

Fırçasız, Dış Rotorlu Elektrikli Bisiklet Motoru Tasarımı, Üretimi Ve Deneysel Doğrulaması

Design, Production and Experimental Verification Of A Brushless, Outer Rotor Electric Bicycle Motor

Oğuzhan Ocak¹, Dilan Yılmaz¹, Melike Aydın² ve Metin Aydın^{2,3}

¹Ar-Ge Departmanı, Akım Metal San. ve Tic. A.Ş.
İstanbul Anadolu Yakası Org. San. Bölge, Tuzla / İstanbul
oocak@akimmetal.com.tr / arge29@akimmetal.com.tr

²Ar-Ge Departmanı, MDS Motor Tasarımı Ltd.
Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Yeniköy, Başiskele / Kocaeli
melike@mdsmotor.com

³Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Yerleşkesi, İzmit / Kocaeli
metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışma kapsamında elektrikli bisiklet uygulamaları için 3-faz fırçasız DC motor tasarımı, prototip üretimi ve deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulamada kullanılacak olan senkron motor uygulamanın şekline bağlı olarak dış rotorlu ve yüzeyden mıknatıslı olacak şekilde seçilmiştir. Ön tasarım SPEED programı kullanılarak yapılmış, Flux 2D programı ile detaylı sonlu elemanlar analizi (SEA) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların tasarım kriteriyle örtüştüğü fiziksel parametreler için prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve prototip motoru test sonuçları ile analiz sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Abstract

In this paper, design of a 3-phase brushless DC motor for electric bicycle applications is completed with prototype motor and experimental data. Outer rotor surface mounted permanent magnet synchronous motor type has been selected due to the application. Pre-design stage is realised using SPEED and Flux 2D Software and detailed finite element analysis (FEA) are also completed. Prototype motor is manufactured and experimental results are compared with simulation results. Good agreement is observed between the experimental motor and simulation data.

1. Giriş

Günümüzde birçok ülkede giderek artan trafik problemi ve şehir kirliliğini önlemek amacıyla temiz ulaşım alternatiflerine daha çok önem verilmektedir. Temiz ulaşım için alternatif olarak çoğunlukla elektrikli bisiklet, elektrikli scooter-mopet ve elektrikli otomobiller tercih edilmektedir. Kullanım kolaylığı ve birçok yere uyarlanabilmesi amacıyla elektrikli bisikletlere yönelik talep gün geçtikçe özellikle de gelişmiş ülkelerde artış göstermektedir [4],[5]. Bu artış da beraberinde

yüksek verimli ve hızlı elektrikli bisiklet motoru talebini getirmiştir. Elektrikli bisiklet uygulamalarında küçük hacimli ve yüksek verimli motorlara ihtiyaç duymasının yanında anlık moment ihtiyaçlarına cevap verebilecek motorlar da tercih edilmektedir. Bu uygulamalarda, getirdiği net avantajlar nedeniyle genellikle fırçasız DC motor olarak da adlandırılan ‘fırçasız sürekli mıknatıslı senkron motorlar’ tercih edilmektedir [6].

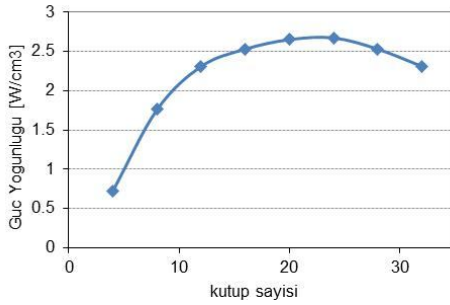
Sürekli mıknatıslı motorlarda kullanılan NdFeB tip mıknatısların akı değerlerinin yüksek olması motorların güç yoğunluklarının yüksek olmasını sağlamaktadır [2]. Rotor yapısının fırçasız olması da boyutlarının ve ağırlıklarının düşük olmasını ve bakım gerektirmemesine imkan tanımaktadır. Tüm bu özellikler dikkate alındığında doğru tasarım parametreleriyle, oldukça kompakt, kolay monte edilebilir ve sürekli çalışma hız aralığında yüksek verime sahip sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı elde etmek mümkündür.

Elektrikli bisiklet uygulamalarında kullanılan motor, bisiklet tekerleklerine yerleştirilip kullanıcının pedal gücünü destekleyeceğinden, tercih edilen sürekli mıknatıslı motor türü dış rotorlu olmalıdır. Motor bisikletin tekerleklerinin her ikisine ya da sadece ön veya arka tekerleğe de yerleştirilebilir. Benzer şekilde pedalsız bisikletlerde de kullanım karakteristiğine bağlı olarak elektrik motoru kullanmak mümkündür.

Bu çalışmanın amacı 3 tekerlekli, pedalsız bir bisiklet için belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda 3 fazlı fırçasız sürekli mıknatıslı ve dış rotorlu bir senkron motor tasarımının yapılması ve prototipi üretilerek sonuçlarının doğrulanmasıdır. Bu kapsamda verilen elektriksel ve mekanik tasarım girdileri kullanılarak motor ön tasarımı gerçekleştirilmiş, motor modern motor tasarım ve analiz yazılımları kullanılarak incelenmiş, prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak yapılan çalışmalar doğrulanmıştır.

2. Fırçasız Motor Tasarımı ve Motor Parametreleri

Sürekli mıknatıslı motor tasarımında kutup ve oluk sayısı kombinasyonu, akım dalga şekli, vuruş momenti seviyesi, zıt EMK dalga formu ve çıkış momentinin kalitesi motor karakteristiklerini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Bunun için uygulamaya bağlı olarak bu kombinasyonun doğru seçilmesi tasarım için oldukça önemli bir faktördür. Dış rotorlu yapı için tasarım kodları ile gerçekleştirilen ön çalışma sonucu bu uygulama için kutup sayısının 20 olması birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Şekil 1’de motor güç yoğunluğunun kutup sayısına bağlı değişiminde 20 kutuplu motor olması gerektiği gösterilmiştir. Ayrıca bu avantajlar arasında başlıca yüksek güç yoğunluğu, düşük malzeme maliyeti ve düşük ağırlık gösterilebilir. Çalışma sonunda elde edilen kutup sayısına uygun 18, 24, 27, 30,... gibi bir çok stator oluk sayısı bulunmaktadır. Getirdiği üretim kolaylığı nedeniyle stator oluk sayısı 18 olarak belirlenmiş ve çalışmalara bu doğrultuda yön verilmiştir. Oluşturulan SPEED modeli ile Tablo 1’ de verilen tasarım kriterleri doğrultusunda ön modelleme yapılmış ve elde edilen en iyi sonuçlar için detaylı sonlu elemanlar analizi kısmına geçilmiştir.



Şekil 1. Kutup sayısı optimizasyonu

Tablo 1. Motor tasarım parametreleri

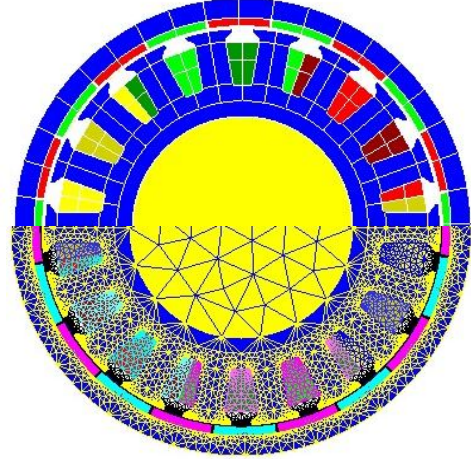
Motor gücü	300 [W]
Anma hızı	250 [rpm]
DC Bara gerilimi	24/48 [V]
Maksimum dış çap	200 [mm]
Kutup sayısı	20
Oluk sayısı	18
Nüve malzemesi	M330-35A

3. Sonlu Elemanlar Analizi

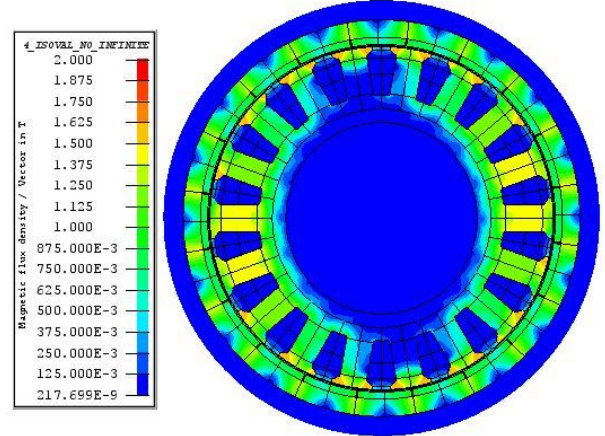
Ön tasarımı tamamlanan motorun elektromanyetik analizi Flux 2D sonlu elemanlar analizi yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarıma ait SEA modeli ve bu modele ait ağ yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere özellikle elektromanyetik dönüşümün olduğu hava aralığı gibi bölgelerde ağ yapısı çok küçük üçgenlerden oluşturulmuşken, dönüşümün olmadığı diğer yerlerde daha büyük üçgenlerden oluşan ağ yapısı kullanılarak hızlı ve doğru çözüme ulaşılabilmek sağlanmıştır.

Yüksüz durum için akı yoğunluğu dağılımına ve akı çizgilerine bakılmıştır (Şekil 3 ve Şekil 4). Yüksüz durumda statorun eriştiği maksimum akı yoğunluğu 1.5 [T]

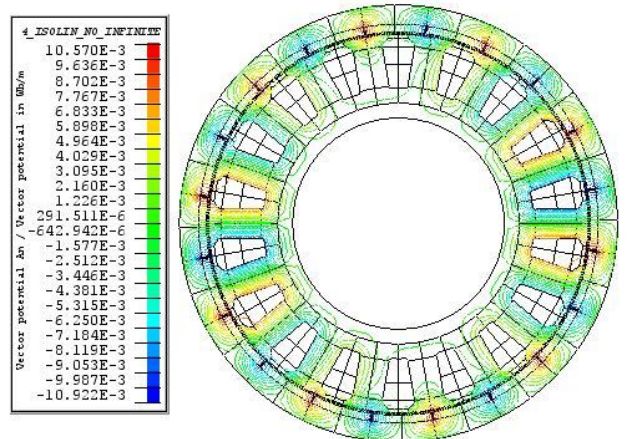
seviyelerindedir. Bu değer de kullanılan sac malzemenin doyum eğrisi göz önüne alındığında makul seviyelerdedir.



Şekil 2. Tasarımın SEA modeli ve ağ yapısı



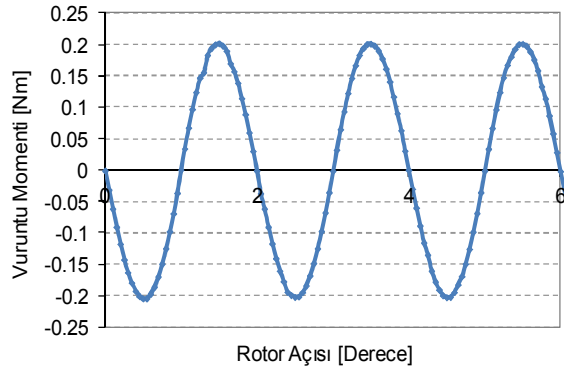
Şekil 3. Yüksüz durum akı yoğunluğu dağılımı



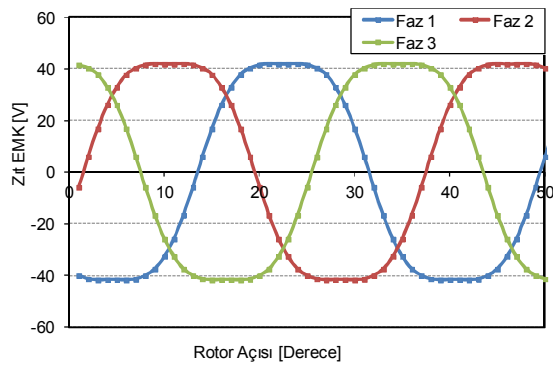
Şekil 4. Akı çizgileri dağılımı

Sürekli mıknatıslı motorlarda moment kalitesi önem taşıyan bir konudur. Motorun moment kalitesinin yüksek olması motor performansına etkisinin yanında sistem performansına da etki etmektedir. Bu sebeple özellikle düşük hızlarda moment kalitesini etkileyen vuruğu seviyesinin düşük tutulması uygulama için kritiktir.

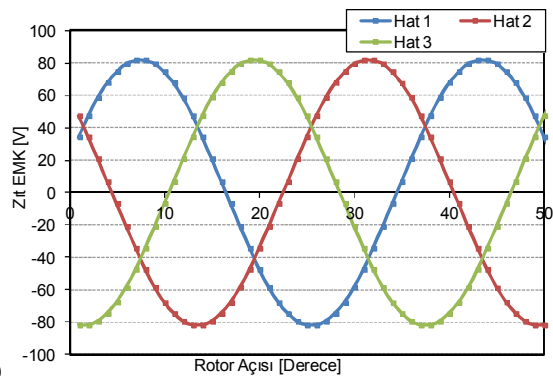
Yüksüz durum analizi için ilk olarak tasarımın vuruğu momenti seviyelerine ve zıt EMK dalga değişimine bakılmıştır. Vuruğu momenti seviyeleri Şekil 5’ den görüldüğü üzere maksimum 0.2 Nm seviyelerindedir. Bu değer tasarım kriterlerini sağlayan, anma momentinin %1.3’ ü seviyelerinde oldukça küçük bir değerdir. 500 rpm hız değeri için motordan elde edilen zıt EMK hat ve faz gerilimleri Şekil 6’ da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere faz gerilimi iste-



Şekil 5. Tasarımın vuruğu momenti değişimi



a)



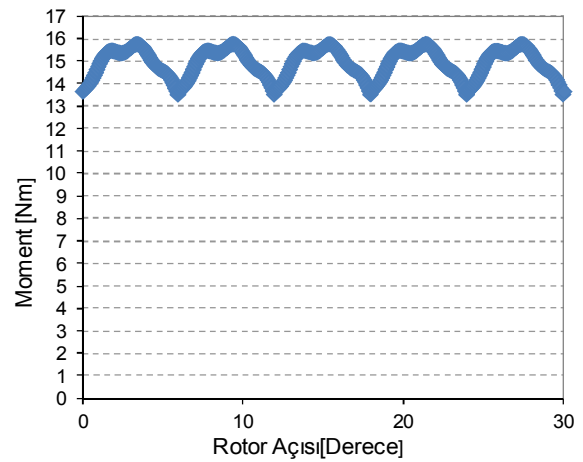
b)

Şekil 6. Zıt EMK a) faz ve b) hat dalga değişimleri

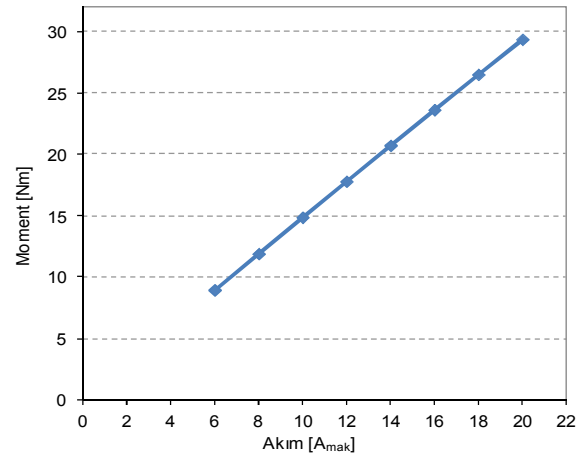
nildiği gibi kare dalga şekline oldukça yakındır. Hat dalga şekli ise iki faz arasındaki gerilim olduğu için şekli sinüzoidal dalga şeklindedir. Hat gerilimi tepe değeri 81.6V, faz gerilimi tepe değeri 41.85V olarak elde edilmiştir.

Yüksüz durum analizlerinden sonra yüklü durum analizlerine geçilmiş ve farklı akım seviyeleri için çıkış momenti seviyeleri incelenmiştir. 10 A maksimum değer için elde edilen çıkış momenti dalga değişimi Şekil 7’ de gösterilmiştir. Bu durumda çıkış momenti ortalama değeri 15.8 Nm olarak elde edilmiştir. Ayrıca çıkış momentinde ortalama momentin %15’ i seviyelerinde moment dalgalanması olduğu gözlenmiştir.

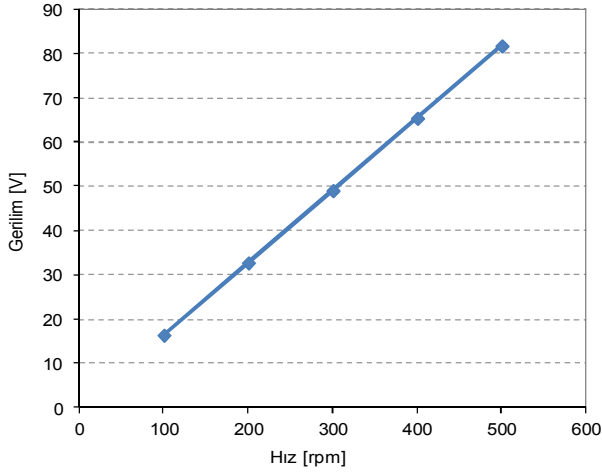
Son olarak motora ait moment ve gerilim sabitlerinin bulunması için moment-akım ve gerilim-hız grafikleri oluşturmak amacıyla analizler yapılmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9’ den görüldüğü üzere motora ait moment sabiti (K_t) 1.49 [Nm/A_{mak}] seviyelerinde, gerilim sabiti (K_v) ise 0.16 [V/krpm] seviyelerindedir.



Şekil 7. Tasarımın çıkış momenti grafiği



Şekil 8. Moment-akım grafiği



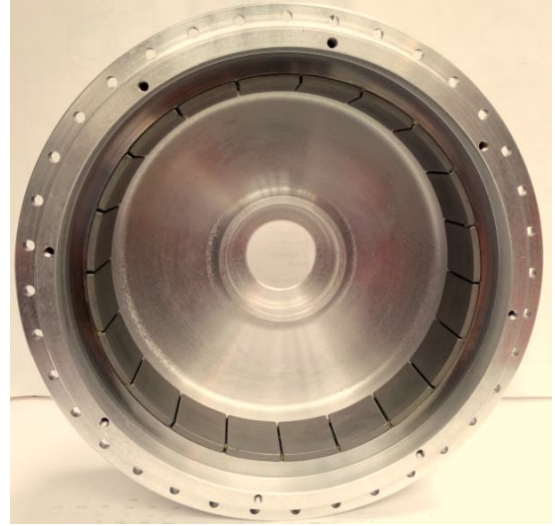
Şekil 9. Gerilim-hız grafiği

4. Prototip Üretimi ve Deneysel Doğrulanması

Tasarım kriterleri doğrultusunda bir tasarım oluşturulmuş ve kriterleri sağlayan boyutlar için prototip üretimi aşamasına geçilmiştir. Prototip üretim aşamasında stator sacları hızlı fiber optik laser kesim yöntemi kullanılarak kesilmiş ve malzeme manyetik özelliklerine zarar verilmeden kesim işlemi sonlandırılmış ve stator yapısı oluşturulmuştur. Mıknatıslar kalitesinden emin olunan bir firmadan temin edilerek prototipte malzeme bağımlı hataların oluşmasının önüne geçilmiştir. Ayrıca işlenen parçalarda belirtilen toleranslar dahilinde imalat gerçekleştirilmiş ve doğruluğu kalite kontroller ile teyit edilmiştir. Bu çalışmaların amacı prototipin kaliteli üretilerek, testleri sonucu oluşabilecek hataların nedenini daha kolay bulmak adına oldukça önemlidir. Prototip motora ait sarımları yapılmış stator, mıknatısları yapılandırılmış rotor ve montajı yapılmış motora ait görüntüler sırasıyla Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 10. Prototip stator yapısı ve sargılar



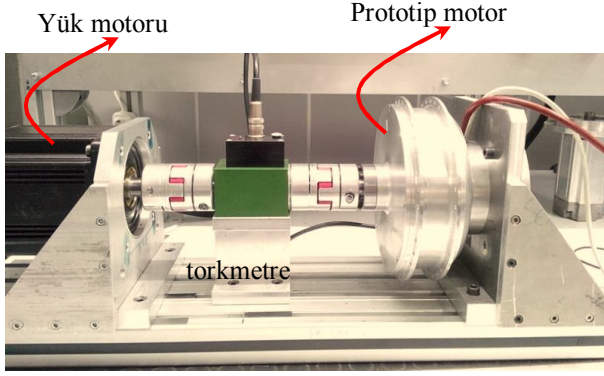
Şekil 11. Prototip rotor yapısı



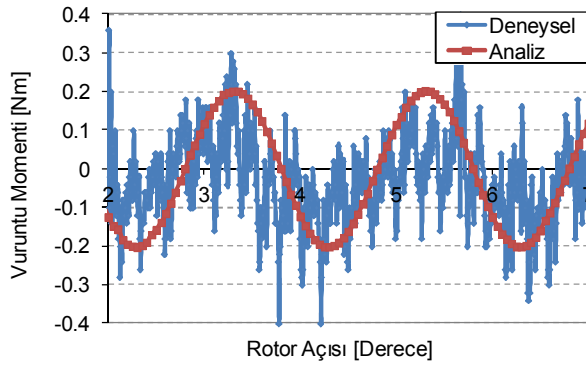
Şekil 12. Prototip motorun gövdeye yerleştirilmiş hali

Prototipe ait yüklü ve yüksüz durum testlerinin yapılabilmesi için deney düzeneği uygun hale getirilmiş ve motor düzeneğe sabitlenmiştir. Düzeneğe montajı yapılmış prototip motor Şekil 13’de gösterilmiştir.

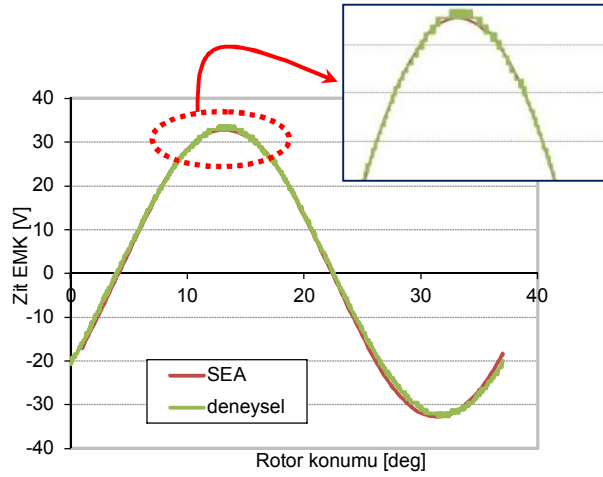
Prototipe ait yapılan ilk test vuruntu momenti testidir. Motor yüksüz durumda, düşük hız seviyelerinde çevrilerek rotordan elde edilen moment değeri kaydedilmiş ve elde edilen datalar simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. Test sonucunda prototipe ait vuruntu momentinin 0.198Nm seviyelerinde olduğu görülmüştür. Şekil 14’ten görüldüğü üzere simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar, aralarındaki yaklaşık %1 fark ile uyum içerisindedir. Vuruntu momentinden sonra zıt EMK testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla simülasyon sonuçlarının karşılaştırması Şekil 15’te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere test sonucunda elde edilen hat gerilimi tepe değeri 83V’tur ve bu da simülasyon sonuçları ile %1.71 hata payı ile örtüşmektedir.



Şekil 13. Motor test düzeneği



Şekil 14. Motor vuruşu momenti test ve analiz sonuçları karşılaştırma grafiği



Şekil 15. Zıt EMK test sonucu grafiği

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında elektrikli bisikletlerde kullanılmak üzere dış rotorlu fırçasız bir senkron motor tasarımı yapılmış ve elde edilen tasarımın prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca prototip testleri, oluşturulan deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ile test sonuçlarının büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür.

6. Teşekkür

Yazarlar, desteklerinden dolayı Akım Metal A.Ş., MDS Motor Ltd. ve Kocaeli Üniversitesi' ne teşekkür eder.

7. Kaynaklar

- [1] Azira Adnan and Dahaman Ishak, Finite Element Modelling and Analysis of External Rotor Brushless DC Motor for Electric Bicycle.,IEEE Student Conference on Research and Development, 2009
- [2] Silvia Maria Diga,Maria, Brojboiu,Nicolae Diga, Constantin Stoica, Considerations on 2D Numerical Modelling of Permanent Magnet Synchronous Motors for Driving Electric Bicycles, IEEE, 2013
- [3] Kyung Su Kim,Sung Ho Lee,Hyung-Rok Cha,Kyu Seok Lee,Sung Jun Park, Design ana Analysis of Outer Rotor Type IPMSM for an Electric Bicycle
- [4] Burin Kerdsup,Nisai H.Fuengwarodsakul, Analysis of Brushless DC Motor in Operation with Magnetic Saturation using FE Method,8th.ECTICConference, 2011
- [5] A.Muetze,Y.C.Tan, Performance Evaluation of Electric Bicycles,IEEE,2005
- [6] T.F.Chan, Lie-Tong Yang,Shao-Yuan Fang,Design of a Permanent-Magnet Brushless D.C Motor Drive for an Electric Bicycle,IEEE,1999
- [7] Silvia Maria Diga,Maria, Brojboiu,Nicolae Diga, Constantin Stoica, Particularities of Construction and Design of Permanent Magnets Synchronous for Driving Electric Bicycles,Recent Researches in Electric Power and Energy Systems
- [8] Per Roger Johansen,Dean Patterson,Christopher O'Keefe,John Swenson,The Use of an Axial Flux Permanent Magnet in Wheel Direct Drive in an Electric Bicycle,Renewable Energy,2001
- [9] Yoshio Tomigashi,Tetsuji Ueta,Kazunobu Yokotani,Kazuo Ikegami,Reducing Cogging Torque of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Bicycles