vardır. Bu çalışmada, hafif elektrikli araçların tahrik sisteminde kullanılan bir tekerlek içi fırçasız doğru akım (FDA) motorunun en iyileştirilmiş verim sonuçlarının elde için farklı sargı yapılarının uygulanması üzerine incelemeler yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda en iyileştirilmiş tasarımın prototipi imal edilmiş, ardından deneysel çalışma gerçekleştirilerek, test sonuçları ve hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tekerlek içi FDA motoru 2,5 kW gücünde, 900 d/dk devir sayısındadır ve giriş gerilimi 150V dur. Tasarım çalışmasında el hesaplamaları ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı ANSYS Electronics Desktop yazılımı kullanılmıştır. Farklı sargı yapılarında motor çalışmasının ne şekilde değişeceği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Motor performans deneylerinde, motor iç ve dış büyüklükleri yüksek doğrulukla ölçülerek çeşitli çalışma koşullarında verim değerleri belirlenmiştir. Test sonuçlarıyla hesaplama sonuçları karşılaştırılarak en iyileştirme çalışmasının geçerliliği ve tasarım çalışmasının doğrulanması incelenmiştir. Çalışmada sargı yapısının özellikle tekerlek içi motorlarda çok önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures

H I G H L I G H T S

- Brushless D.C. different winding structure design
- Brushless D.C. effect of motor winding structure
- Brushless D.C. effect on manufacturing costs of motor winding structure

Article Info

Research Article

Received: 05.04.2018

Accepted: 28.09.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571649

Keywords:

In-Wheel BLDC motor, efficiency, winding shape, light electric vehicle

ABSTRACT

Electric machine windings are the essential elements which affect machine performance and efficiency substantially. Two main criteria are considered during winding design: impact on performance and manufacturing costs. In this study, different winding structure combinations are investigated by implementing in an in-wheel motor structure. The motor is a surface mounted permanent magnet BLDC motor which is intended to use in light electric vehicles. According to the design data, the obtained optimum design is manufactured and tested. Accurately captured test results are compared to the calculated values. The direct drive in-wheel BLDC motor used in this study has the rated values of 2.5 kW output power, 900 min-1 shaft speed and 150 V terminal voltage. A Finite Element Method (FEM) based software is used for the design study, that is called ANSYS Electronics Desktop. Effects of different winding topologies are studied by keeping the motor structure and materials unchanged. The validation of the optimized design is realized by conducting the performance experiments. The study shows that the winding topology has a great importance especially for in-wheel motors.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen sanayileşme ve artan ulaşım ile birlikte fosil yakıtların daha çok kullanılması sonucu önemli çevre problemlerinin ortaya çıktığı açık bir gerçektir. Bu olumsuz çevresel etki, teknoloji gelişmelerini daha çevreci yaklaşımlara yöneltmiştir. Bu yaklaşımlardan belki de en önde geleni olan elektrikli araç teknolojisi gittikçe artan bir hızla gündelik yaşama girmektedir [1-3]. Çok sayıda elektrikli binek otomobil, elektrikli bisiklet ve hafif elektrikli taşıt yollarında yerini almaktadır. Bu eğilimler elektrikli taşıtlarla ilgili teknolojilerde önemli gelişmeleri beraberinde getirmektedir. Günümüzde çoğu otomotiv üreticisi elektrikli araç alanındaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerini yoğunlaştırmıştır [4]. Elektrikli araç teknolojilerinde en önemli kavramlardan biri enerji yönetimidir. Enerji yönetimi kısıtlı batarya performansını en iyi şekilde kullanarak, elektrikli araçların seyahat mesafesini arttırmayı hedefler. Enerjinin etkin kullanılması gerekliliği, elektrikli tahrik sisteminin ana ögesi olan elektrik motoru verimini çok önemli bir hale getirmektedir [5-7]. Birçok araştırmacı ve üretici elektrik motorlarının verimlerinin artırılması ve kayıplarının en aza indirilmesi konusunu bir hedef haline getirmiştir [8]. Enerji tüketimi en az düzeyde olan tahrik sistemlerinin kullanılmasının başlıca iki faydasından söz edilebilir; aracın kat edeceği mesafenin artırılması ve km başına düşen birim enerji tüketiminin azalması [9].

Elektrik motoru imalatı yapan birçok firma ve elektrikli araç üretimine başlayan otomotiv üreticileri, yüksek verimli, yüksek momentli ve düşük hacim-ağırlık özelliklerine sahip olmalarından dolayı FDA motoru imalatına yönelmiştir. Manyetik malzemelerde ve motor topolojilerindeki gelişmelerle birlikte sürekli mıknatıslı fırçasız motor tasarımlarındaki ilerlemeler hızla devam etmektedir [8-12].

Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi tekerlek içi FDA motorlarda da verim, birbiri ile ilişkili birçok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerden birisi girdap akımlarına etki eden sargılardır [13]. Bu çalışmanın amacı, hafif elektrikli araç tahrik sistemlerinde kullanılan tekerlek içi FDA motorlarındaki sargı şekli değişiminin kayıplara ve dolayısıyla verime etkisinin incelenmesidir. Bu çalışmada üzerinde durulan yapı, elektrikli motosiklet ve hafif elektrikli taşıtlar gibi araçların tahrik sistemlerinde çoğunlukla tercih edilen 2,5 kW gücünde, 150 V bara geriliminde ve 900 d/dk devir sayısına sahip tekerlek içi bir FDA motorudur. Belirtilen bulguların çözümlenmesi için çeşitli sargı yapılarının SEY tabanlı yazılımla (ANSYS Electronics Desktop) analizleri yapılmış, elde edilen sonuçlara göre tasarlanan motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. TEKERLEK İÇİ FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIM ÇALIŞMASI (DESIGN STUDY)

Çalışma konusu olan motor için, dünyada yenilenebilir enerji araçları konulu yarışmalarda, özellikle güneş arabası

yarışlarında ve hafif elektrikli araçlarda (iki ve üç tekerlekli motosiklet, üç tekerlekli taşıma aracı vb.) kullanılan tahrik sistemi ölçülerine bağlı kalınmış, bu araçlardaki tekerlek yapısı ölçüt olarak alınmıştır. Tasarım çalışmasına başlamadan önce belirlenen tekerlek içi FDA motoru performans gereksinimleri ve mekanik kısıtları Tablo 1’de verilmiştir. Motorun yerleştirileceği tekerlek yapısı belirli olduğu için motor tasarım çalışması, belirli olan hacimsel özelliklerden hareketle en iyi performansı elde etmeye yöneliktir.

Tablo 1. Tekerlek içi FDA motoru tasarım çalışması başlangıç değerleri
(Initial design values of in-wheel BLDC motor)

Parametreler	Değer
Anma Gücü [W]	2500
Anma Gerilimi [V]	150
En Büyük Araç Hızı [km/s]	100
En düşük Araç Ağırlığı [kg]	250
Tekerlek Çapı [mm]	320
Stator Dış Çapı [mm]	239,8
Rotor Dış Çapı [mm]	273
Rotor Uzunluğu [mm]	30

En iyi performansın elde edilmesine yönelik olarak moment ifadesinin iyi irdelenmesi gerekmektedir. Üç fazlı yüzey mıknatıslı FDA motoru için elektromekanik moment ifadesi Eş. 1’de verildiği gibidir.

$$T_e = \frac{3}{2} p \cdot \psi_m \cdot i_q \quad (1)$$

Eşitlikte p çift kutup sayısı, ψ_m sürekli mıknatıs halkalanma akısı ve i_q q-ekseni akımıdır. Mıknatıs akısının yüksek olması için sürekli mıknatısın kalıcı mıknatıslık (remanence) ve gideren alan şiddeti (coercivity) değerleri yüksek olmalı, ayrıca hava aralığında uygun bir manyetik akı yoğunluğu oluşturmak için ferromanyetik malzemenin de manyetik kalitesinin yüksek olması gerekmektedir.

Fırçasız doğru akım motorlarında moment ifadesi Eş. 1’de verilen denklemin özel bir şekli olarak aşağıda belirtilen eşitlikler ile verilir.

$$T_e = 4 \cdot N \cdot B_g \cdot l \cdot r \cdot I_a \quad (2)$$

$$T_e = k_T \cdot I_a \quad (3)$$

$$k_T = 4 \cdot N \cdot B_g \cdot l \cdot r \quad (4)$$

Eşitlikte N bir faz sarım sayısı, B_g hava aralığı akı yoğunluğu, l motor eksenel uzunluğu, r hava aralığı yarıçapı ve I_a endüvi akım değeridir.

$$E = e_a - e_b = 4 \cdot N \cdot B_g \cdot l \cdot r \cdot I_a \omega_m \quad (5)$$

Burada ω_m motor mil açılmal hızıdır. Motor mil momenti ise;

$$T_m = T_e - T_{mk} \quad (6)$$

Eşitlikte T_{mk} mekanik kayıplardır. Verim değeri ise;

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_{cu} + P_{fe} + P_{pec} + P_{mk}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{P_m}{U \cdot I} \quad (8)$$

Burada P_m mil gücü, P_{cu} bakır kayıpları, P_{fe} demir kayıpları, P_{pec} güç elektroniği kayıpları ve P_{mk} mekanik kayıplardır.

Hesaplamalar Ansys Maxwell RMxprt yazılımı ile yukarıda belirtilen eşitlikler uyarınca yapılmıştır. Mekanik kayıplar deneysel olarak belirlenerek hesaplama algoritmasına katılmış ve daha doğru sonuçların alınmasını sağlanmıştır. Mekanik kayıplar motorun dışarıdan başka bir motor ile döndürülmesi ile belirlenmiştir.

Bu çalışmada belirlenen ve Tablo 1’de verilen başlangıç değerlerinin yanında motor devri, motor akımı ve nominal moment değerleri hesaplanmıştır.

$$v = \omega \cdot R_t \cdot 0,32 \quad \omega = 100 \frac{1000}{3600} \Rightarrow \omega = 86,8 \text{ s}^{-1}$$

$$86,8 = \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow n \cong 830 \text{ d/dk} \quad (9)$$

Burada sırasıyla v , w ve R_t ; motor hızı, açısal hız ve tekerlek çapıdır. Hesap sonucunda motor devrinin 900 d/dk olmasına karar verilmiştir. Buna göre motor akımı;

$$P_N = 2500 \text{ W}, \quad P_e = \frac{2500}{0,95} \Rightarrow P_e = 2631 \text{ W}$$

$$P = U \cdot I \cdot 2631 = 150 \cdot I \Rightarrow I \cong 17,5 \text{ A} \quad (10)$$

Buarada P_N motorun anma gücü, P_e motorun elektriki gücüdür. Motorun momentini ise;

$$T = \frac{P_N}{\omega} \quad T = \frac{2500}{2\pi \frac{900}{60}} \Rightarrow T = 26,5 \text{ Nm} \quad (11)$$

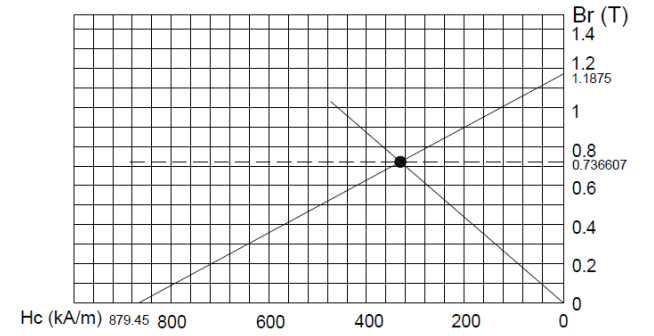
Elektrik motorları için verimin en önemli göstergelerinden biri; akım başına en yüksek moment (MTPA - Maximum Torque Per Amper) olarak adlandırılan ve olabilecek en düşük akımla en yüksek momentü üretmeyi ifade eden kavramdır. Bu değer yüksek olması bakır kayıplarının ve motor ısınmasının düşük olduğunu vurgular. MTPA değerinin yüksek olabilmesi için mıknatıs özgül değerlerinin ve ferromanyetik malzeme (motor sacı) kalitesinin yüksek olması gerekir. Bu nedenle, yüksek verimli ve yüksek performanslı bir tasarım için elde edilebilecek en kaliteli malzemeler sağlanmalıdır. Çalışmada, yüksek moment üretimini sağlayacak olan malzeme araştırmaları yapılmıştır. Yumuşak manyetik malzeme ve sürekli mıknatıs üretimi yapan firmaların kataloglarında yer alan bütün malzemelerin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken malzemelerin aşağıda belirtilen özellikleri göz önüne alınmıştır:

- BH eğrisi

- Mıknatıslık kaybı (demagnetisation)
- Isıl etki
- Hacim ve ağırlık
- Toplam demir kayıpları
- Maliyet

Belirtilen özelliklerin irdelenmesiyle bu çalışmada kullanılan tekerlek içi FDA motoru stator ve rotorunu oluşturan malzeme seçimleri gerçekleştirilmiştir. Bu seçimi yapabilmek için benzetim çalışmaları yapılmış ve benzetim çalışması sırasında dış momenti etkisi, iletken akım yoğunluğu, çıkış gücü ve moment değeri incelenmiştir. Bu incelemelerle birlikte önceki çalışmaların sonuçları da göz önünde bulundurulmuştur [14]. Bu verilere ilave olarak malzemenin piyasadan temin edilebilirliği ve maliyette eklendiğinde, stator malzemesi olarak M27_26G ve sürekli mıknatıs malzemesi olarak NdFeB_N38H_80C’nin çok daha iyi bir sonuç elde edileceği yargısına ulaşılmıştır. NdFeB_N38H_80C sürekli mıknatısları yüksek güç ve yüksek artık mıknatıslılığı giderici kuvvet etkilerine sahip manyetik özelliklere sahip oldukları için bu çalışmanın hedeflerine ulaşmasında büyük etken olacağı düşünülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan NdFeB_N38H_80C sürekli mıknatısının B_r kalıcı mıknatıslık değeri 1,1875 T ve gideren alan şiddeti 879,45 kA/m değerindedir [15]. Yüksüz durumdaki mıknatısın manyetik akı yoğunluğu 0,736607 T değerindedir. Bu veriler yardımıyla çalışmada kullanılan sürekli mıknatısın çalışma noktası Şekil 1’de belirtilen kesişim noktasına çok yakın bir yerde olduğu belirlenmiştir.

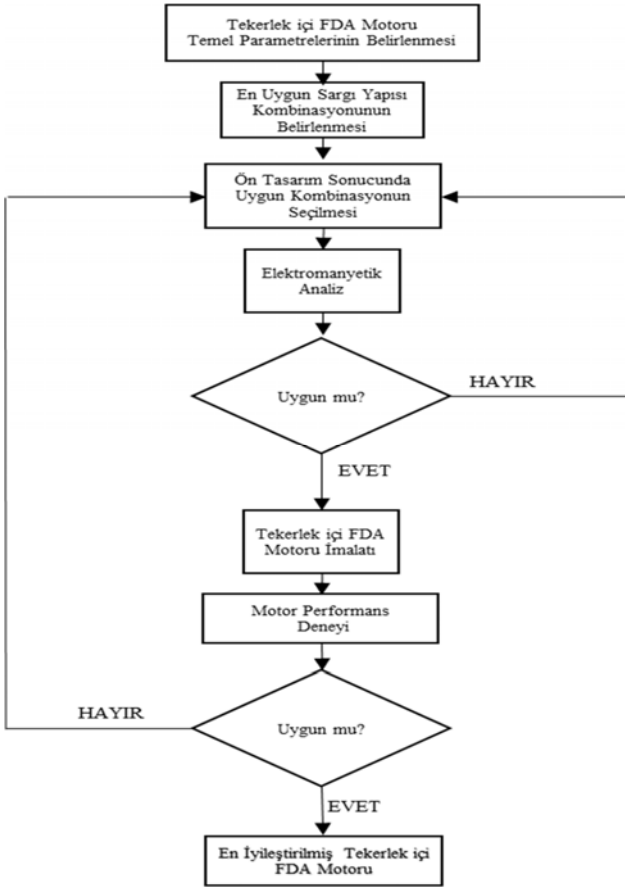


Şekil 1. NdFeB_38H mıknatısının çalışma noktası (Working point for NdFeB_38H)

Tasarım başlangıç ölçütü olarak öncelikle Tablo 1’de belirtilen maddeler göz önünde tutulurken diğer taraftan tasarım analiz çalışmalarında çıkış gücünün değeri temel alınmıştır. Motorun özel bir zorlamalı soğutmasının olmaması ve kalkış, hızlanma durumlarındaki ani ısınmalar da düşünüldüğünde, motor sürekli çalışma sıcaklığının 90°C civarında olması düşünülmüştür. Ayrıca uygulama deneyimlerinden hareketle hava aralığının 1 mm olması hedeflenmiştir. Sargıların yerleşimi de önemli bir sorundur. Maksimum stator oluk doluluk oranı, pratik sonuçlar da göz önünde tutularak %70 alınmıştır. Kuşkusuz dikkörtgen kesitli iletkenlerle veya sargılara yüksek düzeyde preslemeler yapılarak daha yüksek doluluk oranları elde

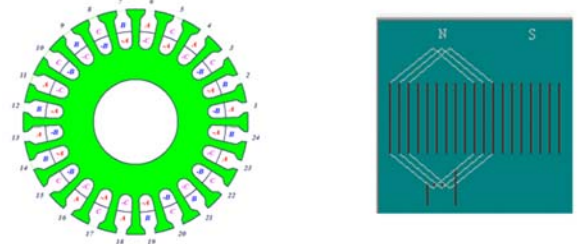
edilebilir. Ancak bilindiği gibi yuvarlak kesitli iletkenlerin piyasadan uygun fiyatla bulunabilme durumu bulunmaktadır ve özel tasarımlar- üretimler dışında dikdörtgen kesitli iletkenler çok kullanılmamaktadır. Doluluk oranını arttırmak için çeşitli sıkıştırma kuvvetleri uygulamak ise çoğu kez iletken yalıtımlarının bozulması ve sargının kısa devre dayanımının azalması ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca bu tip teknikler sargının ısı dağılımını önemli ölçüde kötüleştirmektedir. Parçalı stator kullanılarak sargıların stator parçalarına sarılıp daha sonra birleştirilerek stator yapısının oluşturulması gibi uygulamalar da vardır ancak bu özellikle yüksek maliyet ve özel üretim teknikleri gerektirmektedir. Tasarlanacak motorun ilave bir soğutma sistemine sahip olmayacağı, doğal soğutmalı olacağı düşünüldüğünde, iletken akım yoğunluğunun 4 ile 6 A/mm² arasında olması uygundur. Akım yoğunluğunun motordan yüksek moment talep edildiği durumlarda artmasına karşın, elektrikli araçların kullanım koşulları nedeniyle, motor çoğu kez anma gücü ve altında çalışacağından akım yoğunluğu uygun değerlerde olacaktır.

Hafif elektrikli araç tahrik sisteminde kullanılan tekerlek içi FDA motorlarındaki sargı şekli değişiminin verime etkisinin belirlenmesi Şekil 2’de verilen akış diyagramı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

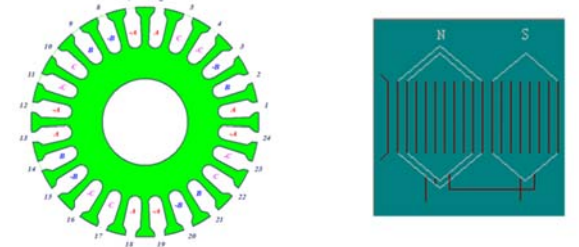


Şekil 2. Tekerlek içi FDA motoru tasarım akış diyagramı (Design flow chart of in-wheel BLDC motor)

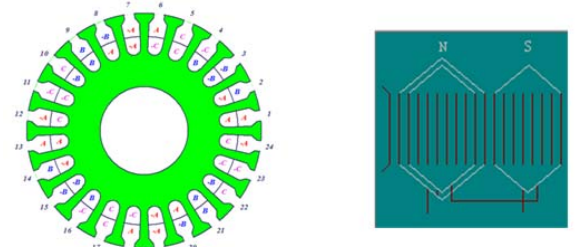
Tekerlek içi FDA motorlarındaki farklı sargı tiplerine yönelik tasarım çalışması için hafif elektrikli araçların tahrik sistemlerinde sıklıkla kullanılan gerek araştırmacılar gerekse imalatçılar tarafından tercih edilen sargı şekillerinden Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’de gösterilen çift katmanlı-yarım kalıp, tek katmanlı-tam kalıp ve çift katmanlı-tam kalıp sargılı yapılar kullanılmıştır. Sargı yapılarından bağımsız olarak tasarım çalışması boyunca, pratik uygulamalara uygun olarak, oluk doluluk oranı %60-%70 arasında tutulmuştur.



Şekil 3. Tam kalıp - konsantrik sargılı (Double layer – concentrated winding)



Şekil 4. Yarım kalıp - konsantrik sargılı (Single layer – concentrated winding)



Şekil 5. Tam kalıp - dağıtılmış sargılı (Double layer – distributed winding)

Bu sargı yapılarını kullanarak ve daha önceden belirtilen ön koşullar dikkate alınarak oluşturulan tasarımların ANSYS Electronics Desktop yazılımıyla yapılan benzetim çalışması sonucunda Tablo 2’de verilen değerlere ulaşılmıştır. Yapılan benzetim çalışmasında manyetik devre doyumlari göz ardı edilmiş, bütün faz sargılarının direnci, öz ve karşılıklı endüktansı eşit ve sabit olarak alınmıştır.

Yarım kalıp (single layer) sargılarda tüm oluk bir sargı ile doldurulur, bu durumda konsantrik sargılı motorların endüktans değerleri yüksek, sargı direnci değerleri düşük olmaktadır. Tam kalıp (double layer) sargılarda, bir oluk iki

Tablo 2. Farklı sargı tiplerine göre motor performans değerleri (Motor performance values for different winding types)

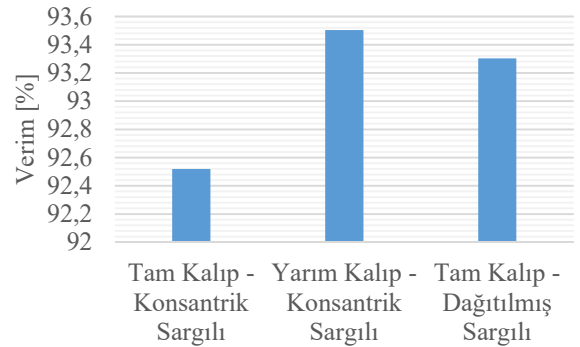
Sargı Tipi	Konsantrik		Dağıtılmış	
	Tam Kalıp - Sargılı	Yarım Kalıp - Sargılı	Tam Kalıp - Sargılı	Dağıtılmış Sargılı
Diş Momenti [Nm]:	0,59146	0,59146	0,59146	0,59146
Ortalama Giriş Akımı [A]:	18,014	17,8251	17,8628	17,8628
Endüvi Akımı Efektif Değeri [A]:	15,2529	15,8681	15,1442	15,1442
Endüvi Isıl Yük [A^2/mm^3]:	73,8767	79,9564	72,8283	72,8283
Özgül Elektrik Yükü [A/mm]:	17,979	18,7042	17,851	17,851
İletken Akım Yoğunluğu [A/mm^2]:	4,10906	4,27479	4,0798	4,0798
Sürtünme ve Rüzgâr Kayıpları [W]:	28,5494	22,7484	24,8288	24,8288
Çekirdek Demir Kaybı [W]:	109,884	81,9875	91,7919	91,7919
Endüvi Bakır Kaybı [W]:	63,6953	68,9371	62,7914	62,7914
Toplam Kayıp [W]:	202,129	173,673	179,412	179,412
Çıkış Gücü [W]:	2499,98	2500,1	2500,01	2500,01
Giriş Gücü [W]:	2702,11	2673,77	2679,43	2679,43
Verim [%]:	92,5196	93,5046	93,3041	93,3041
Nominal Hız [min^{-1}]:	1022,5	816,255	890,352	890,352
Nominal Moment [Nm]:	23,3478	29,2484	26,8134	26,8134
Moment dalgalanması [%]	9,1	8,9	15,1	15,1
Kilitli Rotor Momenti [Nm]:	665,784	740,687	721,523	721,523
Kilitli Rotor Akımı [A]:	820,299	820,299	820,299	820,299
Toplam Motor Ağırlığı [kg]:	6,54098	6,54098	6,54098	6,54098

farklı faz sargısı paylaşmakta ve sargı endüktansı düşük, sargı direnci az da olsa yüksek değerdedir.

Tasarımlarda, diş momentini (cogging torque), motor toplam ağırlığı ve kilitli rotor akım değerleri değişmemektedir. Bununla birlikte çekirdek demir kayıplarının tam kalıp - konsantrik sargılı yapıda yüksek olduğu ve yarım kalıp - konsantrik sargılı yapıda en düşük olduğu, endüvi bakır kayıplarının yarım kalıp - konsantrik sargılı yapıda yüksek olduğu ve tam kalıp - dağıtılmış sargılı yapıda en düşük olduğu, sürtünme ve rüzgâr kayıplarının dolaylı olarak etkilendiği, tam kalıp - konsantrik sargılı yapıda yüksek olduğu ve yarım kalıp - konsantrik sargılı yapıda en düşük olduğu görülmüştür. Toplam kayıplara bakıldığında tam kalıp - konsantrik sargılı yapının en yüksek değere sahip olduğu ve yarım kalıp - konsantrik sargılı yapının en düşük değere sahip olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte verim değişiminin sargı şekillerine göre değişimi ise Şekil 6'da görüldüğü gibidir. Yarım kalıp - konsantrik sargı şeklinin hafif elektrikli araçların tahrik sisteminde kullanılan tekerlek içi FDA motorlarının hedeflenen yüksek verim değerinin elde edilmesi için kullanılabilceği yargısına ulaşılmıştır. Bununla birlikte tam kalıp konsantrik sargılar, sargı dönüş uzantıları düşük olduğu için ince yapılı radyal akılı motorlarda tercih edilirler [16].

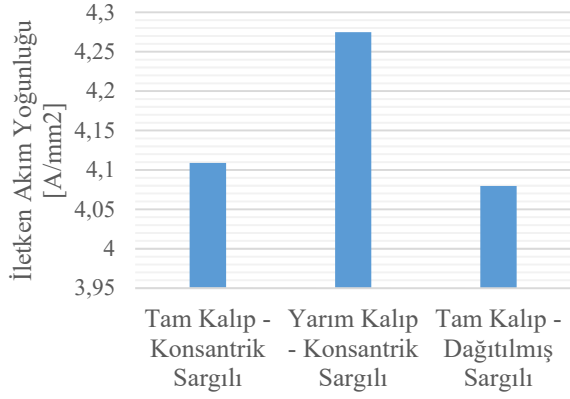
Doğal olarak soğuyan motor için değişik sargı tiplerine göre akım yoğunluğu değişimi Şekil 7'deki gibidir. Buradan yarım kalıp, konsantrik sargılı yapının diğer sarım şekillerine göre daha yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bütün sarım şekillerinin doğal soğutma için

gerekli olan 4-6 A/mm^2 değerleri arasında değere sahip olduklarından dolayı doğal soğutmanın uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

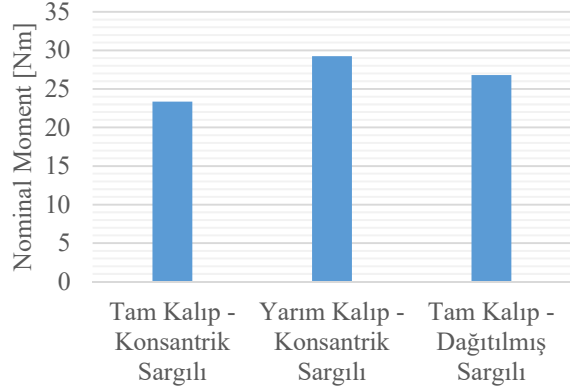


Şekil 6. Sargı Yapısının Verime etkisi (Effect of winding structure on motor efficiency)

Elektrikli araçlar uygulamalarında moment üretimi motorun en önemli performans değerlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Tekerlek içi FDA motoru sargı şekli değişiminin momente etkisi Şekil 8'de görüldüğü gibidir. Yarım kalıp-konsantrik sargılı yapının 29,2484 Nm moment üreterek diğer sargı şekillerine göre daha fazla moment oluşturduğu görülmüştür. Şekil 9'da değerlendirmeye alınan tasarımların, SEY analizi ile elde edilen normalize edilmiş elektromanyetik momentlerinin elektriksel açı ile değişimleri verilmiştir. Tam kalıp ve yarım kalıp konsantrik sargıların moment dalgalanmaları birbirine çok yakındır.



Şekil 7. Sargı Yapısının İletken Akım Yoğunluğuna etkisi (Effect of winding structure on current density)



Şekil 8. Sargı Yapısının Nominal Momente etkisi (Effect of winding structure on motor torque production)

Buna karşın tam kalıp dağıtılmış sargının moment dalgalanması daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 2’de görülen tasarım çalışması sonuçlarından yarım kalıp-konsantrik sargılı yapının hedeflenen prototip yapısına daha uygun olacağını anlaşılmakta ve Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da görülen sonuçlarında bunu destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Ayrıca toplam motor ağırlığında değişim meydana getirmeden moment değerinde diğer sargı

yapılarında olduğu gibi düşme olmadığı gibi, toplam kayıp miktarındaki düşmeyle birlikte verim değerinin de yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. En iyi olarak belirlenen motorun SEY ile manyetik analizi yapılmıştır. Şekil 10’da üretilecek olan motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Analizden de anlaşılacağı gibi, motorda manyetik devresi neredeyse doymasız ve yüksek manyetik geçirgenlikle çalışmaktadır. Stator oluk dişi uçlarında bu değerler sınır değerler civarında olduğu görülmektedir.

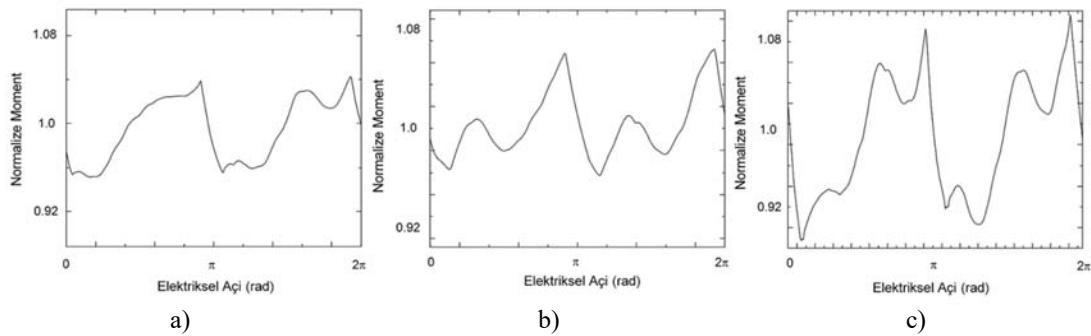
3. PERFORMANS DENEYİ (PERFORMANCE TEST)

En iyileştirilmiş parametrelere sahip olan yarım kalıp-konsantrik sargılı tekerlek içi FDA motorunun imalatı tamamlandıktan sonraki durumu Şekil 11’deki gibidir. Tasarım analizleri sonucunda imalatı yapılan tekerlek içi FDA motorunun performans deneylerinin yapılması amacıyla Şekil 12’de gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Montaj işlemi tamamlandıktan sonra; 2,5kW, 150V’luk tekerlek içi FDA motoru, AA güç kaynağı ve buna bağlı doğrultucu ile birlikte motor sürücüsü üzerinden beslenerek çalıştırılmıştır.

Böylece performans deneyi gerçekleştirilmiş, motor giriş akımı, bara gerilimi, hızı, momenti ölçülmüştür. Performans deneyinde motora yükleme yapılabilmesi için motor miline bağlı olan 3kW gücünde generatör kullanılmıştır. Kademeli olarak devreye giren bu yükler, üç fazlı doğrultucu üzerinden generatör çıkışına bağlıdır. Deney düşük yük değerinden yüksek yük değerine kadar farklı yük durumlarını kapsamakta ve bu şekilde dinamo fren momenti elde edilmiştir.

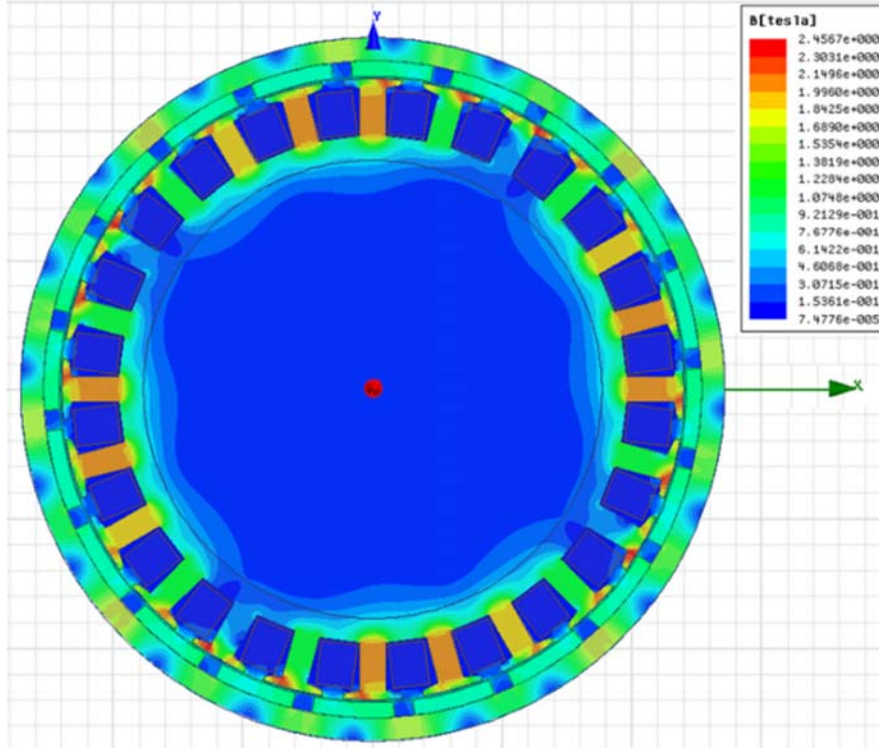
Böylece, değişen yük altında motorun performansı ölçülmüş ve motorun temel öz eğrileri çıkarılmıştır. Performans deneyi ile hedeflenen; sargı değişim sonuçlarıyla en iyileştirilmiş tasarım çalışması sonuçlarının, bu sonuçlara göre imalatı yapılmış tekerlek içi FDA motorunun farklı çalışma koşullarındaki davranışının birbirine olan yakınlığının belirlenmesidir.

Şekil 13’de görülen deney düzeneğindeki moment algılayıcısı tekerlek içi FDA motoru ve generatör milleri



Şekil 9. Elektromanyetik moment dalgalanmaları a) Tam Kalıp Konsantrik Sargılı b) Yarım Kalıp Konsantrik c) Tam Kalıp Dağıtılmış

(Electromagnetic torque ripples a) Double layer - concentrated winding b) Single layer concentrated winding c) Double layer - distributed winding)



Şekil 10. Tekerlek içi FDA motorunda manyetik akı yoğunluğu dağılımı (Magnetic Flux Density of in-wheel BLDC Motor)



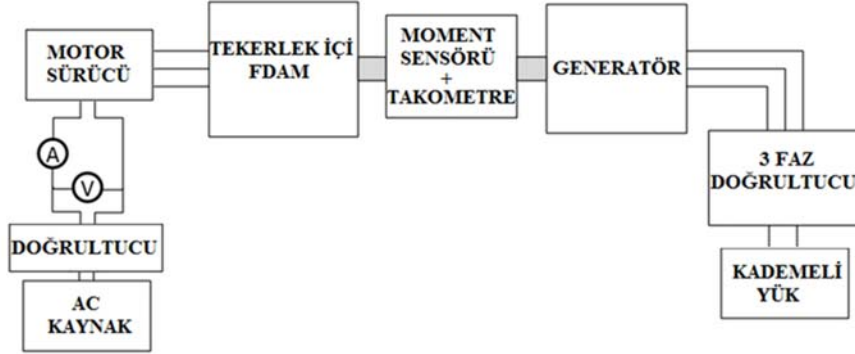
Şekil 11. Yarım kalıp-konsantrik sargılı tekerlek içi FDA motoru imalat resmi
(Completed in-wheel BLDC Motor with single layer – concentrated winding)

arasındadır. Bu algılayıcı ile anlık ve sürekli rejim moment değerleri ölçülmüş ve takometre üzerinden alınan motor hızı değerleri ile farklı yük durumlarındaki motor çıkış gücü bulunmuştur. Aynı esnada motor giriş akım ve giriş gerilim

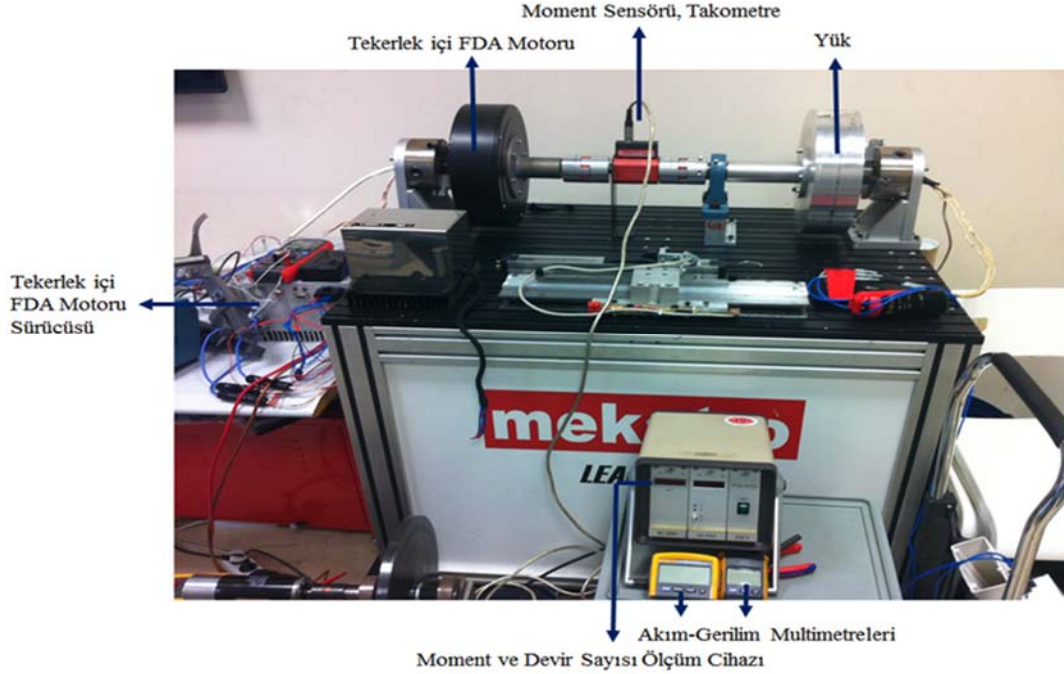
değerleri de akım-gerilim ölçerler üzerinden alınmış ve bu değerlerden giriş gücü hesaplanmıştır. Bu işlemlerin aynı anda ve yüksek doğrulukla yapılmasına dikkat edilmiş ve alınan sonuçların güvenilirliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Hız-verim ve giriş akımı-moment grafiklerinin, hesaplanan değerler ve performans testi sonuçlarına göre

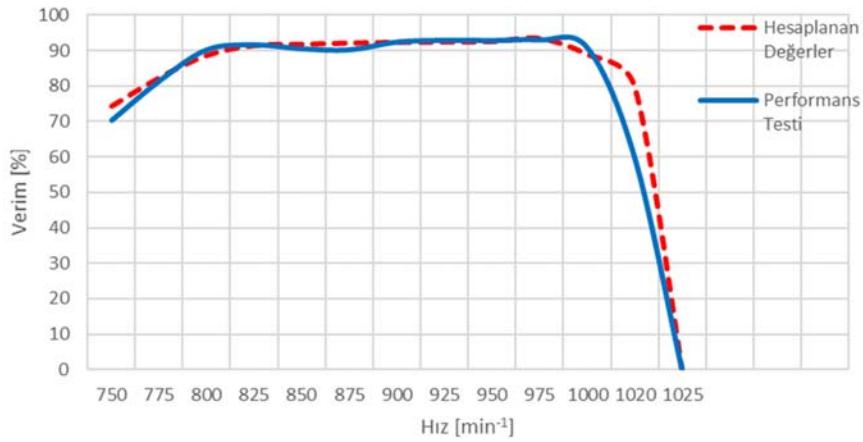
karşılaştırılması Şekil 14 ve 15’de verilmiştir ve birbiri ile oldukça uyumlu yargısına varılmıştır.



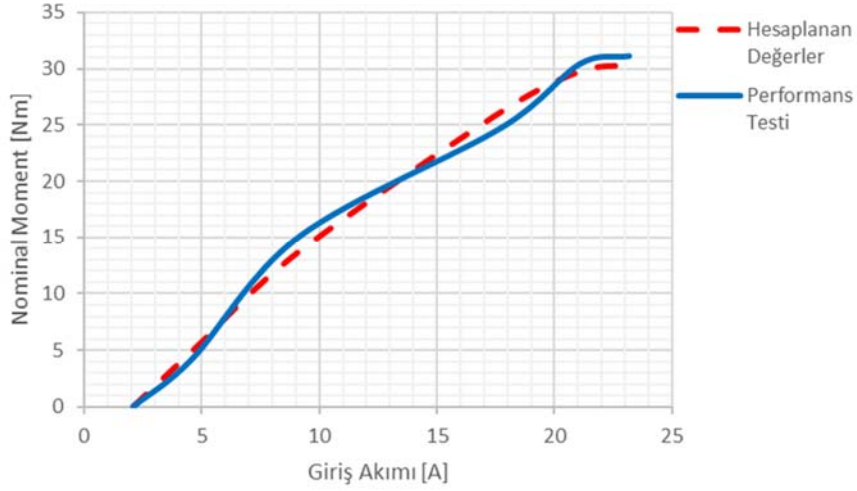
Şekil 12. Motor performans deneyi bağlantı şeması (Principal schema of motor test bed)



Şekil 13. Tekerlek içi FDA motoru performans deney düzeneği (In-Wheel BLDC motor performance test bed)



Şekil 14. Hız-Verim hesap ve performans testi karşılaştırma grafiği (Comparison of calculated and measured speed-efficiency curves)



Şekil 15. Giriş Akımı-Moment hesap ve performans testi karşılaştırma grafiği
(Comparison of calculated and torque-terminal current curves)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

B_g	: hava aralığı akı yoğunluğu
i_q	: q-ekseni akımı
l	: motor aksel uzunluğu
N	: bir faz sarım sayısı
P_{cu}	: bakır kayıpları
P_e	: motorun elektrikli gücü
P_{fe}	: demir kayıpları
P_m	: mil gücü
P_{mk}	: mekanik kayıplar
P_N	: motorun anma gücü
P_{pec}	: güç elektroniği kayıpları
p	: çift kutup sayısı
r	: hava aralığı yarıçapı
R_t	: tekerlek çapı
T	: motorun momenti
T_e	: hava aralığı momenti
T_m	: motor mil momenti
T_{mk}	: mekanik kayıplar
v	: motor hızı
w	: açılma hızı
w_m	: motor mil açılma hızı
ψ_m	: sürekli mıknatıs halkalanma akısı
η	: verim

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada hafif elektrikli araçların tahrik sisteminde kullanılan 2,5 kW gücünde ve anma giriş gerilimi 150V olan tekerlek içi FDA motorlarında farklı sarım yapısı kombinasyonları üzerine incelemeler yapılmıştır. Yarım kalıp - konsantrik sargılı yapının diğer sargı şekillerine göre gerek verim değeri gerekse moment değeri olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Tasarım çalışması sonucu elde edilen bu tasarımın prototipi imal edilmiştir. Bu prototipin performans testleri yapılmış ve hesaplanan değerler ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarım hesap sonuçları ve performans testi sonuçlarının birbiriyle büyük ölçüde

örtüştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Hafif elektrikli araçlarda kullanılan tekerlek içi FDA motorlarının imalat maliyetlerine etki eden önemli parametrelerden birisi de sarım işlemidir. Yarım kalıp - konsantrik sargı yapısının tam kalıp - dağıtılmış sargı yapısına göre işçilik ya da işlem maliyetinin daha ucuz olduğu bilinmektedir. Yarım kalıp - konsantrik sargı yapısının kullanılması sarım işçiliği maliyetini düşüreceğinden, hafif elektrikli araçların imalat maliyetlerine de etki eden bir parametre olarak düşünülmelidir. %100 yerli otomobil imal edilmesi ivme kazanmış olan ülkemizde, bu hedefin ilerleyen zamanda elektrikli otomobile yönelmesi kaçınılmazdır. Bu çalışmada elde edilen verilerin bu süreçte yararlı olacağı ve seri imalata dönük uygulamalara destek niteliği taşıdığı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FEN-C-DRP-110412-0096.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ustun O., Yilmaz M., Gokce C., Karakaya U., Tuncay R.N., Energy Management Method for Solar Race Car Design and Application, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami-USA, 804-811, 3-6 May, 2009.
2. Lee J.H., Kim D., Song J., Jung S., Kim Y., Design of 100kW Propulsion Motor for Electric Conversion Vehicle Based on Vehicle Driving Performance Simulation, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Busan-Korea (South), 412-416, 1-4, June, 2016.
3. Sarıkurt T., Balıkcı A., A Novel Energy Management System for Full Electric Vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 323-333, 2017.

4. Bouscayrol A., Boulon L., Hofman T., Chan C.C., Special Section on Advanced Powertrains for More Electric Vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 6 (3), 995 - 997, 2016.
5. Zarko D., Ban D., Lipo T.A., Analytical Solution for Cogging Torque in Surface Permanent-Magnet Motors Using Conformal Mapping, IEEE Transactions on Magnetics, 44 (1), 52-64, 2007.
6. Tuncay R.N., Ustun O., Yılmaz M., Gökce C., Karakaya U., Design And Implementation Of An Electric Drive System For In-Wheel Motor Electric Vehicle Applications, 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'11), Chicago- USA, 1-6, 6-9 September, 2011.
7. Demir U., Aküner M. C., Design and Optimization of in-Wheel Asynchronous Motor for Electric Vehicle, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 18-2, 1-21, 2018.
8. Zhao L., Ham C., Zheng L., Wu T., Sundaram K., Kapat J., Chow L., A Highly Efficient 200000 Rpm Permanent Magnet Motor System, IEEE Transactions on Magnetics, 43 (6), 2528-2530, 2007.
9. Markovic M., Hodder A., Perriard Y., An Analytical Determination of The Torque-Speed and Efficiency-Speed Characteristics of a BLDC Motor, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2009), California- USA, 168-172, 20-24 September, 2009.
10. Zhu S., Hu Y., Liu C., Wang K., Iron Loss and Efficiency Analysis of Interior PM Machines for Electric Vehicle Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65 (1), 114-124, 2018.
11. Zarko D., Ban D., Lipo T.A., Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in the Slotted Air Gap of a Surface Permanent-Magnet Motor Using Complex Relative Air-Gap Permeance, IEEE Transactions on Magnetics, 42 (7), 1828-1837, 2006.
12. Liu J., Gong C., Wu Z., Influence Research of Rotor Structure Parameters on the Performance of IPMSM, 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney-Australia, 1-5, 11-14 August, 2017.
13. Çınar M. A., Alboyacı B., Çürükova S. , Sönmez O., Yapıcı R., Calculation of Optimum Dimensions of Magnetic Shunt Elements to Reduce Stray Losses on Transformer Tank Walls, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1337-1346, 2017.
14. Çabuk A.S., Tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının en iyi tasarımı için yeni bir yaklaşım, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
15. Arnold Magnetic Technologies. Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets. <http://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/> . Yayın tarihi 2015. Erişim tarihi Ocak 15, 2018.
16. Senol S., Ustun O., Design and analysis of a sub-fractional slot concentrated winding BLDCM with unequal tooth widths, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 39 (1-4), 859-864, 2012.

