

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİŞLİSİZ ASANSÖR SİSTEMLERİ İÇİN FERRİTE TABANLI
GÖMÜLÜ MİKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMI**

HİCRET YETİŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ERKAN MEŞE**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİŞLİSİZ ASANSÖR SİSTEMLERİ İÇİN FERRİTE TABANLI
GÖMÜLÜ MIKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMI

Hicret YETİŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 20.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Erkan MEŞE

Ege Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Erkan MEŞE

Ege Üniversitesi

Prof. Dr. Hacı BODUR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Murat AYZ

Kocaeli Üniversitesi

ÖNSÖZ

Asansör sistemleri ve mıknatıslı senkron makine tasarımı ile ilgili yapılacak çalışmalar için faydalı bir referans olması temennisiyle...

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince mesleğime dair öğrendiğim neredeyse her şeyi kendisine borçlu olduğum, engin bilgi birikimi, düşünceleri ve kişiliği ile her alanda örnek aldığım tez danışmanım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Erkan MEŞE' ye tez çalışması süresince göstermiş olduğu anlayış, sabır ve destekleri için en içten teşekkürlerimi sunarım. Yol göstericiliği ve sonsuz desteği olmasa, ne yapardım hiç bilmiyorum.

Tez çalışmamı değerlendirmek üzere kıymetli vakitlerini ayıran değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Hacı BODUR ve Yrd. Doç. Dr. Murat AYZ' a ilgi ve görüşlerinden dolayı gönülden teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince takıldığım her konuda bilgilerini paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Arş. Gör. Yusuf YAŞA' ya, lisans hayatımdan itibaren zorlu süreçlerde her daim yanımda olan değerli arkadaşlarım Gülsüm ÖZYILDIRIM ve Kübra BAYRAM ÇİLESİZ' e, tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her durum ve koşulda yanımda olan eşsiz aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Infolytica Şirketine, MotorSolve BLDC Tasarım ve Analiz programına bir yıllık ücretsiz kullanım imkânı sağlamalarından dolayı çok teşekkür ederim.

Aralık, 2017

Hicret YETİŞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTIMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	10
1.3 Hipotez.....	11
BÖLÜM 2	
ASANSÖR SİSTEMLERİ.....	13
2.1 Dişli Kutulu Asansör Sistemleri	16
2.2 Dişlisiz Asansör Sistemleri	17
2.3 Motor Tasarımı için Dişlisiz Asansör Sistemi Gereksinimleri.....	18
BÖLÜM 3	
MIKNATISLI SENKRON MAKİNELER.....	21
3.1 Yüzey Montajlı Senkron Motorlar	23
3.2 Gömülü Miknatıslı Senkron Motorlar	24
BÖLÜM 4	
DİŞLİSİZ ASANSÖR SİSTEMİ İÇİN MIKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMI	27
4.1 Tasarım Süreci, Gereksinimler ve Kısıtlar.....	27

4.1.1	Tasarım Süreci.....	27
4.1.2	Gereksinimler ve Kısıtlar	28
4.2	Mıknatıslı Senkron Makinelerin Çalışma Prensibi.....	32
4.3	Ferrite Tabanlı GMS Motorların Tasarımı	33
4.3.1	IPM1, IPM2, IPM3, IPM4 Motorlarının Tasarımı	33
4.3.2	IPM5 Motorunun Tasarımı.....	37
4.4	Ferrite Tabanlı GMS Motorların Analiz Sonuçları.....	38
4.5	Seçilen Tasarımlar	44
4.6	NdFeB Tabanlı YMS Motor Tasarımı.....	46
4.7	YMS Motorun Analiz Sonuçları.....	48
4.8	Önerilen Motor	51
BÖLÜM 5		
	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
	KAYNAKLAR	55
	ÖZGEÇMİŞ	59

SİMGE LİSTESİ

B	Manyetik akı yoğunluğu
d	d-ekseni
i	Akım
J	Akım yoğunluğu
K	Faydalanma katsayısı
Ld	Stator d-ekseni endüktansı
Lq	Rotor q-ekseni endüktansı
P	Güç
q	q-ekseni
T	Moment
v	Çizgisel hız
x	Reaktans
ω	Açısal hız
η	Verim
λ	Toplam halkalanan akı
γ	Tork açısı

KISALTMA LİSTESİ

EN	European Elevator Standards
GMS	Gömülü Mıknatıslı Senkron
IEC	International Electrotechnical Commission
IPM	Interior Permanent Magnet
NdFeB	Neodymium Iron-Boron
PM	Permanent Magnet
SmCo	Samarium Cobalt
SPM	Surface-Mounted Permanent Magnet
SMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
YMS	Yüzey Montajlı Senkron

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Temel IPM motor laminasyon konfigürasyonu [21]	7
Şekil 2.1 Asansör sistemi Kurulum Şeması [31]	15
Şekil 2.2 Geleneksel asansör Mekanizması [32]	16
Şekil 2.3 Dişlisiz asansör sistemi [32]	17
Şekil 2.4 Askı oranı için dişlisiz asansör sistemi görünümü [10].....	18
Şekil 3.1 Aynı akı yoğunluğunu için gerekli mıknatıs boyutları [37]	22
Şekil 3.2 Çeşitli mıknatıslara ait B-H Grafiği [38]	22
Şekil 3.3 YMS motorun genel rotor yapısı	23
Şekil 3.4 YMS motorlara ait fazör diyagramı [41]	24
Şekil 3.5 GMS motorda akı yolları. (a) d- eksen, (b) q- eksen [21]	25
Şekil 3.6 GMS motora ait fazör diyagramı [41]	26
Şekil 4.1 S5 sınıfı çalışma karakteristiği	30
Şekil 4.2 MSM motorun çalışma prensibi şeması [7].....	32
Şekil 4.3 GMS motorlara ait stator ve rotor geometrileri	36
Şekil 4.4 IPM5'e ait stator ve rotor geometrisi.....	37
Şekil 4.5 GMS motorların verim değerleri	40
Şekil 4.6 (a),(b),(c),(d),(e) GMS motorlara ait moment dalgalılığı analizleri	40
Şekil 4.7 GMS motorların akı dağılımları	43
Şekil 4. 8 YMS motora ait stator ve rotor geometrisi	48
Şekil 4. 9 YMS motor ait moment dalgalılığı analizi.....	48
Şekil 4. 10 YMS motora ait akı dağılımı	49
Şekil 4. 11 YMS motor verim grafiği	49

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1 K katsayısı değer aralıkları [41].....	30
Çizelge 4. 2 J, akım yoğunluğu değer aralıkları [41].....	31
Çizelge 4. 3 Belirlenen parametreler.....	31
Çizelge 4. 4 GMS motorların tasarım özeti.....	34
Çizelge 4. 5 GMS motorlara ait özellikler.....	34
Çizelge 4. 6 IPMS'e ait tasarım özeti.....	37
Çizelge 4. 7 GMS motorlara ait maliyet analizi.....	43
Çizelge 4. 8 Analiz sonuçları özeti.....	44
Çizelge 4. 9 Tüm GMS motorların tasarım özeti.....	44
Çizelge 4. 10 YMS motora ait tasarım özellikleri.....	47
Çizelge 4. 11 YMS motora ait maliyet analizi.....	50
Çizelge 4. 12 YMS motor analiz özeti.....	50
Çizelge 4. 13 Karşılaştırma sonuçları.....	51

DİŞLİSİZ ASANSÖR SİSTEMLERİ İÇİN FERRİTE TABANLI GÖMÜLÜ MİKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMI

Hicret YETİŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erkan MEŞE

Elektriğin yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası olduğu 21.yy.ın gündelik hayat seyri içinde sıklıkla kullandığımız elektrik enerjisi ile çalışan araçların her birinin arkasında ihtiyaç duydukları tahrik gücünü sağlayan elektrik makineleri vardır. Enerji kaynaklarının tasarruflu kullanımı çalışmaları bağlamında elektrik makinelerinin minimum enerji ile ihtiyaç duyulan gücü üretilebilecek şekilde tasarlanmaları oldukça önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında enerji verimliliği kapsamında günlük hayatta sıklıkla kullandığımız geleneksel asansör sistemlerine alternatif olarak verimleri oldukça yüksek olan Mıknatıslı Senkron Makineler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri anlatılmıştır. Mıknatıslı Senkron Makineler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri, geleneksel asenkron motor uygulamalarına kıyasla yüksek verim, yüksek moment yoğunluğu, dişli kutusunun ortadan kalkması ile meydana gelen kayıpların azalması ve sistemin hacminin küçülmesi gibi birçok avantaja sahiptir. Dişlisiz asansör sistemleri mıknatıslı motorlar arasında hem Yüzey Montajlı Senkron Motorlar (YMSM) hem de Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorlar (GMSM) ile sürülebilirler. Ancak her iki motor ile sürülen sistemlerin dezavantajları; çıkış momentinin yüksek oranda dalgalılık içermesi ve son yıllarda NdFeB ve SmCo gibi nadir toprak elementi sürekli mıknatısların (rare - earth permanent magnets) hızla artan maliyetleridir.

Bu çalışmada dişlisiz asansör uygulamaları için; diğer mıknatıslara oranla maliyeti oldukça düşük olan Ferrite mıknatis kullanılarak tasarlanan Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorlar (GMSM) önerilmiştir. Ayrıca GMSM'in çıkış moment dalgalılığını minimize

etmek amacıyla farklı oluk / kutup kombinasyonları ve akı-bariyeri sayıları araştırılmıştır.

Belirtilenler ışığında: ilk olarak 630 kg / 8 kişilik taşıma kapasitesine sahip bir dişlisiz asansör sistemi için gerekli parametreler hesaplanmış ve bu parametreler doğrultusunda Ferrite tabanlı GSM'lerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. GSM sürürlü asansör sistemlerinin YSM sürürlü sistemlere kıyasla daha üstün özelliklere sahip olduklarını göstermek amacıyla ile GSM'lerle aynı parametrelere sahip NdFeB tabanlı bir YSM da tasarlanmıştır. Tasarlanan tüm motorlar analiz edilerek; moment dalgalılığı, akı yoğunluğu, verim ve maliyet açısından karşılaştırılmış ve en uygun motor seçilmiştir. Tasarımlar ve analizler MotorSolve BLDC Tasarım ve Analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asansör sistemleri, doğrudan sürürlü uygulamalar, yüzey montajlı senkron motorlar, gömülü mıknatıslı senkron motorlar, ferrite mıknatıs



ABSTRACT

DESIGN OF FERRITE BASED INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR GEARLESS ELEVATOR SYSTEMS

Hicret YETİŞ

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Erkan MEŞE

Electricity; is an important source of energy production for the daily life of 21th century. Vehicles powered by electric energy are designed with electric machines that provide the driving power they need. In today's world where energy resources are consumed rapidly, designs that aim to save energy is a study that many disciplines conduct research. With in this context it is crucial that designing electric machines capable of generating sufficient power with minimum energy.

In this thesis, with in the content of energy efficiency it is proposed gearless elevator systems driven by Permanent Magnet Synchronous Machine which have rather high efficiency, instead of conventional elevator systems with gearbox, which we use frequently in daily life. Gearless elevator systems driven by Permanent Magnet Synchronous Machine have many advantages over traditional induction motor applications, such as high efficiency, high torque density, reduction of losses due to the elimination of gearbox and reduction in the system volume. Gearless elevator systems can be driven by permanent magnet motors which locations of the magnet classify them as Surface- Mounted Synchronous Motors (SPMSM) and Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSM). Regardless of the magnet location, disadvantages are high ripple in the torque and rapidly increasing costs of rare – earth permanent magnets such as NdFeB and SmCo. In this study, Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSM) have been proposed for gearless elevator applications. Ferrite

magnets, which have a relatively low cost compared to the other magnets, have been used in the design of these motors. In addition, different Slot / pole combinations and flux-barrier numbers have been investigated to minimize the torque ripple of the IPMSM.

According to this information; firstly the parameters required for a gearless elevator system with a carrying capacity of 630 kg / 8 persons are calculated. Then, the design of Ferrite based IPMSM was carried out in order to meet the requirements. A NdFeB based SMSM with the same parameters as the IPMSM is also designed to show that the IPMSM elevator systems are superior to the SMSM elevator systems. All designed motors are compared in terms of torque ripple, efficiency and cost with various analyses. And the most suitable motor is selected. Designs and analyses are performed by using the MotorSolve BLDC Design and Analysis Program.

Keywords: Elevator systems, direct drive applications, surface-mounted synchronous motors, interior permanent magnet synchronous motors, ferrite magnets



1.1 Literatür Özeti

Evrenin oluşumundan bu yana insanlar yaşadıkları kozmosun işleyişinin altında yatan düzeni anlamaya çalışmışlardır. Çevrelerinde meydana gelen doğa olaylarını gözlemlemiş ve birbirleri ile olan bağlantıları araştırmışlardır. Üzerinde yaşadığımız evrenin düzenini anlamlandırma çabaları ve gözlemler bugün ki Modern Bilimin temelini oluşturmuştur.

21.yy.ın en önemli bilim adamlarından biri kabul edilen Stephen Hawking Zaman'ın Kısa Tarihi adlı kitabında insanoğlunun bu çabasını; *“Bugün hala, neden burada (dünyada) olduğumuzu ve nereden geldiğimizi öğrenmek zorundayız. İnsanlığın bilgiye olan derin tutkusu süregelen araştırmacılığımızın gerekçesi olmaya yeterli ve bir hedef olarak içerisinde yaşadığımız evrenin tam bir tasvirinden daha azına razı değiliz.”* diyerek özetlemiş ve ardından *“Bilimin nihai hedefi tüm evreni tasvir edecek bir kurama ulaşmaktır.”* diye ekleyerek insanlığın geçmişten günümüze kadar yapmış olduğu bilimsel çalışmalara bir hedef tayin etmiştir [1].

Hawking'in belirttiği insanlığın bilgiye olan derin tutkusu sayesinde sayısız bilimsel çalışma yapılmış ve günümüz bilim insanları artık “Kozmosun işleyişinin altında yatan temel yasalar nelerdir?” gibi sorular yerine “Yapay zekâ sitemlerinin sınırları” konulu soruları tartışır seviyeye gelmiştir. Modern bilimin bu baş döndürücü gelişim süreci içinde en önemli olaylardan biri şüphesiz Elektrik enerjisinin keşfi olmuştur. 21.yy.ın Modern dünyasında elektrik enerjisinin olmadığı bir yaşam düşünülemez.

Bugün eğer elektrik enerjisi dünyanın her yerinde kullanılabiliriyse bunu 18.yy ve 19.yy da; Stephan Grey (1696-1736), Benjamin Franklin (1706-1790), Charles

Augustin de Coulomb (1736-1802), Hans Christian Oersted (1775-1851), Andre Marie Ampere (1775-1836), George Simon Ohm (1789-1854), Michael Faraday (1791-1867), James Clark Maxwell (1831-1879), Heinrich Herz (1857-1894) ve tabii ki Nicola Tesla (1856-1943) gibi değerli bilim insanlarının yapmış olduğu çalışmalara borçluyuz.

Bilimsel alanda böyle gelişmeler yaşanırken bu gelişmelere paralel olarak insanların doğaya olan bakışı zaman içerinde değişikliğe uğramıştır. 18.yy da Batı'da yaşanan Sanayi Devrimi sürecini endstriyelleme döneminin başlangıcı olarak kabul edersek önceki dönemlerde “doğayı yorum gerektiren anlamlar ile dolu bir metin olarak okuma” bakışı bu dönemde yerini “doğayı dönüştürülmesi gereken bir nesne olarak görmeye” bırakmıştır. Bu paradigma değişimi Modern insanın sürekli artan enerji ihtiyaını karşılamak için doğayı, doğal kaynakları kendi ihtiyaçları doğrultusunda araçsallaştırarak istediği gibi kullanıp, tüketebileceği bir nesne konumuna indirgemiştir.

Bu indirgemeci anlayış kaçınılmaz olarak bizleri var olan doğal enerji kaynaklarının hızla yok olması ve ilerleyen yıllarda dünyanın sürekli artan enerji ihtiyaının karşılanamaması gibi trajik bir durum ile yüz yüze bırakmıştır. Bu sebeple “Enerji Verimliği” ve “Yenilenebilir Enerji Kaynakları” kavramları 21.yy.ın çokça önem verilen konuları asında yer alır. Bu bağlamda elektrik enerjisinin üretiminden evlerimizde kullanabileceğimiz düzeye getirilmesinde ve bu enerjinin başka formlara dönüşümünde en etkin rolü alan elektrik makineleri, elektrik enerjisinin verimli şekilde kullanılması çalışmaları kapsamında kritik bir önem teşkil eder. Bu sebeple enerji verimliliği açısından elektrik makinelerinin minimum enerji ile ihtiyaç duyulan gücü üretilebilecek şekilde tasarlanmaları oldukça önemlidir.

18.yy da yaşanan sanayi devrimi ile birlikte başlayan paradigma değişimi, kendini sadece artan enerji talebi ve buna paralel olarak yapılan bilimsel çalışmalarda değil toplumun her alanında etkilerini göstermeye başlamış, toplumların sahip oldukları kültürel değerlerinde ve yaşayış tarzlarında köklü değişmelere yol açmıştır.

Bir toplum sahip olduğu kültürün yansımalarını en açık şehirleme anlayışında ve buna bağlı olarak mimarisinde gösterir. Geçmiş dönemde doğa ile i içe, tek katlı yapılarda yaşamayı tercih eden toplumların yatay olarak gelişen bir şehirleme anlayışları vardı. Endstriyelleme süreci sonrası değişen anlayışla birlikte başlayan doğal yaşamdan kopuş beraberinde çok katlı, dikey olarak gelişen yeni bir şehirleme tarzını getirdi. Ve

tabii ki nihai olarak mimarı alanda yaşanan bu değişim ‘Asansörleri’ modern yaşamın vazgeçilmez öğesi kıldı.

1923 yılında H. Marryat “ *Electric Passenger Lifts*” adlı makalesinde sanayileşme süreci ile kentlerin nüfuslarını hızla arttığını ve artan nüfusun kent ve ticari merkezlerde toplanma eğilimi gösterdiğini bu sebeple eski ve küçük binaların yerini yeni ve daha büyük binaların aldığını belirtmiş ve büyük binaların beraberinde elektrikli asansör sistemlerini gerekli kıldığını altını çizmiştir. Bir elektrikli asansör sisteminin temel olarak;

- ✓ Gerekli yükü taşımak için uygun bir şekilde tasarlanmış bir araba veya platform (Asansör Kabini),
- ✓ Bina yapısına sıkıca tutturulmuş genellikle ahşap veya çelik kılavuzlar (Raylar),
- ✓ Kılavuzları birbirine tutturmak için arabaya veya platforma tutturulmuş pabuçlar,
- ✓ Karşıt ağırlık,
- ✓ Arabanın veya platformun ve karşıt ağırlığın askıya alınmış olduğu ve sürüş motorundan hareketi ilettiği bir halat veya zincir (Çekiş Halatları),
- ✓ Halat veya zincirin takıldığı bir tahrik kasnağı veya tamburu
- ✓ Elektrik motorundan tahrik kasnağına veya tamburuna güç aktarımı yapan dişliler (Sonsuz Vidalı Redüktör),
- ✓ Elektrik motoru (Asenkron Motor veya Mıknatıslı Senkron Motor),
- ✓ Genellikle motor ve sonsuz dişli arasındaki kuplajla yapılan ve bir tambur üzerinden çalışan elektromanyetik fren,
- ✓ Aracın içinde veya bir veya daha fazla iniş için uygun koşullarla motoru çalıştırmak ve durdurmak üzere tasarlanmış kontrol cihazları (Asansör kontrol kartı, hız kontrol cihazı, asansör kumanda panosu, acil kurtarma kartı gibi)
- ✓ Koşullara göre basit veya karmaşık olabilen ve asansör veya arzın herhangi bir bölümünün arızalanmasından veya araç yokken bir iniş kapısının açılmasından dolayı kazanın imkânsız hale getirilmesi amaçlanan emniyet tertibatı (Aşırı yük kontakları, tamponlar, hız regülatörü ve mekanik fren, elektromanyetik fren kolu) gibi birimlerinden oluştuğunu belirtmiştir [2].

Elektrik enerjisini verimli şekilde kullanabilme çalışmaları ile 1923 yılından günümüze asansör sistemlerinde teknik olarak birçok iyileştirici çalışmalar yapılmıştır. Özellikle kontrol sistemlerinde yarı iletken güç elektroniği elemanlarının kullanılmaya başlanması ve enerji verimliliği sınıfı yüksek elektrik motorlarının üretilmesi sayesinde gittikçe artan verimlilikleri ile asansörler büyük ve kalabalık şehirlerde modern yaşamın vazgeçilmez parçası haline gelmişlerdir [3-5].

Thomas M. Jahns 2007 yılında yaptığı “*The Expanding Role of PM Machines in Direct-Drive Applications*” adlı çalışmasında Sürekli mıknatıslı senkron makinelerin (SMSM), makine ve yük arasındaki dişli kutuları veya diğer mekanik aktarma bileşenlerini ortadan kaldıran doğrudan sürürlü dişlisiz asansör uygulamaları için oldukça tercih edildiklerinin altını çizmiştir. Doğrudan sürürlü uygulamaları ile asansör sistemlerinde son 15 yılda oldukça büyük bir gelişme kaydedildiğini o zamana kadar asansör sistemlerinin standart olarak; asansör şaftının üst kısmında ayrı bir odada bulunan bir asenkron motor, dişli kutusu, kasnak ve kablo kanalından oluştuğunu fakat 1990 yıllarının ortalarında asansör üreticilerinin ayrı bir makine dairesi ihtiyacını ortadan kaldıran SMSM’li sistemleri tanıtarak asansör sistemlerinde sessiz bir devrim yarattıklarını belirtmiştir [6].

Makine dairesi ve dişli kutusu ihtiyacını ortadan kaldırılması, iyi sürüş konforu, yüksek verimlilik, zayıflatılmış mekanik gürültü ve doğrudan sürüş imkânı ile SMSM’ ler düşük hızlarda mükemmel performans göstermesi, asenkron motorlara kıyasla daha az hacimli ve ağırlığa sahip olmaları, mükemmel kontrol sağlamaları, uzun ömürlülük ve daha çevreci olmaları gibi üstün özelliklerinden dolayı asansör sistemleri için oldukça talep gören motorlar arasında yerini almışlardır [7-9].

2017 yılında H. Bakhtiarzadeh, A. Polat ve L. T. Ergenin yapmış oldukları “*Design and Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator Applications*” başlıklı çalışmalarında hızla artan insan nüfusunun yaşam alanı olarak gökdelen tarzı yüksek binaları zorunlu kıldığını ve buna paralel olarak asansörlerin temel bir gereksinim olduğunu belirtmişleridir. Eski geleneksel dişli kutusu gerektiren asansör sistemlerinin enerji verimliliği açısında oldukça kötü sistemler olduklarının altını çizmiş ve bu sistemlere karşı SMSM’ ler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemlerini önermişlerdir [10].

H. Yetiş, H. Boztepeli, Y. Yaşa ve E. Meşe'nin 2013 yılında "Comparative Design of Direct Drive PM Synchronous Motors in Gearless Elevator Systems" başlığı ile yapmış oldukları çalışmalarında dişlisiz asansör uygulamalarında kullanılan SMSM'lerin geleneksel dişli kutulu asenkron motor ile gerçekleştirilen sistemlere karşı avantajlarını;

- ✓ Dişli kutusunun ortadan kalkması ile meydana gelen kayıpların azalması ve sistemin hacminin küçülmesi,
- ✓ Dişli kutusuna ihtiyaç duyulmadığından motorun miline direk olarak bağlanabilen hassas kodlayıcıya ve hassas kontrol sağlayan kapalı devre sürücü sistemi sayesinde asansörlerin kalkış, duruş ve hareket etme sırasında yüksek performans göstermesi,
- ✓ Asenkron motorlara kıyasla çok daha etkin gerçekleştirilen moment ve hız denetimi sayesinde, programlanan hız zaman eğrisi tüm yük koşullarında büyük bir doğrulukla izlenmesi ve kat hizalamasında kusursuz bir hassasiyet ve konfor sağlanması,

Son olarak SMSM kullanımı sayesinde rotor bakır kayıplarının ortadan kalkması ve buna bağlı olarak verimin yükselmesi ve SMSM'lerin yüksek kalkış momentine ve sessiz çalışma gibi iyi özelliklere sahip olmaları olarak sıralamışlardır [11].

Temel olarak bir mıknatıslı senkron motorda diğer senkron motorlardan farklı olarak rotorunda uyarma sargıları yerine sürekli mıknatıslar bulunur. Motorun moment üretebilmesi için gereken akı mıknatıslardan sağlanır. Uyarma sargılarına olan ihtiyacın ortadan kalkması ile rotorda meydana gelen bakır kayıplarının önüne geçilmiş ve rotora akım taşıyacak fırça ve kolektör düzeneklerine ihtiyaç duyulmadığından bu düzeneklerden kaynaklanan işletme ve bakım giderleri elimine edilmiştir. Bu özellikleri sayesinde diğer motorlara kıyasla daha küçük hacimli yüksek verimli motorlar olarak piyasa oldukça ilgi görmektedirler. Ayrıca asansör sistemlerinde rotorun direk olarak mile bağlanabilmesi sayesinde dişli kutusuna olan ihtiyacın ortadan kalkması bu motorlara olan ilgiyi daha da arttırmaktadır [12-13].

2016 yılında YinYe Yang ve arkadaşları "*Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications*" başlıklı çalışmalarında Mıknatıslı Senkron Motorların; yüzey montajlı senkron motorlar (YMSM) ve gömülü mıknatıslı senkron motorlar (GMSM) olarak sınıflandırıldığını belirtmişlerdir. YMS

motorlarda mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirilmelerinin üretim açısından kolaylık sağladığını buna karşın yüksek hızlı uygulamalarda bu durumun dezavantaja dönüştüğüne dikkat çekmişlerdir. GMS motorlarda ise mıknatısların rotor yüzeyine değil içerisine yerleştirilmesinin motoru mekanik olarak daha dayanıklı kıldığını bu sayede yüksek hızlı uygulamalarda çokça tercih edildiklerinden bahsetmişlerdir [14].

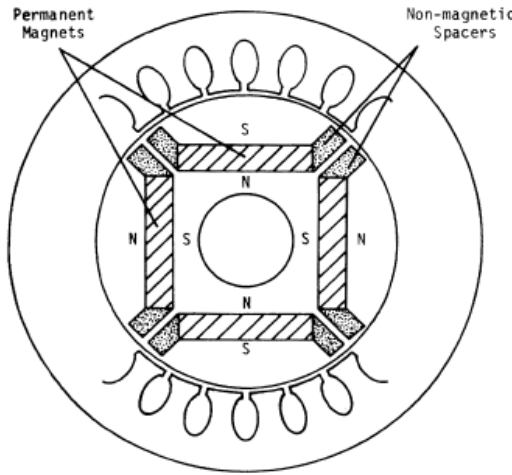
1985 yılında M.A. Rahman ve G.R. Slemon “*Promising Applications of Neodimiyum-Boron- Iron Magnets in Electrical Machine*” adlı çalışmalarında mıknatıslı motorların gelişiminin son yirmi yılda sürekli-mıknatıs materyallerin teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir [15].

Sürekli mıknatısların tarihsel gelişimine bakıldığında 1930’de Alnico (Aluminum Nicel Cobalt)’ ın keşfinden önce manyetik enerji yoğunlukları oldukça zayıf olan materyaller kullanılmak zorunda kalmıştır. 1960’lı yıllarda Ferrite mıknatısların kullanılmaya başlaması ile daha verimli PMSM’ ler üretilmeye başlanmıştır. 1970’lerde Samarium Cobalt (SmCo) mıknatıslar keşfedilmiş, 1980’de ise manyetik enerji yoğunlukları diğer mıknatıslara oranla oldukça yüksek olan Neodimium Boron Iron (NdFeB) mıknatısların kullanımı ile yüksek verimli SMSM’ ler üretilerek motor endüstrisinde olarak büyük gelişme kaydedilmiştir [16].

NdFeB ve SmCo gibi nadir toprak elementi manyetik enerji yoğunluğu yüksek olan sürekli mıknatıslar sayesinde diğer motorlara göre yüksek performans gösteren SMSM’ler yaygınlığı hızla yükselişe geçerek piyasada oldukça rağbet gören motorlar arasında yerini almışlardır [17-19].

Massimo Barcaro ve Nicola Bianchi’nin 2014 yılında “*Interior PM Machines Using Ferrite to Replace Rare-Earth Surface PM Machines*” adlı çalışmalarında mıknatıslı motorların yüksek verim, yüksek moment yoğunluğu gibi özelliklerinden dolayı endüstride çeşitli uygulamalar da kullanıldıklarını fakat son yıllarda manyetik enerji yoğunlukları yüksek nadir-toprak elementi sürekli mıknatısların (NdFeB ve SmCo gibi) fiyatlarının gittikçe arttığını bu sebeple motor üreticilerinin fiyat olarak daha ucuz olan Ferrite mıknatıs gibi materyallere yöneldiğine dikkat çekmişleridir. Fakat Ferrite mıknatısın manyetik enerji yoğunluğu NdFeB’e göre oldukça düşük olduğundan üretilen moment miktarının önemli ölçüde düşmesine neden olacağını bu sebeple moment üretiminin doğrudan enerji yoğunluğu yüksek mıknatıs kullanımına bağlı olan YMS motor için Ferrite kullanımının uygun olmadığını belirtmişlerdir. Bu nedenle

ekonomik olarak uygun bir mıknatıslı motor üretimi için; Ferrite tabanlı GMS motorları önermişlerdir. Enerji yoğunluğu düşük mıknatıs kullanılsa bile rotorunun geometrisinden dolayı üretilen relüktans moment bileşenini arttırmak için anizotropik yapıların kullanılmasıyla Ferrite kullanımından dolayı azalan momentin relüktans moment bileşeni sayesinde telafi edilebilir düzeye getirilebileceğini ifade etmişlerdir. Ancak yinede istenilen moment yoğunluğuna ulaşabilmek için motorun aktif uzunluğunu arttırmak gerektiğinin de altını çizmişlerdir. Hızla artan mıknatıs fiyatlarına çözüm olarak; aynı güç, moment ve çapa sahip fakat maliyeti yüksek olan NdFeB tabanlı YMS motorlar yerine aktif uzunluğu daha fazla olmasına rağmen daha düşük maliyetli olan Ferrite tabanlı GMS motorları önermişlerdir [20].



Şekil 1. 1 Temel IPM motor laminasyon konfigürasyonu [21]

karakteristikleri üzerinde; yüksek hızlara çıkıldığında mıknatısların rotor içinde gömülü olması sebebiyle mekanik olarak sağlam bir yapıya kavuşması ve relüktans moment üretimine sebebiyet vermesi gibi önemli etkiler yarattığını vurgulamışlardır. Ayrıca diğer motor türlerine kıyasla değişken hız ve güç aralıklarında yüksek moment yoğunluğu ile çalışabilme avantajı sağladıklarını ve relüktans moment bileşenin çıkış momentini artırıcı önde katkı sağladığından dolayı manyetik enerji yoğunluğu düşük daha az maliyetli sürekli mıknatısların kullanımına imkan verdiklerini belirtmişlerdir [21].

H. Gürleyen, P. C. Palavicino, E. Meşe ve B. Sarlıoğlu 2017 yılında “ *D- and Q-axis Inductance Calculation of IPMSM Using Approximate Analytical Model*” isimli çalışmalarında GMS motorların yüksek verim, yüksek güç yoğunluğu ve geniş bir hız

1986 yılında Thomas M. Jahns, Gerald B. Kliman ve Thomas W. Neumann’ın “*Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives*” başlıklı çalışmalarında GMS motorun tanımını basitçe; sürekli mıknatısların rotor çekirdeğinin yüzeyine değil Şekil 1.1’de ki gibi içine yerleştirilmiş olan sürekli mıknatıslı motorlar olarak yapmışlardır. Sürekli Mıknatısların bu şekilde diziliminin motorun çalışma

aralığında çalışabilme gibi özelliklerinden dolayı hibrit ve elektrikli araç uygulamalarında popüler olarak kullanıldıklarını belirtmişlerdir. Mıknatısların rotor içine gömülü olması nedeniyle GMS motorların çıkış momentinin; relüktans moment bileşeni ve mıknatıs moment bileşeni olarak iki ayrı moment bileşeninden oluştuğunu vurgulamışlardır. Rotor içine gömülü mıknatıslar sebebiyle q-ekseni endüktansının d-ekseni endüktansından daha büyük değerde olduğundan ve makine performansını en doğru şekilde tahmin etmek için q ve d endüktans değerlerinin sağlıklı bir şekilde hesaplanması gerektiğine dikkat çekmişlerdir [22].

2015 yılında Nicola Bianchi ve arkadaşları yapmış oldukları “*Sensitivity Analysis of Torque Ripple Reduction of Synchronous Reluctance and Interior PM Motors*” başlıklı çalışmalarında GMS ve senkron relüktans motorların ortak dezavantajlarının yüksek moment dalgalılığı olduğunu ve her iki motor içinde rotor geometrisinin hem çıkış moment değeri hem de moment dalgalılığı üzerinde yüksek bir etkisinin bulunduğunu belirtmişlerdir. Yüksek ve pürüzsüz bir moment elde etmek amacıyla optimal rotor geometrisini belirlemek için hassas bir optimizasyon sürecinin gerekli olduğunun altını çizmişlerdir [23].

L. Alberti, M. Barcaro ve N. Bianchi 2012 yılında “*Design of a Low Torque Ripple Fractional-slot Interior Permanent Magnet Motor*” adıyla yapmış oldukları çalışmalarında GMS motorların kompleks makine geometrilerine karşın alan zayıflatma uygulamalarında yüksek momente değerlerine çıkabilmeleri, yüksek hata-toleransına sahip olmaları ve düşük maliyetli mıknatıs kullanıma imkan sağlamaları sebebiyle oldukça tercih edildiklerini vurgulamışlardır. GMS motorların sahip olduğu avantajlı özellikleri kesir oluklu sargı yapılarının sağladığı üstün performans ile birleştirmeyi amaçlayarak 12 oluklu / 10 kutuplu, kesir oluklu bir GMS motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. GMS motorlarda kesir olukla sargı yapısının kullanılması ile bakır kayıplarının önemli ölçüde azalacağını belirtmişlerdir. Buna karşın GMS motorun anizotropik rotor geometrisi ve statorun kesir oluklu sargı yapısı motorun ürettiği momentte yüksek oranda dalgalılığa sebep olduğunu açıklamışlardır. Bu soruna çözüm olarak çok katmanlı sargı yapısı ve simetrik olmayan rotor geometrisi kullanımı ile optimizasyon sürecinin ardından tasarlanan motorun moment dalgalılık oranını %1,5 değerinin altına indirmişlerdir [24].

Seok-Hee Han, Thomas M. Jahns, Wen L. Soong 2007 yılında yaptıkları “*Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using the Principle of Mutual Harmonics Exclusion*” başlıklı çalışmalarında üstün özelliklerinin yanında GMS motorların en büyük problemini çıkış momentinin yüksek oranda dalgalılığa sahip olması olarak açıklayarak, moment dalgalılığını azaltmak için; düşük sayılı stator oluk sayısı ve simetrik rotor yapısını önermişlerdir [25].

2010 yılında yine Thomas M. Jahns ve takım arkadaşları “*Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Stators With Odd Number of Slots Per Pole Pair*” adıyla yaptıkları çalışmada kutup çifti başına düşen oluk sayısının tek olduğu çok katmanlı akı-bariyerine sahip IPM motor tasarımlarının çıkış momentinin daha az oranda dalgalılık içerdiğini yaptıkları karşılaştırmalı tasarımlar ile göstermişlerdir [26].

Massimo Barcaro ve Nicola Bianchi'nin 2012 yılında “*Torque Ripple Reduction in Fractional-Slot Interior PM Machines Optimizing the Flux-Barrier Geometries*” başlığı ile yaptıkları çalışmada GMS motor tasarımında akı-bariyeri sayısının rotorun anizotropikliğini etkilediğini böylece relüktans momentte değişime sebebiyet vererek çıkış momentini artıcı yönde etki yaptığının altını çizmişlerdir. Bu sebeple akı-bariyeri sayısını mümkün olduğunca arttırılmasını önermişlerdir. Ayrıca akı-bariyeri açısının moment dalgalılığını doğrudan etkilediğini bu nedenle rotor geometrisi dikkatli bir şekilde tasarlanırsa moment dalgalılığını minimum seviyeye getirerek yüksek moment yoğunluğuna sahip GMS motorlar üretilebileceğini vurgulamışlardır [27].

2015 yılında Mohammad Sedigh Toulabi ve arkadaşları “*Design and Performance Assessment for the V Shaped Magnet IPM Synchronous Motor*” başlığı ile yapmış oldukları çalışmalarında geniş hız aralığında sahip uygulamalarda GMS motorların tasarımını etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Hava aralığı içerisindeki akı yoğunluğunun GMS motorların ürettiği moment üzerinde önemli bir rol oynadığını belirterek hava aralığı içerisindeki akı yoğunluğu değerinin; rotor içerisine yerleştirilen mıknatısların şekli, yönü ve hacmi ile hava aralığı uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Belirtilen değerli optimize ederek 12 oluklu / 8 kutuplu V- biçimli bir GMS motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir [28].

Zhento S. Du ve Thomas A. Lipo 2017 yılında “*Efficient Utilization of Rare Earth Permanent-Magnet Materials and Torque Ripple Reduction in Interior Permanent-*

Magnet Machines” başlığı ile yapmış oldukları çalışmalarında nadir toprak elementli mıknatıs kullanımının GMS motorların üretim maliyetlerini önemli ölçüde arttırması nedeniyle büyük bir dezavantaj yarattığına dikkat çekmişlerdir. Dünyadaki nadir toprak materyalinin yetersizliğinden dolayı bu materyalleri içeren mıknatısların maliyetlerinin hala büyük bir endişe kaynağı yaratmaya devam ettiğini vurgulamışlardır. Mıknatıs maliyetlerini düşürmek için tasarımcıların daha ucuz mıknatısların kullanılabildiği GMS motorlara yöneldiklerini fakat GMS motorların çıkış momentlerinin yüksek oranda dalgalılık içerdiğinin altını çizmişleridir. Moment dalgalılığını azaltmak için kutup çifti başına düşen oluk sayısının tek olduğu stator yapılarının tercih edilmesi, stator laminasyonlarının belirli bir açı ile burulması işlemi ve farklı yapılarda akı bariyeri geometrilerinin kullanılması gibi yöntemlerin uygulandığını belirtmişlerdir [29].

Enrico Carraro ve takım arkadaşları “*PM Synchronous Machine Comparison for Light Electric Vehicles*” başlığı ile 2014 yılında yapmış oldukları çalışmalarında mıknatıslı senkron motorların sahip oldukları üstün özelliklere karşın son yıllarda enerji yoğunluğu yüksek mıknatısların hızla artan fiyatlarının tasarımcıları daha ucuz mıknatıs arayışlarına girmelerine sebep olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip mıknatısların fiyat artışı sorununa çözüm bulma amacı ile aynı stator ve rotor geometrisi sahip kutup sayıları aynı olan NdFeB tabanlı GMS motor, ferrite tabanlı GMS motor, senkron relüktans motor ve YMS motor olmak üzere 4 farklı motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. En uygun sonuçları sağlayan tasarımın Ferrite tabanlı GMS motor olduğu göstermişlerdir [30].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında elektrik enerjisinin verimli kullanımı çalışmaları kapsamında verimliliği oldukça düşük geleneksel dişli kutulu asansör sistemlerine alternatif olarak dişli sistemine ihtiyaç olmadan doğrudan SMSM’ler tarafından sürülen asansör sistemleri anlatılmıştır. SMSM’ ler, asansör sistemleri gibi düşük hızlı uygulamalarda asenkron motorlara kıyasla daha iyi kontrol imkânı sağladıklarından oldukça iyi performans gösterirler ayrıca rotorda meydana gelen bakır kayıpları ve dişli kutusun sebep olduğu kayıplar elimine edildiğinden enerji verimliliği açısından oldukça iyi motorlardır. Bu avantajlarının yanı sıra son yıllarda hızla yükselen nadir-toprak elementli mıknatıs fiyatları ile SMSM’ lerin çıkış momentinin yüksek oranda dalgalılık

içermesi konuları SMSM tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri için çözüm aranan problemlerin başında gelir.

1.3 Hipotez

Enerji yoğunlukları yüksek nadir-toprak elementi sürekli mıknatısların (NdFeB ve SmCo gibi) fiyatlarının gittikçe yükselmesi nedeniyle motor üreticileri enerji yoğunluğu diğer mıknatıslara göre zayıf olmasına rağmen fiyat olarak daha ucuz olması sebebiyle Ferrite mıknatıs kullanımına yönelmişleridir.

YMS motorların çıkış moment değeri doğrudan kullanılan mıknatısın manyetik enerji yoğunluğuna bağlıdır. YMS motorlar, Ferrite gibi enerji yoğunluğu zayıf mıknatıslar kullanıldığında bir asansör sistemini sürmek için gerekli seviyedeki momenti üretmezler. GMS motorlar ise YMS motorlarda üretilen momente ek olarak mıknatısların rotorun iç yüzeyine yerleştirilmesinden dolayı çıkış momentini artırıcı relüktans moment bileşenine sahiptir. Relüktans moment bileşeni sayesinde GMS motorların çıkış momenti, Ferrite gibi enerji yoğunluğu düşük mıknatıslar kullanılsa bile çeşitli optimizasyonlar ile asansör sistemleri sürmek için yeterli düzeye ulaştırılabilir.

Literatür özetinde ve yukarıda bahsedilen bilgiler doğrultusunda bu tez çalışması kapsamında dişlisiz asansör uygulamaları için; diğer mıknatıslara oranla maliyeti oldukça düşük olan Ferrite mıknatıs kullanılarak tasarlanan gömülü mıknatıslı senkron motorlar (GMSM) önerilmiştir. Ayrıca GMSM' in çıkış moment dalgalılığını minimize etmek amacıyla farklı oluk / kutup kombinasyonları ve akı-bariyeri sayıları araştırılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak 630 kg/ 8 kişilik taşıma kapasitesine bir asansör sistemi için gerekli hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar doğrultusunda GMS motorun moment dalgalılığını minimize etmek amacıyla farklı oluk/kutup kombinasyonları ve akı-bariyeri katmanı sayılarına sahip Ferrite tabanlı motorlar tasarlanmıştır. Tasarlanan motorlar analiz edilerek moment dalgalılığı açısından en iyi sonucu veren iki tasarım seçilmiştir. Daha sonra GMSM sürürlü asansör sistemlerinin YMSM sürürlü sistemlere rakip olabileceklerini göstermek amacı ile GMSM' lerle aynı parametrelere sahip NdFeB tabanlı bir YMSM tasarlanmıştır. Tasarlanan YMS motor moment dalgalılığı, akı yoğunluğu, verim ve maliyet açısından analiz edilerek seçilen Ferrite tabanlı GMS

motorlar ile karşılaştırılmıştır. Tüm motor tasarımları ve analizler MotorSolve BLDC Tasarım ve Analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda SMSM' ler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri için en ekonomik çözümün Ferrite tabanlı GSM motorlar olduğu gösterilmiştir.



BÖLÜM 2

ASANSÖR SİSTEMLERİ

Modern anlamda, asansör insanları veya malzemeyi dikey olarak kaldırmak üzere tasarlanmış bir nakliye aracı olarak tanımlanır. Asansör sistemleri, 1853 yılında Elisha Graves Otis tarafından kaldırma platformunun serbest düşmesini önlemek için tasarlanan emniyet cihazının icadı ile asansörlerde güvenliğin geliştirilmesine rağmen 1857 yılına kadar yolcu taşıma amacı ile kullanılmadılar. İlk yolcu asansörü 1857 yılında E. V. Haughwout & Company' nin New York mağazasında kuruldu [31].

Asansörler yolcu taşıma amacı ile ilk kullanıldığı tarihten bugüne hızla artan nüfusları ile büyük ve kalabalık şehirlerde modern yaşamın vazgeçilmez parçası haline gelmişlerdir.

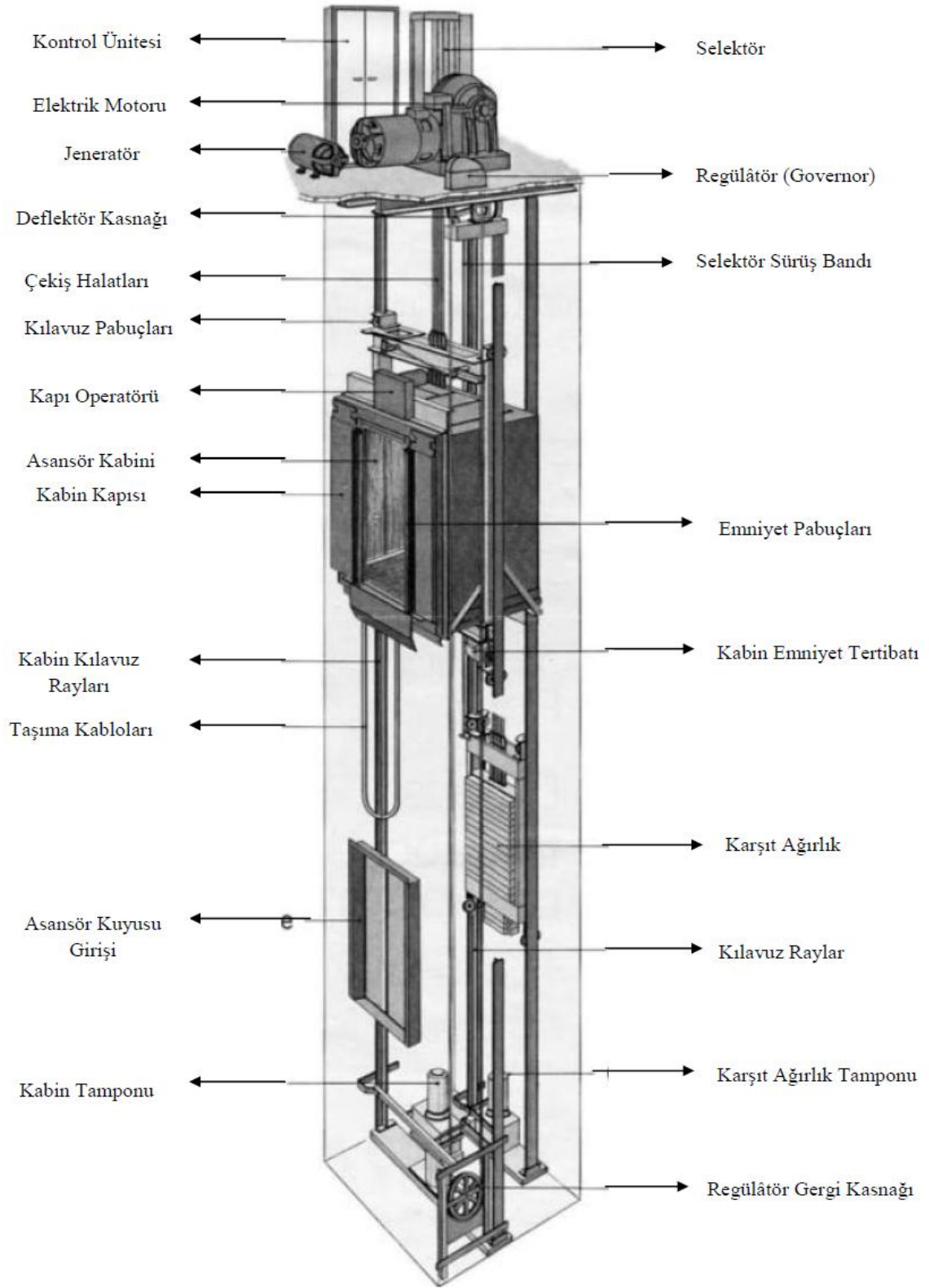
H. Marryat' ın “ *Electric Passenger Lifts*” adlı makalesinde temel olarak bir asansör sisteminin aşağıdaki birimlerden oluştuğunu belirtmiştir.

- ✓ Gerekli yükü taşımak için uygun bir şekilde tasarlanmış bir araba veya platform (Asansör Kabini),
- ✓ Bina yapısına sıkıca tutturulmuş genellikle ahşap veya çelik kılavuzlar (Raylar),
- ✓ Kılavuzları birbirine tutturmak için arabaya veya platforma tutturulmuş pabuçlar,
- ✓ Karşit ağırlık,
- ✓ Arabanın veya platformun ve karşit ağırlığın askıya alınmış olduğu ve sürüş motorundan hareketi ilettiği bir halat veya zincir (Çekiş Halatları),
- ✓ Halat veya zincirin takıldığı bir tahrik kasnağı veya tamburu

- ✓ Elektrik motorundan tahrik kasnağına veya tamburuna güç aktarımı yapan dişliler (Sonsuz Vidalı Redüktör),
- ✓ Elektrik motoru (Asenkron Motor veya Mıknatıslı Senkron Motor),
- ✓ Genellikle motor ve sonsuz dişli arasındaki kuplajla yapılan ve bir tambur üzerinden çalışan elektromanyetik fren,
- ✓ Aracın içinde veya bir veya daha fazla iniş için uygun koşullarla motoru çalıştırmak ve durdurmak üzere tasarlanmış kontrol cihazları (Asansör kontrol kartı, hız kontrol cihazı, asansör kumanda panosu, acil kurtarma kartı gibi)
- ✓ Koşullara göre basit veya karmaşık olabilen ve asansör veya arızın herhangi bir bölümünün arızalanmasından veya araç yokken bir iniş kapısının açılmasından dolayı kazanın imkânsız hale getirilmesi amaçlanan emniyet tertibatı (Aşırı yük kontakları, tamponlar, hız regülatörü ve mekanik fren, elektromanyetik fren kolu) gibi birimlerinden oluştuğunu belirtmiştir [2].

Bir asansör sistemini meydana getiren birimler Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

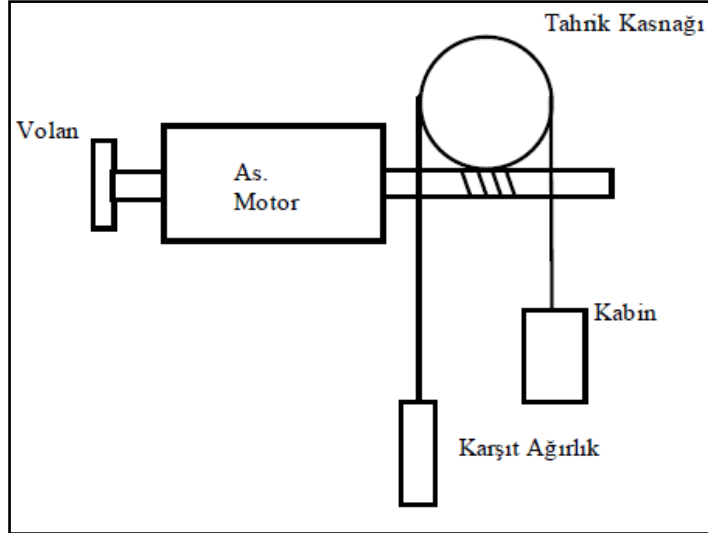
Asansör sistemleri H. Marryat’ın sıraladığı diğer birimler ortak olmak üzere elektrik motorundan tahrik kasnağına veya tamburuna güç aktarımı yapan dişlilerin kullanıldığı ve kullanılmadığı sistemler olarak ikiye ayrılır. Güç aktarımı yapan dişlilerin kullanıldığı sistemler; “Dişli Kutulu Asansör Sistemleri” olarak bilinir ve bu sistemlerde elektrik motoru olarak asenkron motorlar kullanılır. Elektrik motoru olarak Mıknatıslı Senkron Makinelerin kullanıldığı ve böylece dişli kutusu ihtiyacının ortadan kalktığı doğrudan sürürlü sistemler ise “Dişlisiz Asansör Sistemleri” olarak bilinir.



Şekil 2. 1 Asansör sistemi kurulum şeması [31]

2.1 Dişli Kutulu Asansör Sistemleri

Dişli kutulu asansör sistemleri bir elektrik motoru ve bir redüktörden oluşan geleneksel asansör sistemleri olarak ifade edilirler. Elektrik motoru olarak asenkron motorun



Şekil 2. 2 Geleneksel asansör mekanizması [32]

açısından kötü sistemler olarak kabul edilirler. Ayrıca dişli kutusu kullanımı sebebiyle kasnak tarafından vida tarafına güç ve enerji aktarımı mümkün olmaz yani elektrik motorlarının faydalı fren özelliğinden yararlanılamaz [32-33].

630 kg / 8 kişi taşıma kapasitesine sahip bir geleneksel dişli kutulu asansör sistemlerinin verimini Duru ve Demiröz tarafından [32] de verilen eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{motor} = [((Myük \times g) \times v) / (2 \times \eta)] \quad (2.1)$$

Burada;

P_{motor} : Asenkron Motorun Gücü (kW)

$M_{yük}$: Asansör sisteminin taşıma kapasitesi (kg), 630 (Karşı ağırlığın kabin ağırlığının tamamını ve yükün yarısını dengelediği kabul edilmiştir.)

g : Yer çekimi kuvveti (m/s^2), 9.88

v : Kabin hızı (m/s), 1

η : Sonsuz vidalı dişli sisteminin verimi, %60 kabul edilmiştir.

$$P_{motor} = [((630 \times 9.88) \times 1) / (2 \times 0.60)], P_{motor} = 5.187 \text{ (kW) olarak bulunur.}$$

Asenkron motorun verimini %80 olarak kabul edilirse giriş gücü;

$$(\eta_{motor}) = P(\text{çıkış, motor})/P_{giriş} \quad (2.2)$$

$(0.80) = (5187)/P_{giriş}$, $P_{giriş} = 6.484$ (kW) olarak bulunur.

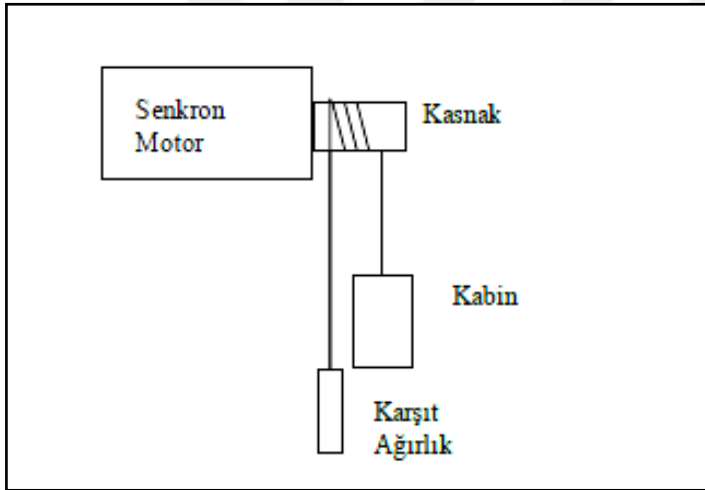
Sitemin elektrik enerjisinden mekanik enerjiye veriminin,

$$\eta(\text{elk} - \text{mek}) = [(Myük \times g \times v) / 2 \times P_{giriş}] \quad (2.3)$$

$\eta(\text{elk} - \text{mek}) = [(630 \times 9.88 \times 1) / 2 \times 6484]$, $\eta(\text{elk} - \text{mek}) = 0.48$ gibi oldukça düşük bir değerde olduğu görülür.

Yapılan hesaplamalar ile elektrik motoru olarak % 80 verimliliğe sahip bir asenkron motorun kullanılmasına rağmen dişli kutusu sisteminin neden olduğu kayıplar sebebiyle asansör sistemi verimin % 48'e kadar düştüğü görülmüştür.

2.2 Dişlisiz Asansör Sistemleri



Şekil 2. 3 Dişlisiz asansör sistemi [32]

Dişlisiz asansör sistemleri, elektrik motoru olarak Mıknatıslı Senkron Makinelerin kullanılarak dişli sistemine ihtiyaç olmadan Şekil 2.3'de ki gibi rotor milinin doğrudan tahrik kasnağına akuple edildiği sistemler olarak tanımlanır.

Dişlisiz asansör sistemlerinde kullanılan Mıknatıslı senkron

makinelere, makine ve yük arasındaki dişli kutuları veya diğer mekanik aktarma bileşenlerini elimine etmelerinin yanında, iyi sürüş konforu, yüksek verimlilik, zayıflatılmış mekanik gürültü ve doğrudan sürüş imkânı, düşük hızlarda mükemmel performans göstermesi, asenkron motorlara kıyasla daha az hacimli ve ağırlığa sahip olmaları, mükemmel kontrol sağlamaları, uzun ömürlülük ve daha çevreci olmaları gibi üstün özelliklerinden dolayı asansör sistemlerinde kullanılmaya başlanmaları ile bu alanda sessiz bir devrim yaratmışlardır [6-8].

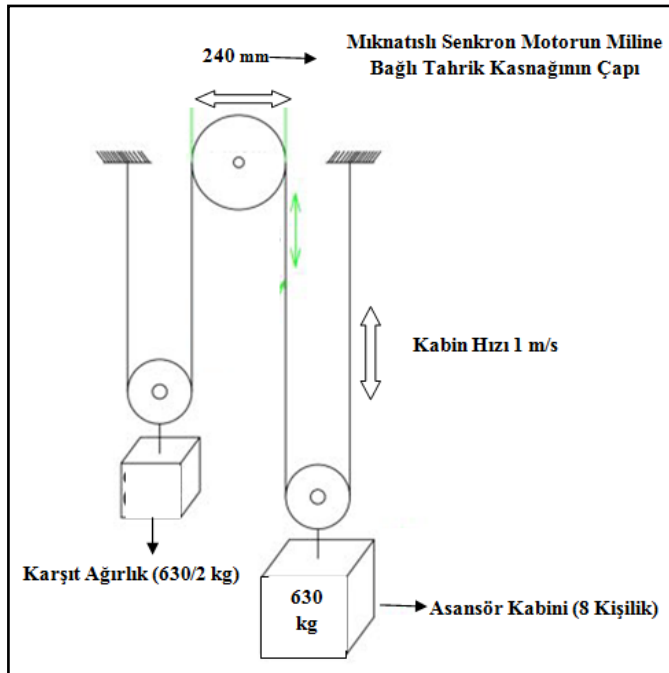
Mıknatıslı senkron motorlar, geleneksel asansör sistemlerinde kullanılan asenkron motorlara kıyasla rotorda meydana gelen bakır kayıpları ve dişli kutusu ile tahrik kasnağı arasında ki moment dönüşümünün sebep olduğu kayıpları elimine ettiklerinden dolayı enerji verimliliği açısından oldukça iyi bir seçenektir. Ayrıca uygun kontrol elemanları kullanıldığında karşıt ağırlığın seyir yönünde etki etmesi durumunda oluşan frenleme enerjisinin şebekeye geri verilmesine imkân sağlayarak enerji tüketimini düşürürler.

Enerji verimliliği açısından geleneksel sistemlere kıyasla oldukça üstün durumda olan dişlisiz asansör sistemleri, asansör uygulamalarında yaygınlığı hızla artarak kullanılmaktadır.

Enerji verimliliği açısından en uygun asansör sistemine ulaşmanın hedeflendiği bu tez çalışmasında, tasarlanacak makine için dişlisiz asansör sistemleri bahsedilen üstün özellikleri sebebiyle tercih edilen sistem olmuştur.

2.3 Motor Tasarımı için Dişlisiz Asansör Sistemi Gereksinimleri

Tez çalışması kapsamında tasarlanacak; 8 kişilik taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör sistemi için mıknatıslı senkron motorun moment, hız ve güç parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler Duru ve Demiröz tarafından [34] de



Şekil 2. 4 Askı oranı için dişlisiz asansör sistemi görünümü [10]

yapılan hesaplamalar doğrultusunda belirlenebilir. Fakat Öncesinde “Asansör sistemlerinde Avrupa Standartları (Elevator EN Standards)” kapsamında bazı değerlerin belirlenmesi gerekir [35]. Bu doğrultuda standartlara uygun olarak her kişi 75-80 kg olarak kabul edilirse 8 kişilik asansör sisteminin taşıma kapasitesi 630 kg olarak belirlenir. Şekil 2.4’te basit olarak ifade edilen sistem için gerekli her değer bu

standartlarda verilen bilgiler doğrultusunda seçilmiştir. Bu veriler doğrultusunda aşağıda ki işlem adımları takip edilerek tasarlanacak motorun moment, hız ve güç değerleri belirlenmiştir.

Motorun üretmesi gereken nominal moment;

$$M_{motor} = [(r_{kasnak} \times g \times (m_{yük} + m_{kabin} - m_{ka})) / (u \times \eta)] \quad (2.4)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada;

M_{motor} : Moment (Nm)

r_{kasnak} : Tahrik kasnağının yarıçap (m), (0.12)

g : Yerçekimi kuvveti (m/s^2), (9,88)

$m_{yük}$: Yük kütlesi (kg), 630

m_{kabin} : Kabin kütlesi (kg), m_{ka} : Karşıt ağırlık kütlesi (kg)

$(m_{yük} + m_{kabin} - m_{ka}) = \frac{m_{yük}}{2}$, kabul edilmiştir.

u : Askı tipine bağlı katsayı (direk askı için 1, 2:1 askı için 2 alınır). Tasarım 2:1 askı tipi için yapılmış olup $u=2$ alınmıştır.

η : Kuyu ve halat sisteminin verimi, (%75)

$M_{motor} = [(0.12 \times 9.88 \times (630/2)) / (2 \times 0.75)]$, $M_{motor} = 248.98 \cong 250 Nm$ olarak hesaplanır.

Motorun nominal hızı;

$$\omega = [u \times (v \times r_{kasnak})] \text{ (rad/s)} \quad (2.5)$$

v : Kabin hızı ($1m/s$)

$$\omega = [2 \times (1 \times 0.12)]$$
, $\omega = 16.75 \text{ rad/s}$

$$n = \omega \times [60 / (2 \times \pi)]$$
, $n = 160 \text{ dev/dak}$ olarak bulunur. (2.6)

Motorun nominal gücü;

$$P_{motor} = T \times \omega, \text{ (W)} \quad (2.7)$$

$P_{motor} = 250 \times 16.75$, $P_{motor} \cong 4200 W$ olarak belirlenir.

Yapılan hesaplamalar doğrultusunda 8 kişilik taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör sistemini sürmek için tasarlanacak olan motorun güç, moment ve hız değeri;

$P_{motor} = 4.2 \text{ kW}$, $M_{motor} = 250 \text{ Nm}$, $n = 160 \text{ dev/dak}$ olarak belirlenmiştir.

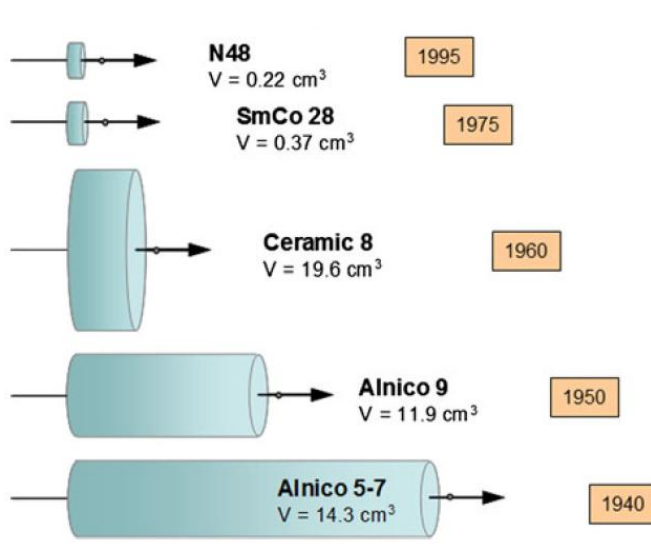


MIKNATISLI SENKRON MAKİNELER

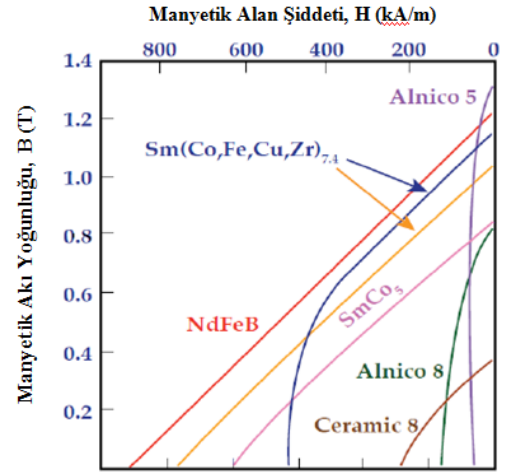
Elektrik makinelerinde moment üretebilmesi için gerekli akımın rotor yüzeyine veya içine yerleştirilen mıknatıslardan elde etme düşüncesinin temelleri 20.yy.a dayanmaktadır. Bu düşünce bağlamında ortaya çıkan Mıknatıslı Senkron Makineler, uyarma sargılarına olan ihtiyacın ortadan kalkması ile rotorda meydana gelen bakır kayıplarının önüne geçilmesi ve rotora akım taşıyacak fırça ve kolektör düzeneklerine ihtiyaç duyulmadığından bu düzeneklerden kaynaklanan işletme ve bakım giderlerinin yok edilmesi gibi üstün özellikleri bünyesinde barındırır. Ancak tarihsel olarak bu makinelerin gelişimi yeterli manyetik akı yoğunluğu ve dayanma gerilimine sahip enerji yoğunluğu yüksek sürekli-mıknatıs materyallerin teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ile doğrudan ilişkilidir.

Elektrik makinelerinde kullanılmak amacıyla kalıcı mıknatısiyet özelliğine sahip ilk materyal 1920'lerde ticari olarak piyasaya sürülen kobalt çeliğidir (cobalt-steel). Fakat Kobalt çeliği 1 MGOe civarında bir koersivite değerine sahip olduğundan pratik olarak makine tasarımı için kullanışlı değildir. Sürekli-mıknatıs materyallerin makine tasarımında kullanımı ancak, 1931-1960 yılları arasında 30 yılı aşkın bir sürede sonunda 10 MGOe' ye ulaşan koersivite değerleriyle, Alnico mıknatıs alaşımları ailesinin geliştirilmesiyle mümkün hale gelmiştir. 1960'lı yıllarda ise sürekli-mıknatıslara kıyasla maliyeti oldukça düşük Ferrite (Ceramic) mıknatıslar (2 MGOe) piyasa sürülmüştür. Enerji yoğunluğu açısından oldukça zayıf bir materyal olmasına rağmen düşük maliyeti ve mükemmel korozyon direnci ile bugün dünyadaki sürekli-mıknatıs tüketiminin %75'inden fazlasını oluşturan Ferrite mıknatıslar, motor endüstrisinde muazzam ticari başarılarla ulaşmışlardır. 1970'lerde Samarium-Cobalt (SmCo, 8 MGOe) mıknatısların ardından 1980'lerde enerji yoğunluğu oldukça yüksek olan Neodymium-Iron-Boron (NdFeB, 14-50 MGOe) mıknatısların piyasa sürülmesi ile moment değeri ve güç

yoğunluğu açısından oldukça üstün mıknatıslı senkron makine tasarımları elde edilmiştir [36]. Şekil 3.1’de Sürekli-mıknatısların tarihsel gelişim kronolojisine göre belirli bir alanda aynı akı yoğunluğunu üretmek için gerekli mıknatıs hacimleri gösterilmiştir [37].



Şekil 3. 1 Aynı akı yoğunluğunu için gerekli mıknatıs boyutları [37]



Şekil 3. 2 Çeşitli mıknatıslara ait B-H grafiği [38]

NdFeB ve SmCo gibi manyetik enerji yoğunluğu yüksek olan sürekli mıknatısların kullanımı ile diğer motorlara göre yüksek performans gösteren Mıknatıslı Senkron Motorlar yaygınlığı hızla yükselişe geçerek piyasada oldukça rağbet gören motorlar arasında yerini almışlardır [17-19].

Endüktansların rotor açısının bir fonksiyonu olarak değiştiği mıknatıslı senkron motorlarda, 2 fazlı (d-q) eşdeğer devre modeli (Referans eksen takımı) karmaşık denklemlerin hesaplamasını basitleştirmesi sebebiyle yaygın olarak kullanılır [39]. Referans eksen takımına göre mıknatıslı senkron motorların üretilen moment (3.1) eşitliği ile hesaplanır.

$$T_{em} = \frac{3}{2}p [(\lambda_{pm} i_q) + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3.1)$$

Burada;

T_{em} : Anlık olarak üretilen moment, (Nm)

p : Kutup çifti sayısı

λ_{pm} : Sürekli mıknatıs nedeniyle üretilen toplam halkalanan akı

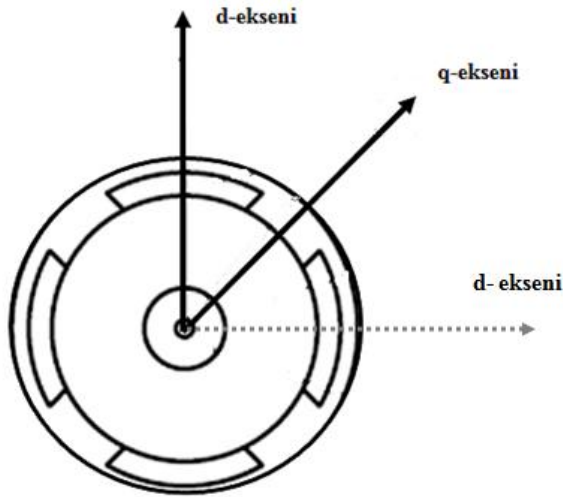
i_d, i_q : Stator akımının d ve q eksenli bileşenleri, (A)

L_d, L_q : Stator d ve q eksenli öz endüktanslarıdır, (Henry).

(3.1) denkleminde parantez içerisindeki ilk terim sürekli mıknatıs nedeniyle üretilen toplam halkalanan akı ile orantılı **mıknatıs moment bileşenini** temsil ederken, Stator d ve q eksenli endüktanslarının arasındaki farkla orantılı olan ikinci terim ise **relüktans moment bileşenini** temsil etmektedir.

Mıknatıslı senkron motorlar genel olarak; mıknatısların rotor üzerindeki konumuna göre; yüzey montajlı ve gömülü mıknatıslı senkron motorlar olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği YMS motorlarda statora ait L_q ve L_d endüktansları rotor konumundan bağımsız ve yaklaşık birbirine eşit değerdedir. Mıknatısların rotorun içine yerleştirildiği GMS motorlarda ise L_q ve L_d endüktansları rotorun konuma bağlı olarak değişir ve eşit değerde değildirler ($L_q \neq L_d$) [40].

3.1 Yüzey Montajlı Senkron Motorlar

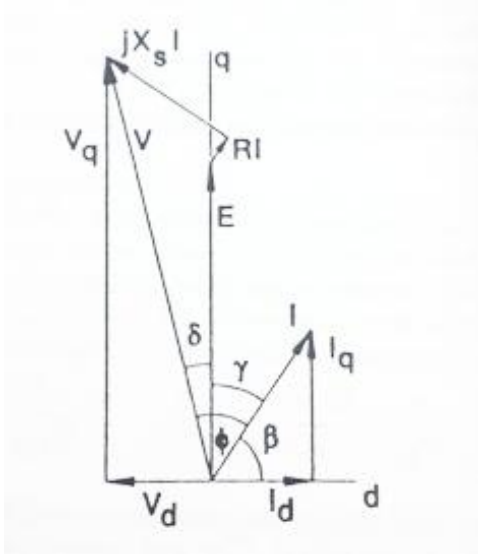


Şekil 3.3 YMS motorun genel rotor yapısı

Şekil-7'de ki gibi mıknatısların rotor yüzeyine monte edildiği YMS motorlar, stator endüktanslarının rotor konumundan bağımsız olması, kontrolünün sadeliği ve yapımının basitliği özellikleri sebebi ile endüstriyel uygulamalarda oldukça popülerdirler. Mıknatıslı senkron motorlara ait genel moment denklemi YMS motorun stator endüktanslarının eşitliği göz

önünde bulundurulurken yeniden düzenlenirse bu motorlara ait moment denklemi 3.2 gibi elde edilir.

$$T_{em_{YMS}} = \frac{3}{2} p [(\lambda_{pm} i_q)] \quad (3.2)$$



Şekil 3. 4 YMS motorlara ait fazör diyagramı [41]

Relüktans moment bileşenine sahip olmayan YMS motorların ürettiği moment doğrudan kullanılan mıknatısın enerji yoğunluğuna (λ_{pm}) bağlı olarak değişecektir. Ayrıca stator akımı (I_s) q- eksenine akımına eşittir bu sebeple motorun moment üretmesi için i_q 'ya akım uygulamak yeterlidir. Bu durumda $i_d = 0$ 'dır. Alan zayıflatmanın gerekli olduğu uygulamalarda ise d eksenine negatif yönde akım uygulanarak ters emk azaltılır. Bu durum, 3.3 denklemi gereği inverter akım kapasitesini aşmamak için q eksenine akımında azaltma yapmayı gerektirir ki, 3.2 denkleminde göre sonuç olarak moment azalır.

Asansör uygulamaları alan zayıflatma bölgesinde çalışmayı gerektirmez. Şekil-8'de verilen YMS motorlara ait fazör diyagramı bahsedilen özellikleri anlamaya yardımcı olacaktır [41]. Burada;

- ✓ X_d, X_q d ve q eksenlerine ait eşit senkron reaktanslardır. ($X_d = X_q = X_s$)
- ✓ Stator akımı $I = I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ 'dır. (3.3)
- ✓ YMS motorlarda $I_d = 0$ olduğundan $I = I_s = I_q$ 'dır.
- ✓ Gama açısı (γ) I_s ve I_q akımları arasındaki açıdır. Uygulamada **tork açısı** olarak adlandırılan **γ açısı YMS motorlarda $I_s = I_q$ olduğundan sıfırdır.** ($\gamma = 0$)

3.2 Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorlar

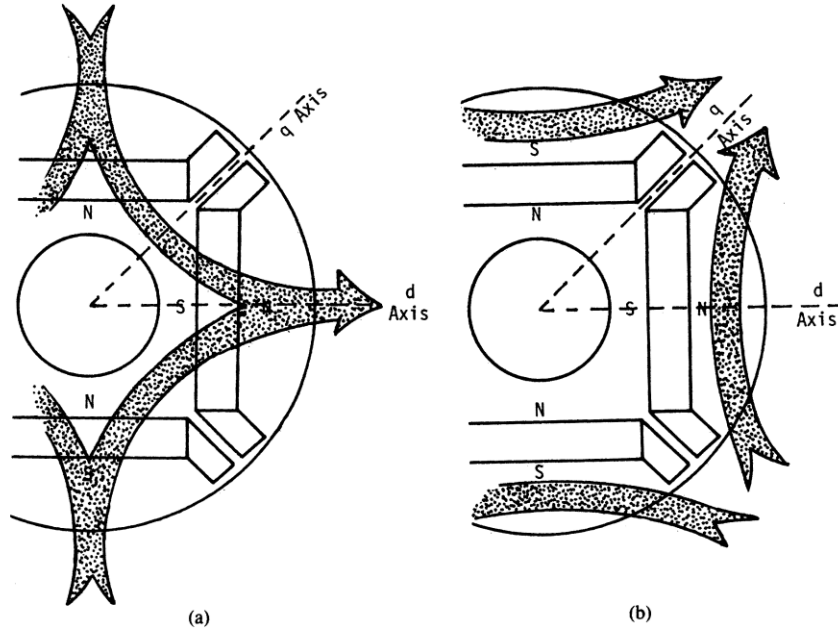
Mıknatısların rotor çekirdeğinin yüzeyine değil içine yerleştirildiği motorlardır. Mıknatısların bu şekilde dizilimi motorun çalışma karakteristiği üzerinde; yüksek hızlara çıktığında mıknatısların rotor içinde gömülü olması sebebiyle mekanik olarak sağlam bir yapıya kavuşması ve relüktans moment üretimine sebebiyet vermesi gibi önemli etkiler yaratmıştır. Ayrıca diğer motor türlerine kıyasla değişken hız ve güç aralıklarında yüksek moment yoğunluğu ile çalışabilme avantajı ve relüktans moment

bileşeninden dolayı manyetik enerji yoğunluğu düşük daha az maliyetli sürekli mıknatısların kullanımı imkânı sağlamışlardır [21].

Mıknatıslı senkron motorlara ait genel moment denklemi GMS motorlar için aynen geçerlidir.

$$T_{em_{GMS}} = \frac{3}{2}p [(\lambda_{pm} i_q) + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3.4)$$

Moment denkleminde parantez içerisinde ki ilk terim YMS motorlar da olduğu gibi kullanılan mıknatısın enerji yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. d ve q eksenli stator endüktans değerleri arasındaki farka orantılı olan parantez içerisinde ki ikinci terim ise relüktans bileşenini temsil etmektedir. Stator endüktans bileşenlerini oluşturan d ve q eksenlerine ait akı yolları Şekil 3.5’de gösterilmiştir. GMS motorlara ait moment denklemi L_d ve L_q endüktansları arasındaki farkın artırılması makinenin relüktans moment bileşenine yapacağı katkıyı açıkça ortaya koymaktadır [36].

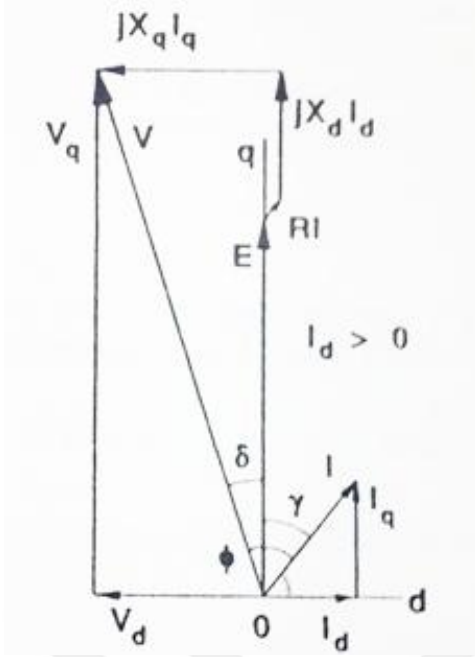


Şekil 3. 5 GMS motorda akı yolları. (a) d- eksenli, (b) q- eksenli [21]

GMS motora ait fazör diyagramı Şekil 3.6’da verilmiştir. Burada;

➤ X_d, X_q d ve q eksenlerine ait senkron reaktanslardır. ($X_d \neq X_q$)

➤ Stator akımı $I = I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ ’dir. (3.3)



Şekil 3. 6 GMS motora ait fazör diyagramı [41]

➤Tork açısı $\gamma = \beta - \frac{\pi}{2}$ 'dir. (3.5)

β , I ve I_d arasındaki açıdır.

➤Akım fazörü $I = I_d + jI_q$ 'dır. (3.6)

$I_d = I \cos \beta = -I \sin \gamma$ (3.7)

$I_q = I \sin \beta = I \cos \gamma$ (3.8)

GMS motorlarda **tork açısı, çıkış moment değeri ve moment dalgalılığı üzerinde** önemli bir etkiye sahiptir. Bu sebeple GMS motor tasarımında dikkatle seçilmesi gereken bir parametredir.

DİŞLİSİZ ASANSÖR SİSTEMİ İÇİN MİKNATISLI SENKRON MAKİNE TASARIMI

4.1 Tasarım Süreci, Gereksinimler ve Kısıtlar

4.1.1 Tasarım Süreci

Dişlisiz asansör sistemi için mıknatıslı senkron makine tasarımı sürecinde; son yıllarda hızla artan NdFeB mıknatıs fiyatının motor maliyetini oldukça yükseltmesi ve GMS motorların çıkış momentinin yüksek oranda dalgalılık içermesi problemleri dikkat edilmesi gereken hususların başında gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, bahsedilen problemlere çözüm bulma amacı ile [42-44] çalışmalarındaki yaklaşımlar doğrultusunda; diğer mıknatıslara oranla maliyeti oldukça düşük olan Ferrite mıknatıs kullanılarak tasarlanan GMS motorlar önerilmiş ve motorların çıkış moment dalgalılığını minimize etmek amacıyla farklı oluk / kutup kombinasyonları ve akı-bariyeri katmanı sayıları araştırılmıştır.

Bu doğrultuda 630 kg/ 8 kişilik taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör sistemi için, tez çalışmasının ikinci bölümünde “**Motor Tasarımı için Dişlisiz Asansör Sistemi Gereksinimleri**” başlığı altında hesaplanan **güç, moment ve hız** değeri tüm motorlar için aynı olmak üzere, ilk olarak beş ayrı Ferrite tabanlı GMS motor tasarlanmıştır. Tasarlanan GMS motorlar moment dalgalılığı, verim, akı yoğunluğu, toplam ağırlık ve maliyet açısından analiz edilerek moment dalgalılığı ve maliyet açısından en üstün 2 tasarım seçilmiştir.

Daha sonra dişlisiz asansör uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, GMSM' lerle aynı parametrele sahip klasik NdFeB tabanlı bir YMS motor tasarlanıp analiz edilmiştir.

Son olarak seçilen 2 GMS motor ile YMS motor; moment dalgalılığı, verim, akı yoğunluğu, toplam ağırlık ve maliyet açısından karşılaştırılarak SMSM'ler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri için en ekonomik çözümün Ferrite tabanlı GSM motorlar olduğu gösterilmiştir.

Yapılan tüm tasarımlar ve analizler **MotorSolve BLDC Tasarım ve Analiz programı** kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Gereksinimler ve Kısıtlar

Tez çalışmasının ikinci bölümünde “**Motor Tasarımı için Dişlisiz Asansör Sistemi Gereksinimleri**” başlığı altında yapılan hesaplamalar doğrultusunda 8 kişilik taşıma kapasitesine sahip dişlisiz asansör sistemini sürmek için tasarlanacak olan motorların güç, moment ve hız değeri;

$P_{motor} = 4.2 \text{ kW}$, $M_{motor} = 250 \text{ Nm}$, $n = 160 \text{ dev/dak}$ olarak belirlenmiştir.

Bu parametreler doğrultusunda öncelikli olarak tüm elektrik makinelerinin tasarımında kullanılan genel moment eşitliği denklemindeki değerlerin belirlenmesi gerekir.

$$T = KD_r^2 L_{stk} \quad (4.1)$$

Genel moment denkleminde;

- **T** çıkış momenti (Nm),
- **K** çıkış yada faydalanma katsayısı (kNm/m^3), makine tasarımında kullanılan malzemeden ne derece faydalanıldığıнын bir ölçüsüdür. Makinenin ana boyutlarının tayininde faydalanma katsayısının şimdiye kadar imal edilmiş makinelerden elde edilen değerleri kullanılır [41],
- **D_r** rotor çapı (m),
- **L_{stk}** ise motorun aktif uzunluğunu (m), temsil etmektedir.

Bu parametrelerden;

- ✓ $T = 250 \text{ Nm}$ olarak hesaplanmıştı.
- ✓ **K**, Çizelge 4.1' de verilen değer aralıkları doğrultusunda seçilir.

✓ $D_r^2 L_{stk}$, değeri ise seçilen K değeri ve T' ye bağlı olarak hesaplanır.

Mıknatıslı Senkron Motorlar, Çizelge 4.1' de belirtilen elektrik makineleri arasında Yüksek performanslı servo motorlar sınıfında yer alırlar. Bu doğrultuda **K**, 15 – 50 kNm/m^3 arasında bir değerde seçilebilir. Ancak öncesinde IEC' nin (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) elektrik makinelerinin işletme karakteristiklerini tanımlamak için görev döngüsü sınıflamalarını (Motor Duty Cycle) içeren IEC 60034-1 uluslararası standartları doğrultusunda motorların çalışma rejimi belirlenmelidir [45]. Asansör sistemlerini sürmek için kullanılan motorlar, IEC 60034-1 standartlarına göre **S5 Sınıfı** işletme karakteristiğine göre çalıştırılırlar.

S5 sınıfı çalışma rejimi (elektriksel frenlemeli dönemli kesintili çalışma); motorun Şekil 4.1' de gösterildiği gibi bir yol verme, bir değişmez yükte çalışma, bir hızlı elektriksel frenleme ve bir enerjisiz durma sürelerinden oluşan birbirini izleyen özdeş dönemlerle çalışmasıdır [45]. Bu çalışma rejiminde motor bir tam periyotta kısa süreli olarak çalıştığından motor içerisinde kritik bir sıcaklık artışı yaşanmaz. Bu da tasarımcılara elektriksel olarak motoru fazla yükleyebilme avantajı sağlar. Elektriksel yüklenme ise doğrudan stator oluklarında bulunan iletkenlerdeki akım yoğunluğunu (**J**, A/mm^2) etkileyecektir. Belirli makineler için akım yoğunluğu değerleri Çizelge 4.2 'de verilmiştir [41].

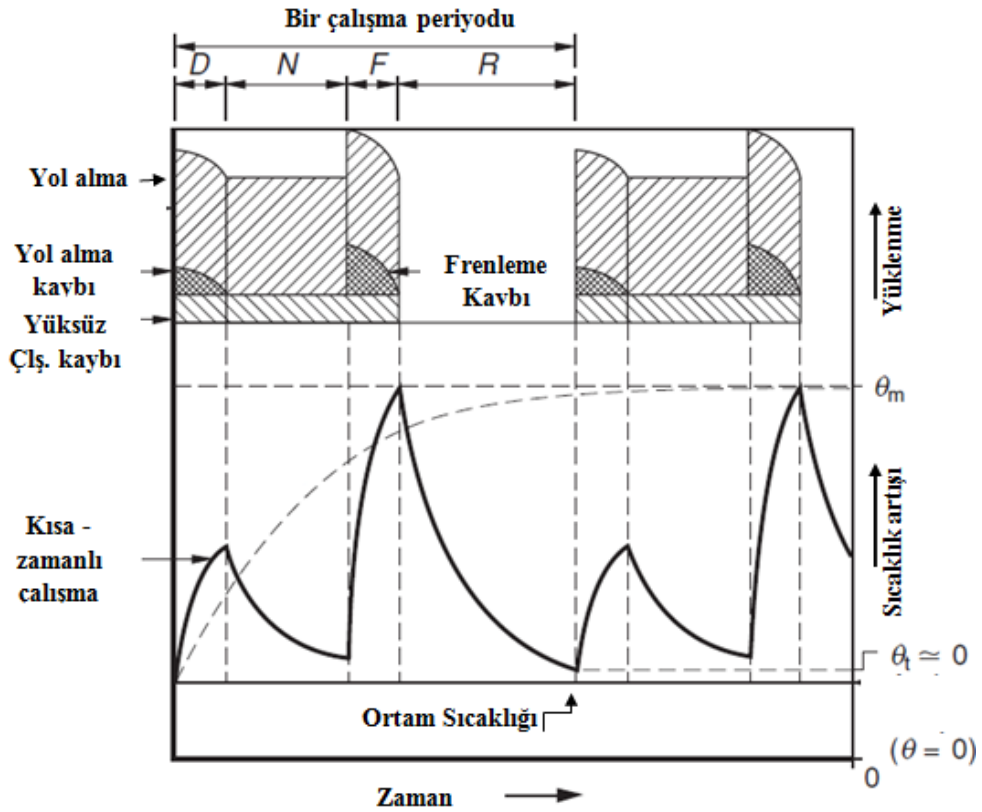
Çizelge 4.2'de verilen değerler doğrultusunda **J**, 5 – 10 A/mm^2 arasında bir değer seçilebilir. Ancak tasarlanacak motorlar S5 sınıfında olduklarından dolayı aşırı ısınma problemi yaşamazlar bu sebeple daha yüksek bir **J** değeri seçimi mümkündür.

Belirli bir hacim için akım yoğunluğunun yüksek seçilebilmesi motorun performansından en iyi şekilde yararlandığını gösterir. Yüksek akım yoğunluğu, makine tasarımında kullanılan malzemeden ne derece faydalandığının bir ölçüsü olan **K** değerini daha yüksek seçebilme imkanı sağlar.

Bahsedilen bilgiler doğrultusunda belirlenen parametreler Çizelge 4.3'de özetlenmiştir.

Çizelge 4. 1 K katsayısı değer aralıkları [41]

	K (kNm/m^3)
Küçük güçlü tamamı kapalı motorlar (Small totally-enclosed motors)	7 - 14
Tamamı kapalı motorlar (Totally-enclosed motors)	14 - 42
Endüstriyel motorlar (Integral-hp industrial motors)	7 - 50
Yüksek performanslı servo motorlar (High-performance servomotors)	15 - 50
Havacılık makineleri (Aerospace machines)	30 - 75
Büyük sıvı soğutmalı makineler (Large liquid-cooled machines)	100 - 250



Şekil 4. 1 S5 sınıfı çalışma karakteristiği

Burada;

D: Yol alma süresi,

N: Normal şartlar altında çalışma süresi,

F: Elektriksel frenleme süresi,

R: Enerjisiz – Dinlenme süresi,

θ_t : Bir çalışma devri sırasında ulaşılan sıcaklık artışıdır.

Çizelge 4. 2 J, akım yoğunluğu değer aralıkları [41]

	J (A/mm²)
Tamamı kapalı motorlar (Totally-enclosed motors)	1.5 – 5
Hava ya da fan soğutmalı makinelere	5 - 10
Sıvı soğutmalı makinelere	10 - 30

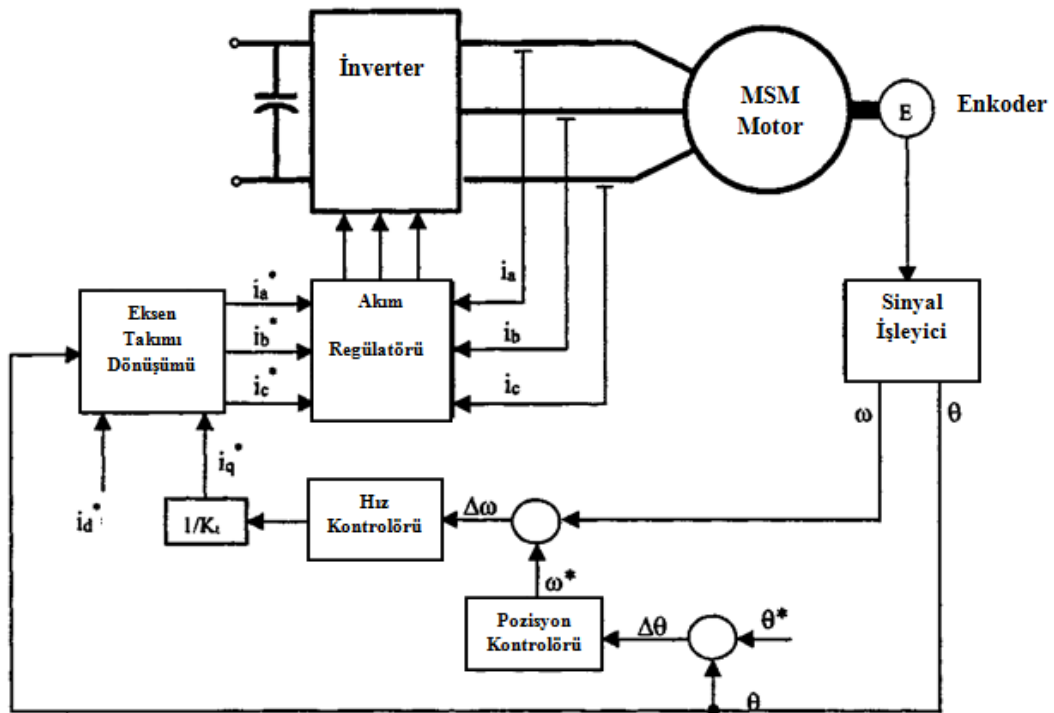
Çizelge 4. 3 Belirlenen parametreler

Tasarlanan Motor Adları	J (A /mm²)	K (kNm/m³)	D_r (m)	L_{stk} (m)
IPM1 IPM2 IPM3 IPM4	13,5	56,3	0,149	0,2
IPM5	13,5	40	0,184	0,185
SPM	13,5	73	0,148	0,156

4.2 Mıknatıslı Senkron Makinelerin Çalışma Prensipleri

Dişlisiz asansör sistemlerini sürmek için kullanılan mıknatıslı senkron motorlarda etkili moment ve hız kontrolü için stator akım vektörü her t anında, rotor konumuna bağlı olarak konumlandırılmalıdır. Akım vektörünün değeri ise talep edilen momente göre hız regülatörü tarafından ayarlanır. Akım vektörü denetimi “Uzay Vektör Modülasyonu” yöntemi ile sağlanır [32,46]. Bu yöntem ile mıknatıslı senkron makinelerin çalışma prensibi Şekil 4.2’de blok şeması şeklinde basitçe ifade edilmiştir [7].

Mıknatıslı senkron motorun rotorunun miline akupile edilen hassas konum algılayıcı enkoder sayesinde motorun konum bilgisi elde edilerek akım vektörünün rotorla senkronize şekilde dönmesi sağlanır. Enkoderden alınan konum bilgisi sinyal işleyiciden geçirilerek motora ait θ -konum ve ω -hız bilgileri elde edilir. Elde edilen veriler doğrultusunda i_q ve i_d referans akımları oluşturulur. Referans akımlarına ters dönüşüm uygulanarak a,b ve c fazlarına ait referans akım bilgileri elde edilir. Ardından, bu akımlar, bir hata akımı oluşturmak için akım regülatörü tarafından makinede akan gerçek akımlarla karşılaştırılır. Bu doğrultuda, akım regülatörü tarafından inverter anahtarlarını çalıştıran PWM kontrol sinyalleri belirlenerek motorun talep edilen momenti üretmesi sağlanır.



Şekil 4. 2 MSM motorun çalışma prensibi şeması [7]

4.3 Ferrite Tabanlı GMS Motorların Tasarımı

4.3.1 IPM1, IPM2, IPM3, IPM4 Motorlarının Tasarımı

GMS motorlarda akı bariyerleri ve stator dişleri arasında meydana gelen manyetik relüktans değişimi moment dalgalılığına sebep olur [47]. Moment dalgalılığı asansör sistemleri uygulamalarında istenmeyen bir durumdur. Moment dalgalık oranını azaltmada klasik bir yöntem olan stator laminasyonlarının belirli bir açı ile burulması işlemi GMS motorların moment dalgalılığını azaltmada yeterli bir çözüm değildir. Bu soruna çözüm bulma amacıyla farklı oluk / kutup sayıları ve akı bariyerine sahip 4 farklı GMS motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm tasarımlarda daha ucuz ve yaygın Ferrite kullanılmıştır. Tasarımlara ait parametreler Çizelge 4.4 ve 4.5’ de verilmiştir.

Tasarımlara ait rotor çapı ve aktif uzunluk değerleri Çizelge 4.3 verilmiştir. Stator dış çapı ise endüstriyel olarak asansör uygulamalarında 630 kg taşıma kapasiteli sistemler için talep edilen 235-245 mm aralığına uygun olarak 245 mm olarak belirlenmiştir. Böylece makinelerin ana geometrisi oluşturulmuştur.

Stator olukları, akı bariyeri ve mıknatıs geometrileri; stator iletkenlerindeki akım yoğunluğu $J = 13,5$ (A /mm²) olmak üzere ve stator ve rotordaki maksimum manyetik akı yoğunluğu $B_{max} = 1,85$ (Tesla) değeri ile sınırlı olacak şekilde tasarlanmışlardır.

GMS motorların tasarım parametreleri, aynı termal ve hacimsel kısıtlamalar altında moment dalgalılığını minimize etmek için optimize edilmiştir.

Çizelge 4.5’de belirtilen değerler dört tasarımda ortak olmak üzere ilgili tasarımlara ait diğer parametreler Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

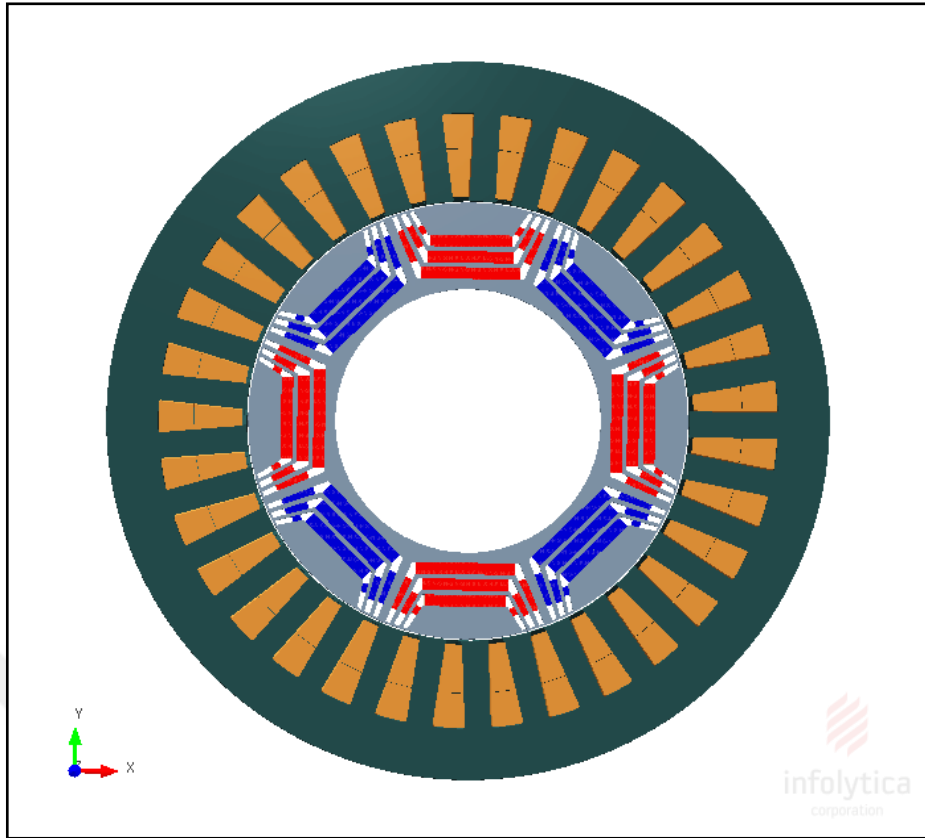
Çizelge 4.4 ve 4.5’ de belirtilen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilen tasarımlar Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 5 GMS motorlara ait özellikler

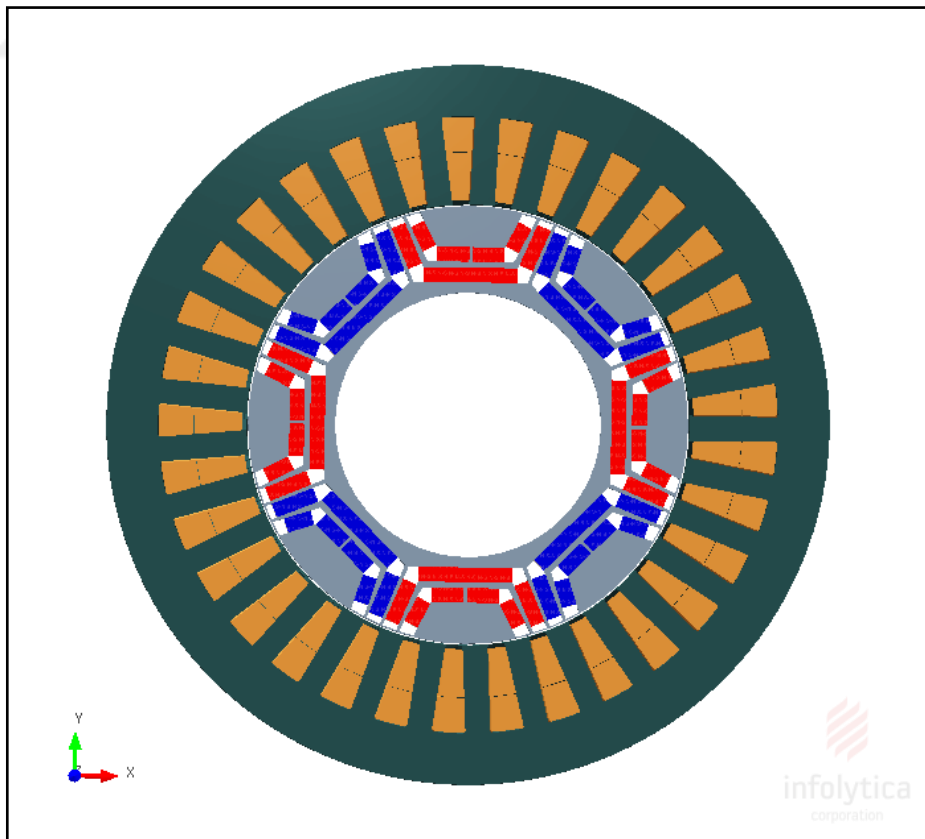
	Değer (Birim)
Nominal güç	4.2 kW
Nominal hız	160 dev/dak
Çıkış momenti	250 Nm
Uygulanan DC bara gerilimi	530 V
Uygulanan akım	13 A
Stator dış çapı	245 mm
Rotor dış çapı	149 mm
Rotor iç çapı	90 mm
Aktif uzunluk	200 mm
Hava aralığı	0.5 mm
Stator burulma faktörü (Skew width)	1
Oluk doluluk oranı	% 40
Sargı tipi	Dağıtılmış
PM materyali	Ferrite (Y40)
Stator çelik materyali	M530-50A
Rotor çelik materyali	M800-100A

Çizelge 4. 4 GMS motorların tasarım özeti

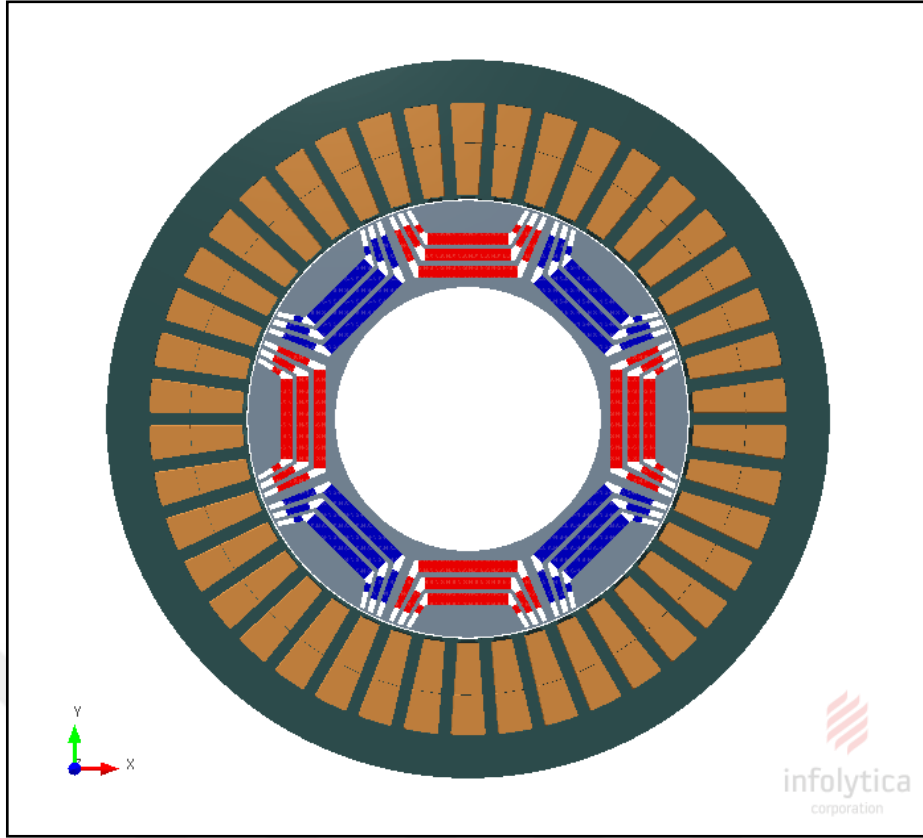
Motor Adı	Oluk sayısı	Akı bariyeri sayısı	Kutup sayısı	γ (Tork açısı, °)	Bobin adımı
IPM1	33	3	8	36	4
IPM2	33	2	8	30	4
IPM3	42	3	8	45	5
IPM4	33	2	10	32	3



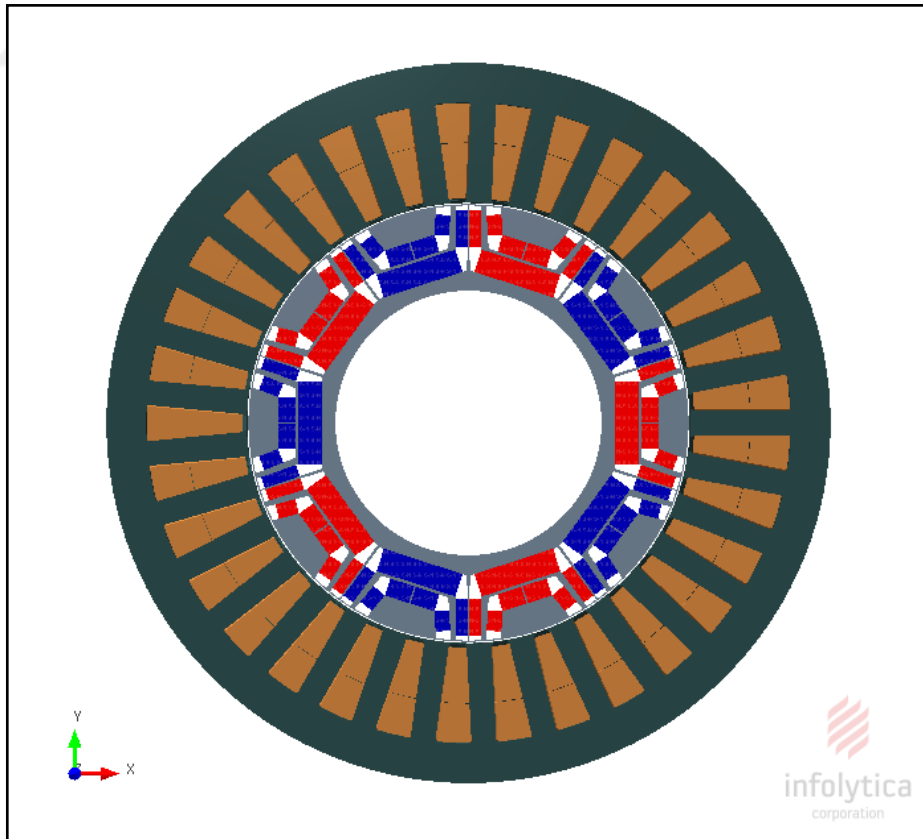
(a) IPM1



(b) IPM2



(c) IPM3



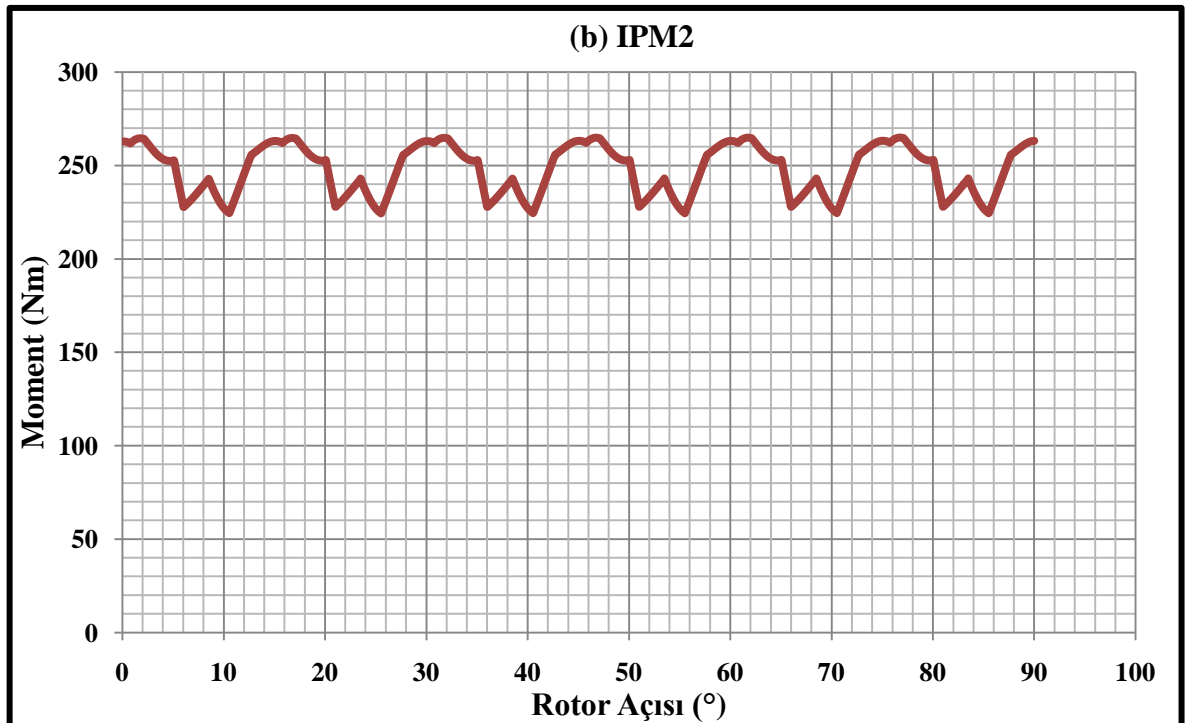
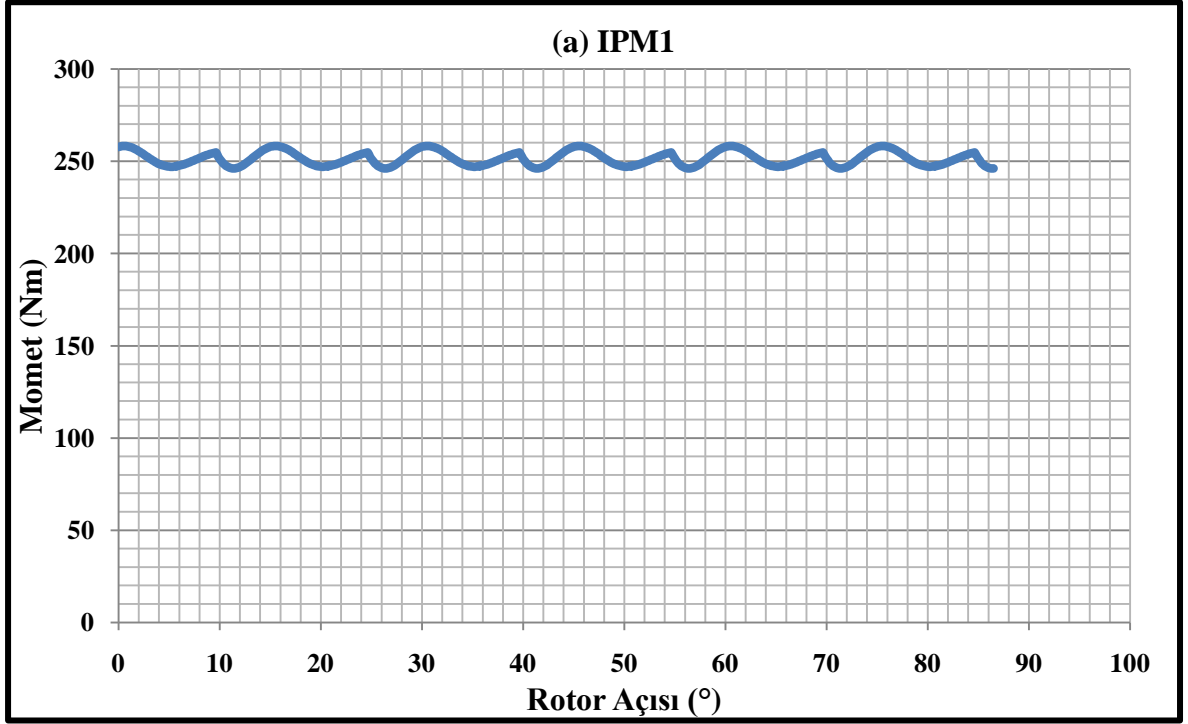
(d) IPM4

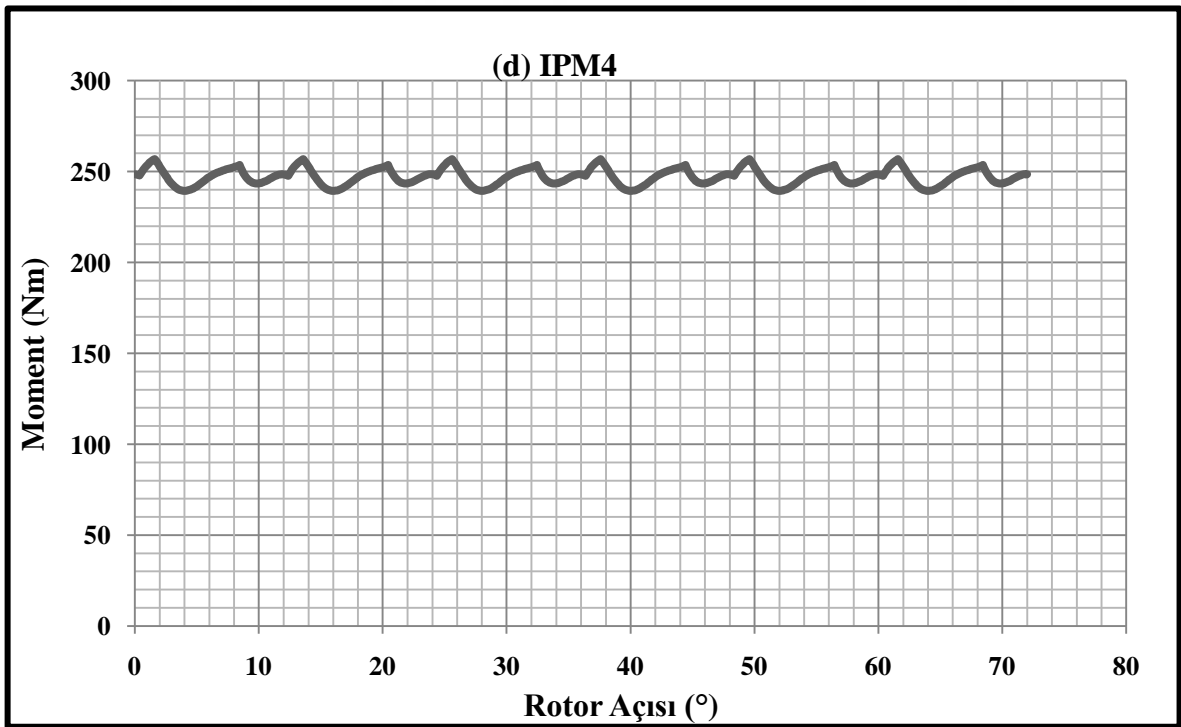
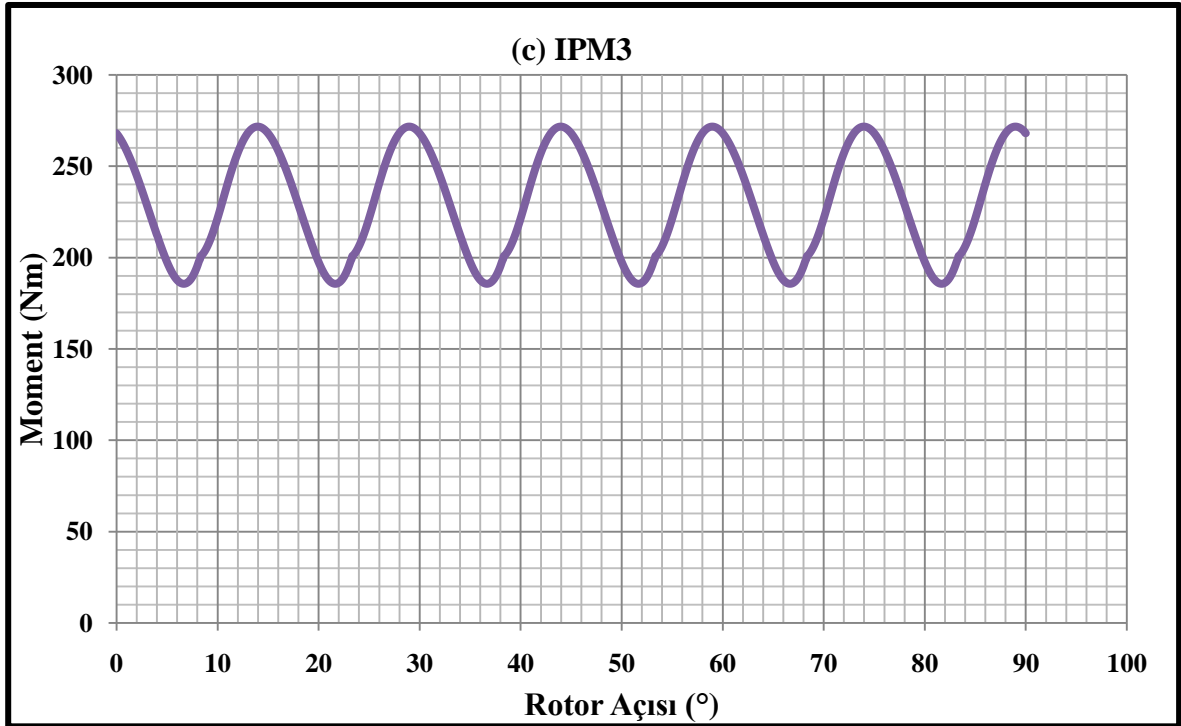
Şekil 4. 3 GMS motorlara ait stator ve rotor geometrileri

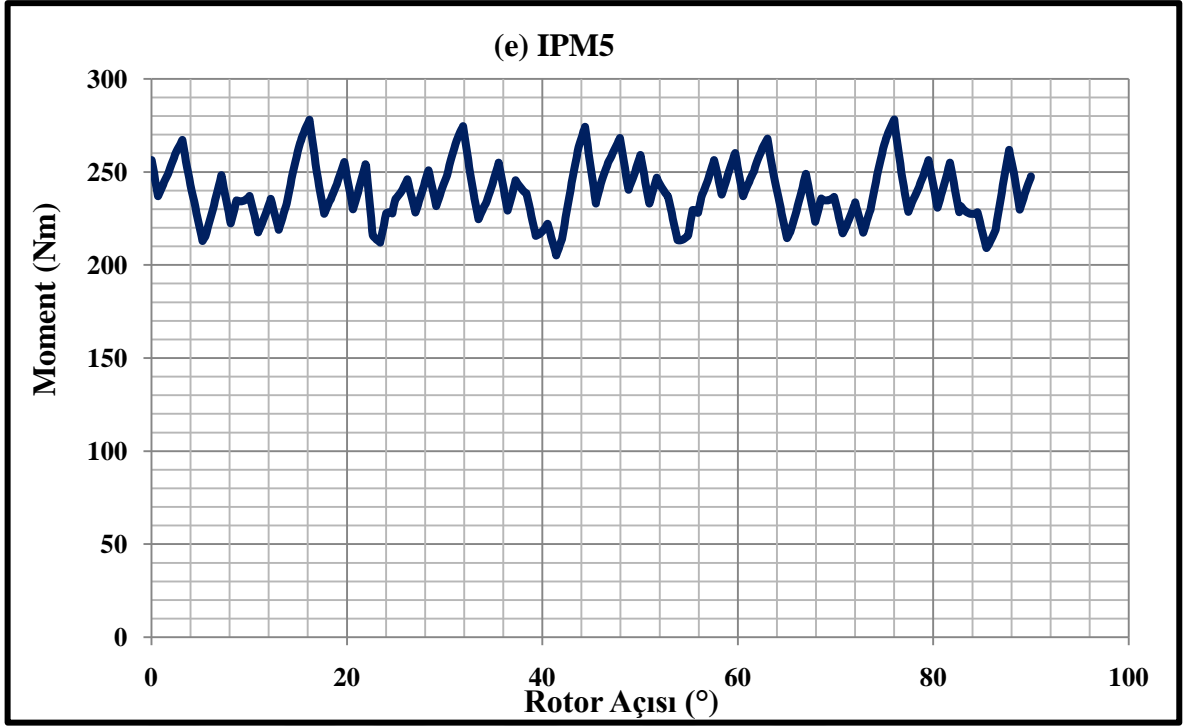
4.4 Ferrite Tabanlı GMS Motorların Analiz Sonuçları

Tasarlanan motorlar; moment dalgalılığı, verim, akı yoğunluğu ve maliyet açısından analiz edilmiştir. Analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

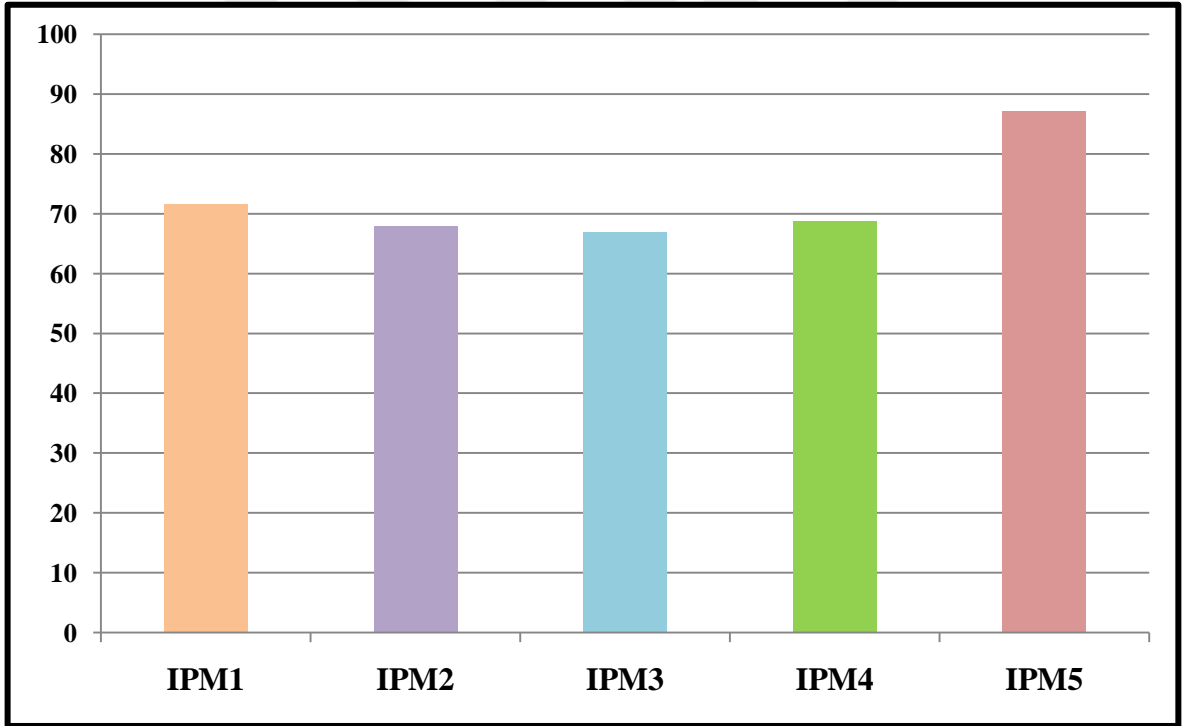
- Moment Dalgalılığı analiz sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.
- Verim analizi sonuçları Şekil 4.5'de gösterilmiştir.





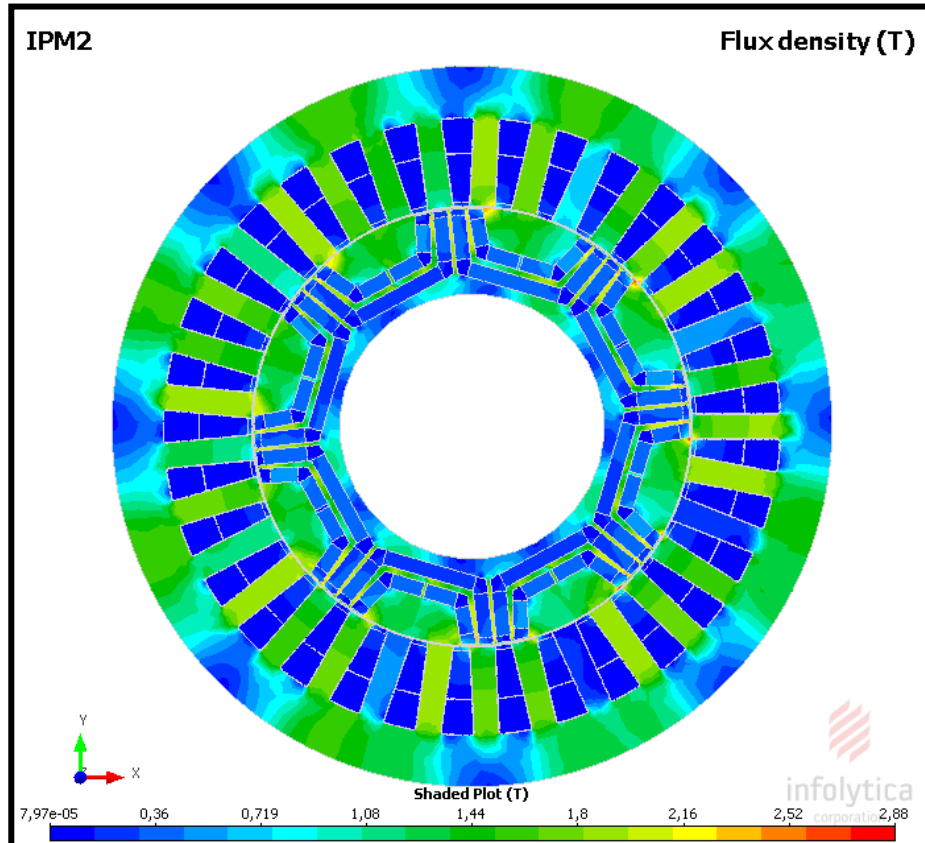
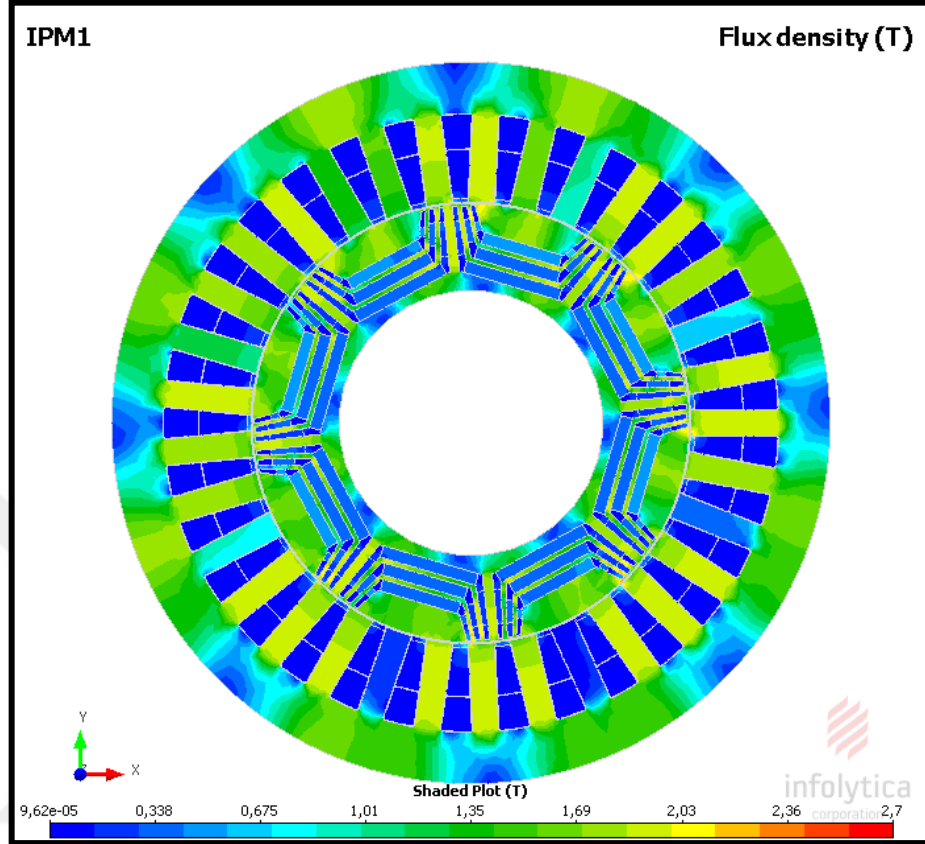


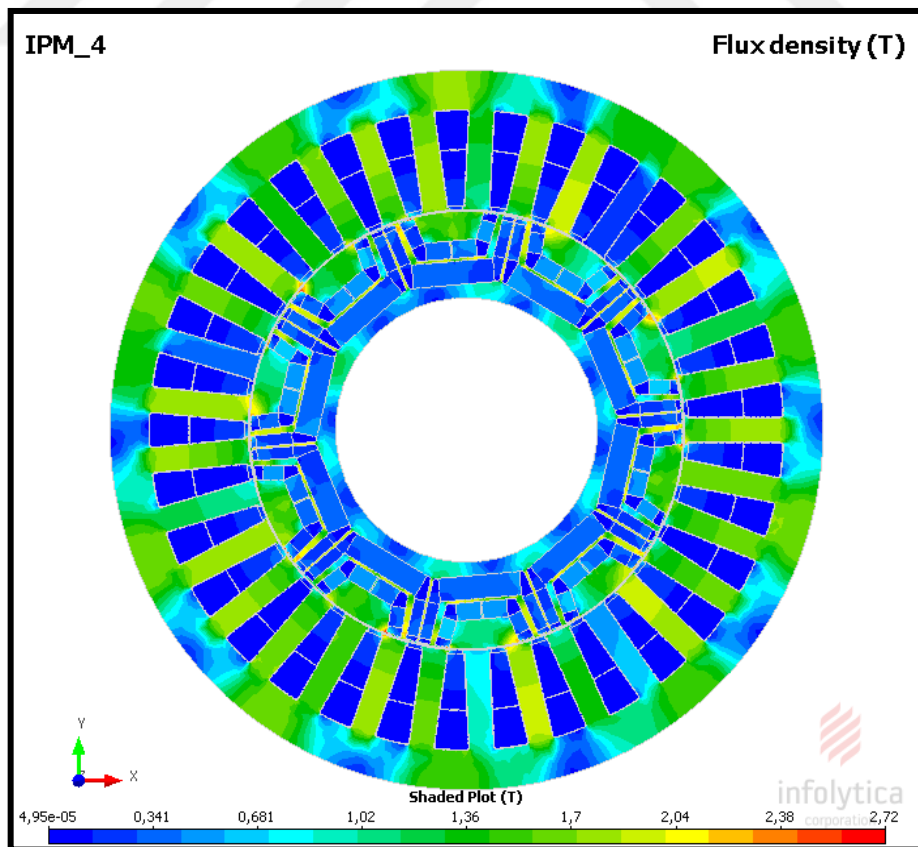
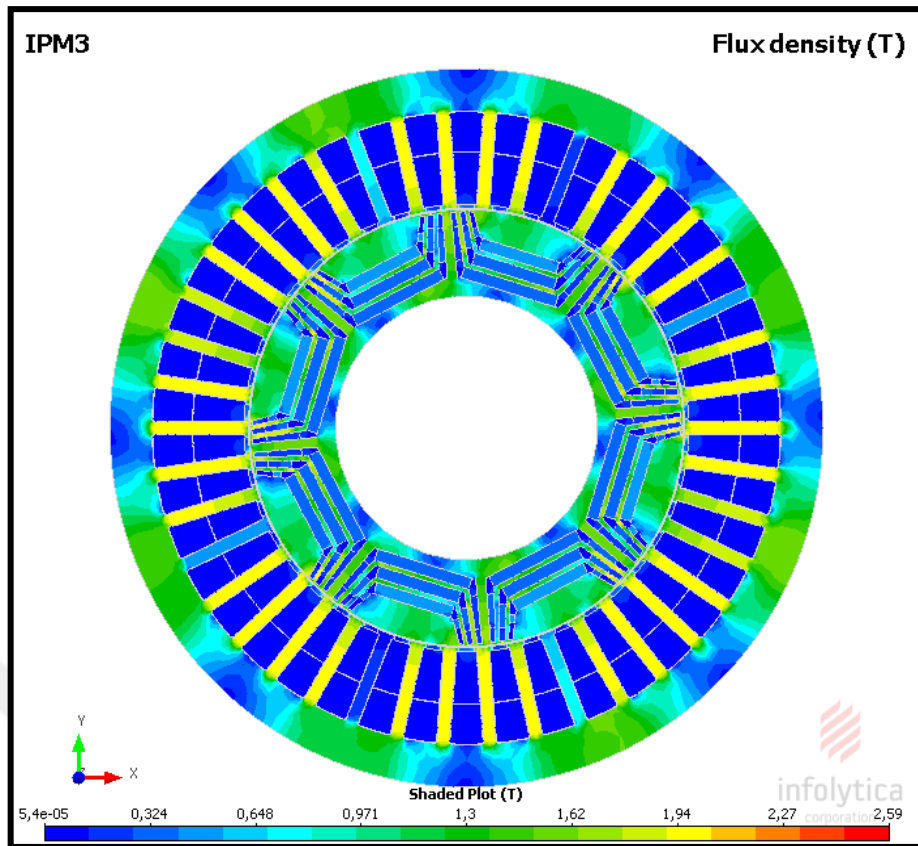
Şekil 4. 6 (a),(b),(c),(d),(e) GMS motorlara ait moment dalgalılığı analizleri

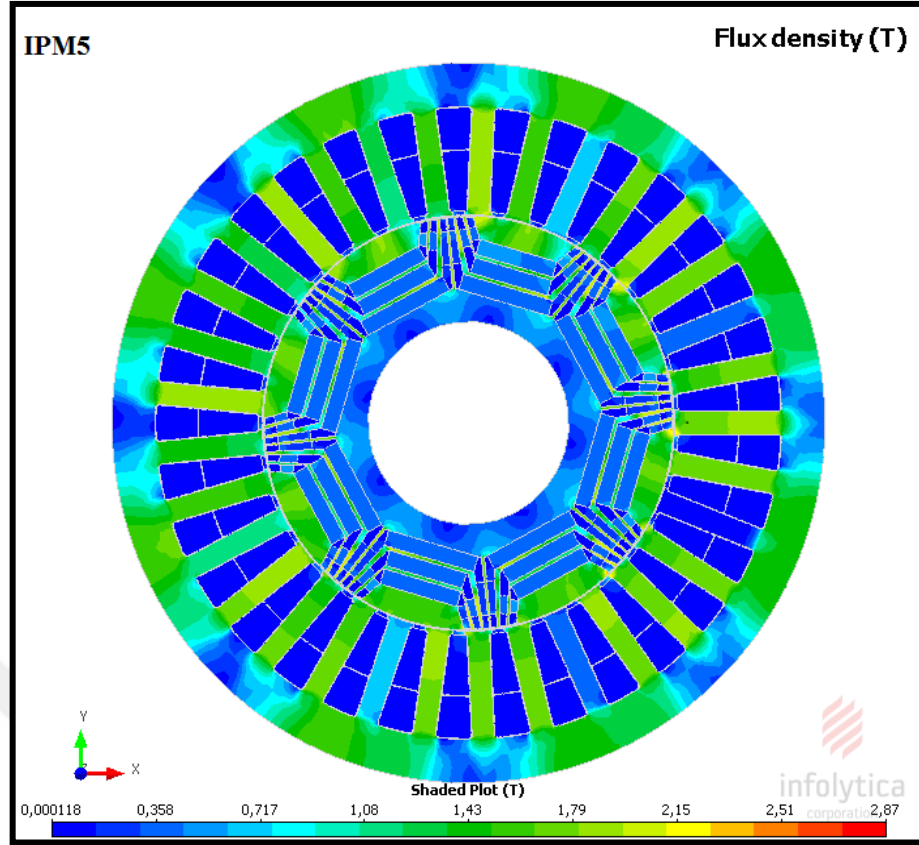


Şekil 4. 5 GMS motorların verim değerleri

- Akı yoğunluğu analizi sonuçları Şekil 4.7’de gösterilmiştir.
- Tasarımlara ait maliyet analizi sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiştir.







Şekil 4. 7 GMS motorların akı dağılımları

Çizelge 4. 7 GMS motorlara ait maliyet analizi

	Birim	IPM1	IPM2	IPM3	IPM4	IPM5
Rotor çelik kütlesi	kg	9,88	9,04	9,88	7,46	14,45
Rotor mıknatıs kütlesi	kg	3,62	4,01	3,62	4,85	7,17
Stator çelik kütlesi	kg	32,89	32,89	25,52	29,89	49,03
Stator sargı kütlesi	kg	8,18	8,18	13,09	9,44	21,15
Toplam kütle	kg	54,57	54,12	52,11	51,64	98,97
Rotor çelik fiyatı (0.75 USD/kg)	USD	7,41	6,78	7,41	5,6	10,5
Rotor mıknatıs (Ferrite) fiyatı (7 USD/kg)	USD	25,34	28,07	25,34	33,95	50,19
Stator çelik fiyatı (0.8 USD/kg)	USD	26,31	26,31	20,42	23,91	39,22
Stator sargı fiyatı (7 USD/kg)	USD	57,26	57,26	91,63	66,08	148,05
Toplam fiyat	USD	116,32	118,42	144,8	129,54	247,96

4.5 Seçilen Tasarımlar

Tasarlanan GMS motorlara ait analiz sonuçları özet olarak Çizelge 4.8’de ifade edilmiştir. Tasarlanan motorlara ait özellikler, hatırlatmak amacıyla, Çizelge 4.9’da özetlenmiştir.

Çizelge 4. 8 Analiz sonuçları özeti

	Birim	IPM1	IPM2	IPM3	IPM4	IPM5
Moment Dalgalılığı	%	4,8	16	34	6,8	28
Verim	%	71,5	68	66,9	68,7	87,1
Toplam kütle	kg	54,57	54,12	52,11	51,64	98,97
Toplam fiyat	USD	116,32	118,42	144,8	129,54	247,96

Çizelge 4. 9 Tüm GMS motorların tasarım özeti

Motor Adı	Oluk sayısı	Akı bariyeri sayısı	Kutup sayısı	γ (Tork açısı,°)	Bobin adımı	Stator dış çapı (mm)	Rotor dış çapı (mm)	Aktif uzunluk (mm)
IPM1	33	3	8	36	4	245	149	200
IPM2	33	2	8	30	4	245	149	200
IPM3	42	3	8	45	5	245	149	200
IPM4	33	2	10	32	3	245	149	200
IPM5	33	3	8	45	4	320	184	185

Dişlisiz asansör sistemleri düşük hızlı uygulamalardır ve üreticilerin maliyeti düşük tutup kârı maksimum yapma çabaları doğrultusunda makinenin geometrisi küçük olacak şekilde tasarlanırlar. Bu doğrultuda dişlisiz asansör sistemlerini sürmek için kullanılan mıknatıslı senkron motorlar düşük devirli ve küçük hacimde olmaları sebebiyle yüksek verim değerlerine sahip değildirler.

Bu verilere ek olarak; maliyeti azaltmak amacı ile Ferrite kullanıldığında ise asansör sistemini sürmek için gerekli momentin üretilebilmesi için makinenin aktif uzunluğunun

arttırılması gerekmektedir. Motor boyutunun büyümesi daha fazla çelik ve bakır kullanımı anlamına gelir ve bu durum doğrudan demir ve bakır kayıplarının artmasına neden olur. Kayıplarda meydana gelen artış ise aynı çıkış gücü için motor veriminin düşmesine sebep olur. Gerekli seviyedeki momentin üretilmesi için uzunluk artışı yerine motor çapı artırımını da tercih edilebilir. Çap artışı ise bakır kaybını çok fazla etkilemezken daha fazla demir kaybına sebep olmaktadır. Fakat asansör sistemlerinin düşük hızlı uygulamalar olduğu göz önünde bulundurulursa meydana gelen demir kaybı motorun verimini fazla etkilemeyecektir.

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında Ferrite tabanlı GMS motorların gerekli seviyedeki momentini üretebilme amacı ile; ilk dört tasarımda motorun aktif uzunluğunun arttırılması, son tasarım olan IPM5 motorunda ise çapın arttırılması yöntemleri izlenmiştir. Bu sebeple tasarım sonuçlarını daha sağlıklı yorumlayabilmek için aynı makine geometrisine sahip olan; IPM1, IPM2, IPM3, IPM4 tasarımlarını ayrı, farklı geometrideki IPM5 tasarımını da ayrı olarak değerlendirmek gereklidir.

İlk dört tasarıma ait analiz sonuçları değerlendirildiğinde; oluk / kutup kombinasyonu ve akı bariyeri sayısını moment dalgalılığı üzerinde çok önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Moment dalgalılığı açısından en üstün iki tasarımın IPM1 ve IPM4 motorları olduğu Çizelge 4.8’de görülmektedir.

Maliyet açısından ise en ekonomik tasarımlar IPM1 ve IPM2 motorlarıdır. Verim açısından incelendiğinde ise aktif uzunluk artışı ve daha önce belirtilen nedenlerden dolayı tüm tasarımların verimlerinin yüksek değerde olmadığı görülür. Ancak 2.1 başlığında belirtildiği gibi geleneksel dişli kutulu asansör sistemlerinin aynı güç ve moment değeri için % 48 gibi oldukça kötü bir verimle çalıştıkları göz önünde bulundurularak sistem bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Sistem bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise Ferrite tabanlı GMS motorların her açıdan oldukça üstün durumda olduğu açıktır.

IPM5 tasarımı ise aktif uzunluk değeri düşük olduğundan verim açısından diğer tasarımlardan üstün konumdadır. Ancak boyutları asansör sistemleri için tercih edilen değerlerin üstündedir. Ayrıca makine geometrisinin büyük olması doğrudan maliyeti artışına sebep olmuştur. Çıkış momenti dalgalılık oranı da yüksek sayılabilecek değerdedir.

Yukarıda belirtilenler doğrultusunda tüm tasarımlar incelendiğinde maliyet ve moment dalgalılığı açısından IPM1 ve IPM4 tasarımlarının diğer tasarımlardan üstün motorlar olduğu görülür. Bu sebeple **Ferrite tabanlı dişlisiz asansör uygulamaları için en optimum motorlar olarak; IPM1 ve IPM4 tasarımları** seçilmiştir.

IPM1 tasarımı moment dalgalılığı, verim ve maliyet açısından IPM4 tasarımına üstün konumdadır. Ancak iki tasarıma ait akı dağılımları incelenirse IPM1 motorun stator akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu görülür. IPM4 tasarımı akı dağılımı açısından böyle bir durum söz konusu değildir. Ayrıca motorların çok katmanlı rotor yapıları ve akı bariyerlerine yerleştirilen mıknatıs sayısı ve boyutlarının çeşitliliği, işçilik maliyetinde bir miktar artışa sebep olmaktadır. Bu doğrultuda her iki tasarım incelendiğinde 3 katmanlı yapıya sahip IPM1 tasarımının işçilik maliyetinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

4.6 NdFeB Tabanlı YMS Motor Tasarımı

NdFeB tabanlı YMS motorlar dişlisiz asansör uygulamaları gibi doğrudan sürümlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu çalışma kapsamında NdFeB tabanlı YMS motor tasarımının amacı dişlisiz asansör uygulamalarında performans ve maliyet açısından diğer tasarımlar ile karşılaştırılarak en uygun mıknatıslı senkron motor tasarımına ulaşmaktır.

YMS motora ait rotor çapı ve aktif uzunluk değeri Çizelge 4.3'de verilmişti. Stator dış çapı ise endüstriyel olarak asansör uygulamalarında 630 kg taşıma kapasiteli sistemler için talep edilen 235-245 mm aralığına uygun olarak 240 mm olarak belirlenmiştir. Böylece makinenin ana geometrisi oluşturulmuştur.

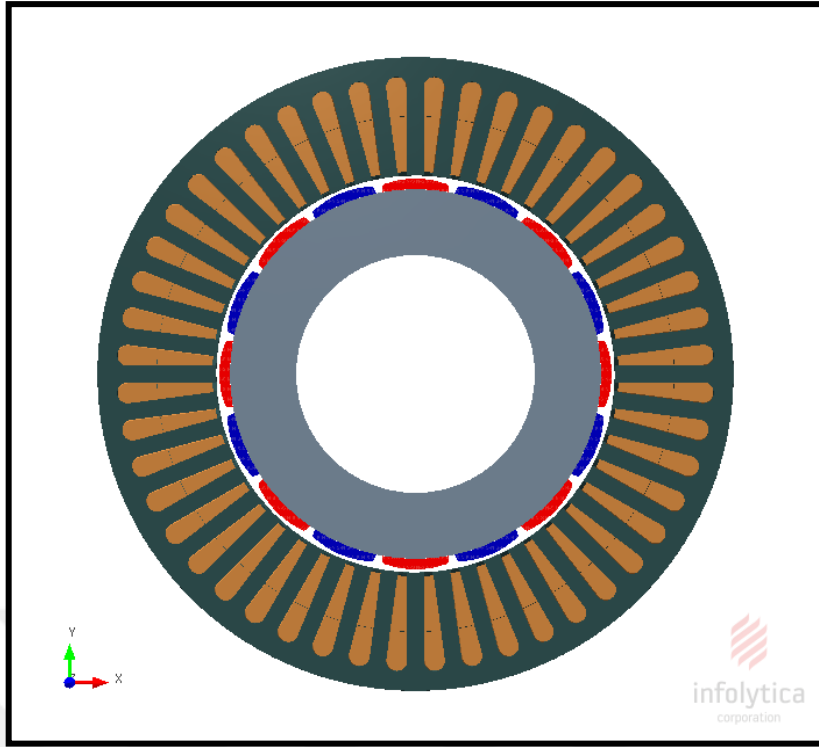
GMS motorların tasarım sürecinde olduğu gibi stator olukları ve mıknatıs geometrisi; stator iletkenlerindeki akım yoğunluğu $J = 13,5$ (A /mm²) olmak üzere ve stator ve rotordaki maksimum manyetik akı yoğunluğu $B_{max} = 1,85$ (Tesla) değeri ile sınırlı olacak şekilde tasarlanmışlardır.

YMS motorların çıkış momenti, GMS motorlar da olduğu gibi yüksek miktarda dalgalılık içermez. Momentinin dalgalılığını azaltmada klasik çözüm olan stator laminasyonlarının belirli bir açı ile burulması, YMS motorun moment dalgalılığı minimize etmek için yeterli bir işlemdir.

Çizelge 4. 10 YMS motora ait tasarım özellikleri

	Değer (Birim)
Nominal güç	4.2 kW
Nominal hız	160 dev/dak
Çıkış momenti	250 Nm
Uygulanan DC bara gerilimi	530 V
Uygulanan akım	13 A
Stator dış çapı	240 mm
Rotor dış çapı	148 mm
Rotor iç çapı	90 mm
Aktif uzunluk	156 mm
Hava aralığı	1,25 mm
Stator burulma faktörü (Skew width)	0,8
Oluk doluluk oranı	% 40
Sargı tipi	Dağıtılmış
PM materyali	NdFeB (N35)
Stator çelik materyali	M530-50A
Rotor çelik materyali	M800-100A
Oluk sayısı	48
Kutup sayısı	16
γ (Tork açısı)	0°
Bobin adımı	3

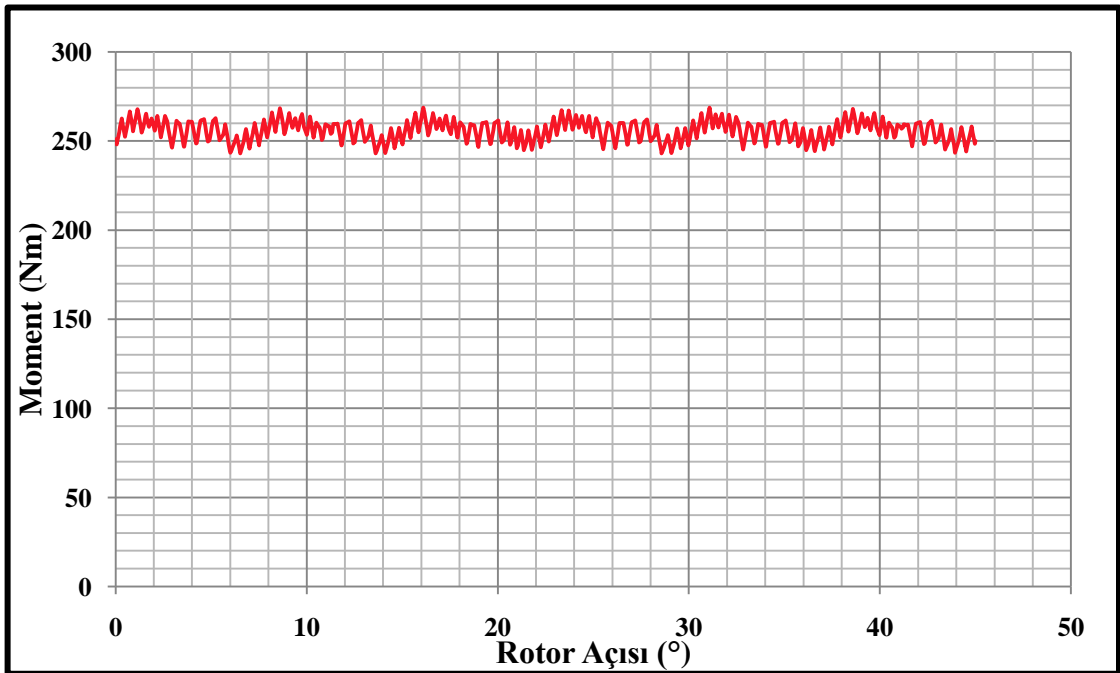
Çizelge 4.10'da belirtilen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilen YMS motor tasarımı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 8 YMS motora ait stator ve rotor geometrisi

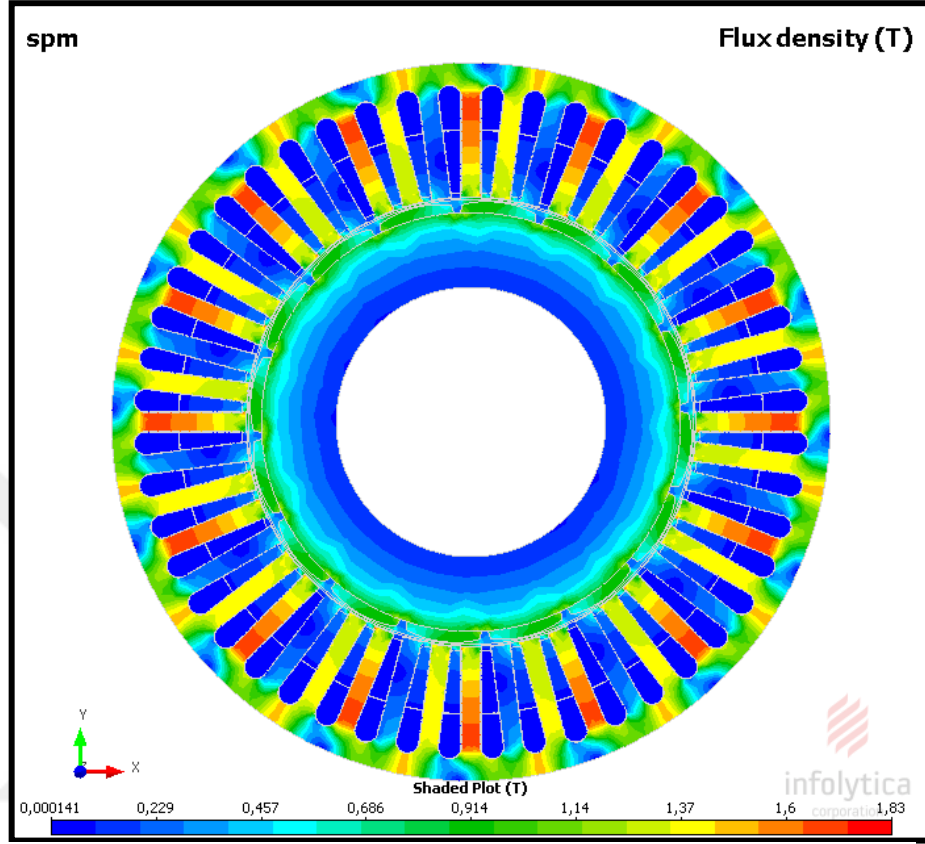
4.7 YMS Motorun Analiz Sonuçları

Tasarlanan motorlar; moment dalgalılığı, akı yoğunluğu, verim ve maliyet açısından analiz edilmiştir. Analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



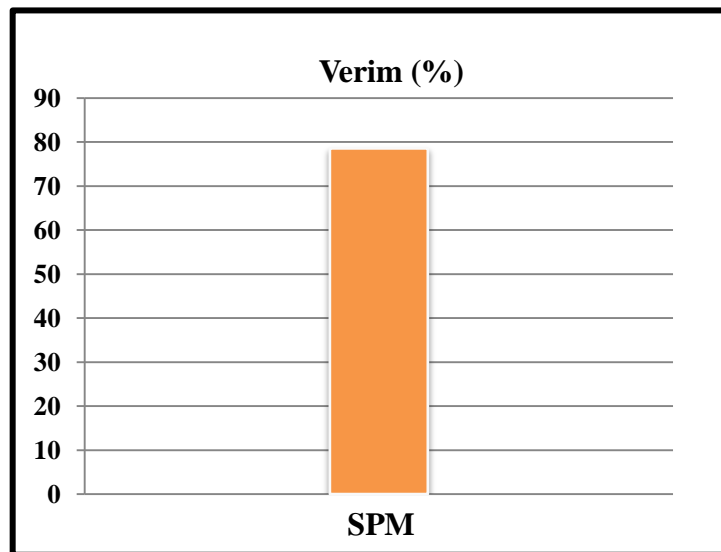
Şekil 4. 9 YMS motor ait moment dalgalılığı analizi

- YMS motora ait moment dalgalılığı analizi sonucu Şekil 4.8’de verilmiştir.
- Stator ve rotordaki akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 10 YMS motora ait akı dağılımı

- Verim analiz sonucu Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4. 11 YMS motor verim grafiği

- Maliyet analiz sonucu Çizelge 4.11’de ve analiz özeti Çizelge 4.12’de ifade edilmiştir.

Çizelge 4. 11 YMS motora ait maliyet analizi

	Birim	SPM
Rotor çelik kütlesi	kg	10,85
Rotor mıknatıs kütlesi	kg	1,68
Stator çelik kütlesi	kg	20,67
Stator sargı kütlesi	kg	7,89
Toplam kütle	kg	41,09
Rotor çelik fiyatı (0.75 USD/kg)	USD	8,14
Rotor mıknatıs (NdFeB) fiyatı (140 USD/kg)	USD	235,2
Stator çelik fiyatı (0.8 USD/kg)	USD	16,54
Stator sargı fiyatı (7 USD/kg)	USD	55,23
Toplam fiyat	USD	315,11

Çizelge 4. 12 YMS motor analiz özeti

	Birim	SPM
Moment Dalgahlığı	%	10
Verim	%	78,6
Toplam kütle	kg	41,09
Toplam fiyat	USD	315,11

4.8 Önerilen Motor

Mıknatıslı senkron motorlar tarafından sürülen dişlisiz asansör uygulamaları için tasarlanan Ferrite tabanlı GMS ve NdFeB tabalı YMS motorlar performans ve maliyet açısından karşılaştırılarak en uygun tasarım seçilmiştir. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4. 13 Karşılaştırma sonuçları

	Birim	IPM1	IPM4	SPM
Moment Dalgalılığı	%	4,8	6,8	10
Verim	%	71,5	68,7	78,6
Toplam kütle	kg	54,57	51,54	41,09
Toplam fiyat	USD	116,32	129,54	315,11

Yolcu taşıma amacı ile kullanılan asansör uygulamalarında elektrik motorunun üretmiş olduğu momentin düzgünlüğü; konfor ve güvenlik açısından kritik önem teşkil eder. Bu sebeple tez çalışması kapsamında tasarlanan motorlar performans açısından değerlendirilirken öncelikli olarak önem verilen metrik motorların çıkış momentinin dalgalılık oranını olmuştur. Bu doğrultuda oluşturulan tasarımlar moment dalgalılığı açısından incelediğinde en iyi performansın IPM1 tasarıma ait olduğu Çizelge 4.13’de görülmektedir. Ancak diğer iki tasarımın da dalgalılık değeri asansör uygulamaları için uygun aralıkta olduğunu belirtmek gerekir.

Moment dalgalılığı açısından analiz sonuçlarını değerlendirirken altının çizilmesi gereken önemli nokta; literatüre bakıldığında GMS motorların YMS motorlara kıyasla oldukça yüksek moment dalgalılık oranına sahip olduğudur. Ancak, bu çalışma kapsamında tasarlanan GMS motorların dalgalılık oranı, önceki bölüm başlıklarda belirtilen çeşitli optimizasyonlar ile, YMS motorun moment dalgalılık oranından daha düşük değerlerde olacak şekilde minimize edilmiştir. Bu veriler ile GMS motorların dalgalılık sorununun özverili bir tasarım süreci ile çözülebileceği gösterilmiştir.

Verim değerlerine bakıldığında ise SPM motorun %78,6 ile üstün olduğu görülür. Anacak verim değerleri incelenirken SPM motorun enerji yoğunluğu diğer mıknaıslara göre oldukça yüksek enerji yoğunluğuna sahip NdFeB mıknaıs ile tasarlandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Ferrite tabanlı tasarımların verim değerlerinin yüksek olmayacağı beklenen bir durumdur. Fakat geleneksel asansör sistemlerinin oldukça kötü verim değerleriyle çalıştıkları hatırlanacak olursa Ferrite tabanlı tasarımların verimleri düşük bile olsa dişlisiz asansör sistemleri her açıdan daha avantajlı konumdadır.

Elektrik makineleri tasarımında tasarımcıların temel hedefi; performans açısından üstün ve aynı zamanda maliyet açısından ekonomik bir tasarımına ulaşmaktır. Bu doğrultusunda maliyet açısından tasarımlar incelendiğinde YMS motorun GMS motorlara kıyasla maliyetinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. GMS tasarımlarını ise hem performans hem de maliyet açısından oldukça iyi motorlardır. Fakat GMS motorların rotorlarının çok katmanlı bir yapıya sahip olmaları ve akı bariyerlerine yerleştirilecek mıknaısların boyutlarının farklı geometrilerde olması üretim aşamasında işçilik maliyetinde bir miktar artışa neden olacaktır. Ancak bu miktar YMS motorun maliyetinin yanında oldukça düşük kalacağından, GMS motorlar maliyet açısından üstünlüğünü korumaya devam edecektir.

Yukarıda belirtilenlere ve yapılan analizler sonuçlarına göre; SMSM' ler tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri için en ekonomik çözümün Ferrite tabanlı GSM motorlar olduğu gösterilmiştir. Bu doğrultuda tez çalışması kapsamında 8 kişilik / 630 kg taşıma kapasiteli dişlisiz asansör sistemini sürmek için en uygun motor olarak; **Ferrite tabanlı IPM1 ve IPM4** tasarımları önerilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz modern dünyasının sürekli artan enerji ihtiyacı talebi doğrultusunda doğal enerji kaynakları büyük bir hızla tüketilmektedir. Enerji tüketimi konusunda verimlilikten ve çevrecilikten oldukça uzak enerji politikalarının izlenmesi bizleri geri dönüşü mümkün olmayan bir sürecin eşiğine getirmiştir. İzlenen yanlış politikalar sonucunda tabiatın doğal dengesi alt üst edilmiş ve doğal enerji kaynakları yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalmıştır. Bu trajik durum 21.yy.ın ilk çeyreğinde geç de olsa fark edilmiş ve gerekli önlemleri almak için “Enerji Verimliliği” ve “Yenilenebilir Enerji Kaynakları” konularında yapılan çalışmalar gittikçe artarak önem kazanmıştır. Bu bağlamda elektrik enerjisinin üretiminden evlerimizde kullanabileceğimiz düzeye getirilmesinde ve bu enerjinin başka formlara dönüşümünde en etkin rolü alan elektrik makineleri, elektrik enerjisinin verimli şekilde kullanılması çalışmaları kapsamında kritik bir önem teşkil eder. Bu sebeple enerji verimliliği açısından elektrik makinelerinin minimum enerji ile ihtiyaç duyulan gücü üretilebilecek şekilde tasarlanmaları oldukça önemlidir.

Tez çalışması kapsamında elektrik enerjisinin verimli kullanımı çalışmalarına bir nebze de olsa katkıda bulunmak amacı ile; gündelik hayat seyri içinde sıklıkla faydalandığımız asansör uygulamaları için verimliliği oldukça düşük geleneksel dişli kutulu asansör sistemlerine alternatif olarak dişli sistemine ihtiyaç olmadan doğrudan SMSM’ ler tarafından sürülen yüksek verime sahip dişlisiz asansör sistemleri önerilmiştir.

SMSM’ ler, asansör sistemleri gibi düşük hızlı uygulamalarda asenkron motorlara kıyasla daha iyi kontrol imkânı sağladıklarından oldukça iyi performans gösterirler ayrıca rotorda meydana gelen bakır kayıpları ve dişli kutusunun sebep olduğu kayıplar

elimine edildiğinden enerji verimliliği açısından oldukça iyi motorlardır. Bu bağlamda dişlisiz asansör uygulamaları için; diğer mıknatıslara oranla maliyeti oldukça düşük olan Ferrite mıknatıs kullanılarak tasarlanan gömülü mıknatıslı senkron motorlar (GMSM) önerilmiştir. Ayrıca GMSM' in çıkış moment dalgalılığını minimize etmek amacıyla farklı oluk / kutup kombinasyonları ve akı-bariyeri sayıları araştırılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak 630 kg/ 8 kişilik taşıma kapasitesine bir asansör sistemi için gerekli hesaplamalar yapılmış ve bu hesaplamalar doğrultusunda GMS motorun moment dalgalılığını minimize etmek amacıyla farklı oluk/kutup kombinasyonları ve akı-bariyeri katmanı sayılarına sahip beş ayrı Ferrite tabanlı motor tasarlanmıştır. Tasarlanan motorlar moment dalgalılığı, akı yoğunluğu, verim ve maliyet açısından analiz edilerek içlerinden performans ve maliyet olarak en iyi sonucu veren **33 oluklu / 8 kutuplu IPM1 ve 33 oluklu / 10 kutuplu IPM4** tasarımları seçilmiştir. Daha sonra GMSM sürürlü asansör sistemlerinin YMSM sürürlü sistemlere rakip olabileceklerini göstermek amacı ile GMSM' lerle aynı parametrele sahip asansör uygulamalarında sıklıkla kullanılan klasik **NdFeB tabanlı bir YMS motor** tasarlanmıştır. Tasarlanan YMS motor moment dalgalılığı, akı yoğunluğu, verim ve maliyet açısından analiz edilerek seçilen IPM1 ve IPM4 motorları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan karşılaştırma sonucunda moment dalgalılığı ve maliyet açısından IPM1 ve IPM4 tasarımlarının SPM tasarımına göre oldukça başarılı motorlar oldukları görülmüştür. Özverili bir tasarım süreci ile **GMS motorların dalgalılık oranı YMS motorlarından daha düşük olacak şekilde minimize edilmiş ve Ferrite kullanımı sayesinde maliyet YMS motora kıyasla yaklaşık %60 oranında azaltılmıştır.**

Bu veriler ışığında; Mıknatıslı Senkron Motorlar tarafından sürülen dişlisiz asansör sistemleri için enerji verimliliği, performans ve ekonomik açıdan en uygun çözümün **Ferrite tabanlı GSM motorlar** olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Hawking, S., (1998). Zamanın Kısa Tarihi, 36.Basım, Alfa Yayıncılık, Cambridge.
- [2] Marryat, H., (1923). "Electric Passenger Lifts", IET Journals & Magazines, 62:325-341.
- [3] Inaba, H., Onoda, Y., Shima, S, Ando T., Kurosawa, T., Sakai, Y. ve Maekawa, A., (1980). "A New Speed-Control System for DC Motors and its Application to Elevators", IEEE Transactions On Industry Applications, IA-16(2):179-185.
- [4] Inaba, H., Onoda, Y., Shima, S, Ueda, A., Ando, T., Kurosawa, T. ve Sakai, Y. (1985). "A New Speed Control System for DC Motors Using GTO Converter and its Application to Elevators", IEEE Transactions On Industry Applications, IA-21(2):391-397.
- [5] Rahman, M. A., (1993). "Modern Electric Motors in Electronic World", Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON '93), 15-19 November, Maui HI.
- [6] Jahns, T. M., (2007). "The Expanding Role of PM Machines in Direct-Drive Applications", Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC), 23-25 October 2007, Madison.
- [7] Ficheux, R. L., Caricchi, F., Crescimbeni, F. ve Honorati, O., (2001). "Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Direct-Drive Elevator Systems Without Machine Room", IEEE Transactions On Industry Applications, 37(6):1693-1701.
- [8] Wang, G., Xu, j., Li, T., Zhang, G., Zhan, H., Ding, L. ve Xu, D., (2014). "Weight-Transducerless Starting Torque Compensation of Gearless Permanent-Magnet Traction Machine for Direct-Drive Elevators", IEEE Transactions On Industrial Electronics, 61(9):4594-4604.
- [9] Zhongshu, L., Aijun, Z., Lie, M. ve Siyang, L., (2011)"Design of Line-Start Low Speed and High Torque PMSM for Gearless Drive System", International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 20-23 August 2011, Beijing, China.

- [10] Bakhtiarzadeh, H., Polat, A. ve Ergene, L. T., (2017). “Design and Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator Applications”, International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 25-27 May 2017, Brasov.
- [11] Yetis, H., Boztepeli, H., Yasa, Y., ve Mese, E., (2013). “Comparative Design of Direct Drive PM Synchronous Motors in Gearless Elevator Systems”, Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2-4 October 2013, İstanbul.
- [12] Rahman, M. A.ve Little, T. A., (1984). “Dynamic Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 103(6):1277-1282.
- [13] Wang, J. H., Tan, F. W. ve Jin, R. L., (2005). “Research on Low-speed Gearless Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator Drive”, International Conference on Electrical Machines and Systems, 27-29 September 2005, Nanjing.
- [14] Yang, Y., Castano, S., Yang, R., Kasprzak, M., Bilgin, B., Sathyan A., Dadkhah, H. ve Emadi, A., (2017).“Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications” IEEE Transactions on Transportation Electrification, 3(1):87-97.
- [15] Rahman, M. A ve Slemon, G., (1985). “Promising Applications of Neodymium Boron Iron Magnets in Electrical Machines” IEEE Transactions on Magnetics, 21(5):1712-1716.
- [16] Rahman, M. A., (2005). “Advances in Interior Permanent Magnet (IPM) Motor Drives”, Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, 11-15 July 2005, Durban.
- [17] Bianchi, N., Bolognani, S. ve Frare, P., (2006). “Design Criteria for High-Efficiency SPM Synchronous Motors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 21(2):396-404.
- [18] Pellegrino, G., Vagati, A., Guglielmi, P., ve Boazzo B., (2012). “Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application”, IEEE Transactions On Industry Applications, 59(2):803-811.
- [19] Skomski, R., Manchanda, P., Kumar, P., Balamurugan, B., Kashyap, A. ve Sellmyer, D. J., (2013). “Predicting the Future of Permanent-Magnet Materials”, IEEE Transactions on Magnetics, 49(7):3215-3220.
- [20] Barcaro, M. ve Bianchi, N., (2014). “Interior PM Machines Using Ferrite to Replace Rare-Earth Surface PM Machines”, IEEE Transactions On Industry Applications, 50(2):979-985.
- [21] Jahns, T. M., Kliman, B. ve Neumann, T. W., (1986). “Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives”, IEEE Transactions On Industry Applications, IA-22(4):738-747.
- [22] Gürleyen, H., Palavicino, P. C., Meşe, E., ve Sarlıoğlu, B., (2017). “D- and Q-axis Inductance Calculation of IPMSM Using Approximate Analytical Model”,

IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 22-24 June 2017, California.

- [23] Bianchi, N., Degano, M. ve Fornasiero, E., (2015). "Sensitivity Analysis of Torque Ripple Reduction of Synchronous Reluctance and Interior PM Motors" IEEE Transactions On Industry Applications, 51(1):187-195.
- [24] Alberti, L., Barcaro, M. ve Bianchi, N., (2012). "Design of a Low Torque Ripple Fractional-slot Interior Permanent Magnet Motor", IEEE Transactions On Industry Applications, IA-50(3):1801-1808.
- [25] Han, S-H., Jahns, T. M. ve Soong, W. L., (2007). "Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using the Principle of Mutual Harmonics Exclusion" 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 23-27 September 2007, Kowloon.
- [26] Han, S-H., Jahns, T. M. ve Soong, W. L., Güven, M. K. ve Illindala, M. S., (2010). "Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Stators With Odd Number of Slots Per Pole Pair", IEEE Transactions on Energy Conversion, 25(1):118-127.
- [27] Barcaro, M. ve Bianchi, N., (2012). "Torque Ripple Reduction in Fractional-Slot Interior PM Machines Optimizing the Flux-Barrier Geometries", XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2-5 September 2012, Marseille.
- [28] Toulabi, M. S., Salmon, J. ve Knight, A. M., (2015). "Design and Performance Assessment for the V Shaped Magnet IPM Synchronous Motor", 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) , 10-13 May 2015, Coeur d'Alene.
- [29] Du, Z. S. ve Lipo, T. A., (2017). "Efficient Utilization of Rare Earth Permanent-Magnet Materials and Torque Ripple Reduction in Interior Permanent-Magnet Machines", IEEE Transactions On Industry Applications, 53(4):3485-3495.
- [30] Carraro, E., Degano M., Morandin, M. ve Bianchi N., (2014). "PM Synchronous Machine Comparison for Light Electric Vehicles", IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 17-19 December 2014, Florence.
- [31] Strakosch, G. R. ve Caporale, R. S., (2010). The Vertical Transportation Handbook, 4. Basım, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [32] Duru, H. T. ve Demiröz, R., (2009). "Asansörlerde Modern Dişlisiz Tahrik Sistemleri ve Enerji Verimliliği", III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli.
- [33] Duru, H. T. ve Demiröz, R. ve Toktaş, Y., (2005). "Asansör Sistemlerinde Doğrudan Tahrik Ve Mıknatıs Uyarmalı Senkron Motor Kullanılarak Enerji Verimliliğinin Yükseltilmesi", 1. EVK Sempozyumu, Kocaeli.
- [34] Duru, H. T. ve Demiröz, R., (2008). "Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde kullanılan Mıknatıs Uyarmalı Senkron Motorların Çalışma ve Boyutlandırma İlkeleri", Asansör Sempozyumu, İzmir.
- [35] EN81-1, (1998). European Elevator Standards, CEN, Brussels.

- [36] Pellegrino, G., Jahns, T. M., Bianchi, N., Soong, W. L. ve Cupertino, F., (2016). “The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors”, Springer Nature, Switzerland.
- [37] Lewis, L. H. ve Jimenez-Villacorta, F., (2013). “Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation”, Metallurgical and Materials Transactions A., 44(1):1-20.
- [38] Gündoğdu, T., (2012). Development of Salient-Pole Synchronous Machines by Using Fractional Slot Concentrated Winding Technique & Additional Permanent Magnets, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] Ohm, D. Y., (1997). Dynamic Model of PM Synchronous Motors, Drivotech, Inc., Blacksburg, Virginia.
- [40] Chapman, P. L., (2002). The Power Electronics Handbook, 2.Basım, CRC Press LLC, Florida.
- [41] Hendershot, J. R. ve Miller, T. J. E., (1994). Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford.
- [42] Fasolo, A., Alberti, L. ve Bianchi, N., (2014). “Performance Comparison Between Switching-Flux and IPM Machines With Rare-Earth and Ferrite PMs”, IEEE Transactions On Industry Applications, 50(6):3708-3715.
- [43] Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S. ve Xu, J., (2013). “Optimal Slot/Pole and Flux-Barrier Layer Number Combinations for Synchronous Reluctance Machines”, Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 27-30 March 2013, Monaco.
- [44] Yetis, H. ve Mese, E., (2017). “ Design of IPM Synchronous Motor for Gearless Elevator Applications”, International Conference on Engineering Technology and Innovation (ICETI), 22-26 March 2017, Sarajevo.
- [45] IEC 60034-1, (1999), International Electrotechnical Commission International Standard, IEC 1999 Copyright, Switzerland.
- [46] Kang, J., (2009). General Purpose Permanent Magnet Motor Drive without Speed and Position Sensor, Yaskawa Electric America, Inc.
- [47] Sanada, M., Hiramoto, K., Morimoto, S. ve Takeda, Y., (2004). “Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement”, IEEE Transactions On Industry Applications, 40(4):1076-1082.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hicret YETİŞ
Doğum Tarihi ve Yeri : 22.06.1991 / Tekirdağ
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : hicretyetis@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Turgut Özal Anadolu Lisesi	2009

YAYINLARI

Bildiri

1. Yetis, H., Boztepeli, H., Yasa, Y., ve Mese, E., (2013). “Comparative Design of Direct Drive PM Synchronous Motors in Gearless Elevator Systems”, Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2-4 October 2013, İstanbul.
2. Yetis, H. ve Mese, E., (2017). “ Design of IPM Synchronous Motor for Gearless Elevator Applications”, International Conference on Engineering Technology and Innovation (ICETI), 22-26 March 2017, Sarajevo.

