



# Hafif Elektrikli Araçlar için Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması

Cemil Ocak<sup>1\*</sup>, Burak Yenipınar<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0001-6542-6350), [cemilocak@gazi.edu.tr](mailto:cemilocak@gazi.edu.tr)

<sup>2</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-5997-944X),  
[burak.yenipinar@ostimteknik.edu.tr](mailto:burak.yenipinar@ostimteknik.edu.tr)

(3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications June 11-13, 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.949092)

**ATIF/REFERENCE:** Ocak, C. & Yenipınar, B. (2021). Hafif Elektrikli Araçlar için Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 228-233.

## Öz

Hafif elektrikli araçlarda kullanılacak asenkron tahrik motorlarının (ATM) hız, moment ve güç değerleri, kullanımının amaçlandığı bölgedeki sürüş çevrimine bağlı olarak kalkış ve fren yapma sayısı, hız limiti, ivme ihtiyacı, toplam araç ağırlığı gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Fakat endüstriyel tip sincap kafesli asenkron motorlar sürekli çalışma rejiminde ve anma şartlarında şebekeden çalışmaya uygun olarak tasarlanırlar ve elektrikli araçlar için kullanılacak asenkron tahrik motorlarından tasarım ve performans istekleri bakımından önemli ölçüde ayrışırlar. Bu çalışma, hafif elektrikli araçlarda kullanılmak üzere özelleştirilmiş, 48V DC batarya gerilimine sahip, 3,5kW gücünde ve S2-60dk çalışma rejiminde çalışabilecek bir ATM'nin tasarımını, sonlu eleman analizlerini (SEA), performans çıktılarını, prototip üretimi gerçekleştirilen motorun test sonuçlarını ve tasarım sonuçları ile karşılaştırmasını sunmaktadır. Çalışmada ihtiyaç duyulan motor özelliklerine yönelik temel boyutlandırma eşitlikleri, tasarlanan asenkron motorun fiziksel ölçüleri, stator ve rotor oluk ölçüleri, sarım özellikleri ve performans değerleri verilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motor öncelikle SEA analizlerine tabi tutularak farklı çalışma koşullarındaki akı dağılımları ve akım yoğunlukları verilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen prototip asenkron tahrik motoru sekiz farklı hız ve yük şartında test edilerek frekans, gerilim, akım, hız, moment, çıkış gücü, güç faktörü ve verim sonuçları tasarım sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde prototip motor farklı yük şartlarında ısı testlerine alınarak ısı artışı eğrileri elde edilmiş ve sunulmuştur. Test sonuçları ile tasarım sonuçları büyük oranda benzerlik göstermiş olup, tasarım sonuçları test sonuçları ile doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli Araç, Asenkron Motor, Sonlu Eleman Analizi, Test ve Doğrulama.

## Design and Implementation of Asynchronous Motor For Light Electric Vehicles

### Abstract

Speed, torque and power values of asynchronous traction motors (ATM) to be used in light electric vehicles vary depending on many parameters such as the number of starting and braking, speed limit, need for acceleration, total vehicle weight, depending on the driving cycle in the area where it is intended to be used. However, industrial type squirrel cage asynchronous motors are designed to operate from the mains in continuous running duty and rated conditions, and they differ significantly from asynchronous traction motors to be used for electric vehicles in terms of design and performance requirements. This study aims to design an asynchronous traction motor to be used in light electric vehicles which has 48V DC battery voltage, 3,5kW power and S2-60min short-time duty. Finite element analysis (FEA), performance outputs, test results of the prototype motor have been carried out with comparative results. Basic sizing equations for the required motor properties, physical dimensions of the designed asynchronous motor, stator and rotor slot dimensions, winding properties and performance values are given in the study. The designed motor is firstly subjected to FEA analyses and flux distributions and current densities in different operating conditions are given. The prototype asynchronous traction motor was tested under eight different speed and load conditions, and the results of frequency, voltage, current, speed, torque, output power, power factor and efficiency were compared with the simulation results. Similarly, the prototype motor was taken to temperature rise tests under different load conditions, and temperature curves were obtained and presented. The test results and the design results were substantially similar, and the design results were confirmed by the test results.

**Keywords:** Electric Vehicle, Induction Motor, Finite Element Analysis, Test and Verification.

\* Sorumlu Yazar: Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6542-6350, [cemilocak@gazi.edu.tr](mailto:cemilocak@gazi.edu.tr)

## 1. Giriş

Batarya teknolojilerinde yaşanan ilerleme ve kWh başına ortalama batarya maliyetlerin giderek düşmesi elektrikli araçlara olan talebi ve kullanımı giderek yaygınlaştırmaktadır [1, 2]. Gerek üreticilerin giderek ağırlaşan emisyon standartlarına uyum çabası, gerekse kullanıcıların elektrikli araçların sunduğu eşsiz moment karakteristiğine ve çevreciliğine olan talebi, elektrikli araçlarda önemli bir ivme yakalanmasına katkı sağlamıştır. Giderek artan popüleritesine paralel olarak son zamanlarda hibrit ve elektrikli araç teknolojilerinde yenilikçi çalışmaların sayısı hızla artmaktadır [3-5].

Elektrik motorları, elektrikli araçların en önemli unsurlarından biridir [6]. Literatürde her ne kadar çok sayıda farklı elektrik motoru türünün elektrikli araçlarda kullanıldığı ifade edilse dahi [3, 7], günümüz elektrikli araçlarının hemen hemen tamamında Asenkron Motorlar (IM) ve Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) yaygın olarak kullanılmaktadır. SMSM'in moment yoğunluğu ve verim değerleri asenkron motorlara kıyasla daha yüksektir [8]. Bununla birlikte, SMSM'lerin rotorlarında kullanılan nadir element içeren mıknatısların yüksek maliyeti ve fiyat istikrarsızlığı üreticiler için önemli bir sorun olarak değerlendirilmektedir [2, 9]. Benzer şekilde sıcaklığa bağlı demagnetizasyon riski SMSM'lerin en önemli dezavantajıdır [10]. Sürekli yüksek performanslı kullanım sonucunda SMSM sıcaklığı artmakta ve sıcaklık artışını sınırlamak için etkin sıvı soğutma kullanılmaktadır. Sıvı soğutma tedbirine paralel olarak motor sürücüsü üzerinden sıcaklığa bağlı akım sınırlama yaygın olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorlar ise basit yapıları, dayanıklılığı, düşük maliyetleri, hız kontrol tekniklerinin gelişmişliği ve SMSM'lere göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kabiliyeti sebebiyle elektrikli araçlarda tahrik motoru tercih edilmektedir [5, 11, 12]. Asenkron motorlarda demagnetizasyon riskinin olmaması, stator sargılarının izolasyon sınırları dahilinde çok daha yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmelerine imkan sağlamaktadır. Her ne kadar yüksek sıcaklık dayanımı söz konusu ise de, elektrikli otomobillerde sürekli çıkış gücü süresini arttırmak için yine sıvı soğutma ile tercih edilmektedirler. Elektrikli otomobil ve gelişmiş türevlerinin aksine hafif elektrikli araçlarda (>1kW, <15kW) ise sıvı soğutma gerek maliyet, gerek se soğutma sisteminin beraberinde getireceği ek ünitelerin yapısal entegrasyon sorunu sebebiyle nadiren kullanılmaktadır. Hafif elektrikli araçlarda sıvı soğutma bulunmaması, bu araçlarda SMSM'lerin kullanılmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Bu sebeple hafif elektrikli araçların büyük çoğunluğunda asenkron motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Endüstriyel tip bir asenkron motorun sadece stator sargısının değiştirilerek elektrikli araçlarda kullanıma uygun hale getirilebileceği sıklıkla karşılaşılan yanlış değerlendirmelerden biridir. Elektrikli araçlarda kullanılacak tahrik motorlarının tasarımı farklı bir konudur. Temel olarak, stator ve rotor geometrileri minimum motor hacminde maksimum momenti sağlayabilecek şekilde optimize edilmeli, geniş bir hız-moment aralığında maksimum verim ve güç katsayısı sağlamalı ve motor boyutlandırılması soğutma sisteminin sürüş çevrimi ile olan ilişkisi sonucunda ortaya çıkacak ısı artışının limitlere uygun olup olmadığına göre gerçekleştirilmelidir [5].

Bu çalışmada hafif elektrikli araçlarda kullanılmak üzere özelleştirilmiş, 48V DC batarya gerilimine sahip, 3,5kW gücünde ve S2-60dk çalışma rejiminde çalışabilecek bir ATM'unun

tasarımını, sonlu eleman analizlerini (SEA), performans çıktılarını, prototip üretimi gerçekleştirilen motorun test sonuçlarını ve tasarım sonuçları ile karşılaştırmasını sunmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Asenkron Tahrik Motorunun Boyutlandırılması

Asenkron motorların tasarımında boyutlandırma hesapları kritik öneme sahiptir. Motorun temel boyutlandırma eşitlikleri [13]'de verildiği gibi hesaplanabilir.  $C_0$  (Esson katsayısı) olup motorun temel boyutlarını elde etmek için kullanılan hacim kullanım faktörüdür ve Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanır.

$$C_0 = \frac{60 \times S_0}{D_{ic}^2 \times L \times n_0} \quad (1)$$

Verilen eşitlikte  $S_0$  hava aralığı görünür gücü,  $D_{ic}$  Stator iç çapı,  $L$  motor nüve uzunluğu,  $n_0$  motorun senkron hızını ifade etmektedir. Eşitlik (1) yardımıyla  $C_0$  elde edildikten sonra motorun aktif hacmi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$D_{ic}^2 \times L = \frac{60 \times K_E \times P_n}{C_0 \times L \times n_0 \times \cos \varphi_{1n}} \quad (2)$$

Burada,  $K_E$  zıt emk katsayısı,  $P_n$  motor anma gücü,  $\cos \varphi_{1n}$  motorun anma şartlarındaki güç faktörü değeridir. Genel boyutlandırma hesaplamalarında  $\lambda$  kutup adımı için bir değer belirlenmesi geleneksel bir hesaplama yaklaşımdır ve aşağıdaki Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\lambda = \frac{2 \times L \times p_1}{\pi \times D_{ic}} \quad (3)$$

Verilen eşitlikte  $p_1$  kutup çifti sayısını ifade etmektedir. Motorun aktif hacmi ( $D_{ic}^2 \times L$ ) hesaplandıktan sonra  $D_{ic}$  ve  $L$  değerlerinin ayrıştırılması gerekmektedir. Yukarıda verilen Eşitlik (2) ve Eşitlik (3)'e göre stator iç çapı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$D_{ic} = \sqrt[3]{\frac{2 \times p_1 \times K_E \times P_n}{\pi \times \lambda \times C_0 \times f_1 \times \eta_n \times \cos \varphi_{1n}}} \quad (4)$$

Burada  $f_1$  motor anma frekansını,  $\eta_n$  motor verimini ifade etmektedir. Anma şartlarındaki motor verimi ve güç faktörü değerleri geçmiş tasarım tecrübeleri doğrultusunda seçilmektedir. Stator iç çapı hesaplanan motorun stator dış çapı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$D_{dis} = D_{ic} + 2 \times (h_s + h_{cs}) \quad (5)$$

Verilen Eşitlik (5)'de,  $h_s$  stator oluk yüksekliğinin yaklaşık değeri,  $h_{cs}$  ise stator boyunduruk mesafesine karşılık gelmektedir. Stator iç ve dış çapı hesaplanan motorun nüve uzunluğu Eşitlik (6)'da görüldüğü gibi hesaplanabilir.

$$L = \lambda \times \frac{\pi \times D_{ic}}{2 \times p_1} \quad (6)$$

Motorun hava aralığı uzunluğu elektrik motorunun performansını etkileyen önemli bir parametredir ve rotor çevresel hızı limitleri içerisinde Eşitlik (7)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$Hava \text{ Aralığı} \approx (0.1 + 0.012 \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} (m) \quad (7)$$

Bu bölümde motorun stator dış ve iç çapı, nüve uzunluğu ve hava aralığı uzunluğu gibi motorun temel boyutlandırma eşitlikleri paylaşılmıştır. Daha detaylı tasarım eşitlikleri [13-14] kaynaklarda verilmektedir.

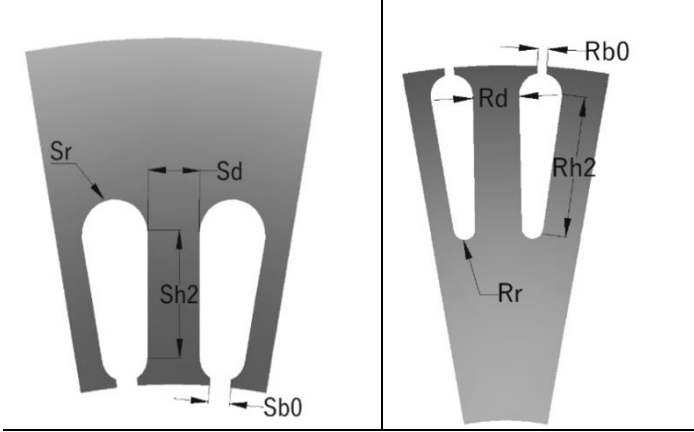
## 2.1. Tasarlanan Asenkron Tahrik Motoru ve Özellikleri

Çalışmada golf, forklift, personel taşıma ve hizmet araçları gibi hafif elektrikli araçlarda kullanıma uygun bir asenkron tahrik motoru tasarlanmıştır. Tasarlanan ATM'na ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Nüve kayıpları, asenkron motorun kayıpları içerisinde önemli bir yere sahiptir. Nüve kayıplarını azaltmak için ise düşük

Tablo 2. Asenkron motorun özellikleri

Temel Motor Özellikleri		Stator ve Rotor Oluk Ölçüleri	
Stator Dış Çap (mm)	210	Sb0 (mm)	2.5
Stator İç Çap (mm)	135	Sd (mm)	6
Rotor Dış Çap (mm)	134	Sr (mm)	3.4
Rotor İç Çap (mm)	60	Sh2 (mm)	13.2
Nüve Uzunluğu (mm)	90	Rb0 (mm)	1
Anma Gerilimi (V)	30	Rd (mm)	4
Anma Hızı (1/dk)	3010	Rh2 (mm)	14
Anma Gücü (kW)	3,5	Rr (mm)	1.15
Bağlantı Tipi	Δ	Stator Oluk Sayısı	36
Sipir Sayısı	7	Rotor Oluk Sayısı	40
Paralel Kol Sayısı	2	Rotor Bar Malzemesi	Alüminyum
Adım	9	Kayık (°)	9
Stator Geometrisi		Rotor Geometrisi	

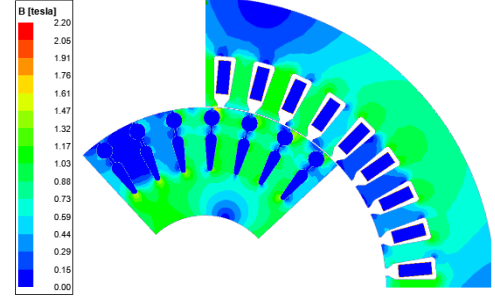


Nüve kayıpları, asenkron motorun kayıpları içerisinde önemli bir yere sahiptir. Nüve kayıplarını azaltmak için ise düşük W/kg kayıplı silisli saclar kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda motor veriminin doğrudan araç menzili ile ilişkili olduğu değerlendirildiğinde, ATM'de kullanılacak nüve malzemesinin düşük W/kg kayıp özelliğine sahip olması beklenmektedir. Bu sebeple bu çalışmada M330-50A kullanılmıştır. Bununla birlikte kayıplar içerisinde en büyük paya sahip olan stator ve rotor bakır kayıpları için yüksek doluluk oranı sunan oluk geometrileri elde edilmiştir.

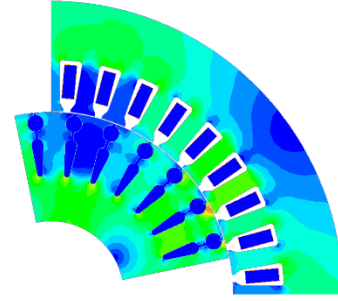
## 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

### 3.1. Sonlu Eleman Analizi Sonuçları

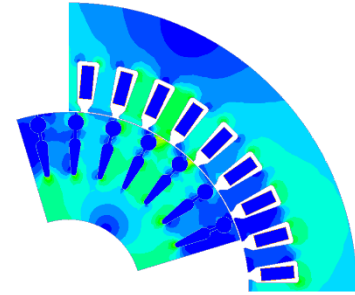
Tasarımı gerçekleştirilen ATM'nun elektromanyetik sonlu eleman analizleri ANSYS Maxwell yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.



(a)

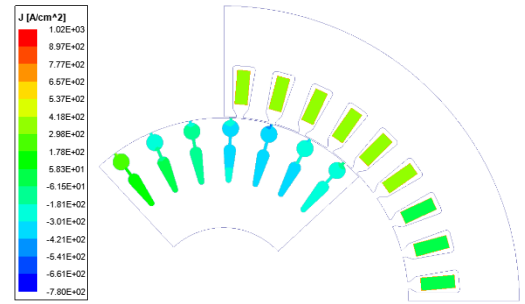


(b)

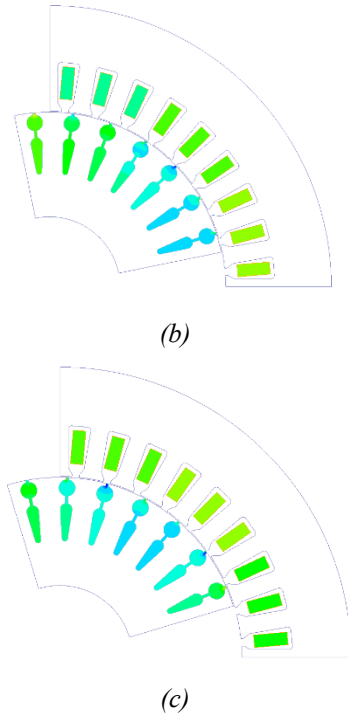


(c)

Şekil 1. Manyetik akı yoğunluğu (T) dağılımı, (a) Sabit tork bölgesi (33Hz), (b) Anma noktası (102Hz), (c) Sabit güç bölgesi (134Hz)



(a)



Şekil 2. Akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ ), (a) Sabit tork bölgesi (33Hz), (b) Anma noktası (102Hz), (c) Sabit güç bölgesi (134Hz)

Yapılan analizler geçici durum analizleri olup, sabit moment bölgesi, anma hızından daha düşük hızlarda, anma momentini üretebilmesi beklenmektedir. Şayet anma noktasındaki akı yoğunluğu doyum bölgesine yakın seçilir ise, kalkış anından itibaren üretilebilecek maksimum moment sınırlı olacaktır. Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen, üç farklı çalışma noktasındaki analiz sonuçları incelendiğinde motordaki ortalama manyetik akı yoğunluğu değerinin 1,3 T, stator ve rotor sargılarındaki akım yoğunluğunun ise maksimum  $3,5 A/mm^2$  civarında olduğu görülmektedir. Bu değerler, nüvenin doyum bölgesinde çalışmadığını göstermekle birlikte motorun anma momentinden fazlasını üretme kabiliyeti olduğunu da göstermektedir.

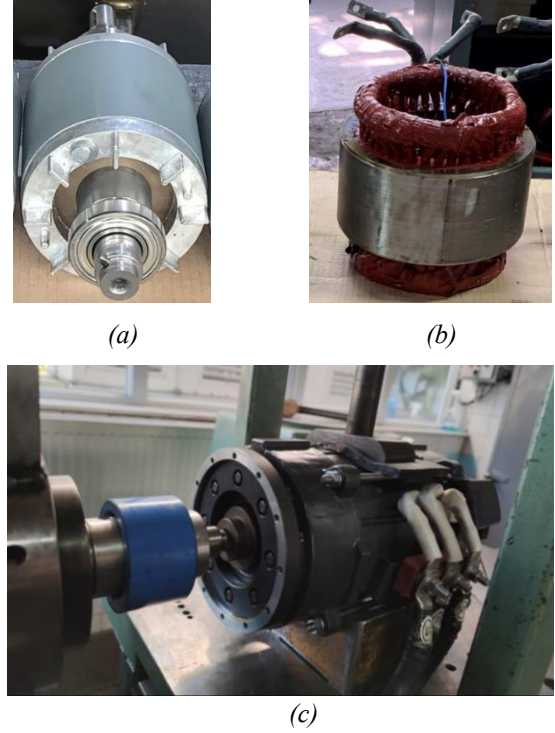
Elektrikli araçlarda kullanılan ATM’lerinin, sabit moment bölgesinde yani anma hızından daha düşük hızlarda, anma momentini üretebilmesi beklenmektedir. Şayet anma noktasındaki akı yoğunluğu doyum bölgesine yakın seçilir ise, kalkış anından itibaren üretilebilecek maksimum moment sınırlı olacaktır. Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen, üç farklı çalışma noktasındaki analiz sonuçları incelendiğinde motordaki ortalama manyetik akı yoğunluğu değerinin 1,3 T, stator ve rotor sargılarındaki akım yoğunluğunun ise maksimum  $3,5 A/mm^2$  civarında olduğu görülmektedir. Bu değerler, nüvenin doyum bölgesinde çalışmadığını göstermekle birlikte motorun anma momentinden fazlasını üretme kabiliyeti olduğunu da göstermektedir.

Asenkron motorların kayıplarının yaklaşık olarak %40-%70’i rotor ve stator iletim kayıplarından meydana gelmekte ve rotor ve stator akım yoğunluğunun karesi ile orantılı olarak değişmektedir. Asenkron motorlarda bu kayıplar ısı olarak açığa çıkmaktadır. ATM’nun IC 410 soğutma tipinde ve S2-60 dakika çalışma rejimine uygun olarak tasarlandığı değerlendirildiğinde, ısı artışını kontrol altında tutmak için her üç çalışma bölgesinde de akım yoğunluklarının kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir.

### 3.2. Test Sonuçları ve Karşılaştırma

Simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen ATM tasarımı, test sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmak için prototip olarak üretilmiştir. Ayrıca, elektrikli araçlarda kullanılan tahrik motorları geniş bir hız aralığında çalıştığından, motorun farklı hız ve yük durumundaki verim, akım, güç faktörü gibi performans

parametreleri gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilerek tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Prototip üretimi ve testi yapılan ATM, (a) rotor, (b) stator, (c) test.

Test süresince motor durdurulmadan ve yaklaşık olarak aynı akım değerlerinde kalacak şekilde belirlenen noktalarda dinamometre ile yüklenmiş, performans değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Belirlenen çalışma noktaları sabit güç bölgesini, anma noktasını ve alan zayıflatmanın devrede olduğu sabit güç bölgesi kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Farklı hız ve yük durumundaki test sonuçları ile tasarım çalışması sonucunda elde edilen performans değerleri Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2 incelendiğinde, tasarım ve test sonuçlarının farklı çalışma noktalarında birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tasarımda elde edilen güç faktörlerinin test sonuçlarına kıyasla daha iyimser olduğu, bununla birlikte daha düşük akımlar elde edildiği görülmektedir. Geniş bir hız aralığında yüksek verimlilik ve güç katsayısı sunması beklenen motorun bu değerleri karşıladığı görülmekle birlikte, özellikle anma çalışma noktasına yakın bölgelerde en yüksek verimlilik elde edilmektedir. Farklı aktarma oranı ve motor anma hızının söz konusu olabileceği farklı uygulamalarda, aracın sürüş profili dikkate alınarak ağırlıklı olarak çalıştığı hız ve etkin moment değerlerine göre anma noktası revize edilmelidir.

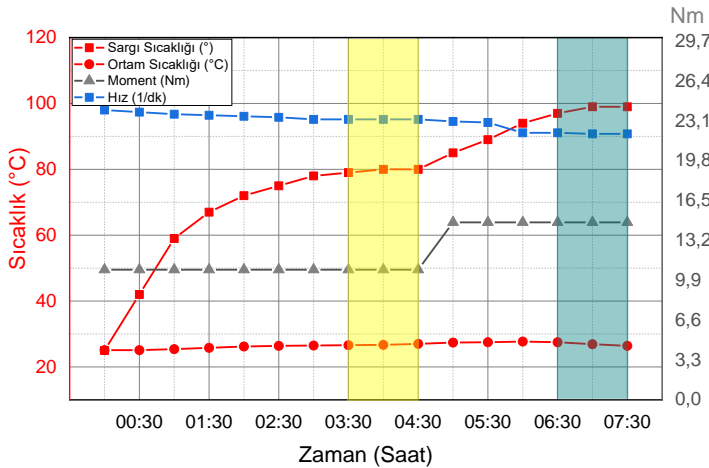
ATM’nin diğer önemli bir testi ise sargı sıcaklık artışının elde edilmesidir. Tasarlanan motor, sürüş profilinde elde edilen etkin moment değerini belirtilen izolasyon sınıfının izin verdiği sıcaklık artışı limiti içerisinde sürekli olarak sağlamalıdır. S2-60 dakika çalışma rejiminde 102Hz ve 3,5kW gücünde tasarlanan motorun sabit güç bölgesindeki sürekli çalışma durumundaki gücünü tespit etmek için sıcaklık artışı testi yapılmıştır. Soğutma etkinliğinin azaltıldığı senaryoyu dikkate almak için motor anma hızının 2/3 ‘ünde anma gücünü sağlayabilecek şekilde yükü kademe kademe arttırılmıştır.



Tablo 2. Tasarım ve test sonuçları

	Frekans (Hz)	Gerilim (V)	Akım (A)	Devir (1/dk)	Moment (Nm)	Çıkış Gücü (kW)	Güç Faktörü	Verim (%)
Tasarım	33	9,70	91,43	935,6	10,92	1,07	0,871	79,97
Test		9,70	95,04	933	11	1,07	0,848	79,02
Tasarım	50	15,00	89,89	1450	11,06	1,68	0,857	83,94
Test		15,00	91,38	1455	11	1,68	0,828	85,46
Tasarım	67	20,40	88,47	1963	11,04	2,27	0,847	85,73
Test		20,40	90,40	1968	11	2,27	0,812	87,52
Tasarım	75	22,60	88,79	2202	11,01	2,54	0,848	86,18
Test		22,60	90,87	2206	11	2,54	0,815	87,62
Tasarım	95	28,30	89,31	2801	11	3,23	0,848	87,01
Test		28,30	92,23	2800	11	3,23	0,813	87,88
Tasarım	102	30,00	90,87	3010	11,1	3,5	0,85	87,21
Test		30,00	91,78	3009	11	3,47	0,823	88,41
Tasarım	117	30,00	89,30	3452	9,68	3,5	0,862	87,5
Test		30,00	92,82	3444	9,7	3,5	0,836	86,8
Tasarım	134	30,00	88,48	3953	8,45	3,5	0,868	87,7
Test		30,00	95,04	3962	8,5	3,53	0,825	86,64

Zamana karşılık motor momentinin, motor hızının, sarğı ve ortam sıcaklığının değişimi aşağıdaki Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Sıcaklık Artışı ve Sürekli Gücün Bulunması

Yapılan testte, motorun momentini başlangıçta 11 Nm olarak belirlenmiştir. 270 dakika sonunda motorun 80°C’de ısıl rejime girdiği tespit edilerek moment değeri 14,7 Nm’ye yükseltilerek teste devam edilmiştir. Devamındaki 180 dakika sonunda motor artan yükünde yeni bir sıcaklık noktasında ısıl rejime girdiği gözlemlenmiş ve test bitirilmiştir. Test sonucunda motorun sürekli çalışma (S1) gücündeki momentini, S2-60 dakika gücündeki momentinden yaklaşık olarak %16 daha düşük olarak elde edilmiştir. Hedeflenen sıcaklık artışı 105 °C’ olduğundan motorun yükü daha fazla artırılmadan test tamamlanmıştır. Şayet izin verilen sıcaklık artışı 125 °C’ olarak belirlenir ise motorun yükü bir miktar daha artırılabilir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, 48V DC batarya grubu kullanan hafif elektrikli araçlarda kullanılacak 102 Hz anma frekansında ve 3,5kW anma gücünde bir ATM’nun tasarımı ve uygulaması

gerçekleştirilmiştir. Hafif elektrikli araçlarda kullanım için özelleştirilmiş tasarıma sahip bir ATM’nun tasarım özellikleri, farklı çalışma noktalarındaki SEA analizleri sunulmuştur.

Tasarım çalışmaları sonucunda elde edilen motorun prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve farklı çalışma şartlarında test edilmiştir. Çalışma sonucunda tasarım ve test sonuçlarındaki fark kabul edilebilir düzeyde gerçekleşmiştir. Anma şartlarındaki motorun verimi tasarım sonucunda %87,21 olarak elde edilirken test sonuçlarında %88,41 olarak gerçekleşmiştir. Prototip üretimi gerçekleştirilen motorun farklı çalışma noktalarındaki tasarım-test karşılaştırması için anma noktası (102Hz) dışında 33, 50, 67, 75, 95, 117 ve 134 Hz değerlerinde performans değerleri elde edilmiştir. Tüm çalışma noktalarında tasarım ve test sonuçlarının büyük oranda yakınlık gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, S2-60dk çalışma rejiminde 105°C’ olarak hedeflenen sıcaklık artışı değeri için, motorun sürekli çalışma gücü yine testler ile elde edilmiştir. 105°C’ sıcaklık artışı veren sürekli çalışma gücü yaklaşık olarak 3kW olarak elde edilmiştir. Böylelikle IC 410 tipi soğutma metoduna sahip S2-60dk çalışma rejimindeki bir asenkron tahrik motorunun, sürekli sağlayabileceği çıkış gücü, S2-60dk çıkış gücünün yaklaşık %84’ü olarak bulunmuştur.

Çalışmanın devamında prototip üretimi gerçekleştirilen ATM’nun S2-5dk ve S2-2dk şartlarında maksimum sürekli çıkış gücü ve momentini değerlerinin elde edilmesi planlanmaktadır.

#### 5. Teşekkür

Yazarlar, çalışmaya katkılarından dolayı ELSAN Elektrik San. ve Tic. A.Ş.’ye teşekkür ederler.

#### Kaynakça

- [1] Huda, M., Aziz, M., & Tokimatsu, K. (2019). The future of electric vehicles to grid integration in Indonesia. Energy Procedia, 158, 4592-4597.
- [2] Boldea, I., Tutelea, L. N., Parsa, L., & Dorrell, D. (2014). Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(10), 5696-5711.

- [3] Dorrell, D. G., Knight, A. M., Popescu, M., Evans, L., & Staton, D. A. (2010, September). Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. In 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (pp. 3352-3359). IEEE.
- [4] Çiçek, A., & Erdinç, O. (2019). PV-Batarya Hibrit Sistemi İçeren Elektrikli Araç Otoparkının Şarj Yönetimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 466-474.
- [5] Terras, J. M., Neves, A., Sousa, D. M., & Roque, A. (2010, September). Estimation of the induction motor parameters of an electric vehicle. In 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Sokolov, E. (2017, June). Comparative study of electric car traction motors. In 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA) (pp. 348-353). IEEE.
- [7] De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., & Leijon, M. (2011). Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 61(2), 475-484.
- [8] Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B., & Guglielmi, P. (2012). Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. *IEEE Transactions on industry applications*, 48(6), 2322-2332.
- [9] Cui, J., Kramer, M., Zhou, L., Liu, F., Gabay, A., Hadjipanayis, G., ... & Sellmyer, D. (2018). Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. *Acta Materialia*, 158, 118-137.
- [10] Ruoho, S., Kolehmainen, J., Ikaheimo, J., & Arkkio, A. (2009). Interdependence of demagnetization, loading, and temperature rise in a permanent-magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(3), 949-953.
- [11] Bitar, Z., & Al Jabi, S. (2014). Studying the performances of induction motor used in electric car. *Energy Procedia*, 50, 342-351.
- [12] Ulu, C., Korman, O., & Kömürgöz, G. (2017, July). Electromagnetic and thermal analysis/design of an induction motor for electric vehicles. In 2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE) (pp. 6-10). IEEE.
- [13] Boldea, I. (2020). *Induction machines handbook*. CRC press.
- [14] Sen, P. C. (2007). *Principles of electric machines and power electronics*. John Wiley & Sons.