



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YAPAY SİNİR AĞI İLE DAHİLİ MİKNATISLI MOTORLAR İÇİN ROTOR VE STATOR GEOMETRİSİ KESTİRİMİ

MAJID POURKARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. M. Caner AKUNER

EŞ-DANIŞMAN
Doç. Dr. Uğur DEMİR

İSTANBUL, 2022



MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES



**ROTOR AND STATOR GEOMETRY
ESTIMATION WITH ARTIFICIAL NEURAL
NETWORK FOR INTERNAL MAGNETS
MOTOR**

MAJID POURKARIMI

MASTER THESIS

Department of Mechatronics Engineering

Thesis Supervisor

Prof. Dr. M. Caner AKUNER

Thesis CO- Supervisor

Assoc. Prof. Uğur DEMİR

ISTANBUL, 2022

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Majid POURKARIMI'nin “**YAPAY SİNİR AĞI İLE DAHİLİ MIKNATISLI MOTORLAR İÇİN ROTOR VE STATOR GEOMETRİSİ KESTİRİMİ** ” başlıklı tez çalışması, tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. M. Caner AKÜNER (Danışman)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi. Gazi AKGÜN (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi. Koray ERHAN (Üye)

İstanbul Gedik Üniversitesi (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı ile Majid POURKARIMI'nin Mekatronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Adı SOYADI

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜRLER

Bu tez çalışmasının fikir aşamasından başlayarak desteklerini esirgemeyen, yol gösteren danışman Hocam, Sayın Prof. Dr. M. Caner AKÜNER'e,

Tezin tüm aşamalarında gerek bilimsel gerek yazılım uygulamaları hakkında bilgi veren ve yol gösteren eş danışman Hocam, Sayın Doç. Dr. Uğur DEMİR'e

Yüksek Lisans eğitimim sürecinde sınıflarında bulunduğum değerli Hocalarım'a,

Ve desteklerini hiç eksik etmeyen değerli aileme şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	i
YENİLİK BEYANI	ii
1. GİRİŞ/INTRODUCTION.....	1
2. MATERIAL VE YÖNTEM	4
2.1 Parametre belirleme:.....	4
2.1.1 Deneme ve Yanılma yöntemi (trial-and-error approach):.....	4
2.1.2 Deneylerin tasarımı (Design of experiment, DoE):.....	4
2.1.3 Taguchi Yöntemi (TAGUCHI Method):.....	5
2.2 Yapay Sinir Ağı, YSA(Artificial Neural Network, ANN).....	6
2.2.1 YSA Eğitimi.....	7
2.2.1.1 Denetimli Eğitim.....	8
2.2.1.2 Denetimsiz Eğitim	8
2.2.2 YSA Seçimi.....	8
2.3 Evrişimsel Sinir Ağı, ESA(Convolutional Neural Network, CNN)	9
2.3.1 Terminoloji.....	9
2.3.2 CNN Yapısı.....	10
2.3.3 Evrişim katmanları	10
2.3.4 Havuzlama Katmanı.....	12
2.3.5 Ağ Eğitimi.....	13
2.3.5.1 Gradyan İnişi.....	14
2.4 Ansys RMXprt and Ansys Maxwell	15
2.4.1 Stator Tasarımı:.....	16
2.4.2 Rotor Tasarımı:	16
2.4.3 Sargı Düzeni:	17
2.5 Dahili Kalıcı Mıknatıslı Motor, IPM(Interior Permanent Magnet)	18
2.6 IPM Motoru ve Parametreleri	22
2.6.1 Stator.....	22
2.6.2 Stator sargıları (Slot).....	23
2.6.3 Rotor	23
2.6.4 Sabit Mıknatis (Pole)	24
2.6.5 DoE Tablosu	25
2.6.6 DoE değerlerine göre IPM motorlarının oluşturulması	27
2.6.7 RMXprt IPM ‘in Maxwell Design ‘a dönüştürülmesi	32
2.6.8 AutoCAD programında dxf dosyaların çevrilmesi	33
2.6.9 PDF’lerin Crop edilmesi, PNG ve Grayscale’le dönüştürülmesi.....	33
2.6.10 Input verilerinin hazırlanması.....	36
2.6.11 Output very setinin hazırlanması	40
2.6.12 Input veri setinin hazırlanması	42
2.6.13 Veri setlerinin Eğitilmesi.....	43
2.6.14 Simulink süreci (Doğrulama aşaması).....	45
3- SONUÇLAR.....	47
KAYNAKLAR/REFERENCES	48

ÖZET

YAPAY SİNİR AĞI İLE DAHİLİ MİKNATISLI MOTORLAR İÇİN ROTOR VE STATOR GEOMETRİSİ KESTİRİMİ

Bu tez çalışmasında enerji politikalarının bir sonucu olarak yaygınlaşan elektrikli araçlar özelinde elektrik motoru tasarım optimizasyon yöntemi ve algoritmasının geliştirilmesi ele alınmıştır. Akıllı şehirler kapsamında hızla artan mikro ulaşım ihtiyacı elektrikli bisiklet ve elektrikli scooter gibi kısa menzil ulaşım araçlarına olan ilgiyi arttırmıştır. Bu tez önerisinde de elektrikli bir scooter modeli ele alınmış ve dinamik modeli incelenerek ihtiyaç duyulan motor gereksinimleri belirlenecektir. Ardından IPM motor topolojileri incelenerek uygun topolojiye karar verilecektir. IPM motor tasarım parametreleri ANSY RMXprt ortamında parametrize edilerek Taguchi'nin deney tasarımı yönteminde uygun deney matrisi seçilerek belirlenen tüm motor tasarım kombinasyonları ANSYS RMXprt de modellenerek elde edilen sonuçlar ile birlikte uygun dosya formatında saklanacaktır. Gerçekleştirilen tüm deneylere ait motor tasarım modelleri belirlenecek en-boy formatında PNG olarak kaydedilecektir. Ardından deney tasarımında elde edilen sonuçlar ile kaydedilen resimler etiketlenerek, uygun giriş çıkışa sahip bir yapay sinir ağı modeli üzerinde MATLAB'da eğitimler gerçekleştirilecektir. Eğitilmiş yapay sinir ağı modeline ihtiyaç duyulan motor gereksinimleri giriş olarak verildiğinde bu sinir ağının uygun motor geometrisini türetmesi beklenecektir. Türetilen motor geometrisi bir paket program (lmg2CAD) yardımı ile iki boyutlu teknik çizim formatına dönüştürülerek ANSYS Maxwell ortamına yüklenecektir. ANSYS Maxwell'de yapılacak analizler ile motor performansı değerlendirilerek. Yapay sinir ağı ile çözüm uzayında parametre kestirimi ve geometri üretimi verdiği sonuçlar değerlendirilerek bu tez çalışması sonuçlandırılacaktır.

ABSTRACT

ROTOR AND STATOR GEOMETRY ESTIMATION WITH CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR INTERNAL MAGNETS MOTOR

In this study, the development of electric motor design optimization method and algorithm specifically for electric vehicles, which have become widespread as a result of energy policies, is discussed. The rapidly increasing need for micro transportation within the scope of small cities has increased the interest in short-range transportation vehicles such as electric bicycles and electric scooters. In this thesis proposal, an electric scooter model is considered and the required motor requirements will be determined by examining its dynamic model. Then, 1PM engine topologies will be examined and the appropriate topology will be decided. IPM motor design parameters will be parameterized in ANSYS RMXprt environment, and all motor design combinations determined by selecting the appropriate test matrix in Taguchin's experiment design method will be modeled in ANSYS RMX prt and stored in the appropriate file format together with the results obtained. Engine design models of all experiments will be saved as jpeg in the aspect format to be determined. Then, by labeling the pictures recorded with the results obtained in the experimental design, trainings will be held in MATLAB on a convolutional neural network model with appropriate input and output. Given the required motor requirements to the trained convolutional neural network model as an introduction, this neural network would be expected to derive the appropriate motor geometry. The derived engine geometry will be converted into a 2D technical drawing format with the help of a package program (Img2CAD) and uploaded to

YENİLİK BEYANI

Batarya teknolojilerinin gelişimi ile menzil seviyesinde olan artışlarla birlikte elektrikli araçlara olan ilgi ve talep artmaktadır. Elektrikli araçlar özelinde batarya dışında verimlilik hususunda iki önemli komponent üzerine çalışmalar büyük ölçüde artmıştır. Bunlar motor sürücüler ve motor tasarımı üzerine olan çalışmaları kapsamaktadır [8]. Elektrik motorların tasarım optimizasyonu ile elde edilen verim artışları (%6) ile benzer batarya kapasitesine ve düşük menzile sahip olan araçlardaki menzil artışı %25 seviyelerine ulaşabilmektedir [6]. Bu da elektrik motorların tasarım optimizasyonuna olan ilgiyi hem arttırmakta hemde yeni optimizasyon teknikleri ile dikkat çekici verimlilikler elde edilebilmektedir [11]. Elektrik motorların tasarım optimizasyonunda kullanılan bazı optimizasyon teknikleri; Genetik Algoritma, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Karmca Koloni Algoritması, Taguchinin Deney Tasarımı ve Sinir Ağı Tabanlı Parametre kestirimi olarak özetlenebilir [7-9].

Derin Öğrenme veya Derin Sinir Ağı terimi, çok katmanlı Yapay Sinir Ağlarını (YSA) ifade eder. Son yıllarda, en güçlü araçlardan biri olarak kabul edildi ve büyük miktarda veriyi işleyebildiği için literatürde çok popüler hale geldi [10]. Daha derin gizli katmanlara sahip olma ilgisi, son zamanlarda farklı alanlarda klasik yöntem performansını aşmaya başladı; özellikle örüntü tanıma. En popüler derin sinir ağlarından biri Evrişimli Sinir Ağı'dır (CNN). Bu adı, evreşim adı verilen matrisler arasındaki matematiksel doğrusal işlemden alır. CNN'nin birden çok katmanı vardır; evreşimli katman, doğrusal olmayan katman, havuz katmanı ve tam bağlantılı katman dahil. Evrişimli ve tamamen bağlantılı katmanların parametreleri vardır, ancak havuzlama ve doğrusal olmayan katmanların parametreleri yoktur. CNN, makine öğrenimi problemlerinde mükemmel bir performansa sahiptir. [10].

Bu çalışmada da literatüre katkı sağlanacak olan nokta yapay sinir ağının elektrik motoru tasarımında ilk defa kullanılacak olmasıdır.

KISALTMALAR/ABBREVIATIONS

AirGapFlx.Dns	: Air-Gap Flux Density
ANN	: Artificial Neural Network
Arm.Cop.Los.	: Armature Copper Loss (W)
Arm.Curr.Dns	: Armature Current Density (A/mm ²)
Arm.Therm.Loa.	: Armature Thermal Load (A ² /mm ³)
Avg.Inp.Curr.	: Average Input Current (A)
BPNN	: Backpropagation Neural Network
CNN	: Convolutional Neural Network
Iron.Cor.Los.	: Iron-Core Loss (W)
Mag Thick	: Magnet Thickness
Mag Widht	: Magnet Width
Mag.Flx.Dns	: Magnet Flux Density
NFTool	: Neural Fitting
Out.Pow.	: Output Power (W)
R.T.Too.Flx.Dns	: Rotor Top-Tooth Flux Density
R.Yk.Flx.Dns	: Rotor Yoke Flux Density
Rat.Trq	: Rated Torque (N.m)
Rt.M.Sqr.Arm.Curr.:	Root-Mean-Square Armature Current (A)
S.Inn Diam	: Stator Inn Diameter
S.Out Diam	: Stator Out Diameter
S.Too.Flx.Dns	: Stator Tooth Flux Density
S.Yk.Flx.Dns	: Stator Yoke Flux Density
Spc.Elc.Loa.	: Specific Electric Loading (A/mm)

ŞEKİL

Şekil 1.1 Tez Aşamaları

Şekil 2.2.1 Beyinde tek bir nöronun yapısı

Şekil 2.2.2 Tipik çok katmanlı ileri besleme mimarisi

Şekil 2.3.2.1 Evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisine ve eğitim sürecine genel bakış

Şekil 2.3.3.1 Sağdaki matris...

Şekil 2.3.3.2 a-c, Çekirdek boyutu 3×3 olan, dolgusuz ve 1 adımlı bir evrişim işlemi örneği

Şekil 2.3.4.1 a) 2×2 filtre boyutu,

Şekil 2.3.5.1.1 Gradyan İnişi

Şekil 2.4.1.1 60 yuvalı stator modeli geliştirildi RMXprt aracı

Şekil 2.4.2.1 RMXprt'de geliştirilen 48 yuvalı rotor modeli

Şekil 2.4.3.1 RMXprt aracında sarma düzeni görünümü

Şekil 2.4.1 Verimlilik ve Hız grafiği

Şekil 2.4.2 Güç faktörü ve Hız grafiği

Şekil 2.4.3 Faz akımı Çıkış gücü grafiği

Şekil 2.4.4 Tork Çıkış gücü grafiği

Şekil 2.4.5 Maxwell 2D geometrisi

Şekil 2.4.6 Maxwell 3D geometrisi

Şekil 2.6.1. IPM Motoru Bölümleri

Şekil 2.6.1.1 Stator için parametreler

Şekil 2.6.2.1 Slot parametreleri

Şekil 2.6.3.1 Rotor parametreleri

Şekil 2.6.4.1 Sabit Mıknatıs(Pole) parametreleri

Şekil 2.6.6.2 IPM 2 görüntüsü

Şekil 2.6.6.3 IPM 5 görüntüsü

Şekil 2.6.6.4 Sol tarafta Bulunan IPM 1 ve Sağ tarafta bulunan IPM 5

Şekil 2.6.7.1 Sol tarafda 34 nolu IPM Maxwell ve Sağ tarafda 2 nolu IPM Maxwell görüntüleri

Şekil 2.6.8.1 AutoCAD uygulaması üzerinde Motor görüntülerinin PDF dosyasına dönüştürülmesi

Şekil 3.6.9.1 Motor görüntülerinin Crop edilmesi

Şekil 2.6.9.2 IPM Resimlerin PDF'ten PNG'ye dönüştürülmesi

Şekil 2.6.9.3 RGB motor resimlerinin Grayscale'le dönüştürülmesi

Şekil 2.6.9.4 Import edilmeye hazır IPM resimleri

Sekil 2.6.10.1 Genel Perspektif

Şekil 2.6.10.2 Verimlilik grafiği

Şekil 2.6.10.3 Tork grafiği

Şekil 2.6.10.4 Ortalama Giriş Akımı

Şekil 2.6.10.5 Çıkış gücü

Şekil 2.6.10.6 Demir Çekirdek Kaybı

Şekil 2.6.10.7 Armatür Akım Yoğunluğu

Şekil 2.6.11.1 IPM 5 için importu sonucu

Şekil 2.6.11.2 IPM 1 için tek sütunlu Matris

Şekil 2.6.11.3 Output Matrisi

Şekil 2.6.11.4 Normalize edilmiş Output veri seti

Şekil 2.6.12.1 Input dağçerleri

Şekil 2.6.12.2 Normalize edilmiş Input veri seti

Şekil 2.6.13.1 Matlab nftool ile eğitim parametreleri

Şekil 2.6.13.2 Regresiyon Diagramı

Şekil 2.6.13.3 Error Histogramı

Şekil 2.6.14.1 Simulink diagramı

TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLES

Tablo 1.1 Yaygın Olarak Kullanılan Elektrik Motor Tipleri

Table 1.2 Literature summary of optimization for the electric motors [20–39, 41, 42]

Tablo 2.6.1 IPM seçilen parametreler ve Nominal değerleri

Tablo 2.6.5.1 Taguchi tablosundaki değerlerin katsayı ifadeleri

Tablo 2.6.5.2 Taguchi ortogonal tablosu

Tablo 2.6.6.1 IPM 1 için parametre değerleri

Tablo 2.6.6.2 Sonuç parametreleri (Non-Load Magnetic Variables)

Tablo 2.6.6.3 Sonuç parametreleri (Full-Load Operation)

Tablo 2.6.6.4 IPM 2 için parametre değerleri

Tablo 2.6.6.5 IPM 5 için parametre değerleri

Tablo 2.6.6.6 Tüm IPM'ler için revize edilmiş Orthogonal tablo

Tablo 2.6.6.7 seçilen 35 IPM için değerler

Tablo 2.6.10.1 Ansys Solution'dan elde edilen IPM motor karakteristikleri

1. GİRİŞ

Elektrik araçların EV (Electric Vehicle), onlinimizdeki yıllarda hayatımız bir parçası olacağı inkar edilemez. Bu güncellenmenin ana nedeni, aslında tüm insanlar için problem hali gelmiş, global ısınma ve karbon dioksit emisyonu olarak tanımlanabilir [1]. Dünya çapında ulaşım, üretim (enerji üretimi dahil), nakliye ana sanayi için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Çevre dostu ürünlere ve yakıt verimliliğine olan talep, temiz enerji ve enerji tasarrufuna olan ilginin artmasına katkıda bulunur. Bu kapsamda hibrit elektrikli araç, otomotiv pazarında poplilaritesinin artması nedeniyle elektrik motorlu çekiş sistemleri için uygulanabilir bir çözümdür [2].

İki temel EV türü vardır: tamamen elektrikli araçlar (EV'ler) ve plug-in hibrit elektrikli araçlar (PHEV'ler). EV'ler (tamamen elektrikli araçlar) bir veya daha fazla elektrik motoruyla çalıştırılır. Sebekeye takarak elektrik alırlar ve pillerde saklarlar. Petrol bazlı yakıt tüketmezler ve egzoz emisyonu üretmezler. EV'ler, Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV'ler) ve Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV'ler) içerir. PHEV'ler (fişli hibrit elektrikli araçlar) bir elektrik motoruna güç sağlamak için pilier kullanır, şarj etmek için elektrik ebekesine bağlanır ve içten yanmılı motora güç sağlamak için petrol bazlı veya alternatif bir yakıt kullanır. Bazı PHEV türlerine genişletilmiş menzilli elektrikli araçlar (EREV'ler) de denir [3].

EV'lerde, tekerleklere tork sağlayabilen çekiş motorları kullanır. Elektrik motorları kabaca iki türe ayrılabilir: DC ve AC motorlar. Her iki tip de EV uygulamalarında kullanılabilir.

Bir EV motorunda arzuladığımız özellikler şunlardır:

- Yüksek verim
- Yüksek anlık gliüç
- Hızlı tork tepkisi
- Yüksek güç yoğunluğu
- Düşük maliyetli
- Yüksek hızlanma
- Sağlamlık

Uygun motor tasarımı, geniş sabit güç çalışma bölgesi sağlar ve bu da yüksek hızlarda çalışmaya izin verir. SRM'ler, EV uygulamaları için uygun bir tork / güç hızı karakteristiğine sahiptir [4].

Tablo 1.1 Yaygın Olarak Kullanılan Elektrik Motor Tipleri

Technical Properties	DC Motor	Asynchronous Motor	Wound Rotor Synchronous Motor	Permanent Magnet Synchronous Motor	Permanent Magnet Synchronous Motor	Switched Reluctance Motor
Field Orientation	Radial	Radial	Radial	Radial	Axial	Radial
Torque	+	-	-	++	++	+
Efficiency	-	-	(+/-)	++	++	+
Max. Speed	-	(+/-)	-	(+/-)	(+/-)	+
Cooling Performance	-	-	(+/-)	+	-	+
Field Weakening	+	+	+	(+/-)	(+/-)	(+/-)
Reliability	-	+	-	+	+	+
Economic Potential	+	++	-	-	(+/-)	+

Motor seçimi için yapılan araştırmaların özetinde yukarıdaki değerlendirme tablo genel anlamda durumu özetlemektedir. Tablodaki değerlendirme sonuçları dikkate alınarak Sabit Mıknatısı Senkron Motor tipi bu Tez'in araştırma konusunda ele alınmıştır.

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonu ile elde edilen verim artışların (%6) ile benzer batarya kapasitesine ve düşük menzile sahip olan araçlardaki menzil artışı %25 seviyelerine ulaşabilmektedir [5]. Bu da elektrik motorların tasarım optimizasyonuna olan ilgiyi hem arttırmakta hem de yeni optimizasyon teknikleri ile dikkat çekici verimlilikler elde edilebilmektedir[6].

Elektrik motorlarının tasarım optimizasyonunda kullanılan bazı optimizasyon teknikleri; Genetik Algoritma, Paçacık Sürü Optimizasyonu, Karrıca Koloni Algoritması, Taguchi'nin Deney Tasarımı ve Sinir Ağı Tabanlı Parametre kestirimi olarak özetlenebilir[7-9]. Tablo2 [12-31,33,34]. Derin Öğrenme veya Derin Sinir Ağı terimi, çok katmanlı Yapay Sinir Ağlarını (YSA) ifade eder. Son yıllarda, en güçlü araçlardan biri olarak kabul edildi ve büyük miktarda veriyi işleyebildiği için literatürde çok popüler hale geldi [10].

Table 1.2 Literature summary of optimization for the electric motors [20–39, 41, 42]

Publication	Objective	Optimization Method
Wrobel et al. [12]	Skewing optimization of permanent magnet poles in order to reduce its cogging torque	Incremental constraint analysis and gradient-based optimization
Dongyang et al. [13]	Permanent magnet optimization in order to reduce usage of rear earth magnet	Particle swarm optimization (PSO)
Markovic and Perriard [14]	Designing a slotless PM brushless dc motor in order to improve Halbach magnetization	Sequential quadratic programming (SQP)
Kowol et al. [15]	Maximizing the average electromagnetic torque and minimizing the ripple torque	An evolutionary algorithm, being a generalization of a genetic algorithm (GA)
Huang et al. [16]	Aiming to reduce cogging force for a linear motor	Incremental constraint analysis and gradient-based optimization
Umadevi et al. [17]	Maximization of average torque and minimization of cogging torque in the BLDC motor	Particle swarm optimization (PSO)
Prieto et al. [18]	Minimizing the motor cost	A mono-objective optimization methodology (differential evolution (DE))
Castellini et al. [19]	Maximization of torque-to-current ratio at base speed	Multi-objective genetic algorithm (MOGA)
Liu and Fu [20]	Designing optimal permanent magnet (PM)	Particle swarm optimization (PSO)
Gangl et al. [21]	Find a design that yields a small total harmonic distortion (THD)	Topology optimization method
Carraro et al. [22]	Maximization of the torque and minimization of the torque ripple, copper and iron losses	A multi-objective differential evolution (DE) optimization
Krasapoulos et al. [23]	Reducing the torque ripple and improving traction performance	Artificial bee colony (ABC) technique
Elomary et al. [24]	Maximizing the efficiency of the BLDC motor	Backtracking search algorithm (BSA)
Demir and Aküner [33]	Optimization of rotor geometry	Taguchi's design of experiment (DoE)
Yıldız et al. [25]	Maximizing average torque and efficiency	An ant colony optimization (ACO)
Ion et al. [26]	Aiming at a homogeneous, radially oriented magnetic flux density	Particle swarm optimization (PSO)
Belhadi et al. [27]	The reduction of the first harmonics of torque and radial force applied on the stator teeth	Genetic algorithm (GA) optimization
Demir and Aküner [34]	Optimization of motor size	Taguchi's design of experiment (DoE)
Riviera et al. 2019 [28]	Design a low-cost, rare-earth-free magnet motor	Incremental constraint analysis and gradient-based optimization
Sun et al. [29]	Developing a new multilevel optimization strategy for the multi-objective optimization of an IPMSM by using Pearson correlation coefficient analysis and cross-factor variance analysis	Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) and Kriging model
Shi et al. [30]	Robust design optimization, ensuring that the motor performance is not sensitive to the variations of manufacturing tolerances	Fuzzy-based sequential Taguchi robust optimization
Diao et al. [31]	Aiming a design optimization method which integrates the concept of multiple driving modes, system level optimization and robust design	Sequential Taguchi method

2. Materyel ve Yöntem

2.1 Parametre belirleme: Her deney, gözlemlenen olayın arkasındaki bilimi ortaya çıkarmak için yeterli ilgili veriyi elde etmek için deneyler planlamalı ve yürütmelidir. Olası yöntemler ise:

2.1.1 Deneme ve Yanılma yöntemi (trial-and-error approach):

Bu yöntemde her bir deney durum ile ilgili ufak bir bilgi verir. Her deneyden sonra ölçümler yapılır ve bir sonraki deney için gerekli değişiklikler yapılır. "Hangi parametreler ve ne kadar değiştirilmelidir". Çoğu zaman bu tür seriler, olumsuz sonuçlar oğarak insanın cesaretini kırabileceğinden veya bir sonraki deneyde değiştirilmesi gereken bir parametre seçimine izin vermeyeceğinden fazla ilerlemez. Bu nedenle, bu tür deneyler genellikle, deney sayısı çift haneye ulaşmadan çok önce sona erer!

2.1.2 Deneylerin tasarımı (Design of experiment, DoE):

Deney tasarımı (DOE), bir süreci etkileyen faktörler ile bu sürecin çıktısı arasındaki ilişkiyi belirlemek için sistematik bir yöntemdir.

Başka bir deyişle, neden-sonuç ilişkilerini bulmak için kullanılır. Bu bilgi, çıktıyı optimize etmek için proses girdilerini yönetmek için gereklidir.

Deney tasarımı çok amaçlı bir tekniktir [41]. Kullanımı fiziksel deneylerle sınırlı değildir, simülasyon deneylerine [42],

parametreleri metodik olarak değişen karmaşık analitik ifadelerin hesaplanan sonuçlarının araştırılmasına veya çeşitli faktörlerin etkilerinin incelendiği diğer karar problemlerine uygulanabilir.

DOE'nin kökenleri, bir önceki yüzyılın başında yöntemin Sir Fisher tarafından geliştirildiği ve tarımda başarıyla kullanıldığı Birleşik Krallık'taydı.

Ancak, batı endüstrilerindeki uygulaması yetersizdi.

1960'larda Japonya'da geliştirilen ve 1980'lerde batıda yayılan "Taguchi yöntemleri", belirli avantajlara sahip belirli bir deneysel tasarım stilini temsil eder [43] [44].

DOE ekonomik bir tekniktir çünkü nispeten az sayıda gözleme dayalı olarak güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

Küçük ama iyi tasarlanmış bir deneyden elde edilen verileri doğru bir şekilde analiz etmek, istatistiksel olarak sağlam yorumlar sağlayacaktır.

En büyük avantajı, bir karar probleminin daha karmaşık yönlerine ışık tutabilecek faktör etkilerinin ve özellikle etkileşimlerinin metodik bir incelemesidir.

2.1.3 Taguchi Yöntemi (TAGUCHI Method):

Sağlam tasarım, düşük geliştirme ve üretim maliyetleri ile yüksek kaliteli ürünler üretmek için çeşitli varyasyon nedenlerine minimum düzeyde duyarlı olan ürün ve süreç koşullarını elde etmeye yönelik bir mühendislik metodolojisidir [46].

Taguchi'nin parametre tasarımı, sağlam tasarım için önemli bir araçtır.

Performans, kalite ve maliyet için tasarımı optimize etmek amacıyla basit ve sistematik bir yaklaşım sunar. Sağlam tasarımda kullanılan iki ana araç [46–48]:

- varyasyona vurgu yaparak kaliteyi ölçen sinyal-gürültü oranı
- birçok tasarım faktörünü aynı anda barındıran ortogonal diziler

İngiliz endüstrisinde hem mühendisler hem de istatistikçiler tarafından Taguchi yöntemlerinin başarılı uygulamaları, UK Taguchi Kulübü'nün oluşumuna yol açmıştır [49].

Taguchi'nin yaklaşımı tamamen deneylerin istatistiksel tasarımına dayanmaktadır [46] problem çözme ve ürün/süreç tasarımı optimizasyonu ihtiyaçlarını ekonomik olarak karşılayabilir.

Bu tekniği uygulayarak, birden fazla faktörün performans üzerindeki etkilerinin araştırılmasında ve ayrıca hangi faktörün daha fazla, hangisinin daha az etkiye sahip olduğunu belirlemek için bireysel faktörlerin etkisini incelemekte etkili olduğu için, deneysel araştırma için gereken süre önemli ölçüde azaltılabilir [46].

Bu tezde Taguchi tasarım yöntemi kullanılarak, matematiksel yöntemlere dayalı mühendislik ve istatistiksel teknolojilerin, IPM parametre seçimleri ve normalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Taguchi'nin deneysel tasarım yöntemi, tasarım parametrelerinin kombinasyonlarının sayısını azaltarak belirli bir sistematikte gerçekleştirilen daha az deney kombinasyonunu içerir. Bu yöntemle, nispeten daha önemli parametrelerin tanımlanmasına ve önemsiz olanların elenmesine olanak sağlanır. Ayrıca deneysel maliyetleri daha kısa sürede azaltan bir yöntem olarak da avantaj sağlamaktadır [33].

Taguchi'nin deneysel tasarım (DoE) yönteminde, hangi parametrelerin

sonuçları etkilediği analiz edilerek parametrelerin önceliği belirlenir. Böylece istenilen sonuçlara ulaşmak için ilgili parametrelere odaklanılarak optimizasyon gerçekleştirilir. Ayrıca bazı parametrelerin önemi standart sapma sonuçları ile değerlendirilebilir ve parametre sayısı azaltılabilir [34, 35].

Literatürde bazı DoE tabanlı çalışmalar bulunmaktadır. DOE verilerine göre sinir ağı (NN) eğitimi gibi tahmin süreci . Balestrassi et al. (2009) doğrusal olmayan zaman serisi tahmini üzerinde çalıştı[36] ve, Lasheras et al. DoE. kullanarak sinir ağı modelini kestirme(tahmin) için geliştirmeye çalıştı[37]. Bu tezde Taguchi tasarım yöntemi kullanılarak, matematiksel yöntemlere dayalı mühendislik ve istatistiksel teknolojilerin, IPM parametre seçimleri ve normalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.2 Yapay Sinir Ağı, YSA(Artificial Neural Network, ANN)

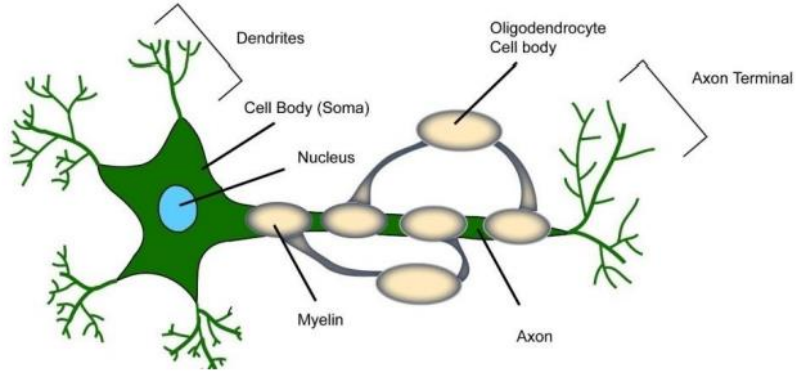
Araştırmaların çoğu tek bir sorunu çözmeye odaklanmıştır: “İnsan beyni nasıl çalışır?” Bu sorunu çözmek için Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır.

YSA başlangıçta basitleştirilmiş bir beyin fonksiyonu modeli olarak tanıtıldı. İnsan beyni birbirine bağlı milyarlarca nörondan oluşur. Bunlar, sinyallerin komşu nöronlara iletilmesine izin veren özel üyelere sahip hücrelerdir.[52]

Bir yapay sinir ağı, birbirine yüksek düzeyde bağlı bir dizi işlem elemanından ve harici girdi durumunun dinamiklerine yanıt vererek bilginin işlenmesinden oluşan bir bilgi işlem sistemidir.[53] Aşağıdaki bölüm, ANN modellerinin mimarisine, eğitim kurallarına, seçimine ve avantaj ve dezavantajlarına kısa bir genel bakıştır.

Sinir ağları ile bilgi transfer süreci, ağları oluşturan trilyonlarca nöron tarafından temsil edilir. Bu iletişim elektriksel darbeler, aksiyon potansiyelleri adı verilen hücreler arasında değiş tokuş yaparak oluşur.

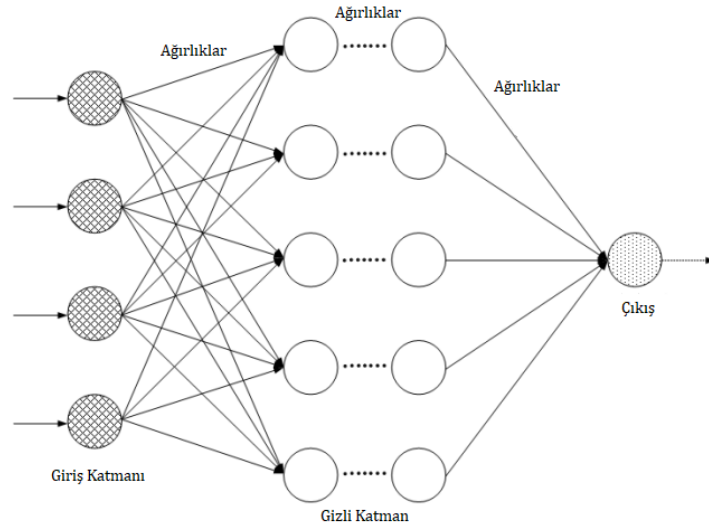
Bu biyolojik yapıları taklit eden bilgisayar algoritmalarına, yapay sinir ağları denir [54].



Şekil 2.2.1 Beyinde tek bir nöronun yapısı

Çok katmanlı ileri besleme ağı, tek katmanlı ağın geliştirilmesidir. Tek katmanlı yöntemle çözülemeyen veya daha fazla zaman harcayan çok daha zor ve karmaşık problemler için kullanılmıştır.

Herhangi bir ağı en önemli üç bölümden oluşur, birincisi nöron girdi katmanı, ikincisi bir veya daha fazla gizli nöron katmanı ve üçüncüsü ise çıktı nöron katmanıdır. Gizli katman, ağı gücünü verir ve girdiden ekstra özellikler çıkarmasına izin verir [52]



Şekil 2.2.2 Tipik çok katmanlı ileri besleme mimarisi

2.2.1 YSA Eğitimi

Algoritmalar, BPNN'ler tarafından denetlenen bir tarzda eğitilir. Giriş ve çıkış, ağı minimum hataya ulaşana kadar bir ağı eğitmek için kullanılır [55].

Bu eğitim algoritmaları, aşağıdaki gibi iki kategoriye ayrılabilir: denetimli ve

denetimsiz eğitim.

2.2.1.1 Denetimli Eğitim

Denetimli eğitim stili içinde, bir YSA'nın gerçek çıktıları ile istenen çıktıları arasında karşılaştırma yapılır, bu nedenle eğitim veri setleri için istenen çözümlerin bilinmesine çalışılır.

Bu, kabul edilebilir ağ doğruluğuna ulaşılan kadar ağırlık girişini ayarlayarak geçen zamanla hatayı azaltır [56].

2.2.1.2 Denetimsiz Eğitim

Buna karşılık, denetimsiz eğitim, doğru bir veri kümesini gerektirmez. Aslında, verilerdeki temel veya verilerdeki kalıplar arasındaki bağlantılar açığa çıkarılır ve kategoriler halinde düzenlenir. Bu, özellik çözümü bilinmeyen durumlarda kullanılır [52].

2.2.2 YSA Seçimi

Nöronlar kavramı, transfer fonksiyonları ve bağlantılar, YSA'ların temel aldığı temel unsurlardır.

YSA'nın farklı yapıları arasındaki benzerlik birçok çalışmada bulunabilir.

Varyasyonun çoğu, çeşitli öğrenme kurallarından ve bu kuralların bir ağı tipik topolojisini nasıl değiştirdiğinden kaynaklanmaktadır.

Genel olarak, YSA uygulamalarının çoğu aşağıdaki dört kategoriye ayrılabilir [52]:

Tahmin: Bazı çıktıları tahmin etmek için girdi değerlerini kullanır.

Bu model mühendislik tahminleri için kullanılır.

Sürekli değerli değişen bir dizi girdi ile sürekli değerli değişen bir veya daha fazla çıktı arasında doğrusal olmayan transfer fonksiyonları oluşturmak için güçlü bir mekanizmadır.

Ağ temel olarak çok katmanlı algılama mimarisini kullanır ve hataları işleme biçiminden .

Mevcut çalışmada, bu modele dayalı olarak IPM 2D datası tahmini için bir YSA modeli oluşturulmuştur.

Sınıflandırma: Sınıflandırmayı belirlemek için girdi değerlerini kullanır.

Bu model genellikle örüntü tanıma için kullanılır.

Veri İlişkilendirme: Kullanılan sınıflandırmayı simüle ederken hata içeren verileri de tanır.

Veri Filtirelemesi: Giriş verilerini analiz ederek çıkış verilerinin pürüzsüz hale getirilmesi. Örneğin Telefon sinyallerinin gürültüden arınması.

2.3 Evrişimsel Sinir Ağı, ESA(Convolutional Neural Network, CNN)

CNN, hayvanların görsel korteksinin organizasyonundan ilham alan ve özelliklerin uzamsal hiyerarşilerini otomatik olarak ve uyarlanabilir şekilde öğrenmek için tasarlanmış, görüntüler gibi bir ızgara desenine sahip verileri işlemek için bir tür derin öğrenme modelidir[57-58].

2.3.1 Terminoloji

Karışıklığı önlemek adına bazı terimler için açıklama yapmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bir "parametre", eğitim sürecinde otomatik olarak öğrenilen bir değişken anlamına gelir. Bir "hiperparametre", eğitim süreci başlamadan önce ayarlanması gereken bir değişkeni ifade eder. Bir "çekirdek", evrişim işlemlerinde uygulanan öğrenilebilir parametre kümelerini ifade eder. Bir "ağırlık" genellikle "parametre" ile birbirinin yerine kullanılır; bununla birlikte, bu terimi evrişim katmanlarının dışındaki bir parametreye, yani örneğin tam bağlantılı katmanlardaki bir çekirdeğe atıfta bulunurken kullanmaya çalıştık.

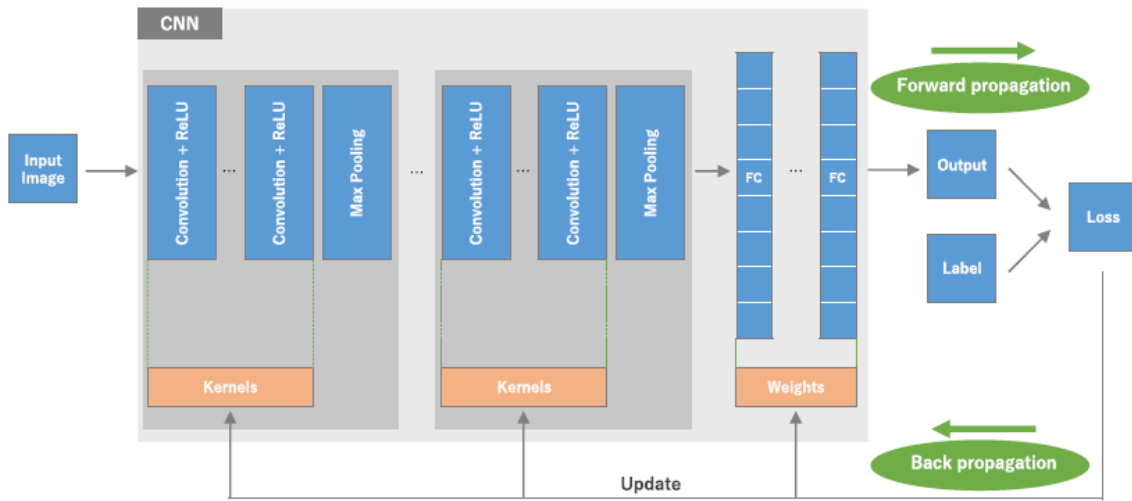
CNN, tipik olarak üç tür katmandan (veya yapı taşlarından) oluşan matematiksel bir yapıdır: evrişim, havuzlama ve tam bağlantılı katmanı. İlk ikisi, evrişim ve havuzlama katmanları, öznitelik çıkarma işlemini gerçekleştirirken, tam bağlantılı bir katman olan üçüncüsü, çıkarılan öznitelikleri sınıflandırma gibi nihai çıktıyı verir. Bir evrişim katmanı, özel bir doğrusal işlem türü olan evrişim gibi bir dizi matematiksel işlemden oluşan CNN'de önemli bir rol oynar. Bir katman çıktısını bir sonraki katmana besledikçe, çıkarılan özellikler hiyerarşik olarak ve aşamalı olarak daha karmaşık hale gelebilir. Çekirdekler gibi parametreleri optimize etme, diğerlerinin yanı sıra geri yayılım ve gradyan iniş adı verilen bir optimizasyon algoritması aracılığıyla çıktılar ve kesin doğruluk etiketleri arasındaki farkı en aza indirmek için gerçekleştirilen eğitim olarak adlandırılır[59].

2.3.2 CNN Yapısı

CNN mimarisi, evrişim katmanları, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlar gibi birkaç yapı taşı içerir.

Tipik bir mimari, birkaç evrişim katmanı ve bir havuzlama katmanından oluşan bir yığının tekrarından ve ardından bir veya daha fazla tamamen bağlı katmandan oluşur.

Girdi verilerinin bu katmanlar aracılığıyla çıktıya dönüştürüldüğü adıma ileri yayılma denir[59] (Şekil 2.3.1).



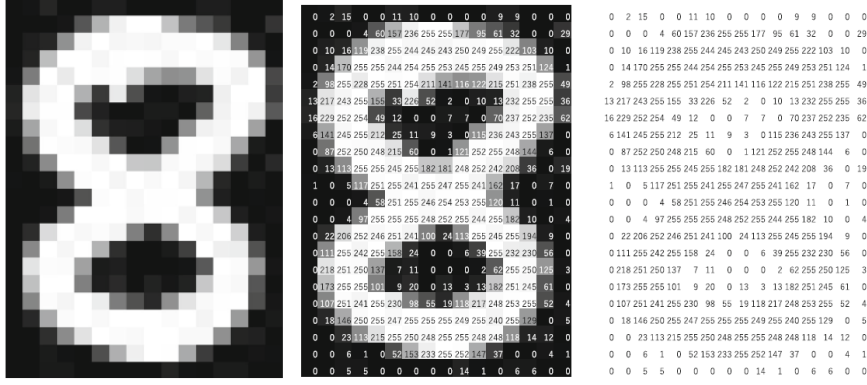
Şekil 2.3.2.1 Evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisine ve eğitim sürecine genel bakış

Bir CNN, birkaç yapı bloğunun bir araya gelmesinden oluşur: evrişim katmanları, havuzlama katmanları (örneğin, maksimum havuzlama) ve tam bağlantılı (FC) katmanlar. Bir modelin belirli çekirdekler ve ağırlıklar altındaki performansı, bir eğitim veri kümesinde iletim yayılımı yoluyla bir kayıp fonksiyonu ile hesaplanır ve öğrenilebilir parametreler, yani çekirdekler ve ağırlıklar, gradyan iniş optimizasyon algoritması ile geri yayılım yoluyla kayıp değerine göre güncellenir. ReLU(Rectified Linear Unit),doğrultulmuş doğrusal birim anlamına gelmektedir[59].

2.3.3 Evrişim katmanları

Girdi verilerinin bu katmanlar aracılığıyla çıktıya dönüştürüldüğü adıma ileri yayılma denir (Şekil 2.3.1) Bu bölümde açıklanan evrişim ve havuzlama işlemleri 2D-CNN için olmasına rağmen, benzer işlemler üç boyutlu (3D)-CNN için de gerçekleştirilebilir.

Evrişim, öznitelik çıkarma için kullanılan, tensör adı verilen bir sayı dizisi olan girdi boyunca çekirdek(Kernel) adı verilen küçük bir sayı dizisinin uygulandığı özel bir doğrusal işlem türüdür[59].

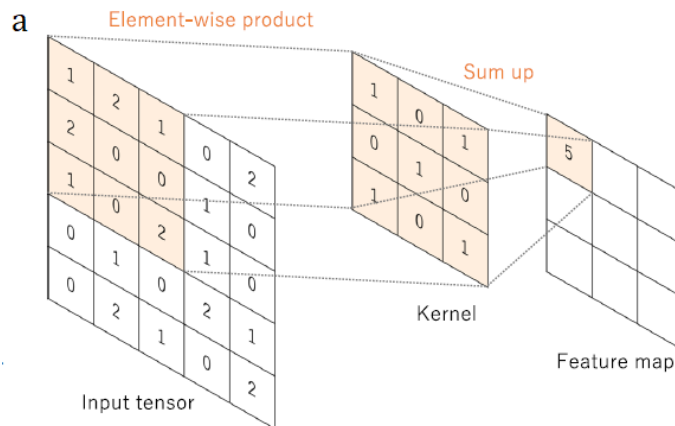


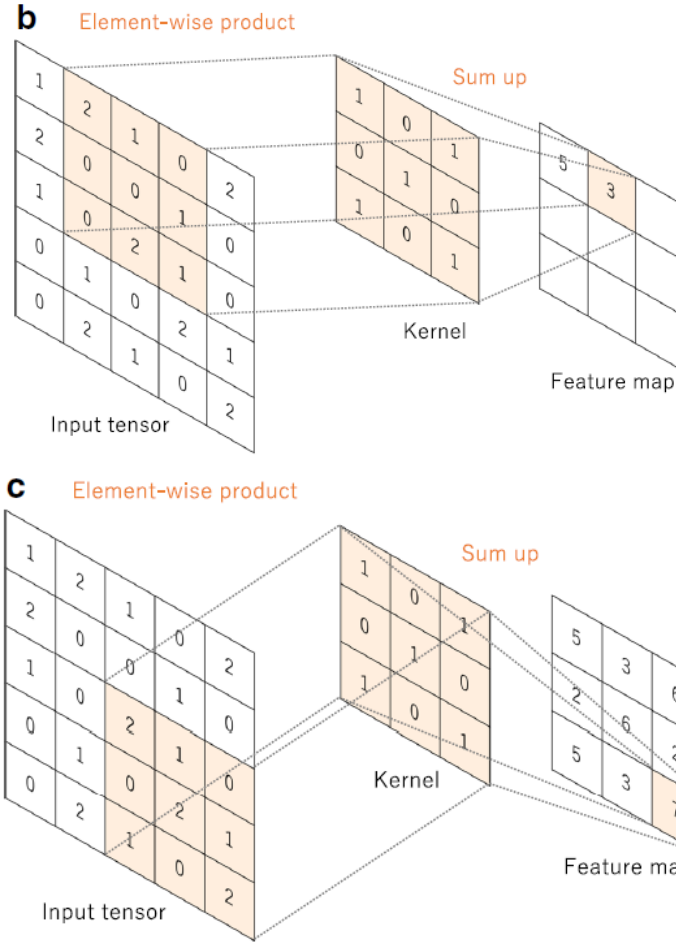
Şekil 2.3.3.1 Sağdaki matris, her biri sol görüntüdeki piksel parlaklığına karşılık gelen 0 ile 255 arasında sayılar içerir. Her ikisi de ortadaki görüntüde toplanmıştır.

ekirdeğin her elemanı ile giriş tensörü arasındaki eleman bazında bir ürün, tensörün her konumunda hesaplanır ve özellik haritası olarak adlandırılan çıkış tensörünün karşılık gelen konumunda çıkış değerini elde etmek için toplanır (Şekil 2.3.3.2 A–C) [59].

Bu prosedür, giriş tensörlerinin farklı özelliklerini temsil eden, rastgele sayıda özellik haritası oluşturmak için birden çok çekirdek uygulanarak tekrarlanır, farklı çekirdekler bu nedenle farklı öznetelik çıkarıcılar olarak düşünülebilir.

Evrişim işlemini tanımlayan iki anahtar hiperparametre, çekirdeklerin boyutu ve sayısıdır. İlki tipik olarak 3×3 'tür, ancak bazen 5×5 veya 7×7 'dir. İkincisi isteğe bağlıdır ve çıktı özelliği haritalarının derinliğini belirler.[59]





Şekil 2.3.3.2 a-c, Çekirdek boyutu 3×3 olan, dolgusuz ve 1 adımlı bir evrişim işlemi örneği.

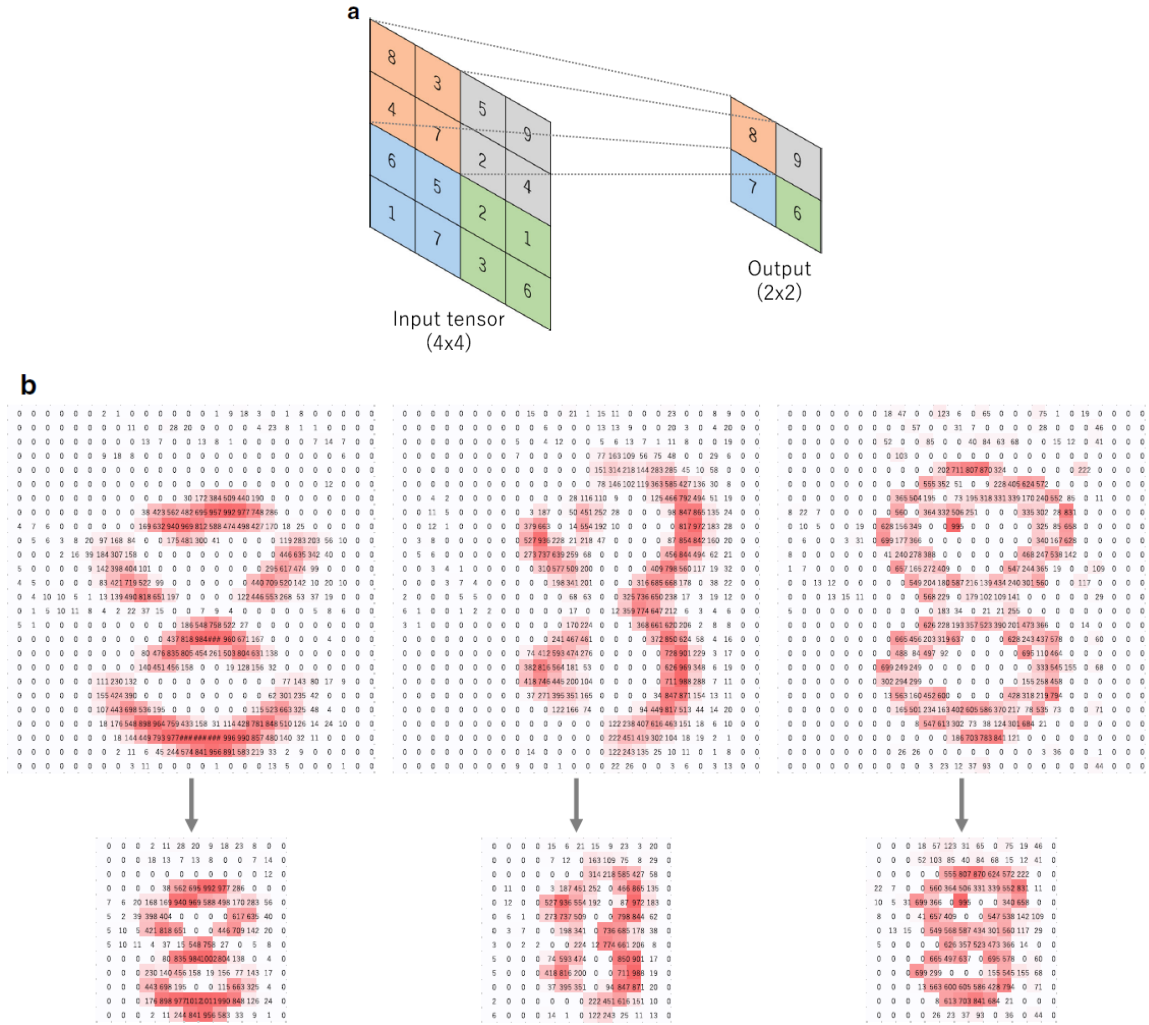
2.3.4 Havuzlama Katmanı

Bir havuzlama katmanı, küçük kaymalara ve bozulmalara bir öteleme değişmezliği sağlamak ve sonraki öğrenilebilir parametrelerin sayısını azaltmak için özellik haritalarının düzlem içi boyutluluğunu azaltan tipik bir altörnekleme işlemi sağlar. Havuzlama katmanlarının hiçbirinde öğrenilebilir bir parametre bulunmadığına dikkat edilmelidir, oysa filtre boyutu, adım ve dolgu, havuzlama işlemlerinde evrişim işlemlerine benzer hiper parametrelerdir[59].

Havuzlama işleminin en popüler biçimi, girdi özellik haritalarından yamaları çıkaran, her bir yamadaki maksimum değeri veren ve diğer tüm değerleri atan maksimum havuzlamadır [59](Şekil 2.3.4).

Pratikte yaygın olarak 2 adımlı 2×2 boyutunda bir filtreye sahip bir maksimum havuzlama kullanılır. Bu, düzlem içi boyutunun altörneklerini 2

faktörlü özellik haritaları. Yükseklik ve genişlikten farklı olarak, özellik haritalarının derinlik boyutu değişmeden kalır[59].



Şekil 2.3.4.1 a) 2×2 filtre boyutu, dolgu yok ve giriş tensörlerinden 2×2 yamaları çıkaran ve her bir yamadaki maksimum değeri veren ve diğer tüm değerleri atan 2 adımlı bir maksimum havuzlama işlemi örneği, bir giriş tensörünün düzlem içi boyutunun 2 faktörü ile altörneklenmesiyle sonuçlanır.b) Şekil 3b'deki aynı görüntüler üzerinde maksimum havuzlama işlemi örnekleri.Üst sıradaki görüntülerin 26×26 'dan 13×13 'e kadar 2 faktörüyle altörneklenildiğini unutmayın[59].

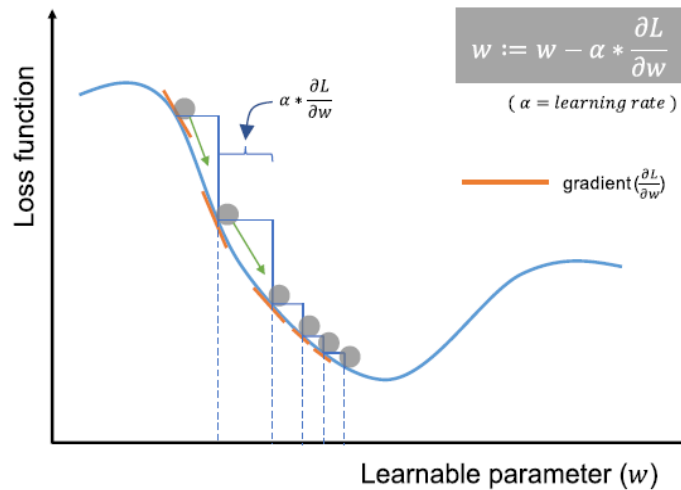
2.3.5 Ağ Eğitimi

Bir ağı eğitmek, bir eğitim veri kümesinde çıktı tahminleri ile verilen yer-gerçek etiketleri arasındaki farkları en aza indiren, evrişim katmanlarındaki çekirdekleri ve tam bağlantılı katmanlardaki ağırlıkları bulma sürecidir.

Geri yayılım algoritması, kayıp fonksiyonu ve gradyan iniş optimizasyon algoritmasının önemli roller oynadığı sinir ağlarını eğitmek için yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bir ağı eğitmek, bir eğitim veri kümesinde çıktı tahminleri ile verilen yer-gerçek etiketleri arasındaki farkları en aza indiren, evrişim katmanlarındaki çekirdekleri ve tam bağlantılı katmanlardaki ağırlıkları bulma sürecidir. Geri yayılım algoritması, kayıp fonksiyonu ve gradyan iniş optimizasyon algoritmasının önemli roller oynadığı sinir ağlarını eğitmek için yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Belirli çekirdekler ve ağırlıklar altındaki bir model performansı, bir eğitim veri kümesinde iletme yayılımı yoluyla bir kayıp fonksiyonu ile hesaplanır ve diğerlerinin yanı sıra geri yayılım ve gradyan inişi olarak adlandırılan bir optimizasyon algoritması aracılığıyla, çekirdekler ve ağırlıklar gibi öğrenilebilir parametreler, kayıp değerine göre güncellenir[59] (Şekil 2.3.2.1).

2.3.5.1 Gradyan İnişi

Gradyan inişi, kaybı en aza indirmek için ağı öğrenilebilir parametrelerini, yani çekirdekleri ve ağırlıkları yinelemeli olarak güncelleyen bir optimizasyon algoritması olarak yaygın olarak kullanılır. Kayıp fonksiyonunun gradyanı bize fonksiyonun en dik artış oranına sahip olduğu yönü sağlar ve her öğrenilebilir parametre, öğrenme hızı adı verilen bir hiperparametreye dayalı olarak belirlenen rastgele bir adım boyutuyla gradyanın negatif yönünde güncellenir, (Şekil 2.3.5.1.1)[59].



Şekil 2.3.5.1.1 Gradyan İnişi

Gradyan, matematiksel olarak, her öğrenilebilir parametreye göre kaybın kısmi bir türevidir ve bir parametrenin tek bir güncellemesi aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$w := w - \alpha * \frac{\partial L}{\partial w}$$

W her öğrenilebilir parametreyi, α bir öğrenme oranını ve L bir kayıp fonksiyonunu temsil eder. Pratikte bir öğrenme oranının eğitim başlamadan önce ayarlanması gereken en önemli hiperparametrelerden biri olduğu unutulmamalıdır. Pratikte, hafıza sınırlamaları gibi nedenlerle, kayıp fonksiyonunun parametrelere göre gradyanları, eğitim veri kümesinin mini-batch adı verilen bir alt kümesi kullanılarak hesaplanır ve parametre güncellemelerine uygulanır[59].

2.4 Ansys RMXprt and Ansys Maxwell

Optimum tasarım ve imalat sonrası performans kontrolü, herhangi bir motorun imalatının ana süreçleridir. Doğru malzeme seçimi ve doğru tasarım, elektrik motorunun performansını artırır. ANSYS RMXprt, çeşitli elektrikli makinelerin doğru ve uygun maliyetli tasarımı için en iyi yazılımdır[60].

Tasarım, malzeme seçimi, üretim ve performans kontrolü (test), herhangi bir elektrik motorunun imalatının ana aşamalarıdır. Asenkron motorlar, mekanizmaların, pompaların tahriki olarak kullanılan yaygın olarak kullanılan makinelerdir. RMXprt, makine performansının hızlı analitik hesaplamalarını ve ayrıntılı sonlu eleman hesaplamaları için 2 boyutlu ve 3 boyutlu geometri oluşturmayı sağlayan şablon tabanlı bir elektrikli makine tasarım aracıdır. RMXprt, çeşitli elektrikli makine türlerini simüle etmek ve analiz etmek için de kullanılabilir[61].

Bu motorların imalatı, tasarım, malzeme seçimi, üretim, test, performans kontrolü vb. birçok süreci içerir. Elektromanyetik hesaplama, manyetik çekirdeğin voltajlar, akımlar, akı, dişlerdeki endüktanslar, çekirdek, boyunduruk, bobin vb. gibi çeşitli parametrelerini tanımlayan tasarım sürecinin önemli bir parçasıdır. “ANSYS Maxwell” sayesinde hesaplama modeli yapılabilir ve elektromanyetik parametreleri görsel olarak uygun bir biçimde elde edebiliriz[62].

A. Kachin ve A.Kiselev, senkron elektrik motoru tahrik sisteminin

araştırılması için “ANSYS Maxwell” kullanımını sunmuşlardır [63].

ANSYS Maxwell programları ayrıca manyetik malzemenin doğrusal olmama durumunu, demirdeki kayıpları ve sarım yarıklarının etkisini vs. dikkate alır.[64]

Ansys RMXprt ve Ansys Maxwell için hazırlanmış bir örnekte bu ürünlerin bazı yetkinlikleri gösterilmeye çalışılmıştır.

Asenkron motor: 3 fazlı 1600 KW,4 kutuplu,690V,50 Hz:

2.4.1 Stator Tasarımı:

Stator tasarımı için ana veriler:

Number of stator slots:60

Outer Diameter of Stator (mm): 895

Inner Diameter of Stator (mm):600

Stacking factor:0.97

Type of steel:50C530

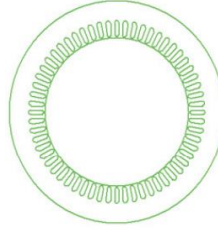
Coil Pitch:13

Number of conductors per Slot :8

Number of wires per conductor:22

Slot Area (mm²):1129

Wire Resistivity(ohm.mm²/m):0.0217



Şekil 2.4.1.1 60 yuvalı stator modeli geliştirildi RMXprt aracı

2.4.2 Rotor Tasarımı:

Rotor Tasarımı için ana Veriler:

No.of Rotor slots:48

Air Gap (mm) :3.5

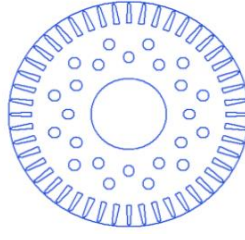
Inner Diameter of Rotor (mm):190

Length of Rotor (mm):660

Stacking factor of Rotor core:0.97

Type of Steel:50C350

Number of Hole Vents:12

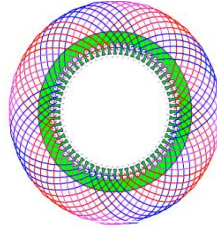


Şekil 2.4.2.1 RMxpirt'de geliştirilen 48 yuvalı rotor modeli

2.4.3 Sargı Düzeni:

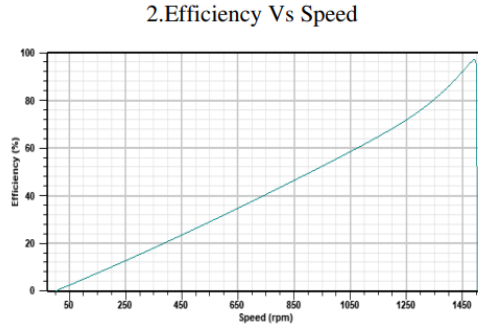
3 fazlı, 2 katmanlı sargı, aşağıdaki gibi 15 yuvada düzenlenmiştir:

AAAAZZZZZBBBBB

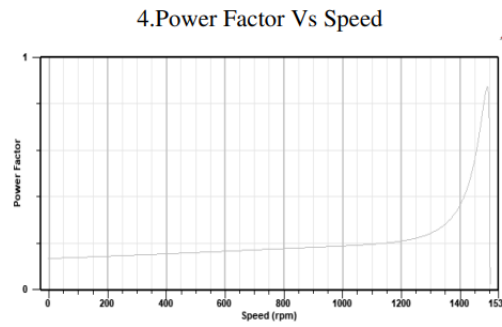


Şekil 2.4.3.1 RMxpirt aracında sarma düzeni görünümü

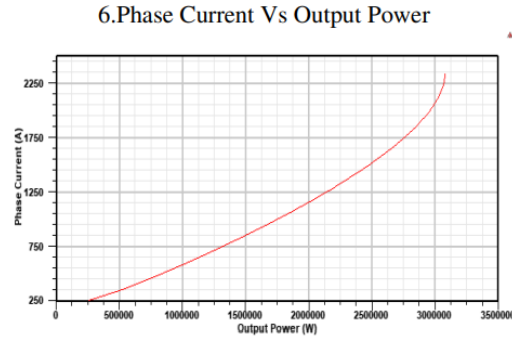
Ayrıca farklı grafik çizelgesi alınabilmektedir. Bazı örnekleri aşağıdaki gibidir:



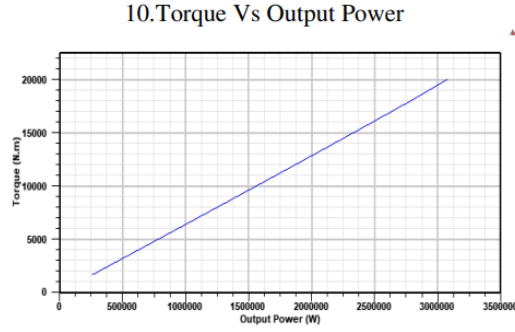
Şekil 2.4.1 Verimlilik ve Hız grafiği



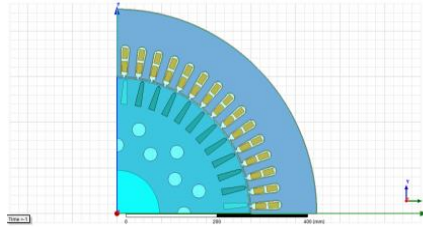
Şekil 2.4.2 Güç faktörü ve Hız grafiği



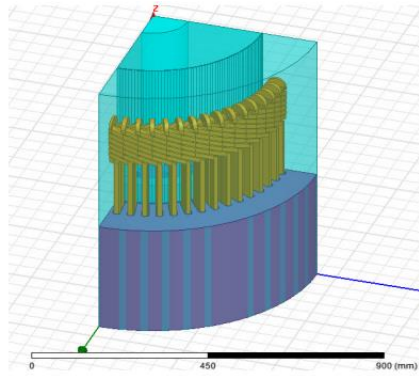
Şekil 2.4.3 Faz akımı Çıkış gücü grafiği



Şekil 2.4.4 Tork Çıkış gücü grafiği



Şekil 2.4.5 Maxwell 2D geometrisi



Şekil 2.4.6 Maxwell 3D geometrisi

2.5 Dahili Kalıcı Mıknatıslı Motor, IPM(Interior Permanent Magnet)

Fosil yakıtların kullanımını azaltmak, egzoz emisyonlarını azaltmak ve araç verimliliğini ve performansını iyileştirmek amacıyla, geleneksel içten

yanmalı motor (ICE) güç aktarma organları yükseltilir veya elektrikli aktarma organları ile değiştirilir [65]-[66].

Elektrikli cer motorları, bu geçişe katkıda bulunan kilit teknolojiler arasındadır ve yüksek güç yoğunluğu, geniş hız aralığı ve yüksek verimliliği nedeniyle yüksek talep görmektedir [67]-[68].

Son yirmi yıl, dahili kalıcı mıknatıslı (IPM) elektrikli makinelerin geliştirilmesinde muazzam ilerlemelerle heyecan verici bir dönem olmuştur. Bu süre zarfında, dahili sabit mıknatıslı senkron makineler (IPSM), en yeni nesil elektrikli araçlar (EV) ve hibrit elektrikli araçlar (HEV) için yüksek verimli elektrikli çekiş tahriklerinin otomotiv pazarındaki ağırlığını attırmaya başladı.

Gelişmiş güç elektroniği ve modern kontrollerle AC makineleri, DC makinelerinin yerini aldı ve çekiş makinesi pazarına hakim oldu.

Hem asenkron hem de senkron AC makineler, ticari olarak temin edilebilen elektrikli araçlarda kullanılmaktadır [69] [70].

Asenkron makineler, on yıllardır geliştirildikleri için en olgun teknolojiye ve köklü üretim tekniklerine sahiptir [68]. Asenkron makine teknolojisi ayrıca nispeten daha düşük maliyetler ve daha kolay kontrol edilebilirlik sunar.

Ancak rotor üzerindeki iletkenler rotor bakır kayıplarını ve dolayısıyla soğutma ihtiyacını artırır. Bu, sabit mıknatıslı senkron makineler (PMSM) ile karşılaştırıldığında genel olarak daha düşük işletme verimliliğine yol açar[71].

Öte yandan, nadir toprak kalıcı mıknatıslarının kullanılması, hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğunu artırır ve kalıcı mıknatıslı senkron makinelerin güç ve tork yoğunluğunu artırır. Bu nedenle, otomotiv üreticilerinin çoğu, araçlarında cer motoru olarak sabit mıknatıslı senkron (IPM) makineleri seçmektedir [69] [70].

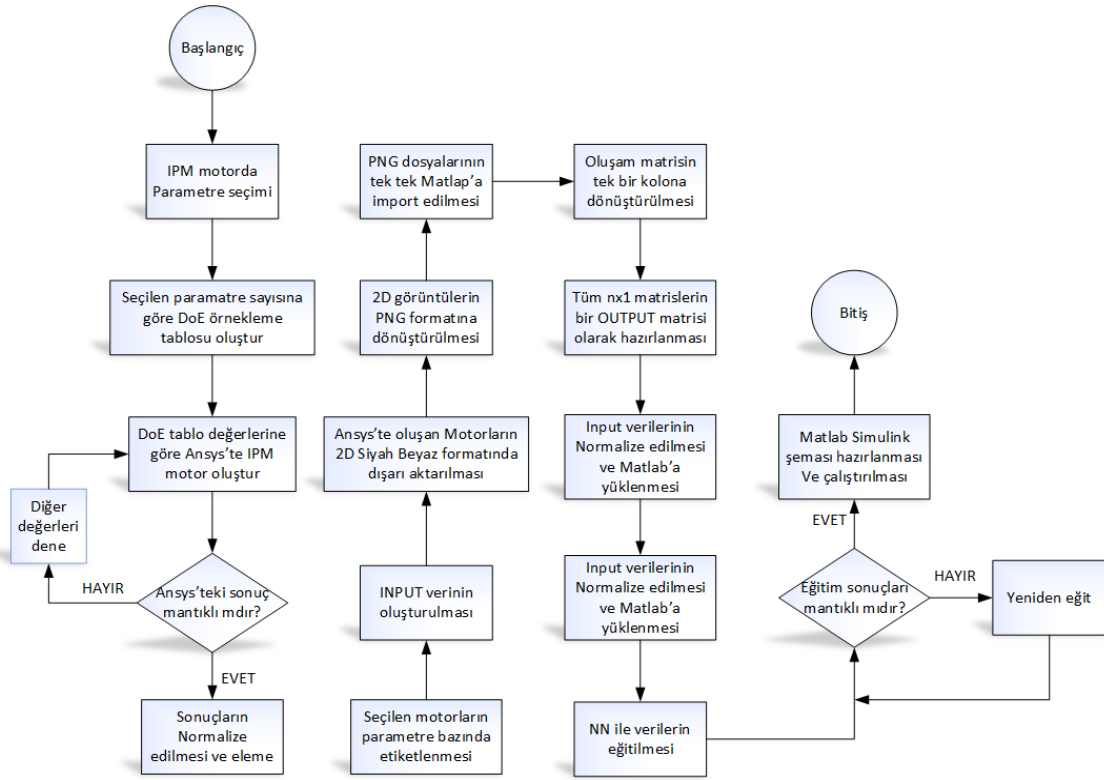
Kalıcı mıknatıslı senkron makineler ayrıca yüzeye monte kalıcı mıknatıslı (SPM) makineler veya dahili kalıcı mıknatıslı (IPM) makineler olarak sınıflandırılabilir. SPM makineleri, nispeten daha kolay üretilebilirlik sunar, çünkü mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırılır. Bununla birlikte, bu aynı zamanda yüksek hızlı çalışma sırasında mıknatısların potansiyel olarak uçup gitmesine neden olur. Buna karşılık, IPM makineleri, rotor laminasyonlarına mıknatıslar gömülü olduğu için daha güçlü rotor sağlamlığı sağlar. Ek olarak, IPM makinelerinde q- ve d- eksenli endüktansları arasındaki özünde

daha yüksek fark, daha yüksek relüktans torkuna katkıda bulunur; bu nedenle, çekiş uygulamaları için gerekli olan yüksek hızlı alan zayıflatma bölgesinde daha yüksek toplam tork sağlar [71].

Çeşitli IPM topolojileri bir dizi makalede incelenmiştir.

Wu, çevresel, radyal, V-tipi ve U-tipi rotor konfigürasyonlarını karşılaştırmış ve IPM rotor konfigürasyonunun örtüşmeyen sargılar için daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır [72]. Wang, yüksek performanslı cer makinesi uygulamaları için bir SPM topolojisi ile dört tek katmanlı IPM rotor topolojisini karşılaştırdı [73]. Chari, benzer yuva ve kutup sayıları altında farklı rotor topolojilerini karşılaştırdı [74]. Dorrel, Toyota Prius IPM, kollu tip mıknatıs rotor ve endüksiyon makinesini inceledi [75]. Liu, elektrikli araçlar için IPM'lerin performansını ve parametrelerini analiz etti [76].

Bu makale, bir IPM motoru için kestirme metodolojisinin aşamaları şekil 2.5.1'de sunulmuştur.



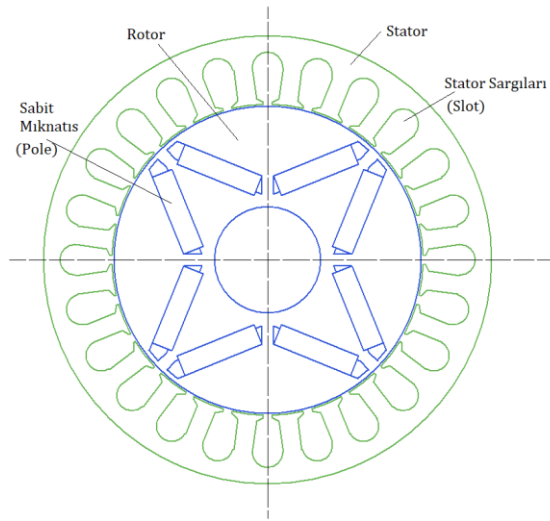
Şekil 2.5.1 Tez Aşamaları

2.6 IPM Motoru ve Parametreleri

Dahili sabit mıknatıslı senkron motorlar (IPSM), yüksek verimlilik, yüksek tork yoğunluğu, yüksek güç faktörü, yüksek güç yoğunluğu ve geniş hız aralığında çalışma gibi üstün avantajları ve olumlu özellikleri nedeniyle otomotiv ve diğer servo sürücülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, parametrelerin kesin bilgisi, sabit mıknatıslı motorların doğru performans tahmini ve tasarım optimizasyonu için kritik öneme sahiptir [38–40].

Bir IPM motoru Rotor, Stator ve Şaft ana bölümlerinden oluşmaktadır. Her bölüm kendine özel önemli parametrelere sahiptir.

Ansys RMXprt programından alınan IPM motor bölümleri şekil 3.1’de gösterilmiştir.



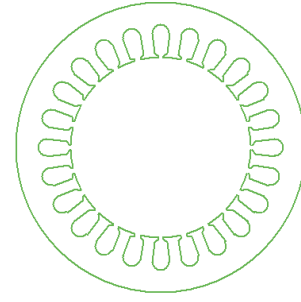
Şekil 2.6.1. IPM Motoru Bölümleri

Belirtildiği gibi IPM motorunun her bölümün kendine özel parametreleri bulunmaktadır.

2.6.1 Stator

Stator için parametreler şekil 2.6.1.1’de gösterilmiştir.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	120	mm	120mm
Inner Diameter	75	mm	75mm
Length	65	mm	65mm
Stacking Factor	0.95		
Steel Type	M19_24G		
Press Board Thickness	0	mm	
Magnetic Press Board	☐		
Skew Width	0	deg	0deg
Lamination Sectors	0		

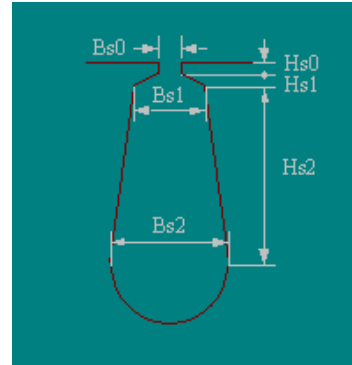


Şekil 2.6.1.1 Stator için parametreler.

2.6.2 Stator sargıları (Slot)

Stator sargıları ile ilgili parametreler şekil 2.6.2.1 de sunulmuştur.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Auto Design	☐		
Parallel To...	☐		
Hs0	0.5	mm	0.5mm
Hs1	1	mm	1mm
Hs2	8.2	mm	8.2mm
Bs0	2.5	mm	2.5mm
Bs1	5.6	mm	5.6mm
Bs2	7.6	mm	7.6mm

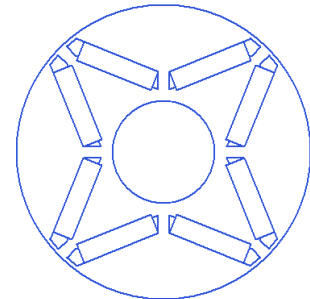


Şekil 2.6.2.1 Slot parametreleri.

2.6.3 Rotor

Rotor parametreleri şekil 2.6.3.1 de sunulmuştur.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	74	mm	74mm
Inner Diameter	26	mm	26mm
Length	65	mm	65mm
Stacking Factor	0.95		
Steel Type	M19_24G		
Pole Type	3		

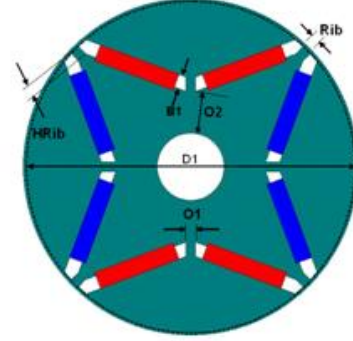


Şekil 2.6.3.1 Rotor parametreleri

2.6.4 Sabit Mıknatıs (Pole)

Sabit mıknatıs ile ilgili parametreler 2.6.4.1 şeklinde sunulmuştur.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
D1	72	mm	72mm
O1	3	mm	3mm
O2	3	mm	3mm
B1	4	mm	4mm
Rib	3	mm	3mm
HRib	3	mm	3mm
Layers	1		1
Layer Pitch	0	mm	0mm
Magnet Thickness	5	mm	5mm
Magnet Width	40	mm	40mm
Magnet Type	XG1...		



Şekil 2.6.4.1 Sabit Mıknatıs(Pole) parametreleri

Bu tezde IPM için seçilen parametreler ve Ansys'ten nominal olarak kabul ettiğimiz parametre değerleri tablo 3.1 de sunulmuştur.

Tablo 2.6.1 IPM seçilen parametreler ve Nominal değerleri

Parametre	Değer
S.Outer Diameter	120
S.Inner Diameter	75
HS0	0.5
SH1	1
SH2	8.2
BS0	2.5
BS1	5.6
BS2	7.6
R.Outer Diameter	74
R.Inner Diameter	26
D1	72
O1	3
O2	3
B1	4
RIB	3
HRIB	3
Magnet Thickness	5
Magnet Width	40

Tablo 2.6.1 de Ansys programından elde edilen parametre değerleri, nominal değerler olarak kabul edilmiştir.

2.6.5 DoE Tablosu

Tagochinin DoE tablosuna bakıldığında 18 parametre ve 3 Level için L36 deney serisi önerilmiştir ki bu deney serisi Matlab programından elde edilir. Tablo 3.2 de ilgili parametreler için Matlab programından elde edilmiş Taguchi Ortogonal tablosu sunulmuştur.

Tabloda bulunan 2 sayısı nominal değer için 1 katsayısını ifade ederken, tablodaki 1 sayısı nominal değer için 0.9 katsayısı ve tablodaki 3 sayısı ise nominal değer için 1.2 katsayısını ifade etmektedir. Taguchi tablosundaki değerler ve katsayı ifadeleri tablo 2.6.5.1’te sunulmuştur.

Tablo 2.6.5.1 Taguchi tablosundaki değerlerin katsayı ifadeleri

Değer	Katsayı
1	0.9
2	1
3	1.2

Tablo 2.6.5.2 Taguchi ortogonal tablosu

IPM No	S.Out Diam	S.Inn Diam	HS0	HS1	HS2	BS0	BS1	BS2	R.Out Diam	R.Inn Diam	D1	O1	O2	B1	RİB	HRİB	Mag Thick	Mag Widt
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3
5	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2
7	1	1	2	2	2	1	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	3
8	1	1	2	2	2	1	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	1
9	1	1	2	2	2	1	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2
10	1	2	1	2	2	1	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2
11	1	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3
12	1	2	1	2	2	1	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1
13	1	2	2	1	2	2	1	2	3	1	3	2	1	3	3	2	1	2
14	1	2	2	1	2	2	2	3	1	2	1	3	2	1	1	3	2	3
15	1	2	2	1	2	2	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1
16	1	2	2	2	1	2	1	2	3	2	1	1	3	2	3	3	2	1
17	1	2	2	2	1	2	2	3	1	3	2	2	1	3	1	1	3	2
18	1	2	2	2	1	2	3	1	2	1	3	3	2	1	2	2	1	3
19	2	1	2	2	1	1	1	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	3
20	2	1	2	2	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	3	2	3	1
21	2	1	2	2	1	1	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	2
22	2	1	2	1	2	2	1	2	2	3	3	1	2	1	1	3	3	2
23	2	1	2	1	2	2	2	3	3	1	1	2	3	2	2	1	1	3
24	2	1	2	1	2	2	3	1	1	2	2	3	1	3	3	2	2	1
25	2	1	1	2	2	2	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2
26	2	1	1	2	2	2	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3
27	2	1	1	2	2	2	3	2	1	3	1	2	2	3	2	3	1	1
28	2	2	2	1	1	1	1	3	2	2	2	1	1	3	2	3	1	3
29	2	2	2	1	1	1	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1
30	2	2	2	1	1	1	3	2	1	1	1	3	3	2	1	2	3	2
31	2	2	1	2	1	2	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1
32	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1	3	1	3	3	2	3	2	2
33	2	2	1	2	1	2	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3
34	2	2	1	1	2	1	1	3	1	2	3	2	3	1	2	2	3	1
35	2	2	1	1	2	1	2	1	2	3	1	3	1	2	3	3	1	2
36	2	2	1	1	2	1	3	2	3	1	2	1	2	3	1	1	2	3

Taguchi Ortogonal tablosuna dayanarak her motor için katsayılar uygun olarak yeni değerlere bağlı Ansys'te IPM motoru tasarlanmıştır.

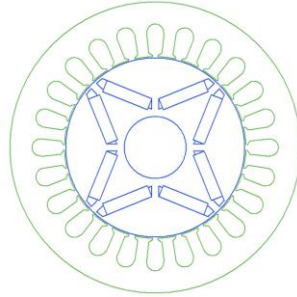
Birinci motor için Taguchi tablosuna bağlı işlenen Motor değerleri 2.6.6.1 tablosunda sunulmuştur.

2.6.6 DoE değerlerine göre IPM motorlarının oluşturulması

Tablo 2.6.6.1 IPM 1 için parametre değerleri

	S.Outer Diameter	S.Inner Diameter	HS0	HS1	HS2	BS0	BS1	BS2	R.Outer Diameter	R.Inner Diameter	D1	O1	O2	B1	R1B	HR1B	Magnet Thickness	Magnet Width
Taguchi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Level Ratio	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Nominal	120	75	0.5	1	8.2	2.5	5.6	7.6	74	26	72	3	3	4	3	3	5	40
Result	108	67.5	0.45	0.9	7.38	2.25	5.04	6.84	66.6	23.4	64.8	2.7	2.7	3.6	2.7	2.7	4.5	36

Ansys programında uygulanan yeni parametre değerleri ile üretilmiş IPM görüntüsü şekil 2.6.6.1 de sunulmuştur.



Şekil 2.6.6.1 IPM 1 görüntüsü

Ansys programında 1. Motor ile ilgili sonucu parametreleri tablo 2.6.6.2, 2.6.6.3 ve 2.6.6.4'te sunulmuştur.

Tablo 2.6.6.2 Sonuç parametreleri (Non-Load Magnetic Variables)

	Name	Value	Units	Description
1	Stator Tooth Flux Density	0.720618	tesla	
2	Stator Yoke Flux Density	1.83968	tesla	
3	Rotor Top-Tooth Flux Density	0.326965	tesla	
4	Rotor Yoke Flux Density	0.414736	tesla	
5	Magnet Flux Density	0.766242	tesla	
6	Air-Gap Flux Density	0.332663	tesla	
7	Stator Tooth Ampere Turns	1.1625	A.T	
8	Stator Yoke Ampere Turns	616.103	A.T	
9	Rotor Top-Tooth Ampere Turns	0.739379	A.T	
10	Rotor Yoke Ampere Turns	0.340036	A.T	
11	Magnet Ampere Turns	-770.95	A.T	
12	Air-Gap Ampere Turns	152.605	A.T	
13	Total Ampere Turn Drop	1.77351e-11	A.T	
14	Saturation Factor	5.05194		
15	Stator Yoke Correction Factor	0.301919		
16	Rotor Yoke Correction Factor	1		

Tablo 2.6.6.3 Sonuç parametreleri (Full-Load Operation)

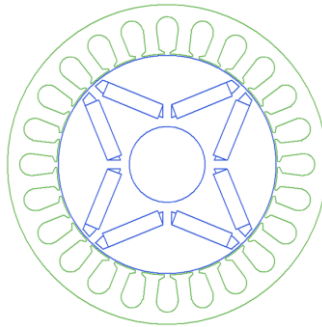
	Name	Value	Units
1	Average Input Current	3070.59	mA
2	RMS Armature Current	3977.96	mA
3	Armature Thermal Load	129.167	A ² /mm ³
4	Specific Electric Loading	21211.4	A_per_meter
5	Armature Current Density	6089490	A_per_m2
6	Frictional and Windage Loss	0	mW
7	Iron-Core Loss	19688.9	mW
8	Armature Copper Loss	105899	mW
9	Transistor Loss	0	mW
10	Diode Loss	0	mW
11	Total Loss	125588	mW
12	Output Power	549940	mW
13	Input Power	675529	mW
14	Efficiency	81.4089	%
15	Torque Angle	44.0583	deg
16	Rated Speed	3600	rpm
17	Rated Torque	1.45876	NewtonMeter
18	Fundamental RMS Phase Back-EMF	105326	mV

Taguchi tablosundaki değerler için 2. IPM için hazırlanan parametre değerleri 2.6.6.4 tablosunda sunulmuştur.

Tablo 2.6.6.4 IPM 2 için parametre değerleri

	S.Outer Diameter	S.Inner Diameter	HS0	HS1	HS2	BS0	BS1	BS2	R.Outer Diameter	R.Inner Diameter	D1	O1	O2	B1	RiB	HRiB	Magnet Thickness	Magnet Width
Taguchi	1	1->2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Level Ratio	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nominal	120	75	0.5	1	8.2	2.5	5.6	7.6	74	26	72	3	3	4	3	3	5	40
Result	108	75	0.45	0.9	7.38	2.25	5.6	7.6	74	26	72	3	3	4	3	3	5	40

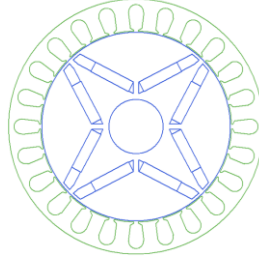
Yukarıdaki tabloda S.Inn.Diam alanında 1=>2 ile gösterilen, Taguchi tablosunda 1 iken Motor topologiesinde gözle görülür ve mantık dışı değer ürettiği için ilgili değer 2 değeri ile değiştirildiğini ifade etmektedir. Şekil 2.6.6.2’te IPM 2’nin görüntüsü sunulmuştur.

**Şekil 2.6.6.2** IPM 2 görüntüsü

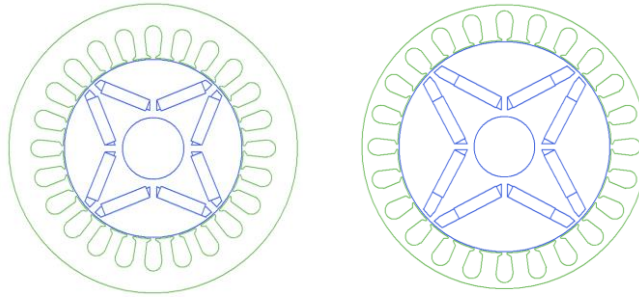
Beşinci IPM için Taguchi tablosundaki değerler 2.6.6.5 tablosunda ve şekil 3.4’te is IPM görüntüsü sunulmuştur.

Tablo 2.6.6.5 IPM 5 için parametre değerleri

	S.Out Diam	S.Inn Diam	HS0	HS1	HS2	BS0	BS1	BS2	R.Out Diam	R.Inn Diam	D1	O1	O2	B1	RiB	HRiB	Mag Thick	Mag Widt
Taguchi	1->2	1->3	1	1	1	2	2	2	2->3	2	3	3->1	3->1	3	1	1	1	1
Level Ratio	1	1.2	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1.2	1	1.2	0.9	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.9
Nominal	120	75	0.5	1	8.2	2.5	5.6	7.6	74	26	72	3	3	4	3	3	5	40
Result	120	90	0.5	0.9	7.38	2.5	5.6	7.6	88.8	26	86.4	2.7	2.7	5	2.7	2.7	4.5	36

**Şekil 2.6.6.3 IPM 5 görüntüsü**

Birinci ve Beşinci IPM görüntülerini yanyana gösteren şekil 2.6.6.4'te Motor parametrelerindeki değişikliğin Motor üzerindeki elemanlarda bariz olarak gösterilmiştir.

**Şekil 2.6.6.4 Sol tarafta Bulunan IPM 1 ve Sağ tarafta bulunan IPM 5**

Tablo 2.6.6.6 de tüm motorlar için hazırlanan Orthogonal Taguchi tablosu sunulmuştur.

Tablo 2.6.6.6 Tüm IPM'ler için revize edilmiş Orthogonal tablo

IPM No	S.Out Diam	S.Inn Diam	HS0	HS1	HS2	BS0	BS1	BS2	R.Out Diam	R.Inn Diam	D1	O1	O2	B1	RiB	HRiB	Mag Thick	Mag Widt
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1->2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	3	3	3->1	3	3->1	3->2	3->1	3->2	3	3->1	3->2	3->1
4	1	1->2	1	1	1	2	1	1	1->2	1	2	2	2	2	3	3	3->2	3->2
5	1->2	1->3	1	1	1	2	2	2	2->3	2	3	3->1	3->1	3	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	2	3	3	3->1	3	1	1	1	1	2	2	2	2->1
7	1	1	2	2	2	1	1	1	2->1	3	1	2	3->1	3->2	1	2	2	3->1
8	1	1->2	2	2	2	1	2	2	3->2	1	2	3->1	1	1	2	3	3->2	1
9	1	1	2	2	2	1	3	3	1	2	3->1	1	2->1	2	3	1	1	2->1
10	1	2	1	2	2	1	1	1	3->2	2->1	1	3->1	2	3	2->3	1	3->2	2->1
11	1	2	1	2	2	1	2	2	1->2	3->1	2	1	3->1	1	3->2	2	1	3->2
12	1->2	2->3	1	2	2	1	3	3	2->3	1	3	2->1	1	2	1	3	2	1
13	1->2	2->3	2	1	2	2	1	2	3	1	3	2	1	3->2	3	2	1	2
14	1->2	2->3	2->1	1	2->1	2	2	3	1->3	2->1	1	3	2->1	1	1	3	2	3
15	1	2	2	1	2	2	3	1	2	3	2	1	3	2	2	1	3	1
16	1	2	2	2	1	2	1	2	3->2	2	1	1	3	2->1	3	3	2	1
17	1	2	2	2	1	2	2	3	1->2	3->1	2	2	1	3	1	1	3	2
18	1->2	2->3	2	2	1	2	3	1	2->3	1	3	3	2	1	2	2	1	3
19	2	1->3	2	2	1->3	1	1	2	1->3	3->1	3	3	1	2	2	1	2	3
20	2	1->2	2	2	1	1	2	3	2	1	1->2	1	2->1	3->1	3	2	3->1	1
21	2	1->3	2	2	1	1	3	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	2
22	2	1->2	2	1	2	2	1	2	2	3	3->2	1	2	1	1	3	3	2->1
23	2	1->3	2	1	2	2	2	3	3	1	1->3	2	3	2	2	1	1	3
24	2	1->2	2	1	2	2	3	1	1->2	2	2	3	1	3	3	2	2	1
25	2	1->2	1	2	2	2	1	3	2	1	2	3	3	1	3	1	2	2
26	2	1->3	1	2	2	2	2	1	3	2	3	1	1	2	1	2	3	3
27	2	1	1	2	2	2	3	2	1	3	1	2	2	3->2	2	3->1	1	1
28	2	2->3	2	1	1	1	1	3	2->3	2	2	1	1	3	2	3	1	3
29	2	2->3	2	1	1	1	2	1	3	3	3	2	2	1	3	1	2	1
30	2	2	2	1	1	1	3	2	1->2	1	1->2	3	3	2	1->3	2	3	2
31	2->3	2->3	1	2	1	2	1	3	3	3	2	3	2	2	1	2	1	1
32	2	2->3	1	2	1	2	2	1	1->3	1	3	1	3	3	2	3	2	2
33	2	2	1	2	1	2	3	2	2	2	1	2->1	1	1	3	1	3->2	3->1
34	2	2->3	1	1	2	1	1	3	1->3	2	3	2	3	1	2	2	3	1
35	2	2	1	1	2	1	2	1	2	3->1	1->2	3	1	2	3	3	1	2
36	2	2->3	1	1	2	1	3	2	3	1	2->3	1	2	3	1	1	2	3

Ayrıca her motor için Taguchi tablosuna istinaden girilen değerlerin sonucu olarak Ansys programından elde edilen motor karakteristik tablosu tüm motorlar için tablo 3.9 de sunulmuştur.

Tüm 35 motor için aynı işlemler yapılarak ilgili değerler Tablo 2.6.6.7 de sunulmuştur.

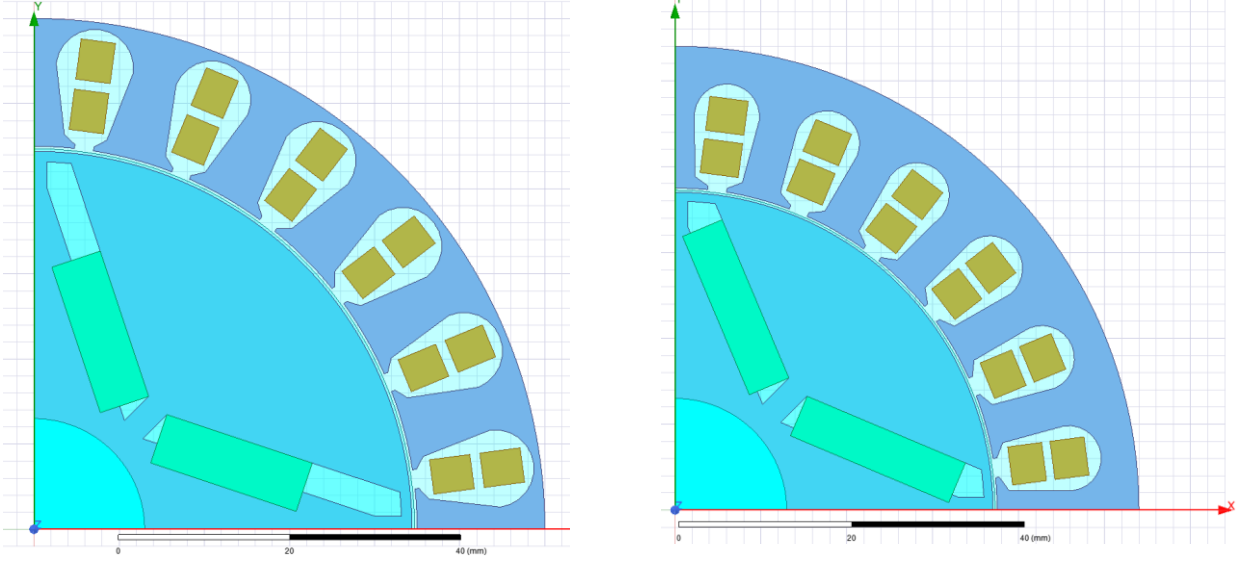
Tablo 2.6.6.7 seçilen 35 IPM için değerler

Parametre	S.Outer	S.Inner	HS0	HS1	HS2	BS0	BS1	BS2	R.Outer	R.Inner	D1	O1	O2	B1	RİB	HRİB	Magnet Thickness	Magnet Width
/Motor	Diameter	Diameter							Diameter	Diameter								
1	108	67.5	0.45	0.9	7.38	2.25	5.04	6.84	66.6	23.4	64.8	2.7	2.7	3.6	2.7	2.7	4.5	36
2	108	75	0.45	0.9	7.38	2.25	5.6	7.6	74	26	72	3	3	4	3	3	5	40
3	108	67.5	0.45	0.9	7.38	2.25	6.72	9.12	66.6	31.2	64.8	3	2.7	4	3.6	2.7	5	36
4	108	75	0.45	0.9	7.38	2.5	5.04	6.84	74	23.4	72	3	3	4	3.6	3.6	5	40
5	120	90	0.45	0.9	7.38	2.5	5.6	7.6	88.8	26	86.4	2.7	2.7	4.8	2.7	2.7	4.5	36
6	108	67.5	0.45	0.9	7.38	2.5	6.72	9.12	66.6	31.2	64.8	2.7	2.7	3.6	3	3	5	36
7	108	67.5	0.5	1	8.2	2.25	5.04	6.84	66.6	31.2	64.8	3	2.7	4	2.7	3	5	36
8	108	75	0.5	1	8.2	2.25	5.6	7.6	74	23.4	72	2.7	2.7	3.6	3	3.6	5	36
9	108	67.5	0.5	1	8.2	2.25	6.72	9.12	66.6	26	64.8	2.7	2.7	4	3.6	2.7	4.5	36
10	108	75	0.45	1	8.2	2.25	5.04	6.84	74	23.4	64.8	2.7	3	4.8	3.6	2.7	5	36
11	108	75	0.45	1	8.2	2.25	5.6	7.6	74	23.4	72	2.7	3	3.6	3.6	3	4.5	40
12	120	90	0.45	1	8.2	2.25	6.72	9.12	88.8	23.4	86.4	2.7	2.7	4	2.7	3.6	5	36
13	120	90	0.5	0.9	8.2	2.5	5.04	7.6	88.8	23.4	86.4	3	2.7	4	3.6	3	4.5	40
14	120	90	0.45	0.9	7.38	2.5	5.04	9.12	88.8	23.4	86.4	3.6	2.7	3.6	2.7	3.6	5	48
15	108	75	0.5	0.9	8.2	2.5	6.72	6.84	74	31.2	72	2.7	3.6	4	3	2.7	6	36
16	108	75	0.5	1	7.38	2.5	5.04	7.6	74	26	64.8	2.7	3.6	3.6	3.6	3	5	36
17	108	75	0.5	1	7.38	2.5	5.6	9.12	74	23.4	72	3	2.7	4.8	2.7	2.7	6	40
18	120	90	0.5	1	7.38	2.5	6.72	9.12	88.8	23.4	86.4	3.6	3	3.6	3	3	4.5	48
19	120	90	0.5	1	9.84	2.25	5.04	7.6	88.8	23.4	86.4	3.6	2.7	4	3	2.7	5	48
20	120	75	0.5	1	7.38	2.25	5.6	9.12	74	23.4	72	2.7	2.7	3.6	3.6	3	4.5	40
21	120	90	0.5	1	7.38	2.25	6.72	6.84	88.8	26	72	3	3.6	3.6	2.7	3.6	4.5	40
22	120	75	0.5	0.9	8.2	2.5	5.04	7.6	74	31.2	72	2.7	3	3.6	2.7	3.6	6	36
23	120	90	0.5	0.9	8.2	2.5	5.6	9.12	88.8	23.4	86.4	3	3.6	4	3	2.7	4.5	48
24	120	75	0.5	0.9	8.2	2.5	6.72	6.84	74	26	72	3.6	2.7	4.8	3.6	3	5	36
25	120	75	0.45	1	8.2	2.5	5.04	9.12	74	23.4	72	3.6	3.6	3.6	3.6	2.7	5	40
26	120	90	0.45	1	8.2	2.5	5.6	6.84	88.8	26	86.4	2.7	2.7	4	2.7	3	6	48
27	120	67.5	0.45	1	8.2	2.5	6.72	7.6	66.6	31.2	64.8	3	3	4	3	2.7	4.5	36
28	120	90	0.5	0.9	7.38	2.25	5.04	9.12	88.8	26	72	2.7	2.7	4	3.6	3.6	4.5	40
29	120	90	0.5	0.9	7.38	2.25	5.6	7.6	88.8	31.2	86.4	3	3	4	3.6	2.7	5	36
30	120	75	0.5	0.9	7.38	2.25	6.72	7.6	74	23.4	72	3.6	3.6	4	3.6	3	5	40
31	120	90	0.45	1	7.38	2.5	5.6	6.84	88.8	23.4	86.4	2.7	3.6	4.8	3	3.6	5	40
32	120	75	0.45	1	7.38	2.5	6.72	7.6	74	26	64.8	2.7	2.7	3.6	3.6	2.7	5	36
33	120	90	0.45	1	8.2	2.25	5.04	9.12	88.8	26	86.4	3	3.6	3.6	3	3	6	36
34	120	75	0.45	0.9	8.2	2.25	5.6	6.84	74	23.4	72	3.6	2.7	4	3.6	3.6	4.5	40
35	120	90	0.45	0.9	8.2	2.25	6.72	7.6	88.8	23.4	86.4	2.7	3	4.8	2.7	2.7	5	48

Note: İlk başta toplam 36 motor için işlem başlatılmış olmasına rağmen, 31 nolu motorun değerleri diğer motorlardan çok farklı çıktığından dolayı, statistik kuralları gereği 31 nolu motor veri kümesinde çıkartılmıştır. İşlemler bunda sonra 35 IPM için devam etmektedir.

2.6.7 RMXprt IPM 'in Maxwell Design 'a dönüştürülmesi

DoE tablosuna bağlı oluşturulan IPM RMXprt motorlarının her biri için Maxwell design görüntüsü oluşturulur.

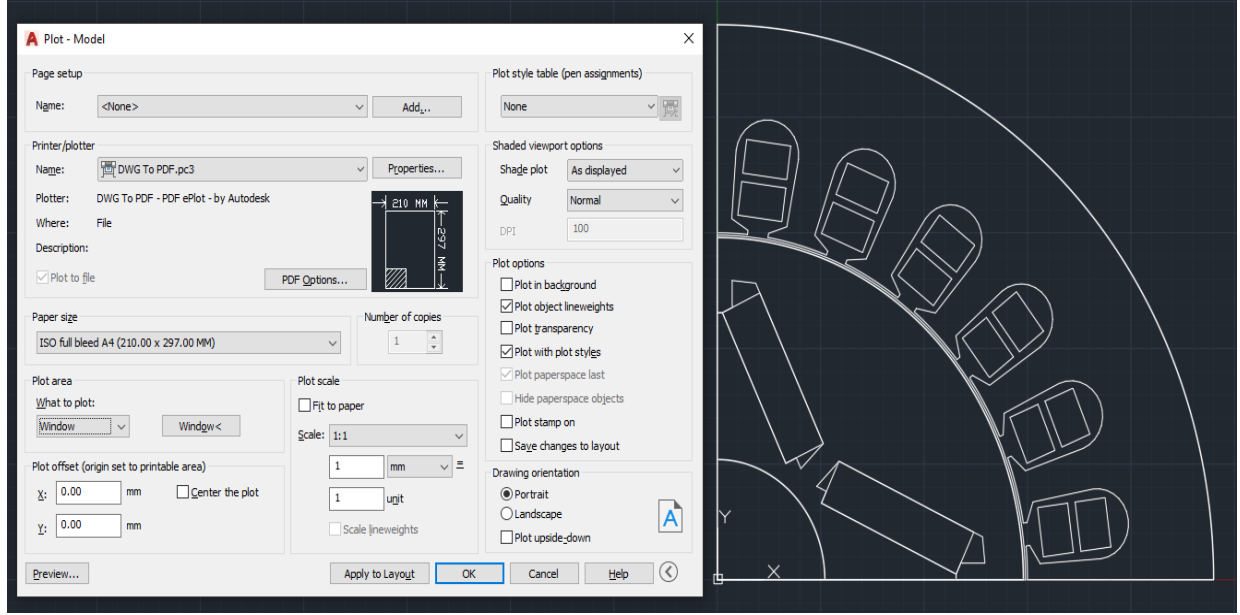


Şekil 2.6.7.1 Sol tarafda 34 nolu IPM Maxwell ve Sağ tarafda 2 nolu IPM Maxwell görüntüleri

Tüm RMXprt IPM 'ler için Maxwell görüntüleri hazırlandıktan sonra görüntüler dxf olarak kaydedilmiş.

2.6.8 AutoCAD programında dxf dosyaların çevrilmesi

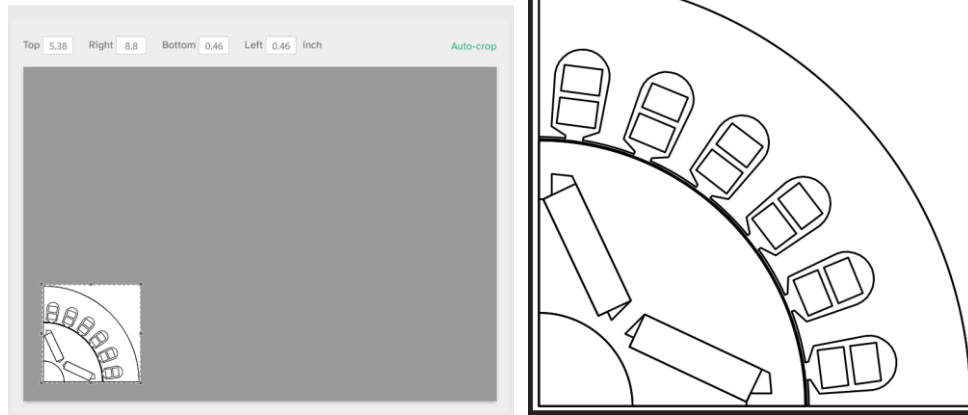
DXF olarak save edile IPM dataları AutoCAD programında, PLOT tool vasıtası ile PDF formatına çevrilmiştir. Tüm motorlar aynı ölçekte hazırlanıp kaydeilmiş.



Şekil 2.6.8.1 AutoCAD uygulaması üzerinde Motor görüntülerinin PDF dosyasına dönüştürülmesi

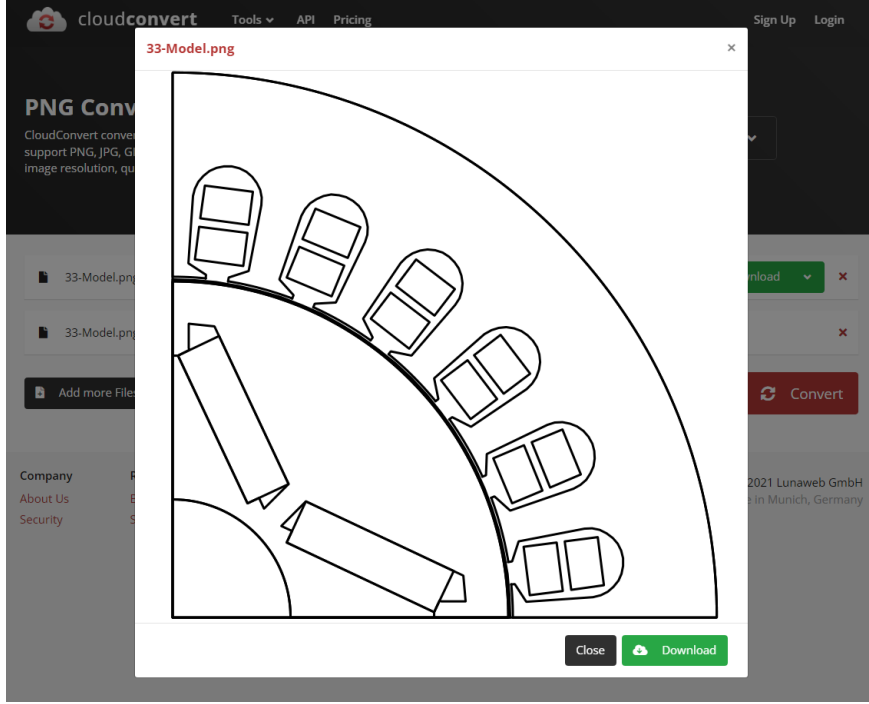
2.6.9 PDF'lerin Crop edilmesi, PNG ve Grayscale'le dönüştürülmesi

AutoCAD programında hazırlanan PDF'ler online bir uygulama vasıtası ile aynı ölçeklerde Crop edilir.



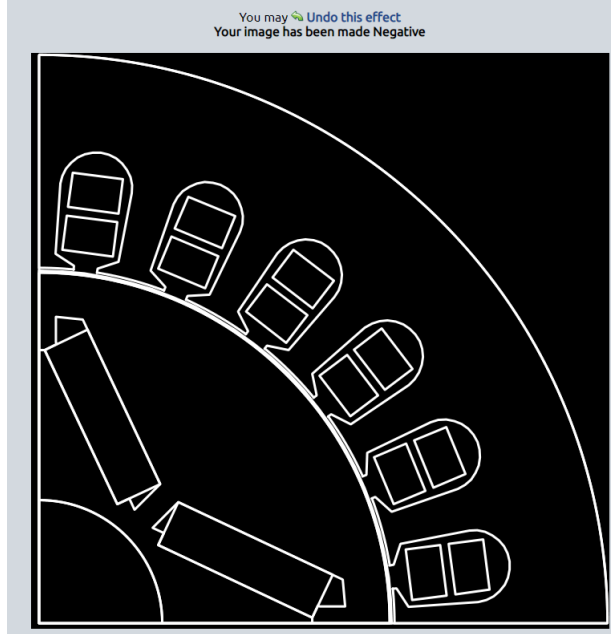
Şekil 3.6.9.1 Motor görüntülerinin Crop edilmesi

Crop edilen PDF IPM görüntüsü online program uygulama ile PNG formatına dönüştürülür.



Şekil 2.6.9.2 IPM Resimlerin PDF’ten PNG’ye dönüştürülmesi

PNG dosyası bu hali ile Matlab programına import edilirse RGB(Red, Green, Blue) şeklinde içeriğe alınıyor. Bu sebepten dolayı ilgili PNG dosyası Grayscale formuna online program vasıtası ile dönüştürüldü.



Şekil 2.6.9.3 RGB motor resimlerinin Grayscale’le dönüştürülmesi.

Aynı işlem tüm motorlar için aynı sırada yapılır.



Şekil 2.6.9.4 Import edilmeye hazır IPM resimleri

Note: İlk başta toplam 36 motor için işlem başlatılmış olmasına rağmen, 31 nolu motorun değerleri diğer motorlardan çok farklı çıktığından dolayı, statistik kuralları gereği 31 nolu motor veri kümesinde çıkartılmıştır. İşlemler bunda sonra 35 IPM için devam etmektedir.

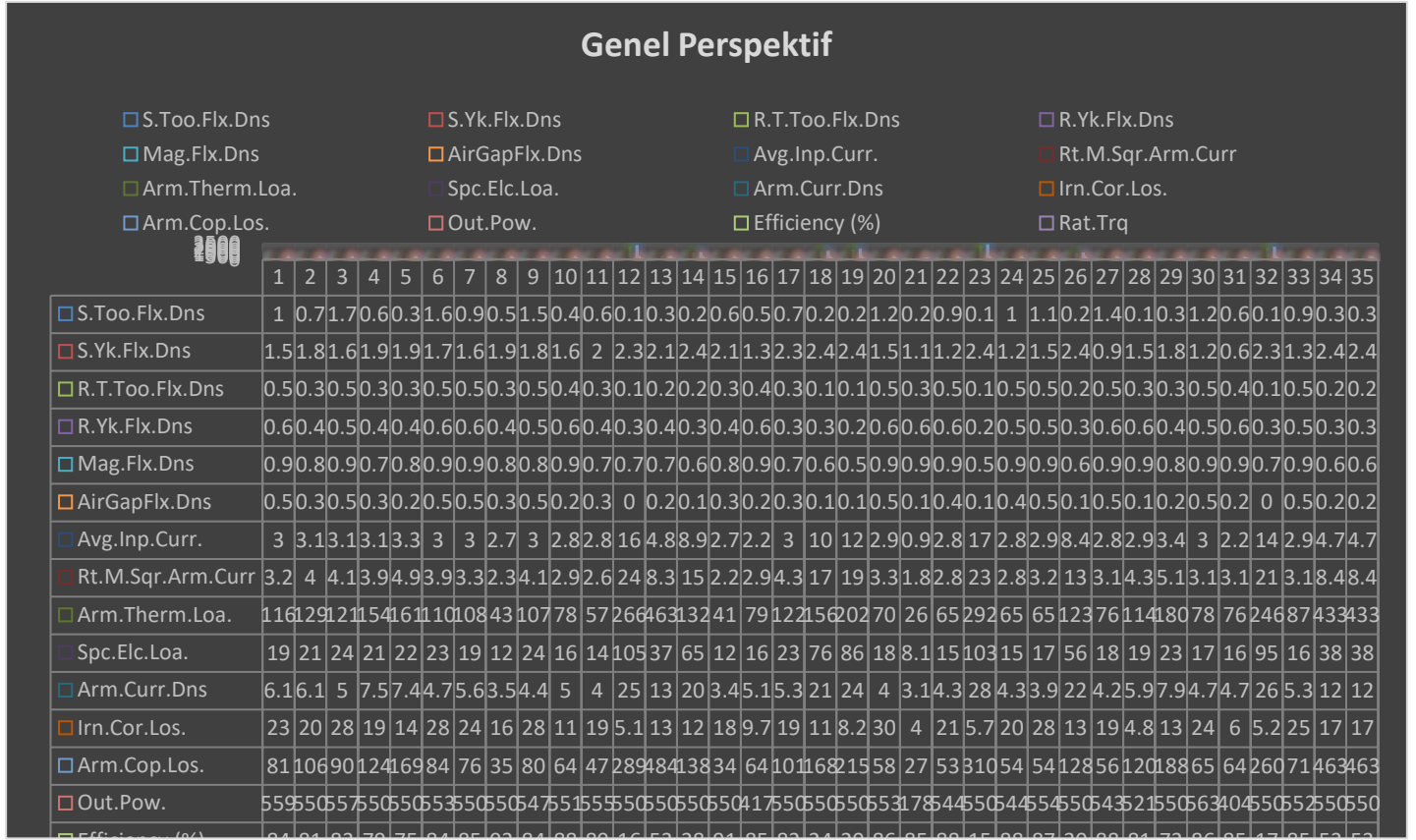
2.6.10 Input verilerinin hazırlanması

Her bir motor için tek tek Ansys Solution'dan elde edilen motor verileri bir matris şeklinde daha sonra Matlab programına aktarılacak üzere toplanır.

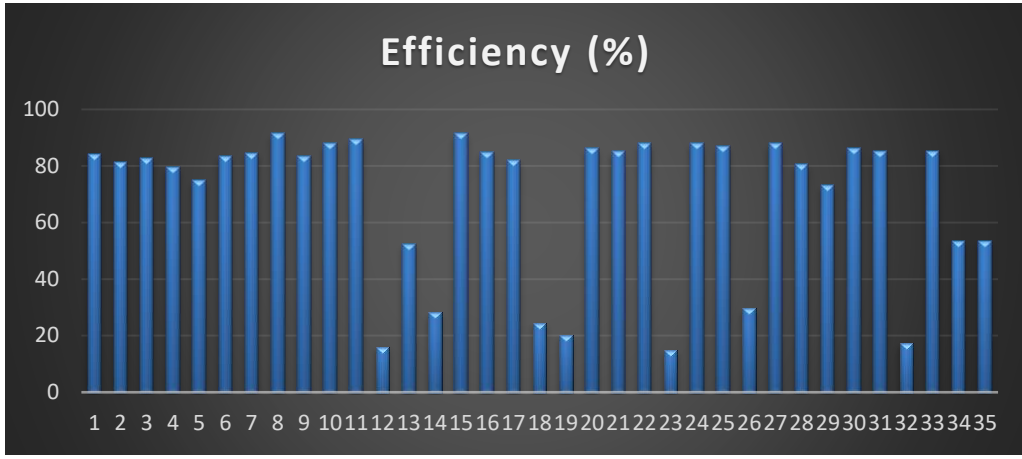
Tablo 2.6.10.1 Ansys Solution'dan elde edilen IPM motor karakteristikleri

Başlık/ IPM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
S.Too.Flx.Dns	0.985363	0.720618	1.66246	0.568006	0.348906	1.61873	0.928279	0.548598	1.48484	0.396336	0.61558	0.0992921	0.27048	0.215761	0.567744	0.494687	0.655948	0.211217	0.162971	1.24823	0.154982	0.881941	0.103746	0.951612	1.11067	0.208007	1.42741	0.148854	0.327184	1.21018	0.286742	0.588385	0.0930394	0.918017	0.349472
S.Vk.Flx.Dns	1.47075	1.83968	1.62074	1.90655	1.85969	1.65443	1.60902	1.87562	1.77262	1.63155	1.99821	2.31089	2.08347	2.36422	2.06999	1.28864	2.27896	2.36721	2.35633	1.46359	1.08191	1.20302	2.36421	1.18958	1.51079	2.38116	0.867008	1.52384	1.76782	1.20066	2.10543	0.801493	2.31375	1.33874	2.3504
R.T.Too.Flx.Dns	0.500792	0.326965	0.484889	0.311122	0.272571	0.502863	0.513804	0.325107	0.401998	0.350176	0.314209	0.147785	0.229206	0.154385	0.296093	0.357152	0.257676	0.14331	0.114207	0.531733	0.267915	0.507613	0.041856	0.466182	0.466993	0.165978	0.512456	0.262176	0.252514	0.486515	0.258424	0.368334	0.146761	0.506697	0.205426
R.Vk.Flx.Dns	0.571049	0.414736	0.538708	0.399051	0.398394	0.567256	0.555764	0.428891	0.508488	0.566748	0.404101	0.329337	0.350764	0.276801	0.434962	0.617016	0.349594	0.250405	0.225627	0.579686	0.646866	0.6087	0.203754	0.488951	0.531183	0.335107	0.553909	0.641256	0.387976	0.534665	0.3807	0.616578	0.348561	0.520406	0.317902
Mag.Flx.Dns	0.891178	0.766242	0.866096	0.740899	0.771794	0.868089	0.888816	0.781905	0.835918	0.908053	0.708676	0.676452	0.705924	0.593528	0.754834	0.930054	0.664845	0.57323	0.546319	0.894241	0.945471	0.915384	0.481965	0.90469	0.890717	0.580422	0.888073	0.93763	0.795594	0.899806	0.701334	0.930445	0.714584	0.892896	0.575725
AirGap.Flx.Dns	0.49966	0.332663	0.492235	0.314402	0.187156	0.477364	0.481412	0.280788	0.4654	0.223158	0.291465	0.0481476	0.151609	0.109569	0.265524	0.231438	0.262977	0.100751	0.0770289	0.501562	0.0861397	0.431753	0.0526795	0.445086	0.473274	0.12613	0.509104	0.0759442	0.176382	0.494954	0.17271	0.240538	0.0485066	0.48675	0.17456
Avg.Imp.Curr.	3.01369	3.07059	3.06657	3.34779	3.33234	3.01061	2.9541	2.791	2.97428	2.84041	2.82148	15.6618	4.75686	8.85151	2.79522	2.22984	3.04422	10.2143	12.3361	2.91205	0.947949	2.80878	16.6432	2.81372	2.89352	8.41088	2.80981	2.9942	3.41514	2.96224	4.36849	2.15144	14.3537	2.94285	4.68036
Rt.M.Sqr.Arm.Curr	3.19248	3.97796	4.10374	3.87149	4.86384	3.90322	3.26022	2.28216	4.08364	2.9277	2.64459	23.5581	8.25174	14.7393	2.24432	2.94513	4.33295	17.0355	19.3801	3.28476	1.82982	2.8317	23.2846	2.83086	3.1793	12.7114	3.06672	4.33821	5.13779	3.09837	7.05031	3.05747	21.3647	3.07681	8.44348
Arm.Therm.Lo	116.319	129.167	121.153	151.955	160.919	109.603	108.16	42.5131	106.859	78.4995	57.0883	2667.22	463.168	1319.88	41.1147	79.4367	121.559	1565.84	2026.51	69.8597	25.5533	65.4519	2925.33	65.413	65.4458	1233.15	76.1853	114.341	179.556	76.3803	379.356	76.3053	2462.81	86.6991	433.137
Spcc.Elc.Lo	18.9145	21.2114	24.3134	20.6437	21.6126	23.1254	19.3158	12.169	24.1943	15.6112	14.1016	104.681	36.6668	65.4942	11.9672	15.7041	23.1043	75.6975	86.1159	17.5151	8.13083	15.0992	103.466	15.0948	16.9527	56.4832	18.1694	19.2769	22.8299	16.5212	31.3282	16.3081	94.9945	16.4063	37.5188
Arm.Curr.Dns	6.14975	6.08949	4.98299	7.45774	7.44561	4.7395	5.59953	3.49355	4.4167	5.02041	4.04036	25.4795	12.6318	20.1526	3.43562	5.05934	5.26131	20.6854	23.5524	3.58054	3.14276	4.33478	28.2735	4.33349	3.86048	21.8321	4.19305	5.93152	7.86496	4.74301	12.1091	4.6804	25.9422	5.28451	11.5445
Im.Corr.Los	22.7704	19.6889	27.5492	18.5999	14.4773	27.859	23.775	16.0205	27.5151	10.7822	18.5502	5.14676	13.2785	11.7469	17.5689	9.68813	18.9618	10.7553	8.17261	29.6323	3.98832	20.629	5.72509	20.2402	28.3657	13.4039	18.7589	4.81353	13.1632	23.7957	15.1184	5.97137	5.15404	24.5889	17.2748
Arm.Cop.Los	81.3246	105.899	89.8289	123.813	168.812	83.5244	76.1766	34.8516	79.5425	63.5476	46.7796	2890.64	483.526	1385.79	34.1582	64.3471	101.22	1686.73	2156.08	58.1713	26.9418	53.2839	3105.81	54.3453	54.042	1286.93	55.9643	120.103	188.443	65.3794	396.125	63.6897	2602.76	70.5353	462.669
Out.Pow.	558.916	549.94	557.267	550.1	549.825	553.211	549.95	549.948	546.885	550.562	553.396	549.822	549.706	549.791	550.024	416.531	549.546	549.666	549.693	552.848	177.619	544.019	549.963	544.433	554.167	550.058	543.436	520.607	549.723	562.517	549.825	403.655	549.895	552.262	549.735
Efficiency (%)	84.2997	81.4089	82.6015	79.4354	74.9985	83.5244	84.6205	91.5329	83.5778	88.1052	89.4753	15.9572	52.5275	28.233	91.4042	84.9082	82.0551	24.4605	20.2544	86.2946	85.1689	88.0387	15.0202	87.951	87.0545	29.7265	87.912	80.6488	73.1665	86.3184	57.2097	85.2823	17.4138	85.3067	53.388
Rat.Trq	1.48257	1.45076	1.4782	1.45919	1.45846	1.46784	1.45879	1.45878	1.45866	1.46041	1.47323	1.45845	1.45814	1.45837	1.45898	1.10488	1.45771	1.45803	1.45811	1.46647	0.471148	1.44305	1.45882	1.44415	1.46997	1.45907	1.44151	1.38095	1.45818	1.49212	1.45846	1.07073	1.45864	1.46492	1.45822

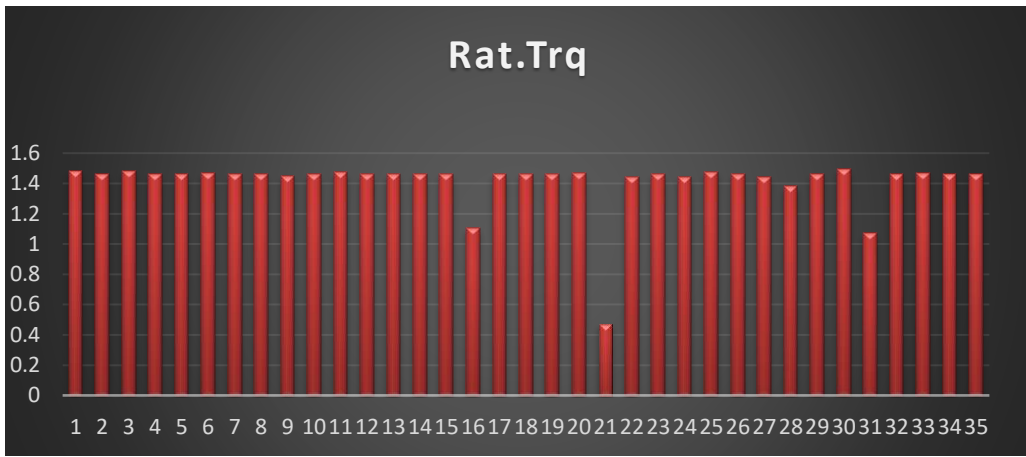
Elde edilen veriler çerçevesinde aşağıdaki grafikler motorlardaki bazı spesifikasyon ortaya çıkarmıştır.



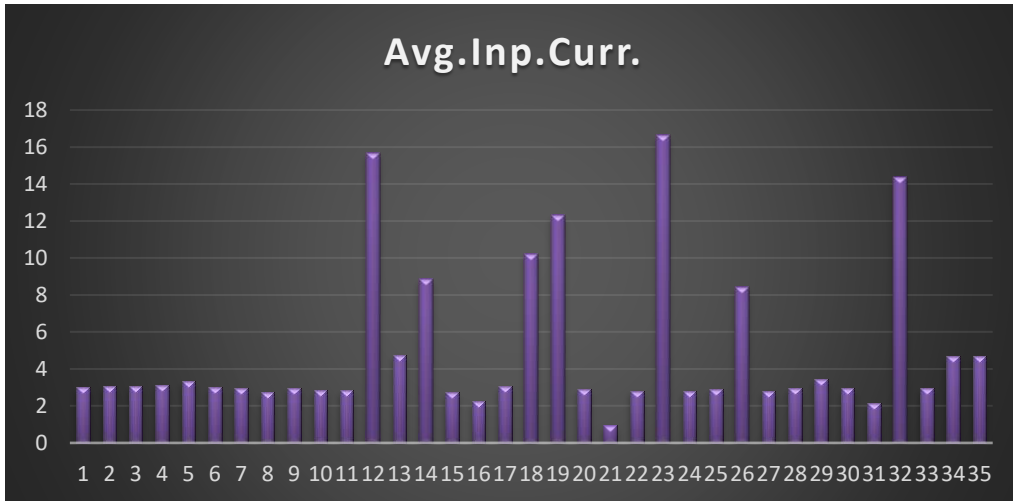
Sekil 2.6.10.1 Genel Perspektif



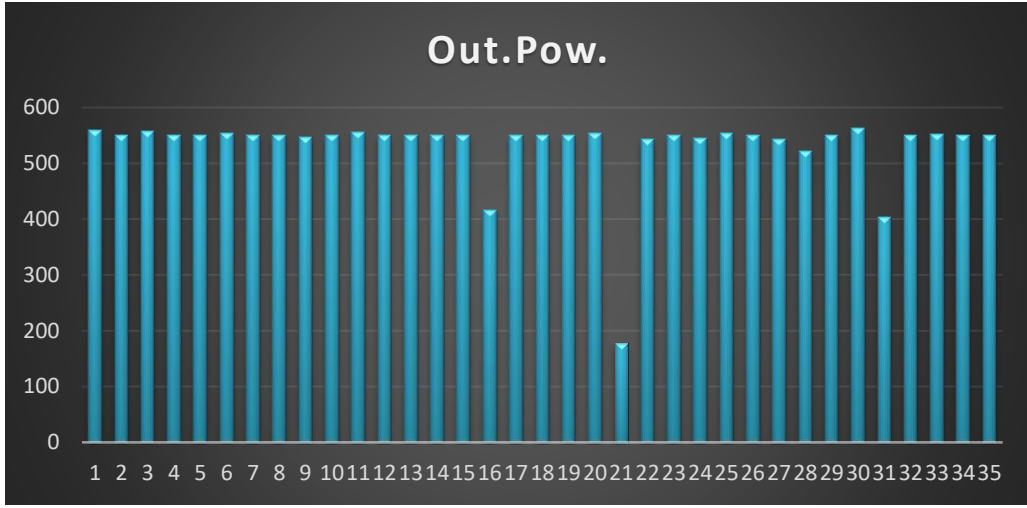
Şekil 2.6.10.2 Verimlilik grafiği



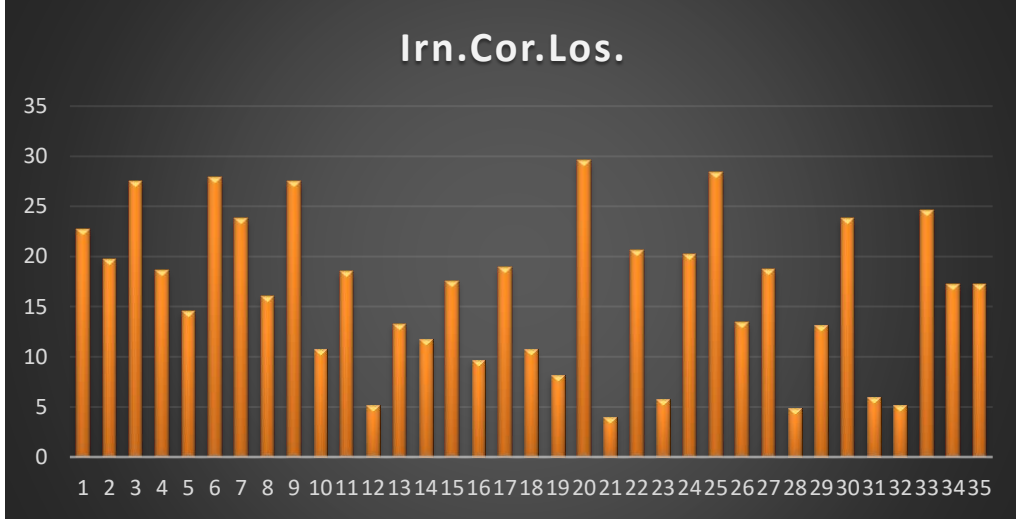
Şekil 2.6.10.3 Tork grafiği



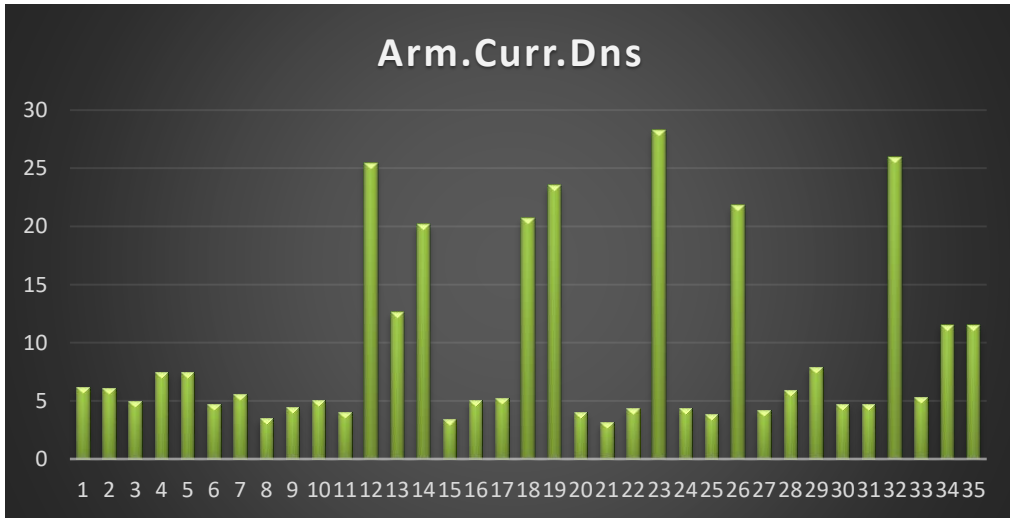
Şekil 2.6.10.4 Ortalama Giriş Akımı



Şekil 2.6.10.5 Çıkış Güç



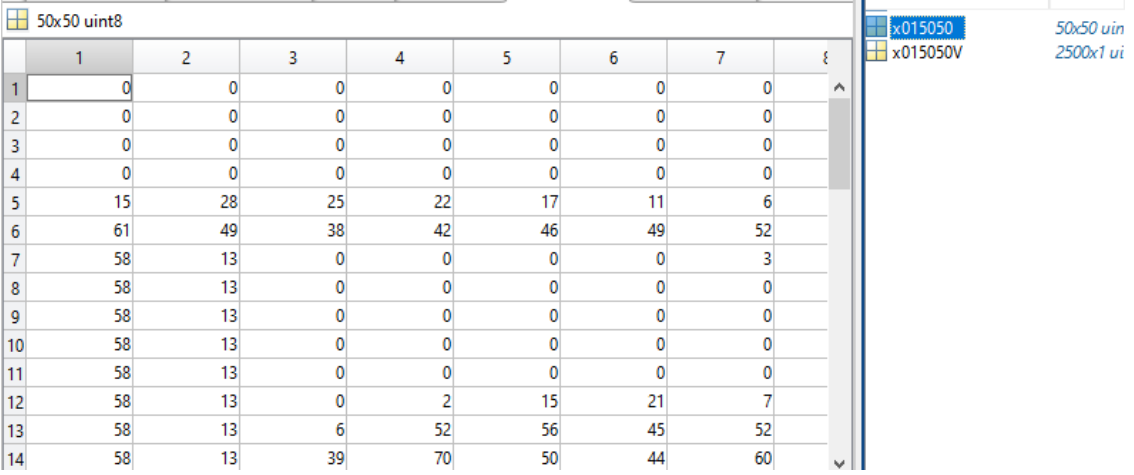
Şekil 2.6.10.6 Demir Çekirdek Kaybı



Şekil 2.6.10.7 Armatür Akım Yoğunluğu

2.6.11 Output very setinin hazırlanması

Bu aşamada elde edilen PNG resimleri matlab programına import edilecektir. İlk olarak PNG formatındaki motor geometri resimleri matlab'a import ediliyor. Her resim bir 50 x 50 şeklinde bir matris olarak Matlab tablosuna import edilir. Şekil 2.6.11.1 ilgili işlemin sonucu olarak gösterilmiştir. Bu matris bir sonraki aşamada bir tek sütunlu matris haline dönüştürülür. M x N Matris'inin tek sütunlu (M x 1) matris'e dönüştürülmesi için $X_v = X(:);$ ibaresinin Matlab formül alanında her matris için yazılması yeterlidir. Burada X matrisin adını temsil etmektedir Bu örnekte x015050 matrisin adını temsil etmektedir. Şekil 2.6.11.2'de vektör matrisi gösterilmiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	ξ
1	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	
5	15	28	25	22	17	11	6	
6	61	49	38	42	46	49	52	
7	58	13	0	0	0	0	3	
8	58	13	0	0	0	0	0	
9	58	13	0	0	0	0	0	
10	58	13	0	0	0	0	0	
11	58	13	0	0	0	0	0	
12	58	13	0	2	15	21	7	
13	58	13	6	52	56	45	52	
14	58	13	39	70	50	44	60	

Şekil 2.6.11.1 IPM 5 için importu sonucu.

2500x1 uint8								
	1	2	3	4	5	6	7	
232	13							
233	39							
234	54							
235	41							
236	14							
237	0							
238	0							
239	0							
240	2							
241	51							
242	14							
243	0							
244	0							
245	0							

2500x35 double								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	69	0	0	
2	0	0	0	0	58	0	0	
3	0	0	0	0	58	0	0	
4	0	0	0	0	58	0	0	
5	15	15	15	15	58	15	15	
6	61	61	61	61	58	61	61	
7	58	58	58	58	58	58	58	
8	58	58	58	58	58	58	58	
9	58	58	58	58	58	58	58	
10	58	58	58	58	58	58	58	
11	58	58	58	58	58	58	58	
12	58	58	58	58	58	58	58	
13	58	58	57	58	90	57	58	
14	58	58	57	58	74	57	58	

Sinir Ağ eğitiminin doğruluk payını arttırmak ve eğitim sonucunun gerçeğe yaklaştırmak için hazırlanan output veri seti normalizasyon işlemini tabi tutulur. Şekil 2.6.11.4 Normalize edilmiş Output veri setini göstermektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8
358	0	0	0	0	0.44521	0	0	0.0454
359	0	0.098485	0	0.015385	0.39726	0	0	0.386
360	0	0.43939	0	0.33846	0.29452	0	0	0.492
361	0	0.51515	0	0.59231	0.39726	0	0	0.363
362	0	0.36364	0.23571	0.43846	0.54795	0.23741	0.13235	0.348
363	0.17518	0.36364	0.42143	0.40769	0.52055	0.42446	0.47794	0.409
364	0.49635	0.38636	0.42857	0.43846	0.90411	0.43165	0.46324	0.356
365	0.42336	0.41667	0.32143	0.45385	0.061644	0.32374	0.36765	0.492
366	0.36496	0.51515	0.32143	0.50769	0	0.32374	0.39706	0.530
367	0.37956	0.51515	0.26429	0.42308	0	0.26619	0.38235	0.515
368	0.35766	0.41667	0.30714	0.26923	0	0.30935	0.36029	0.393
369	0.29927	0.17424	0.42143	0.10000	0.054795	0.42446	0.27941	0.136
370	0.18248	0.87879	0.45714	0.89231	0.16438	0.46043	0.15441	0.878
371	0.065693	0.23485	0.40714	0.23846	0.28082	0.41007	0.051471	0.234

Şekil 2.6.11.4 Normalize edilmiş Output veri seti

2.6.12 Input veri setinin hazırlanması

Ansys'ten elde edilen motor karakteristik değerleri şekil 2.6.12.1'de gözüktüğü gibi Matlab programına Input datası olarak import edilmiştir.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.98536	0.72062	1.6625	0.56801	0.34891	1.6187	0.92828	0.54860
2	1.4708	1.8397	1.6207	1.9066	1.8597	1.6544	1.6090	1.8756
3	0.50079	0.32697	0.48489	0.31112	0.27257	0.50286	0.51380	0.32511
4	0.57105	0.41474	0.53871	0.39905	0.39839	0.56726	0.55576	0.42889
5	0.89118	0.76624	0.86610	0.74090	0.77179	0.86809	0.88882	0.78191
6	0.49966	0.33266	0.49224	0.31440	0.18716	0.47736	0.48141	0.26079
7	3.0137	3.0706	3.0666	3.1478	3.3323	3.0106	2.9541	2.7310
8	3.1925	3.9780	4.1037	3.8715	4.8638	3.9032	3.2602	2.2822
9	116.32	129.17	121.15	153.96	160.92	109.60	108.16	42.513
10	18.915	21.211	24.313	20.644	21.613	23.125	19.316	12.169
11	6.1498	6.0895	4.9830	7.4577	7.4456	4.7395	5.5995	3.4936
12	22.770	19.689	27.549	18.600	14.477	27.859	23.775	16.021
13	81.325	105.90	89.829	123.81	168.81	83.524	76.177	34.852
14	558.92	549.94	557.27	550.10	549.83	553.21	549.95	549.95

Şekil 2.6.12.1 Input değerleri

Sinir Ağ eğitiminin doğruluk payını arttırmak ve eğitim sonucunun gerçeğe yaklaştırmak için hazırlanan Input veri seti normalizasyon işlemini tabi tutulur. Şekil 2.6.12.2 Normalize edilmiş Input veri setini göstermektedir.

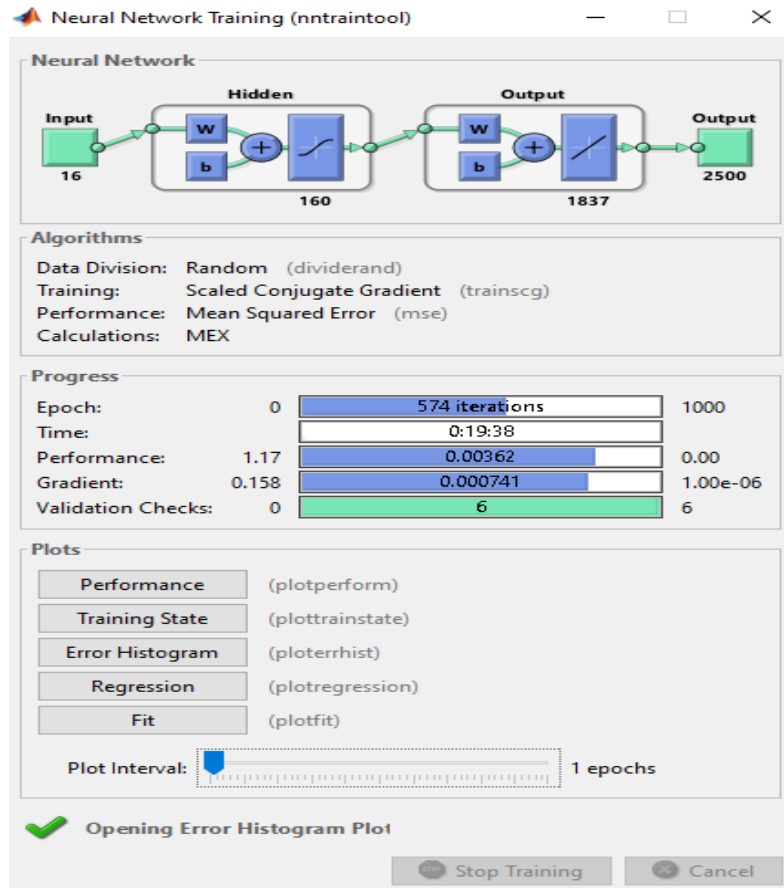
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.56857	0.39988	1	0.30264	0.16303	0.97214	0.53220	0.29027
2	0.48844	0.69574	0.57272	0.73332	0.70699	0.59165	0.56613	0.71594
3	0.93087	0.54247	0.89533	0.50707	0.42093	0.93549	0.95994	0.53832
4	0.82890	0.47614	0.75591	0.44074	0.43926	0.82034	0.79440	0.50808
5	0.88287	0.61332	0.82875	0.55864	0.62530	0.83305	0.87777	0.64711
6	0.97951	0.61723	0.96340	0.57761	0.30157	0.93114	0.93993	0.46130
7	0.13162	0.13524	0.13499	0.14016	0.15192	0.13142	0.12782	0.11360
8	0.062714	0.098864	0.10465	0.093964	0.13964	0.095424	0.065831	0.020818
9	0.031301	0.035732	0.032968	0.044280	0.046681	0.028985	0.028487	0.0058490
10	0.11169	0.13548	0.16761	0.12960	0.13964	0.15530	0.11585	0.041825
11	0.11965	0.11726	0.073226	0.17170	0.17122	0.063537	0.097760	0.013959
12	0.73242	0.61225	0.91877	0.56979	0.40902	0.93085	0.77159	0.46920
13	0.017663	0.025645	0.020425	0.031463	0.046079	0.018378	0.015991	0.0025690
14	0.99064	0.96732	0.98636	0.96774	0.96703	0.97582	0.96735	0.96735

Şekil 2.6.12.2 Normalize edilmiş Input veri seti

2.6.13 Veri setlerinin Eğitilmesi

Elde edilen input ve output dataları Matlab programında bulunan nftool (Neural Fitting) modülü ile şekil 2.6.13.1’de gözüktüğü gibi eğitime bırakılmıştır.

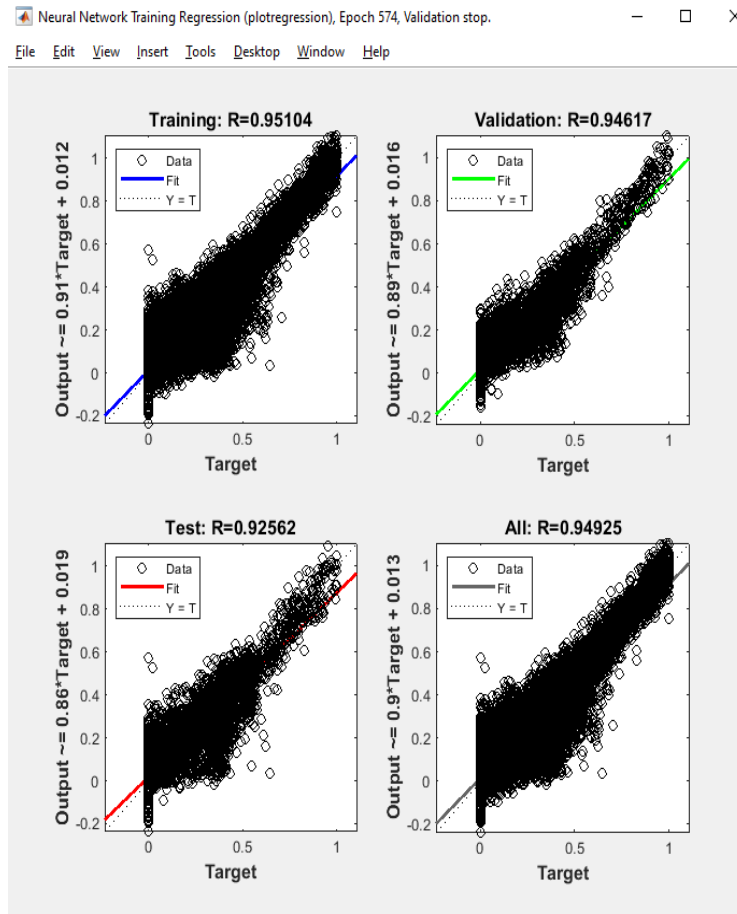
Şekilde gözüktüğü gibi Input veri seti 16, Input ve Output gizli katmanlar sırası ile 160 ve 1837, nihayetinde Output veri seti ise 2500 olarak gözükmektedir.



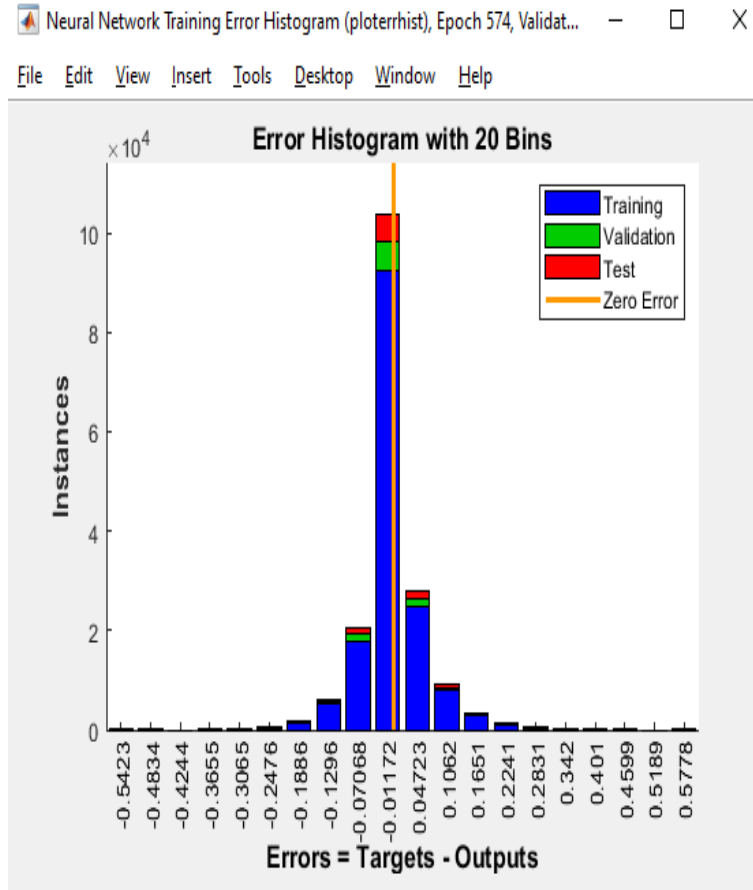
Şekil 2.6.13.1 Matlab nftool ile eğitim parametreleri

Eğitim tamamlandıktan sonra Regresiyon diagramı (Şekil 2.6.13.2) ve Error Histogramına

(Şekil 2.6.13.3) bakıldığında eğitim sonuçları yaklaşık %95 başarı elde etmiştir ki bu gerçek anlamda dikkate alınması gereken bir başarı oranıdır.



Şekil 2.6.13.2 Regresiyon Diagramı

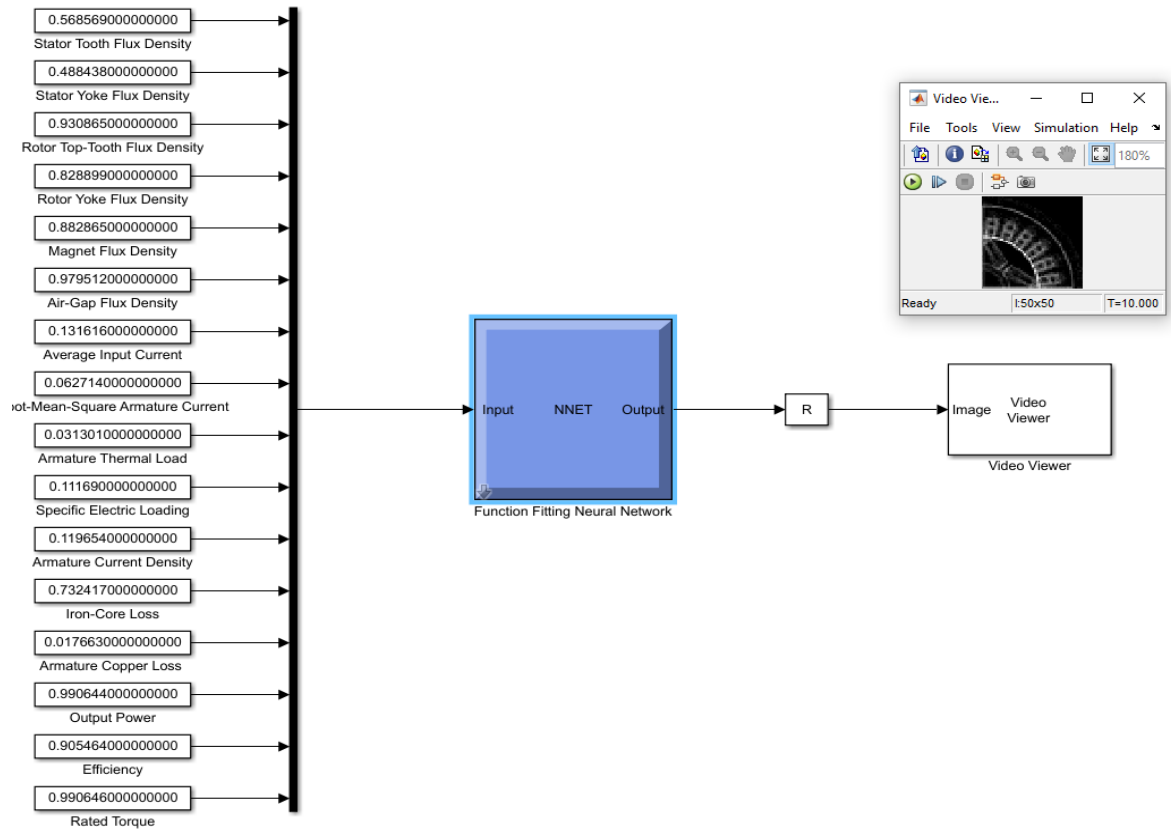


Şekil 2.6.13.3 Error Histogramı

2.6.14 Simulink süreci (Doğrulama aşaması)

Elde edilen başarıyı kontrol etmek ve eğitilmiş veri setinin eğitilmiş ağ için yeterli olduğunu kontrol etmek için, Matlab Function oluşturulur ve Simulink diagramı şekil 2.6.14.1 gibi kurulur.

16 Input veri seti değerleri diagrama girilir ve Simulink Run edilir. Simulink işlemi tamamlandığında 2.6.14.1 şekilde gözüktüğü gibi input verilerine dayalı motor geometrisi elde edilmektedir.



Şekil 2.6.14.1 Simulink diagramı

3- Sonuçlar

Bu çalışmada, sinir ağının çıktısından istenen motor tasarım parametrelerine karşılık gelen motor geometrisi görüntüsünü elde etmek için elektrik motoru tasarımı için bir sinir ağı yaklaşımı kullanılmıştır. Motor geometri görüntülerini elde etmek için, ANSYS RMXprt ve ANSYS Maxwell kullanılarak elde edilen motor geometrileri ve analiz sonuçlarından bir veri seti üretilerek bir sinir ağı eğitilmiştir. Eğitilen YSA'nın çıktısından istenilen motor performans değerlerine karşılık gelen motor geometrisi-görüntüsü elde edilmeye çalışılır.

Bu, %94.925 sonucunun önerilen yaklaşımın istenen yakınsama oranını temsil ettiği anlamına gelir.

Önerilen yaklaşımın sonucu göz önüne alındığında, Elektrik Motoru geometrisinin görüntü üretiminin başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Bu nedenle, önerilen metodoloji, geometrik tasarım problemlerinin belirsizliğine karşı motor optimizasyon çalışmaları için daha iyi bir başlangıç sağlar. Ayrıca bu çalışmada, hızlı tepki verme gibi üstün özelliklerinden dolayı sonlu elemanlar hesaplaması yerine elektrik motorlarının elektromanyetik analizi için hesaplama kullanılması planlanmıştır.

Ayrıca, Motor tasarımcılarının ilk model geometrisinin seçiminde, tasarım ve doğrulama süreçlerinde ve bilgisayar destekli analiz süreçlerinde karşılaştıkları belirsizlikler uzun zaman almakta ve bu da zaman-maliyet verimliliğini azaltmaktadır. Bu durumda tasarımcılar optimizasyon tekniklerine odaklanırlar. Motor tasarım optimizasyonunda hem geleneksel deney yöntemleri tasarımı hem de yapay zeka tabanlı yaklaşımlar incelenir.

Bu araştırmanın ileriki safhalarında, geometri görüntüleri FFT ve IFFT ile ayrıştırılarak ve bir araya getirilerek yapay sinir ağının öğrenme hızının iyileştirilme test edilebilir.

Sinir ağlarının eğitimi, görüntü geometrisinin gerçek hayali, büyüklük-aı kısımlarını sağlayan FFT kullanılarak ayrıştırma işlemi ile başarılı olup olmadığı denenebilir.

ilaveten, eğitilmiş sinir ağlarından üretilen motor geometrileri Log, FFT, Log+FFT, Laplacian, Sobel ve Histogram Equalization gibi 2 boyutlu filtre teknikleri ile iyileştirme araştırmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR/REFERENCES

- 1- U. Demir and M.C. Akliner, "Calculation of Performance Characteristic of In-Wheel Asynchronous Motor for Electric Vehicle", *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, vol. 6, no. Özel Sayı1 (ISMSIT2017), pp. 10-20, Dec. 2017
- 2- U. Demir and M.C. Akliner, "Design and analysis of radial induction motor", Demir, U., Akliner, M.C. Design and analysis of radial induction motor. *Electrical Engineering*, vol. 100, 2361-2371 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0708-6>
- 3- M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design". CRC Press 2nd ed., Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, LLC, 2010. <https://doi.org/10.1201/9781420054002>
- 4- Z. Mounir, M. El Hachemi Benbouzid, and D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study", *IEEE*, vol. 55, no. 6, pp. 1756-1764, November, 2006
- 5- X. Sun, Z. Shi, G. Lei, Y. Guo and J. Zhu, "Multi-Objective Design Optimization of an IPMSM Based on Multilevel Strategy," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 139-148, Jan. 2021, doi:10.1109/TIE.2020.2965463.
- 6- B. Wahono, W. B. Santoso, and A. N. Amin, "Analysis of Range Extender Electric Vehicle Performance Using Vehicle Simulator" *Energy Procedia*, Volume 68, April 2015, Pages 409-418
- 7- U. Demir ve M. Aktiner, "Elektrikli bir araç için tekerlek iyi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 33, sayı 4, ss. 1517-1530, Ara. 2018, doi:10.17341/gazimmfd.416448
- 8- U. Demir and M.C. Aktiner, "Using Taguchi method defining critical rotor pole data of LSPMSM considering the power factor and efficiency", *Tehnicki vjesnik*, vol. 24, br. 2, str. 347-353, 2017. <https://doi.org/10.17559/TV-20140714225453>
- 9- Yong-Hwan Oh, Tae-Kyung Chung, Min-Kyu Kim and Hyun-Kyo Jung, "Optimal design of electric machine using genetic algorithms coupled with direct method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 3, pp. 1742-1745, May 1999, doi: 10.1109/20.767366.
- 10- S. Albawi, T. A. Mohammed and S. Al-Zawi, "Understanding of a convolutional neural network," 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET), Antalya, Turkey, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICETechnol.2017.8308186.
- 11- U. Demir, "Improvement of the power to weight ratio for an induction traction motor using design of experiment on neural network". *Electr Eng* (2021). <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01204-2>
- 12- Wrobel R, Lukaszyn M, Jagiela M et al (2003) new approach to reduction of the cogging torque in a brushless motor by skewing optimization of permanent magnets. *Electr Eng* 85:59–69. <https://doi.org/10.1007/s00202-002-0144-4>
- 13- Dongyang C, Changzhi S, Yuejun A (2006) The application of magnet optimization of permanent magnet synchronous motor by modified PSO. In: 2006 6th world congress on intelligent control and automation, Dalian, 2006, pp 1879–1882. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2006>
- 14- Markovic M, Perriard Y (2009) Optimization design of a segmented halbach permanent-magnet motor using an analytical model. *IEEE Trans Magn* 45(7):2955–2960. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2015571>
- 15- Kowol M, Łukaniszyn M, Latawiec KJ (2010) Modeling and construction optimization of a modular TFM with an outer rotor. *Electr Eng* 92:111–118. <https://doi.org/10.1007/s00202-010-0167-1>
- 16- Huang Y, Zhou S, Bao G, Wang Z (2012) Design and optimization for unilateral flat permanent linear motor. In: 2012 IEEE international conference on computer science and automation engineering (CSAE), Zhangjiajie, 2012, pp 687–691. <https://doi.org/10.1109/CSAE.2012.6291111>

- [://doi.org/10.1109/CSAE.2012.6](https://doi.org/10.1109/CSAE.2012.6)
- 17- Umadevi N, Balaji M, Kamaraj V (2014) Design optimization of brushless DC motor using Particle Swarm Optimization. In: 2014 IEEE 2nd international conference on electrical energy systems (ICEES), Chennai, 2014, pp 122–125. <https://doi.org/10.1109/ICEES>
 - 18- Prieto D, Fernandez A, Dessante P, Vannier J, Jannot X, Saint-Michel J (2014) Optimization methodology for synchronous reluctance motor by finite element method. In: 2014 16th European conference on power electronics and applications, Lappeenranta, 2014. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6910891>
 - 19- Castellini L, D'Andrea M, Villani M (2015) Design optimization of surface PM synchronous motors for a dynamic focus adjustment of a laser beam. In: 2015 IEEE international electric machines & drives conference (IEMDC), Coeur d'Alene, ID, 2015, pp 676–682. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2015.7409132>
 - 20- Liu X, Fu W (2015) A novel sequential strategy for multivariable optimization in designing of PM motor. In: 2015 IEEE international magnetism conference (INTERMAG), Beijing, 2015, pp 1–1. <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2015.7156997>
 - 21- Gangl P, Amstutz S, Langer U (2016) Topology Optimization of Electric Motor Using Topological Derivative for Nonlinear Magnetostatics. *IEEE Trans Magn* 52(3):1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2496177>
 - 22- Carraro E, Morandin M, Bianchi N (2016) Traction PMASR motor optimization according to a given driving cycle. *IEEE Trans Ind Appl* 52(1):209–216. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2477479>
 - 23- Krasopoulos CT, Armouti IP, Kladas AG (2016) Hybrid multiobjective optimization algorithm for PM motor design. In: 2016 IEEE conference on electromagnetic field computation (CEFC), Miami, FL, 2016, pp 1–1. <https://doi.org/10.1109/CEFC.2016.7816014>
 - 24- Elomary I, Abbou A, Idoumghar L (2017) Backtracking search algorithm optimization for the brushless direct current (BLDC) motor parameter design. In: 2017 international renewable and sustainable energy conference (IRSEC), Tangier, 2017, pp 1–5. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477573>
 - 25- Yildiz A, Polat M, Özdemir MT (2018) Design optimization of inverted switched reluctance motor using ant colony optimization algorithm. In: 2018 International conference on artificial intelligence and data processing (IDAP), Malatya, Turkey, 2018, pp 1–6. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620923>
 - 26- Ion IG, Bontinck Z, Loukrezis D et al (2018) Robust shape optimization of electric devices based on deterministic optimization methods and finite-element analysis with affine parametrization and design elements. *Electr Eng* 100:2635–2647. <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0716-6>
 - 27- Belhadi M, Krebs G, Marchand C et al (2018) Geometrical optimization of SRM on operating mode for automotive application. *Electr Eng* 100:303–310. <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0504-0>
 - 28- Rivière N, Villani M, Popescu M (2019) Optimisation of a high speed copper rotor induction motor for a traction application. In: IECON 2019—45th annual conference of the IEEE industrial electronics society, Lisbon, Portugal, 2019, pp 2720–2725. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927627>
 - 29- Sun X, Shi Z, Lei G, Guo Y, Zhu J (2021) Multi-objective design optimization of an IPMSM based on multilevel strategy. *IEEE Trans Ind Electron* 68(1):139–148. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2965463>
 - 30- Shi Z, Sun X, Cai Y, Yang Z (2020) Robust design optimization of a five-phase PM hub motor for fault-tolerant operation based on taguchi method. *IEEE Trans Energy Convers* 1:1. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2989438>
 - 31- Diao K, Sun X, Lei G, Bramerdorfer G, Guo Y, Zhu J (2020) System-level robust design optimization of a switched reluctance motor drive system considering multiple driving cycles. *IEEE Trans Energy Convers* 1:1. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3009408>

- 32- Zajmi L, Ahmed FYH, Jaharadak AA (2018) Concepts, methods, and performances of particle swarm optimization, backpropagation, and neural networks. *Appl Comput Intell Soft Comput* 1:1. <https://doi.org/10.1155/2018/95472> 12
- 33- Demir U, Aküner MC (2017) Using Taguchi method in defining critical rotor pole data of LSPMSM considering the power factor and efficiency. *Tehnički Vjesnik* 24(2):347–353. <https://doi.org/10.17559/TV-20140714225453>
- 34- Demir U, Aküner MC (2018) (2018) Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle. *J Fac Eng Arch Gazi Univ* 18–2:1–21. <https://doi.org/10.17341/gazim.mfd.416448>
- 35- Kocabicak ZK, Demir U (2020) Design and optimization of an electromechanical actuator for the latch of a foldable vehicle seat. *Mater Test* 62(7):749–755. <https://doi.org/10.3139/120.111539>
- 36- Balestrassi PP, Popova E, Paiva AP, Marangon JW (2009) Design of experiments on neural network's training for nonlinear time series forecasting. *Neurocomputing* 72(4–6):1160–1178. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2008.02.002>
- 37- Lasheras FS, Vilan JA, Nieto PJ, del Coz Diaz JJ (2010) The use of design of experiments to improve a neural network model in order to predict the thickness of the chromium layer in a hard chromium plating process. *Math Comput Model* 52(7–8):1169–1176. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.03.007>
- 38- Lovelace, E. C., T. M. Jahns, and J. H. Lang, “A saturating lumped-parameter model for an interior PM synchronous machine,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 38, No. 3, 645–650, May–Jun. 2002.
- 39- Bernal, F. F., A. G. Cerrada, and R. Faure, “Determination of parameters in interior permanent-magnet synchronous motors with iron losses without torque measurement,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 37, No. 5, 1265–1272, Sep.–Oct. 2001.
- 40- Rezaie, J., M. Gholami, R. Firouzi, T. Alizadeh, and K. Salashoor, “Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) adaptive genetic parameter estimation,” *Proceedings of the WCECS*, Oct. 2007.
- 41- Box, G.E., Hunter, W.G. and Hunter, J.S. (2005) *Statistics for Experimenters*. 2nd Edition, Wiley, New York.
- 42- Law, A.M. and Kelton, W.D. (2000) *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd Edition, McGraw Hill, New York
- 43- Taguchi, G. (1986) *Introduction to Quality Engineering*. Asian Productivity Organization, Tokyo
- 44- Dehnad, D. (ed.) (1989) *Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method*. Wadsworth & Brooks/Cole, Pacific Grove, California.
- 45- Miryam Barad, *Design of Experiments (DOE)—A Valuable Multi-Purpose Methodology*, Tel Aviv University, Israel
- 46- S.H. Park, *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman & Hall, London, 1996.
- 47- R. Unal, E.B. Dean, Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview, in: *Proceedings of the International Society of Parametric Analyst 13th Annual*, May 21–24, 1991.
- 48- M.S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design*, PrenticeHall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- 49- T. Bendell, Taguchi methods, in: *Proceedings of the 1988 European Conference on Taguchi Method*, Elsevier, Amsterdam, 13–14 July, 1988.
- 50- Wu C F and Hamada J 2002 *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization* Wiley
- 51- Ghosh S, Rao C R 1996 *Design and Analysis of Experiments*. Handbook of Statistics 13 NorthHolland ISBN 0-444-82061-2
- 52- Cha, D., Zhang, H., & Blumenstein, M. (2011). Prediction of maximum wave-induced liquefaction in porous seabed using multi-artificial neural network model. *Ocean Engineering*, 38(7), 878–887.

- 53- Caudil, M. (1987). Neural networks primer part 1. *AI Expert*, 2(12), 46–52.
- 54- Birdi, Y., Aurora, T., & Arora, P. (2013). Study of Artificial Neural Networks and neural implants. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 1(4), 258–62
- 55- Haykin, S., & Network, N. (2004). A comprehensive foundation. *Neural Networks*, 2, 41.
- 56- Yazid Salem, NICOSIA, 2017, APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TO PREDICT THE WAVE CHARACTERISTICS,
- 57- Hubel DH, Wiesel TN (1968) Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *J Physiol* 195:215–243
- 58- Fukushima K (1980) Neocognitron: a self organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. *Biol Cybern* 36:193–202
- 59- Rikiya Yamashita & Mizuho Nishio & Richard Kinh Gian Do & Kaori Togashi (2018), Convolutional neural networks: an overview and application in radiology, <https://doi.org/10.1007/s13244-018-0639-9>
- 60- Prof.Yogesh B.Mandake(2018),Three phase Induction Motor -Model Design and Performance Analysis in ANSYS RMXprt, Pune, India
- 61- Olga V.Tikhoniva and Anatoliy T.Plasturn,2018 IEEE 978-1-5386-4320-2,
- 62- Olga V.Tikhoniva and AnatoliyT.Plasturn, 2017 IEEE 978-1-5090-4865-6/17, “Electromagnetic Torque Calculation of Induction Motor with Ring Windings by dint of ANSYS Maxwell”
- 63- Dr.Norbert Grass, Dr.WernerHartmann,MichaelKlocknerYutthan aTirawanichakul, Perapong Tekasakul1,Siemens AG, IEEE0-7803-7420- 7/02“Application of different types of high voltage supplies on industrial electrostatic precipitators
- 64- Zelmira Ferkova,2014 IEEE 978-1-4799-3721- 9/14, “Comparison of Two-Phase Induction Motor Modelling in ANSYS Maxwell 2D and 3D Program”
- 65- Y. Yang and A. Emadi, "Hybrid and plug-in hybrid vehicles," in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, 2013, pp. 1-22.
- 66- Y. Yang and A. Emadi, "Integrated Electro-Mechanical Transmission Systems in Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA, 2011.
- 67- S. Rogers, "EV everywhere grand challenge, Electric drive status and challenges," U. S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, 2012.
- 68- Z.Q. Zhu and D. Howe, "Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746-765, April 2007.
- 69- J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R. Waters, and M. Leijon, "Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: a review," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 475-484, Feb. 2012.
- 70- A. Bazzi, "Electric machines and energy storage technologies in EVs and HEVs for over a century," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Chicago, IL, 2013.
- 71- B. Bilgin and A. Sathyan, "Fundamentals of Electric Machines," in *Advanced Electric Drive Vehicles*, Boca Raton, FL, CRC Press, 2014, pp. 107-186.
- 72- S. Wu, L. Tian, and S. Cui, "A comparative study of the interior permanent magnet electrical machine's rotor configurations for a single shaft hybrid electric bus," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, Sept. 2008.
- 73- A. Wang , Y. Jia , and W.L. Soong, "Comparison of five topologies for an interior permanent-magnet machine for a hybrid electric vehicle," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 3606 - 3609, Oct. 2011.
- 74- F. Charih, F. Dubas, C. Espanet and D. Chamagne, "Performances comparison of PM machines with different rotor topologies and similar slot and pole numbers," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Sorrento, 2012.

- 75- D. G. Dorrell, A. M. Knight, L. Evans, and M. Popescu, "Analysis and design techniques applied to hybrid vehicle drive machines—assessment of alternative IPM and induction motor topologies," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3690-3699, 2012.
- 76- X. Liu, H. Chen, J. Zhao, and A. Belahcen, "Research on the performances and parameters of interior PMSM used for electric vehicles," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. pp, no. 99, 2016.

Bu Tez Çalışmasından Çıkan Bilimsel Eserler:

Uluslararası Mayıs 2022 CODIT/İstanbul konferansı

***POURKARIMI, M & DEMİR, U & AKÜNER, M.C.** *“Neural Network Approach for E-Motor Development” (2022)*

Patentler:

AKÜNER, M.C.& POURKARIMI, M & DEMİR, U & AKGÜN, G. “Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Elektrik Motoru Tasarımında Rotor ve Stator Geometrileri Kestirme ve Analiz Etme Yöntemi”- 2022-GE-337252

ÖZGEÇMİŞ

Majid Pourkarimi 22 Eylül 1980’de İran’da doğmuştur. Lise eğitimini Şehit Madani okulunda Fizik ve Matematik bölümünde 1999’da tamamlamıştır. Ardından Raja Üniversitesi Endüstri Mühendisliği/Yönetimi Öğr.’ni kazanarak 2003 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2004-2006 yılları arasında askerlik hizmetini yerine getirmiştir. 2007 yılında İran’dan Türkiye’ye yerleşmiş ve BGS Information Systèmes firmasında ERP danışmanı olarak 2013 yılına kadar ERP sektöründe BEKO, Arçelik, AKAR Kalıp, TURAŞ, Eurobump Otomotive vs. firmalarına danışmanlık vermiştir. 2013-2021 Yılları arasında Siemens PLM alanında, Boğaziçi Yazılım firmasında PLM projeleri yöneticisi ve danışmanı olarak, FORD Otosan, STM, TAI, TEI, Aselsan ve birçok savunma sanayi firmalarında PLM projesini hayata geçirmiştir.

2019 yılında Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Yüksek lisans bölümüne kayıt yaptırmaya hak kazanmıştır. Yoğun çalışma hayatı temposuna rağmen Uluslararası 2022 CODIT konferansına gönderdiği Yapay Sinir Ağı yaklaşımı ile Elektrik motorlarında Rotor ve Stator Kestirimi makalesi sunuma hak kazanmış ve ilgili makale 2022 IEEE Xplore’da yayınlanmıştır.

2021 sonu itibari ile PLM alanında çalışmalarını Dassault Systèmes firması ile işbirliği yaparak devam ettirmektedir.

Adı Soyadı : Majid POURKARIMI

Doğum Yeri /Tarihi : IRAN / 22.09.1980

E-Posta : Pourkarimi.majid@gmail.com

Öğrenim Durumu

Lise : Şahit Madani, Iran, Tabriz/ Fizik Matematik (1999)

Lisans : RAJA Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği ve Yönetimi (2003)

Yüksek Lisans : Marmara Üniversitesi / Mekatronik Programı (2022)