# PAPER DETAILS

TITLE: Tekerlek Içi Firçasiz Dogru Akim Motorlarinin Sicaklik Dagilimlarinin Lumped-Devre Modeli

Semasi ile Incelenmesi

AUTHORS: Ali Sinan ÇABUK

PAGES: 128-136

ORIGINAL PDF URL: https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/974669

**RESEARCH ARTICLE** / ARAȘTIRMA MAKALESİ

# Tekerlekiçi Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Sıcaklık Dağılımlarının Toplu Parametreli Devre Modeli Şeması ile İncelenmesi

Temperature Distribution Analysis of In-Wheel Brushless Direct Current Motor Based on

#### Lumped Circuit Schemes

#### Ali Sinan ÇABUK<sup>1</sup>D

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Maslak-Istanbul

#### Öz

Elektrik motorlarında sıcaklık etkisi motorun çalışma karakteristiğini etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Isıl etkinin iyi bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Araştırmacılar tarafından yapılacak elektrik motoru tasarımlarının buna uygun olarak düzenlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, tekerlekiçi firçasız doğru akım (FDA) motorunun sıcaklık dağılımlarının incelenmesi toplu parametreli devre modeli şeması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl etkiler elektrik motorlarının performanslarını değiştirir. Bununla birlikte kalıcı mıknatısların manyetik özelliklerini geri dönülmeksizin yitirmelerine neden olurlar. Motor sargılarındaki yalıtkanları bozunuma uğratırlar. Bütün bu etmenlerden dolayı ısıl etkinin imalattan önce iyi incelenmesi gereken bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmada hafif elektrikli araçlarda daha çok kullanılmakta olan 3000 W çıkış gücü değerine sahip, bara gerilimi 150V, hızı 1000 d/dk olan 20 kutup-24 oluklu yapı tercih edilmiştir. Isıl etkileri irdelenmiş, benzetim çalışması sonuçlarının gerçekçi sonuçlarla örtüşerek imalat öncesi tercih edilebilir bir yaklaşım olduğu yargısına ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Tekerlekiçi Fırçasız Doğru Akım Motoru, Isıl Etki, Lumperd-Devre Modeli, Verim, Sargı Yapısı, Hafif Elektrikli Araçlar

#### Abstract

Thermal effect is one of the most impartant parameters for electric motors. The thermal effect should analysis as detail by researcher. Hence the design of electric motor can be fixed with thermal analysis. In this study, the temperature distributions of the in-wheel brushless direct current (BLDC) motor were examined using the Lumped-circuit model scheme. Thermal effects change the performance of electric motors. However, they cause the permanent magnet to lose its magnetic properties without recurrence. They decompose insulators in motor windings. Because of all these factors, it should be noted that the thermal effect is a parameter that needs to be examined well before manufacturing. For this paper, 20-poles/24-slots with fixed power of 3000 W bus voltage and motor speed as 150 V and 1000 rpm has been preferred which is used more in light electric vehicles. Thermal analysis results and prototype thermal test were examined, the effects on the parts used in motor design were investigated, the results of the simulation studies overlap with the experimental test results reached a judgment that can be preferred before manufacturing.

Keywords: In-Wheel BLDC Motor, Thermal Effect, Lumped Circuit Schemes, Efficiency, Winding Shape, Light Electric Vehicle

### I. GİRİŞ

Elektrik motorlarında ısıl etki performansı etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Bu etkinin doğru bir şekilde incelenip yapılacak elektrik motoru tasarımlarının buna uygun olarak düzenlenmesi gerekmektedir. Isıl etkisi iyi anlaşılmayan ve buna önlem alınmayan bir elektrik makinesin kayıplarının artarak verimsiz çalışma durumuna geçmesi gözlemlenir. Bununla birlikte sabit mıknatısların curie sıcaklığı değerini aşarak mıknatısların geri dönülmeksizin bozunuma uğramasına, sargıların aşırı ısınmasına ve motor sargı yalıtkanlarının zarar görmesine neden olur [1-5].

Elektrik motorları sürekli olarak nominal güç değerlerinde çalışabilirler. Nominal güç ifadesine teorik olarak bakıldığında; sürekli çalışma sırasında gücü verebilecekleri en büyük mil olarak tanımlanabilir. Motor çıkış gücüne etki edecek miline bağlı yüklerin nominal güç değerinden daha fazla vüklenmesi durumunda da sürekli calısma durumunda olmamak koşuluyla çalışabilir. Kısa süreli nominal güç değerinden yüksek olan bu çalışma halinin motor üzerine birçok zararlı etkileri vardır, fakat belirtilen çalışma süresi uzun olmadığı durumlarda bu etkiler kabul edilebilir düzeydedir. Aşırı yük durumunda çalışma süresi uzatılırsa ısınmadan dolayı motor sargılarının yanmasına, sargı yalıtkanlarının zarar görmesine ve sabit mıknatısların özelliklerini kalıcı olarak yitirmesine neden olabilir [6]. Bu yüzden aşırı yük durumunun ve dolayısıyla motor sıcaklık değerlerinin kontrol altında tutulması önemlidir. Gerek motorların ısıl performans testleri ile ilgili standartlar gerekse çeşitli yüklerde çalıştırmak için gerekli olan performans ölçütleri ve çalışma koşullarıyla ilgili standartlar döner elektrik makinalarının performans değerlendirmeleri uluslararası standartı olan IEC 600034-1 standartı altında yer almaktadır.

Elektrik motoru sargı olukları içinde kullanılan yalıtkan malzemelerin özellikleri yalıtım sınıflarıyla birlikte belirlenir. Her yalıtkan malzeme sınıfının dayanabileceği sıcaklık değerleri vardır. Bunlar Tablo 1'de verilmiştir [7,8].

**Tablo 1.** Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışmasıcaklıkları [9,10]

Yalıtım Sınıfı	Maksimum Sargı Sıcaklığı [°C]	Maksimum Isınma[°C]	Isınma Toleransı [°C]
А	105	60	5
Е	120	75	5
В	130	80	10
F	155	105	10
Н	180	125	15

Tekerlekiçi firçasız doğru akım (FDA) motorlarında sıcaklıktan en fazla etkilenen kısımlar sabit mıknatıslar ve sargılardır. Motor sıcaklığının izin verilen maksimum sıcaklık değerlerini aşması durumunda motor sargılarının motor gövdesiyle olan yalıtımını sağlayan yalıtkan malzeme özelliğini kaybedip zarar görebilir ve motor sargı iletkenleri arasında kısa devrelere neden olabilir [9]. Bununla birlikte mıknatıslar enerji yoğunluğu değerlerini sıcaklık artışıyla kaybetmeye başlarlar. Curie sıcaklığına erişen sabit mıknatıslar geri dönmeksizin manyetik özelliklerini kaybederler. Bu nedenlerden dolayı motor çalışma sıcaklığının imalattan önce bilinmesi önem arzeder.

Bu çalışmada hafif elektrikli araçlarda kullanılan tekerlekiçi FDA motorunun Motor cad yazılımı ile benzetim çalışmasıyla ısıl analizi yapılmıştır. Motor-Cad yazılımı gözlü elektrik devre yapısına benzeyen göz ağları kullanarak ısıl problemleri ortaya çıkarır ve sürekli rejim halindeki ısıl devre modelini tanımlar. Yazılım motor parçaları düğümleri arasına bağlı ısıl dirençleri ve ısı kaynaklarını içerir. Ayrıca geçici hal benzetiminde ise gövdenin ısıl dirençlerini ilave eder. Bu sırada gövdenin zamana bağlı değişim gösteren iç enerjisini hesaplamalara ilave etmek için ısıl kapasitanslar kullanmaktadır. Burada belirtilen ısıl dirençler iletim ve yayınım olarak Eşitlik 1 ve 2 deki gibi hesaplanır.

$$R_{iletim} = \frac{l}{\lambda A} \tag{1}$$

$$R_{yayınım} = \frac{l}{\alpha A}$$
(2)

Burada l düğüm noktaları arası uzaklık,  $\lambda$  ısıl iletkenlik katsayısı, *A* kesit alanı ve  $\alpha$  ise ısı yayınım katsayısıdır.

Isıl kapasitanslar ise;

$$C = V \rho c \tag{3}$$

Burada V hacim,  $\rho$  yoğunluk ve c malzemenin ısıl kapasitesidir [10].

Yapılan benzetim çalışması için hafif elektrikli araçlarda (güneş arabası, motorsiklet vb.) daha çok tercih edilen yapı olan 3000W çıkış gücü değerine sahip, bara gerilimi 150V, hızı 1000 d/dk olan 20 kutup-24 oluklu yapı tercih edilmiştir. Bu yapı yazarların önceki çalışmalarında performans olarak iyi sonuçlar vermiş olan bir tasarım yapısına sahiptir [6].

Bu çalışma boyunca yapılan işlem adımları ve süreç Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tekerlekiçi FDA motorunun ısıl analiz süreci

#### II. TEKERLEK İÇİ FDA MOTORU ISIL BENZETİM ÇALIŞMASI

Güneş arabası yarışlarında kullanılan hafif elektrikli araç tekerlek yapısı ölçüsü baz alınarak Tablo 2 ve Şekil 2'de verilen 6mm. kalınlığında ve mıknatısı kucaklama değeri (embrace) 0,8 olan sabit mıknatıslı tekerlekiçi FDA motoru parametreleri ile tasarım çalışmasına başlanmıştır. Tasarımın ön benzetim çalışması sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçeklenmiş ve elektromanyetik analizleri yapılmıştır.

 Tablo 2. Tekerlekiçi FDA motoru tasarım çalışması

 başlangıç değerleri

Parametreler	Değer	
Güç [W]	3000	
Gerilim [V]	150	
Anma Hızı [d/dk]	1000	
Min Araç Ağırlığı [kg]	370	
Tekerlek Çapı [mm]	320	
Stator Malzemesi	M27_26G	
Sabit Mıknatıs	NdFeB38	



Şekil 2. Tekerlekiçi FDA motoru stator oluk ölçüleri

Tablo 2'de verilen veriler çerçevesinde oluşturulan yapının elektromanyetik analizleri motorun parametrelerinin belirlenmesi anlamında önem taşımaktadır. Bu parametrelerle oluşturulan motor sarım sayısı 32 olan varım kalıp-konsantrik sargılıdır. Sargılarda çapı 2,174 mm, yalıtkan vernik kalınlığı 0,3 mm olan iletkenler kullanılmıştır. Oluk doluluk oranı imalatta sıkıntı olmaması için %60 değerini aşmayacak şekilde belirlenmiştir. Elektromanyetik alan analizleri sonucunda statorda doyma noktalarının oluşup oluşmadığı, manyetik alan kuvvet çizgilerinin düzgün dağılımda olup olmadığının kontrolü vapılabilmektedir. Yapılan benzetim çalışmasında bütün faz sargılarının direnci, öz ve karşılıklı endüktansı eşit ve sabit, manyetik devre doyumları göz ardı edilmiş ve çalışma ortam sıcaklığı değeri 90°C olarak belirlenmiştir. Yapılan bu benzetim Eşitlik 4 poisson denklemi ve Eşitlik 5'de verilen 2 boyutlu poisson denklemi yardımıyla hesaplamalarını yapmaktadır.

$$\mathbf{V}^2 V = -\frac{\rho_f}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_f}{\varepsilon}$$
(5)

Burada  $\rho_f$  yük yoğunluğu,  $\varepsilon$  ortamın dielektrik katsayısıdır.

Yukarıda parametreleri belirtilen tekerlekiçi FDA motorunun manyetik alan analizleri sonucunda bulunacak manyetik akı çizilerinin motor geometrisi üzerindeki dağılımı ve manyetik akı yoğunluğunun nerelerde doyuma gittiği veya gitmediğinin anlaşılması için önem taşımaktadır. Şekil 3 ve 4'de benzetim sonucunda elde edilen manyetik akı çizgisi ve manyetik akı yoğunluğu dağılımları görülmektedir.



Şekil 3. Tekerlekiçi FDA motoru iki boyutlu manyetik akı çizgileri dağılımı



Şekil 4. Tekerlekiçi FDA motoru iki boyutlu manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 3'de verilen tekerlekiçi FDA motorunun manyetik akı çizgilerinin gerek rotor sırt demirinde gerekse stator dişleri üzerinde düzgün bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Şekil 4'deki manyetik akı yoğunluğu dağılımına bakıldığında, stator diş uçlarında sınır akı yoğunluğu değerleri olan 2T'ya yaklaşıldığı ama motorun genelinde sınır değerlerin aşılmadığı anlaşılmaktadır.

Benzetim çalışması sonucunda moment değerinin 30Nm. civarında olduğu, diş momentinin 0,58 Nm., endüvi akım yoğunluğunun 4,36 A/mm<sup>2</sup>, ortalama giriş akımı 22,3A olduğu görülmektedir.

Benzetim sonuçlarından tekerlekiçi FDA motorunun hedeflenen moment değerine stator ve rotor üzerinde doyum bölgeleri olmadan erişebileceği yargısına varılmıştır. Tekerlekiçi FDA motorları için önemli konulardan biriside fiziksel alan yetersizliğinden dolayı doğal soğutmaya uygun olup olmadığının incelenmesidir. Yapılan manyetik alan analizlerinden endüvi akım yoğunluğunun doğal soğutmaya uygun olan 4-6  $A/mm^2$ sınır değeri içerisinde olduğu görülmektedir. Manyetik alan analizi sonuçları belirtilen motorun termal analizinin doğal soğutma olacak şekilde tasarıma başlanması gerektiğini belirtmektedir. Benzetim sonuçlarından ortaya çıkartılan yapının gerçek çalışma sırasında olusacak olan ısının motor bilesenlerine ve benzetim sonuçlarına etkisini gözlemleyebilmek icin Motor-Cad yazılımı ile gercek ısıl analizi yapılmıştır. Bu yazılım ısıl analizi yapabilmek için manyetik alan analizine ait olan benzetim dosvasından motorun geometrik ölcüleri, elektriksel parametreleri, manyetik alan analizi sonuçları gibi birçok veriyi kendisi almaktadır. Bu yazılımın temelini oluşturan toplu parametreli devre modeli, elektrik motorlarının sıcaklık etkilerin ortaya çıkartılmasında kullanılan çözümlemeli yaklaşımdır. Isıl çözümleme yapan benzer yazılımlar toplu öğeli olan toplu parametreli devre modelini temel alarak analizlerini gerçekleştirirler. Sıcaklık dağılımlarının yer aldığı bu devre modelinde, motor gövdesi içerisinde bulunan ve birbirleriyle etkileşim halindeki parçalar arasında taşınım, iletim ve ışınım yöntemiyle ısıl etkiler aktarılmaktadır ve bunların ısıl değerleri analitik vöntemlerle hesaplamaktadır. Tekerlekici FDA motorunu olusturan parcaların sıcaklıklarını yaklaşık olarak değerlendirmek için gelistirilen analitik ısıl devre modeli stator ve rotor için ısıl hesaplama Eşitlik 6 ve 7'deki gibidir.

$$\Delta \Theta_{R} = \left[ p_{R} \left( I / I_{N} \right)^{2} \Delta \Theta_{NR} \right] \left[ 1 - e^{-t/\tau_{1R}} \right]$$
$$+ \left[ (1 - p_{R}) \left( I / I_{N} \right)^{2} \Delta \Theta_{NR} \right] \left[ 1 - e^{-t/\tau_{2R}} \right]$$
(6)

$$\Delta \Theta_{S} = \left[ p_{S} \left( \frac{l}{I_{N}} \right)^{2} \Delta \Theta_{NS} \right] \left[ 1 - e^{-t/\tau_{1S}} \right]$$
$$+ \left[ (1 - p_{S}) \left( \frac{l}{I_{N}} \right)^{2} \Delta \Theta_{NS} \right] \left[ 1 - e^{-t/\tau_{2S}} \right]$$
(7)

Burada  $\Delta \Theta_R$  rotordaki ısıl artışı,  $\Delta \Theta_S$  stator ısıl artışı, *p<sub>R</sub>* ve *p<sub>S</sub>* rotor ve stator sargılarının kısa süre sabiti için ağırlık faktörünü, *I<sub>N</sub>* nominal akımını, *I* faz akımını,  $\tau_{IR}$  ve  $\tau_{IS}$  rotor ve stator sargılarının anlık soğumaısınma zaman sabitini,  $\Delta \Theta_{NR}$  ve  $\Delta \Theta_{NS}$  rotor ve statorun nominal yük ve akım durumundaki ısıl artışını, *t* zamanı,  $\tau_{2R}$  ve  $\tau_{2S}$  rotor ve statorun gövdesindeki soğuma- ısınma zaman sabitini verir [11-14].

Bu çalışmada üzerinde incelemeler yapılan prototipin benzetim çalışması sonucunda iletken akım yoğunluğu değerinin 4 ile 5 A/mm<sup>2</sup> arasında değişim gösterdiği görülmüştür. Bundan dolayı, oluşturduğumuz yapının ilave bir soğutucu ünitesine gereksinim duymadığı ve doğal hava soğutmanın yeterli olacağı düşünülmüştür. Zaten tekerlekiçi motor yapıları doğal soğutma dışında soğutulmaları mekaniki kısıtlamalar yüzünden oldukça zordur. Isıl analiz çalışmaları motorun doğal soğutma sistemine sahip olmalı yargısına göre devam ettirilmiştir. Tablo 2'deki değerlere sahip tekerlekiçi FDA motor tasarımı Motor-Cad yazılımıyla analiz edilmesinden ortaya çıkan toplu parametreli ısıl devre modeli Şekil 5'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5. Tekerlekiçi FDAM toplu parametreli ısıl dağılım devre modeli

Bu devre modelinde kahverengi renk motor gövdesini, koyu mavi renk motor kasasını, turkuaz renk rotor sırt demirini, kırmızı renk stator sacını, açık yeşil renk sürekli mıknatısı, sarı renk stator sargısını, koyu yeşil renk mili ve gri renk ise rulmanı ifade etmektedir. Ayrıca bu ısıl devre modelinde kullanılan sembollerin anlamları ise Tablo 3'de verildiği gibidir.

 
 Tablo 3. Tekerlekiçi FDAM ısıl dağılım devre modeli parametreleri

Parametre	Açıklama		
	Termal direnç		
	Arayüz direnci		
	Isı yayılımı direnci		
- R	Radyasyon direnci		
0	Güç kaybı		
$\rightarrow$	Düğüm noktası		
17.0C	Sıcaklık farkı		
21.2W	Güç akışı		

Şekil 5'de verilen toplu parametreli ısıl dağılım devre modeli üzerinde ısıl düğüm noktaları ve bunlara bağlı olan motor parçalarının sıcaklık değerleri verilmiştir. Bu ısıl devre modelinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6'daki ısıl dağılımların incelenmesi gerekebilir. Tekerlekiçi FDA motorun radyal geometrisi üzerindeki ısıl dağılımlar ise Şekil 6'da verildiği gibidir.



Şekil 6. Tekerlekiçi FDAM radyal geometri ısıl

#### dağılım

Gerek ısıl dağılım devre modelinde gerekse radyal geometri ısıl dağılımında görüldüğü üzere motorun genelinde ortalama değerler olarak 92°C'nin geçilmediği, sadece manyetik akının yoğun olduğu oluk dişlerinde 91,5°C değerine ulaştığı görülmektedir. Benzetim modelinde kullanılan prototipin rotoru için seçilen NdFeB38 sürekli mıknatısının çalışma sıcaklığı 80°C dir. Isıl dağılım devre modelindeki sabit mıknatıs üzerindeki calısma ortalama sıcaklığının 49,1°C civarında ve yüzey sıcaklığının 77,61°C olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık değeri NdFeB 38H mıknatısının manyetik bozulumunun olabileceği sıcaklık değerinin (Curie sıcaklığı) altında olduğu gözlenmiştir. Böylece bu sonuçlar elektromanyetik alan analizi ile ulaşılan; tekerlekiçi FDAM geometrisindeki elektriksel büyüklüklerin ilave bir soğutma sistemine ihtiyaç duymayacağı yargısını desteklemektedir.



Şekil 7. Tekerlekiçi FDA motoru zamansal ısıl dağılım

Şekil 7'deki zamansal ısıl dağılıma baktığımızda sargılar ve stator yüzeyindeki sıcaklık değerlerinin ani bir artış gösterip 84. saniyeden sonra rejime girdiği ve ulaştığı sıcaklık değeri etrafında salınımlar yaptığı görülmüştür. Rotor yüzeyi ve sabit mıknatısların ise zaman değişimiyle doğru orantılı bir biçimde yüksek artışlar oluşmadığı anlaşılmıştır.

Şekil 8'de tekerlekiçi FDAM stator kesiti ısıl dağılımında görüldüğü üzere stator oluk tabanında sıcaklığın düşük seviyelerde olduğunu, olukların hava aralığına yakın bölgelerinde ise sıcaklık değerlerinin daha yüksek değerlere çıktığı belirtilebilir. Ortalama sargı sıcaklığının 121,04°C olduğu için stator olukları içindeki B sınıfı bir izolasyon malzemesi tercih edilmesi gerektiği sonucu çıkartılabilir. Bu izolasyon sınıfına sahip malzeme ile motorda, özellikle aşırı akıma neden olacak zor şartlarla karşılaşılacağı ve aşırı yüklenmelerin olacağı uygulamalarda yüksek ısıl dayanıklılık sağlanmış olur.



Şekil 8. Tekerlekiçi FDAM stator kesiti ısıl dağılımı

Sırt demirine ait Şekil 9'daki rotor kesiti ısıl dağılımında sabit mıknatısların hava aralığına yakın olan bölgelerinde yüksek sıcaklıklara çıkarken, sırt demirine yakın olan bölgelerinde daha düşük sıcaklık değerlerine eriştiği görülmektedir. Bu değer mıknatıs yüzeyi üzerinde 77,61°C civarında olduğu ve seçilmiş olan NdFeB38 mıknatısın curie sıcaklığı olan 80°C'ye erişmediği görülmektedir.



Şekil 9. Tekerlekiçi FDAM rotor kesiti ısıl dağılımı

Şekil 5,6,7, 8 ve 9'dan edindiğimiz bütün ısıl analiz verilerini Tablo 4'de görebiliriz.

Sıcaklık Ölçüm Bölgesi	Sıcaklık [ <sup>0</sup> C]	
Gövde	73,31	
Rulman	94,24	
Mil	114,05	
Gövde Boşluğu	82,12	
Yakın Ortam	41,2	
Sargı (Ortalama)	121,04	
Sırt Demiri	123,07	
Stator Yüzeyi	123,09	
Rotor Yüzeyi	78,51	
Mıknatıs Yüzeyi	77,61	

Tablo 4. Termal analiz sonucu

Tablo 4'de görüldüğü üzere sargı sıcaklıkları yüksek değerlerde olmasına rağmen kabul edilebilir sınır değerleri içindedir. Gerek stator sacları ve rotor çeliği, gerekse sabit mıknatıslar gerçek ısıl analiz sonuçlarında belirtilen sıcaklık değerleri icinde çalışabilecek malzemelerdir. Burada özellikle sabit mıknatısların maruz kaldığı sıcaklık değeri manyetik bakımından bozuluma uğramaması önem arzetmektedir. Şekil 10'da Motor-Cad yazılımı ile benzetim sonuçlarının karşılaştırılması yapılan verilmiştir. Buna göre tekerlekiçi FDA motorunda en çok ısınan yer stator yüzeyi ve sargılar, en az ısınma olan parça ise motor gövdesi ve mıknatıs yüzeyleridir.



Şekil 10. Tekerlekiçi FDAM ısıl dağılım

#### III. ISINMA TESTİ

Yüksek sıcaklık durumu FDAM için sabit mıknatısların bozulmasına ve yalıtkan malzemelerin özelliklerini yitirmesinin yanı sıra bakır kayıplarının artmasına neden olur. Sargılardaki bu ısı motorun rotor, stator, gövde ve miline yayılır ve motorun gövde içi sıcaklığını yükseltir. Bundan dolayı, motorun gövde ısısını dikkate alarak sargı sıcaklığının değeri hakkında yargıya varmak doğru olmaz. Motor sıcaklığının ölçümünde iki yöntem kullanılmaktadır; termik elemanlarla ölçüm yöntemi ve direnç artışı yöntemi. Bu çalışmada yapılan ısınma deneyinde yaygın olarak tercih edilen direnç artış yöntemi kullanılmıştır. Direnç artış yöntemi, iletkenin sıcaklık değişimine bağlı olarak direnç değerinin değişmesi durumuna dayanır. IEC 60034-1 standardına göre yapılan ısınma deneyinde motorun milinin nominal güç ile yüklenmesi ve önceden belirlenmiş aralıklarda sargı direnç değerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Isınma deneyi başlangıç koşulu olarak motor iç sıcaklığının ortam sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Sargılarda kullanılan iletkenler için direnç artış karakteristiği dikkate alınarak, ilk ve son direnç oranlarından sargıların ulaştığı ortalama sıcaklık değeri Eşitlik 8 ile belirlenir [12,13].

$$\frac{\Theta_2 + k}{\Theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \tag{8}$$

Burada  $\Theta_1$  soğuk durumdaki sargı sıcaklığı,  $\Theta_2$  ısınma deneyi sonundaki sargı sıcaklığı,  $R_1 \Theta_1$  sıcaklığındaki sargı direnci,  $R_2$  ısınma deneyi sonucundaki sargı direnci,  $k 0^{\circ}$ C'deki malzemenin sıcaklık katsayısıdır.

Isınma testinin amacı motorun sargı sıcaklığının çeşitli yük durumları için çıkarılması ve Motor-Cad yazılımı ile benzetim çalışmasıyla ulaşılan sonuçlarla uyumunun karşılaştırılmasıdır. Isıl test sırasında, motorun performans deneyi sonucuyla erişilmiş en iyi çalışma noktasındaki yük ile yüklenmiş ve motorun sürekli çalışma sıcaklığında olup olmadığının denetimi yapılmıştır. Isınma deneyinde Şekil 11'deki bağlantılar kurulup gerekli ölçümler yapılmıştır. Bu deneyde motorun en iyi performans deneyi sonucundaki gücü sabit tutulmuş ve ortam sıcaklığı 25,8°C olduğu durumda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Tekerlekiçi FDAM ısınma deneyi bağlantı şeması

Şekil 12'de görülen test düzeneğinde motoru yüklemek için manyetik fren kulanılmıştır. Test esnasında manyetik yük değeri artırılarak gerekli ölçümler yapılmıştır. 3 saat süren ısınma deneyinde motor milinin güç değeri sabit tutularak yolverilen motorun direnç değeri ölçümleri ilk 1 saat boyunca 15'er dakika aralıklarla, daha sonraki 2 saatlik dilim için yarım saatlik aralıklarla yapılmıştır. Yapılan direnç artış yöntemi ölçümleri hassas olması ve deneyin bütünlüğünün bozulmaması için birkaç saniye içerisinde yapılmıştır. Isınma deneyi boyunca motor sargı sıcaklığı değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Deney sonucunda motor sargı sıcaklığı 118,213°C'ye ulaşmıştır. Isınma deneyi sırasında alınan değerlere bağlı olarak motor ısınma eğrisi Şekil 13'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 12. Tekerlekiçi FDAM ısınma deney düzeneği

Tablo 5 ve Şekil 13'de görüldüğü gibi ısınma deneyi ile elde edilen motor sargı sıcaklığının Motor-Cad yazılımı ile elde edilen sonuç ile örtüştüğü görülmektedir. Isınma testi ile elde edilen motor sargı sıcaklığı ortalama değeri 114,26546°C'dir. Motor-Cad benzetim çalışması ile elde edilen ortalama motor sargı sıcaklığı ise 121,04 °C'dir. Buradan gerçek ölçüm ile benzetim çalışması ile elde edilen sıcaklık değeri arasında % 5,6 fark olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Isınma deneyi sonuçları

Ölçüm Süresi [dk]	Ortam Sıcaklığı [°C]	Sargı Direnci (2R) [Ohm]	Motor Sargı Sıcaklığı [°C]	D.A. Kaynak Gerilimi [V]	D.A. Kaynak Akımı [A]
0	25,8	0,312	24,3	3	9,615
15	25,9	0,402	99,0981	3	7,463
30	26	0,419	113,227	3	7,156
45	26	0,421	114,889	3	7,126
60	26,7	0,423	116,551	3	7,092
90	26,1	0,423	116,551	3	7,092
120	26	0,424	117,382	3	7,076
150	26,4	0,425	118,213	3	7,059
180	25,7	0,425	118,213	3	7,059



Şekil 13. Motor ısınma grafiği

Deney sonucu elde edilen sıcaklık değeri göz önüne alınıp toplu parametreli devre modeliyle birlikte sabit mıknatısların bozunuma uğramadan çalışma gösterecekleri yargısına erişilebilir. Bunun yanında sargı yalıtımında kullanılan malzemenin B yalıtım sınıfına sahip olması gerekliliğide doğrulanmış olmaktadır.

# IV. SONUÇLAR

Isıl etki tekerlekiçi FDAM performansına etki eden önemli parametrelerden birisidir. Bu tip yapıda olan elektrik motorlarında gövde içi soğutma için kulanılan pervane, gövde kanatçıkları gibi yapılar mekaniki sınırlama nedeniyle tasarımlarda kullanılamamaktadır. Bu nedenden dolavı tekerlekici FDA motorlarda sıcaklık etkisinin iyi incelenmesi gerekmektedir. Motor parçaları üzerindeki ısıl etkileri imalatan önce gerekli şekilde incelenmeden üretimi yapılan tekerlekiçi FDA motorun kayıplarının öngörülmeyen birşekilde arttığı ve verimsiz bir çalışma durumu sergiler. Bununla birlikte yüksek ısıl etkiler tekerlekiçi FDAM sürekli mıknatıslarının curie sıcaklığı değerini geçtiğinde geri dönülmeksizin manyetik özelliklerini kaybetmesine, sargıların aşırı ısınıp zarar görmesine ve sargı yalıtkan malzemelerinin zarar görmesine neden olur. Belirtilen bütün bu olumsuzluklar motorun arıza durumuna gecmesini kolavlastirip motorun calisma ömrü azaltacaktır. Belirtilen bu olumsuzluklar, imalat sonucunda elde edilecek ısıl etkilerin önceden bilinmesine yardımcı olacak gerçekçi yaklaşımların önemini daha iyi anlamayı sağlamaktadır. Yardımcı mekaniki soğutmaya imkan vermeyen tekerlekiçi FDA motorlarda sıcaklığın tasarım sırasında belirlenmesi, tasarımın değismesine hemde hem malzeme seçimlerine etki etmektedir.

Bu çalışma, tekerlekiçi FDAM toplu parametreli devre modeli benzetim çalışması sonuçlarının prototipi imal edilmiş olan motorun üzerinde yapılan ısıl test sonuçlarını doğrular nitelikte olduğunu göstermektedir. Tablo 4'de verilen benzetim sonuçlarıyla Tablo 5'de verilen ısıl test sonuçları birbirini destekler niteliktedir. Motor sargı sıcaklığı, benzetim çalışması sonucu ile motorun gerçek çalışma koşulunda ölçülen değeriyle arasında % 5,6'lık bir hata payı olduğu görülmektedir. Bu fark değerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir. Isıl analiz sonuçlarının toplu olarak incelendiği Tablo 4 ve 5'de de görüldüğü üzere sargı sıcaklıkları yüksek değerlerde olmasına rağmen kabul edilebilir sınır değerleri içindedir. Böylece gerekli çıkış gücünü elde ederken sargıların ısıl etkilerden zarar görmeyecek olduğu yargısına erişilmektedir. Şekil 6,8 ve 9'de verilen ısıl dağılımlarında sıcaklık etkilerinin mıknatıs yüzeyi ve stator dişleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Çalışmada belirlenen gerek stator sacları ve rotor çeliği, gerekse sabit mıknatıslar toplu parametreli devre modeli ısıl analiz sonuçlarında belirtilen sıcaklık değerleri içinde çalışabilecek malzemeler olduğu anlaşılmıştır.

Toplu parametreli devre modeli ile eriştiğimiz sonuçlar doğrultusunda karar verilen malzemelerin gerçek ısıl analiz testinden geçtiği ve bu malzemelerin gerçek özelliklerinin bu sıcaklık derecelerinde bozunuma uğrayarak değişmeyeceği yargısına ulaşılmıştır. Bununla birlikte bu malzemelerin tekerlekiçi FDAM imalatında kullanılabilir olduğu sonucuna erişilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından biriside toplu parametreli devre modeli sonuçlarının gerçekçi bir yaklaşım olduğunu ispatlar niteliktedir. Ayrıca elektrik araçlarda tercih edilen tekerlekiçi FDAM üzerine incelemeler yapan araştırmacılar ve imalatçılar için bu model gerçekçi sonuclarını kullanarak vaklasımlarda bulunabileceklerini göstermektedir. Motor-CAD yazılımının, tasarımcıya bu karmaşık ve önemli tasarım alanında gerçekçi sonuçlara ulaşmasına yardımcı olacak bir araç olduğu söylenebilir.

%100 yerli otomobil yapılması hız verilmiş ve gerek devlet tarafından gerekse özel sektör tarafından desteklenerek gelecekte ülkemize yön verecek olan bu aracın elektrikli otomobil olması öngörülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların 2023 yılı hedefleri doğrultusunda yerli elektrikli otomobil sürecine faydalı olacağı ve bu tip motorlar üzerine seri imalata yönelik uygulamalara destek niteliği taşıdığı düşünülmektedir.

# TEŞEKKÜR

Motor-Cad yazılımında yapılan analizlerle ilgili olarak Prof. Dr. Damir Zarko'ya ve Zagreb Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Fakültesinin vermiş olduğu destek için teşekkür ederim.

#### KAYNAKLAR

- [1] Guechi M.R., Desevaux P., Baucour P., Espanet C., Brunel R. ve Poirot M. (2015). Experimental Study on the Improvement of the Thermal Behavior of Electric Motors. *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, 9(2), 91-97.
- [2] Fakhfakh M. A., Kasem M.H., Tounsi S. ve Neji R. (2008). Thermal Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric

Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicle*, 6(2), 1145-1151.

- [3] Herbert J., Arafat A., Wang G. ve Choi S. (2016). Investigation of a Thermal Model for a Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 20-24 Mart.
- [4] Zhu, S., Hu, Y., Liu, C. ve Wang, K. (2018). Iron Loss and Efficiency Analysis of Interior PM Machines for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 114-124.
- [5] Uma Devi K. ve Sanavullah M.Y. (2011). Performance Analysis Of Exterior(Outer) Rotor Permanent Magnet Brushless Dc (Erpmbldc) Motor By Finite Element Method. 3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT), Kanyakumari, India, 8-10 Nisan.
- [6] Cabuk A.S. (2016). A Novel Approach to Optimized Design of In-Wheel BLDC Motors. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Türkiye, s. 77-83.
- [7] Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları, www.emo.org.tr/ekler/2095bad7034daef\_ek.pdf (17.06.2018)
- [8] Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları, www.siemens.com.tr (17.06.2018)
- [9] Vansompel, H., Hemeida, A. ve Sergeant, P. (2017). Stator Heat Extraction System for Axial Flux Yokeless and Segmented Armature Machines. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, USA, 21-24 Mayıs.
- [10] Nerg J., Rilla M. ve Pyrhönen J. (2008). Thermal Analysis of Radial Flux Electrical Machines with a High Power Density. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(10), 3543 – 3554.
- [11] Cabuk A.S. (2019). Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler, Chapter 6 Tekerlekiçi Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Isıl Devre Modeli İle Sıcaklık Etkilerinin İncelenmesi. Ankara, Türkiye: Gece Akademi.
- [12] ABB Distribution Automation Handbook (2011). Erişim Adresi: https://new.abb.com/mediumvoltage/distributionautomation/misc/distribution-automationhandbook
- [13] ABB Motor Protection Calculation Tool for SPAM 150 C, User's Manual and Technical Description (2002) Erişim Adresi:https://library.e.abb.com/public/9fa93744 8521cc28c2256bf1002d7252/FM\_SPAM150C\_ 750637\_ENbab\_2010.
- [14] Hakola, T. (1982). Application guide for protection of synchronous machines, ABB Relays Erişim Adresi: https://new.abb.com/mediumvoltage/distribution-automation/numericalrelays/motor-protection-and-control.