

## Tekerlekiçi Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Sıcaklık Dağılımlarının Toplu Parametrelili 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> 

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

### 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 fırçasız doğru akım (FDA) motorunun sıcaklık dağılımlarının incelenmesi toplu parametrelili devre modeli şeması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl etkiler elektrik motorlarının performanslarını değiştirir. Bununla birlikte kalıcı mıknatısların manyetik özelliklerini geri dönmeksizin yitirmelerine neden olurlar. Motor sargılarındaki yalıtkanları bozunuma uğrattırır. Bütün bu etmenlerden dolayı ısıl etkinin imalatın 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 analiz sonuçları ile prototip üzerindeki ısıl test sonucu değerleri incelenip, motorun tasarımında kullanılan parçalar üzerindeki 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 important 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 dönmeksizin 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 verebilecekleri en büyük mil gücü olarak tanımlanabilir. Motor çıkış gücüne etki edecek miline bağlı yüklerin nominal güç değerinden daha fazla yüklenmesi durumunda da sürekli çalışma 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 ısı 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 çalışma sıcaklıkları [9,10]

Yalıtım Sınıfı	Maksimum Sargı Sıcaklığı [°C]	Maksimum Isınma [°C]	Isınma Toleransı [°C]
A	105	60	5
E	120	75	5
B	130	80	10
F	155	105	10
H	180	125	15

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

$$R_{iletim} = \frac{l}{\lambda A} \quad (1)$$

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

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

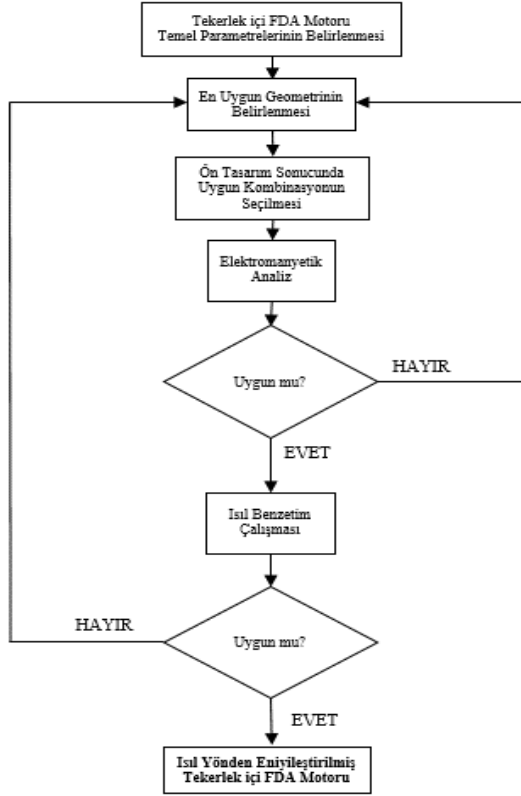
Isıl kapasitanslar ise;

$$C = V \rho c \quad (3)$$

Burada  $V$  hacim,  $\rho$  yoğunluk ve  $c$  malzemenin ısı 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.



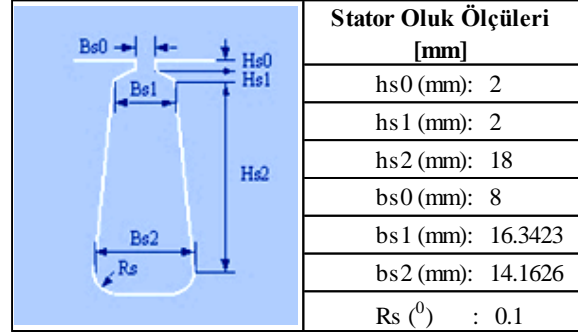
Şekil 1. Tekerlek içi FDA motorunun ısıl analiz süreci

## 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 mıknatıs kucaklama değeri (embrace) 0,8 olan sabit mıknatıslı tekerlek içi FDA motoru parametreleri ile tasarım çalışmasına başlanmıştır. Tasarımın ön benzetim çalışması sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilmiş ve elektromanyetik analizleri yapılmıştır.

**Tablo 2.** Tekerlek içi 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. Tekerlek içi FDA motoru stator oluk ölçüleri

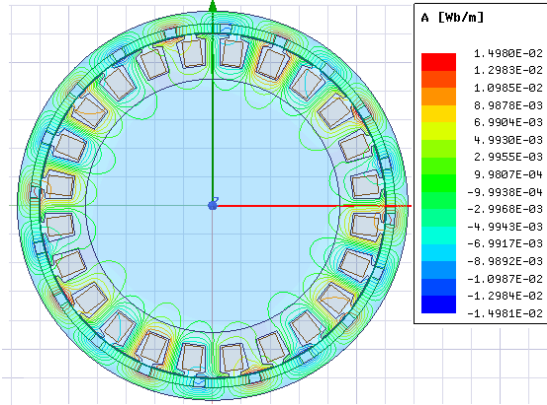
Tablo 2’de verilen veriler çerçevesinde oluşturulan yapının elektromanyetik analizleri motorun parametrelerinin belirlenmesi anlamında önem taşımaktadır. Bu parametrelerle oluşturulan motor sarım sayısı 32 olan yarım kalıp-konsantrik sargılıdır. Sargılarda çapı 2,174 mm, yalıtkan vernik kalınlığı 0,3 mm olan iletkenler kullanılmıştır. Oluk doluluk oranı imalatta sıkıntı olmaması için %60 değerini aşmayacak şekilde belirlenmiştir. Elektromanyetik alan analizleri sonucunda stator da doyma noktalarının oluşup oluşmadığı, manyetik alan kuvvet çizgilerinin düzgün dağılımda olup olmadığının kontrolü yapılabilmektedir. 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.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_f}{\epsilon} \quad (4)$$

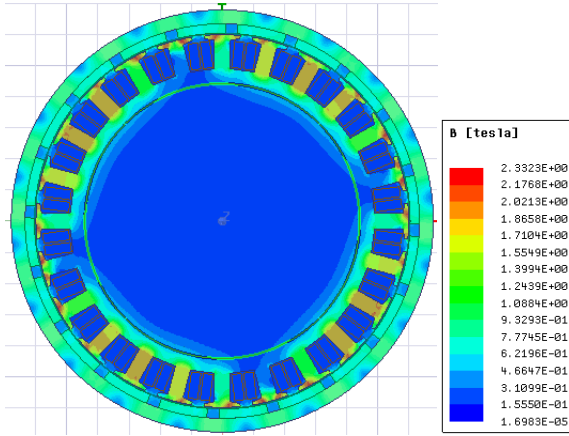
$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_f}{\epsilon} \quad (5)$$

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

Yukarıda parametreleri belirtilen tekerlek içi FDA motorunun manyetik alan analizleri sonucunda bulunacak manyetik akı çizgilerinin 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. Tekerlekliçli FDA motoru iki boyutlu manyetik akı çizgileri dağılımı



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

Şekil 3'de verilen tekerlekliçli 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, dış momentinin 0,58 Nm., endüvi akım yoğunluğunun 4,36 A/mm<sup>2</sup>, ortalama giriş akımı 22,3A olduğu görülmektedir.

Benzetim sonuçlarından tekerlekliçli FDA motorunun hedeflenen moment değerine stator ve rotor üzerinde doyum bölgeleri olmadan erişebileceği yargısına varılmıştır. Tekerlekliçli FDA motorları için önemli konulardan birisi doğal soğutmaya uygun olup olmadığının incelenmesidir. Yapılan manyetik alan analizlerinden endüvi akım yoğunluğunun doğal soğutmaya uygun olan 4-6

A/mm<sup>2</sup> 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 oluşacak olan ısının motor bileşenlerine ve benzetim sonuçlarına etkisini gözlemleyebilmek için Motor-Cad yazılımı ile gerçek ısıl analizi yapılmıştır. Bu yazılım ısıl analizi yapabilmek için manyetik alan analizine ait olan benzetim dosyasından motorun geometrik ölçüleri, elektriksel parametreleri, manyetik alan analizi sonuçları gibi birçok veriyi kendisi almaktadır. Bu yazılımın temelini oluşturan toplu parametrelili devre modeli, elektrik motorlarının sıcaklık etkilerinin ortaya çıkartılmasında kullanılan çözümlenmeli yaklaşımdır. Isıl çözümlenme yapan benzer yazılımlar toplu öğeli olan toplu parametrelili devre modelini temel olarak analizlerini gerçekleştirirler. Sıcaklık dağılımlarının yer aldığı bu devre modelinde, motor gövdesi içerisinde bulunan ve birbirleriyle etkileşim halindeki parçalar arasında taşınım, iletim ve ışınlım yöntemiyle ısıl etkiler aktarılmaktadır ve bunların ısıl değerleri analitik yöntemlerle hesaplanmaktadır. Tekerlekliçli FDA motorunu oluşturan parçaların sıcaklıklarını yaklaşık olarak değerlendirmek için geliştirilen analitik ısıl devre modeli stator ve rotor için ısıl hesaplama Eşitlik 6 ve 7'deki gibidir.

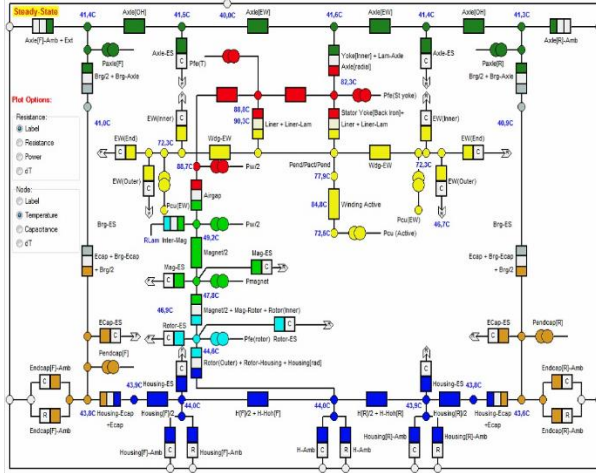
$$\Delta\Theta_R = [p_R (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NR}] [1 - e^{-t/\tau_{1R}}] + [(1 - p_R) (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NR}] [1 - e^{-t/\tau_{2R}}] \quad (6)$$

$$\Delta\Theta_S = [p_S (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NS}] [1 - e^{-t/\tau_{1S}}] + [(1 - p_S) (I/I_N)^2 \Delta\Theta_{NS}] [1 - e^{-t/\tau_{2S}}] \quad (7)$$

Burada  $\Delta\Theta_R$  rotordaki ısıl artışı,  $\Delta\Theta_S$  stator ısıl artışı,  $p_R$  ve  $p_S$  rotor ve stator sargılarının kısa süre sabiti için ağırlık faktörünü,  $I_N$  nominal akımını,  $I$  faz akımını,  $\tau_{1R}$  ve  $\tau_{1S}$  rotor ve stator sargılarının anlık soğutma-ısınma 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 soğutma-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 tekerlekliçli motor yapıları doğal soğutma dışında soğutulmaları mekanik 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 parametrelili ısı devre modeli Şekil 5'de gösterildiği gibidir.



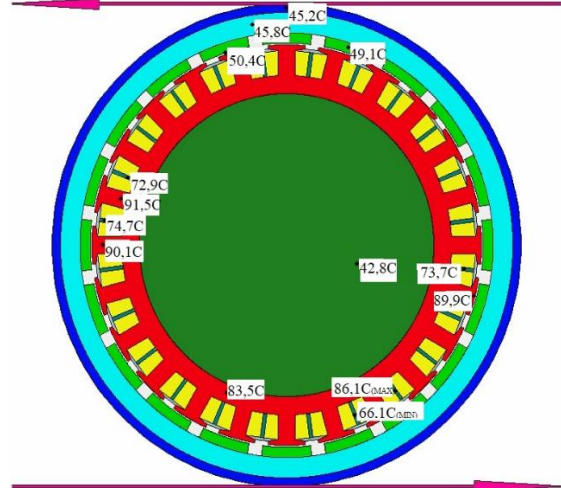
Şekil 5. Tekerlekiçi FDAM toplu parametrelili ısı dağılım devre modeli

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

Tablo 3. Tekerlekiçi FDAM ısı dağılım devre modeli parametreleri

Parametre	Açıklama
	Termal direnç
	Ara yüz direnci
	Isı yayılımı direnci
	Radyasyon direnci
	Güç kaybı
	Düğüm noktası
	Sıcaklık farkı
	Güç akışı

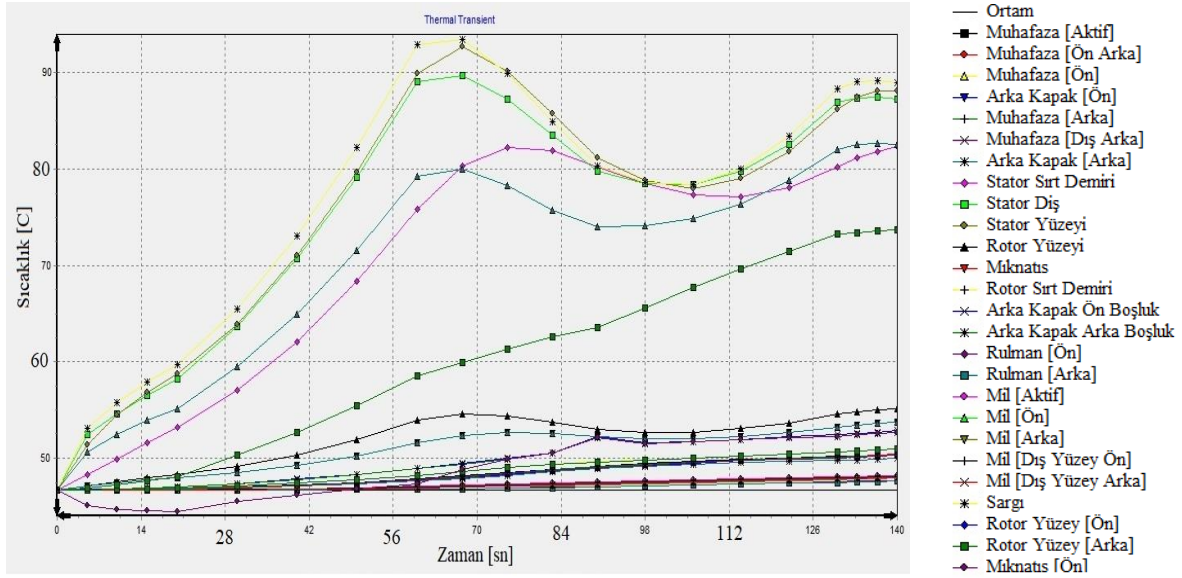
Şekil 5'de verilen toplu parametrelili ısı dağılım devre modeli üzerinde ısı düğüm noktaları ve bunlara bağlı olan motor parçalarının sıcaklık değerleri verilmiştir. Bu ısı devre modelinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6'daki ısı dağılımların incelenmesi gerekebilir. Tekerlekiçi FDA motorun radyal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



Şekil 6. Tekerlekiçi FDAM radyal geometri ısı dağılımı

Gerek ısı dağılım devre modelinde gerekse radyal geometri ısı dağılımında görüldüğü üzere motorun genelinde ortalama değerler olarak  $92^{\circ}\text{C}$ 'nin geçilmediği, sadece manyetik akının yoğun olduğu oluk dışlarında  $91,5^{\circ}\text{C}$  değerine ulaştığı görülmektedir. Benzetim modelinde kullanılan prototipin rotoru için seçilen NdFeB38 sürekli mıknatısının çalışma sıcaklığı  $80^{\circ}\text{C}$  dir. Isı dağılım devre modelindeki sabit mıknatıs üzerindeki çalışma ortalama sıcaklığının  $49,1^{\circ}\text{C}$  civarında ve yüzey sıcaklığının  $77,61^{\circ}\text{C}$  olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık değeri NdFeB\_38H mıknatısının manyetik bozulmasının 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.

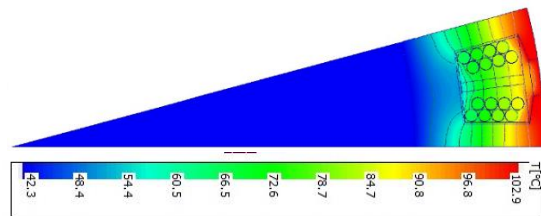




Şekil 7. Tekerleğiçi FDA motoru zamansal ısı dağılımı

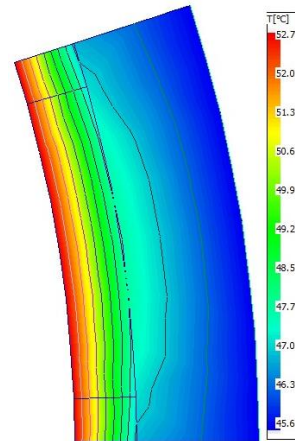
Şekil 7’deki zamansal ısı dağılımına baktığımızda sargılar ve stator yüzeyindeki sıcaklık değerlerinin ani bir artış gösterip 84. saniyeden sonra rejime girdiği ve ulaştığı sıcaklık değeri etrafında salınımlar yaptığı görülmüştür. Rotor yüzeyi ve sabit mıknatısların ise zaman değişimiyle doğru orantılı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

Şekil 8’de tekerleğiçi FDAM stator kesiti ısı 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. Tekerleğiçi FDAM stator kesiti ısı dağılımı

Sırt demirine ait Şekil 9’daki rotor kesiti ısı dağılımında sabit mıknatısların hava aralığına yakın olan bölgelerinde yüksek sıcaklıklara çıkarken, sırt demirine yakın olan bölgelerde 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.



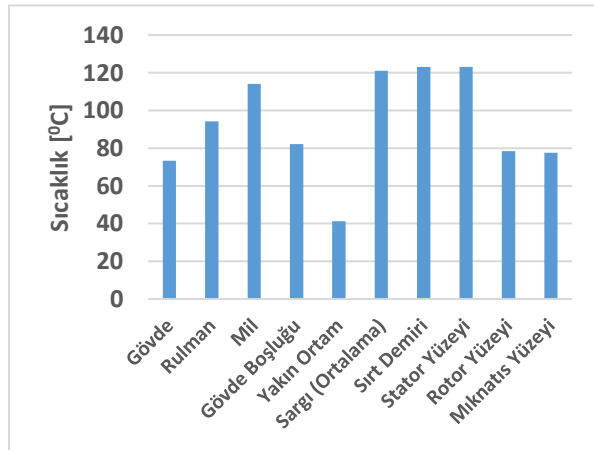
Şekil 9. Tekerleğiçi FDAM rotor kesiti ısı dağılımı

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

**Tablo 4.** Termal analiz sonucu

Sıcaklık Ölçüm Bölgesi	Sıcaklık [ °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’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 içinde çalışabilecek malzemelerdir. Burada özellikle sabit mıknatısların maruz kaldığı sıcaklık değeri manyetik bozuluma uğramaması bakımından önem arz etmektedir. Şekil 10’da Motor-Cad yazılımı ile yapılan benzetim sonuçlarının karşılaştırılması 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

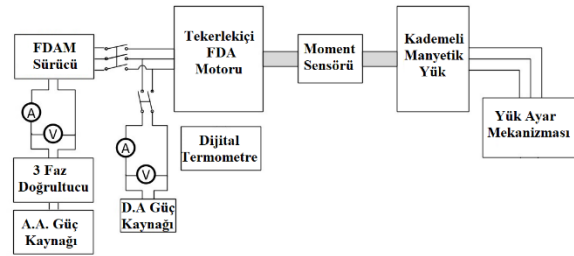
Yüksek sıcaklık durumu FDAM için sabit mıknatısların bozulmasına ve yalıtkan malzemelerin özelliklerini yitirmesinin yanı sıra bakır kayıplarının artmasına neden olur. Sargılardaki bu ısı motorun

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 artışı yöntemi kullanılmıştır. Direnç artışı 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 artışı karakteristiği dikkate alınarak, ilk ve son direnç oranlarından sargıların ulaştığı ortalama sıcaklık değeri Eşitlik 8 ile belirlenir [12,13].

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

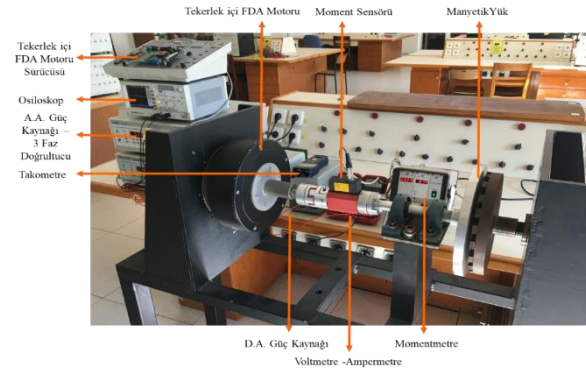
Burada  $\theta_1$  soğuk durumdaki sargı sıcaklığı,  $\theta_2$  ısınma deneyi sonundaki sargı sıcaklığı,  $R_1$   $\theta_1$  sıcaklığındaki sargı direnci,  $R_2$  ısınma deneyi sonundaki sargı direnci,  $k$  0°C’deki malzemenin sıcaklık katsayısıdır.

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 sonundaki 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 kullanılmıştır. 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.

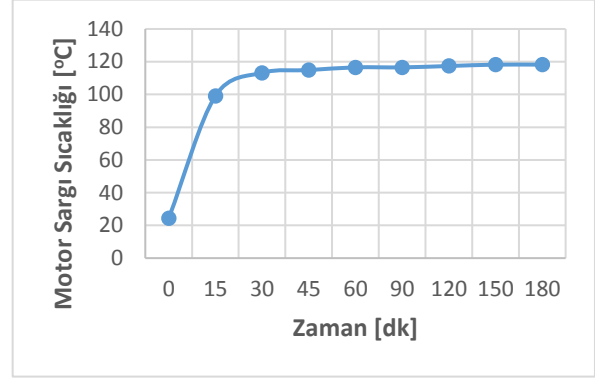


Şekil 12. Tekerleğiçli FDAM ısınma deneyi düzeni

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 parametrelili devre modeliyle birlikte sabit miktatların bozunuma uğramadan çalışma gösterecekleri yargısına erişilebilir. Bunun yanında sargı yalıtımında kullanılan malzemenin B yalıtım sınıfına sahip olması gerekliliğide doğrulanmış olmaktadır.

#### IV. SONUÇLAR

Isıl etki tekerleğiçli FDAM performansına etki eden önemli parametrelerden birisidir. Bu tip yapıda olan elektrik motorlarında gövde içi soğutma için kullanılan pervane, gövde kanatçıkları gibi yapılar mekanik sınırlama nedeniyle tasarımlarda kullanılamamaktadır. Bu nedenden dolayı tekerleğiçli FDA motorlarda sıcaklık etkisinin iyi incelenmesi gerekmektedir. Motor parçaları üzerindeki ısıl etkileri imalattan önce gerekli şekilde incelenmeden üretimi yapılan tekerleğiçli FDA motorun kayıplarının öngörülme bir şekilde arttığı ve verimsiz bir çalışma durumu sergiler. Bununla birlikte yüksek ısıl etkiler tekerleğiçli FDAM sürekli miktatlarının 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 geçmesini kolaylaştırıp motorun çalışma ömrü azaltacaktır. Belirtilen bu olumsuzluklar, imalat sonucunda elde edilecek ısıl etkilerin önceden bilinmesine yardımcı olacak gerçekçi yaklaşımların önemini daha iyi anlamayı sağlamaktadır. Yardımcı mekanik soğutmaya imkan vermeyen tekerleğiçli FDA motorlarda sıcaklığın tasarım sırasında belirlenmesi, hem tasarımın değişmesine hemde malzeme seçimlerine etki etmektedir.

Bu çalışma, tekerleğiçli FDAM toplu parametrelili 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 ısı etkilerden zarar görmeyecek olduğu yargısına erişilmektedir. Şekil 6,8 ve 9'de verilen ısı dağılımlarında sıcaklık etkilerinin miktatsız yüzeyi ve stator dişleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Çalışmada belirlenen gerek stator sacları ve rotor çeliği, gerekse sabit miktatsızlar toplu parametrelili devre modeli ısı analiz sonuçlarında belirtilen sıcaklık değerleri içinde çalışabilecek malzemeler olduğu anlaşılmıştır.

Toplu parametrelili devre modeli ile eriştiğimiz sonuçlar doğrultusunda karar verilen malzemelerin gerçek ısı 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 parametrelili 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 sonuçlarını kullanarak gerçekçi yaklaşımlarda 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](http://www.emo.org.tr/ekler/2095bad7034daef_ek.pdf) (17.06.2018)
- [8] Motor sargı yalıtım sınıfları ve çalışma sıcaklıkları, [www.siemens.com.tr](http://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 Furçasız 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/medium-voltage/distribution-automation/misc/distribution-automation-handbook>
- [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/9fa937448521cc28c2256bf1002d7252/FM\\_SPAM150C\\_750637\\_ENbab\\_2010](https://library.e.abb.com/public/9fa937448521cc28c2256bf1002d7252/FM_SPAM150C_750637_ENbab_2010).
- [14] Hakola, T. (1982). Application guide for protection of synchronous machines, ABB Relays Erişim Adresi: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/motor-protection-and-control>.