



Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnet-mass and torque-ripple for electric vehicles

Hatice Kurnaz Araz^{1,2} , Murat Yılmaz^{1*}

¹Electrical Engineering Department, Istanbul Technical University, ITU, 34469 Maslak, Istanbul, Turkey

²Cadem CAD/CAM Support Center and Computer Co., 34762 Uskudar, Istanbul, Turkey

Highlights:

- Design and production procedure of an interior permanent magnet synchronous motor for EVs
- Design of high efficiency and power density PMSM with reduced permanent magnet-mass and cost
- Novel design approaches to reduce torque ripple and cogging torque

Keywords:

- Electric vehicles
- Permanent magnet synchronous motor
- Finite element analysis
- Torque ripple

Article Info:

Research Article

Received: 13.09.2018

Accepted: 04.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.458515

Acknowledgement:

This study is supported by Cadem CAD/CAM Support Center and Computer Co.

Correspondence:

Author: Murat Yılmaz
e-mail: myilmaz@itu.edu.tr
phone:+90 212 285 67 69

Graphical/Tabular Abstract

In the near future, the reduction in petroleum and emission restrictions, especially with the development of batteries, electric motors and power electronics technologies, will inevitably lead to further influence of EVs.

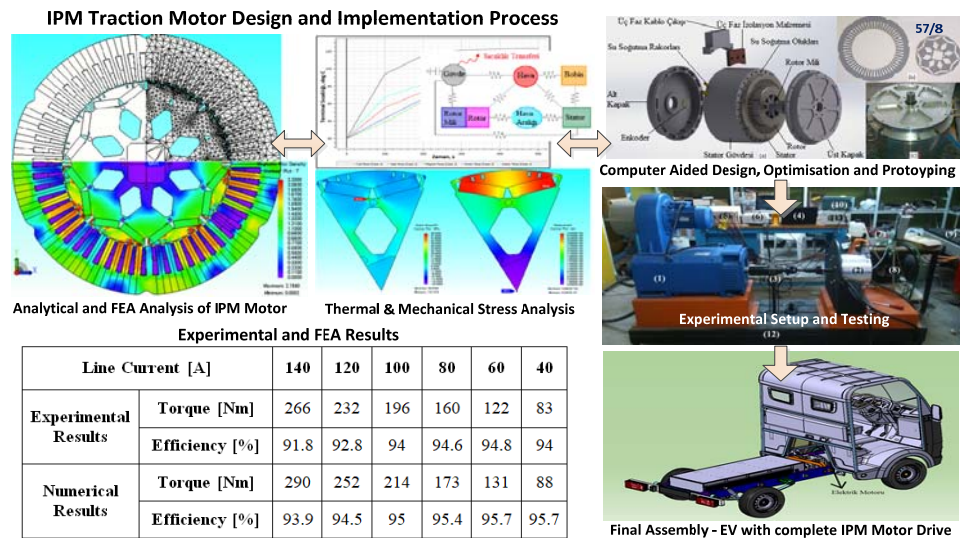


Figure A. IPM traction motor design and implementation process, experimental and FEA results

Purpose: The aim is to design and implement internal permanent magnet synchronous motor with high efficiency and power density which is the main part of the drive system of electric vehicles

Theory and Methods:

The main parameters of the electric motor were determined by following the flowchart which is covering the design process. Analytical and numerical (FEA) analyzes were carried out and analysis deepened under various operating conditions. The effect of space harmonics, radial forces and cogging torque are reduced due to the unbalanced winding structure created by using the single slot number (57-slot/8-pole). Throughout the design process, optimizations on the structure, size and position of the permanent magnets have resulted in minimizing the magnet amount to provide the required performance and torque-speed characteristic. Thermal and structural strength analyzes of the motor were made.

Results:

As a result of detailed analytical, numerical analysis and optimizations, the IPM motor was produced and experiments have been made under different operating conditions in the test-setup. The optimized motor was mounted on the EV. The performance and road tests on the EV were successfully carried out. IPM traction motor design and implementation process, experimental and FEA results are shown in Figure A.

Conclusion:

In this study, considering the criteria of low torque ripples, high efficiency and power density requirements in the wide torque-speed region, the design of 57/8 unbalanced winding IPM motor with reduced permanent magnet ratio for electric vehicles were successfully realized.



Elektrikli araçlar için mıknatıs oranı ve moment titreşimi azaltılmış yüksek verimli sürekli mıknatıslı senkron motor tasarım süreci ve gerçekleştirilmesi

Hatice Kurnaz Araz^{1,2} , Murat Yılmaz^{1*} 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

²Cadem CAD/CAM Destek Merkezi ve Bilgisayar San. Tic. A.Ş., 34762, Üsküdar İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Elektrikli araçlar için gömülü mıknatıslı senkron motorun tasarım ve üretim süreci
- Sürekli mıknatıs oranı ve maliyeti azaltılmış yüksek verim ve güç yoğunluklu motor tasarımı
- Moment dalgalanması ve vuru momentinin azaltılmasına yönelik özgün tasarımsal yaklaşımlar

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 13.09.2018
Kabul: 04.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.458515

Anahtar Kelimeler:

Elektrikli araçlar,
sürekli mıknatıslı senkron
motorlar,
sonlu elemanlar analizi,
moment titreşimi

ÖZET

Yakın gelecekte, petrol ürünlerine bağımlılığın azaltılması talebi, emisyon kısıtlamaları, batarya, motor ve güç elektroniğindeki gelişmelerle elektrikli araçların günlük yaşantımıza daha fazla girmesi kaçınılmaz olup, hem otomotiv sektörünün hem de akıllı şebekelerin önemli bir unsuru olacaktır. Bu kapsamda, elektrikli araçların tahrik sisteminin ana parçası olan yüksek verim ve güç yoğunluklu, düşük moment dalgalanmalı, değişken hızlarda ve mıknatıs oranı azaltılmış gömülü mıknatıslı senkron motorun tasarımı ve gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Tasarım sürecini kapsayan akış diyagramı oluşturulmuş ve araç gereksinimlerinden motorun ana boyutları belirlenmiştir. Detaylı analitik analizlerle motorun temel büyüklüklerinin, rotor ve stator boyutlarının, sargı yapısının belirlenmesi süreci uygulanmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Statorda, tek ve yüksek oluk sayılı simetrik olmayan sargı yapısıyla uzay harmonikleri, radyal kuvvetler ve vuru momentinin etkisinin azaltılmasına katkı sağlanmıştır. Özgün olarak tasarıma özel 57-slot/8-pole yapıyla moment titreşimleri ve vuru momenti azaltılmış yüksek verimli motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Rotor ve mıknatısların yapısı, boyutları ve yerleşiminde yapılan optimizasyonlarla en önemli maliyet unsuru olan mıknatıs miktarının, moment-hız gereksinimleri ve performansı sağlayacak şekilde minimuma indirilmesi sağlanmıştır. Motorun, termal ve yapısal dayanım analizleri yapıp prototip üretimi ve testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımda yapılan eniyilemelerle optimize edilen motor araca monte edilerek performans ve yol testleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnet-mass and torque-ripple for electric vehicles

H I G H L I G H T S

- Design and production procedure of an interior permanent magnet synchronous motor for electric vehicles
- Design of high efficiency and power density PMSM with reduced permanent magnet-mass and cost
- Novel design approaches to reduce torque ripple and cogging torque

Article Info

Research Article
Received: 13.09.2018
Accepted: 04.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.458515

Keywords:

Electric vehicles,
permanent magnet
synchronous motor,
finite element analysis,
torque ripple

ABSTRACT

In the near future, the reduction in petroleum and emission restrictions, especially with the development of batteries, electric motors and power electronics, will inevitably lead to the further influence of electric vehicles. In this study, it is aimed to design and implement interior permanent magnet synchronous (IPM) motor with high efficiency and power density. A flowchart covering the design process was developed focusing on the design of the IPM motor. The main dimensions of the machine to be designed are determined from the vehicle requirements. With the detailed analytical analyzes, the process of determining the basic dimensions of the motor and winding structure was applied and numerical analyses were carried out by the finite element method. The effect of space harmonics, radial forces and cogging torque are reduced due to the unbalanced winding created by using the single slot number (57-slot/8-pole). Throughout the design process, optimizations on the structure, size, and position of the magnets have resulted in minimizing the magnet amount to provide the required performance and torque-speed characteristic. Thermal and structural strength analyzes of the motor were made and prototype production and tests on the vehicle were successfully performed..

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: haticek@cadem.com.tr, myilmaz@itu.edu.tr / Tel: +90 212 285 67 69

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel içten yanmalı motora (İYM) sahip araçlarda, tüketilen yakıtın sadece küçük bir kısmı faydalı işe dönüştürülebilmekte olup şehir içi tüketimde verim yaklaşık olarak %16 civarında olmaktadır [1]. İYM'lerin verimsizliğine karşın elektrik motorunun %95'li verimlere rahatça ulaşabilmesi, çevre kirliliği ve petrol rezervi gibi konular araçların elektrikleştirilmesi konusunu gündeme getirmiştir. Elektrikli araçlar (EA); emisyonlardan kurtulma, verimlilik artışı, petrole karşı bağımsızlık, mekanik aksam, sessiz ve titreşimsiz çalışma gibi pek çok artılara sahipken hala gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan yönetmelik ve altyapı eksiklikleri, batarya teknolojileri ve maliyeti dolayısıyla ortaya çıkan kısıtlamalara sahiptir. Elektrik çekiş motor ve sürücü sistemleri ise EA'lara geçiş evresinde yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu, geniş moment-hız bölgesinde çalışma aralığı sayesinde talep edilen ve büyüyen ana teknolojilerden biridir [2-5]. Bu kapsamda EA'larda kullanılan elektrik motorları ve araştırmalar incelendiğinde yüksek verimlilik, yüksek moment/güç yoğunluğu oranı ve güç faktörü, düşük hacim ve ağırlık, sağlam yapı, yüksek verim ve güvenilirlik gibi üstünlüklerinden dolayı sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) ön plana çıkmakta olduğu görülmektedir. SMSM teknolojilerinin en büyük problemi ise, sürekli mıknatısların fiyatlarının yüksek olması, sıcaklığa olan duyarlılıkları ve aşırı yüklenme yeteneğinin mıknatısların karakteristiği ile sınırlı olmasıdır. Bu durum seri üretimde maliyetin yüksek olması, sıcaklıkla beraber performansın düşmesi sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Bu tip motorlarda sabit güç-hız aralığı rotor yapısına bağlı olup rotorun optimizasyonu sabit güç hız aralığını iyileştirebilmektedir [5-8]. Tasarım süreci boyunca rotorda bulunan mıknatısların boyutları ve konumu üzerine yapılacak optimizasyon çalışmaları ile sürekli mıknatıs miktarının gerekli performansı sağlayacak şekilde minimuma indirilmesi hedeflenmiştir.

SMSM'ler, temelde yüzey (YSMSM) ve gömülü sürekli mıknatıslı (GSMSM) olmak üzere iki temel topoloji yapısına sahiptirler. YSMSM'lerde mıknatıslar yüzeyde bulunduğu için üretimi GSMSM'ye göre nispeten daha kolaydır, ancak yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetin etkisi ile mıknatısların yerinden çıkması için ekstra malzeme ihtiyacı bulunmaktadır. GSMSM'de ise mıknatıslar rotorun içine gömülerek manyetik çıkıklık elde edilirken rotor gövdesine gömülü olduklarından yerlerinden çıkma problemi de önlenmiş olmaktadır. Böylece, d eksenini ve q eksenini endüktansları (L_d , L_q) arasındaki farktan doğan relüktans momenti üretilmektedir. İlave relüktans momenti sayesinde daha yüksek moment elde edilirken motorun alan zayıflatma yeteneği de artırılmaktadır. Bu tip motorların EA'larda ideal elektrik motoru olarak yaygın kullanılmasının sebepleri yüksek verimlilik, küçük hacim ve ağırlık, relüktans momenti ve iyi alan zayıflatma gibi özelliklere sahip olması olarak ortaya çıkmaktadır. GSMSM'lerin moment üretimine ilişkin ifade Eş. 1'de verilmekte olup bu denklemde ilk terim sürekli mıknatıslı

etkileşimle üretilen momenti, ikinci terim ise relüktans momentini ifade etmektedir [9]. Yüzey mıknatıslı yapılarda ise L_d ve L_q yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu için relüktans momenti üretilmez.

$$T = \frac{3}{2} p \cdot [\phi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (1)$$

Bu denklemde; p kutup çifti sayısını, ϕ_f mıknatısın oluşturduğu manyetik akıyı, i_q q eksenini akımını, i_d d eksenini akımını, L_q q eksenini endüktansını, L_d ise d eksenini endüktansını ifade eder. Relüktans momenti rotor bariyerlerinin sayısı, kalınlığı ve yeri ile kontrol edilebilir.

Elektrikli araçlarda kullanılan GSMSM'lere ilişkin literatür incelendiğinde birçok rotor topoloji ve geometrisine sahip GSMSM (rotor iç yüzeyine, rotora çubuk şeklinde, tekli ve çoklu bariyer şeklinde, eksenel laminasyonlu, segment yapıda, V şeklinde, W şeklinde) teknolojileri karşılaşılmaktadır. Yang vd. [3]; aynı tasarım hedefleri ve sınırlamalarına sahip V, çift V ve üçgen şeklinde üç farklı rotor topolojisindeki GSMSM tasarım ve kıyaslamasına odaklanmıştır. Tasarım süreci ve rotorlara ait optimizasyonların yapıldığı bu çalışmada her bir motor için manyetik analizler gerçekleştirilip hava aralığı akı yoğunluğu, vuruş momenti, Zıt-EMK, moment, moment-hız eğrileri, moment dalgalanması, verim, demanyetizasyon analizi, mekanik stres ve radyal kuvvet analizi yapılmıştır. Yapılan kıyaslamaların sonucunda, üçgen şeklindeki mıknatıs diziliminin en yüksek çıkış momentini sabit moment aralığında ürettiği ve bunun yüksek hızlarda daha yüksek Zıt-EMK üretmesine neden olduğu ve hedeflenen maksimum hıza ulaşamadığı görülmüştür. Çift V şeklindeki mıknatıs diziliminin moment performansı ve hız aralığı makul seviyede yüksek hızlarda en yüksek mekanik strese sahip olduğu görülmüştür. V-tipi mıknatıs dizilimi ise iyi moment-hız performansı, en iyi demanyetizasyon performansı, en az mekanik stres ve kabul edilebilir radyal kuvvete sahip olduğundan V tipi mıknatıs dizilimi seçilmiştir.

EA'lar için tasarlanan motorda düşük hacim ve ağırlıkta azami güç ve verim talep edilmektedir. Verimliliği artırmak için daha ince sac malzemenin kullanılmasıyla malzeme daha düşük manyetik akı yoğunluğunda doyuma ulaşacağından aynı hacimde moment azaltacak ve güç yoğunluğundan feragat edilmiş olacaktır. İnce sac malzemelerin motor performansına etkisi Huynh ve Hsieh [4] 2016'da irdelenmiştir. Elektrik motorunda moment dalgalanması, stator ve rotor manyetomotor kuvvetlerinin birbirleriyle etkileşiminden oluşmaktadır. Stator manyetomotor kuvveti amper sarım dağılımı ile tayin edilmekte olup rotor manyetomotor kuvveti ise mıknatısların dizilimi ve rotordaki diğer oyuklar ile alakalıdır. Stator manyetomotor kuvveti kullanılan sargının özellikleri ile üretilmektedir. Han vd. [10] yaptıkları çalışmada mıknatıslı motorlardaki moment dalgalanmasını incelemişlerdir. Seo vd. 2009 yılında yaptıkları çalışmada stator sargı yapılarını inceleyerek, kesirli sargı yapısına sahip elektrik

makinalarında rotorun demir kayıplarının çok arttığı görmüşlerdir [5]. Moment dalgalanmasını azaltmak amacıyla Suzuki ve Sakai [11] yaptıkları çalışmada stator sargılarını toroidal bir şekilde sararak önemli miktarda azalma sağlamışlardır.

Elektrikli araçlar için elektrik motoru tasarımı birçok parametrenin optimize edildiği tasarım çevrimlerinden oluşan karmaşık bir süreçtir. Tasarlanan elektrik makinesinin, araç üzerinde kullanılacağından minimum hacim ve ağırlıkta maksimum verimi vermesi talep edilmektedir. Özellikle gömülü mıknatıslı rotor yapısına sahip senkron motorun tasarım süreci, üretim ve uygulamasına yönelik çalışmalar gerek özel sektörde gerekse üniversitelerimizde kısıtlı olup, çalışma kapsamında yapılan katkılar, özgün yaklaşımlar ve üretim yeteneği ile motor tasarımı ve uygulamasının başarıyla gerçekleştirilmiş olması oldukça önemlidir. Bu kapsamda yapılan çalışmada öncelikle GSMSM tasarım süreci detaylı olarak irdelenmiş ve özgün yaklaşımları kapsayan tasarım akış diyagramı oluşturulmuştur. Araç gereksinimlerinden yola çıkılarak detaylı analitik analizlerle motorun temel büyüklükleri belirlenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile çeşitli çalışma koşullarında nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Statorda tek ve çok sayılı oluk kullanılan simetrik olmayan sargı yapısı sayesinde uzay harmonikleri, radyal kuvvetler ve vuru momentinin etkisi azaltılmasına katkı sağlanmıştır. Dolayısıyla, özgün olarak tasarıma özel olarak uygulanan 57 oluk kullanımı ile moment dalgalanması ve vuru momenti ve rotor optimizasyonu ile mıknatıs oranı dolayısıyla maliyeti azaltılmış yüksek verimli gömülü mıknatıslı motor yapısı analitik ve nümerik olarak geliştirilmiştir. Termal ve yapısal dayanım analizleri yapıp üretimi gerçekleştirilen motordan elde edilen deneysel sonuçlarla analiz sonuçlarının karşılaştırılması, tasarım optimizasyonu ve eniyilemelerle elde edilen motor ve sürücü sistemi araca monte edilerek yol testleri başarı ile gerçekleştirilmiştir.

2. GSMSM'İN TASARIM SÜRECİ (DESIGN PROCEDURE OF THE IPM MOTOR)

Endüstriyel elektrik motorları (EM) genellikle sürekli ve kısa zamanlı yüklenme koşullarına göre tasarlanıp optimize edilirken, EA'lar için ise geniş bir moment-hız aralığında ve değişken sürüş koşullarında maksimum verimi en az ağırlık ve hacimde verecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu yüzden EA'lar için belirli bir sürüş çevriminde, toplam kayıpların ve moment titreşimlerinin en az olacağı, düşük maliyetli ve yüksek güç yoğunluklu EM tasarımlarının geliştirilmesi oldukça önemli olup, elektromanyetik, termal ve mekanik olarak geniş kapsamlı analiz ve optimizasyon aşamaları içermektedir. Tasarlanacak motorun, yüksek moment ve güç yoğunluğunu yüksek verimlilikte verebilen ve ek olarak relüktans momentinin kullanılabildiği GSMSM yapısında olmasında karar kılınmış olup, elektrikli araç isterlerini geniş bir moment-hız aralığında karşılayacak ve sürekli mıknatıs gereksinimini dolayısıyla maliyeti azaltacak şekilde tasarım aşamalarını içeren ve özgün analitik ve nümerik yaklaşımların uygulandığı akış diyagramı Şekil 1'de verilmektedir. Tasarım akış diyagramı adım adım

uygulanarak GSMSM'a ilişkin temel parametreler belirlenmiştir.

2.1. Temel Tasarım Parametreleri ve Uygulama Kısıtları (Key Design Parameters and Application Constraints)

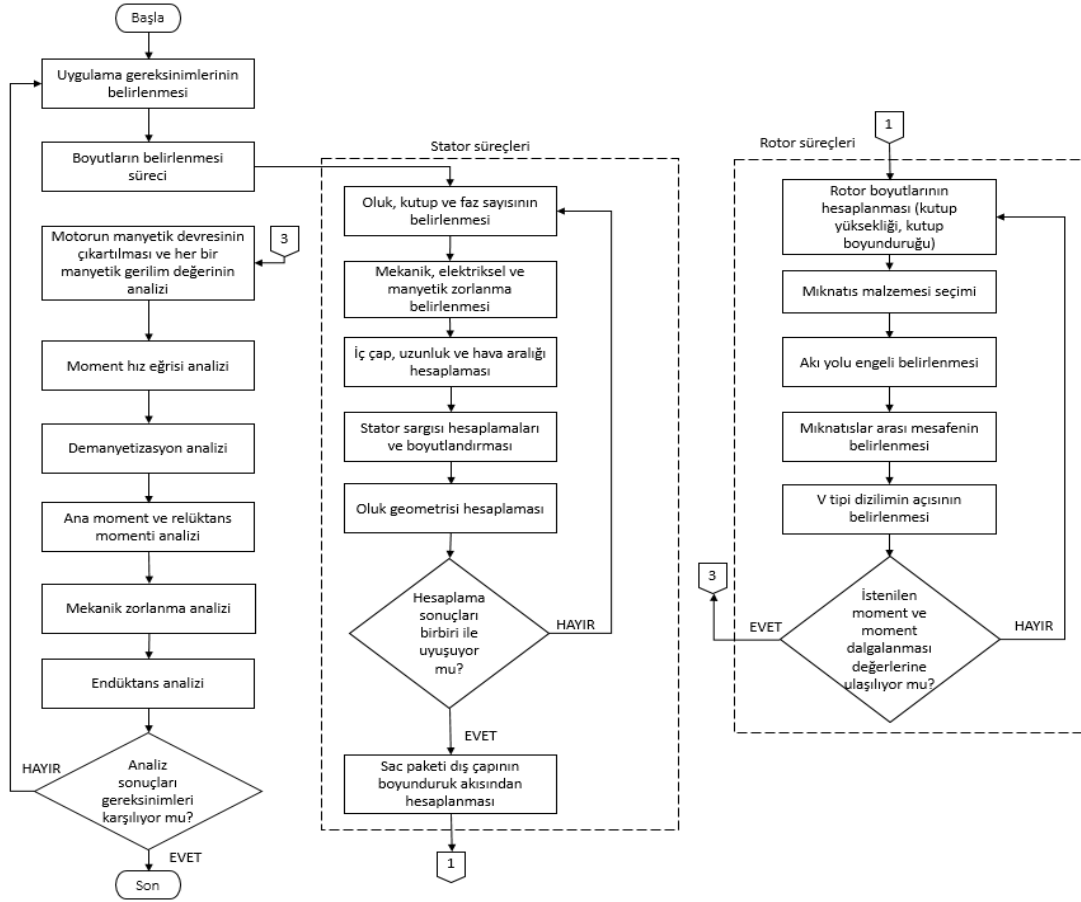
Tasarlanacak elektrik motorunun ayrıntılı olarak analitik ve nümerik analizlerinin gerçekleştirilmesi aşamasından önce uygulama gereksinimleri ve kısıtlarına bağlı olarak ana büyüklüklerin belirlenmesi ve sıcaklık, verim, güç yoğunluğu ve maliyet hedefleri doğrultusunda üretimi gerçekleştirilecek motor malzemelerinin seçilmesi tasarım sürecinin ilk aşamasını oluşturmaktadır.

2.1.1. Aracın gereksinimlerinden elektrik motor parametrelerinin belirlenmesi

(Determination of electric motor parameters from vehicle requirements)

Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere elektrik motoru tasarımında öncelikle isterlerden yola çıkarak başlangıç parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir aracın sürüş performansı genellikle aracın ivmelenmesi, azami sürati ve eğim çıkış kabiliyeti gibi parametrelerle değerlendirilir ve bu parametreler göz önünde bulundurularak aracın gereksinimleri belirlenir. Turcoto Uveyk isimli üç silindirli dizel motorlu aracı elektrikleştirme kapsamında, arkadan çekişli aracın İYM ve şanzımanı çıkartılarak elektrik motorunun araçtaki diferansiyel çıkışına bağlanması öngörülmüştür. Başlangıç parametrelerini belirleyebilmek için aracın (Turcoto Uveyk) ağırlığı, güç aktarma birimi, kuvvetler ve tekerlek çapları vb. incelenerek elektrik motorunun güç, moment ve devir sayısına bağlı olarak grafikleri çıkartılmıştır. Bu doğrultuda, araç bir ton yüklükken %20 kalkış açısında kalkabilecek, maksimum araç hızını ise 90 km/h yapacak bir elektrik motoru tasarlanması hedeflenmiştir.

Uveyk aracının, hedeflenen 50 kg motor ve 22 kWh batarya paketi de dahil olmak üzere boş ağırlığı 860 kg iken diferansiyel oranı 4.875, C_d katsayısı (aracın aerodinamik katsayısı) 0,25, yüzey alanı 2,26 m², C_{rr} katsayısı (yolun tekerlek üzerinde oluşturduğu direncin katsayısı) 0,0125 ve tekerlek çapı 58,35 cm'dir. Bu değerler ve gereksinimler doğrultusunda maksimum tırmanma açısı ve hızı elde edilmiştir. Aracın üzerine binen kuvvetler; lastik sürtünmesi (F_r), rulman sürtünmesi (F_b), drag kuvveti (F_w) ve eğer araç yokuş çıkıyorsa eğim direncidir. Maksimum araç hızında, EM'nin momentinin araç üzerine binen kuvvetleri karşılaması sağlanmalıdır. Bu kuvvetler ve aracın dinamik parametrelerinden yola çıkarak gerekli motor momenti ve gücü gibi temel motor parametreleri elde edilmiş ve bu değerler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de hesaplanan büyüklükler motor momenti (T), motor hızı (n), araç hızı ($V_{hız}$), elektrik motor gücü (P) ve aracın maksimum tırmanma açısı (G)'dir. Bu kapsamda, Uveyk aracı tam yüklü iken kalkış anında %27,6 eğimi ve maksimum hızında %7,49 eğimi çıkabilmektedir. Türkiye karayollarında 90 km/h hız izni verilen yollarda izin verilen anayol eğimi %4 ve yerel yol eğimi %7'dir [12]. Uveyk aracı 90 km/h hıza ulaştığında %7,49 eğimi tırmanabilme yeteneğine sahiptir.



Şekil 1. IPM Çekiş motoru tasarım akış diyagramı (Design flowchart of the IPM traction motor)

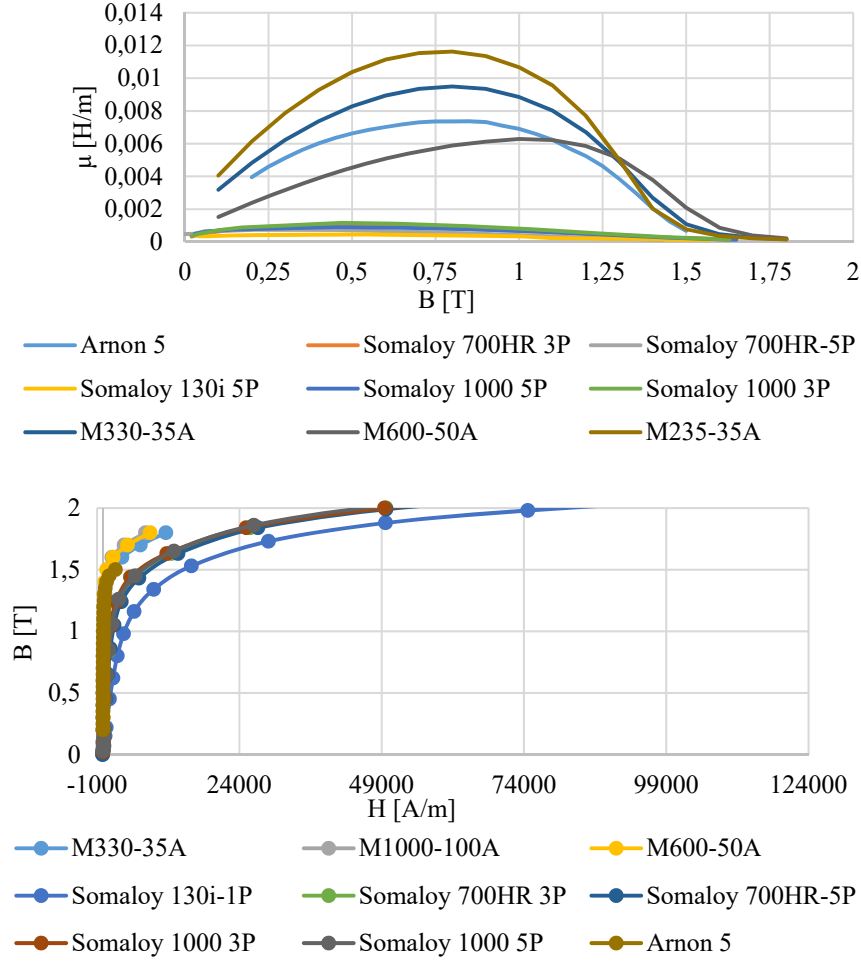
Tablo 1. IPM motor özellikleri belirleme tablosu (IPM motor specification table)

Hesaplanan Büyüklükler	Sabit Aralığı	Moment	Sabit Güç Aralığı		Azalan Güç Aralığı	
T [Nm]	290	290	218	145	107	82
n [rpm]	500	1500	2000	3000	3500	4000
V_{hiz} [km/h]	11,3	33,8	45,1	67,7	79,0	90,3
F_r [N]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
F_b [N]	228	228	228	228	228	228
F_w [N]	3,6	32,3	57,4	129,1	175,7	229,5
P [kW]	15,2	45,6	45,6	45,6	39	34,2
G [%]	27,6	27,6	20,3	13,4	9,8	7,49

2.1.2. Malzeme seçimi (Material selection)

Elektrik motorlarında kullanılan malzemeler elektromanyetik devreyi etkileyen aktif malzemeler ve etkilemeyen pasif malzemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. GSMMS'larda kullanılan aktif malzemeler, demir çekirdeği oluşturan sac malzeme, stator sargısı için kullanılan iletken malzeme ve rotorda kullanılan sürekli mıknatıslardır. Çalışma kapsamında yüksek verimlilik hedeflendiğinden, tasarımda yüksek manyetik geçirgenlikli ve düşük kayıplı sac kullanılması yüksek hızlı çalışmadan dolayı gereklidir. Demir çekirdeği oluşturan sac malzeme seçilirken en iyi kalite sac malzemesi ile maliyeti arasında

optimizasyon yapılması gerekmektedir. İyi kalite sac malzemesi kaybı düşük olan ve mümkün olan en az manyetik alan şiddetinde en büyük manyetik akı yoğunluğu oluşturan sac malzemesi olarak tanımlanabilir. Tasarımda, SMC (soft magnetic composite) malzemelerinden Somaloy 130i 5P, 700HR 3P, 700HR 5P, 1000 3P ve 1000 5P malzemeleri ile sac malzemelerinden Arnon 5, M235-35A, M330-35A, M600-50A ve M1000-100A (M330: kayıp miktarını, 35A: sac malzemesinin kalınlığını göstermektedir) seçilmiş olup bu malzemelerin B-H eğrileri ile manyetik geçirgenlik grafikleri Şekil 2'de verilmektedir. Manyetik geçirgenliği oldukça yüksek, kayıp değerleri düşük ve maliyeti standart sac malzemelerinden yüksek olmayan M330-35A sac



Şekil 2. Seçilen malzemelerin μ -B ve B-H eğrileri (μ -B and B-H curves of selected materials)

malzemesi demir çekirdekte kullanılmak üzere belirlenmiştir.

Elektriği ileten malzemeler sırasıyla altın, gümüş, bakır, alüminyum ve pirinç gibi elektriksel direnci düşük olan ve manyetik geçirgenliği de havanın manyetik geçirgenliğine yakın olan malzemelerdir. Elektrik motorlarında genellikle iletken malzeme olarak bakır ve maliyeti düşürmek hedeflendiğinde ise alüminyum kullanılmaktadır. Gümüş ise en iyi iletken olup maliyet sebebiyle elektrik motorlarında tercih edilmemektedir. Bu doğrultuda stator sargılarını oluşturacak iletken olarak optimum malzeme olan bakır seçilmiştir.

Rotorda kullanılan SM'ler sert ferromanyetik malzeme olarak tanımlanmakta ve çok büyük manyetik akı yoğunluğuna maruz kalmadığı müddetçe üzerindeki manyetik akı yoğunluğu değerini korumaktadır. Sac malzemelerinin histerezis eğrileri oldukça inceyken, SM'lerin histerezis eğrileri çok daha geniştir. Bir SM'nin giderici manyetik alan şiddeti yükseldikçe malzemenin sertliği artmaktadır. Mıknatıslı motorların tasarımında Ferrit, Alnico, SmCo ve NdFeB olmak üzere dört farklı SM

kullanılmaktadır. En yüksek manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddetine sahip mıknatıs NdFeB, en düşük değerlere sahip ise Ferrit mıknatıslardır. Sürekli mıknatıslı bir elektrik motorunda bulunan NdFeB, ferrit mıknatıs ile değiştirdiğimizde B_r değeri yaklaşık olarak 1,4T'dan 0,4T'ya, yani %71 oranında düşmektedir. Giderici manyetik alan şiddeti ise yaklaşık olarak 1050 kA/m değerinden 250 kA/m değerine %76 oranında düşmekte ve üretilen moment %54 azalmaktadır. Bu kapsamda, ana hedeflerden biri olan yüksek güç ve moment yoğunluğuna ulaşabilmek için NdFeB tipi SM'ler içerisinde Arnold firmasının ürettiği artık manyetik akı yoğunluğu (B_r) 1,345 T, hacim başına maksimum manyetik enerjisi ($(BH)_{max}$) 354 kJ/m³ olan N45SH tipi mıknatıs seçilmiştir.

2.2. GSMSM'nin Analitik Analizi (Analytical Analysis of the IPM Motor)

EA'lar için motor tasarlanırken temel olarak sistem elektromanyetik, mekanik, elektriksel ve termal tasarım olmak üzere dört ana birime bölünmelidir. Analitik tasarımda elektrik motoru bir sistem olarak düşünülür ve gerekli olan tüm alt sistemler matematiksel olarak

modellenir. Analitik analiz kapsamında, makinenin somut olan oluk geometrisi, sarım sayısı, boyunduruk gibi parametrelerinin yanında soyut olan akı yoğunluğu, kutup akısı ve endüktans değerleri gibi parametrelerin de hesaplandığı, elektrik motorunun akı yolu üzerindeki dirençlerin ve manyetik iletkenliğinin de hesaplandığı analitik denklemleri içeren bir model oluşturulmuştur. Analitik tasarımda öncelikle elektrik motorunun elektromanyetik analizi ve yüklemesi ele alınmıştır. Elektromanyetik yüklemeye B (manyetik akı yoğunluğu) ve J (elektrik akım yoğunluğu) ile ifade edilir. Elektrik makinesinin manyetik zorlanması bileşke hava aralığı endüksiyonunun 1. harmoniği ($B_{\delta 1}$) ile ve elektriksel zorlanması ise çevre akım yoğunluğu tarafından belirlenir. Bu iki değişken, manyetik doyuma ulaşma ve sıcaklık yükselmesi ile sınırlanmaktadır. Dolayısıyla elektromanyetik yüklemeye kayıplarla ve soğutma ile bağlantılıdır. Bu doğrultuda bir elektrik motorundan alınabilecek nominal gücü kayıplar ve soğutma sisteminin yapısı belirler. Elektrik motorundaki elektriksel kayıplar, bakır ve demir kayıpları olarak ikiye ayrılır. Demir kayıpları da kendi içerisinde frekans ile orantılı olarak artan histerezis kayıpları ve frekansın karesi ile artan girdap akımı kayıptır. Bakır ve demir kayıplarına ilişkin genel ifadeler Eş. 2 ve Eş. 3'de verilmiştir.

$$P_{cu} = I^2 R = J^2 \cdot \rho_{cu} \cdot V_{cu} \quad (2)$$

$$P_{fe} = [P_{fe,h} + P_{fe,g} = m_{fe} \cdot \varepsilon_h \cdot f + \varepsilon_g \cdot f^2] \cdot \hat{b}^2 \quad (3)$$

Burada, I faz akımı, R faz direnci, J akım yoğunluğu, ρ_{cu} bakır iletkenin özgül direnci, V_{cu} bakır iletken hacmi, m_{fe} demir ağırlığı, f frekans, \hat{b} manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri, ε_h ve ε_g histerezis ve girdap akım kayıp sabitleridir. Demir kayıplarının beş temel nedeni bulunmaktadır; manyetik akı dağılımı, döner alanlar, gerilme zorlanması, evirici kaynaklı zaman harmonikleri, stator kaynaklı uzay harmonikleri. Kayıpların belirlenmesinden sonra motorun temel parametreleri üzerinden tasarım büyüklükleri hesaplanır. Elektrik motor gücünün, elektriksel ve manyetik zorlanma birimlerini ve motorun hacmini içinde barındıran ifade Eş. 4'de verilmiştir.

$$S = m \cdot E \cdot I = m \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot I \\ = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \hat{b} \cdot A_s \cdot V_r = C \cdot V_r \quad (4)$$

Burada, S m-fazlı bir elektrik makinesinin görünür gücü, ilk kısımda endüklenen zıt-EMK (E) ve akım (I) cinsinden, ikinci kısımda zıt-EMK ve faz akımı değerlerinin formüllerinin açılması ile elektriksel zorlanma, manyetik zorlanma ve boyut parametrelerinin formüle dahil edilmesi sağlanmıştır. Eşitlikte, N bir fazın sarım sayısını, $\hat{\phi}$ manyetik akımın tepe değerini, C faydalanma katsayısını ve V_δ ise rotorun hacmini göstermektedir. C faydalanma katsayısı elektrik makinesinin birim hacimden (1 m^3) birim zamanda (1 min) alınabilecek enerjiyi yani malzemeden ne kadar faydalandığını gösterir ve birimi kVA.dakika/ m^3 'tür. A_s ise

doğrusal akım yoğunluğunu göstermekte olup ifadesi Eş. 5'de verilmektedir.

$$A_s = \frac{J \cdot N \cdot A_{cu}}{l} \quad (5)$$

Burada, J akım yoğunluğunu, A_{cu} bakır iletkenin alanını, l bakır iletkenin uzunluğunu ifade etmektedir.

2.2.1. GSMSM'nin ana boyutlarının belirlenmesi (Determination the main dimensions of the IPM motor)

Analitik tasarım sürecinde isterlerden ve araç üzerindeki hacimden yola çıkarak ana boyutların belirlenmesi gerekmekte olup bu süreç Eş. 6 doğrultusunda C faydalanma katsayısının belirlenmesi ile başlamaktadır. Literatür ve çeşitli tasarımların incelenmesi, gereksinimler ve isterlerden yola çıkarak faydalanma katsayısı 200 kWs/m^3 yani $3,62 \text{ kVA.dakika/m}^3$ olarak seçilmiştir [9].

$$P = \omega \cdot C \cdot V_r \rightarrow D_i^2 \cdot l_i = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{C \cdot \frac{\pi}{4}}} \quad (6)$$

Burada, D_i iç çap, l_i çekirdek boyu, n hızı göstermektedir. Önemli parametrelerden rotorun mekanik zorlanım sınırı için rotor hacmi başına moment değeri hesaplanmalıdır. Hava aralığı yüzey gerilimi rotor hacmi başına düşen momentin yarısıdır. Rotor hacmi başına düşen moment ifadesi Eş. 7'de verilmiş olup birimi Nm/m^3 'tür.

$$TRV = \frac{T}{\frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot l_i} \quad (7)$$

$$A_s = \frac{2 \cdot m \cdot N \cdot I}{\pi \cdot D_i} \quad (8)$$

Doğrusal akım yoğunluğu belirlenmesi gereken diğer bir büyüklük olup ifadesi Eş. 8'de verilmiştir. Doğrusal akım yoğunluğu belirlendikten sonra senkron motorlar için uzunluk/çap oranı belirlenir ve farklı kaynaklardan alınan değerler Eş. 9, Eş. 10 ve Eş. 11'deki gibidir [13-15]. l_i/D_i oranı Eş. 10 ile $0,91$ olarak belirlenmiş olup sac paket uzunluğu, l_i $0,14 \text{ m}$ ve hava aralığının çapı D_i $0,154 \text{ m}$ olarak elde edilmiştir.

$$\begin{cases} \frac{l_i}{D_i} \approx \frac{\pi}{4 \cdot p} \sqrt{p}, p > 1 \\ \frac{l_i}{D_i} \approx 1 \dots 3, p = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$0,5 < \frac{l_i}{D_i} < 2 \quad (10)$$

$$0,7 < \frac{l_i}{\tau_{kutup}} < 2,8 \quad (11)$$

Hava aralığı belirlenmesi gereken bir diğer parametre olup, senkron motorlar için tipik radyal hava aralığı uzunluğu Eş. 12'de verilmektedir [9]. Buradaki k katsayısı çıkık kutuplu sinüzoidal hava aralıklı GSMSM için $4,5 \cdot 10^{-4}$ olarak alınmıştır [13]. Eş. 12'den hava aralığı uzunluğu (δ) $0,7 \text{ mm}$ olarak elde edilmiştir.

$$\delta = k \cdot \tau_{kutup} \cdot \frac{A_s}{b_\delta} \quad (12)$$

Sonraki aşamada statorun oluk sayısı ve rotorun kutup sayısı belirlenmiştir. 4000 rpm maksimum hız, 1500 rpm nominal hız ve 290 Nm moment değerlerini karşılamak için tasarımda 4 kutup çifti seçilmiştir. Ana hedeflerden olan moment dalgalanmasını azaltılması için kesirli dağıtılmış sargı yapısı seçilmiş olup oluk sayısı oluk yıldızındaki fazörlerin arasındaki mesafeyi daraltmak amacıyla 57 olarak belirlenmiştir. Gerilim dalga şeklini sinüsten uzaklaştıran harmoniklerin yok edilmesini ya da azaltılmasını sağlamak ve vuru mu momenti, moment dalgalanması vb. parametreleri mümkün olduğunca azaltmak için tek oluk sayısı kullanılarak simetrik olmayan sargı yapısı oluşturulmuştur. Literatürde tek oluk sayısına sahip elektrik motoru tasarımı uygulanması bulunmamakta olup, sargı yapısının oluşturulması ve sargıların oluklara yerleştirilmesi açısından 57 oluklu ve 4 kutup çiftli yapı bir sorun oluşturmamakta olup uygulama olarak özgündür. Belirlenen oluk sayısı ve kutup sayısına ilişkin ifadeler Eş. 17, Eş. 18 ve Eş. 19'dan sargı faktörü ζ hesaplanır. q (kutup ve faz başına düşen oluk sayısı) değeri 2,375, bobin genişliği (y) 7 olan kırı şlenmiş sargının sargı faktörü 0,955 olarak belirlenmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğunun tepe değeri (\hat{b}_δ) manyetik zorlanmanın tayini için belirlenerek manyetik akı elde edilmiş olup, ifadesi Eş. 13'de verilmektedir. α_i , kutup örtme faktörü olup akı yoğunluğunun ortalama ve tepe değerinin oranı olarak tanımlanır. Demir çekirdeğin doyumu na göre değişmektedir ve hava aralığındaki akı yoğunluğu sinüzoidal ise $2/\pi$ olarak alınır. Kutup ayağı yayı ile kutup adının arasındaki oran kutup örtme faktörüne eşit olup, Eş. 14'de verilmiştir. Analizlerde hava aralığı akısının mümkün olabilecek maksimum mertebede olması hedeflenerek 1,35T olarak belirlenmiştir.

$$\hat{\phi} = \hat{b}_\delta \cdot \alpha_i \cdot \tau_{kutup} \cdot l_i \quad (13)$$

$$b_{pi} = \alpha_i \cdot \tau_{kutup} \quad (14)$$

Doğrusal/çevre akım yoğunluğu yani elektriksel zorlanma değerinin belirlenmesi analitik analizin bir sonraki aşamasını oluşturmaktadır. Bu değer, GSMSM için 35-65 kA/m değerleri aralığında olup, doğrudan soğutmaya sahip ise 150-200 kA/m aralığına çıkabilmektedir. Sıvı soğutmalı sistemlerle 300 kA/m değerine kadar ulaşılabilir [9]. Çalışmada, soğutma statorun dışına geçirilen alüminyum bloğun içerisinden geçen su ile gerçekleştirileceğinden doğrusal/çevre akım yoğunluğu 35 kA/m olarak belirlenmiştir. Elde edilmiş büyüklükler kullanılarak bir faza ait sarım sayısı Eş. 15'de verilen ifade ile hesaplanarak 43,16 sarım olarak elde edilmiştir.

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{\omega \cdot \xi \cdot \alpha_i \cdot \hat{b}_\delta \cdot \tau_{kutup} \cdot l_i} \quad (15)$$

Oluk başına düşen fiktif sarım sayısı tam sayı olması gerektiğinden çıkan sonuca en yakın tam sayı seçilip ve sarım sayısı yeniden hesaplanmıştır. 57 oluklu motor 3 fazlı

olduğu için sarım sayısı 19 (57/3)'ün katları olmalıdır. 43,16 sarım sayısına en yakın değer 19'un katı tamsayı değeri olan 38'dir. Eş. 16'da verilen ifade ile elde edilen sarım sayısı için \hat{b}_δ değeri yeniden hesaplanmıştır. Değişen sarım sayısında hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu 1,47T olarak belirlenmiştir.

$$\hat{b}_\delta = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{\omega \cdot \xi \cdot \alpha_i \cdot N \cdot \tau_{kutup} \cdot l_i} \quad (16)$$

Analitik analizin bir diğer aşamasında ise oluk boyutlarını hesaplanması gerekmektedir. Oluk genişliği b_0 ve oluk yüksekliği h_0 olup oluk derinliği ile oluk genişliği arasında yaklaşık olarak $4 \leq b_0/h_0 \leq 6$ ilişkisi bulunmaktadır. Bunun sebebi, oluk dağılma reaktansının ve dolayısıyla darbe kısa devre akımının büyüklüğünün oluk boyutlarına bağlı olmasıdır. Dar ve derin oluklarda dağılma reaktansı büyük ve darbe kısa devre akımı küçük olmaktadır. Oluk derinliği oluk genişliği oranı yüksek oluk sayısı kullanıldığı için sınır değere yakın olan 5,93 olarak belirlenmiş olup oluk derinliği 27 mm ve oluk genişliği 4,55 mm olarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bütün analitik hesaplamalar ve analiz adımları sonucunda motorun ana boyutları elde edilmiştir. Akı ve akım yoğunlukları gibi manyetik değerler motorun nominal çalışma koşulu için hesaplanmıştır.

2.2.2. Stator sargı yapısının belirlenmesi (Determination of the stator winding topology)

Sürekli mıknatıslı motor tasarımının önemli aşamalarından bir tanesi stator yapısı ve buradan yola çıkarak stator sargı tipi, sarım sayısı, iletken çapı, oluk sayısı ve yapısının vb. belirlenmesidir. Stator sargıları, her biri eşit uzunlukta olan faz sargılarından oluşur ve bu sargılar genellikle yıldız bağlanır. Moment üretimi özellikle harmonik oluşumu stator sargı yapısına oldukça bağımlı olup araç performansını doğrudan etkilemektedir. Harmonik oluşumuna bağlı olarak oluşan moment dalgalanması, gürültü gibi problemler sargı tipi ve özellikleri değiştirilerek azaltılabilmektedir. Sargı tipi temel olarak dağıtılmış ve konsantrik sargı olarak ikiye ayrılır. Konsantrik sargı, dağıtılmış sargı ile aynı moment için daha fazla akıma ihtiyaç duyabilmektedir. Bobinler dışın üzerinden sarıldığı için oluşan oluk yıldızı arasındaki açılar geniş ve oluşan kuvvetin genliği dağıtılmış sargıya göre yüksek olduğundan moment dalgalanması ve gürültü oluşmaktadır. Moment dalgalanmasını mümkün olduğunca düşürmek için sargı tipi dağıtılmış sargı olarak seçilmiştir. Kesirli oluklu konsantrik sargılı yapılar, alan zayıflatma yeteneği iyi olmayan yüzey mıknatıslı motorlar için daha çok tercih edilmektedir. Tasarımda önemli kriterlerden biri olan sargı faktörü, faz sargılarındaki etkin sarımlar olarak tanımlanmakta olup elektromanyetik moment, sargı faktörünün temel bileşeni ile orantılıdır. Bu nedenle, sargı faktörünün temel bileşeni yüksek olmalıdır. Her bir uzay harmoniği için ayrı ayrı sargı faktörü hesaplanır. Sargı faktörü genellikle iki faktörün ürünü olarak ifade edilir ve her birinin maksimum değeri 1'dir ve ifadesi Eş. 17'de verilmiştir. Bunlar; kırı şleme faktörü (ζ_p) ve dağılma faktörüdür (ζ_d). Statorda kaydırma yapılırsa bu faktörün de faktörünün hesaplanması gerekecektir.

$$\xi_w = \xi_p \cdot \xi_d \quad (17)$$

Kirişlenmemiş bir bobinde bobin yanlarında endüklenen gerilimler arasında 180 derece (π) faz farkı olur. Bu bobinlerde sargı kırıleme faktörü 1'dir. Kirişlenmiş bobinde ise bobin yanları arasındaki bobin genişliği (y), kutup başına düşen oluk sayısından farklı olacağından bobin yanları arasındaki faz farkı $\frac{y}{\tau_p} \cdot \pi$ 'ye eşit olacaktır. Bir sargıda yok edilmesi istenilen uzay harmoniği hesaplanılarak kırıleme yapıp o harmonik yok edilebilir. Sargıyı kırılediğimizde ise iki bobin yanı arasında $\frac{y}{\tau_p} \cdot \pi$ kadar bir faz farkı

olacağından, elektromotor kuvvet fazörlerinin geometrik toplamı cebirsel toplamından küçük olacaktır. Sargı kırıleme faktörü ile bu azalma momente aktarılır. Sargı kırıleme faktörü ifadesi Eş. 18'de verilmektedir. Bu denklemde; v harmoniği, β_1 bobin yanları arasındaki açının 180 dereceden farkının birinci harmoniğini, γ_v ise v 'nüncü harmonikteki bobin yanları arasındaki faz farkını göstermektedir.

$$\xi_{pv} = \cos\left(\frac{v \cdot \beta_1}{2}\right) = \sin\left(v \cdot \frac{90^\circ \cdot y}{\tau_p}\right) \quad (18)$$

$$\dots \beta_1 = \pi - \frac{y}{\tau_p} \cdot \pi \dots \gamma_v = v \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \pi$$

Sargı dağılma faktörü, her bir bobin stator oluklarında oluşan elektromotor kuvveti fazörünün geometrik toplamının cebirsel toplamına oranıdır. Buna ilişkin ifade ise Eş. 19'da verilmektedir. Bir fazda endüklenen toplam EMK'ya oluk yıldızı vektörlerinin birbirine eklenmesiyle ulaşılabilir.

$$\xi_{dv} = \frac{\sin\left(v \cdot \frac{q \cdot y_1}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{y_1}{2}\right)} = \frac{\sin\left(v \cdot \frac{90^\circ}{m}\right)}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{90^\circ}{q \cdot m}\right)} \quad (19)$$

Elektrik makinesinde tam olarak sinüzoidal dağılmamış sargı yapısı, akımın frekansında sonsuz sayıda harmonik üretir. Bu harmonikler uzay harmoniğidir ve 3-fazlı makinelerde 3 ve 3'ün katı olan uzay harmonikleri makine içinde döner alan oluşturmazlar. Uzay harmonikleri için en etkili yöntem bobinlerin belirli bir oranda kırılenmesidir. Kirişlenmemiş sargıda aynı faza ait gidiş ve dönüş iletken grupları arasında 180° olmalıdır [14]. Gerilim dalga şeklini sinüsten uzaklaştıran harmoniklerden uzak durmak ve vuruğu momenti, moment dalgalanması, gürültü parametrelerini mümkün olduğunca az olmasına katkı sağlanması amacıyla iki tabaka kırılenmiş sargı çalışmada seçilmiş ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Manyetik gürültü (Magnetic noise)

Manyetik gürültü, elektrik motorlarının güvenilirliğini azaltan bir parametre olup çekiş yapan bir elektrik

motorunda minimum mertebede tutulması istenmektedir. Elektromanyetik titreşimin yani manyetik gürültünün temel kaynakları; moment dalgalanması, vuruğu momenti ve radyal kuvvet yoğunluğudur. Rotor ve stator arasındaki etkileşimden rotorda oluşan teğetsel kuvvetler moment oluşumunu sağlarken, çekimsel kuvvetler radyal kuvvetlerdir. Manyetik gürültünün kaynağı büyük oranda radyal kuvvetler olup ifadesi Eş. 20'de verilmektedir. Bu denklemde, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, B_n ise hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşenidir. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğunun teğetsel bileşeni demir çekirdeğin manyetik geçirgenliği havadan çok daha yüksek olduğu için ihmal edilebilmektedir.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_n(\theta, t)^2 \quad (20)$$

Mıknatıslı bir rotor dönerken, statordaki oluklar dolayısıyla hava aralığında relüktans değişimi olur ve bu da vuruğu momentine sebep olmakta olup ifadesi Eş. 21'de verilmektedir. Bu denklemde, W depolanan enerjiyi, θ rotorun açısını, F_c giderici manyetik alan şiddeti, ϕ_m manyetik akı yoğunluğunu ifade eder. Vuruğu momentinin bir periyodu 360°'nin oluk sayısına bölünmesi ile bulunur.

$$T_{vuruğu} = -\frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{1}{2} F_c \cdot \frac{d\phi_m}{d\theta} \quad (21)$$

Üç-faz sinüzoidal zıt-EMK'ya sahip olan motorlarda moment dalgalanması %15'i geçmemelidir. Moment titreşimleri ve vuruğu momenti stator sac paketinin veya rotor şoklama alanının belli bir açıyla kaydırılması, oluk ağız açıklığı, konsantrik ve kesirli oluk adımı sargı vb. tasarımsal yaklaşımlar veya yazılımsal olarak aktif kontrol yapılarıyla düşürülebilir. Gerçekleştirilen tasarımda, oluk ağız açıklığının optimizasyonu, tek oluk sayılı simetrik olmayan sargı yapısı kullanımı, diş yapısı, özgün olarak rotor üzerinde belirlenen hava boşlukları ve aktif kontrol ile uzay harmonikleri, radyal kuvvetler ve vuruğu momentinin etkisi azaltılmıştır.

3. GSMSM'İN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE IPM MOTOR)

Elektrik makinelerinin karmaşık yapıları, kullanılan malzemelerin lineer olmayan karakteristikleri ve manyetik doymalar sebebiyle analitik çözüm yapabilmemizin zorluğu göz önüne alındığında sayısal çözümleme oldukça önemlidir. Analitik analizi gerçekleştirilerek ana boyutları ve parametreleri belirlenen GSMSM'nin detaylı performans sonuçlarının elde edilmesi için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. SEY, hem karmaşık fiziksel şekilleri kolay modellemesinden hem de lineer olmayan malzemelerin tanımlanmasına izin verdiğinden elektrik motorlarının analizinde en çok tercih edilen sayısal yöntemdir. SEY'in temeli, karmaşık sınır koşulları nedeniyle tüm çözüm bölgesi için analitik bir potansiyel fonksiyonu bulmanın mümkün olmadığı durumlarda, parça-parça bir yaklaşım ile çözümün tanımlanan sonlu küçük elemanlar içinde aranmasına

dayanmaktadır. Bir elektrik motorunun elektromanyetik analizinde SEY kullanırken, motorun malzemelerinin doğru seçilmesi, lineer olmayan etkilerin ve doymanın kapsama alınması ve oluşturulan ağ yapısının hassasiyeti sonuçların doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Nümerik analizler sayesinde tek bir parametrenin motor üzerindeki etkisi etkin bir şekilde çalışılabilir.

3.1. Elektromanyetik Tasarım (Electromagnetic Design)

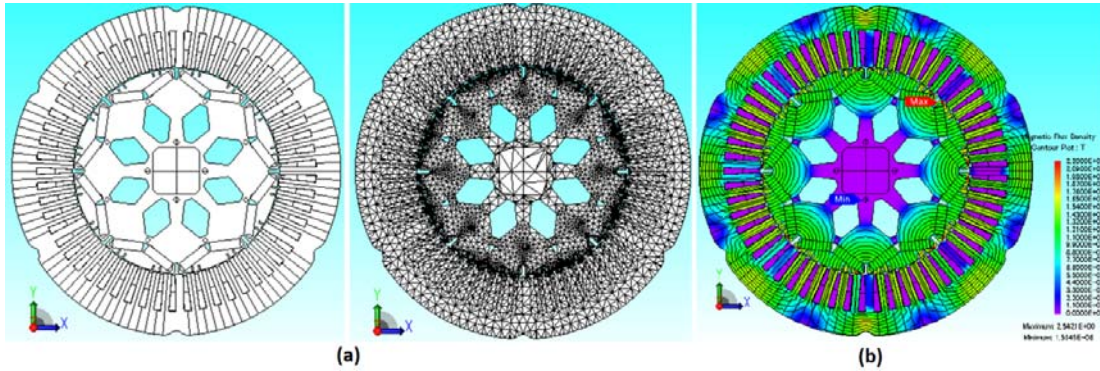
GSMSM'nin nümerik analizlerinde ticari hazır paket programlardan biri olan JMAG-Designer kullanılmıştır. Kesin sonuçlar elde etmek için, elektrik motorunun kabuğunun stator boyunduruğuna geçme noktaları, rotor sac paketini ve mıknatısları sabitlemede kullanılan saplamalar, rotor mili, rotor ve stator sac malzemeleri, sürekli mıknatıslar ve bakır iletkenler üretime uygun olacak şekilde modellenip çizilerek iki boyutlu ve üç boyutlu geometriler oluşturulmuştur. Böylece, analitik olarak elde edilen boyutlardan yola çıkılarak 57 oluk - 8 kutuplu motorun ayrıntılı nümerik analizleri ile motor özellik ve karakteristiklerinin detaylı incelenmesi sağlanmıştır. GSMSM'nin üretime uygun SEY iki boyutlu (2D) geometrisi ve ağ yapısı Şekil 3a'da verilmektedir.

3.2. Boşta Çalışma Analizleri ve SEY Sonuçları (No-load Operation Analysis and FEA Results)

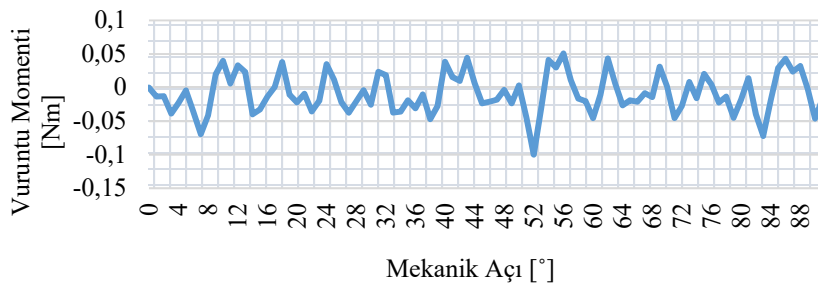
Boşta çalışmada, motorun nominal hızındaki zıt-EMK ile üretilen harmonikler ve mıknatıs ile stator dişlerinin etkileşimi ile oluşan vuruğu momenti olmak üzere iki temel

parametre incelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 3b'de verilmektedir. Manyetik devre akı yolu boyunca en yüksek akı değeri stator dişlerinde ve boyunduruğunda 1,5T mertebesinde elde edilmiştir. Rotorda ise manyetik akının düzgünlüğünü sağlamak ve vuruğu momentini azaltmak için açılmış hava boşluklarının olduğu nokta manyetik akı yoğunluğunun maksimum olduğu noktalar olarak ortaya çıkmaktadır. Manyetik akı yoğunluğundaki bu artışın demir kayıplarına etkisi çok az olmuştur. Bu noktalarda yüksek manyetik akı yoğunluğu sebebiyle doyma olduğu gözlemlenmiş, bu doyma sayesinde SM'nin manyetik akı yoğunluğu hava aralığını geçmekte ve mümkün olan en az akı kaçığı ile manyetik devrenin tamamlanması sağlanmaktadır. Vuruğu momentini düşürmek için nümerik analizlerle belirlenip rotor üzerinde açılan hava boşlukları, diş yapısı ve oluk sayısı sayesinde bu değerin maksimum olduğu nokta 0,1Nm olarak elde edilmiştir. Vuruğu momenti-mekanik açı değişim eğrisi ise Şekil 4'te verilmektedir.

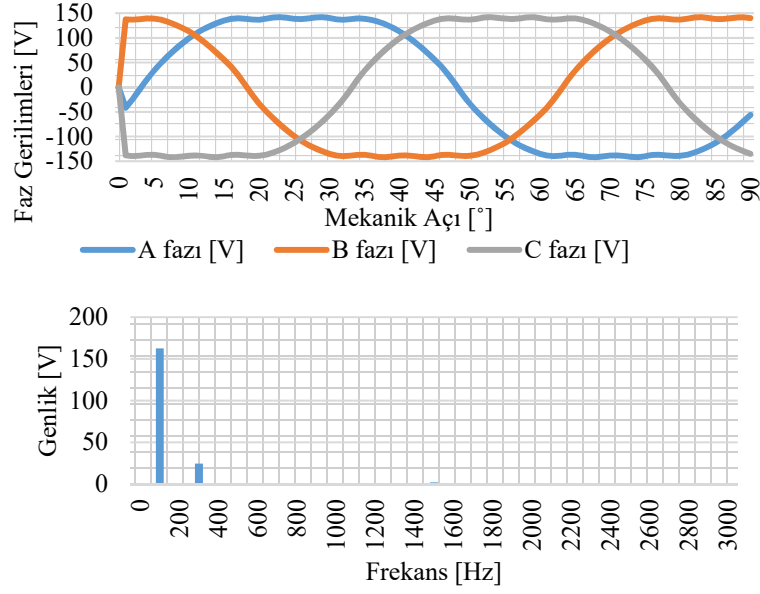
Boşta çalışmadaki analiz sonuçlarıyla motorun, stator histerezis kaybı 139,74 W ve girdap akımı kaybı 114,01W, rotor histerezis kaybı 2,82 W ve rotor girdap akımı kaybı 18,5 W olmak üzere toplam 275,06 W'lık demir kaybı belirlenmiştir. Endüklenen gerilim 116 V olup dalga şekli ve harmonik analizi Şekil 5'de gösterilmektedir. Harmonik analizinde, birinci harmoniğin %15'i 3. harmonik ve %1,2'si ise 15. harmonik olarak elde edilmiştir. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ve harmonik analizi ise Şekil 6'da verilmektedir. Harmonik analizinde, birinci harmoniğin %22,2'si 3. harmonik, %5,38'i 5. harmonik, %1'i 7.



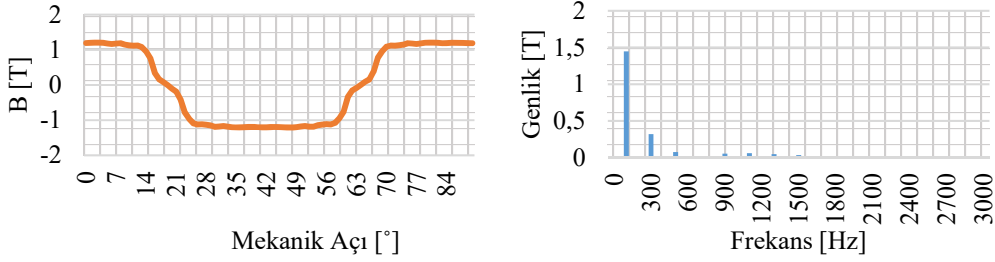
Şekil 3. a) GSMSM'nin 2D geometrisi ve oluşturulan ağ dağılımı b) Boşta çalışmada manyetik akı yoğunluğu yapısı
(a) Magnetic flux density distribution in no-load operation (b) 2D geometry and mesh structure of the IPM motor)



Şekil 4. Vuruğu momenti-mekanik açı değişim eğrisi (Cogging torque versus mechanical angle curve)



Şekil 5. Boşta çalışmada zıt-EMK dalga şekli ve harmonik analizi
(Back-EMF waveform and harmonic analysis in no-load operation)



Şekil 6. Hava aralığındaki akı yoğunluğu ve harmonik analizi (Air-gap magnetic flux density and harmonic analysis)

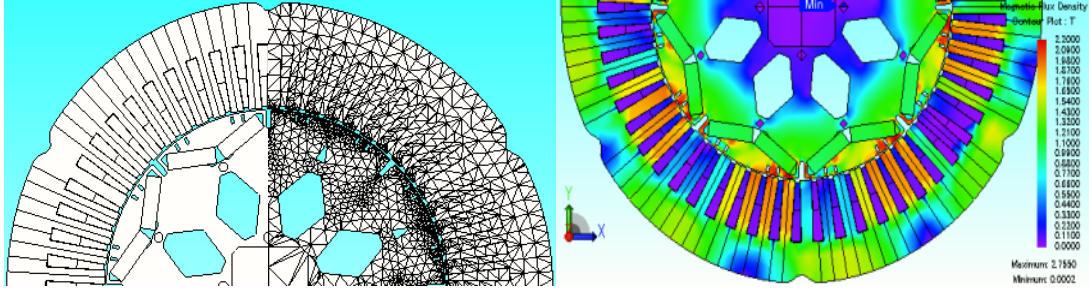
harmonik, %3,9'u 9. harmonik, %4,34'ü 11. harmonik, %3,34'i 13. harmonik ve %2,36'sı 15. harmonik olduğu görülmüştür.

3.3. Yükte Çalışma Analizleri ve SEY Sonuçları (Full-load Operation Analysis and FEA Results)

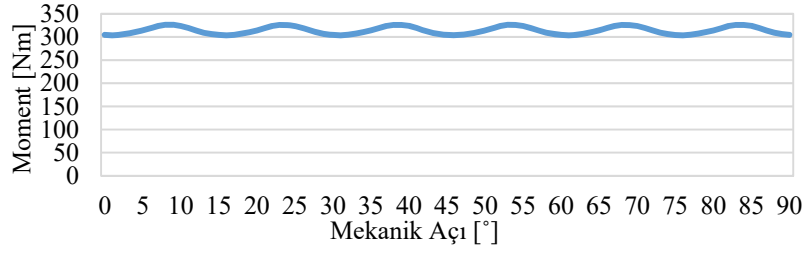
Motorun nominal akım ve moment koşullarındaki davranışı yükte çalışma analizleri ile incelenmiştir. JMAG-Designer üzerinde üç-faz sargı sinüzoidal faz akımı ile beslenirken rotor 1500 rpm'de döndürülerek bir elektriksel periyot için sonuçlar elde edilmiştir. Yükte çalışmada motor geometrisi, ağ yapısı ve manyetik akı yoğunluğu dağılımına ilişkin görüntüler Şekil 7'de verilmektedir. Dişlerdeki maksimum akı yoğunluğu 1,9 T, boyunduruktaki maksimum akı yoğunluğu ise 1,6T olarak elde edilmiştir. Motor, 1500 rpm hızda ve 141,42 A nominal faz akımı değerinde relüktans momentinin de yardımıyla ürettiği moment 314,23 Nm ve moment dalgalanması ise %7,24 olarak elde edilmiştir. Stator histeresiz kaybı 151,34 W ve girdap akımı kaybı 141,04 W, rotor histeresiz kaybı 4,22 W ve girdap akımı kaybı 25,44 W olmak üzere toplam demir kaybı 322,03 W olarak belirlenmiştir. Bakır kayıpları 2099,96 W, mıknatıs girdap akımı kayıpları 47,1 W, mil ve saplama kayıpları 0,29W ve sürtünme vantilasyon kayıpları mekanik gücün

%1'i alınarak 493,6 W olarak belirlenmiştir. Bu kayıp değerleri ile nominal hız ve momentte elektrik motorunun verimi %95,24 elde edilmiştir.

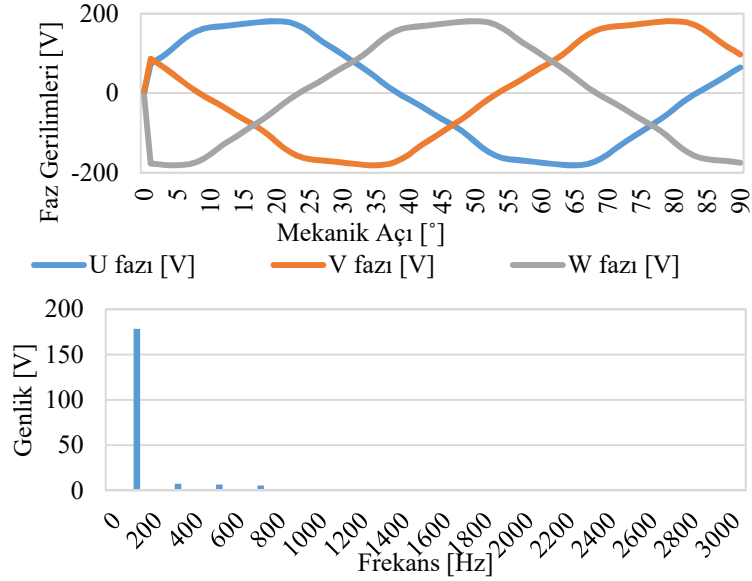
Üretilen momentin mekanik açıya bağlı olarak değişimi Şekil 8'de, üç faz endüklenen gerilim ve bir faza ilişkin gerilimin harmonik analizi ise Şekil 9'da verilmektedir. Faz geriliminin etkin değeri 126,6 V olarak elde edilmiş olup harmonik analizinde birinci harmoniğin genliğinin %4,21'i genliğinde 3. harmonik, %3,64'ü genliğinde 5. harmonik ve %3,01'i genliğinde 7. harmonik oluşumu gözlemlenmiştir. Diğer harmonikler çok düşük olup stator sargıları yıldız bağlı olduğu için 3. harmonik döner manyetik alanda döner alan oluşturmadığı için bir problem oluşturmamaktadır. 5. harmonik döner manyetik alanda ters yönlü döner alan, 7. harmonik ise aynı yönlü manyetik alan oluşturmaktadır. Bu sebeple 5. ve 7. harmonik yaklaşık olarak birbiri ile aynı olduğundan birbirini sönmüleyeceklerdir ve döner manyetik alanda istenmeyen bileşenler elimine edilmektedir. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu grafiği ve harmonik analizi Şekil 10'da verilmektedir. Analizler de, birinci harmoniğin %14,2'si 3. harmonik, %12,13'ü 5. harmonik, %3,13'ü 7. harmonik, %1'i 9. harmonik, %1,1'i 13. harmonik, %2,6'sı 17. harmonik, %3,9'u 19. Harmonik, %3,7'si 21. harmonik olarak elde edilmiştir.



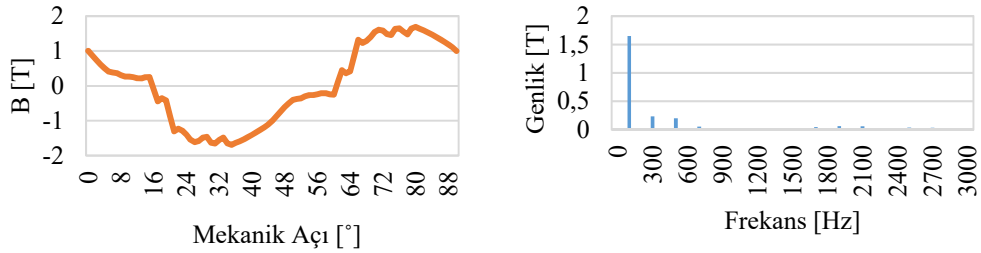
Şekil 7. Yükte çalışmada IPM motor geometrisi, ağ yapısı ve manyetik akı yoğunluğu
(2D IPM motor geometry, mesh structure of the motor and magnetic flux density at full-load operation)



Şekil 8. Üretilen moment-mekanik açı değişim eğrisi (Torque versus mechanical angle curve)



Şekil 9. Üç faz için endüklenen gerilim-mekanik açı değişimi ve bir faz harmonik analizi eğrileri
(Three-phase induced voltage versus mechanical angle and single-phase harmonic analysis curves)



Şekil 10. Hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ve harmonik analizi (Air-gap magnetic flux density and harmonic analysis)

3.4. Endüktans Değerlerinin Elde Edilmesi (Determination of the Inductance Values)

Yük açısı, geometri ve malzemelerin doğrusal olmayan özellikleriyle oluşan doymanın yarattığı endüktans değişimleri JMAG-Designer ile farklı akım ve yük açısı için elde edilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi d eksenli endüktansı düşük manyetik geçirgenliği olan sürekli mıknatıslar nedeniyle düşük olmakta ve bu nedenle d eksenli boyunca çok yüksek manyetik direnç oluşmakta ve manyetik doymadan L_d daha az etkilenmektedir. q eksenli endüktansı ise, d eksenli endüktansından yüksek manyetik geçirgenlik dolayısıyla daha büyüktür. q ekseninde manyetik direnç çok daha küçük olduğu için manyetik doymadan daha fazla etkilenmektedir. Şekil 11'de relüktans ve mıknatıs momenti toplamının maksimum olduğu nokta akım faz açısının 20° olduğu noktada $331,07$ Nm olduğu belirlenmiştir. Elde edilen L_d ve L_q -akım faz açısı ve moment-akım faz açısı eğrileri Şekil 11'de verilmektedir. Nominal faz akımında L_q/L_d endüktans oranı (çıkıklık oranı) akım faz açısı 80° iken $3,2$, 70° iken $2,85$ olarak belirlenmiştir. 1500 rpm'den 3900 rpm'ye çıkabilmek için gerekli olan endüktans oranı ise $2,6$ 'dır. Hedeflenen parametreler ve çalışma koşulları bu endüktans oranıyla sağlanabilmektedir.

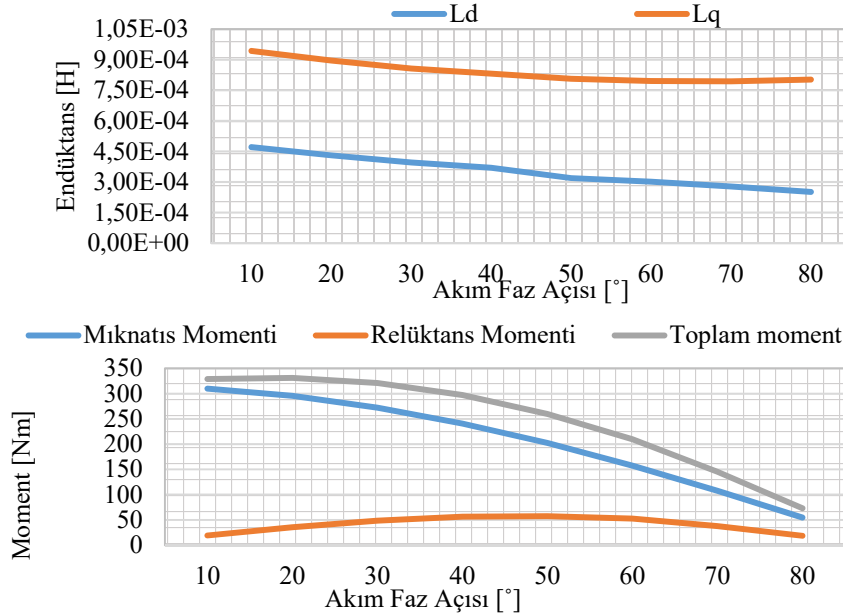
4. TERMAL VE MEKANİK STRES ANALİZİ (THERMAL AND MECHANICAL STRESS ANALYSIS)

Elektrik motorunun tasarım sürecinde termal ve mekanik stres analizlerinin gerçekleştirilmesi motorun istenilen sınırlar içerisinde olduğunun belirlenmesinde önemlidir.

Motorun dış gövde, gövde kapakları, rulmanları, mil ve rotoru birleştirmek için kullanılan saplama gibi malzemeler belirlenirken motorun elektromanyetik tasarımını

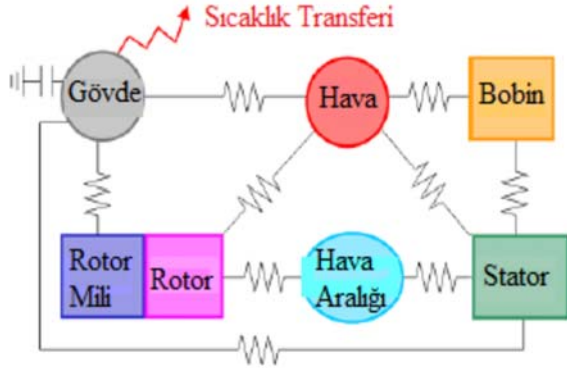
etkilemeyecek gereksinimlere uygun malzemeler seçilmiştir. Bu pasif malzemelerden mil ve saplaması dayanımı yüksek malzemelerden, rulmanlar maksimum motor hızında çalışabilen malzemeden ve motorun dış gövde ve gövde kapakları hafif ve işlemesi kolay alüminyum malzemelerden seçilmiştir. Termal analizde öncelikle sıcaklık eşdeğer devresi kullanılarak elektriksel direnç devresi oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir [16]. Sıcaklık eşdeğer devresi Şekil 12'de verilmektedir. Sırasıyla sürekli mıknatıstan rotora, rotordan hava aralığına, statoran hava aralığına ve bobinden statora termal dirençler eklenmiş ve bakır kaybı, mıknatıslardaki kayıplar gibi kayıp değerleri ise sıcaklık bileşeni olarak devreye eklenmiştir. Elektriksel direnç devresi içerisindeki termal direnç değerleri analitik denklemler kullanılarak hesaplanmış ve eşdeğer devrede kullanılmıştır. Nominal çalışma koşulu için oluşturulan analizde bobinler, hava aralığı, mıknatıslar, rotor ve stator sıcaklıkları Şekil 13'de verilmektedir. Sıcaklığın maksimum olduğu nokta $123,6^\circ\text{C}$ ile bobinlerde ve en büyük kayıplar da bobinlerde olduğundan, ısı transferi direnç katsayısı da bu ısıyı iletmediğinden bu durum normaldir. F sınıfı izolasyon malzemesi kullanıldığından $123,6^\circ\text{C}$ izolasyon için uygun bir sıcaklıktır. Elektriksel ve termal devre için sıcaklık yükselmesi grafiği Şekil 13'de görülmektedir.

Yapısal olarak en yüksek zorlanma mekanik dönüşün ve hava boşluklarının olduğu rotorda gerçekleşmektedir. Bu sebeple, sac malzemesi üzerine binen kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir. Maksimum devir sayısı 3900 rpm olduğundan ve en yüksek kuvvet bu hızda oluşacağından zorlanma analizleri bu hızda yapılmıştır. Rotor 8 kutuptan olduğundan, geometri sekize bölünerek analizler gerçekleştirilmiştir. Maksimum zorlanma ve yer değiştirme değişimleri Şekil 14'te verilmektedir. Maksimum yer değiştirme $3,6$ μm ve maksimum mekanik zorlanma ise



Şekil 11. L_d ve L_q -akım faz açısı ve moment-akım faz açısı grafikleri
(L_d and L_q versus current angle curves and torque versus phase current angle curves)

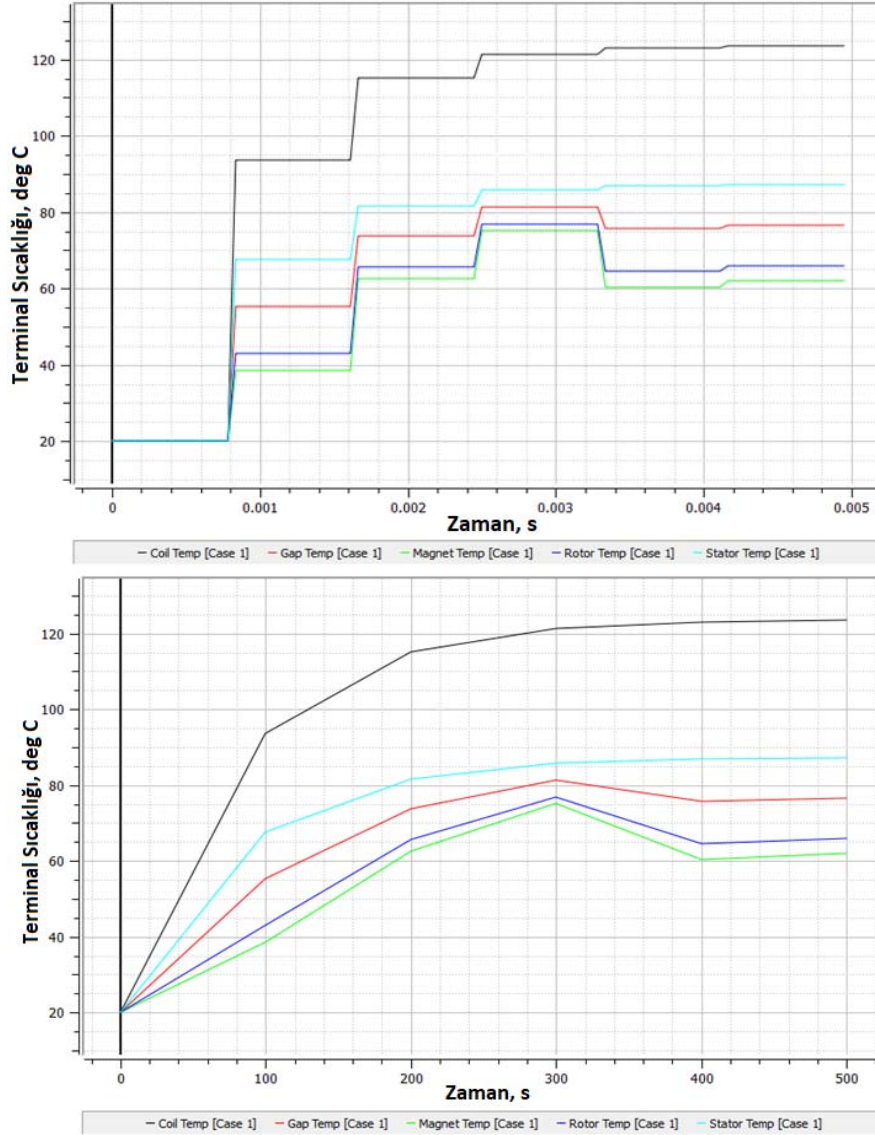
53,94 MPa olarak elde edilmiş olup istenilen sınırlar içerisinde olduğu analizlerle belirlenmiştir.



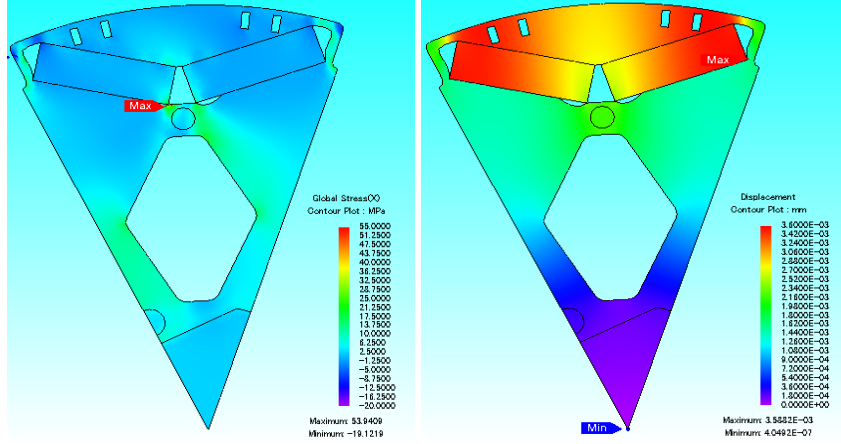
Şekil 12. GSMSM'nin sıcaklık eşdeğer devresi
(Temperature equivalent circuit of the IPM motor)

5. GSMSM'İN SÜRÜCÜ VE KONTROL SİSTEMİ (DRIVE AND CONTROL SYSTEM OF THE IPM MOTOR)

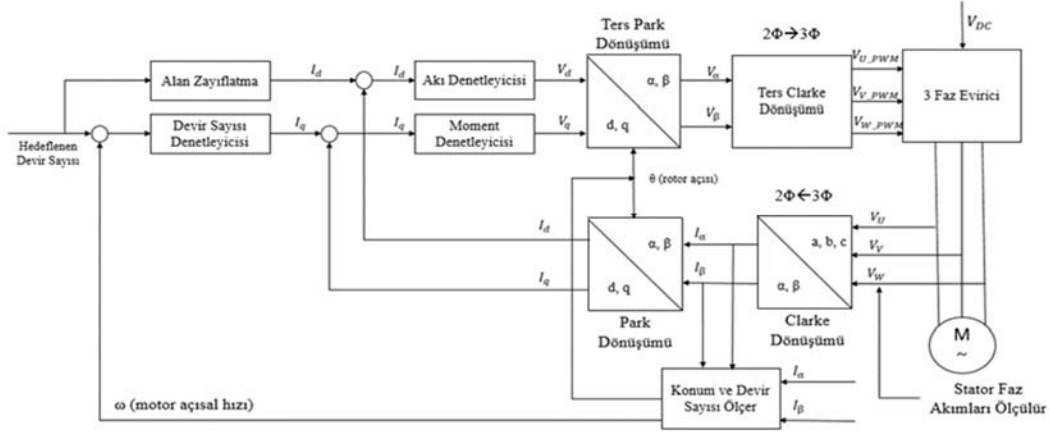
SMSM'lerin günümüzdeki gelişimi, yüksek performans ve verimli yapıları, sürekli mıknatıs ve motor sürücü teknolojilerinin gelişmesi ile gerçekleşmiştir. Sabit bir çalışma noktasında çalışmayan EA'ların motorlarından değişken hız ve moment gereksinimleri yüksek verim talep edilmektedir. Bu sebeple, SMSM'lerin kontrollerinde geniş moment-hız karakteristiklerinin sağlanması için genellikle dört yöntem uygulanır. Bunlar; trapezoidal sürüş, sinüzoidal sürüş, alan yönlendirmeli kontrol (FOC) ve doğrudan moment kontrolüdür (DTC). Çalışma kapsamında kontrol metodu olarak alan yönlendirmeli kontrol çeşitli avantajları dolayısıyla seçilmiştir. Uygulanan FOC'nin genel blok diyagramı Şekil 15'de verilmektedir [17]. Alan yönlendirmeli kontrolde GSMSM'nin fazlarından akım sensörü yardımı ile alınan akım bilgileri kullanılarak gerilim



Şekil 13. Elektriksel ve termal devrede sıcaklık yükselme grafiği (Temperature rise graphs for electrical and thermal circuit)



Şekil 14. Mekanik zorlanma ve yer değiştirme dağılımları (Mechanical stress and displacement distributions)



Şekil 15. GSMSM'nin alan yönlendirmeli kontrol blok diyagramı (Field oriented control block diagram of IPM motor)

ve akım vektörleri hesaplanmaktadır. Blok diyagramından da görüleceği üzere bu kontrol yönteminde stator üç faz gerilim ve akımları zamana bağlı ya da rotorun açısına bağlı olarak zamandan bağımsız iki bileşenli bir yapıya dönüştürülür. Clarke dönüşümü kullanılarak stator faz akımları üç faz sinüzoidal sistemden iki fazlı zamana bağlı bir sisteme (α - β gerilim ve akımları) ve Park dönüşümü ile de zamandan bağımsız d-q eksenlerine dönüştürülmektedir. Sürüş algoritması oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan FOC yönteminde geri bildirim için faz akımlarını ölçen akım sensörü ve rotor konum bilgisini ölçen enkoder kullanılmış ve aracın isterlerini sağlayacak şekilde geniş moment-hız aralığında çalışma başarı ile gerçekleştirilmiştir.

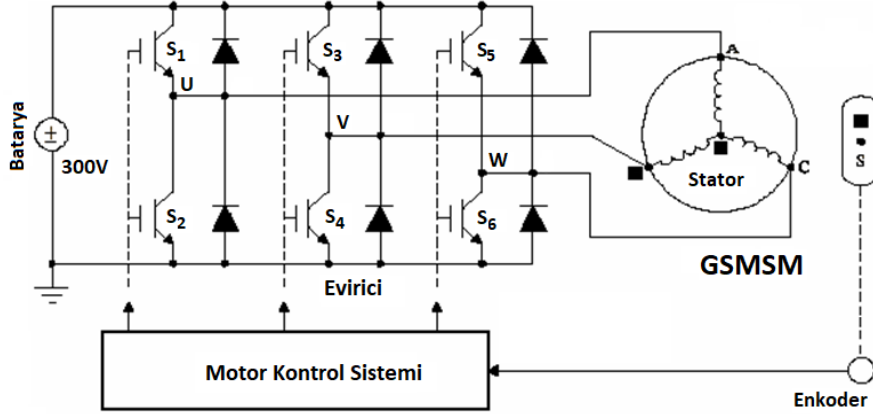
En genel anlamda EA'ların elektrikli sürüş sistemini batarya, üç fazlı evirici ve elektrik motoru oluşturmaktadır. Enerji kaynağı bataryadan elde edilen doğru gerilim üç fazlı evirici üzerinden elektrik motorunun sinüs formunda dalga şekli ile beslenmesi sağlanmaktadır. Elektrik motorunda bulunan konum sensörü (enkoder) ve akım sensöründen geri bildirim alınarak elektrik motorunun beslenmesi gereken genlik ve frekanstaki faz gerilimleri FOC algoritması tarafından belirlenip üç fazlı evirici üzerinden motorun üç fazına uygulanır. Motor sürücü ve kontrol sisteminin genel şeması Şekil 16'da verilmektedir.

6. GSMSM'NİN GERÇEKLENMESİ VE DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE IPM MOTOR)

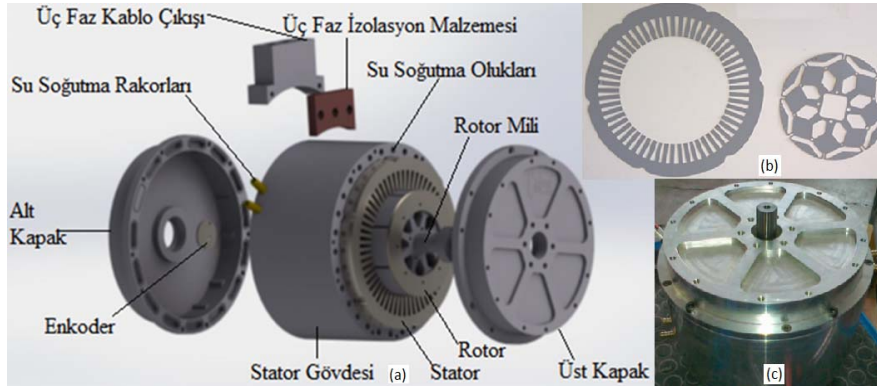
6.1. Motorun Üretimi (Production of the Electric Motor)

Elektrik motorunun üretimi, stator, rotor ve soğutma sistemi ile beraber gövde üretimi olmak üzere üç ana kısımda ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Stator ve rotor üretildikten sonra mekanik aksamlarla beraber rotor miline rulman yerleştirilmiştir. Tasarımı yapılan motor dış gövdesi statora sıkı geçme olarak yerleştirilmiş ve ön ve arka kapağı takılan motor birleştirilerek GSMSM'nin üretimi gerçekleştirilerek araç üzerinde uygulanmıştır. Şekil 17a'da tasarımı gerçekleştirilen motorun CAD çizimi ile patlatılmış geometrisi verilmektedir. Stator ve rotor sacları lazer kesim makinesinde kestirilmiş olup Şekil 17b'de kesilmiş rotor ve stator saclarının görünümü verilmektedir. Statorun üretim aşaması temel olarak stator saclarının kesilmesi, sacların birleştirilmesi, faz sargılarının oluklardan ve birbirinden izole edilerek sarılması işlemlerinden oluşmaktadır.

Öncelikle stator sacları fiber lazer kullanılarak kestirilip, tasarlanan mekanik düzenek yardımıyla birleştirilen saclar



Şekil 16. Motor sürücü ve kontrol sisteminin genel şeması (General scheme of the motor drive and control system)



Şekil 17. a) Üretilen GSMMSM'nin bilgisayar destekli tasarımı (CAD) ve patlatılmış resmi b) Üretimi gerçekleştirilen stator ve rotor sacı görünümleri c) Üretimi tamamlanmış GSMMSM

(Computer aided design (CAD) of the IPM motor and exploded picture (a) Produced stator and rotor pictures (c) Manufactured IPM motor

sıkılarak fırınlanmıştır. Sargı tellerinin yüksek iletkenliğe sahip bakır malzemeden olması ve dışındaki izolasyonun yüksek sıcaklığa (F sınıfı) ve mekanik zorlanmalara dayanması EA'larda çalışma koşulları bakımından gerekmektedir. Sargıların stator demir çekirdeği üzerine yerleştirilmesi sırasında oluk doluluk oranı ve belli sınırlar içerisinde oluktan dışarı taşmalar önemli olduğundan 3-faz sargıların sarım işlemleri hassas bir şekilde sarım şeması ve tasarım kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yalıtım sağlayan malzemeler kâğıt maddelerden oluşmakta olup bu tür malzemeler sıcaklık dayanımına göre belirlenmiştir. Rotor üretimi ise mil malzemesinin işlenmesi, rotor saclarının kesilmesi, sacların birleştirilmesi, mil ile rotor demir çekirdeğinin birleştirilmesi ve sürekli mıknatısların yerleştirilmesi aşamalarından oluşmakta olup üretime özel mekanik sistemler kullanılmıştır. Özellikle enerji çarpanı oldukça yüksek olan NdFeB mıknatısın kırılabilirliği nedeniyle üretim sırasında rotora montajı oldukça önemlidir. Yol koşullarına bağlı olarak, araç içerisindeki motorun titreşimli ortamda çalışacağı düşünüldüğünde SM'lerin rotora uygun şekilde sabitlenmesi gerekmektedir. Üretilen stator ve rotor gövdeleri, SM çekim kuvveti dolayısıyla, statorun CNC tablasına sabitlenmesi ve

rotorun CNC motoruna bağlanmasıyla merkezleme yapılarak birleştirilmiştir. Üretilen GSMMSM'nin görünümü Şekil 17c'de verilmektedir.

6.2. Maliyet ve Güç Yoğunluğu Analizi (Cost and Power Density Analysis)

Elektrikli araçlar için elektrik motor tasarımı süreci maliyet ve ağırlık gibi kriterleri göz önünde bulundurarak en uygun geometrik yapı ve boyutların seçimine dayanır. Bu kapsamda, tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen GSMMSM'de kullanılan aktif malzemelerin ağırlıkları: 35.560 kg demir çekirdek, 2,7 kg NdFeB tipi sürekli mıknatıs ve 3,2 kg bakır iletkenlerdir. Tüm malzemeler birleştirildiğinde motorun toplam ağırlığı 59,25 kg olmaktadır. Motorun güç yoğunluğu ise 0,75 kW/kg olarak elde edilmiştir. Sac malzemesinin kilogram maliyeti 2\$, sürekli mıknatıs malzemesinin adet fiyatı 4\$ ve bakırın kg ağırlığı 6\$ olmak üzere motorda kullanılan aktif malzemelerin toplam maliyeti yaklaşık olarak 1700 TL'dir. Seri üretim aşamasında mekanik parçaların üretimi de dâhil olmak üzere bu maliyetler toptan ve sürekli alımlarla beraber daha aşağılara doğru düşecektir. Böylece hedeflenen ana unsurlar kapsamında maliyeti düşürülmüş, düşük moment titreşimli,

yüksek verim ve güç yoğunluklu gömülü sürekli mıknatıslı motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

6.3. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçları (Experimental Studies and Results)

Üretilen elektrik motoruna, çalışmaya özel olarak tasarlanıp hazırlanan deney düzeneğinde; boшта ve yükte çalışma deneyleri, motor modda verimlilik haritası çıkartma çalışmaları, generatör modda yüklü çalışma deneyi ve sıcaklık deneyi gibi çeşitli elektriksel testler uygulanmıştır. Deneyler yapılırken, deney düzeneği üzerinde motor ve sürücüyü soğutmak için kullanılan kapalı devre sıvı soğutma sistemi, aracın simülasyonunun yapılması için Uveyk üzerinde kullanılan soğutma sistemine özdeş tutulmuştur. Çalışma için hazırlanan deney düzeneğine ilişkin resim tüm donanımları kapsayacak şekilde Şekil 18’de verilmektedir.

6.3.1. Bošta çalışma deneyi ve sonuçları (No-load test and results)

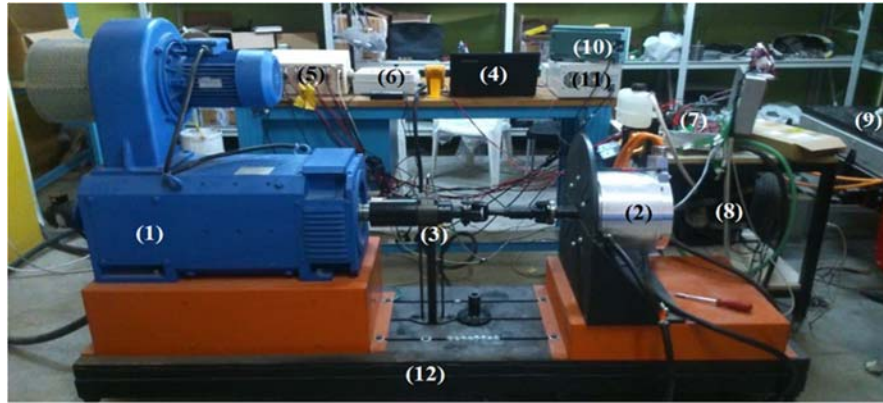
Bošta çalışma deneyinin gerçekleştirilmesi için motor 0-1800 rpm hız aralığında generatör modda çalıştırılmış ve fazlardaki zıt-EMK değerleri kaydedilmiş olup elde edilen sonuçlar Şekil 19’da verilmiştir. Üretilen zıt-EMK değeri 750 rpm’de 50,08 V ve 1500 rpm’lik nominal devir sayısında ise 100,67 V olarak elde edilmiştir.

6.3.2. Motor modda yükleme deneyi ve sonuçları (Load test for motor operation and results)

Motorun nominal hızında, 10 Nm aralıklarla nominal moment değerine kadar alan yönlendirmeli kontrol algoritması kapsamında d eksenini akımı (I_d) sıfır yapılarak (sabit moment bölgesi) yüklenmiştir. Deneyler sonucu elde edilen değerler ile GSMSM’ye ilişkin verim grafiği oluşturulmuştur. Güç kaynağı olarak Turcoto Uveyk aracı üzerindeki 300V nominal gerilime sahip batarya paketi kullanılmıştır. Faz akımının 130 A ve momentin 247 Nm olduğu durumda elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 20’de görülmektedir. Deneyler sonucunda maksimum motor verimi %94,8 olarak elde edilmiş olup moment-faz akımı ve verim-faz akımı grafikleri Şekil 21’de verilmektedir. Nominal akım değerinde üretilen moment 266,25 Nm olarak elde edilmiştir.

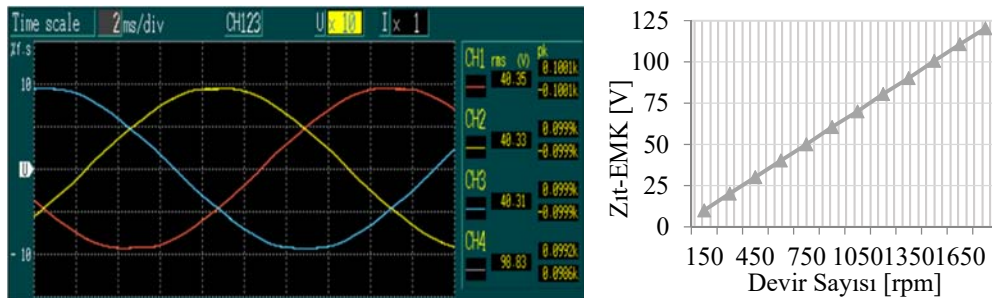
6.3.3. Araç üzerinde gerçekleştirilen testler (Tests on the electric vehicle)

Deney düzeneği üzerinde testleri tamamlanan elektrik motoru ve sürücü sisteminin adaptasyonu CAD çizimi Şekil 22’de verilmekte olan araç üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dönüşümü gerçekleştirilen araçta şanzıman kaldırılarak doğrudan diferansiyele monte edilen elektrik motoru, sürücüsü ve batarya yönetim sistemiyle birlikte entegre

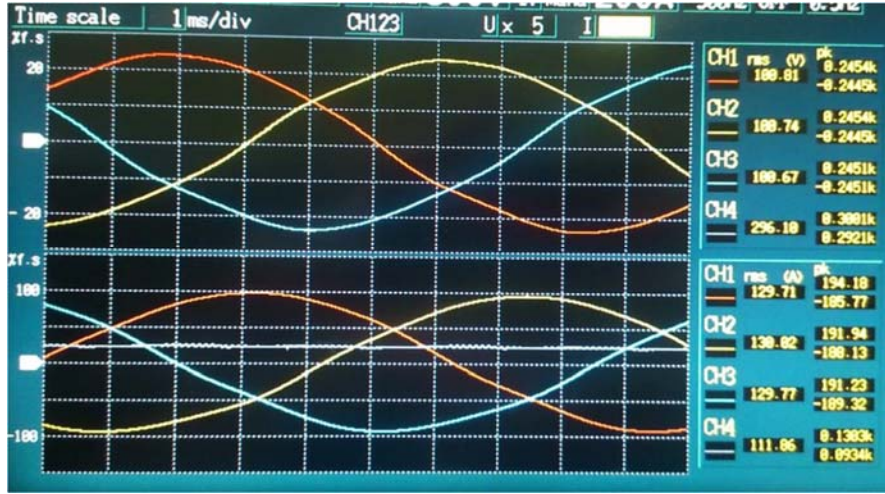


Şekil 18. Deney düzeneği 1) Yük motoru 2) Tasarlanan GSMSM 3) Moment ölçer 4) Bilgisayar 5) Güç analizörü 6) Kontrol paneli 7) Sürücü ve kontrolörü 8) Soğutma sistemi 9) Batarya paketi 10) Osiloskop 11) DA güç kaynağı 12) Mekanik sabitleme düzeneği

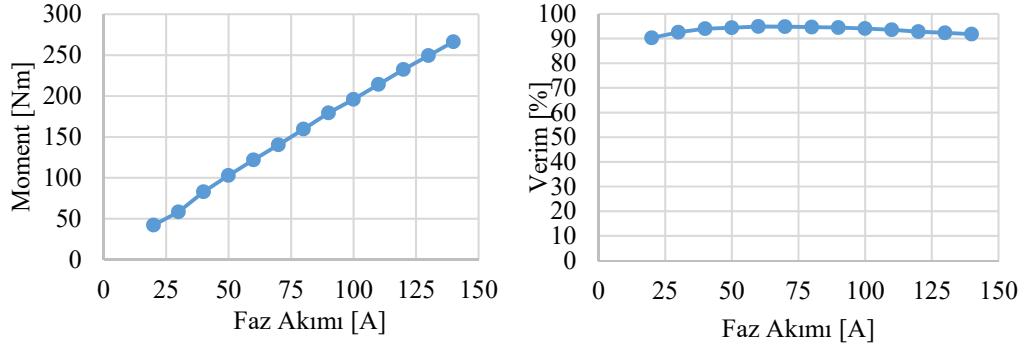
(Experimental setup (1) Load motor (2) Designed IPM motor (3) Torque transducer (4) Laptop (5) Power analyzer (6) Control panel (7) Driver and controller (8) Cooling system (9) Battery pack (10) Oscilloscope (11) DC power supply (12) Mechanical fixing structure)



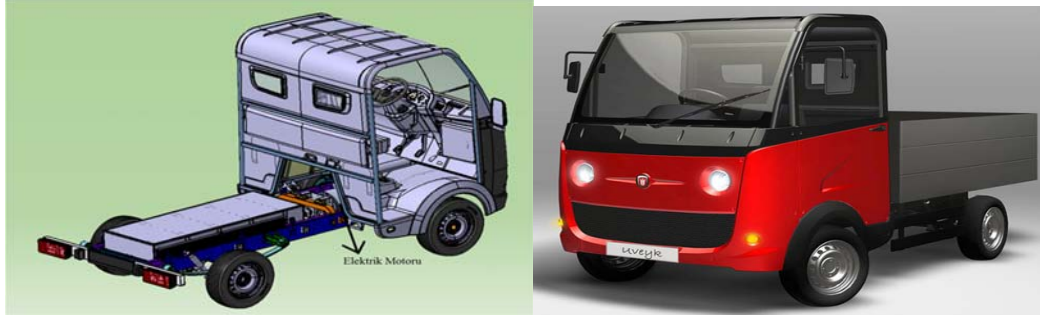
Şekil 19. 600 rpm’de zıt-EMK dalga şekilleri ve 1800 rpm’e kadar bošta çalışmada zıt-EMK eğrisi
(Back-EMF waveforms at 600 rpm and back-EMF curve at no-load operation up to 1800 rpm)



Şekil 20. 130 A faz akımında gerilim ve akım dalga şekilleri (Voltage and current waveforms at 130 A phase current)



Şekil 21. Moment-faz akımı ve verim-faz akımı grafikleri (Torque versus phase current and efficiency versus phase current curves)



Şekil 22. Motor ve sürücü adaptasyonu tamamlanmış Uveyk aracının CAD tasarımı (CAD design of Uveyk vehicle with complete IPM motor and driver adaptation)

olarak çalışması araç üzerinde sağlanmıştır. Tasarlanan elektrik motoru ve diğer sistemler sayesinde araç çekişi elektriksel olarak gerçekleştirilip yol testleri başarı bir şekilde yapılmıştır. Hasanağa organize sanayi bölgesinde yapılan testlerde 155 km menzil boyunca araç tam yüklü iken sürüşler gerçekleştirilmiş ve gerekli veriler elde edilmiştir. Motor sürücüsündeki kontrol sistemiyle, aracın gaz pedalına basılmadığı durumlarda ise gerikazanımlı frenleme gerçekleştirilerek geri kazanım sağlanmıştır. Elektrik motorundan güç talep edilmediği durumlarda ise elektrik makinesi generatör modda çalıştırılarak bataryalar beslenmektedir.

7. NÜMERİK SONUÇLARIN DENEYSEL SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF NUMERICAL RESULTS WITH EXPERIMENTAL RESULTS)

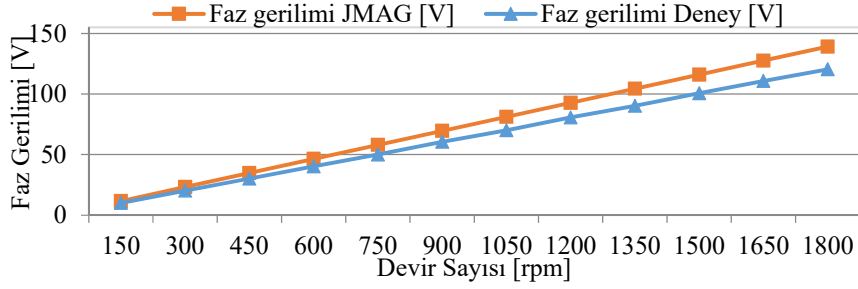
Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak elde edilen sonuçlar farklı yükleme durumları için Tablo 2’de verilmektedir. Deneysel olarak boşta çalışmada elde edilen endüklenen gerilim değerleri ile SEY analizleriyle elde edilen sonuçlar 150 rpm aralıklarla karşılaştırılmıştır. JMAG’in sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde tüm adımlarda üretilen zıt-EMK değeri

yaklaşık olarak %13,5 civarında daha fazla çıkmıştır. Bu farklılığın sabit bir oranda olması, nümerik analizlerde kapsama alınamayan lineer olmayan etkilerden, üretimde oluşan ve öngörülemeyen farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir ve kabul edilebilir seviyededir. Deneysel ve nümerik olarak elde edilen sonuçların karşılaştırmalı faz gerilimi-devir sayısı grafikleri Şekil 23’de verilmektedir. Motor çalışmada tam yükte yükleme deneyi yapılan elektrik motorunun moment-faz akımı ve verim-faz akımı grafikleri ise SEY analizleri ve deneyler ile 10 A aralıklarla karşılaştırılmıştır.

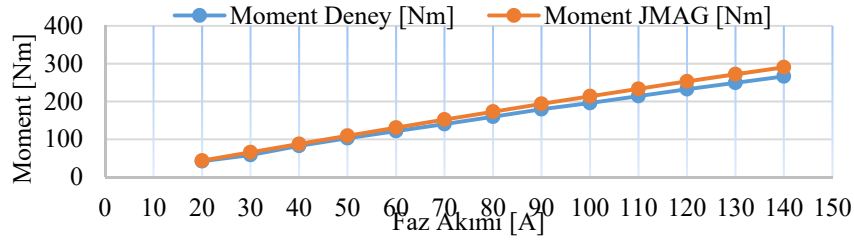
Şekil 24’de JMAG ve deneysel olarak elde edilen moment-faz akımı grafiği karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Moment sapmasının maksimum olduğu nokta 30 A faz akımında %12,5, en az olduğu nokta ise %3,84 ile 20 A faz akımında elde edilmiştir. Şekil 25’te ise JMAG programı üzerinde analiz edilen motor ve gerçekleştirilerek deneyi yapılan motorun verim-faz akımı değişim grafiği karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Verim sapmasının maksimum olduğu nokta 20 A faz akımında %4,74 olarak, en az olduğu nokta ise %0,87 ile 70 A faz akımında elde edilmiştir.

Tablo 2. Deneysel ve nümerik sonuçlar (Experimental and numerical results)

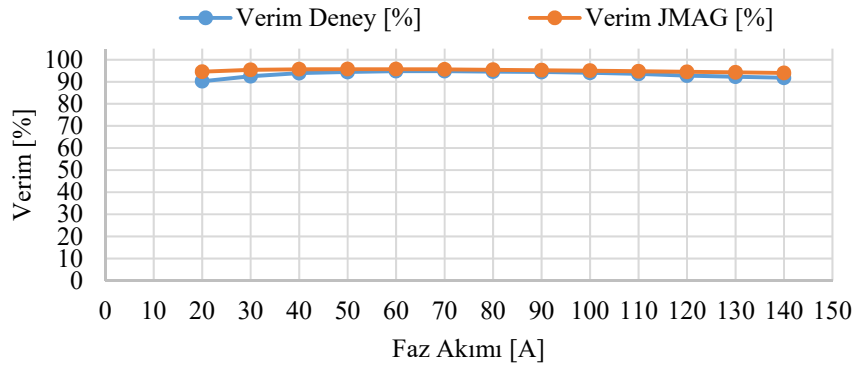
Akım [A]		140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Deneysel	Moment [Nm]	266	249	232	214	196	179	160	140	122	103	83
Sonuçlar	Verim [%]	91,8	92,3	92,8	93,6	94	94,4	94,6	94,8	94,8	94,4	94
Nümerik	Moment [Nm]	290	271	252	233	214	193	173	152	131	109	88
(SEY)	Verim [%]	93,9	94,2	94,5	94,8	95	95,2	95,4	95,6	95,7	95,8	95,7
Sonuçlar												



Şekil 23. Boşta çalışmada deneysel ve SEY faz gerilimi-devir sayısı karşılaştırma grafiği (Experimental and FEA comparison curve for phase-voltage vs. speed at no-load operation)



Şekil 24. Yükte çalışmada deneysel ve SEY moment-faz akımı karşılaştırma grafiği (Experimental and FEA comparison curve for torque vs. phase-current at load operation)



Şekil 25. Yükte çalışmada deneysel ve SEY verim-faz akımı karşılaştırma grafiği (Experimental and FEA comparison curve for efficiency vs. phase-current at load operation)

Nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek farkın zıt-EMK değerinde olduğu en az farkın da verimde olduğu görülmüştür. Aradaki fark motorun en çok çalışacağı noktalarda yaklaşık olarak %5'in altında elde edilmiş olup malzeme özellikleri, üretim aşaması, doğrusal olmayan ve öngörülemez etkiler dikkate alındığında bu farklılıklar kabul edilebilir seviyededir.

8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gerçekleştirilen bu çalışmada, geniş moment-hız bölgesinde düşük moment tireşimleri, yüksek verim ve güç yoğunluğu gereksinimlerinin başta olduğu kriterler dikkate alınarak elektrikli araçlar için mıknatıs oranı azaltılmış gömülü mıknatıslı senkron motora ilişkin birçok elektrikli ve mekanik parametrelerin optimize edildiği tasarım süreci özgün yaklaşımlarla geniş kapsamlı olarak ele alınmıştır. Araç gereksinimlerinden yola çıkılarak tasarım sürecini kapsayan akış diyagramı oluşturulup, motorun analitik ve nümerik olarak ayrıntılı elektromanyetik, termal ve yapısal dayanım analizleri ile beraber tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarımda tek oluklu yüksek sayılı stator yapısının kullanımı ile hem oluk yıldızındaki fazörlerin arasındaki açılarının küçük olması ve dolayısıyla oluk etkisinin azaltılması hem de tek oluk sayısı sayesinde oluşan simetrik olmayan sargı yapısının meydana gelen radyal kuvvetleri sönmemesi sağlanmıştır. Böylece uzay harmonikleri, oluşan radyal kuvvetler ve vuru momentinin etkisi azaltılmıştır. Bu kapsamda, moment dalgalanması ve vuru momentinin azaltılması amacıyla özgün ve tasarıma özel olarak seçilen 57 oluk ve 8 kutup sayısı ile faz- kutup başına düşen oluk sayısı 2.375 olarak belirlenmiş ve oluşturulan simetrik olmayan yapıda istenilmeyen etkiler azaltılmıştır. Gerekli performans hedefleri ve düşük maliyet doğrultusunda rotor yapısı, mıknatıs boyutları ve yerleşimleri üzerine yapılan optimizasyon çalışmaları ve katkılarla sürekli mıknatıs oranı azaltılmış gömülü mıknatıslı motor yapısı elde edilmiştir. Böylece moment dalgalanması düşük, harmonikleri ve sürekli mıknatıs oranı azaltılmış yüksek verim ve güç yoğunluklu gömülü mıknatıslı senkron motor üretilmiş, hazırlanan deney düzeneğinde gerekli elektrikli ve mekanik testler gerçekleştirilip, karşılaştırma sonuçları ve optimizasyonlarla tasarımda eniyilemeler yapılmıştır. Tasarlanan elektrik makinesi ve sürücü sistemi, uygulaması yapılan araca monte edilerek aracın elektrikli araca dönüşümü sağlanmış ve araç üzerinde performans ve yol testleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkılarından ve desteklerinden dolayı Cadem CAD/CAM Destek Merkezi ve Bilgisayar A.Ş. firmasına, Fatih Terzioğlu'na ve Cadem çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ahman M., Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles, *Energy*, 26 (11), 973-989, 2001.

2. Mun J. M., Park G. J., Seo S., Kim Y. J., Jung S. Y., Design characteristics of IPMSM with wide constant power speed range for EV traction, *IEEE Trans. Magn.*, 53 (6), 1-4, 2017.
3. Yang Y., Castano S. M., Yang R., Kasprzak M., Bilgin B., Sathyan A., Emadi A., Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications, *IEEE Trans. Transportation Electrification*, 3 (1), 86-97, 2017.
4. Huynh T. A., Hsieh M. F., Performance evaluation of thin electrical steels applied to interior permanent magnet motor, *IEEE 19th Int. Conf. Electrical Machines and Systems*, 1-6, 2016.
5. Seo J. H., Kwak S. Y., Jung S. Y., Lee C. G., Chung T. K., Jung H. K., A research on iron loss of IPMSM with a fractional number of slot per pole, *IEEE Trans. Magn.*, 45 (3), 1824-1827, 2009.
6. Jiang J. W., Bilgin B., Sathyan A., Dadkhah H., Emadi A., Noise and vibration reduction for IPMSM by using rotor circumferential slits, *IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives (IEMDC)*, 1-8, 2017.
7. Castano S. M., Jiang J. W., Bilgin B., Sathyan A., Dadkhah H., Emadi A., An investigation of slot-pole combinations for interior permanent magnet synchronous machines with different magnet topologies, *IEEE International Con. Electric Machines and Drives (IEMDC)*, 1-8, 2017.
8. Li Y., Bobba D., Sarlioglu B., Design and optimization of a novel dual-rotor hybrid PM machine for traction application, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65 (2), 1762-1771, 2018.
9. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V., Design of rotating electrical machines, John Wiley & Sons, Birleşik Krallık, 2013.
10. Han S. H., Jahns T. M., Zhu Z. Q., Design tradeoffs between stator core loss and torque ripple in IPM machines, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS'08*, 1-8, 2008.
11. Suzuki M., Sakai, K., Reduction of torque ripple for PM motor with toroidal winding, *19th Int. Conf. Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1-6, 2016.
12. Yayla N., Karayolu Mühendisliği, İstanbul, Türkiye, 2002.
13. Arkkio A., Design of electrical machines lecturer notes, Aalto University, Finland, 2015.
14. Hendershot J. R., Miller T. J. E., Design of brushless permanent-magnet machines, *Motor Design Books*, ABD, 2010.
15. Boduroğlu T., Elektrik makinaları dersleri, Cilt 3 Kısım 2, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 1986.
16. JMAG Application Note, Thermal Analysis of an IPM Motor, 2014.
17. Sezenoğlu C., Aydoğan F., Kurnaz A. H., Akgül L., Erçin M. E., Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için elektrik makinesi ve sürücüsü, Cadem A.Ş., Bursa, 2017.
18. Ergene L.T., Polat A., Bakhtiarzadeh H., Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators,

- Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 757-770, 2018.
19. Çabuk A.S., Sağlam S., Üstün Ö., Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 1975-1985, 2019.

