

Hafif Elektrikli Araçlar İçin Kullanılan Tekerlek İçi Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Farklı Oluk ve Kutup Sayısı Kombinasyonlarının Verim Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Investigation of Different Slot-Pole Combinations of An In-Wheel BLDC Motor for Light Electric Vehicle Propulsion

Ali Sinan Çabuk¹, Şafak Sağlam², Gürkan Tosun³, Özgür Üstün^{1,3}

¹Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
ascabuk@itu.edu.tr , oustun@itu.edu.tr

²Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi
ssaglam@marmara.edu.tr

³Mekatro Mekatronik Sistemler Ar-Ge Ltd. Şti
gtosun@mekatro.com

Özet

Bu çalışmada, hafif elektrikli araçların tahrik sisteminde kullanılan tekerlek içi fırçasız doğru akım (FDA) motorunun en iyileştirilmiş verim sonuçlarının eldesi için tasarımı gerçekleştirilmiştir. Farklı oluk-kutup sayısı kombinasyonları üzerine incelemeler yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda en iyileştirilmiş yapının prototipi imal edilmiş ve benzetim çalışması ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışması ve imalatı yapılan tasarım 2.5 kW gücünde ve bara gerilimi 150V olan dış rotorlu tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru için gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı yazılım kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tasarım sonuçları doğrultusunda motorun imalatı yapılmış ve sonrasında ise prototipin performans deneyleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarıyla benzetim sonuçları karşılaştırılarak en iyileştirme çalışmasının geçerliliği incelenmiştir.

Abstract

In this study, the optimum design of a BLDC motor which is used for in-wheel light electric vehicle propulsion is presented. The optimisation work is mainly based on different slot-pole numbers which give a substantial performance for that certain application. An outer rotor, 2.5kW, 150V BLDC motor which is widely implemented in light electric vehicle traction is selected. Finite Element Analysis (FEA) is of the target motor design is conducted for various slot-pole combinations. By using the captured design data, the optimised motor is manufactures and tested. The test and simulation results are compared in order to investigate the optimisation approach.

1. Giriş

Günümüzde gelişmiş bütün ülkelerde çevre kirliliğini önlemek ve artan fosil kaynaklı enerji tüketimini azaltmak amacıyla alternatif yollar aranmaktadır. Çevre dostu ulaşım çözümü bu yolların başında yer almaktadır. Bundan dolayı çok sayıda elektrikli, hafif elektrikli ve hibrit araçları yollarda görmek mümkündür. Bununla birlikte çoğu otomotiv üreticileri bu alandaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerini arttırmışlardır [1-3].

Elektrikli araç teknolojilerinde en önemli kavramlardan birisi enerji planlamasıdır ve dolayısıyla enerji verimli elektrik motorları önem arz etmektedir. Bu nedenle, elektrik motorlarının verimlerinin artırılması ve kayıplarının en aza indirilmesi öncelik verilmesi gereken bir hedef haline gelmiştir. Enerji tüketimi minimum olan tahrik sistemleri kullanılmasının başlıca iki faydasından söz edilebilir; aracın kat edeceği mesafenin artırılması ve km başına düşen birim enerji tüketiminin azalması. Bu hedefler doğrultusunda elektrikli araç üreticileri araştırma-geliştirme çalışmalarının bu alanda yoğunlaştığı görülmektedir [4-7].

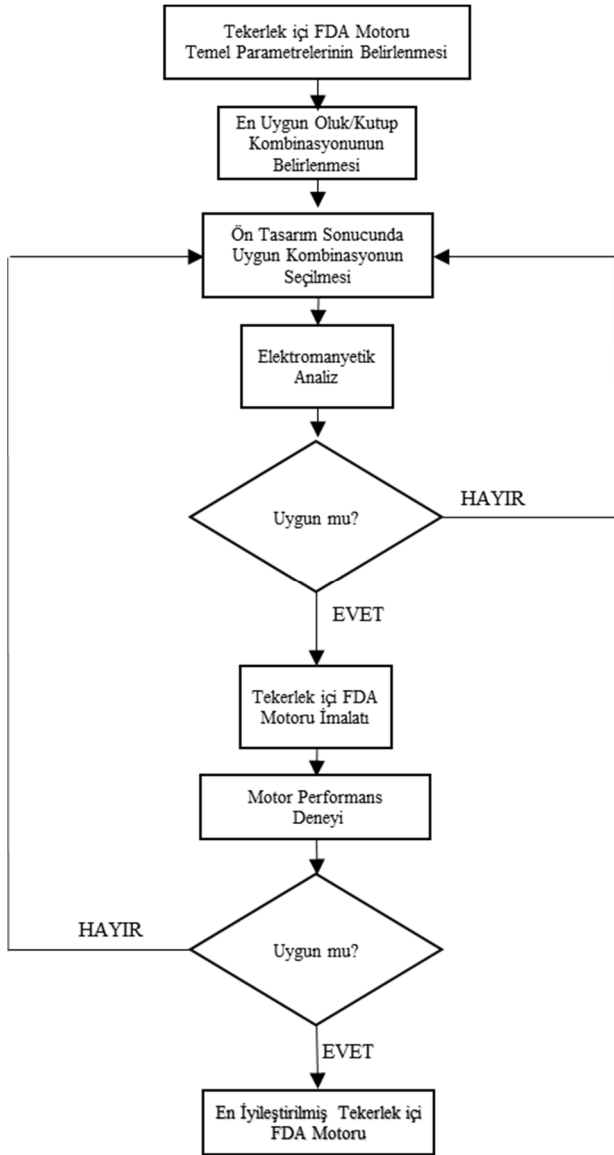
Elektrik motoru üretimi yapan birçok firma ve elektrikli araç üretimine başlayan otomotiv üreticileri, yüksek verimli, momentli ve düşük hacim-ağırlık yapısına sahip olması gibi olumlu özelliklerinden dolayı FDA motoru imalatına yönelmiştir. Ancak gelişen bir teknoloji olması, imalatla kullanılan malzemelerdeki yenilikler ve motor tasarımlarındaki gelişmelerin tam olarak neticelendirilememesinden dolayı hala tam anlamıyla kullanışlı ve gereksinimlere uygun motor tasarımlarının gerçekleştirilmesi sorunludur [7-10]. Ayrıca kullanım kolaylığı ve temiz bir ulaşım aracı olan hafif elektrikli araçlardada aynı durum söz konusudur.

FDA motorlarının verimlerine etki eden parametrelerden birisinin de oluk-kutup sayısı kombinasyonları olduğu bilinmektedir. Bu parametre üzerine yapılacak olan incelemeler

yüksek verimli motor ve km başına düşen birim enerji tüketiminin azalması sonuçlarını ortaya çıkaracaktır. Bu çalışmanın amacı hafif elektrikli araçlar için tekerlek içi FDA motorunun farklı oluk-kutup sayısı değişimlerinin kayıplara etkisinin nasıl olduğu ve verime etkisinin ne oranda olduğuna yönelik bulguların ortaya çıkarılmasıdır. Bu bulguların elde edilmesi için sonlu elemanlar tabanlı yazılımla benzetim çalışması yapılmış, tasarlanan motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Tekerlek içi FDA Motoru Benzetim Çalışması

Bu çalışma boyunca yapılan bütün süreç Şekil 1’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 1: Tekerlek içi FDA motorunun tasarım süreci

Tasarım başlangıç kriteri olarak Çizelge 1’de belirtilen parametreler göz önünde tutulurken diğer taraftan sistemin çıkış

gücünün sabit tutulması temel alınmıştır. Bunun yanında sistem çalışma sıcaklığının 90°C, stator oluk doluluk oranının %60-70 arasında, hava aralığının 1 mm, iletken akım yoğunluğunun 6 A/mm² nin altında olmasına dikkat edilmiştir.

Bu parametreler gözetilerek tekerlek içi FDA motoruna uygun olan 24/18, 24/20, 36/24, 36/28 ve 36/30 oluk/kutup sayısındaki farklı tasarımların verim üzerine etkileri incelenmiştir. SEY karmaşık elektromanyetik dağılımı hesaplarını ve bu tip devrelerdeki lineer özellik göstermeyen sistem parametrelerinin çözümünde kullanılan bir metottur [11,12]. Bu çalışmada bahsedilen benzetim çalışmalarında SEY tabanlı olarak çalışan Ansoft Maxwell Rmxprt yazılımı ile yapılmıştır ve Çizelge 2’deki sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 1: Tekerlek içi FDAM benzetim çalışması tasarım parametreleri

Parametreler	Değer
Güç [W]	2500
Gerilim [V]	150
Anma Hızı [min ⁻¹]	900
Min Araç Ağırlığı [kg]	350
Tekerlek Çapı [mm]	320
Stator Malzemesi	M27_26G
Sabit Mıknatıs	NdFeB38

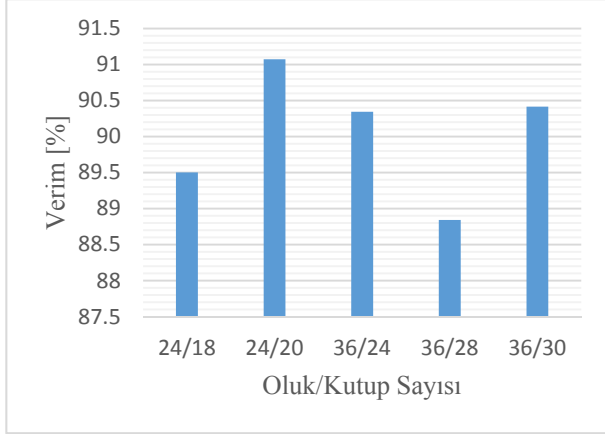
Çizelge 2: Farklı oluk/kutup sayısı benzetim sonuçları

Oluk/Kutup Sayısı	24/18	24/20	36/24	36/28	36/30
Ortalama Akım [A]	18,622	18,297	18,448	18,762	18,435
Akım Yoğunluğu [A/mm ²]	4,086	3,903	3,949	4,224	3,857
Sürtünme ve Rüzgar Kayıpları [W]	36,791	37,007	34,751	28,049	30,815
Demir Kaybı [W]	172,7	175,87	190,6	165,46	195,6
Bakır Kaybı [W]	83,765	32,146	41,838	120,52	38,649
Toplam Kayıp [W]	293,26	245,02	267,19	314,03	265,06
Çıkış Gücü [W]	2500,1	2499,5	2500	2500,2	2500,2
Giriş Gücü [W]	2793,3	2744,5	2767,1	2814,3	2765,2
Verim [%]	89,502	91,072	90,344	88,842	90,415
Nominal Hız [min ⁻¹]	1313,3	1320,9	1241,6	1004,8	1102,7
Nominal Moment [N.m]	18,178	18,071	19,228	23,762	21,651

Farklı oluk/kutup sayısı oranına sahip tasarımların incelenmesi sırasında her bir tasarım için Çizelge 1’deki değerlerin aynı kalmasının dışında oluk yapısının, mıknatıs geometrisinin,

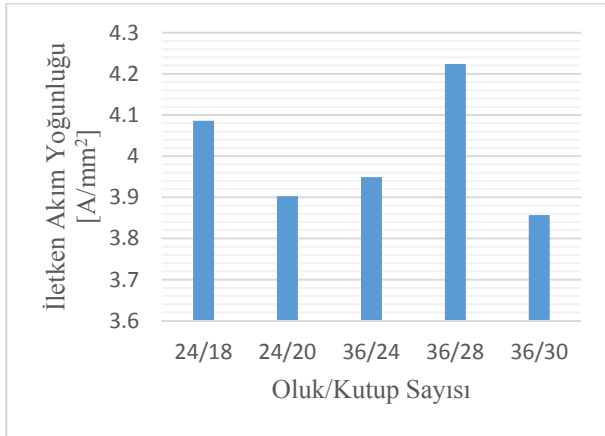
hava aralığının, oluk doluluk oranının, sürtünme ve rüzgar kayıplarının aynı olmasına dikkat edilmiştir.

Bu çalışmanın temel hedefini oluşturan toplam kayıp değeri ve buna bağlı olarak verim değerlerinin oluk-kutup sayısı değişimiyle etkileşimi Şekil 2’de görülmektedir. Endüvi bakır kaybı değerlerinin 36-oluk/28-kutup sayısı olan tasarımda çok yüksek çıktığı, çekirdek demir kaybı değerinin ise 36-oluk/30-kutup sayısı olan tasarımın diğerlerine göre kötü sonuçlar verdiği elde edilmiştir.



Şekil 2: Oluk-Kutup sayısı değişiminin verime etkisi

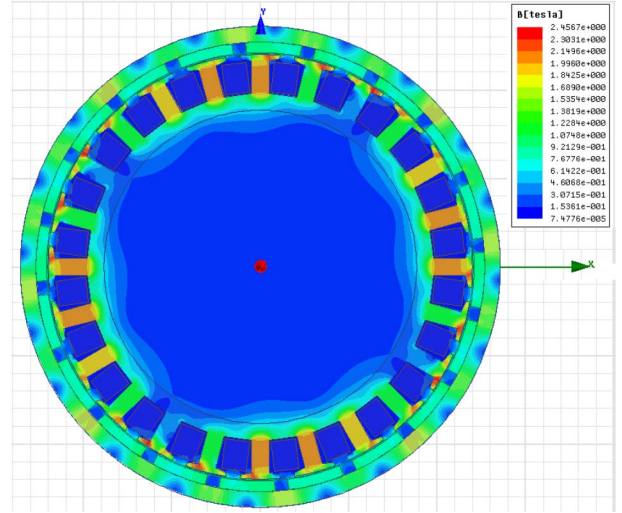
Elektrik motorları için önemli parametrelerden biri olan ve motorun doğal soğutmayla veya ekstra bir soğutma ihtiyacı olduğunu belirleyen endüvi iletkan akım yoğunluğu değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Burada bütün oluk-kutup sayısı kombinasyonlarının ilave soğutma yapılarına ihtiyaç duymadığı görülmektedir.



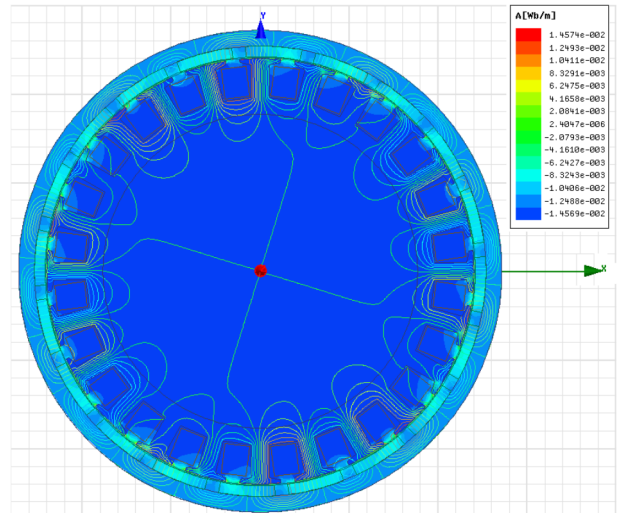
Şekil 3: Oluk-Kutup sayısı değişiminin endüvi iletkan akım yoğunluğuna etkisi

Çizelge 2’deki benzetim sonuçları incelendiğinde gerek endüvi iletkan akım yoğunluğu değerlerinden gerekse verim sonuçlarından 24-oluk/20-kutup sayısına sahip tasarımın diğer tasarımlara göre ön plana çıktığı görülmektedir.

Çalışmanın bu safhasından sonra 24-oluk/20-kutup sayısına sahip tasarımın elektromanyetik analizleri yapılmış ve Şekil 4 ve 5’de manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve manyetik akı çizgisi dağılımı sonuçlarına ulaşılmıştır.



Şekil 4: Tekerlek içi FDA motoru iki boyutlu manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 5: Tekerlek içi FDA motoru iki boyutlu manyetik akı çizgileri dağılımı

Şekil 4’de belirtilen tekerlek içi FDA motorunun iki boyutlu manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, manyetik akı dağılımının sınır değerleri aşmayan bir yapıya sahip olduğu, sadece stator diş uçlarında sınır değere yaklaşıldığı ve 2T civarında olduğu görülmüştür. Şekil 5’de verilmiş olan manyetik akı çizgilerinin stator dişleri ve sırt demirinde düzgün bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

3. Tekerlek içi FDA Motoru Prototip Üretimi

Çalışmanın bu kısmında, SEY tabanlı Ansoft Maxwell Rmxprt yazılımları kullanılarak benzetim çalışması yapılmış ve en iyileştirilmiş oluk-kutup sayısına sahip olan 24-oluk/20-kutuplu tekerlek içi FDA motoru tasarımının imalatı gerçekleştirilmiş ve tasarımın deney düzeneği ile testleri yapılmıştır.

Stator imalatı için benzetim çalışmaları sonucunda karar verilen 0,5 mm kalınlığındaki M27_26G silisli sac plakalara, tel erozyon yöntemi kullanılması durumunda kenarlarında bozucu

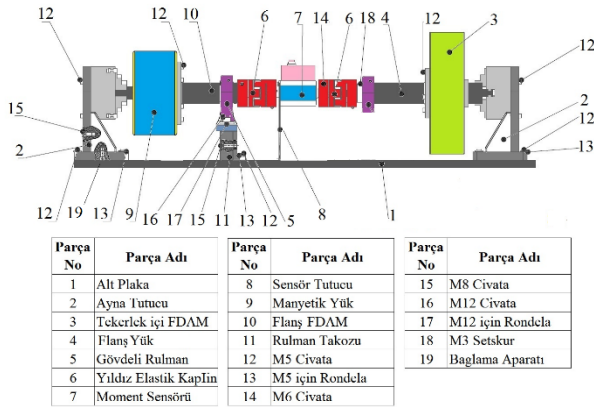
etki oluşturması muhtemel olan saçaklanma oluşacağı için lazer kesim yöntemi uygulanmıştır. 56 adet imalatı yapılan bu sac dilimleri pimler yardımı ile paketlenmiştir. Statorun paketlenen sac dilimleri üzerine sarım işlemi tamamlandıktan sonraki durumu şekil 6'da görülmektedir.



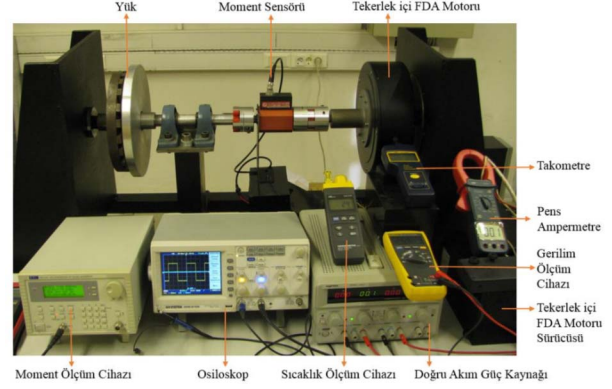
şekil 6: 24-oluk/20-kutuplu tekerlek içi FDA motoru imalat resmi

Stator oluklarına yerleştirilen iletkenler 2,2 mm² lik bakır iletkenlerdir. Stator oluk doluluk oranının benzetim çalışmalarında n grldği gibi %65'in altında olması iletken sarımların stator oluklarından taşmamasına faydalı olduğu gözlemlenmiştir.

Tekerlek içi FDA motoru, motor kontrol devresi ve lme aletleri şekil 7'de verilen deney düzeneği şemasına uygun olarak şekil 8'deki gibi bağlanmıştır. Test düzeneğinde yük olarak kade me ayarlı manyetik etkili yk mekanizması kullanılmıştır. Motor kontrolünde ise Sayısal İşaret İşleyici (DSP) tabanlı bir sistem kullanılmıştır. Bu sistem hassaslık, performans ve elektriksel gürültüyü filtreleme yönünden üstün özellikleri olduğundan dolayı tercih edilmiştir.

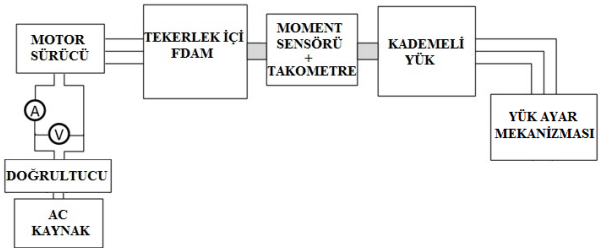


şekil 7: Kurulan deney düzeneğinin şeması



şekil 8: Deney düzeneği

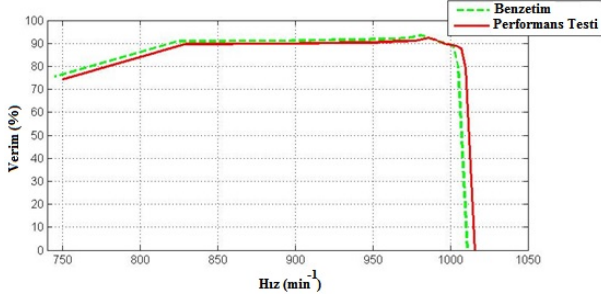
Tekerlek içi FDA motorunun performans deneylerinin yapılması amacıyla şekil 9'da gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır. 2,5 kW, 150V'luk tekerlek içi FDA motoru, AA güç kaynağı ve buna bağlı doğrultucu ile birlikte motor sürücüsü üzerinden PWM uygulanarak enerjilendirilmiştir. Performans deneylerinde motor giriş akımı, bara gerilimi, hızı, momentı ölçülmüştür. Performans deneyini gerçekleştirebilmek için tekerlek içi FDA motoru, kademe ayarlı manyetik etkili yk mekanizmasına bağlanmıştır. Düşük yük değerinden başlayıp yüksek yük değerine kadar farklı yük durumları için dinamo fren momenti elde edilmiştir. Böylece, değişen yük altında motorun performansı ölçülmüş ve motorun temel öz eğrileri çıkarılmıştır. Performans deneyi ile hedeflenen, imalatı yapılan tekerlek içi FDA motorunun farklı çalışma koşullarındaki davranışının ve öngörülen tasarım değerlerine yakınlığının belirlenmesidir. Yüklemeye başlamadan önceki motorun boştaki hızın 1016 min⁻¹, boştaki giriş akımının ise 2,1 A olduğu görülmüştür.



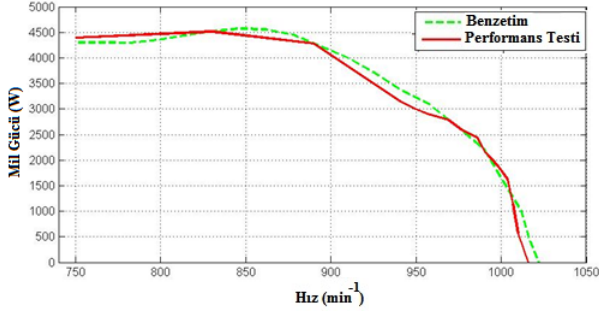
şekil 9: Motor performans deneyi bağlantı şeması

Deney düzeneği üzerinde bulunan tekerlek içi FDA motoru ve manyetik yk milleri arasında yerleştirilen moment sensörü üzerinden alınan anlık moment değerleri 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 alınmış ve bu değerlerden giriş gücü hesaplanmıştır. Bu işlemlerin aynı anda yapılmasına dikkat edilmiş ve alınan sonuçların güvenilirliğinin arttırılması hedeflenmiştir.

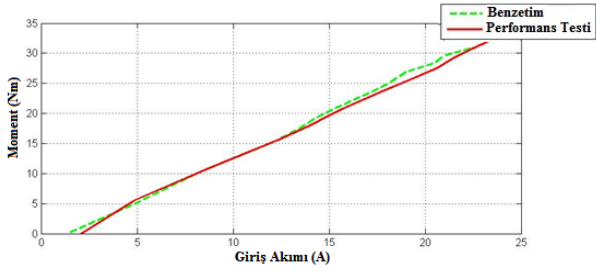
Performans testi sonuçlarıyla benzetim sonuçlarının şekil 10,11,12'de grldği gibi birbiriyle örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 10: Hız-Verim benzetim ve performans testi karşılaştırma grafiği



Şekil 11: Hız-Mil Gücü benzetim ve performans testi karşılaştırma grafiği



Şekil 12: Giriş Akımı-Moment benzetim ve performans testi karşılaştırma grafiği

4. Sonuçlar

Bu çalışmada hafif elektrikli araçların tahrik sisteminde kullanılan tekerlek içi FDA motorlarında farklı oluk-kutup sayısı kombinasyonları üzerine incelemeler yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda en iyileştirilmiş yapının prototipi imal edilmiş ve benzetim çalışması ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Yüksek verimli FDA motorunun imal edilmesine etki eden önemli parametrelerden birisi oluk-kutup sayısı kombinasyonlarının olduğu yargısı bu çalışma ile desteklenmiştir. Ansoft Maxwell Rmxprt yazılımı ile yapılan benzetim çalışması sonucunda 24-oluk/20-kutup sayısına sahip tasarımın diğer tasarımlara göre gerek verim gerekse endüvi iletken akım yoğunluğu değerleri bakımından ön plana çıktığı görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda prototip üretimi yapılan tasarımın performans testleri deney düzeneği üzerinde yapılmıştır. Benzetim sonuçları ve performans testi sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür. %100 yerli otomobil yapılması planlanan ve devlet tarafından desteklenmesi öngörülen günümüz koşullarında bu aracın

ilerleyen zamanda elektrikli otomobil olması kaçınılmazdır. Bu çalışmada elde edilen verilerin bu süreçte yararlı olacağı ve seri imalata dönük uygulamalara destek niteliği taşıdığı düşünülmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Ustun, O., Yilmaz, M., Gokce, C., Karakaya, U. ve Tuncay, R. N., "Energy Management Method for Solar Race Car Design and Application", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, 804-811.
- [2] Tutelea, L. ve I. Boldea, I., "Optimal Design of Residential Brushless D.C. Permanent Magnet Motors with FEM Validation", *Aegean Conference on Electric Machines, Power Electronics and Electromotion (ACEMP '07)*, 2007, 435-439.
- [3] Zarko, D., Ban, D. ve 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.
- [4] Tuncay, R.N., Üstün, O., Yılmaz, M., Gökce, C. ve 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)*, 2011, 1-6.
- [5] Zhao, L., Ham, C., Zheng, L., Wu, T., Sundaram, K., Kapat, J. ve Chow, L., "A Highly Efficient 200000 Rpm Permanent Magnet Motor System", *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6), 2528-2530, 2007.
- [6] Markovic, M., Hodder, A. ve Perriard, Y., "An Analytical Determination of The Torque-Speed and Efficiency-Speed Characteristics of a BLDC Motor", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2009)*, 2009, 168-172.
- [7] Nair, S.S., Nalakath, S. ve Dhinagar, S.J., "Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet BLDC Motor for Automotive Applications", *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC'11)*, 2011, 1615-1618.
- [8] Zarko, D., Ban, D. ve 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.
- [9] Park, S.J., Park, H.W., Lee, M.H. ve Harashima, F., "A New Approach For Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of Bldc Motor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(1), 109-114, 2000.
- [10] Rahim, N.A., Hew Wooi Ping, H.W. ve Tadjuddin, M., "Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Direct Drive of Electric Vehicle", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, 1-6.
- [11] Rahman M. M., Kim K. ve Hur J., "Design and Optimization of Neodymium-Free SPOKE-Type Motor With Segmented Wing-Shaped PM", *IEEE Transactions On Magnetics*, 50(2), 68-76, 2014.
- [12] Adnan, A. ve Ishak, D., "Finite Element Modeling and Analysis of External Rotor Brushless DC Motor for Electric Bicycle", *Proceedings of 2009 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED'09)*, 2009, 376-379.