KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI MANYETİK YATAKLARIN MANYETİK EŞDEĞER DEVRE VE 2B SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE MODELLENMESİ VE TASARIMI

MEHMET GÜLEÇ

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI MANYETİK YATAKLARIN MANYETİK EŞDEĞER DEVRE VE 2B SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE MODELLENMESİ VE TASARIMI

MEHMET GÜLEÇ

Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. İbrahim ŞENOL
Jüri Üyesi, YTÜ .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 18.01.2013

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

1980'li yıllardaki teknolojik gelişimlere bağlı olarak elektronik ürünlerin gelişmesi ve doyumu yüksek olan yeni ferromanyetik malzemelerin keşfiyle manyetik yataklar hakkında araştırmalar hız kazanmıştır. Özellikle yüksek hızlı uygulamalarda ve sistemi dengede tutma amaçlı tercih edilen manyetik yataklar, tasarım ve üretim anlamında az bilinen ve uygulanan bir manyetik sistemdir. Bu çalışma günümüzün gözde araştırma konularından olan manyetik yataklar hakkında manyetik modelleme, tasarım ve sonlu elemanlar analizi konularını içermektedir. Çalışma kapsamında klasik ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatağın manyetik modellemesi, tasarımı, sonlu elemanlar yöntemi ile elektromanyetik analizi yapılmış ve iki farklı tip manyetik yatak karşılaştırılmıştır. Klasik ve sürekli mıknatıslı manyetik yatakların tasarım avantaj ve dezavantajları analizlerle ortaya konulmuştur.

Lisans tez çalışmam dâhil özellikle yüksek lisans tez çalışmam boyunca akademik çalışma ruhunu, farklı, özgün düşünmeyi ve ömür boyu eğitim, araştırma ve öğrenme felsefesini aktarmaya çalışan ve desteklerini her zaman yakından hissettiğim, bilgileri ile çalışmama yapmış olduğu katkılarından dolayı değerli danışmanım ve hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Metin AYDIN' a teşekkür ederim. Ayrıca, kıymetli bilgilerini paylaşarak destek veren laboratuvar arkadaşım Arş. Gör. Ersin YOLAÇAN'a, MDS Motor LTD. ŞTİ. Ar-Ge mühendisi Yücel DEMİR'e ve Akım Metal A.Ş. mekatronik takım lideri Oğuzhan OCAK'a manyetik yatakların elektromanyetik analizlerinde yapmış olduğu yardımlardan dolayı teşekkürü borç bilirim. Manyetik yatakların elektromanyetik analizlerini gerçekleştirmek için kullandığımız yazılımından dolayı CEDRAT firmasına ve sağladığı desteklerden dolayı ayrıca TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Spor ve kültürel anlamda her zaman bana destek olan ve yoğun tez çalışmalarım boyunca beni destekleyen Kocaeli Üniversitesi Dağcılık ve Doğa Sporları Kulübü sporcularına ve kıymetli hocam Prof. Dr. Kuvvet LORDOĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Özel olarak hayatım boyunca desteklerini bir an olsun esirgemeyen ve beni bugünlere getiren aileme, lisans ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca her türlü desteğini ve yardımlarını yanında hissettiğim eşim Berna'ya sonsuz minnet duygularımı sunarım. Onların desteği olmadan çalışmanın hayata geçirilmesi imkânsız olurdu.

Ocak – 2013 Mehmet GÜLEÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR vi
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 4
2. MANYETİK YATAKLAR 11
2.1. Manyetik Yatakların Sınıflandırılması 14
2.2. Aktif Manyetik Yatak Temel Prensipleri 25
2.3. Aktif Manyetik Yataklarda Kullanılan Malzemeler 30
3. KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI İKİ FARKLI TİP MANYETİK YATAĞIN MANYETİK MODELLENMESİ VE TASARIMI 36
3.1. Manyetizma ve Elektromanyetizma 36
3.2. Manyetik Modelleme 37
3.3. Temel Manyetik Devrelerin Modellenmesi 40
3.4. Mıknatıslı Manyetik Devrelerin Modellenmesi 46
3.5. Klasik Manyetik Yatağın Manyetik Devre ile Modellenmesi 52
3.6. Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatağın Manyetik Modellenmesi 63
3.7. Klasik ve Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatağın Tasarımı 71
4. KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI MANYETİK YATAKLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 84
4.1. Sonlu Elemanlar Analizi 84
4.2. Klasik Manyetik Yatağın Sonlu Elemanlar Analizi 87
4.3. Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatağın Sonlu Elemanlar Analizi 95
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 109
KAYNAKLAR 111
EKLER 115
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 120
ÖZGEÇMİŞ 121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Manyetik yataklanmış bir kompresör 7
Şekil 1.2. NASA G2 uzay modülü 8
Şekil 1.3. MAGLEV trenlerinin çalışma prensibi 8
Şekil 1.4. Manyetik yatak kullanılan kalp pompası 9
Şekil 2.1. (a) Elektrik motoru ve (b) manyetik yatakların yapıları 12
Şekil 2.2. Manyetik yatakların yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması 14
Şekil 2.3. Kuvvet hesaplamasına göre manyetik yatakların sınıflandırılması 15
Şekil 2.4. Akı yönlerine göre manyetik yatakların sınıflandırılması 18
Şekil 2.5. Heteropolar manyetik yatağın akı yolları 18
Şekil 2.6. Üretilmiş radyal akılı manyetik yatak 19
Şekil 2.7. Homopolar manyetik yatağın radyal akı yolları 20
Şekil 2.8. Üretilmiş homopolar manyetik yatak 21
Şekil 2.9. 8 oluklu homopolar manyetik yatağın eksenel akı yolları 21
Şekil 2.10. Eksenel manyetik yatağın akı yolları 22
Şekil 2.11. Eksenel manyetik yatak diski 23
Şekil 2.12. Konik manyetik yatağın akı yolları 24
Şekil 2.13. Prototip konik manyetik yatak 25
Şekil 2.14. Manyetik süspansiyon sistemi çalışma prensibi 26
Şekil 2.15. Rotora etkiyen bileşke kuvvet ve akım-kuvvet ilişkisi 27
Şekil 2.16. Aktif manyetik yatağın blok diyagramı 28
Şekil 2.17. Elektrik motoruna ait aktif manyetik yatak blok diyagramı 29
Şekil 2.18. Konik manyetik yatak blok diyagramı 30
Şekil 2.19. Farklı sac malzemelerinin doyum grafikleri 31
Şekil 3.1. Elektrik ve manyetik eşdeğer devresi 39
Şekil 3.2. Çelik nüveye sarılmış bir bobinin manyetik eşdeğer devresi 40
Şekil 3.3. Manyetik devrenin akı çizgileri 42
Şekil 3.4. Hava aralığındaki akı yollarının gösterilmesi 43
Şekil 3.5. Hava aralığındaki akının modellenmesi 43
Şekil 3.6. Manyetik eşdeğer devrede kaçak akıların modellenmesi 44
Şekil 3.7. Akı yoğunluğunun hava aralığına göre değişimi 45
Şekil 3.8. Elektromıknatıstaki hava aralığının tam olarak modellenmesi 46
Şekil 3.9. Sürekli mıknatıslı bir devrenin manyetik eşdeğer devresi 46
Şekil 3.10. Sürekli mıknatısın çalışma bölgesi 48
Şekil 3.11. Sürekli mıknatıslı bir devredeki akı çizgileri 49
Şekil 3.12. Sürekli mıknatıs kaçak akıları 50
Şekil 3.13. Sürekli mıknatıslı tam manyetik eşdeğer devre 50
Şekil 3.14. Akı yoğunluğunun hava aralığına göre değişimi 51
Şekil 3.15. SM nüvede hava aralığının tam olarak modellenmesi 52
Şekil 3.16. Klasik manyetik yatak kesiti ve akı yolları 53
Şekil 3.17. Klasik MY manyetik eşdeğer devresi 54
Şekil 3.18. Manyetik yatağın kesit görüntüsü ve akı yolu 55
Şekil 3.19. Elektromıknatısın manyetik eşdeğer devresi 55
Şekil 3.20. Elektromıknatısın yaklaşık manyetik eşdeğer devresi 61

Şekil 3.21. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak kesiti 63
Şekil 3.22. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresi 65
Şekil 3.23. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın kesit görüntüsü ve akı yolu 66
Şekil 3.24. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresi 67
Şekil 3.25. Manyetik eşdeğer devrenin süper pozisyon devreleri 69
Şekil 3.26. MATLAB GUI program ara yüzü 72
Şekil 3.27. Ara yüz programının manyetik yatak parametre çıkarması 72
Şekil 3.28. Kuvvetin hava aralığına göre değişimi 74
Şekil 3.29. Kuvvetin akıma göre değişimi 75
Şekil 3.30. Kuvvetin amper-sarım sayısına göre değişimi 75
Şekil 3.31. Etkiyen kuvvetin farklı parametrelere göre değişimi 76
Şekil 3.32. Manyetik yatağın çalışma noktaları 77
Şekil 3.33. Etkiyen kuvvetin hava aralığına göre değişimi 79
Şekil 3.34. Etkiyen kuvvetin akıma göre değişimi 80
Şekil 3.35. Etkiyen kuvvetin amper-sarım miktarına göre değişimi 80
Şekil 3.36. Etkiyen kuvvetin farklı parametrelere göre değişimi 81
Şekil 3.37. SM manyetik yatağın çalışma noktaları 82
Şekil 4.1. Dairenin sonlu elemanlar ile çevrenin hesaplanması 84
Şekil 4.2. Klasik manyetik yatağın SEA modeli 87
Şekil 4.3. Klasik manyetik yatağın ağ yapısı 88
Şekil 4.4. Klasik manyetik yatağın sargı yapısı ve özellikleri 88
Şekil 4.5. Klasik manyetik yatağın akı yoğunluğu değişimi 89
Şekil 4.6. Klasik manyetik yatağın akı yolları 90
Şekil 4.7. Hava aralığındaki akı yoğunluğu 91
Şekil 4.8. Hava aralığındaki akı yoğunluğu 91
Şekil 4.9. 0,1 mm hava aralığına sahip MY kuvvet akım grafiği 92
Şekil 4.10. Etkiyen kuvvetin hava aralığına göre değişimi 93
Şekil 4.11. Kuvvetin akıma göre değişimi 93
Şekil 4.12. Farklı hava aralığına sahip MY kuvvet–akım grafiği değişimi ve SEA manyetik eşdeğer devre ile karşılaştırılması 94
Şekil 4.13. SM manyetik yatağın SEA modeli 95
Şekil 4.14. SM manyetik yatağın ağ yapısı 96
Şekil 4.15. SM manyetik yatağın yüksüz durum akı yoğunluğu 97
Şekil 4.16. SM manyetik yatağın yüksüz durum akı çizgileri 97
Şekil 4.17. SM kutup yönleri ve rotora etkiyen kuvvetler 98
Şekil 4.18. Yüksüz durum hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi 99
Şekil 4.19. SM manyetik yatağın yüklü durum akı yoğunluğu 100
Şekil 4.20. SM manyetik yatağın akı yolları 101
Şekil 4.21. Hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi 102
Şekil 4.22. SM manyetik yatağın tek bir manyetik devresi 103
Şekil 4.23. Kuvvetin hava aralığına göre değişimi 103
Şekil 4.24. Tek bir manyetik devrenin rotora etkilediği kuvvet 104
Şekil 4.25. Rotora hava objelerinin eklenmesi 105
Şekil 4.26. SM manyetik yatağın akı yoğunluğu 106
Şekil 4.27. SM manyetik yatağın akı yolları 106
Şekil 4.28. Hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi 107
Şekil 4.29. SM MY ait kuvvetin değişimi 108
Şekil 4.30. SM MY ait kuvvetin değişimi 108

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Sürekli mıknatısların karşılaştırılması 34
Tablo 3.1. Manyetik ve elektrik devre elemanları benzetim modeli..... 38
Tablo 3.2. Klasik manyetik yatağın ön tasarım fiziksel parametreleri 73
Tablo 3.3. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın ön tasarım fiziksel parametreleri 78
Tablo 3.4. Klasik ve SM manyetik yatağın çalışma akımları 83

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A : Kesit alanı, (mm^2)
B : Manyetik akı yoğunluğu, (T)
B_c : Sac malzemesindeki akı yoğunluğu, (T)
B_g : Hava aralığındaki akı yoğunluğu, (T)
B_y : Hava aralığındaki yaklaşık akı yoğunluğu, (T)
B_m : Sürekli mıknatıs çalışma akı yoğunluğu, (T)
B_{pm} : Sürekli mıknatıs akı yoğunluğu, (T)
B_r : Kalıcı manyetik akı yoğunluğu, (T)
d : Paket uzunluğu, (m)
D : Elektrik akı yoğunluğu, (coulomb/m^3)
E : Elektriksel alan, (V/m)
f : Kuvvet, (N)
F : Elektromanyetik kuvvet, (N)
F_y : Yaklaşık elektromanyetik kuvvet, (N)
g : Hava aralığı mesafesi, (m)
H : Manyetik alan şiddeti, (A/m)
H_c : Kalıcı manyetik alan şiddeti, (A/m)
H_g : Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti, (A/m)
H_m : Sürekli mıknatıs çalışma manyetik alan şiddeti, (A/m)
i : Akım, (A)
J : Atalet momenti, (Kgm^2)
J_i : İletkenlik akım yoğunluğu, (A/m^2)
l_c : Nüve akı yolu uzunluğu, (m)
l_{pm} : Sürekli mıknatıs akı yolu uzunluğu, (m)
l_r : Rotor akı yolu uzunluğu, (m)
l_s : Stator akı yolu uzunluğu, (m)
L : Endüktans, (H)
L_y : Yaklaşık endüktans, (H)
N : Sarım sayısı
Q : Elektriksel yük, (c)
R : Direnç, (Ω)
v : Hız, (m/sn)
V : Gerilim, (V)
w_{pm} : Sürekli mıknatıs genişliği, (m)
w_r : Rotor genişliği, (m)
w_s : Stator genişliği, (m)
w_t : Stator diş genişliği, (m)
W : Enerji, (Watt)

x : Yer değiştirme, (m)
μ_0 : Havanın manyetik geçirgenliği, (H/m)
μ_{pm} : Sürekli mıknatısın manyetik geçirgenliği, (H/m)
μ_r : Sac malzemesinin manyetik geçirgenliği, (H/m)
λ : Toplam akı, (t-Wb)
λ_y : Yaklaşık toplam akı, (t-Wb)
$\Re$: Relüktansı, (A-t/Wb)
$\Re_c$: Sac malzemesinin relüktansı, (A-t/Wb)
$\Re_g$: Hava aralığının relüktansı, (A-t/Wb)
$\Re_{lk}$: Hava aralığı kaçak akı relüktansı, (A-t/Wb)
$\Re_{pm}$: Sürekli mıknatıs relüktansı, (A-t/Wb)
$\Re_{pm\text{-}lk}$: Sürekli mıknatıs kaçak akı relüktansı, (A-t/Wb)
$\Re_r$: Rotor relüktansı, (A-t/Wb)
ϕ : Akı, (Wb)
ϕ_r : Sürekli mıknatıs akısı, (Wb)
ϕ_y : Yaklaşık akı, (Wb)
ϕ_{sp1} : Birinci süper pozisyon devre akısı, (Wb)
ϕ_{sp2} : İkinci süper pozisyon devre akısı, (Wb)

Kısaltmalar

AC : Alternative Current (Alternatif Akım)
AMY : Aktif Manyetik Yatak
DC : Direct Current (Doğru Akım)
EMK : Elektro Motor Kuvvet
MMK : Manyeto Motor Kuvvet
MY : Manyetik Yatak
SE : Sonlu Elemanlar
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi
SM : Sürekli Mıknatıs

KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI MANYETİK YATAKLARIN MANYETİK EŞDEĞER DEVRE VE 2B SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE MODELLENMESİ VE TASARIMI

ÖZET

Manyetik yatak, en basit olarak döner alanları sürtünmesiz bir şekilde havada dengede tutan ve elektromanyetik esaslara göre çalışan bir sistemdir. Ferromanyetik malzemelerin ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte manyetik yataklar hakkındaki araştırmalar artmış ve manyetik yatakların gelişimi büyük bir hız kazanmıştır. Manyetik yataklar sağladıkları avantajlarıyla özel uygulamalarda giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Mekanik yatakların performansının yetersiz kaldığı ve veya kullanılmasının mümkün olmadığı uygulamalarda manyetik yataklar verimli ve kararlı yapılarıyla rahatlıkla kullanılmaktadır. Manyetik yatakların araştırma konuları tasarım ve kontrol olmak üzere iki temel disipline ayrılmıştır. Bu çalışmada manyetik yatak tasarımına odaklanılmıştır. Klasik ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatağın manyetik modellenmesi, tasarımı ve sonlu elemanlar analizlerine yer verilmiş ve iki farklı tip manyetik yatağın karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktif Manyetik Yatak, Manyetik Modelleme, Manyetizma, Sonlu Elemanlar Analizi, Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatak.

MODELLING AND DESIGN OF CONVENTIONAL AND PERMANENT MAGNET MAGNETIC BEARINGS WITH MAGNETIC EQUIVALENT CIRCUIT AND 2D FINITE ELEMENT ANALYSIS

ABSTRACT

The simplest way, balance the rotating fields without friction and working with electromagnetic principles systems are called magnetic bearings. With developing ferromagnetic materials and technology, researches over magnetic bearings are increased and improve of magnetic bearings are widely accelerated. Due with many advantages at special applications in industry, magnetic bearings are mostly used. With equilibrium structures, magnetic bearings can be used easily where mechanical bearings are not useful or not possible to use in places. Control and design are two main research areas in magnetic bearings. This study focuses on the design of magnetic bearings. Magnetic modeling, design and FEA are done for two different kind of magnetic bearings and two different kind of magnetic bearings, classic and PM magnetic bearings are compared and cons-pros are explained.

Keywords: Active Magnetic Bearings, Magnetic Modeling, Magnetism, Finite Elements Analysis, PM Magnetic Bearings.

GİRİŞ

Bilim ve teknolojinin hızlı gelişim sürecinde birçok çeşitli ürün ortaya çıkmış veya ihtiyaçlar doğrultusunda icat edilmiştir. Dönen mekanizmalar insanoğlunun ilk yıllarından beri hayatını kolaylaştırmış ve ihtiyaçlarına çözüm bulmuştur. Mısırlardan başlayarak 21. yüzyıla gelesiye kadar dönen mekanizmalar hayatımızın her alanında farklı uygulamalarda bizlere eşlik etmektedirler. Tekerleğin keşfinden bu yana günümüze kadar dönen mekanizmaların yataklama yani dengeleme ihtiyacı olduğu aşikârdır. Dönen mekanizmaların yataklanması genellikle mekaniksel olarak sağlanmaktadır. Mekanik yataklar dönen alanlar ile sabit alanlar arasında mekanik bir bağ kurarak yataklamayı ve dengelemeyi sağlar. Fakat bu yataklama enerji kaybı, verim düşüklüğü, mekaniksel bağlantı ve düzenli bakım gerektirmesi gibi dezavantajları barındırır. Günümüzde ihtiyaçlar doğrultusunda çok yüksek devir sayılarına ulaşan dönen mekanizmalar geliştirilmiştir. Bu sistemlerin yataklanması mekaniksel olarak mümkün değildir. Günümüzün birçok modern uygulamasında yataklamayı sağlamak için farklı disiplinlerin teknolojileri kullanılarak gelişmiş teknikler uygulanmaktadır. Bu yataklama tekniklerin başında manyetik yatak gelmektedir.

Manyetik yataklar, mekanik yatakların aksine yatak içindeki dönen mekanizmaları yani rotor ve mili, yatağa temas ettirmeksizin sürtünmesiz bir şekilde havada dengede kalmasını sağlayan bir sistemlerdir. Manyetik yataklarda mil ile yatak arasında mekanik bir bağlantı olmadığı için klasik mekanik yatakların dezavantajlarını barındırmazlar. Manyetik yataklama sayesinde döner sistemlerde yağlama ve bakım gerektirmeksizin sessiz bir şekilde çok yüksek hızlara ulaşmak mümkün kılınmıştır. Manyetik yataklar barındırdıkları avantajlarıyla günümüzde standart ve standart dışı birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, klasik ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatağın manyetik devre temelli modellenmesi yapılmış, modellenmesi yapılan manyetik yatakların tasarımı tamamlanmıştır. Manyetik yatakların sonlu elemanlar yöntemi ile

elektromanyetik analizi yapılmış ve çıkan sonuçlar manyetik modelleme ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar genel olarak beş bölümde incelenmiştir:

Bölüm 1'de manyetik yataklar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Manyetik yatakların tarihsel gelişim süreci anlatılmış, manyetik yatakların endüstri uygulamaları hakkında çeşitli örnekler verilmiş ve manyetik yataklar hakkında literatür araştırması anlatılmıştır.

Bölüm 2'de manyetik yatakların çalışma prensibi detaylı bir şekilde anlatılmış. Manyetik yatak çeşitleri ele alınmış ayrıca manyetik yataklarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin incelenmesi yapılmıştır.

Bölüm 3'de klasik ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatağın manyetik devre temelli modellemesi detaylı olarak anlatılmıştır. İki farklı tip manyetik yatağın kitabına uygun bir şekilde tam ve yaklaşık eşdeğer manyetik devre modelleri çıkartılmıştır. Geliştirilen bir ara yüz programı ile manyetik eşdeğer devre modellerinden yola çıkarak istenilen fiziksel boyutlarda ve kuvvet değerlerinde manyetik yatak parametreleri elde edilmiştir.

Bölüm 4'de tasarımı tamamlanan aktif ve sürekli mıknatıslı manyetik yatakların sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk başta sonlu elemanlar analizi kullanılarak iki farklı tip manyetik yatak 2 boyutlu olarak modellenmiş ve elektromanyetik analizleri yapılmıştır. Elektromanyetik analiz sonucuna göre iki farklı tip manyetik yatağın kuvvet akım grafikleri çıkartılmış ve manyetik modelleme sonuçları ile karşılaştırmalar yapılarak yorumlanmıştır.

Bölüm 5'de bu çalışmadan elde edilen tüm çıktılar özet halinde sunularak genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca bundan sonra yapılabilecek çalışmalar ve iyileştirmeler hakkında fikirler sunulmuştur.

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde üniversitelerde üzerinde tam anlamıyla bilimsel olarak çalışma yapılmamış olan aktif ve sürekli mıknatıslı farklı iki tip manyetik yatak için modelleme, tasarım ve sonlu elemanlar analizlerini yapmaktır. Bu sayede günümüzde özellikle ulaşım, taşıma, sağlık, gıda ve uzay endüstrileri gibi birçok

farklı alanda yaygın olarak kullanılan manyetik yatakların modern teknikler kullanarak güvenilir yazılımlar sayesinde modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiş olacaktır. Çalışmanın temel amacı aktif ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatak modellemesi ve tasarımı yapmak, sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek ve iki farklı tip manyetik yatağın karşılaştırılmasını yapmaktır.

1. GENEL BİLGİLER

Manyetik yatak kavramının temeli 19. yüzyılın sonlarına doğru yapılan çalışmalara dayanır. 1842 yılında Samuel Earnshaw ilk defa manyetik askı sistemi ile ilgili çalışmalarda bulunmuştur. Samuel Earnshaw'ın kendi adıyla anılan Earnshaw teoremi temelleri Maxwell kanunlarına dayanmaktadır. Earnshaw teoremine göre statik bir mıknatıs kullanarak yerçekimine karşı kararlı bir şekilde askıda kalmanın olanaksız olduğunu ortaya koymuştur [1]. Bu çalışma pasif manyetik yatakların temelini oluşturmaktadır. 1930'lu yıllara kadar pasif sistemlerin olduğu çalışmalar görülmektedir.

Teknolojinin gelişmesi, yüksek hızlara çıkan sistemlerde mekaniksel yatakların yetersiz kalması ve cisimleri havada dengede tutma merakı aktif manyetik yataklar ile ilgili araştırmaların artmasına neden olmuştur. Akif manyetik yatak sistemi ile ilgili ilk çalışma 1946 yılında yapılmıştır. Jesse Beams Manatthan Projesi kapsamında fotoelektrik sensörlerinden geri beslemeli olacak şekilde atom bombasında kullanılmak üzere ultra santrifüj motorunu manyetik olarak yataklamaya çalışmış fakat bilgisayar ve elektronik malzemelerin yetersiz olması sebebiyle çalışmasını sonlandıramamıştır [2]. Jesse Beams bu çalışmasıyla manyetik yatakların kurucu olarak nitelendirilir.

Bilgisayar teknolojisinin ve yarıiletken malzemelerin gelişmesiyle birlikte 1950'li yıllardan itibaren manyetik yataklarla ilgili çalışmalar tam anlamıyla başlamıştır. 1957 yılında aktif manyetik yataklar ile ilgili ilk patent Fransa Patent Enstitüsü'nden Hispana Suiza şirketi tarafından alınmıştır [3]. 1962 yılında ise D. Nieman dönen mil sistemleri için elektrik ve manyetik kuvvetlerin kullanılmasıyla eksenel olarak yataklamayı icat ettiğini ilan eden bir çalışma yayınlamıştır [4]. 1970'li yılların sonlarında Habermann'nın [5] ve Schewitzer'in [6] aktif manyetik yataklar ile ilgili çalışmaları gelmiştir. Bu çalışmalarda esnek rotorlar ile ilgili çalışmalar yapılmış, rotor titreşimlerinin azaltılması sağlanmıştır. 1970'li yıllardan başlayarak manyetik yataklar hakkında patent alımları ve endüstri uygulamaları hız kazanmıştır. 1978

yılında Studer sürekli mıknatıslı manyetik yatak tasarımını literatüre kazandırmış ve manyetik yatakların yeni tasarım yönünü belirlemiştir [7]. Sürekli mıknatısların manyetik yataklara uygulanmasıyla sürekli mıknatıslı manyetik yataklar veya hibrid manyetik yataklar giderek artan bir şekilde özellikle enerji verimliliği gerektiren uzay araçlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu hızlı gelişimler sayesinde manyetik yatakların uygulama alanları artmıştır. 1988 yılında İşviçre'de Schewitzer, Okada ve Allarie tarafından ilk defa uluslararası manyetik yatak sempozyumu düzenlenmiştir.

Sürekli mıknatısların keşfi manyetik yatak tasarım yönünden farklı topolojilerin doğmasına sebep olmuştur. Sürekli mıknatısların yüksek manyetik akı yoğunluklarını kazanması ve doyumu yüksek ferromanyetik malzemelerin elde edilmesiyle manyetik yatakların çalışma prensibini değiştiren çalışmalar ortaya konulmuştur. Bu çalışmalarda manyetik yatak hem dengelemeyi sağlamakta hem de başka bir tahrik kaynağına ihtiyaç duymadan rotoru ve mili döndürebilmektedir. Literatürde bu tür yapılara yataksız veya kendinden yataklı motor denilmektedir. Yataksız motorlar hakkında Bosch, Okada, Chiba, Fukao, Bichel, Ohishi ve Salazar'ın birçok çalışması mevcuttur. Nihayet 1992 yılında Okada ve Ohishi yataksız motorlar hakkında ilk patenti almıştır [8]. 1998 yılında günümüz manyetik yatak tasarımlarının temelini oluşturun sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili çalışma Antilla, Lantto ve Arkkio tarafından yapılmıştır [9]. Bu çalışmada radyal manyetik yatağın kuvvet ve parametre doğrusallaştırma çalışmaları yapılmıştır.

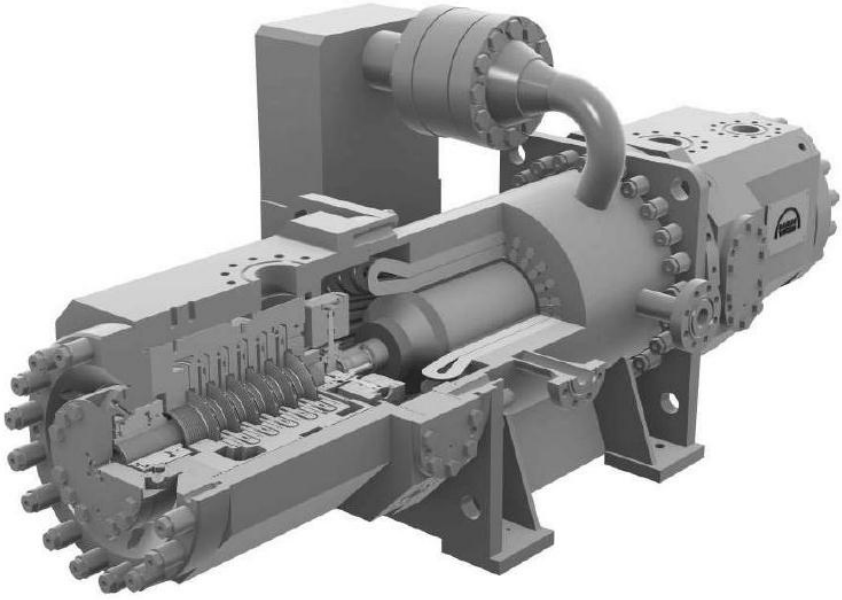
1990'lı yıllara kadar manyetik yatakların kontrol sistemlerinde kullanılan bilgisayar donanımlarının ve yarıiletken elektronik malzemelerin maliyetinin yüksek olması manyetik yatakların endüstri uygulamalarını kısıtlamıştır. 1990'lı yıllara gelindiğinde kontrol sistemlerinin ucuzlaması ve endüstride manyetik yataklara duyulan ihtiyaçlar sayesinde manyetik yataklar endüstriye kolaylıkla uygulanabilir hale gelmiştir.

2000'li yıllara gelindiğinde ise süperiletken malzemelerin kullanıldığı manyetik yataklar hakkında araştırmalar hız kazanmıştır. Özellikle uzay teknolojisinin baş döndüren gelişimi ile artık daha az enerji harcayan daha az yakıt ile maksimum verimde ortam sıcaklığının çok yüksek olma durumunda bile verimle çalışan uzay araçlarına ihtiyaç duyulmuştur. Süperiletken manyetik yatakların pasif manyetik yataklar gibi çalışması aktif bir kontrol sistemine ihtiyaç duyulmaması süperiletken

manyetik yatakların gelişimine hız kazandırmıştır. 20. yüzyılın sonlarından itibaren süperiletken manyetik yataklar hakkında çalışmalar yapmıştır [10]. 2005 yılında İchihara ve arkadaşları 10KW gücünde uzay aracına süperiletken manyetik yatak uygulamasını anlatan makalesini yayınlamışlardır [11]. Bu araştırmada YBCO süperiletken malzemenin kullanıldığı, dıştan rotorlu uzay aracının rotoru da sürekli mıknatıs kullanıldığı radyal akılı süperiletken manyetik yatak uygulaması anlatılmıştır. Maslen ve İchihara'nın yapmış oldukları çalışmalar ile süperiletken manyetik yatak tasarımları uygulamaları günümüzde özellikler uzay araçlarında ve yüksek hızlı trenlerde kullanılmaktadır. Günümüzün manyetik yataklarının temel hedefi yüksek verim, enerji verimliliği, yaklaşık sıfır bakım ile bir ömür boyu çalışma süresini sağlamasıdır.

Manyetik yatakların tasarım tekniklerinin 1930'lu yıllardan başlayarak gelişmesi, kontrol teknolojisinin ve malzemelerini hızlı gelişmesiyle birlikte 1970'li yıllardan itibaren manyetik yataklar tasarım ve üretimleri itibariyle endüstriyel uygulamalarda kullanılması artmıştır. Özellikle teknolojinin gelişmesiyle birlikte çok yüksek hızlara çıkan sistemlerin yapılması ve bu özel sistemlere uygun yataklamanın mekanik yataklama ile mümkün olmaması manyetik yatak araştırmalarını arttırmış ve manyetik yatakların bu tip özel uygulamalarda kullanılmasını sağlamıştır. Manyetik yataklar uzay, taşıma, ulaşım, sağlık, temizlik ve gıda endüstrilerinde özel ve kararlı uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. 1976 yılında kurulan S2M firması manyetik yatakları ticarileştiren ilk firma olmuştur. 1982 yılında geliştirdikleri manyetik yatağı 1985 yılında bir doğalgaz kompresörüne uygulamışlardır [12]. Manyetik yataklar sağladıkları pek çok avantajları ile birlikte günümüzde birçok farklı alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Manyetik yatakların endüstri uygulamaları ile ilgili bazı örnekler belirtilmiştir.

Manyetik yataklar petrol boru hatlarındaki kompresörlerde kullanılması endüstride sıkça rastlanmaktadır. Şekil 1.1'de MAN/Turbo firmasının geliştirdiği 6 megavat gücünde ve 6000 devir/dakika hıza ulaşabilen bir manyetik yataklamaya sahip kompresör örneği verilmiştir [13].



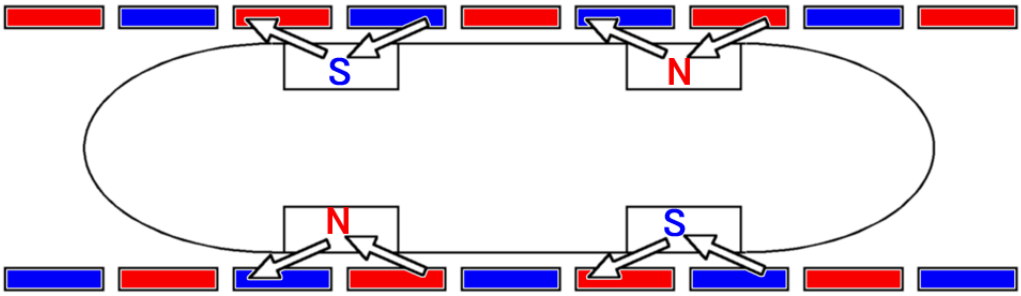
Şekil 1.1. Manyetik yataklanmış bir kompresör

Teknolojinin baş döndüren gelişmesiyle birlikte uzay bilimindeki gelişmeler ve yenilikler hız kazanmıştır. Uzay araçlarının temel özelliği enerji harcamaları az, bakım gerektirmeyecek ve bir ömür boyu kullanabilir donanımlara sahip olmasıdır. Mekanik yatakların hem verimi azaltması hem de zamanla bakım gerektirmesi gibi dezavantajlarından dolayı manyetik yataklar uzay araçları için vazgeçilmez bir eleman olmuşlardır. Özellikle süperiletken manyetik yatakların pasif olarak tasarlanması ve elektronik bir geri bildirime ihtiyaç duymaması bu tip manyetik yatakların uzay araçlarında kullanımı arttırmıştır. Şekil 1.2'de NASA tarafından üretilen uzay modülü gözükmektedir. 2004 yılında tasarımı bitirilen ve üretilen bu uzay modülü 41000 devir/dakika hızda çalışabilmektedir. G2 tip uzay modülü bir önceki versiyonu olan G1'in gelişmiş ve daha az maliyet ile daha çok verim ile çalışabilen bir üst versiyonudur. G2 tip uzay modülü tasarımı yapıldıktan sonra sadece bir ay içerisinde montajı yapılmıştır. Önceki modülün montajı ise yaklaşık 4 ay sürmüştür. G2 modülü Şekil 1.2'de verilmiştir [14].



Şekil 1.2. NASA G2 uzay modülü

Manyetik raylı trenler yani MAGLEV'lerin temeli de manyetik yataklara dayanmaktadır. MAGLEV trenlerin altında mıknatıslar vardır ve özel üretilmiş elektromıknatıs raylar sayesinde tren raylara değmeyecek şekilde havada asılı kalarak ileri yönde hareket eder. MAGLEV trenler normal trenlere göre daha ucuz ve hızlı olmalarına karşın gereksinim duydukları elektromıknatıslar ve özel raylar MAGLEV'lerin yaygın kullanımına engel olmaktadır. Başta Japonya, Almanya, Çin ve Fransa'da MAGLEV'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. 2003 yılı Aralık ayında Japonya'da JR-Maglev MLX01 treni saatte 581 km/s hız yaparak Guinness Rekorlar Kitabı'nda en hızlı MAGLEV treni unvanını almıştır. Şekil 1.3'de MAGLEV trenlerinin çalışma prensibi gösterilmiştir [15].



Şekil 1.3. MAGLEV trenlerinin çalışma prensibi

Manyetik yatakların avantajlarından bir tanesi de, çok küçük mikro boyutlardan çok büyük makro boyutlara kadar çok farklı büyüklüklerde ihtiyaçlar doğrultusunda

tasarımı yapılabilmeleridir. Manyetik yatakların özel uygulamalara tasarlanabilmesi sayesinde tıp alanındaki bazı uygulamalarda manyetik yataklar kullanılmıştır. Mekanik yataklarda bulunan yağlanma, ortam kirliliği ve bakım gereksinimleri manyetik yataklarda bulunmadığından dolayı teknolojinin gelişmesiyle kalp pompalarında manyetik yataklar kullanılmıştır. Kalp pompalarında temizlik, bir ömür boyu sürekli ve verimli çalışma gayet önemlidir. Çünkü ameliyat sonrası hastanın vücuduna yerleştirilen kalp pompasının bir ömür boyu kusursuz bir şekilde çalışması istenir. Şekil 1.4'de WorldHealth Coorperation tarafından üretilen kalp pompası gösterilmiştir [16]. Bu kalp pompasında pasif ve aktif iki tip manyetik yatak bulunmaktadır.



Şekil 1.4. Manyetik yatak kullanılan kalp pompası

Manyetik yataklar yukarıda örnekleri verildiği gibi farklı uygulamalarda değişik tasarımlarla kullanılmaktadır. Ülkemizde ise manyetik yataklar ile ilgili çalışmalar daha çok manyetik yatakların kontrolü üzerine yapılmaktadır. Ülkemizde manyetik yataklar hakkında tek araştırma grubu Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde bulunmaktadır [17]. Bu laboratuvarda manyetik yatak kontrolleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Manyetik yatak tasarımı konusunda ise ülkemizdeki üniversitelerde bugüne kadar tam anlamıyla bir çalışma yapılmamıştır. 06.01.2012 tarihi ile Yüksek Öğretim Kurumu Ulusal Tez Merkezi veri tabanında bulunan manyetik yataklar ile ilgili üniversitelerde yapılmış yüksek lisans ve doktora çalışmaları incelenmiştir [18-27].

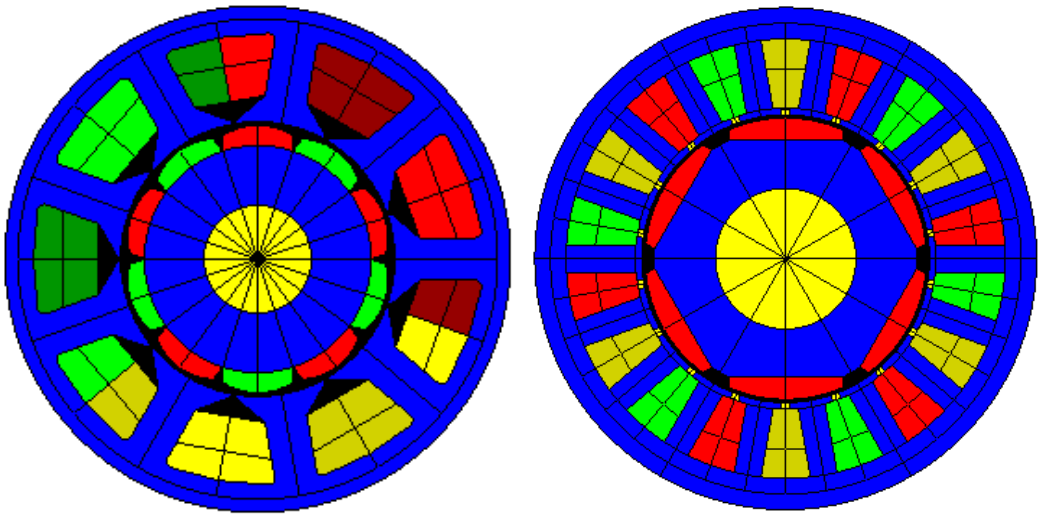
Bu çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde ve belirtilen çalışmalarda manyetik yatak tasarımı hakkında detaylı bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Hatta sürekli mıknatıslı manyetik yataklar üzerine ülkemizdeki üniversitelerde çalışma

yapılmadığı ortaya çıkmıştır. Bu çalışma bu anlamda ulusal camiada özgünlük değerine sahip ve önemli bir boşluğu dolduracak bir çalışma olacaktır. Bu sayede ülkemizde modern yazılımlar kullanılarak klasik ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatak tasarımı yapılacak, sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilecek, iki farklı tip manyetik yatağın karşılaştırılması yapılacaktır.

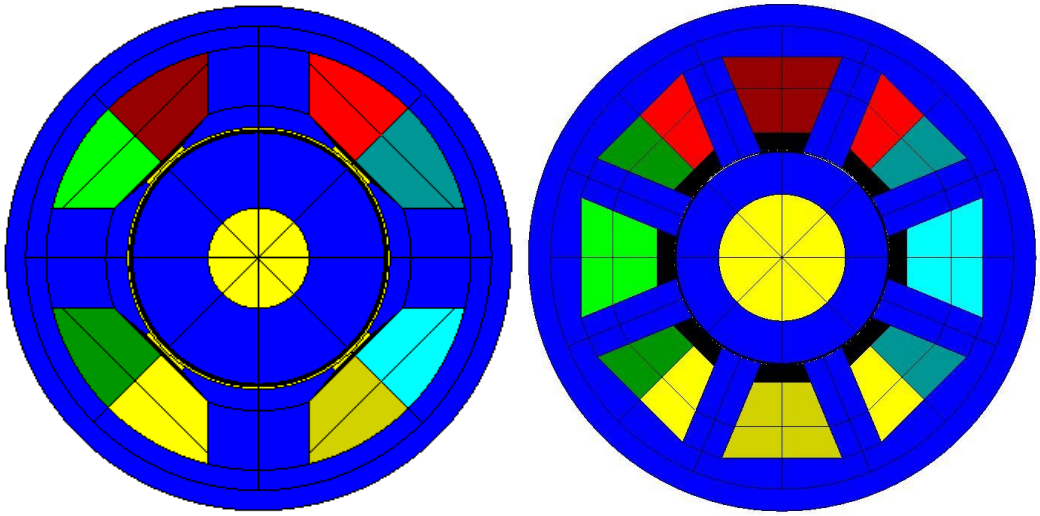
2. MANYETİK YATAKLAR

Günümüzün popüler araştırma konularından bir tanesi manyetik yataklardır. 1982 yılında Societe de Mehanique Magnetique (S2M) şirketi tarafından geliştirilen ve 1985 yılında bir doğal gaz kompresörüne uygulanan ticari ilk manyetik yataktan bu yana günümüze kadar manyetik yataklar konusunda birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmaların sonucunda manyetik yataklar birçok farklı alana uygulanmıştır. Manyetik yatak, kısaca fiziksel bir bağlantı olmaksızın motor milinin havada dengede kalmasını sağlayan bir sistemdir. Motor mili hiçbir şekilde mekaniksel sürtünme ve yağlamaya maruz kalmadığından dolayı, bu yataklama sayesinde milin çok sessiz bir şekilde yüksek hızlarda çalışması sağlanabilmektedir. Manyetik yatak temel olarak mili tam olarak başka bir ana tahrik kaynağı tarafından tahrik edilmek üzere havada asılı tutar.

Rotoru ve mili mekaniksel etkilere maruz bırakmadıklarından dolayı günümüzde çoğunlukla özel uygulamalarda ve zor koşullarda rahatlıkla kullanılmaya açık olan manyetik yataklar tam bir mekatronik uygulamalardır. Yataklarda kullanılan malzeme ve bunların fiziksel yerleşimleri için yapılan analizler mekanik kısmı, manyetik yatağın tasarımı ve yataklamayı kontrol altında tutan ve denetleyen kontrol sistemlerinin tasarımını da elektrik-elektronik kısmını oluşturmaktadır. Manyetik yataklar elektrik motorları gibi benzer bir çalışma şekline sahiptir. Fakat elektrik motorlarına göre farklı stator olukları ve sargı yapısına sahiptirler. Elektrik motorları çoğunlukla üçün katı olacak şekilde faz sayısına göre oluğa sahip iken manyetik yataklarda ise oluk sayıları çoğunlukla çift sayılardan oluşmaktadır. Manyetik yataklarda amaç elektrik motorlarının aksine bağımsız manyetik devreler oluşturmak olduğundan dolayı stator olukları elektromıknatıs çiftlerini sağlamak için genellikle ikinin katları olacak şekilde tasarımı yapılır. Ek olarak 3 oluklu manyetik yatak yapıları da literatürde mevcuttur. Şekil 2.1'de elektrik motorları ve manyetik yataklardaki yapı farklılıkları gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.1. (a) Elektrik motoru ve (b) manyetik yatakların yapıları

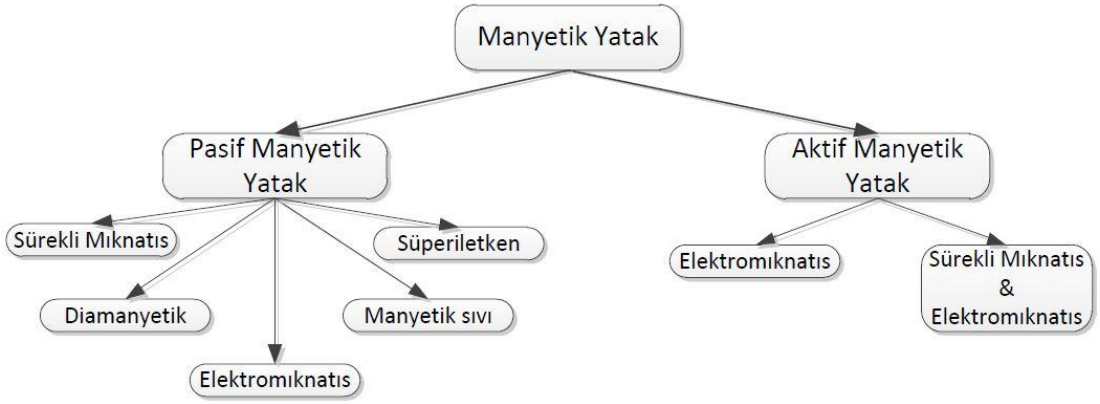
Manyetik yataklar çalışma yapıları itibariyle birçok avantaj barındırırlar. Manyetik yatakta mil, havada asılı kaldığından dönme esnasında sadece hava ile teması söz konusudur. Bu yüzden mekaniksel sürtünmeye maruz kalmaz. Manyetik yataklar temiz bir çevre için kullanımında herhangi bir olumsuz unsur içermemektedir. Yağlama sistemlerinin olmayışı yatağın kendisi ve çevre için kirlilik oluşturmaz. Bu sebeplerden dolayı mekanik bakım gerektirmez. Manyetik yatak boyutları çok büyük ölçülerde olduğu gibi çok küçük ölçülerde de yapılabilmektedir. Sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıplar normal mekanik yataklara nazaran daha az olması sebebiyle yapılan bakım sarfiyatlar oldukça azdır. Mekanik sürtünmenin olmayışı bir açıdan yapılan bakım harcamalarının olmayışı anlamına gelmektedir. Boyut bakımından her

türlü büyüklüklerde üretilebilmektedir. Üretilen yatak ağırlıkları, gram mertebelerinden kilogramlara kadar çıkabilmektedir. Manyetik yatak kontrol sistemleri, tahrik kaynağının yüksek hızda yapacağı dengesizliği ve titreşimleri otomatik olarak elimine eder ve tehlikeli durumlarda yine otomatik olarak durdurur. Bu nedenle tehlike arz edecek her durum kontrol altına alınmıştır. Titreşim yok denecek kadar azdır. Bu yüzden sessiz çalışırlar. Manyetik yataklar avantajlarının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Kullanıldığı sistemler itibari ile oldukça yüksek maliyetlere sahiptirler. Kontrol algoritmaları oldukça karmaşık bir yapıya sahiptirler. Milin dengeye alınması oldukça zahmetli ve uzun süren bir süreç gerektirir. Doğrusal olmayan bir sistem olduğundan dolayı kontrolü belli bir bilgi ve altyapıya ihtiyaç duymaktadır.

Manyetik yataklar, günümüzde giderek artan ve çok yakın zamanda birçok ülkede yaygın olarak ana ulaşım aracı haline gelecek olan hızlı tren sistemlerinin ana parçasıdır. Manyetik yataklama sayesinde günümüzde 580 km/s hızlara ulaşabilen hızlı trenler yani MAGLEV'ler üretilmiştir. Ayrıca uzay endüstrisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Manyetik yatakların yüksek emniyet ve uzun süre bakımsız kullanım sağlaması sebebiyle uzay endüstrisinde kullanımları oldukça yaygındır. Bu tür uygulamalarda yataklar daha çok uyduların momentum tekerleri üzerinde kullanılmaya başlanmıştır. Buradaki amaç uyduların uçuş tekerlerine enerjinin depolanmasıdır. Manyetik yataklar tıp alanında da kullanılmaktadır. Manyetik yatak tasarımlarını alanında kalp üzerinde yapılan çalışmalar yoğunluktadır. Bu alanlarda suni kalp için tasarımlar yapılmaktadır. Bu uygulamada manyetik yataklar yüksek emniyete sahiptir. Tasarlanan pompa geometrisinin biyolojik olarak insan vücuduyla uyum içerisinde olması, manyetik yatağın bu alanda kullanımını arttırmıştır. Manyetik yataklar, yüksek hızlarda çalışan makinalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Manyetik yatak sistemleri gıda sektöründeki yüzeysel kesicilere ve değişik alanlarda faaliyet gösteren tahrik edilen sistemlere de entegre edilebilmektedir. Diğer uygulamalar olarak da turbo makina sistemleri ve gaz kompresörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik yatakların, mekaniksel faktörlerden etkilenmemesi ve yağlama gereksinimi olmamasından dolayı çevreyi koruma amaçlı ve doğal temizleyici olarak birçok alanda olduğu gibi temizlik alanında da kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

2.1. Manyetik Yatakların Sınıflandırılması

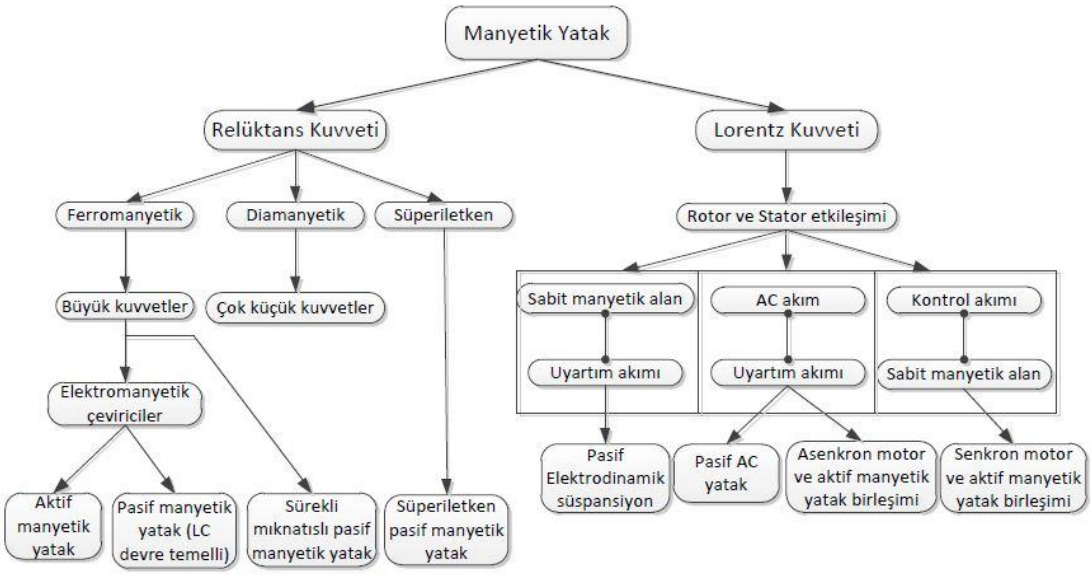
Manyetik yataklar çeşitli özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Manyetik yataklar en temel olarak manyetik yatakların kontrol edilip edilmediğine göre sınıflandırdılar. Çoğu araştırmacı bu sınıflandırmayı kullanmaktadır. Yani manyetik yatakların dengede tuttuğu milin pozisyon bilgisinin bir geri bildirim ile kontrol edilip edilmediği ile ilgilidir. Bu geri bildiriminin yapılıp yataklamanın kontrol edildiği manyetik yataklara aktif manyetik yatak, kontrol edilmediği manyetik yataklara ise pasif manyetik yatak olarak adlandırılır. Pasif manyetik yataklar birbirlerini etkileyen iki manyetik malzemeden meydana gelebilirler ve tasarıma göre hareketli veya sabit olabilirler. Aktif manyetik yataklar ise ferromanyetik malzemelerden ve sürekli mıknatıslardan meydana gelmektedir. Aktif manyetik yatakların pasif manyetik yataklardan farklı mil pozisyonunun her daim sensörler tarafından ölçülmesi ve istenildiği gibi kontrol edilmesidir. Pasif manyetik yataklarda ise yataklamayı kontrol etmek söz konusu değildir. Şekil 2.2'de manyetik yatakların yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması verilmiştir [28].



Şekil 2.2. Manyetik yatakların yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması

Şekil 2.2'de ayrıca pasif ve aktif manyetik yataklarda kullanılan malzemelerde gösterilmiştir. Pasif manyetik yatakların LC devreli elektromıknatıs, sürekli mıknatıs, diamanyetik malzeme, süperiletken ve manyetik sıvı kullanılarak tasarımları yapılabilir. Aktif manyetik yataklarda elektromıknatıslar yaygın olarak kullanılmaktadır. Sürekli mıknatıslı aktif manyetik yataklar yapılarında elektromıknatıs bulundururlar. Sürekli mıknatıslı manyetik yataklar en çok enerji verimliliği ve yüksek kuvvet elde edilmesi gerek yerlerde kullanılırlar.

Manyetik yataklar hakkında yapılan araştırmalara ve yayınlara bakıldığında manyetik yatakların elektrik yüklerin hareketine dayalı bir şekilde manyetik yatakların çalışma prensibini oluşturan sabit ve döner alanların etkileşiminden kuvvetin nasıl hesaplandığına göre sınıflandırma yapılmaktadır [28]. Bu sınıflandırma temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunların ilki kuvvetin relüktans değeri ile hesaplanması, ikincisi ise kuvvetin Lorentz kuvveti ile hesaplanmasıdır. Şekil 2.3'de yaygın olarak kullanılan kuvvet hesaplanmasına göre manyetik yatak çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kuvvet hesaplamasına göre manyetik yatakların sınıflandırılması

Şekil 2.3'de kuvvet hesaplaması temel olarak iki kısma ayrılır. Bunların ilki relüktans kuvvet hesaplaması ikincisi kısım ise Lorentz kuvvet hesaplamasıdır. Relüktans kuvveti manyetik alanda saklanan enerjiden meydana gelmektedir. Manyetik alanda saklanan enerji mekanik enerjiye dönüşmek ve bu mekanik enerjinin hareketiyle kuvvet oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı relüktans kuvveti yani *f* yapılan iş üzerinden hesaplanmaktadır. Denklem (2.1)'de relüktans kuvvetine göre kuvvetin hesaplanması formülü verilmiştir.

$$f = \frac{\delta W}{\delta x} \tag{2.1}$$

Denklemde *W* yapılan işi, *x* ise yer değiştirmeyi temsil etmektedir. İleriki bölümlerde *f* kuvvetinin hesaplanması detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Relüktans kuvvetinin

temeli manyetik alana bağlı olduğu için manyetik yatakta kullanılan malzemelerin geçirgenliği relüktans kuvvetini direkt olarak etkiler.

Şekil 2.3'de verilen sınıflandırmada relüktans kuvvetinin altında kullanılan malzemelere göre manyetik yatakların sınıflandırılması gösterilmiştir. Bunlar ferromanyetik, diamanyetik ve süperiletken malzeme kullanıma göre sınıflandırılır. Ferromanyetik malzeme kullanılan manyetik yataklardan büyük kuvvetler ve diamanyetik malzeme kullanılan manyetik yataklardan ise küçük kuvvetler elde edilebilir. Bunun sebebi ise ferromanyetik malzemelerin geçirgenliği 1'den yani havanın geçirgenliğinden çok yüksek, diamanyetik malzemelerin geçirgenliği 1'den çok küçüktür. Geçirgenliği 1 olan süperiletken malzemelerden meydana gelen manyetik yataklarda ise tasarım ve süperiletkene bağlı olmak koşulu ile büyük kuvvetler elde edilebilir.

Manyetik yatakların ikinci büyük gruplandırılması ise Lorentz kuvvet hesaplanmasıdır. Lorentz kuvveti elektromanyetik alanlar tarafından hareketli bir noktasal yüke etkiyen kuvvettir. Elektrik ve manyetik alanlar üzerine günümüzün modern teorileri ilk olarak Michael Faraday tarafından ortaya atılmıştır. Lord Kelvin ve J. C. Maxwell tarafından ise elektrik ve manyetik alanların matematiksel açıklamaları getirilmiştir. 1892 yılında ise Hendrik Lorentz kendi soyadı ile anılacak olan, elektrik ve manyetik alanların kuvvete etkilerini tam olarak açıklayan çalışma yapmıştır [29]. Bu çalışma ile Hendrik Lorentz 1902 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü almıştır. Bu çalışmaya göre kuvvet denklemi Denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$f = Q\left(E + v \times B\right) \tag{2.2}$$

Denklem (2.2)'de f kuvveti, Q parçacığın elektriksel yükünü, E elektrik alanı, B manyetik akı yoğunluğunu ve v parçacığın anlık hızını temsil etmektedir. Denklem (2.2)'ye göre kuvvet elektrik alanın parçacığın anlık hızının manyetik akı yoğunluğu ile çarpımının toplamının elektriksel yük ile çarpılmasına eşittir. Elektrik alanda meydana getirdiği uygulanabilir enerji, manyetik alanda meydana gelen uygulanabilir enerjiden yaklaşık 100 kat daha düşüktür. Bu sebepten dolay Denklem (2.2) daha basit bir hale dönüştürülebilir. Elektrostatik katsayı elimine edilip

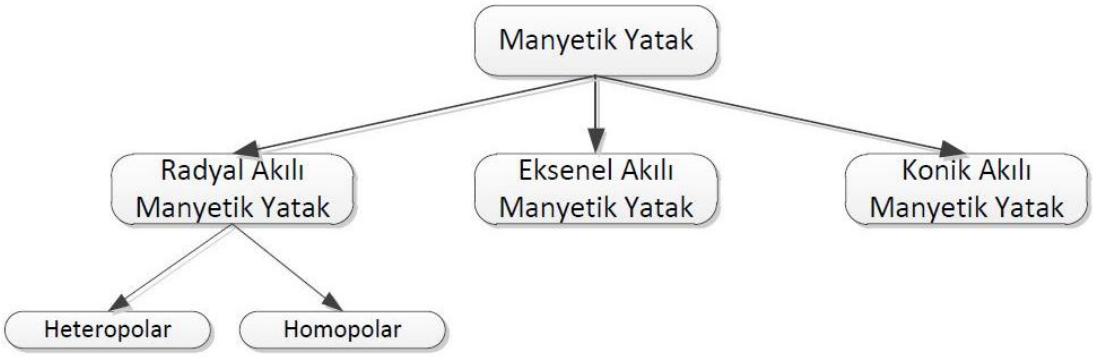
denklem tekrardan düzenlenirse parçacığın elektriksek yük ile hızı çarpımından akım değeri gelir. Denklem (2.3)'de basitleştirilmiş ifade verilmektedir.

$$f = i \times B \tag{2.3}$$

Denklem (2.3)'de kuvvetin akım ile ilgili olduğu görülmektedir. Denklem (2.3)'de kuvvet ile manyetik alan birbirlerine diktir. Manyetik yataklar Lorentz kuvveti hesaplanmalarına göre dört ana gruba ayrılırlar. Bu gruplama akım kaynaklarına göre yapılmaktadır. Akım kaynaklarının yani rotor ve statordaki akım kaynaklarının birbirlerine göre olan etkileşimleri bu tür sınıflandırmanın temelini oluşturur.

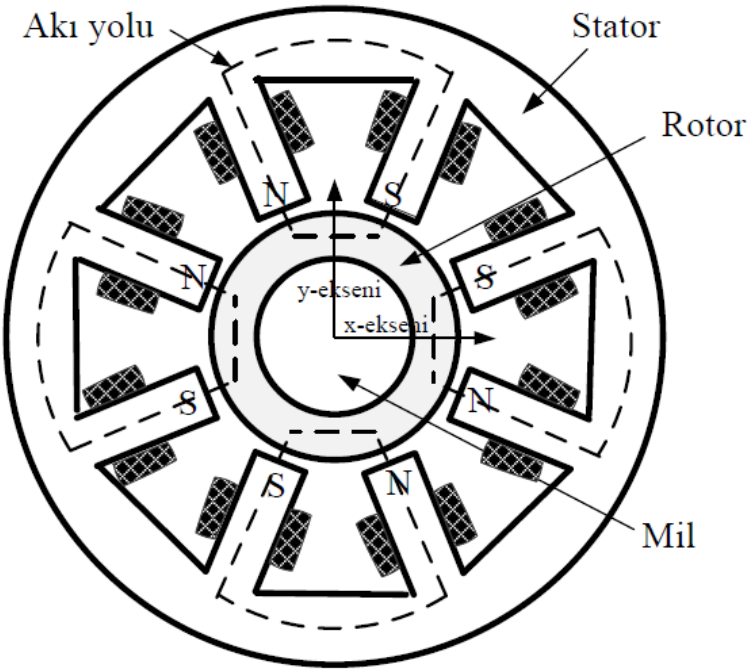
Rotorun AC akım, sabit manyetik alan veya aktif kontrollü olması veya statorun indüklenmiş veya sabit manyetik alan olması şeklinde sınıflandırmalara ayrılırlar. Rotorun sabit manyetik alan ve statorun uyartım akımından meydana gelen sistemlere pasif elektromanyetik süspansiyon, rotoru AC akım, statoru uyartım akımından meydana gelen sistemlere ise AC yatak denir. Pasif elektromanyetik süspansiyon sadece yüksek hızlarda çalışabilmekte ve bu yüzden verimliliği düşük olmaktadır. AC yatak ise büyük kayıplara sahiptir. Elektrik motorlarına entegre edilen manyetik yataklar ise aktif manyetik yataklardır. Bunlar asenkron veya senkron makinalara entegre edilerek kontrollü bir şekilde yataklamayı sağlarlar. Bu tip manyetik yatakların gelişmesiyle yataksız veya kendinden yataklı olarak nitelendiren rotorun ve milin hem dönmesini hem de dengede kalmasını sağlayan sistemler günümüzün popüler araştırma konuları arasına girmiştir.

Manyetik yataklar ayrıca manyetik akıların aktığı yolun yönüne göre de sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmada manyetik yatakların tasarımları ön plana çıkmaktadır. Tasarım tipine göre manyetik yataklar radyal, eksenel veya hem radyal hem eksenel olan konik akı yollarına sahip olabilirler. Temel olarak tasarım tipine göre 3 tip manyetik yatak bulunmaktadır. Manyetik yatakların tasarım yapılarına göre olan sınıflandırması Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Akı yönlerine göre manyetik yatakların sınıflandırılması

Şekil 2.4'de manyetik yatakların akı yönlerine göre sınıflandırılması verilmiştir. Radyal akılı manyetik yataklar rotoru ve mili x ve y eksenlerinde dengede tutabilir veya aktif bir manyetik yatak ise rotor ve mil deplasmanı istenilen pozisyona getirilebilir. Radyal manyetik yataklar heteropolar ve homopolar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sekiz oluklu heteropolar tip radyal akılı manyetik yatağın x-y eksen kesitli akı yolları Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Heteropolar manyetik yatağın akı yolları

Heteropolar manyetik yatakta, statorda bulunan dişler zıt kutuplu elektromıknatıslar olacak şekilde sargılar sarılmakta ve x-y yönünde kuvvet oluşturacak elektromıknatıs çiftleri meydana getirilmektedir. Heteropolar manyetik yataklarda manyetik akı

yolunu rotor üzerinden x ve y ekseninden bir yok takip ederek radyal bir şekilde tamamlamaktadır. Bilindiği gibi elektrik motorlarında mil çoğunlukla ferromanyetik özelliği olmayan malzemelerden seçilir. Bunun nedeni kaçak akıları önlemek ve akı yoluna yön vermektir. Şekil 2.6'da üretilen bir radyal akılı manyetik yatak gösterilmiştir [30].



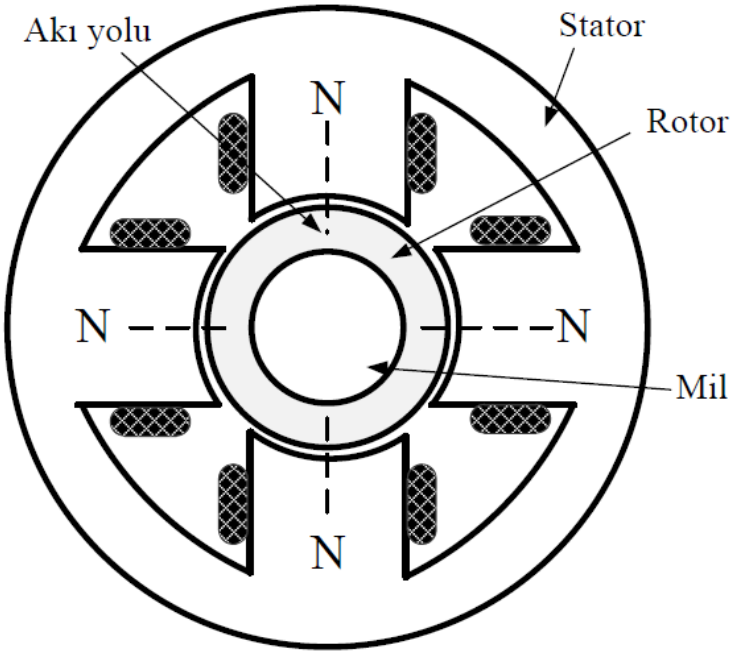
Şekil 2.6. Üretilmiş radyal akılı manyetik yatak

Şekil 2.6'da toplam 4 sargı çıkışı gözükmektedir. Bu dört sargı 4 adet elektromıknatıs çiftinin olduğunu göstermekte, bir nevi x ve y eksenlerini sağa, sola, aşağı veya yukarı çekecek elektromıknatısların sargı sonlarıdır.

Radyal akılı manyetik yatakların diğer bir çeşidi de homopolar manyetik yataktır. Homopolar manyetik yatakların heteropolar manyetik yataklardan farklı manyetik akının paket boyu boyunca yani z ekseni boyunca ilerleyip manyetik devreyi bu şekilde tamamlamasıdır. Homopolar manyetik yataklar heteropolar manyetik yataklara göre daha az oluklu olabilirler. Heteropolar manyetik yataklar 4'den 48 oluğa kadar çıkabilmekteyken homopolar manyetik yataklar genellikle 4 olukludur. Fakat tasarım tipine göre oluk sayısı artırılabilmektedir.

Manyetik yataklar ile ilgili çalışmalara ve yapılan endüstri uygulamalarına bakıldığında homopolar manyetik yatakların heteropolar manyetik yataklara göre daha az kullanıldığı görülmüştür. Homopolar manyetik yataklarda rotorlarda sürekli

mıknatıs kullanılması modelleme avantajı açısından daha kolaydır. Eksenel olarak akıya yol göstermek ve kayıpları azaltmak için homopolar manyetik yatakların rotorlarında veya statorlarında sıklıkla sürekli mıknatıs kullanılır. Heteropolar manyetik yataklarda ise sürekli mıknatıslar genellikle manyetik yatağın statorunda kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de 4 oluklu homopolar manyetik yatağın x-y eksen kesitleri gösterilmiştir.



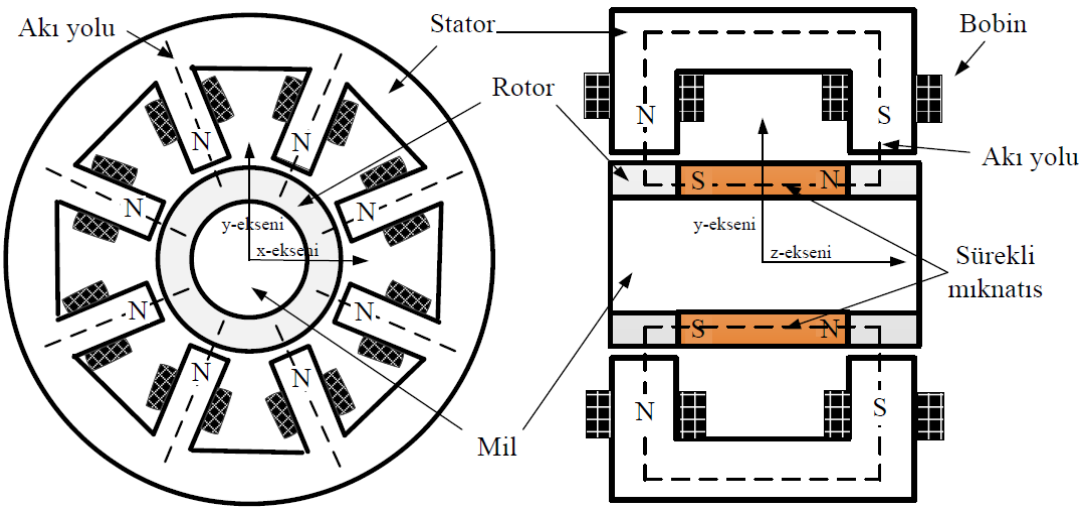
Şekil 2.7. Homopolar manyetik yatağın radyal akı yolları

Şekil 2.7'de gösterilen homopolar manyetik yatak 4 olukludur ve her bir oluk rotoru x ve y eksenlerinde sağa veya sola çekmeye çalışır. Herhangi bir elektromıknatıstan çıkan akı rotor boyunca hareket ederek paket sonundaki kutup eşleyenini bulur ve manyetik devresini tamamlar. Şekil 2.8'de üretilmiş dört kutuplu homopolar manyetik yatak gösterilmiştir [31].



Şekil 2.8. Üretilmiş homopolar manyetik yatak

Şekil 2.8'de gösterilen homopolar manyetik yatağın statorunda oluklar ortadan ikiye bölünerek bir paket boyunca iki farklı elektromıknatıs oluşturulmuştur. Bu sayede statordaki akı yolu daha da güçlendirilmiş ve rotordaki kaçak akıları düşürmek mümkün olmuştur. Homopolar manyetik yataklarda kaçak akıları elimine etmek ve manyetik akıdan maksimum verim almak için rotorda veya statorda sürekli mıknatıs kullanılabilmektedir. Şekil 2.9'da rotorunda yüzük tip sürekli mıknatıs bulunan bir homopolar manyetik yatak gösterilmiştir.

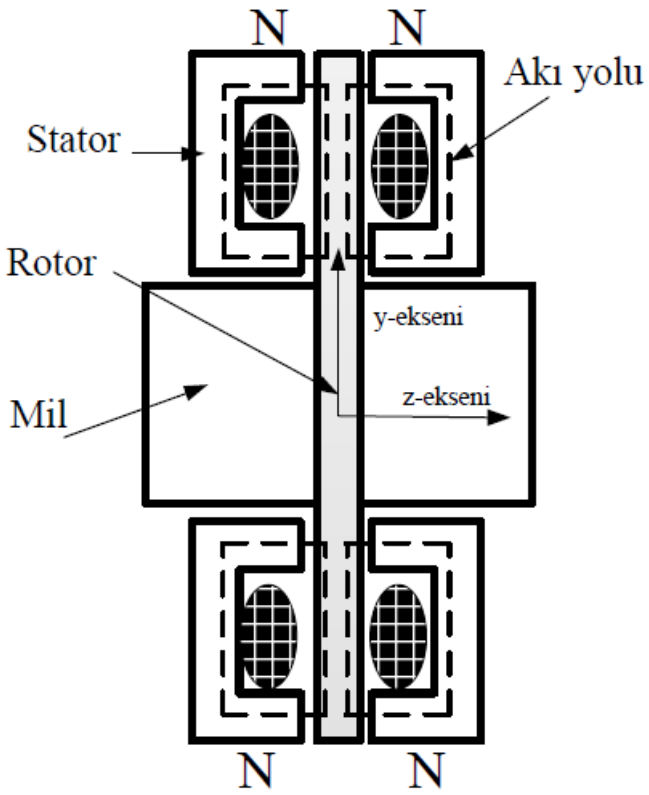


Şekil 2.9. 8 oluklu homopolar manyetik yatağın eksenel akı yolları

Şekil 2.9'da sürekli mıknatıslı homopolar bir manyetik yatağın x-y ve z-y eksen kesit görüntüleri ve akı yolları gösterilmiştir. Homopolar manyetik yatakta yüzük tip

sürekli mıknatıs kullanılmıştır. Sürekli mıknatısın kullanılmasının amacı akı kayıplarını azaltmak ve akının manyetik devresini tamamlamasına yardım etmektir. Sürekli mıknatıs kullanılması aynı zamanda daha az malzeme ve enerji kullanılmasını ve aynı zamanda yüksek kuvvet değerlerinin daha az akım değerleri ile elde edilmesini sağlamaktadır.

Radyal manyetik yatak rotoru ve mili x ve y ekseninde dengede tutmaya çalışırlar. Radyal manyetik yatakta zorluk her zaman yerçekimi ivmesine karşı koyulması gerektiğidir. Eksenel manyetik yataklarda ise eksen boyunca dengeleme sağlanır. Eksenel manyetik yataklar rotoru ve mili z ekseninde dengede tutan ve istenilen deplasmana getiren manyetik yataklardır. Şekil 2.10'da eksenel manyetik yatak kesit görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Eksenel MY akı yolları

Şekil 2.10'da eksenel manyetik yatağın z-y eksen kesit görünümü verilmiş ve akı yolları dağılımı gösterilmiştir. Eksenel akılı manyetik yatak radyal yatağa göre farklı bir tasarıma sahiptir. Radyal manyetik yatağın aksine eksenel manyetik yataklarda karşılıklı stator diskleri kullanılır ve stator disklerinin arasına yatak ile aynı çapta

olan rotor konulmaktadır. İki tane stator diskinin içinde dairesel olarak bobinler sarılarak veya yüzük tip sürekli mıknatıslar konularak tasarımı yapılmaktadır. Her bir diskten akan akı eksen boyunca doğruca rotora geçer ve akılar aynı kutuplu olduğu için tekrardan kendi zıt kutbuna geri döner. Eksenel yataklarda pasif ve aktif olmak üzere temel iki grupta incelenir. Aktif eksenel manyetik yataklarda disklerin rotora uyguladığı kuvvet kontrol edilerek rotorun z ekseninde deplasman değişimi sağlanabilir, pasif manyetik yataklarda ise manyetik yatakların uyguladığı kuvvet sabittir. Eksenel yataklar radyal yataklara nazaran paket boyları daha büyük olabilir. Şekil 2.11'de üretilmiş bir eksenel akılı manyetik yatak gösterilmiştir [30].

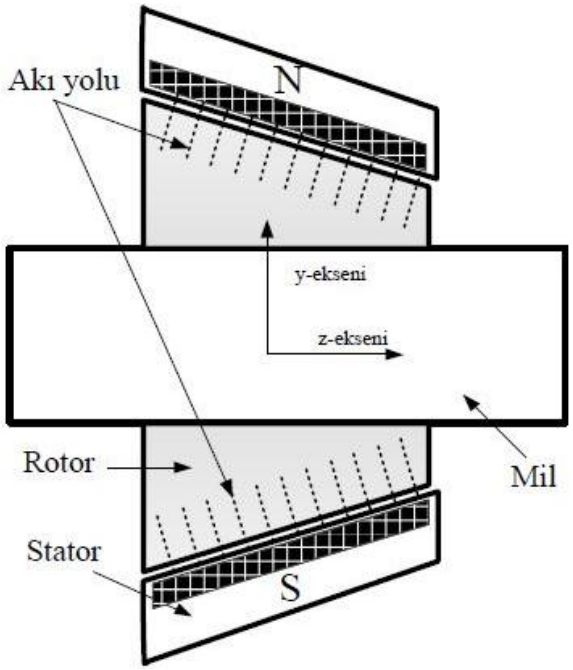


Şekil 2.11. Eksenel manyetik yatak diski

Şekil 2.11'de gösterilen eksenel manyetik yatakta dairesel sarımlar açıkça gözükmektedir. Yapılan tasarıma göre bu bobinler ferromanyetik bir malzeme ile kapatılabilir ya Şekil 2.11'de olduğu gibi açık bırakılabilir. Ayrıca eksenel manyetik yataklarda tasarıma ve uygulama alanına göre Şekil 2.10'da olduğu gibi "C" tip manyetik yatak olduğu gibi "E" tip manyetik yatak tasarımları da mevcuttur. "E" tip eksenel manyetik yataklardaki amaç daha az bir paket boylarında daha fazla kuvvet elde etmektir. Ek olarak eksenel manyetik yataklarda da sürekli mıknatıslar enerji verimliliği açısında sıkça kullanılmaktadır.

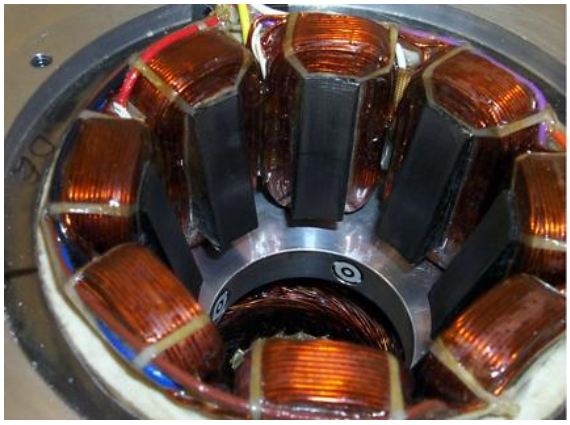
Akı yönlerindeki son sınıflandırma ise yapılarında hem radyal hem de eksenel manyetik yatakları barındıran konik akılı manyetik yataklardır. Konik akılı manyetik yataklar rotoru hem radyal yönde yani x ve y, hem de eksenel yönde yani z ekseninde dengede tutabilir ve istenilen pozisyona getirebilir. Konik manyetik

yataklar genellikle uzay araçlarında kullanılmaktadır. Üç eksende dengede tutma gereksinimi olan sistemlerde radyal ve eksenel yataklar tek bir yatak içinde birleştirilir. Böyle bir tasarımla hem 3 eksen denge ve pozisyon kontrolü sağlanır ek olarak sistemde maliyeti kazancı elde edilmiş olur. Konik akılı manyetik yataklar yataksız manyetik yatakların yani hem rotoru dengeleyen hem de motorun dairesel olarak dönmesini sağlayan sistemlerin temelidir. Şekil 2.12'de konik akılı manyetik yatağın akı yolları gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Konik manyetik yatağın akı yolları

Şekil 2.12'de z-y eksen kesit konik manyetik yatak gösterilmiştir. Konik manyetik yatağın akı yollarına bakıldığında heteropolar radyal manyetik yatağın akı yolları gibidir. Fakat akı statordan konik bir açı ile çıkar ve rotor bu şekilde geçerek manyetik devresini tamamlar. Manyetik yatak tarafından rotora etkiyen kuvvet de koniklik açısı kadar olacaktır ve kuvvetin bileşenlerini 3 eksende açıp rotora etkiyen kuvvet her bir eksen için hesaplanabilir. Konik manyetik yatakların kuvvet kontrolü zordur çünkü oluşan kuvvet her üç eksene etki eder. Bu yüzden konik manyetik yatakların kontrolü diğer manyetik yataklara nazaran daha karmaşıktır. Şekil 2.13'de üretilmiş bir konik akılı manyetik yatak gösterilmiştir [32].



Şekil 2.13. Prototip konik manyetik yatak

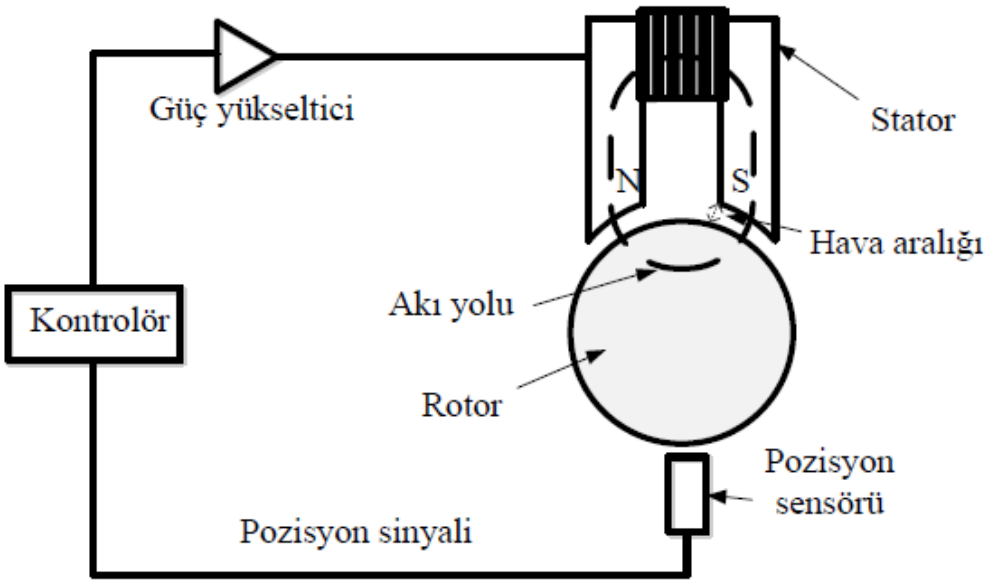
Şekil 2.13'de NASA tarafından üretilen konik akılı manyetik yatak verilmiştir. Şekle bakıldığında stator dişlerinin konik biçimde olduğu rahatça gözükmektedir. Konik akılı manyetik yataklarda da sürekli mıknatıslar akı kaçaklarını elimine etmek ve enerji verimliği açısından kullanılmaktadır.

2.2. Aktif Manyetik Yatak Temel Prensipleri

Günümüzde tam anlamıyla mekatronik ürün nedir diye araştırma yapılırsa bu araştırma sonunda elde edilen ürünlerden bir tanesi şüphesiz aktif manyetik yataklar çıkacaktır. Aktif manyetik yatak diğer manyetik yatak çeşidinden yani pasif manyetik yataktan en temel farklı rotor pozisyon bilgisinin sürekli olarak denetlenmesidir. Teknolojinin hızlı gelişimi ve elektronik ürünlerin ucuzlamasıyla endüstride aktif manyetik yataklara olan ilgi artmış ve araştırmalara sonucunda endüstrinin ihtiyaçlarına cevap verebilen aktif manyetik yatak uygulamaları artmıştır. Endüstride kullanılan aktif manyetik yataklar çoğunlukla güçlü elektromıknatısların rotora büyük kuvvet etki etmesini sağlamaktadır. Elektromıknatıslar tarafından oluşturulan kuvvet her zaman sistemi dengesiz bir duruma sokmakta ve sistemin dengelenmesi ihtiyaç haline gelmektedir.

Aktif manyetik yatakların çalışma prensibini anlamak için ilk başta manyetik yatakların temelini oluşturan manyetik süspansiyon sistemini anlamak gerekir. Manyetik süspansiyon sistemi manyetik yataklara nazaran daha az hassas ve bu sayede kontrolü kolay, tek eksen çalışma uzayına sahip bir sistemdir. Manyetik süspansiyon bileşenleri ile manyetik yatak bileşenleri yaklaşık olarak aynıdır.

Manyetik süspansiyon sisteminin bileşenleri ve çalışma prensibi Şekil 2.14'de verilmiştir.

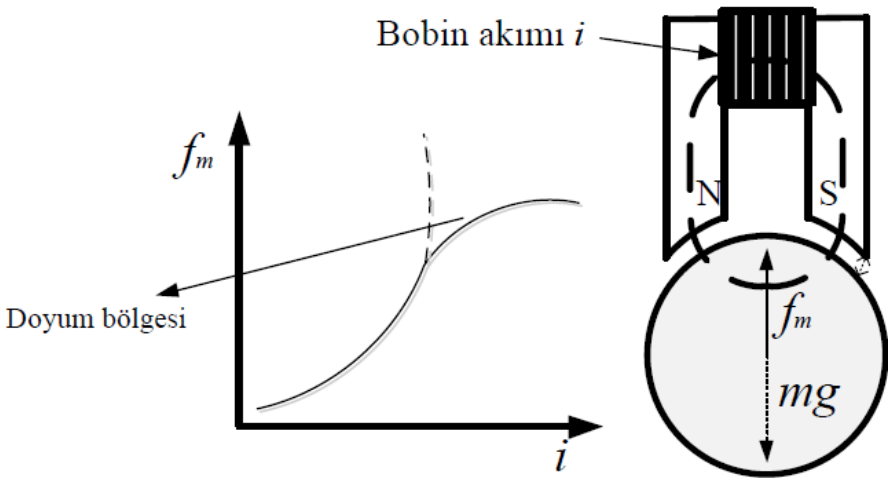


Şekil 2.14. Manyetik süspansiyon sistemi çalışma prensibi

Manyetik süspansiyon sisteminde ferromanyetik malzemeden üretilmiş bir rotor elektromıknatısların ürettiği yerçekimi kuvvetine aksi yönde bir kuvvete maruz kalır. Levitasyon olayı sırasında sensör rotorun deplasmanını ölçer ve bu bilgiyi kontrolöre gönderir. Kontrolör ise rotor pozisyonunu referans pozisyon ile karşılaştırarak referans pozisyona gelebilmesi için gerekli kuvvet değerini sağlaması için gerekli akım bilgisini güç yükselticisine gönderir ve güç yükselticisinden çıkan akım elektromıknatısa iletilir. Bu sayede rotor her zaman referans pozisyona gelmek için elektromıknatıslar tarafından farklı bir kuvvete maruz kalır. Rotora etkiyen bileşke kuvvet Denklem (2.4)'deki gibi ifade edilir.

$$f = f_m - mg \tag{2.4}$$

Denklem (2.4)'de f rotora etkiyen bileşke kuvveti, f_m elektromıknatısın rotora uyguladığı kuvvetini ve mg ise rotorun ağırlığını ifade eder. Şekil 2.15'de rotoru etkiyen bileşke kuvvetler ve akım-kuvvet ilişkisi gösterilmiştir.



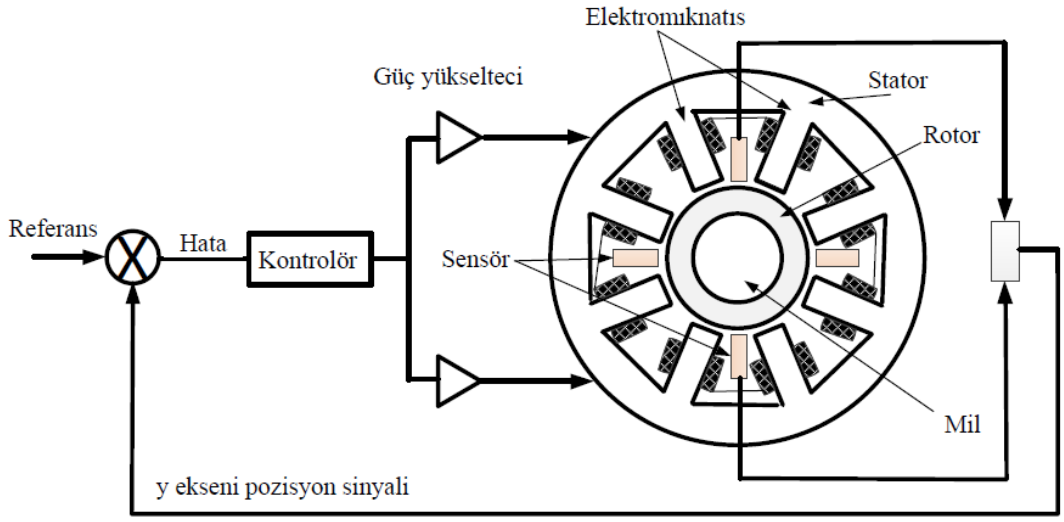
Şekil 2.15. Rotora etkiyen bileşke kuvvet ve akım-kuvvet ilişkisi

Şekil 2.15'de rotora etkiyen bileşke kuvvet ve akım-kuvvet ilişkisi gösterilmektedir. Bileşke kuvvetin her zaman sıfır olması istenir fakat gerçekte hiçbir zaman sıfır bileşke kuvvet elde edilemez. Yani referans pozisyon ve rotorun pozisyonunun hatası her zaman vardır fakat çoğu sistemde bu deplasman farklı insan gözünün görebileceği şekilde hissedilemez. Mesela rotorun referans pozisyona gelmesi için kontrolör tarafından elektromıknatıslara belirli bir akım gönderilir ve bu akım doğrultusunda rotora etkiyen kuvvet artar ve rotor elektromıknatıslara doğru yaklaşır. Bu değişim nedeniyle stator ile rotor arasındaki hava aralığı azalır ve kuvvet daha artar ve artmaya devam eder. Bu kuvvet artması ise rotor pozisyonun tekrardan referans pozisyonunu geçmesine neden olur. Bu seferde kontrolör tarafından uygulanan akım değeri azaltılır ve rotora etkiyen kuvvet azalır. Bu sayede rotor deplasmanı tekrardan büyür ve hava aralığının artmasıyla tekrardan kuvvet azalır. Rotorun referans pozisyona getirilmesi bu şekilde devam eder. Her zaman referans pozisyon ile rotor deplasmanı arasında bir hata mevcuttur.

Şekil 2.15'de ayrıca manyetik süspansiyon sisteminin akım-kuvvet ilişkisi verilmiştir. Kuvvet akım ilişkisi süspansiyon sisteminin limitlerini ve doğrusal çalışma bölgesini veren bir ilişkidir. Stator bobin akımı artıkça ferromanyetik malzeme doyuma ulaşacak ve doyuma ulaşan malzeme yüksek akım değerlerinde bile aynı kuvvet etki edecektir. Bu sebepten dolayı bu tür sistemlerin tasarımı yapılırken fiziksel özelliklere göre kuvvet akım grafikleri çıkartılarak elektromıknatıslardan elde edilebilecek doğrusal bölgede maksimum kuvvet değerleri hesaplanır. Bu kuvvet değerleri tabi ki de stator ve rotor arasındaki hava

aralığına, elektromıknatısları oluşturan bobinlerin sarım sayılarına, kesit alanlarına ve akıma göre değişiklik gösterir. Aynı kuvvet değerini veren birçok sistem tasarımı yapılabilmektedir.

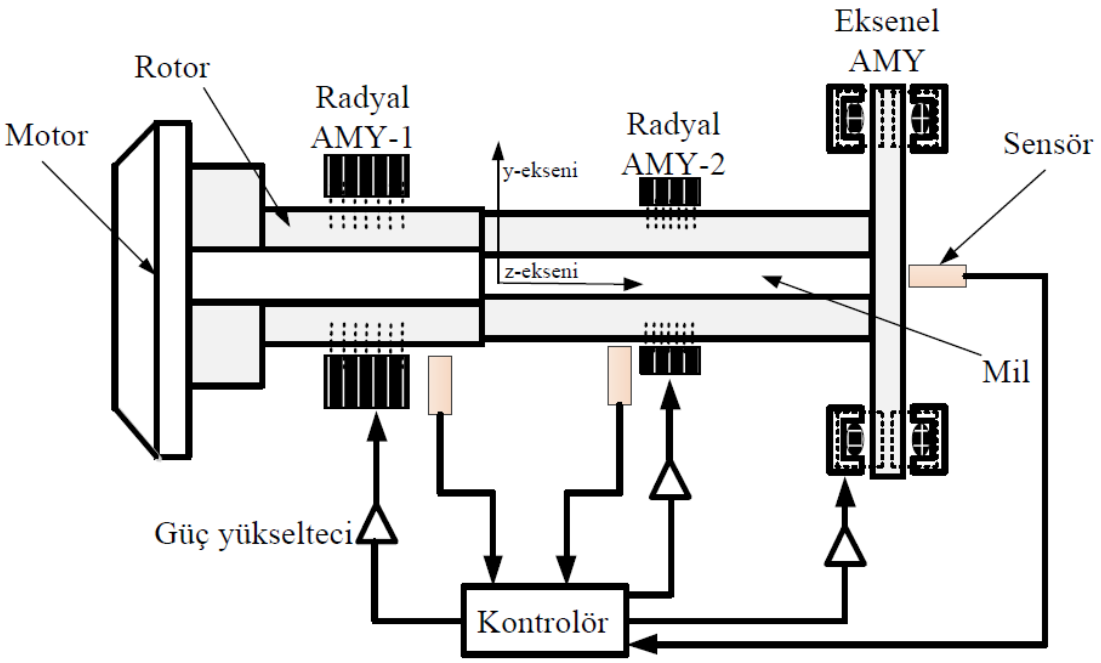
Aktif manyetik yatağın çalışma prensibi tek eksen manyetik süspansiyon sisteminin çalışmasıyla mantık olarak aynıdır. Aktif manyetik yatağın tasarımına dayalı olarak rotorun x, y ve z eksenlerinde istenilen yönlerde arzu edilen pozisyonda kalması sağlanabilir. Klasik aktif manyetik yatağın blok diyagramı Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Aktif manyetik yatağın blok diyagramı

Şekil 2.16'da heteropolar aktif manyetik yatağa blok diyagramı verilmiştir. Şekildeki stator tasarımını referans alınırsa 4 adet elektromıknatıs çifti rotoru x ve y eksenlerinde dengede tutmaya çalışırlar. Her eksen elektromıknatısları birbirlerine seri bağlıdır fakat zıt kutupları oluşturmak için bobinler birbirlerine göre ters sarımlıdır. Sensörler genellikle stator dişlerinin iç çapları ile aynı mesafeye konulur ve rotorun statora olan uzaklığını milimetrenin yüzde biri hassasiyete kadar ölçebilirler. Sensörlerden alınan pozisyon bilgileri ışığında referans rotor pozisyonu ile karşılaştırılarak kontrolöre hata bilgisi gönderilir. Hataya göre kontrolör rotorun referans pozisyona gelebilmesi için y eksenlerindeki elektromıknatıslara gerekli akımı sağlar. Aynı çalışma mantığı rotorun x ekseninde dengelenmesi içinde yapılmaktadır. Rotorun statora olan deplasmanını ölçen sensör yardımıyla rotor pozisyon bilgisi referans bilgiyle karşılaştırılıp bir hata sinyali oluşmaktadır. Kontrolöre gelen bu hata sinyali ile elektromıknatıslara gönderilecek akım kontrolör

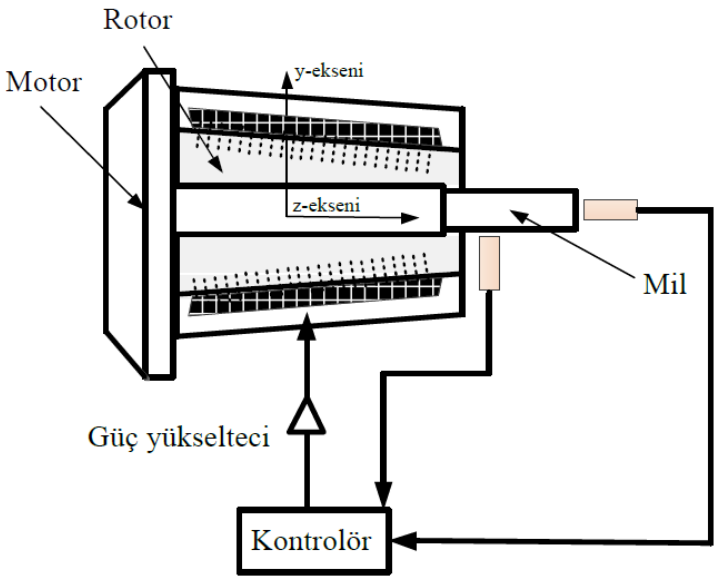
tarafından ayarlanır. Benzer mantıkta çalışma eksenel aktif manyetik yatak içinde geçerlidir. Şekil 2.17'de bir elektrik motoruna ait radyal ve eksenel aktif manyetik yatakların uygulanmasının şematik gösterimi verilmiştir [33].



Şekil 2.17. Elektrik motoruna ait aktif manyetik yatak blok diyagramı

Şekil 2.17'de gösterilen blok diyagramında iki tane radyal yatak ve bir tane eksenel yatak bulunmaktadır. Rotor ekseni boyunca iki tane radyal yatak rotoru x-y ekseni boyunca, eksenel manyetik yatak ise rotoru z ekseni boyunca istenilen pozisyonda dengede tutmaya çalışır. Elektrik motoru rotor ve mili döndürmekte manyetik yataklarda dengelemektedir. Manyetik yatak uygulamalarında genellikle iki tane radyal manyetik yatak kullanılır. Milin uzunluğuna göre manyetik yatak sayıları artabilir. Günümüzün gelişmiş uygulamalarıyla manyetik yataklar hem motor görevi hem de manyetik yataklamayı sağlamaktadır. Bu sayede hem motor hem de yataklama görevi tek bir manyetik yatak yapabilmektedir. Bu tür manyetik yatakların rotorları yüzeyden veya dâhili sürekli mıknatıslı bileşenlerden oluşur ve stator oluklarında kendi tasarımına has bir sarım prensibi vardır. Bu tür manyetik yataklara yataksız veya kendinden yataklı motorlar denir. Ayrıca 3 eksen manyetik yataklamayı sağlayan konik yapılı manyetik yataklarda mevcuttur. Dönen sistemlerde eğer 3 eksende yataklama sağlamak gerekiyorsa alternatif olarak konik manyetik yataklar kullanılabilmektedir. Şekil 2.17'deki sistemde 3 adet manyetik

yatak kullanılarak yataklama sağlanmıştır. Fakat fiziksel açıdan daha küçük olan yerlerde ise alternatif yataklar kullanılarak aynı şekilde yataklanma sağlanmaktadır. Şekil 2.18'de bu tip bir yapı gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Konik manyetik yatak blok diyagramı

Şekil 2.18'de üç eksen yataklama sadece tek bir manyetik tasarım ile yapılmıştır. Sistemde kullanılan elektronik bileşenler Şekil 2.17'deki sisteme göre azaltılmış ve daha basit bir yapı ile aynı çalışma sistemi kurulmuştur. Ayrıca daha küçük paket boyları ve fiziksel özellikler için yapılabilecek bir tasarım mümkün hale gelmiştir.

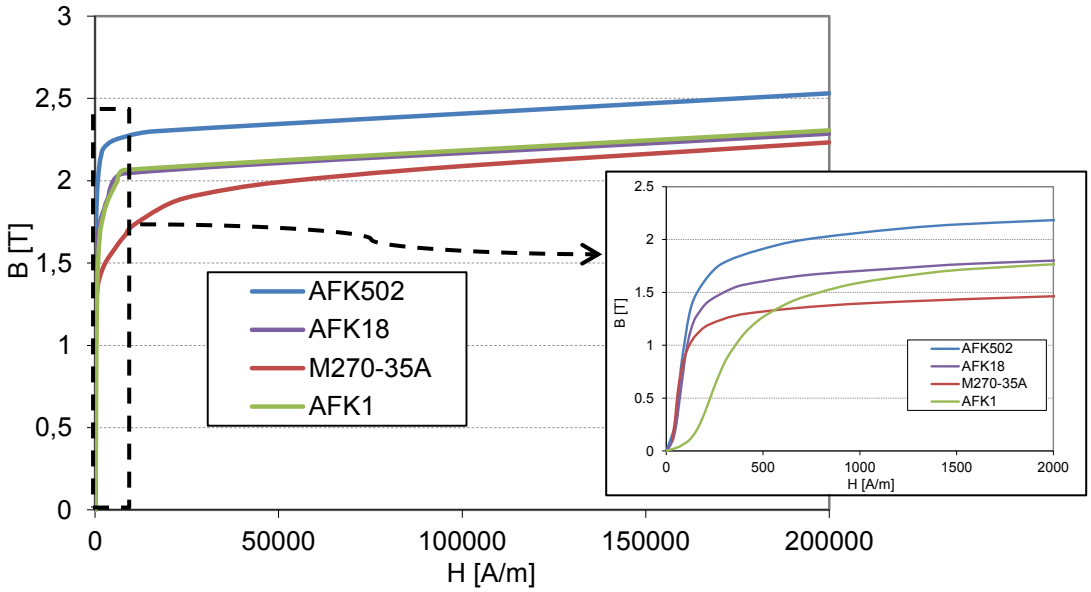
2.3. Aktif Manyetik Yataklarda Kullanılan Malzemeler

Aktif manyetik yatakların çalışma prensipleri elektrik motorlarına benzemektedir. Elektrik motoru temel olarak mil, rotor, stator, bobin ve tasarıma bağlı olarak sürekli mıknatıstan meydana gelmektedir. Aktif manyetik yataklar da aynı elektrik motorları gibi mil, rotor, stator, bobin ve sürekli mıknatıstan oluşmaktadır. Elektrik motorlarında bobinler stator olukları etrafında belli bir harmoniye göre sarılmıştır ve rotor ve milin dönmesini sağlamaktadır. Aktif manyetik yataklar ise sadece rotoru ve mili dengeye ve istenilen pozisyona getirmektedir. Aktif manyetik yataklar ferromanyetik esaslara göre çalışmaktadır. Bu sebepten dolayı manyetik yataklarda elektrik motorlarında kullanılan malzemelerin çoğu kullanılmaktadır. Bu bölümde

aktif manyetik yataklarda kullanılan sac, sürekli mıknatıs ve bobin malzemeleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Manyetik yatakların üretiminde farklı yapılarda malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler kendi içinde barındırdıkları farklı yapısal, manyetik ve termal özellikler ile farklı endüstri uygulamalarındaki manyetik yatakların tasarımında kullanılmaktadır. Genel olarak manyetik yatak malzemeleri; sac, sürekli mıknatıs ve bobin malzemeleri olmak üzere 3 gruba ayrılır.

Manyetik yataklarda kullanılan sac malzemelerinin genel olarak manyetik doyum değerinin yüksek olması istenir. Sac malzemelerinin manyetik akı yoğunluğunun doyum değeri ne kadar büyük olsa da, doğrusal olmayan bir manyetik akı yoğunluğuna sahip olan malzemenin doğrusal bölgesinin kararlılığı bir o kadarda önemlidir. Doğrusal bölgenin açısının dik ve doğrusal olması o malzemenin kaliteli olduğunun bir göstergesidir. Çünkü doğrusal bölgenin kararlılığı manyetik yatağın çalışma değerlerinin hesaplanmasını direkt olarak etkiler. Kayıpların çok önemli olmadığı, maliyetin daha ön plana çıktığı düşük hızlı uygulamalarda daha kalın sac malzemeleri kullanılabilmektedir. Bu malzemelere örnek olarak elektrik motorlarında sıkça kullanılan M270-35A gösterilebilir. Şekil 2.19'da birkaç farklı sac malzemesinin manyetik akı yoğunluğunun manyetik alan şiddetine göre olan değişimleri yani manyetik doyum grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.19. Farklı sac malzemelerinin doyum grafikleri

Şekil 2.19'da AFK502, AFK18, AFK1 ve M270-35A tip manyetik malzemelerinin manyetik doyum grafikleri verilmiştir. Manyetik doyum grafiği manyetik akı yoğunluğunun manyetik alan şiddetine göre değişimi ile hesaplanmaktadır. Manyetik doyum grafikleri doğrusal olmayan grafiklerdir ve aktif manyetik yataklarda kullanılacak malzemelerin doyumlarının yüksek ve doyum eğrilerinin dik olması istenir.

Şekil 2.19'da ek olarak 4 malzemenin akı yoğunluğu yükselme bölgeleri harici olarak gösterilmiştir. Yükselme bölgelerine bakarak AFK502, AFK18 ve M270-35A malzemesinin enerji kaybının daha düşük ve verimli olduğu söylenebilir. Ayrıca enerji kaybını en aza indirmesi açısından manyetik yataklarda kullanılan malzemelerin kalınlığının az olması istenir. Bu manyetik yataklar kullanılan sac malzemelerinin pahalı olmasının nedenlerinden biridir. Fakat manyetik yatakların uygulama alanlarına ve kullanılan malzemelerin maliyetlerine göre farklı malzemeler kullanılabilir. Manyetik yatakların çoğunlukla kullanıldığı yüksek hızlı uygulamalarda ise düşük kayıp değerlerine sahip malzemelerin tercihi daha uygun olmaktadır. Örnek olarak askeri ve uzay uygulamaları gibi kritik alanlarda kullanılan motorların sac malzemeleri ile gıda endüstrisinde kullanılan manyetik yatakların sac malzemeleri farklı olabilmektedir.

Mıknatıs malzemelerinin hızlı gelişimi ve sürekli mıknatısların keşfiyle sürekli mıknatısların elektrik motorlarında kullanılması artmış ve paralel olarak manyetik yataklarda kullanılmaya başlanmıştır. Struder'in sürekli mıknatısların aktif manyetik yataklara uygulanması ile ilgili ilk çalışmalarıyla birlikte sürekli mıknatıslı manyetik yataklar literatürde yerini almıştır [7]. Teknolojinin gelişmesi sürekli mıknatısların 1980'lerin sonlarından itibaren endüstride yaygınlaşması ve ekonomik hale gelmesiyle manyetik yatak uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır.

2000'li yıllara gelindiğinde ise yazılımların gelişmesiyle birlikte sürekli mıknatıslı manyetik yataklar kesin ve doğru sonuçlar ile bilgisayar ortamında tasarlanmış ve yataksız motor diye adlandırılan yeni bir manyetik yatak sistemi üzerine araştırmalar artmıştır. Yataksız motorlarda manyetik yatak hem rotoru ve mili dengelemekte hem de rotor ve mili döndürmektedir. Günümüz araştırmalarında sürekli mıknatıslar daha çok yataksız motorlarda kullanılmaktadır. Sürekli mıknatısların manyetik yataklara

entegre edilmesiyle kaçak akıların ve bakır kayıplarının en aza indirilmesi sağlanmış enerji verimliliği ve çalışma sürekliliği kazanılmıştır. Bu avantajların yanında sürekli mıknatıslı manyetik yatakların tasarımı ve kontrolü daha karmaşık ve zor bir hale gelmiştir.

Sürekli mıknatıslı manyetik yatakların temeli elektrik motorlarına dayanmaktadır. Sürekli mıknatıslı malzemeler aynı manyetik yataklarda olduğu gibi elektrik motorlarında da uyartım akısını oluşturmak için kullanılmaktadırlar. Sürekli mıknatıs malzemeleri genel olarak Al-Ni-Co, Ferit, Samaryum Kobalt ve NdFeb sınıflarına ayrılmaktadır. Al-Ni-Co; Alüminyum, Nikel, Demir ve Kobalt elementlerinden oluşmuş bir alaşım olup, 2. Dünya Savaşı yıllarında Bell laboratuvarı tarafından keşfedilmiştir. Mıknatıs malzemeleri arasında en eski tarihe sahip olan Al-Ni-Co mıknatıslarıdır. Al-Ni-Co türü mıknatıslar yüksek akı yoğunluğuna sahip olmalarının yanında pahalı olmaları ve manyetik özelliklerini kolayca kaybetmeleri gibi dezavantajlara da sahiptir.

Mıknatıs malzemelerinin bir diğer türü olan Ferit mıknatıslar, 1950'li yıllarda bulunmuştur. Al-Ni-Co tip mıknatıslara oranla daha ucuz olan Ferit mıknatıslar, sürekli mıknatısların yaygın olarak kullanılmasına imkan kılmıştır. Ferit tip mıknatıslar kırılgan bir yapıya sahip olmalarının yanında Al-Ni-Co mıknatıslara oranla daha düşük akı yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca mıknatıslanma değerlerinin yüksek olması demagnetize olma oranlarına düşürmektedir. Ferit mıknatıslar literatürde seramik mıknatıslar olarak da bilinmektedir.

Mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler 1960'lı yıllara gelindiğinde Samaryum ve Kobalt elementlerinden oluşan alaşımın (SmCo) keşfedilmesiyle büyük bir sıçrama yapmıştır. Bulunan bu alaşım literatürde nadir toprak mıknatısı olarak geçmektedir. Kırılgan bir yapıya sahip olan SmCo mıknatısların mıknatıs enerjileri, Al-Ni-Co ve Feritlere göre çok daha yüksektir.

Sürekli mıknatıslı motorların kullanım alanlarının artması ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanması ise, 1983 yılında Neodimiyum Demir Boron (Neodymium Iron Boron - NdFeB)'larin bulunması ile olmuştur. NdFeB mıknatıslarının bulunması ile manyetik akı yoğunluğu (*Br*) ve mıknatıslanma (*Hc*) değerleri çok daha yüksek seviyelere bu sayede ulaşabilmiştir. Bu tip mıknatısların avantajları arasında

Samaryum Kobalt (SmCo) mıknatıslardan ucuz olmaları ve günümüzde en yüksek güç yoğunluğuna sahip mıknatıslar olmaları söylenebilir. Ayrıca NdFeB mıknatısların kırılgan olmaları ve paslanmaya karşı koruma gereksinimi bu tip mıknatısların dezavantajları arasında gösterilebilir. Tablo 2.1'de sürekli mıknatıs malzemelerinin karşılaştırılması verilmiştir [34].

Tablo 2.1. Sürekli mıknatısların karşılaştırılması

	AlNiCo	Ferrit	SmCo	NdFeB
İlk uygulaması	1932	1952	1970	1983
Manyetik akı yoğunluğu (*Br*) [T]	0,5-1,35	0,15-0,43	0,9-1,1	1,0-1,4
Kalıcı mıknatıslanma (*Hc*) [kA/m]	40-150	150-350	700-2400	900-3200
Maksimum çalışma sıcaklığı [°C]	700-850	350-450	250-375	150-200
Korozyon direnci	Çok düşük	Mükemmel	Mükemmel	Düşük
Maliyet	Orta	Düşük	Çok yüksek	Yüksek

Tablo 2.1'de karşılaştırılmaları verilen sürekli mıknatısların tarihsel gelişimine bakıldığında teknolojini gelişmesiyle birlikte yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip sürekli mıknatısların keşfi gelmektedir. Manyetik yatak tasarımında günümüzde genellikle yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip NdFeB tip sürekli mıknatıslar kullanılmaktadır. NdFeB tip sürekli mıknatısların en büyük dezavantajı yüksek sıcaklık değerlerinde mıknatıslanma özelliklerinin yok olmasıdır. Bu yüzden yüksek sıcaklık içeren uygulamalarda NdFeB tip sürekli mıknatısları kullanılmamaktadır.

Manyetik yatakların bileşenlerinden bir tanesi de bobinlerdir. Manyetik yataklarda bobinlerden elde edilen akım yoğunluğu direk olarak verimi etkiler. Bu sebepten dolayı bobin malzemesi, bobinin kesit geometrisi ve bobin koruyucu malzemesinin seçimi elektrik motorlarında olduğu gibi manyetik yataklarda da önemli bir konudur. Bobinlerin iyi elektriksel özelliklere ve uzun çalışma ömürlerine sahip olması istenir. Manyetik yataklarda bobin malzemesi olarak genellikle bakır kullanılır. Fakat bakırın yanında nikel, gümüş ve alüminyum bobinlerde mevcuttur. Bakır çok iyi bir iletkendir fakat oksidasyona uğramaması için korumaya ihtiyaç duyar. Ayrıca bakırın direnci yüksek sıcaklarda değişime uğrar bu yüzden ortam sıcaklığı yüksek

uygulamalardaki manyetik yataklarda bu durumun göz ardı edilmemesi gerekir. Bakırın yüksek sıcaklıklar altında çalışması nikel ile alaşım oluşturması ile azda olsa önlenebilmektedir. Gümüş de aynı şekilde iyi bir iletkendir ve bakırın aksine yüksek sıcaklık altında rahatlıkla çalışabilir fakat gümüş bobinlerin maliyeti yüksektir. Alüminyum bobinler ise iyi iletkenliklerinin yanında en büyük avantajları ise hafifliklerididir. Alüminyum bakıra göre üçte bir oranda daha hafiftir ve alüminyumun bu avantajıyla uzay ve uçak endüstrisinde kullanımını daha fazladır. Bobinlerin değişik dezavantajlarını gidermek için farklı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Bu yalıtım malzemeleri sayesinde bakır bobinler 800°C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda güvenilirlikle kullanılabilmektedir [35].

Sac yapısında, sürekli mıknatıs çeşitlerinde ve bobin çeşitlerindeki farklı özelliklerden dolayı herhangi bir manyetik yatak tasarımı yapılırken ilk başta manyetik yatağın uygulama alanı üzerinde araştırmalar yapılmalı ve uygun malzemeler optimum seviyede kullanılmalıdır. İşte bu yüzden manyetik yatak tasarımları büyük önem taşımaktadır. Çünkü yapılan manyetik modelleme ile sistemin ana iskeleti oluşturulacak ve bunun üzerinde malzeme seçimleri yapılarak manyetik yatağın elektromanyetik ve termal performansı meydana gelecektir.

3. KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI İKİ FARKLI TİP MANYETİK YATAĞIN MANYETİK MODELLENMESİ VE TASARIMI

Bu bölümde klasik ve sürekli mıknatıslı iki farklı tip manyetik yatağın manyetik modellenmesi ve tasarımı konularına yer verilmiştir. İlk başta manyetizma, elektromanyetizma ve manyetik modelleme ile ilgili açıklamalarda bulunulmuş ve manyetik yatakların manyetik devre temeli ile modellenmesi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tez kapsamındaki iki farklı tip manyetik yatağın tasarımları ve karşılaştırılmaları yapılmıştır.

3.1. Manyetizma ve Elektromanyetizma

Günümüzde en temel basit bir sistemden en karmaşık bir sisteme kadar hayatımızdaki birçok ürün manyetizma kurallarına göre çalışmaktadır. Manyetizma ile ilgili söylemler tarih öncesi yıllara dayanmaktadır. Manyetizma üzerine ilk yazılı belge M.Ö. 2. yüzyılda Çin'de yazılmıştır ve bu belgede manyetik malzemelerin demiri çekip itebileceğinden ilk defa bahsedilmiştir [36]. 12. yüzyılda ise Çinlilerin manyetik tabanlı pusulayı navigasyon için kullanıldığı bilinmektedir. 17. yüzyılda ise manyetik malzemelerin kutupları hakkında çalışmalar yapılmış, kuzey-güney kutupları bilgisine ulaşılmış ve manyetik akının yönü hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Elektromanyetizma ise elektrikle yüklü parçacıklar arasındaki etkileşime neden olan kuvvettir. Bu etkileşimin gerçekleştiği alanlara ise elektromanyetik alan olarak tanımlanır ve bu kuvvet doğadaki dört temel kuvvetten biridir. 1800'lü yıllara kadar manyetizma ve elektriğin birbirleri ile ilişkisi açıklanamamıştır. Elektrik ve manyetizmanın birbirinden bağımsız olarak düşünülmekteydi. Elektrik ve manyetizma arasındaki ilişki ilk defa 1820 yılında Hans Christian Ørsted tarafından ortaya konulmuştur [37]. Aynı yılda Fransız bilim adamı Andere Marie Ampere üzerinden akım geçen iki telin birbirlerini etkilediğini gözlemlemiştir. Ampere manyetik alan ile bu alanı doğuran akım arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmiştir [38].

Elektromanyetizma ile ilgili diğer bir önemli buluş ise 1821 yılında Michael Faraday'ın elektromanyetik indüklenmeyi keşfetmesi olmuştur. Bu olay elektrik motorlarının ve generatörlerinin keşfi olarak kabul edilmektedir. Yani Faraday bu buluşu ile manyetik kuvvetten elektriksel gücü elde etmiştir. Faraday'ın elde ettiği deneysel bulgular James Clerk Maxwell'in ortaya koyduğu elektromanyetizma kuramına temel oluşturmuştur. James Clerk Maxwell 1873 yılında yayınladığı eserinde o güne kadar bütün elektrik ve manyetizma yasalarını sistemli bir bütünlük içerisinde matematiksel bir yapıya kavuşturmuştur [39]. Değişken elektrik ve manyetik alanların birbirlerinden ayrı olarak var olamayacağını göstermiş, elektromanyetik alan ve dalga kavramlarını geliştirmiştir. Maxwell'in öngördüğü elektromanyetik dalgalar ise 1889 yılında Heinrich Hertz tarafından laboratuvar koşullarında elde edilmiştir.

3.2. Manyetik Modelleme

Manyetik yatakların en önemli kısmı oluşturdukları elektromanyetik kuvvet değeridir. Bu sebepten dolayı manyetik enerjinin ve oluşan kuvvetin hesaplanması gayet önemlidir. Bu hesaplamalar genellikle manyetik eşdeğer devre modeli veya sonlu elemanlar analizi yöntemi ile yapılmaktadır. Bu bölümde manyetik eşdeğer devre benzetim modellenmesi anlatılmıştır. Manyetik devre tıp ki bir elektrik devresi gibi manyetik kaynaktan çıkan akının kapalı bir yol üzerinden geçerek devresini tamamladığı bir devredir. Manyetik devreler için elektrik devrelerinin manyetik eşdeğer benzetimleri yapılmıştır. Manyetik devrelerde akı sürekli mıknatıslar veya bobinler tarafından oluşturulur ve manyetik devre üzerinden yolunu tamamlar.

Manyetik devre kavramı elektrik devrelerinde manyetik kaynaklardan meydana gelen akının ve akıya bağlı olarak oluşan değerlerin hesaplanması için ortaya konulmuştur. Bu sayede içinde transformatör gibi karmaşık sistemlerin olduğu devrelerde manyetik alanlar kolaylıkla çözüme kavuşturulmuştur. Manyetik devre benzetim modeli ile ilgili çalışmalarda elektrik devrelerindeki Ohm kanunu baz alınarak manyetik benzetimler elde edilmiştir. Elektrik devresinde direnç kavramına karşın manyetik direnç yani relüktans kavramını ilk defa 1888 yılında Oliver Heaviside tarafından ortaya atılmıştır. Aynı şekilde elektro motor kuvveti yani EMK kavramının manyetik eşdeğer karşılığı olan manyeto motor kuvveti yani MMK

kavramı ise 1883 yılında Basonquet tarafından bilime kazandırılmıştır. Ohm kanunun manyetik devre benzetimini ise İngiliz John Hopkinson yapmıştır. Aynı benze çalışma Henry Rowland tarafından da yapılmış ve literatürde Hopkins veya Rowland kanunun olarak geçmektedir. Tablo 3.1'de manyetik devre ve elektrik devre elemanlarının benzetimleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Manyetik ve elektrik devre elemanları benzetim modeli

Elektriksel	Manyetiksel
Gerilim (v), [V]	MMF ($\mathcal{F}$), [A-t]
Akım (i), [A]	Akı (ϕ), [Wb]
Direnç (R), [ohm]	Relüktans ($\Re$), [A-t/Wb]
Elektrik alan şiddeti (E), [V/m]	Manyetik alan şiddeti (H), [A-t/m]
Akım yoğunluğu (J), [A/m^2]	Manyetik akı yoğunluğu (B), [T]
İletkenlik (σ), [S/m]	Geçirgenlik (μ), [H/m]

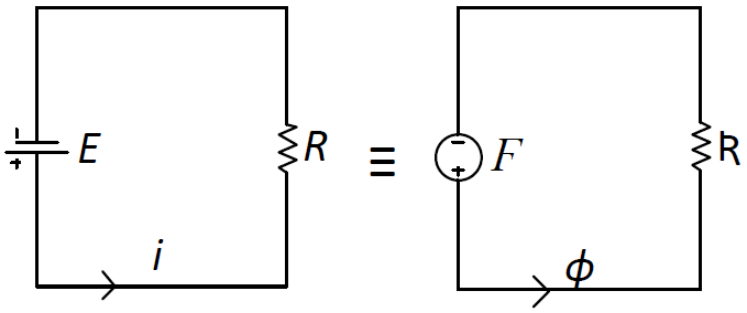
Tablo 3.1'de verilen benzetim modelinde gerilim manyetiksel olarak manyeto motor kuvvetine, akım manyetik akıya ve elektriksel direnç de manyetik dirence yani relüktans olarak benzetimleri yapılmıştır. Denklem (3.1)'de manyeto motor kuvvet denklemi verilmiştir.

$$MMK = \phi\Re \tag{3.1}$$

Manyeto motor kuvveti aynı elektrik devrelerindeki gerilim denklemi gibi devreden akan akı ve devrenin gösterdiği direncin çarpılmasıyla bulunur. Manyeto motor kuvvetinin kaynağı ise manyetik devrede akıyı oluşturan fiziksel bir kuvvettir ve bobin sarım sayısı ile bobinden geçen akımın çarpılmasıyla elde edilir. Denklem (3.2)'de manyeto motor kuvvet denklemi gösterilmiştir.

$$MMK = Ni \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'de N sarım sayısını, i ise bobinden geçen akımı ifade etmektedir. Şekil 3.1'de elektrik ve manyetik eşdeğer devreleri gösterilmiştir. Eşdeğer devrede elektriksel olarak akım manyetik eşdeğeri olarak akı, elektriksel gerilim manyetik eşdeğer olarak MMK, elektriksel direnç ise manyetik direnç olarak benzetim yapılmaktadır.



Şekil 3.1. Elektrik ve manyetik eşdeğer devresi

Manyetik devrede akan akı manyetik kaynağın fiziksel parametrelerine ve devreyi oluşturan malzemelere bağlıdır. Akı yolundaki malzemelerin gösterdiği direnç akının değerini direkt olarak etki eder ve bu manyetik dirence relüktans denir. Relüktans malzemenin geçirgenliğine, akı yolunun uzunluğuna ve akının aktığı malzemenin kesit alanına bağlıdır. Denklem (3.3)'de relüktans formülü verilmiştir.

$$\Re = \frac{1}{\mu}\frac{l}{A} \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'de μ geçirgenliği, *l* akı yolunun uzunluğunu, *A* ise akı yolundaki kesit alanıdır. Denklemden anlaşılacağı üzere manyetik direnç malzemenin manyetik özelliklerine ve fiziksel boyutlarına bağlıdır. Manyetik eşdeğer devre ile hesaplanan diğer değerler ise manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddetidir. Manyetik alanda iki temel vektörden meydana gelmektedir. Bunlardan bir tanesi manyetik alan şiddeti *H* öteki ise manyetik akı yoğunluğu *B*'dir. Manyetik akı yoğunluğu manyetik alan şiddeti ile geçirgenliğin çarpılmasıyla oluşur ve manyetik yataklarda kullanılan sac malzemelerinde doğrusal olmayan bir ilişki içeresindedir. Manyetik geçirgenlik ise μ sembolü ile ifade edilir. Eşdeğer manyetik devre modellerinde geçirgenlik ferromanyetik malzemenin doğrusal bölgesinde olduğu varsayılarak kabul edilir ve bu şekilde hesaplamalar yapılır. Manyetik yataklarda kullanılan malzemelerin B-H eğrilerinin bu yüzden olabildiğince doğrusal olması istenir. Bu şekilde daha kararlı ve doğru analitik hesaplamalar yapmak mümkün olacaktır. Manyetik akı yoğunluğu ise manyetik geçirgenlik ile manyetik alan şiddetinin çarpılmasıyla bulunur. Denklem (3.4)'de manyetik akı yoğunluğunun denklemi verilmiştir.

$$B = \mu H \tag{3.4}$$

Denklem (3.2) ve Denklem (3.4)'de verilen eşitlik temel olarak Ampere yasasına dayanmaktadır. Ampere yasasına göre üzerinden akım geçen bir iletkenin çevresinde bir manyetik alan oluşur ve manyetik alan iletken geçen akım ile doğru orantılıdır. Bu yasa Maxwell'in muhteşem denklemlerinin bir tanesinin temelini oluşturmaktadır. Ampere yasası Denklem (3.5)'de verilmiştir.

$$\int_c Bdl = \mu_0 i \tag{3.5}$$

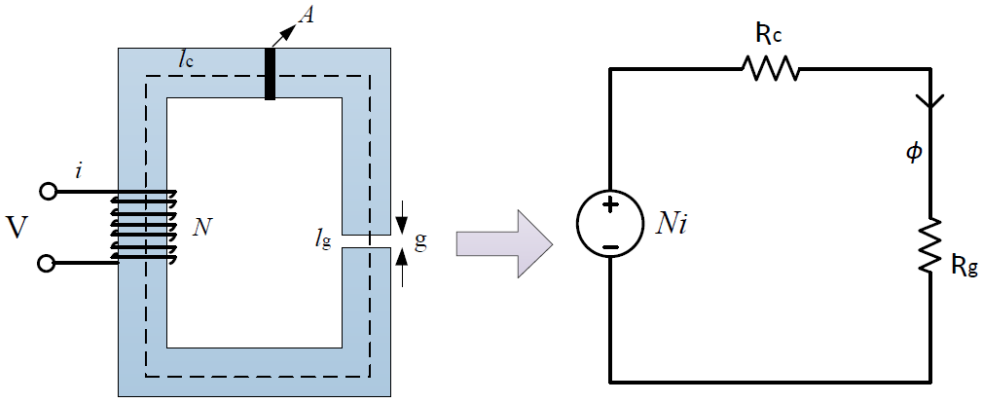
Denklem (3.5)'e bakıldığında belirli bir sınır koşullarına sahip bir uzayda toplam manyetik akı yoğunluğu, havanın manyetik geçirgenliği ile geçen akımın çarpılmasıyla bulunur. Denklemde μ_0 havanın geçirgenliğini ifade etmektedir ve değeri $4\pi 10^{-7}$ Hm^{-1}'dir. Denklem (3.5)'deki manyetik geçirgenliği denklemden kaldırırsak Amper yasası Denklem (3.6)'daki gibi ifade edilmektedir.

$$\int_c Hdl = Ni \tag{3.6}$$

Denklem (3.6) kapalı bir akı yolundaki toplam manyetik alan şiddeti sınır koşullarındaki bobin sarım sayısı ile bobinlerden geçen akımın çarpımına eşittir. Bu denklem ayrıca manyeto motor kuvvetin tanımını da yapmaktadır.

3.3. Temel Manyetik Devrelerin Modellenmesi

Manyetik modellemeyi temel bir örnek ile açıklamak gerekirse, Şekil 3.2'de çelik bir nüveye sarılmış bir bobinin manyetik eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 3.2. Çelik nüveye sarılmış bir bobinin manyetik eşdeğer devresi

Şekil 3.2'de bobin sarımları *Ni* olarak manyetik eşdeğer devrede gösterilmiş ve hava aralığındaki kaçak akılar ihmal edilmiştir. Çelik nüvedeki ve hava aralığında oluşan manyetik direnç ise R_c ve R_g olarak gösterilmiştir. Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'de manyetik eşdeğer devredeki relüktans formülleri verilmiştir.

$$\Re_c = \frac{1}{\mu_0 \mu_c} \frac{l_c - g}{A} \tag{3.7}$$

$$\Re_g = \frac{1}{\mu_0 \mu_g} \frac{g}{A} \tag{3.8}$$

Burada l_c nüvedeki akı yolunu, g hava aralığı uzunluğunu, A ise kesit alanını temsil etmektedir. Bobin sarım sayısı ve akımın çarpılmasıyla devrede oluşan manyeto motor kuvvet elde edilmektedir. Manyeto motor kuvveti ayrıca nüvedeki ve hava aralığındaki manyetik alan şiddeti ile de bulunabilmektedir. Denklem (3.9)'da manyeto motor kuvveti denklemi verilmiştir.

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \tag{3.9}$$

Denklem (3.9)'da H_c ve H_g nüvedeki ve hava aralığındaki manyetik alan şiddetini temsil etmektedir. Şekil 3.2'de verilen manyetik eşdeğer devredeki manyetik akı ise Denklem (3.10)'da verilmiştir.

$$\phi = \frac{Ni}{\Re_c + \Re_g} \tag{3.10}$$

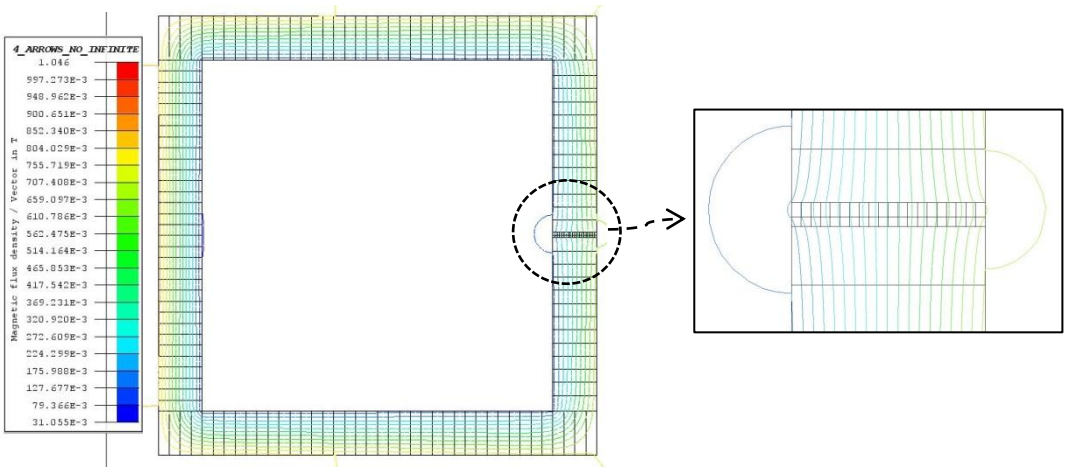
Akı devredeki manyetik kaynağın devredeki total manyetik dirençlere bölünmesiyle elde edilmektedir. Denklemde ϕ manyetik akıyı temsil etmektedir ve birimi Tesla'dır. Manyetik eşdeğer devrede demir çekirdeğinde ve hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu ise akının kesit alana bölünmesiyle oluşur. Denklem (3.11)'de manyetik akı yoğunluğu eşitliği verilmiştir.

$$B_c = B_g = \frac{\phi}{A} \tag{3.11}$$

Hava aralığındaki manyetik akının kaçakları ihmal edilmiş ve kesit alanıyla eşit olduğu kabul edilirse demir çekirdeğindeki ve hava aralığındaki manyetik akı ve akı

yoğunluğu aynı olmaktadır. Fakat tam olarak gerçek bir sonuç almak için kaçak akıların modellenmesi gerekmektedir. Analitik olarak kaçak akıların modellenmesi mümkün değildir. Manyetik devrelerde kaçak akıların tam olarak modellenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kaçak akıların tam olarak analizi ve manyetik devrelerin karakteristiğini belirleyen hava aralığının modellenmesi tam olarak yapılabilmektedir.

Şekil 3.2'deki devrenin manyetik eşdeğer devresinde kaçak akılar ihmal edilmiş ve hava aralığındaki ve demir nüvedeki manyetik akı yoğunluğu analitik olarak hesaplandığında eşit çıkmıştır. Aynı manyetik modelin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapıldığında ise kaçak akılar belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu duruma bir örnek olması için Şekil 3.3'de 500 amper sarım değerine sahip bir bobin ve 0,5 mm hava aralığına sahip bir elektromıknatısın sonlu elemanlar yöntemi ile analizi sonucundaki akı yolları gösterilmiştir.

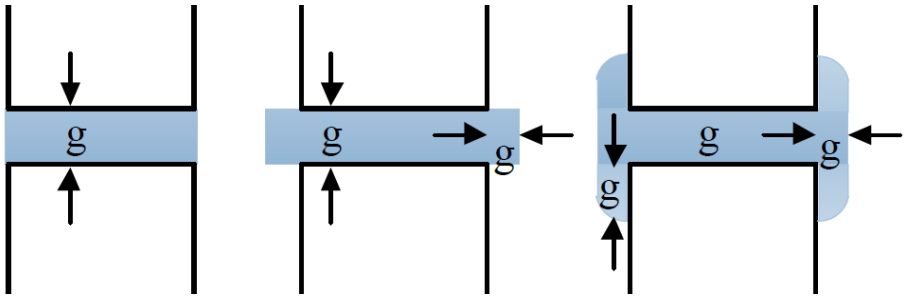


Şekil 3.3. Manyetik devrenin akı çizgileri

Şekil 3.3'den gözüktüğü gibi akı hava aralığından saçaklanma yaparak geçmekte ve manyetik eşdeğer devredeki modellemenin aksine daha geniş bir yoldan geçerek devresini tamamlamaktadır. Bu durumda hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu demir nüvedeki akı yoğunluğuna eşit olmamaktadır. Şekil 3.3'deki elektromıknatıs kaçak akıların ihmal edildiği manyetik eşdeğer devre modelinde hava aralığındaki akı yoğunluğu 1,14T, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edildiğinde akı yoğunluğu 0,92T çıkmaktadır. Bu manyetik eşdeğer devrelerde kaçak akıların modellenmesi gerektiğini göstermektedir. Kaçak akıların manyetik eşdeğer devrede modellenmesi

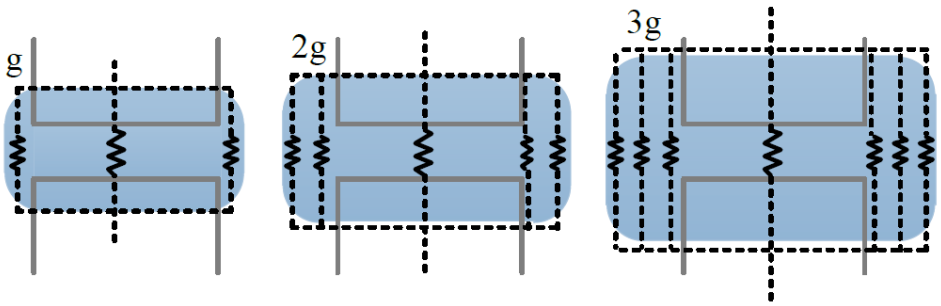
ile nümerik hataların önüne geçilmekte fakat yine en nihai sonuç sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmektedir.

Manyetik devrelerde akı hava aralığından geçerken doğrusal bir yol izlememekte ve saçaklanma yaparak hava aralığından geçmektedir. Şekil 3.4'de hava aralığındaki akının, kaçakları göz ardı edilerek ve hesaba katılarak farklı olarak modellenmeleri gösterilmiştir [40].



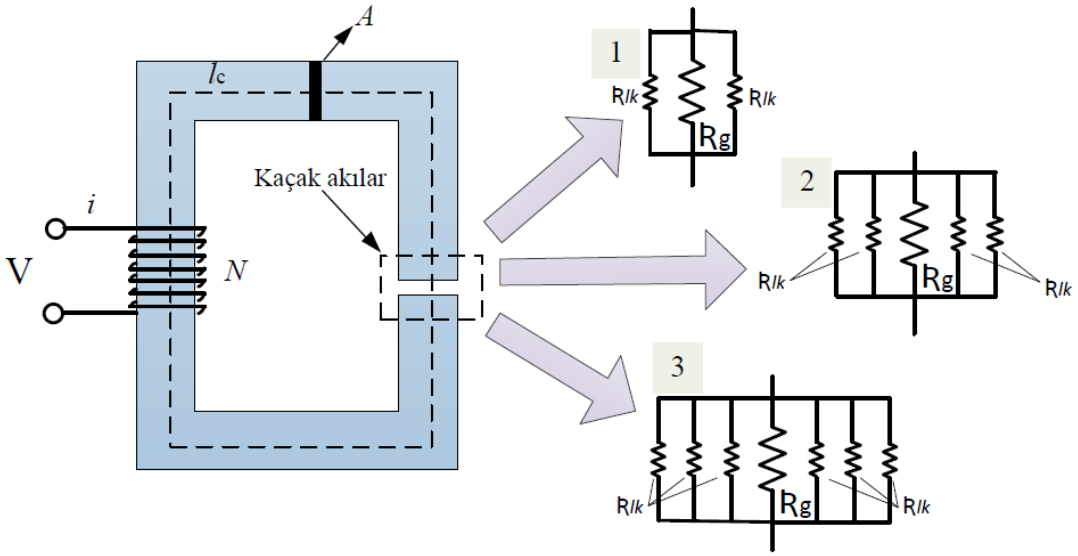
Şekil 3.4. Hava aralığındaki akı yollarının gösterilmesi

Manyetik eşdeğer devre modellenirken kaçak akıların modellenmesi ve hesaplamaya dâhil edilmesi büyük manyetik akı yoğunluğu olan manyetik devrelerde çözüm hassasiyet açısından önem arz etmektedir ve manyetik devrenin tam olarak analizi için sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan araştırmalarda kaçak akıların genellikle hava aralığının mesafesi temel alınarak modellendiği gözlemlenmiştir. Bu oran manyetik devrenin fiziki koşullarına göre değişebilmekte hava aralığının 10 katına kadar çıkabilen kaçak akı modellemeleri vardır. Şekil 3.5'de bu modelleme alternatifleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Hava aralığındaki akının modellenmesi

Çalışma kapsamında yapılan manyetik modellemelerde Şekil 3.5'deki kaçak akıların modellendiği bir benzetim yapılmıştır. Şekil 3.6'deki eşdeğer devrede hava aralığındaki kaçak akılar 3 farklı çeşitte modellenmesi gösterilmiştir. Bu üç farklı modellemede elde edilen sonuçlara göre çıkan en uygun modellemeler çalışma kapsamındaki modellemelerde kullanılacaktır.



Şekil 3.6. Manyetik eşdeğer devrede kaçak akıların modellenmesi

Şekil 3.6'da kaçak akıların meydana getirdiği relüktanslar R_{lk} olarak ifade edilmiştir ve Şekil 3.5'deki kaçak akı benzetimleri yapılmıştır. Akı hava aralığından geçerken saçaklanma yaparak geçmekte ve kaçak akılar oluşmaktadır. Kaçak akıların modellendiği 3 farklı manyetik devrede akan akı Denklem (3.12), Denklem (3.13) ve Denklem (3.14)'de gösterilmiştir.

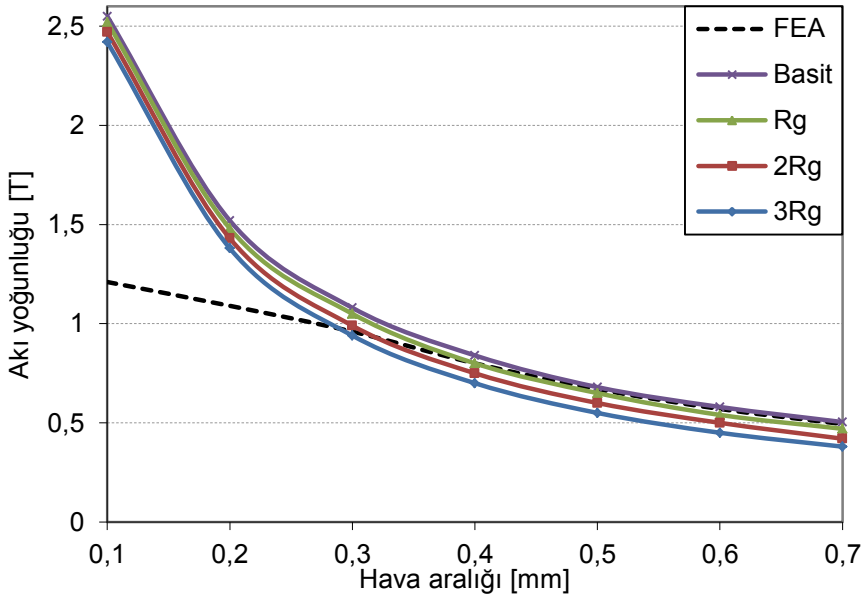
$$\phi_1 = \frac{Ni}{\Re_c + \frac{\Re_g \Re_{lk}}{2\Re_g + \Re_{lk}}} \tag{3.12}$$

$$\phi_2 = \frac{Ni}{\Re_c + \frac{\Re_g \Re_{lk}}{4\Re_g + \Re_{lk}}} \tag{3.13}$$

$$\phi_3 = \frac{Ni}{\Re_c + \frac{\Re_g \Re_{lk}}{6\Re_g + \Re_{lk}}} \tag{3.14}$$

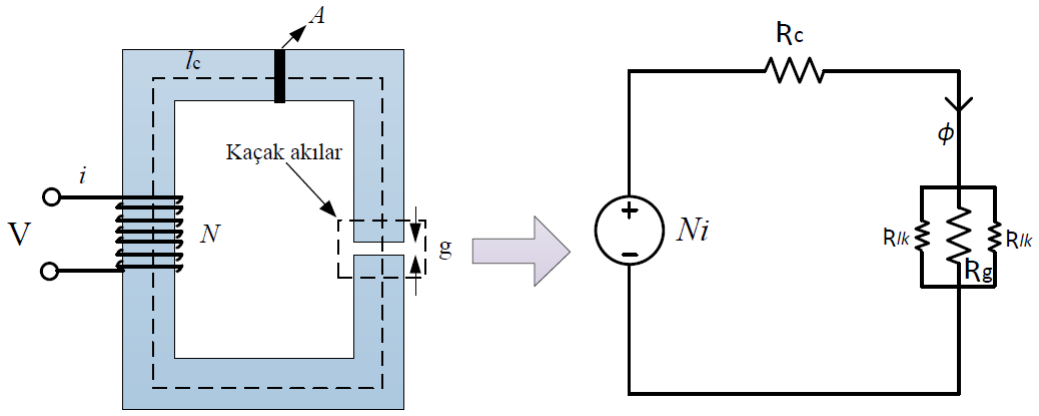
Denklem (3.12)'de birinci durumdaki modelleme, Denklem (3.13)'de ikinci durumdaki manyetik modelleme ve Denklem (3.14)'de ise üçüncü durumdaki manyetik modelleme ile elde edilen akı denklemleri verilmiştir.

Bu durumda parametrik bir çalışma yaparak hava aralığı uzunluğunun 0,1 mm'den 0,7 mm'ye kadar olan durumu kaçak akıların ihmal edilmiş ve farklı durumlarda modellenmiş manyetik eşdeğer devrede ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizi yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun hava aralığına göre olan değişimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Akı yoğunluğunun hava aralığına göre değişimi

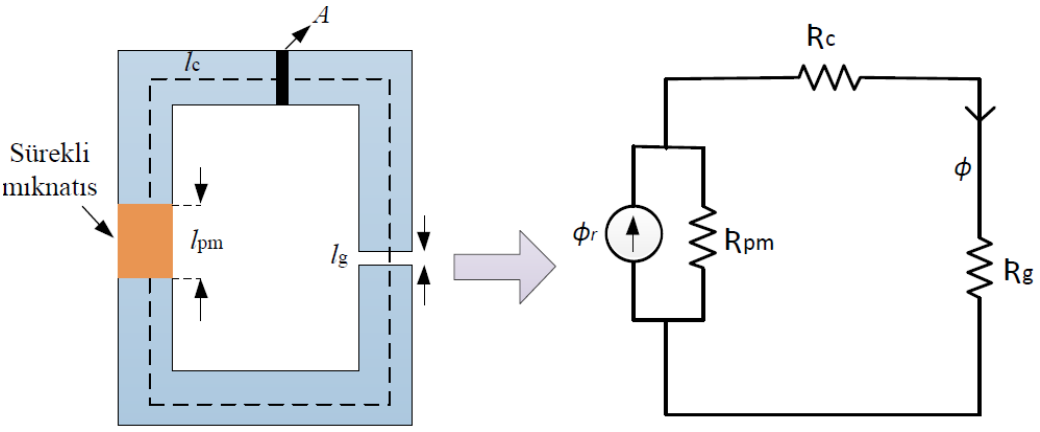
Şekil 3.7'de mor çizgi basit manyetik modelleme, yeşil çizgi Şekil 3.6'daki birinci modelleme, kırmızı çizgi Şekil 3.6'daki ikinci modellemeyi, mavi çizgi ise Şekil 3.6'daki üçüncü modellemeyi ifade etmektedir. Kesikli çizgi ise sonlu elemanlar analizi yöntemi ile elde edilen akı yoğunlukları gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kaçak akıların modellendiği birinci durumdaki yani tek kaçak relüktansın kullanıldığı manyetik modelleme SEA sonuçlarına yakın çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında sadece elektromıknatıstan oluşan devrelerdeki manyetik modellemede kaçak akılar Şekil 3.6'daki birinci modelleme yani tek bir kaçak relüktans baz alınacaktır. Şekil 3.8'de hava aralığının tam manyetik eşdeğer devre modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Elektromıknatıstaki hava aralığının tam olarak modellenmesi

3.4. Mıknatıslı Manyetik Devrelerin Modellenmesi

Manyetik yataklarda kaynak olarak bobinlerin yanı sıra sürekli mıknatıslarda kullanılmaktadır. Sürekli mıknatıslı manyetik yatakların klasik manyetik yataklara göre en büyük avantajı çok düşük amper sarımlarda klasik manyetik yatağa göre daha büyük kuvvet değerlerini elde edebilmesidir. Şekil 3.9'da sürekli mıknatıstan oluşan bir nüvenin manyetik eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Sürekli mıknatıslı bir devrenin manyetik eşdeğer devresi

Şekil 3.9'da sürekli mıknatıs bir manyetik akı kaynağı olarak modellenmiş ve sürekli mıknatıstan meydana gelen relüktans ise manyetik kaynağa paralel olarak bağlanmıştır. Çünkü sadece sürekli mıknatıstan oluşan bir manyetik devrede manyeto motor kuvvetinden bahsetmek yerine sürekli mıknatısı sabit akım kaynağı olarak modellemek daha doğru bir benzetimdir. Şekildeki manyetik eşdeğer devrede sürekli mıknatısın ve hava aralığının kaçak akıları ihmal edilerek modelleme

yapılmıştır. Sürekli mıknatısın meydana getirdiği akı ϕ_r, sürekli mıknatıs relüktansı ise R_{pm} olarak gösterilmiştir. Denklem (3.15) ve Denklem (3.16)'de sürekli mıknatıs akı ve relüktans formülleri gösterilmiştir.

$$\phi_r = B_r A \tag{3.15}$$

$$\Re_{pm} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_{pm}}{A} \tag{3.16}$$

Manyetik eşdeğer devrede akan akı ise devredeki manyetik eşdeğer relüktansın bulunmasıyla elde edilebilmektedir. Sürekli mıknatıs ve hava aralığı kaçak akılarının ihmal edildiği ve akının eşdeğer devrede tam anlamıyla dolaştığı varsayılırsa devrede akan akı denklemi elde edilmiş olur. Denklem (3.17)'de eşdeğer devreden akan akı verilmiştir.

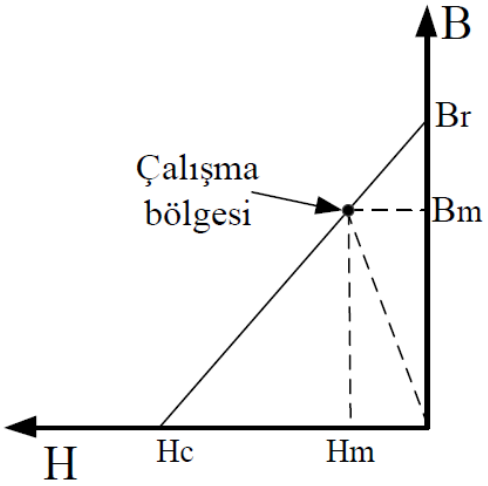
$$\phi = B_r A \frac{\Re_{pm}}{\Re_{pm} + \Re_g + \Re_c} \tag{3.17}$$

Devreden akan akı sürekli mıknatısın sağladığı akı kaynağının devrede birbirlerine paralel bir şekilde bağlı olan relüktanslara bölünmesiyle elde edilmektedir. Denklemde ϕ manyetik akıyı temsil etmektedir ve birimi Tesla'dır. Manyetik eşdeğer devrede sürekli mıknatısta ve hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu ise akının kesit alana bölünmesiyle oluşur. Denklem (3.18)'de kaçak akıların ihmal edildiği durumdaki manyetik akı yoğunluğu eşitliği verilmiştir.

$$B_{pm} = B_g = \frac{\phi}{A} \tag{3.18}$$

Denklemde B_{pm} sürekli mıknatıstaki manyetik akı yoğunluğunu, B_g ise hava aralığındaki akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Hava aralığındaki manyetik akının kaçakları ihmal edilmiş ve kesit alanıyla eşit olduğu kabul edildiğinde sürekli mıknatıstaki ve hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu aynı olmaktadır. Sürekli mıknatıstaki akı yoğunluğuna bakıldığında artık mıknatıslanma akı yoğunluğundan düşük olduğu gözükmektedir. Bu sürekli mıknatısın manyetik devredeki çalışma noktasını göstermektedir. Sürekli mıknatısın çalışma noktası eşdeğer devredeki

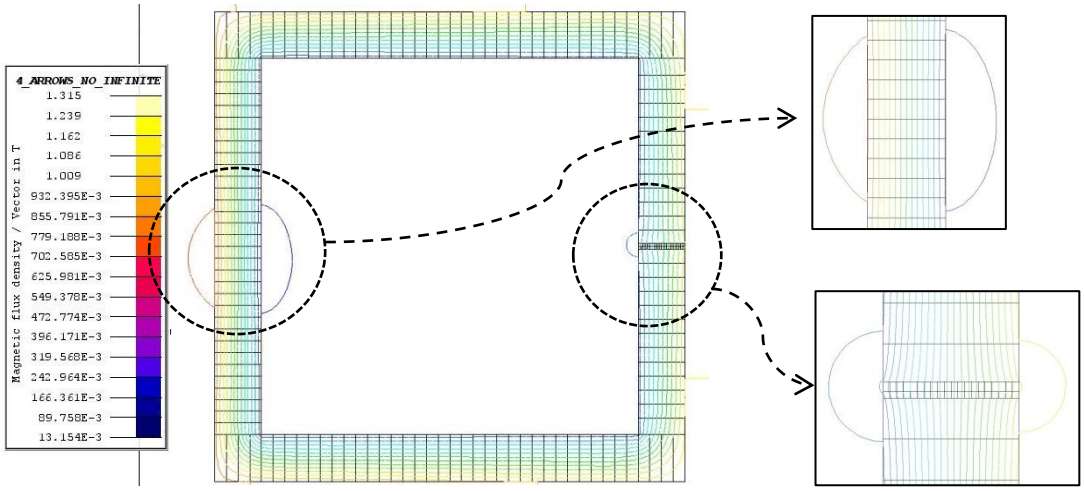
relüktanslara ve sürekli mıknatısın fiziksel özelliklerine göre değişmektedir. Şekil 3.10'da sürekli mıknatısın çalışma bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Sürekli mıknatısın çalışma bölgesi

Şekilde sürekli mıknatısın artık mıknatıslanan akı yoğunluğu B_r, artık mıknatıslanması ise H_c ile gösterilmiştir. Çalışma bölgesini belirleyen çizgi ise manyetik devre bileşenlerine bağlı olmakla beraber sürekli mıknatısın fiziksel boyutlarına da bağlıdır.

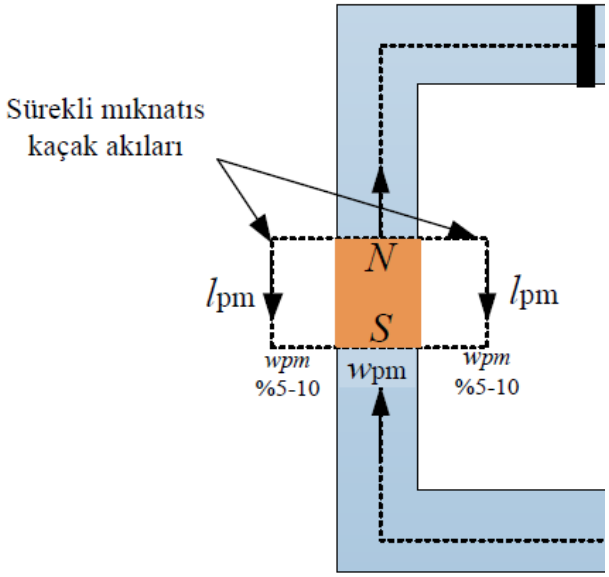
Şekil 3.9'daki manyetik eşdeğer devrede kaçak akılar ihmal edilmiştir ve aynı Şekil 3.2'deki manyetik eşdeğer devredeki gibi hava aralığındaki akı yoğunluğu sürekli mıknatıstaki ve manyetik malzemedeki akı yoğunluğuna eşittir. Fakat gerçekte ise sürekli mıknatısın kendi kaçak akıları ve hava aralığındaki kaçak akılar mevcuttur. Sonlu elemanlar yöntemi ile sürekli mıknatıstaki ve devredeki kaçak akıların tam olarak modellenmesi ve analize dâhil edilmesi mümkün olmaktadır. Şekil 3.9'daki manyetik modelin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapıldığında ise kaçak akılar tam olarak hesaplanabilmektedir. Örnek olması için Şekil 3.9'daki devredeki sürekli mıknatısın 20 mm uzunluğa, 10 mm genişliğine sahip olduğu ve nüve üzerinde 0,1 mm hava aralığına sahip olduğu bir yapı ele alınırsa özellikle yüksek akı yoğunluğuna sahip olunan sürekli mıknatıslı devrelerdeki manyetik eşdeğer devre ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması daha bir öne çıkmaktadır. Şekil 3.11'de sürekli mıknatıslı devrede sonlu elemanlar analizi ile elde edilen akı yolları gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Sürekli mıknatıslı bir devredeki akı çizgileri

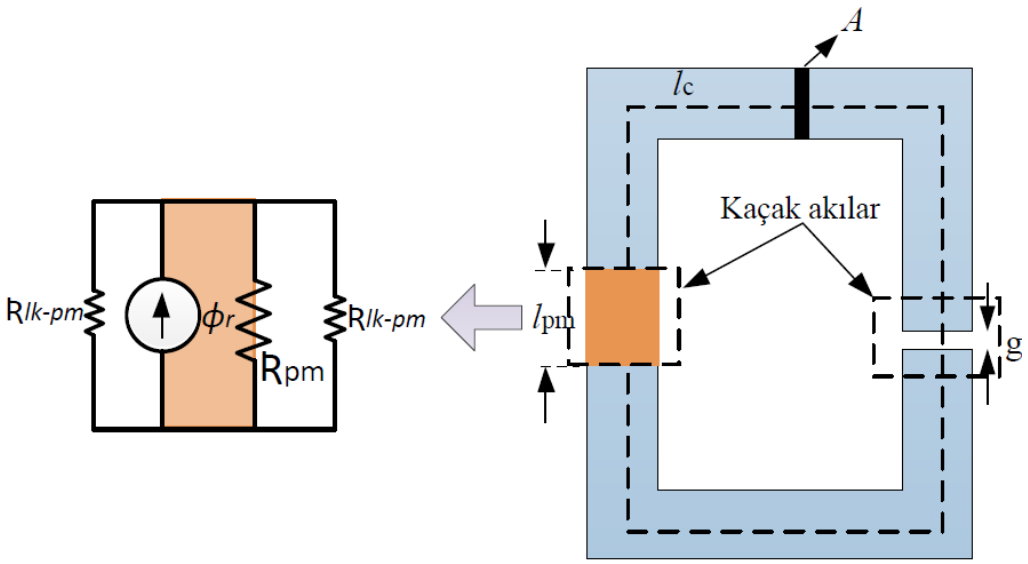
Gerçekte Şekil 3.11'daki gibi sürekli mıknatısta ve hava aralığında kaçak akılar meydana gelmektedir. Manyetik eşdeğer devre ile yapılan hesaplamada hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu 1,2T, sonlu elemanlar analizi yöntemi ile hava aralığındaki akı yoğunluğu 1T elde edilmektedir. Bu durum manyetik eşdeğer devrede sürekli mıknatıstaki ve hava aralığındaki kaçak akıların modellenmesi gerektiğini belirtmektedir.

Sürekli mıknatıslı devrede modellenen manyetik eşdeğer devrelerde hava aralığındaki ve sürekli mıknatıs üzerindeki kaçak akılar ihmal edilmiştir. Fakat manyetik devrelerde özellikle sürekli mıknatıs bulunan yüksek akı yoğunluğuna sahip ve sürekli mıknatıs relüktansının etkilediği devrelerde hava aralığında ve sürekli mıknatıs üzerinde oluşan kaçak akıların modellenmesinin önem taşıdığı sonlu elemanlar analizi yöntemi ile açıklanmıştır. Normalde akının bir kısmı sürekli mıknatıs üzerinden devresini tamamlamakta ve kaçak relüktanslar oluşmaktadır. Bu kaçak relüktansların tanımlanması matematiksel benzetim açısından önem arz etmektedir. Sürekli mıknatıs kaçak akılarının tam olarak benzetimi mümkün değildir ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tam anlamıyla hesaplanabilmektedir. Literatüre bakıldığın sürekli mıknatıs kaçak akıları mıknatıs hacimlerine ve manyetik devre özelliklerine bağlı olmak ile birlikte akının %5-10'nun kaçak akı olarak devresini tamamladığı varsayılmıştır. Bu tez kapsamında manyetik eşdeğer devre modellemelerinde sürekli mıknatıs kaçak akıları %5 olacak şekilde bir modelleme yapılmıştır. Şekil 3.12'de sürekli mıknatıs kaçak akıları gösterilmiştir [40].



Şekil 3.12. Sürekli mıknatıs kaçak akıları

Kaçak akıların modellenmesi büyük manyetik akı yoğunluğu olan sürekli mıknatıslı manyetik devrelerde çözüm hassasiyet açısından önem arz etmektedir ve manyetik devrenin tam olarak analizi için sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesi gerekmektedir. Şekil 3.13'deki manyetik eşdeğer devrede sürekli mıknatıs üzerinde oluşan kaçak akıların modellendiği manyetik eşdeğer devre gösterilmiştir.



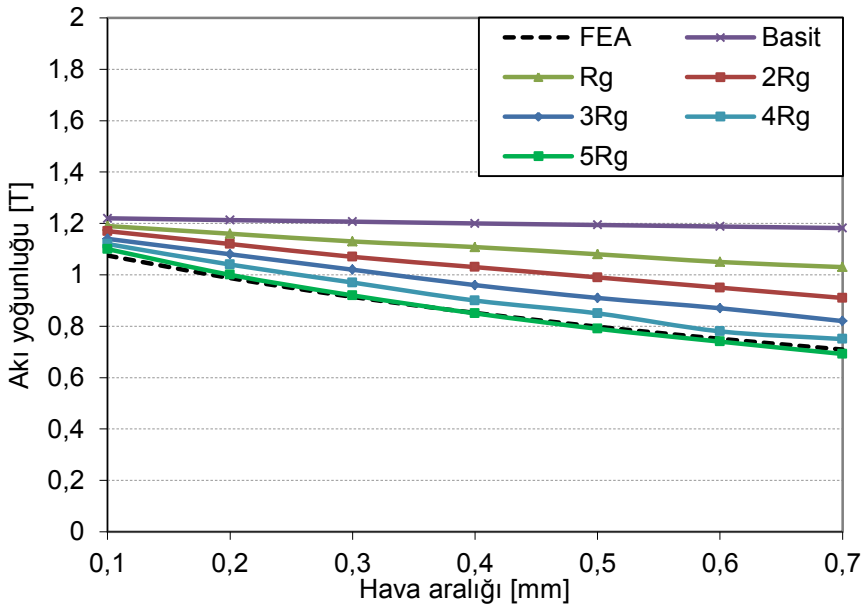
Şekil 3.13. Sürekli mıknatıslı tam manyetik eşdeğer devre

Şekil 3.13'de sürekli mıknatıs kaçak akıların oluşturduğu relüktanslar $R_{lk\text{-}pm}$ olarak ifade edilmiştir. Akı sürekli mıknatıs kaynağından çıkarken ilk başta mıknatısın

kendi üzerinden kaçak bir akı yolu üzerinden devresini tamamlamakta geri kalan akı ise nüve üzerinden hava aralığından geçmekte ve bu şekilde devresini tamamlamaktadır. Şekil 3.13'de hava aralığındaki kaçak akılar 3 farklı çeşitte modellenmiştir. Bu üç farklı kaçak akı modellenmesi ile manyetik devrede akan akı Denklem (3.19)'da ifade edilmiştir.

$$\phi = \phi_r \left(\frac{\Re_{pm}\Re_{pm-lk}}{2\Re_{pm} + \Re_{pm-lk}} \right) / \Re_{es} \tag{3.19}$$

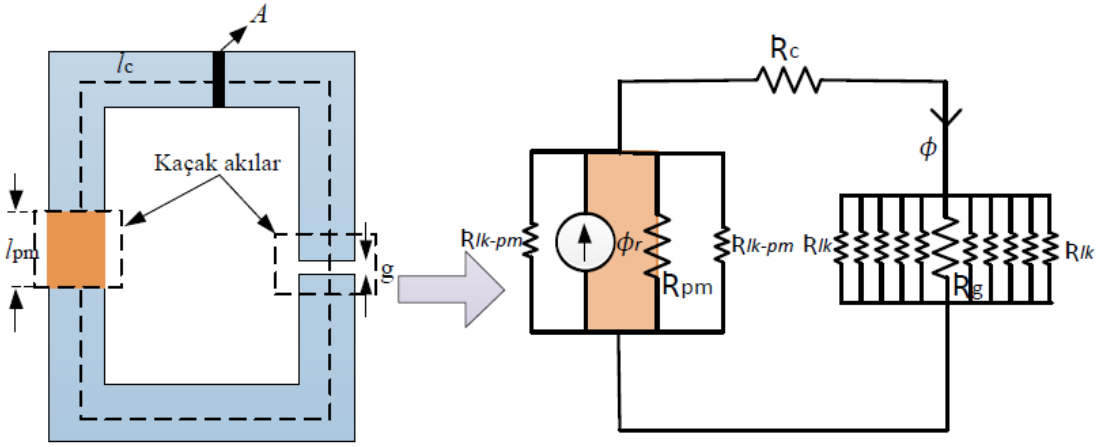
Bu durumda parametrik bir çalışma yaparak hava aralığının 0,1 mm'den 0,7 mm'ye kadar olan değişimi kaçak akıların ihmal edilmiş ve farklı çeşitlerde modellenmiş manyetik eşdeğer devrede ve sonlu elemanlar analizi yöntemi ile hesaplandığında manyetik akı yoğunluğunun hava aralığına göre değişimi Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Akı yoğunluğunun hava aralığına göre değişimi

Şekil 3.14'de mor çizgi basit manyetik modelleme ile hesaplanan değerleri, yeşil çizgi tek bir kaçak relüktans kullanılan eşdeğer devre sonuçlarını, kırmızı çizgi iki adet kaçak relüktans kullanılan manyetik eşdeğer devre sonuçlarını, lacivert çizgi ise üç tane kaçak relüktansın modellendiği eşdeğer devre sonuçlarını, mavi çizgi dört kaçak relüktans modellendiği ve yeşil çizgi ise beş adet kaçak relüktansın modellendiği manyetik eşdeğer devre sonuçlarını göstermektedir. Kesikli çizgi ise

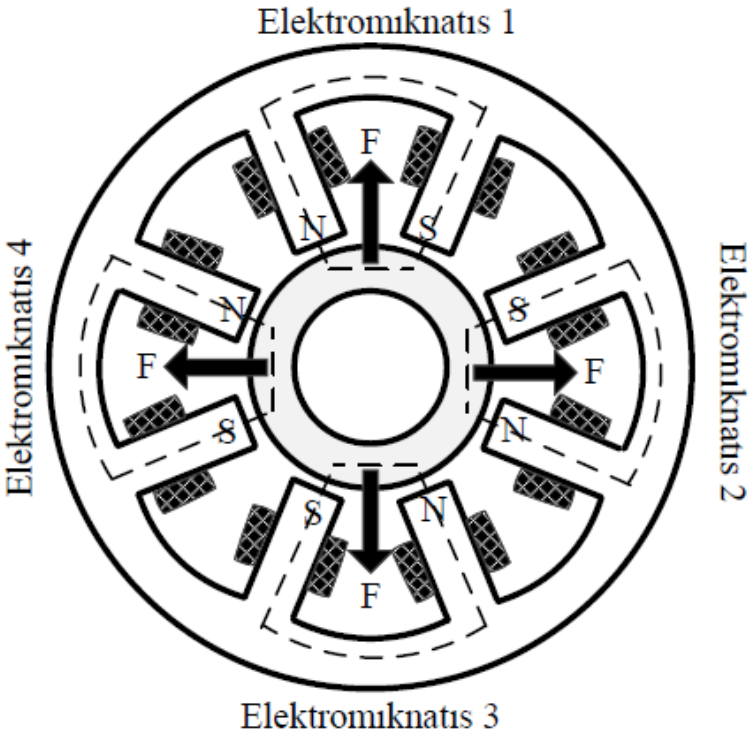
sonlu elemanlar analizi yöntemi ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 3.14'de basit manyetik devrenin modelleme hatası daha bir açık şekilde gözükmektedir. Kaçak akıların modellendiği manyetik modelleme ise SEA sonuçlarına yakın değerler içermektedir. Kaçak relüktansların arttırıldığı modellemelerde sonlu elemanlar analizi sonuçlarına yaklaşılmıştır. Beş adet kaçak relüktansın kullanıldığı modellemede SEA'ne en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Tez kapsamında sürekli mıknatıslı manyetik yatak çalışmalarında bu bölümde yapılan kaçak akı modellenmesi beş adet kaçak relüktansın modellendiği eşdeğer devre kullanılarak yapılacaktır. Şekil 3.15'de sürekli mıknatıslı bir devrede hava aralığının tam olarak modellenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. SM nüvede hava aralığının tam olarak modellenmesi

3.5. Klasik Manyetik Yatağın Manyetik Devre ile Modellenmesi

Bu bölümde klasik manyetik yatağın manyetik eşdeğer devresinin oluşturulması ve kuvvet denklemlerinin çıkartılması anlatılmıştır. Tasarımı yapılacak olan manyetik yatağın manyetik eşdeğer modeli çıkartılmış ve modellenmiştir. Tasarımı yapılacak olan manyetik yatak rotora radyal kuvvet uygulayan ve statorunda heteropolar elektromıknatıslara sahip 8 oluklu bir manyetik yataktır. Şekil 3.16'da gösterilen manyetik yatak "klasik" tip manyetik yatak olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 3.16'da klasik manyetik yatağın kesit görüntüsü, akı yolları ve elektromıknatısların kutuplanmaları verilmiştir. Elektromıknatısların heteropolar kutuplanmaları sayesinde rotora radyal olarak kuvvet uygulayabilmektedir.

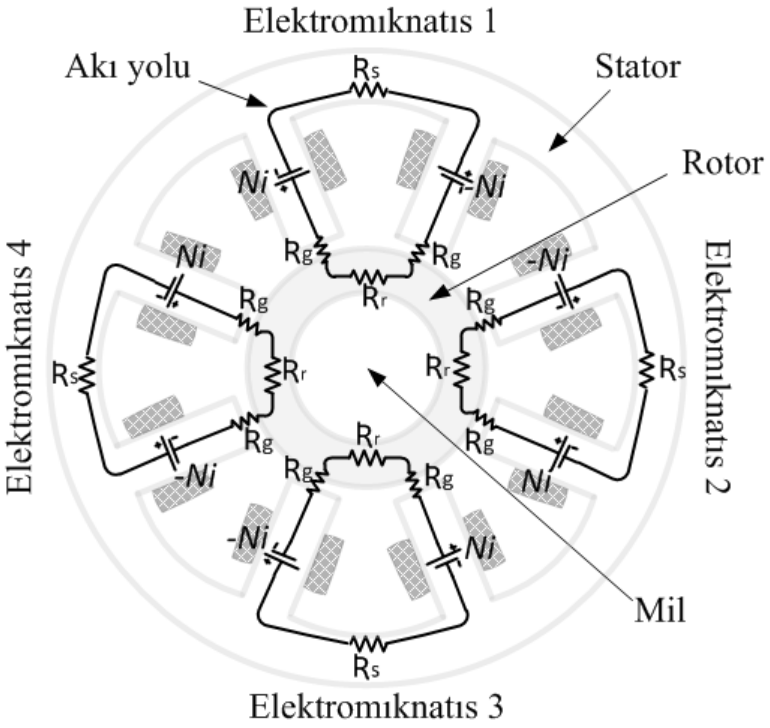


Şekil 3.16. Klasik manyetik yatak kesiti ve akı yolları

Şekil 3.16'da gösterilen klasik manyetik yatak 4 elektromıknatıs çiftinden oluşmaktadır ve her bir elektromıknatıs çifti rotora belli bir kuvvet uygulamaktadır. Uygulanan bu kuvvet sayesinde rotorun ve milin pozisyonunu x ve y yönünde istenilen pozisyona getirebilecek şekilde değiştirebilmektedir. Şekil 3.16'da 2 ve 4 numaralı elektromıknatıslar rotoru x ekseninde kendilerine doğru çekmeye, 1 ve 3 numaralı elektromıknatıslar ise rotoru y ekseninde yani yerçekimi eksenine karşı ve aynı yönde çekmeye çalışırlar. Yerçekiminin etkisi dikkate alındığında elektromıknatıslara bakıldığında rotoru dengelemek için en fazla kuvvet elektromıknatıs 1 tarafından oluşturulmalıdır.

Şekil 3.16'da gösterilen klasik manyetik yatağın statoru heteropolardır ve elektromıknatıs çiftleri birbirlerine göre aynı polaritede olacak şekilde bobinler sarılmıştır. Bu sayede elektromıknatıs çiftleri meydana getirilmiş ve elektromıknatıslar arasında kaçak akıların önlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca kaçak akıların elimine edilmesiyle elektromıknatısların oluşturduğu kuvvet hesaplanması daha kararlı bir hale getirilmiştir. Her bir elektromıknatıs içinden akı akmakta ve manyetik devresini tamamlamaktadır. Şekil 3.17'de klasik manyetik yatağın

manyetik eşdeğer devresi gösterilmiştir. Şekil 3.17'de hava aralığındaki kaçak akılar şeklin karmaşık olmaması için sembolize edilmemiştir.

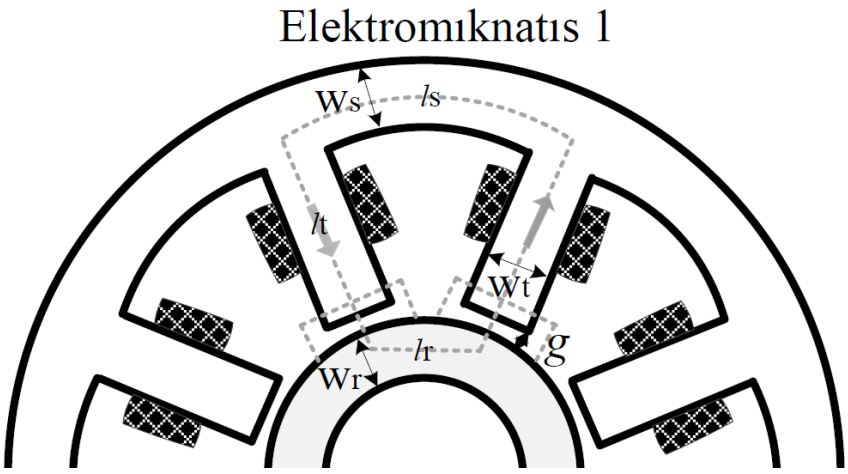


Şekil 3.17. Klasik MY manyetik eşdeğer devresi

Şekil 3.17'de her bir elektromıknatıs çifti içinde akan manyetik akı modellenmiş ve bu şekilde toplam 4 adet manyetik devre oluşmuştur [41]. Her bir elektromıknatıs rotora belli bir elektromanyetik kuvvet uygulamaktadır. Bu sebepten dolayı bütün manyetik devrelerin teker teker rotora etkiyen kuvvetlerinin hesaplanması gerekmektedir.

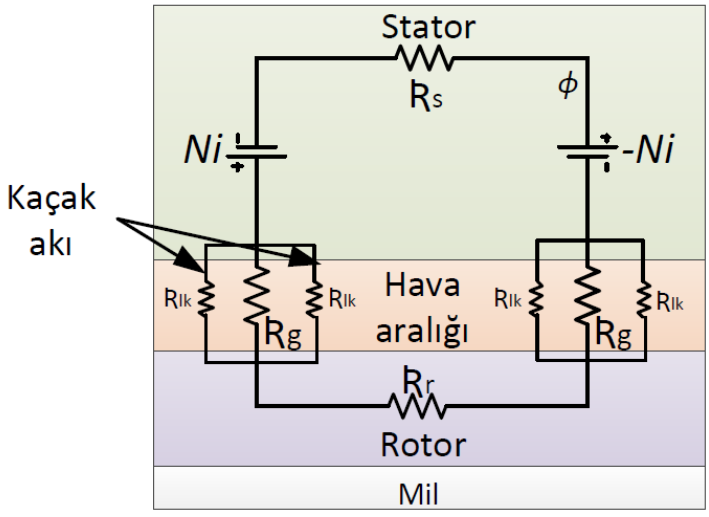
Her bir elektromıknatıs rotoru kendine doğru çekmeye çalışmaktadır. İkinci ve dördüncü elektromıknatıslar rotoru x yönünde dengede tutmaya çalışmak için kuvvet uygulamakta, birinci ve üçüncü elektromıknatıslar ise rotoru y yönünde dengede tutmaya çalışmaktadır.

Rotora etkiyen toplam bileşke kuvvet ise manyetik devrelerin çözümlenmesiyle hesaplanabilmektedir. Bütün elektromıknatıslar aynı özelliklere sahip olduğundan dolayı sadece tek bir manyetik devreyi çözümlemek diğer bütün manyetik devrelerin rotora etkisini anlamada yeterli olacaktır. Şekil 3.18'de tek bir elektromıknatısın kesiti ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Manyetik yatağın kesit görüntüsü ve akı yolu

Şekil 3.18'de tek bir manyetik devrenin geçtiği elektromıknatısın kesit görüntüsü verilmiştir ve manyetik yatağın fiziksel boyutları ifade edilmiştir. Şekilde w_s stator çeliği dış ve iç yarıçap farkı, w_t stator diş genişliğini, w_r rotorun iç ve dış yarıçapı arasındaki uzaklık mesafesidir. Ayrıca şekilde manyetik devrenin akı yolu da gösterilmiştir. Rotordaki akı yolunun uzunluğu l_r, stator nüvesindeki akı yolu uzunluğu l_s, stator dişindeki akı yolu uzunluğu ise l_t olarak gösterilmiştir. Hava aralığı g simgesiyle ifade edilmiş ve hava aralığındaki kaçak akı ise Şekil 3.5'deki benzetim baz alınarak uzunluğu $2g$ genişliği ise g olarak alınmıştır. Şekil 3.18'de gösterilen birinci elektromıknatısın manyetik eşdeğer devresi Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Şekil 3.19'daki manyetik eşdeğer devrede stator ve rotordaki relüktanslar ve hava aralığındaki kaçak akılar modellenmiştir.



Şekil 3.19. Elektromıknatısın manyetik eşdeğer devresi

Şekil 3.19'da verilen manyetik eşdeğer devrede *Ni* bobinin meydana getirdiği manyeto motor kuvvetini, R_g hava aralığındaki relüktansı, R_s stator nüvesinde oluşan relüktansı, R_r ise rotordaki relüktansı ve R_{lk} ise hava aralığında meydana gelen kaçak akıyı ifade etmektedir. Manyetik devredeki akı ise ϕ simgesiyle gösterilmiştir. Manyetik eşdeğer devrede toplam iki adet manyetik kaynak vardır ve birbirlerine seri bir şekilde bağlanmışlardır. Devrede oluşan toplam manyeto motor kuvveti Denklem (3.20)'de verilmiştir.

$$\Im = 2Ni \tag{3.20}$$

Manyetik akı statordaki dişlerdeki bobin sarımlarından oluşmakta ve stator dişi, hava aralığından rotora gelerek rotordan tekrardan hava aralığına geçerek statora geçmekte ve devresini tamamlamaktadır. Akının rotordan geçerken oluşan relüktans Denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$\Re_r = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_r}{w_r d} \tag{3.21}$$

Denklem (3.19)'de havanın manyetik geçirgenliği μ_0, rotor nüvesinin manyetik geçirgenliği ise μ_r ile gösterilmiştir. Rotordaki akı yolunun uzunluğu l_r, w_r rotor iç dış yarıçap farkını, *d* ise rotorun paket boyunu ifade etmektedir. Denklem (3.22)'de ise hava aralığında oluşan relüktans denklemi, Denklem (3.23)'de ise kaçak akı relüktans denklemi verilmiştir.

$$\Re_g = \frac{1}{\mu_0} \frac{g}{w_t d} \tag{3.22}$$

$$\Re_{lk} = \frac{1}{\mu_0} \frac{2g}{gd} \tag{3.23}$$

Denklem (3.22) ve Denklem (3.23)'de *g* hava aralığını, w_t ise stator diş genişliğini ifade etmektedir. Havanın manyetik geçirgenliği 1 olduğu için denklemde havanın manyetik geçirgenliği gösterilmemiştir. Rotordan ve hava aralığından geçen manyetik akı stator dişi üzerinden stator çekirdeğine ve tekrardan eşleniği stator dişe gitmektedir. Denklem (3.24)'de stator meydana gelen relüktansın denklemi verilmiştir.

$$\Re_s = \frac{1}{\mu_0 \mu_r}\left(\frac{2l_t}{w_t d}\frac{l_s}{w_s d}\right) \tag{3.24}$$

Denklem (3.24)'de l_t akının stator dişindeki yol uzunluğu, l_s stator çekirdeğindeki akı yolu uzunluğunu ve w_s ise stator çekirdeği genişliği ifade etmektedir. Manyetik devrede oluşan akı ise Hopkins kanuna göre hesaplanırsa manyetik akı devredeki toplam manyetik kaynakların eşdeğer relüktansa bölünmesiyle bulunur. Denklem (3.25)'de devreden akan akı formüle edilmiştir.

$$\phi = \frac{2Ni}{\left(\left(2\Re_g \Re_{lk}\right)/\left(2\Re_g + \Re_{lk}\right)\right) + \Re_s + \Re_r} \tag{3.25}$$

Devreden akan toplam akı λ, devrede bulunan bobinlerin sarım sayısı ile devreden geçen akının çarpılmasıyla bulunur. Şekil 3.19'daki devredeki toplam akı Denklem (3.26)'da gösterilmiştir.

$$\lambda = 4N^2 i \frac{1}{\left(\left(2\Re_g \Re_{lk}\right)/\left(2\Re_g + \Re_{lk}\right)\right) + \Re_s + \Re_r} \tag{3.26}$$

İndüktans elektromanyetik bir kaynak içinde oluşan manyetik alan içerisindeki enerji depolama kapasitesidir. Manyetik devrelerde indüktansı bulmak için ilk başta Faraday kanunu tekrardan hatırlamanın faydası vardır. Denklem (3.27)'de *N* sarımlı bir bobinde oluşan EMK formülü verilmiştir.

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi}{dt} \tag{3.27}$$

Denklem (3.27)'de ε indüklenen gerilimi ifade etmektedir. İndiktörler bir devrede akımın değişimiyle orantılı olarak karşı gerilim üretirler. Denklem (3.28)'de bir devredeki indükstans formülü ifade edilmiştir.

$$v = L\frac{di}{dt} \tag{3.28}$$

Denklem (3.27) ve Denklem (3.28) Maxwell denklemlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu iki denklem karşılaştırıldığında ise ortaya çıkan eşitlik Denklem (3.29)'da verilmiştir.

$$N\phi = \sum Li \tag{3.29}$$

Denklem (3.29) sadeleştiğinde ise indüktans eşitliğini farklı bir şekilde yazılabilmektedir. Denklem (3.30)'da manyetik eşdeğer devrelerin analizinde kullanılan indüktans eşitliği verilmiştir.

$$L = \frac{N\phi}{i} \tag{3.30}$$

Denklem (3.30)'da L indüktansı temsil etmektedir ve birimi Wb/A yani Henri'dir. $N\phi$ eşitliği ayrıca toplam akı olarak yani λ olarak ifade edilebilmektedir. Şekil 3.19'da verilen manyetik eşdeğer devrenin indüktans formülü ise Denklem (3.31)'de verilmiştir.

$$L = 4N^2 \frac{1}{\left(\left(2\Re_g \Re_{lk}\right)/\left(2\Re_g + \Re_{lk}\right)\right) + \Re_s + \Re_r} \tag{3.31}$$

Maxwell'in muhteşem dört denklemlerinden ikincisi manyetizma için Gauss yasası adı altında kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı yoğunluğunun sıfır olduğu belirtilmiştir. Kapalı bir yüzeydeki manyetik akı Denklem (3.32)'de gösterilmiştir.

$$\oint_s BdA = \phi \tag{3.32}$$

Denklem (3.30) tekrardan düzenlenip manyetik akı yoğunluğu tek başına bırakıldığında manyetik akı yoğunluğu denklemi elde edilmektedir. Manyetik akı yoğunluğu *B* harfiyle gösterilir ve birimi Tesla veya *Wb/A*'dir. Şekil 3.19'da verilen manyetik devrenin hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu denklemi Denklem (3.33)'de verilmiştir.

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{1}{(w_t + 2g)d} \frac{2Ni}{\left(\left(2\Re_g \Re_{lk}\right)/\left(2\Re_g + \Re_{lk}\right)\right) + \Re_s + \Re_r} \tag{3.33}$$

Genelleştirilmiş kuvvet denklemi mesafe başına yapılan iş şeklinde açıklanabilmektedir. Denklem (3.34)'de kuvvet denklemi verilmiştir.

$$F = \frac{\delta W_m}{\delta x} \tag{3.34}$$

Manyetik eşdeğer devrenin iş potansiyeli ise manyetik devredeki indüktansın akıma göre değişimi ile hesaplanabilmektedir. Denklem (3.35)'de manyetik iş denklemi devrilmiştir.

$$W_m = \int_{i_1}^{i_2} L di = \frac{1}{2} L \left({i_2}^2 - {i_1}^2 \right) \tag{3.35}$$

Denklem (3.35)'deki eşitlik Denklem (3.34)'de yerine konursa tek bir manyetik devrenin statik olarak etki edebileceği kuvvet denklemi manyetik eşdeğer devre için hesaplanabilmektedir. Denklem (3.36)'da manyetik eşdeğer devre için kuvvet denklemi verilmiştir.

$$F = \frac{\delta W_m}{\delta x} = \frac{\delta L}{\delta x} \frac{i^2}{2} \tag{3.36}$$

Denklem (3.36) daha basitleştirilmek istenirse denklemdeki yer değişimini manyetik eşdeğer devrede karşılığı olarak hava aralığı olarak benzetimi yapılabilmektedir. Denklem (3.37)'de bu benzetim gösterilmiştir.

$$\frac{\delta L}{\delta x} = \frac{L}{g} \tag{3.37}$$

Denklem (3.37)'deki benzetimi tekrardan kuvvet denklemine yazılırsa ve kuvvet denklemi Denklem (3.38)'deki gibi olur.

$$F = \frac{L}{g} \frac{i^2}{2} \tag{3.38}$$

Kuvvet denklemini Şekil 3.19'da verilen elektromıknatıs için tekrardan düzenlersek, L değeri Denklem (3.31)'den alınıp denklemde yerine konulduğunda yeni kuvvet denklemi elde edilmiş olacaktır. Ayrıca manyetik yatak tasarımı göz önüne alındığında manyetik yatak statorunda toplam sekiz adet diş bulunmaktadır ve her biri merkeze göre simetriktir. Elektromıknatısların rotora etkilediği kuvvet dişlerin

yatay veya dikey ile yaptığı açı değeri ile doğru orantılıdır. Denklem (3.39)'da Şekil 3.19'da verilen elektromıknatısın rotora etkiyen kuvvet denklemi verilmiştir.

$$F = \frac{L}{g}\frac{i^2}{2}\cos(\pi/8) \tag{3.39}$$

Cos (π/8) katsayısı statordaki dişlerin dikey veya yatay doğrultuda yaptığı açı değeridir. Denklemdeki *L* bileşenini açılarak manyetik eşdeğer devredeki relüktans değerlerini içeren bir formül elde edilebilmektedir. Düzenlenen kuvvet Denklem (3.40)'da gösterilmiştir.

$$F = \frac{2N^2 i^2}{g}\frac{1}{\left(\left(2\Re_g \Re_{lk}\right)/\left(2\Re_g + \Re_{lk}\right)\right) + \Re_s + \Re_r}\cos(\pi/8) \tag{3.40}$$

Denklem (3.40)'da verilen kuvvet denklemi hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu hesaba katılarak da başka bir şekilde düzenlenebilir. Denklem (3.41)'de hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu verilmiştir.

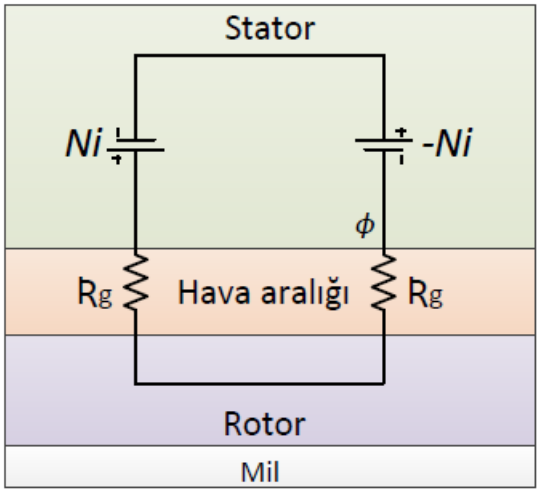
$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{1}{(w_t + 2g)d}\frac{2Ni}{\left(\left(2\Re_g \Re_{lk}\right)/\left(2\Re_g + \Re_{lk}\right)\right) + \Re_s + \Re_r} \tag{3.41}$$

Denklem (3.40)'daki elektro manyetik kuvvet Denklem (3.41)'e göre tekrardan düzenlenirse kuvvet denklemi farklı bir şekilde de ifade edilebilir. Denklem (3.42)'de manyetik akı yoğunluğu baz alınarak düzenlenmiş kuvvet denklemi verilmiştir.

$$F = B\frac{Ni}{g}(w_t + 2g)d\cos(\pi/8) \tag{3.42}$$

Şekil 3.19'da manyetik eşdeğer devresi verilen elektromıknatısın rotora etkilediği elektromanyetik kuvvet denklemi Denklem (3.40) ve Denklem (3.42)'de göstermiştir. Bu denklemler sayesinde elektromıknatısların rotora etki edebileceği kuvvet hesaplanabilmekte ve rotora etkiyen bileşke kuvvet elde edilebilecektir. Tasarım özelliklerine göre manyetik yatak parametreleri belirlenebilmektedir.

Manyetik yatak tasarımı yapılırken manyetik eşdeğer devre temel alınmalıdır. İlk taslak tasarım aşamasında tam manyetik eşdeğer devre yerine yaklaşık manyetik eşdeğer devre kullanmak detay özellikleri elimine edip odaklanması gereken özelliklerde durulması gerekmektedir. Şekil 3.19'da verilen manyetik eşdeğer devrede akı yolundaki bütün relüktanslar hesaba katılmıştır. Fakat ilk tasarım aşamasında bütün detayları ele almak işlem yükünü arttıracaktır. Bu sebepten dolayı yaklaşık manyetik eşdeğer devre modelinde bazı manyetik özelliklerin göz ardı edilebilmektedir. Şekil 3.19'daki manyetik eşdeğer devre incelendiğinde hava aralığında oluşan relüktansın rotor ve statorda oluşan relüktans göre çok daha fazla olduğu aşikârdır. Çünkü havanın manyetik geçirgenliği 1 H/m, ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği ise 1000 ile 10000 H/m arasında değişmektedir. Buna göre havanın relüktans değeri ile ferromanyetik rotor ve statorun relüktans değeri arasında büyük bir fark oluşmakta ve manyetik devrede havanın relüktansının etkisi çok daha fazla olmaktadır. Bu sebepten dolayı yaklaşık manyetik eşdeğer devre modellenmesinde ferromanyetik malzemelerin relüktansları ve hava aralığındaki kaçak akılar ihmal edilebilmektedir.



Şekil 3.20. Elektromıknatısın yaklaşık manyetik eşdeğer devresi

Şekil 3.20'de elektromıknatısın yaklaşık manyetik eşdeğer devresi gösterilmiştir. Yaklaşık manyetik eşdeğer devrede sadece dominant olan relüktans değeri yani hava aralığındaki relüktans modellenmiştir. Yaklaşık manyetik devredeki akı ve toplam akı Denklem (3.43) ve Denklem (3.44)'de gösterilmiştir.

$$\phi_y = \frac{Ni}{\Re_g} \tag{3.43}$$

$$\lambda_y = \frac{2N^2 i}{\Re_g} \tag{3.44}$$

Yaklaşık manyetik devrede hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu ve indüktans Denklem (3.45) ve Denklem (3.46)'da verilmiştir.

$$L_y = \frac{2N^2}{\Re_g} \tag{3.45}$$

$$B_y = \frac{\phi_y}{w_t d} = \frac{Ni}{\Re_g}\frac{1}{w_t d} \tag{3.46}$$

Yaklaşık manyetik devrede meydana gelen kuvvet denkleminin indüktans ve akı yoğunluğuna hesaplamaları Denklem (3.47) ve Denklem (3.48)'de verilmiştir.

$$F_y = \frac{L}{g}\frac{i^2}{2}\cos(\pi/8) \tag{3.47}$$

$$F_y = \frac{B^2}{\mu_0} w_t d \cos(\pi/8) \tag{3.48}$$

Yaklaşık kuvvet denklemindeki relüktans değeri açılırsa sadeleştirilmiş kuvvet denklemi elde edilmiş olur. Denklem (3.49)'da sadeleştirilmiş kuvvet denklemi verilmiştir.

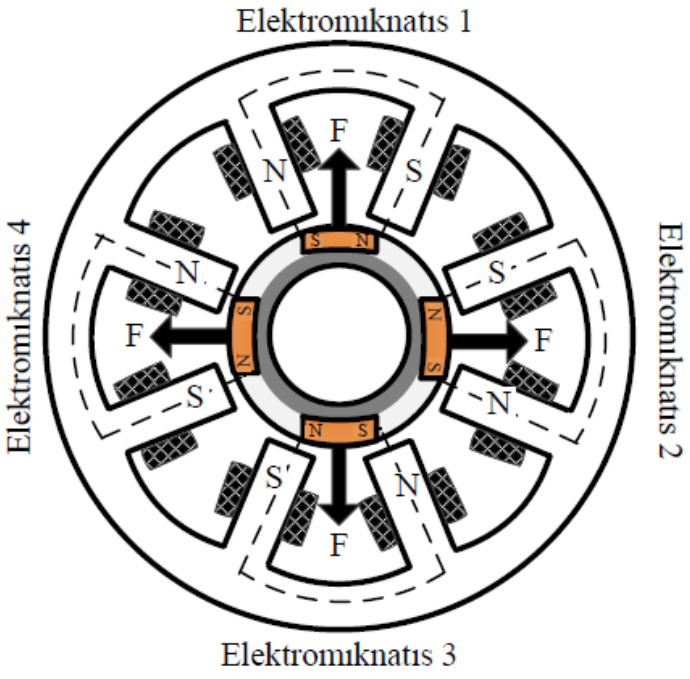
$$F_y = \frac{N^2 i^2}{g^2}\mu_0 A\cos(\pi/8) \tag{3.49}$$

Denklem (3.49)'daki yaklaşık kuvvet denklemine bakıldığında kuvvet değeri sarım sayısı, hava aralığı, akım ve stator diş kesit alanına bağlıdır. Manyetik yatak tasarımında akım-kuvvet ilişkisi büyük önem arz etmektedir. Ferromanyetik malzemelerin doyuma ulaşmadığı sınırlarda yani doğrusal bölgelerinde çalışma uzayının tanımlanması gerekmektedir. Fakat manyetik eşdeğer devre ile yapılan

analizlerde ferromanyetik malzemelerin doyum grafiği doğrusal olarak kabul edilir ve analiz sonucundaki kuvvet bu kabule göre hesaplanmaktadır. Manyetik yatakların en önemli özellikleri rotora etkiledikleri kuvvet akım ilişkisidir.

3.6. Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatağın Manyetik Modellenmesi

Bu bölümde modellenen klasik manyetik yatak ile aynı fiziksel özelliklere sahip fakat rotorunda sürekli mıknatıs olan bir manyetik yatağın manyetik modellenmesi ve kuvvet denklemlerinin çıkartılması anlatılmıştır. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak ile klasik manyetik yatak arasındaki manyetik modelleme ve tasarım farklılıkları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın manyetik eşdeğer devresi çıkartılmış ve modellenmiştir. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın stator yapısı bir önceki bölümdeki klasik manyetik yatağın stator yapısıyla aynı yani 8 oluklu radyal heteropolar bir stator yapısına sahiptir ve sürekli mıknatıslar rotorda olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Şekil 3.21'de sürekli mıknatıslı manyetik yatağın kesit görüntüsü, akı yolları, elektromıknatısların ve sürekli mıknatısların kutup yönleri gösterilmiştir.

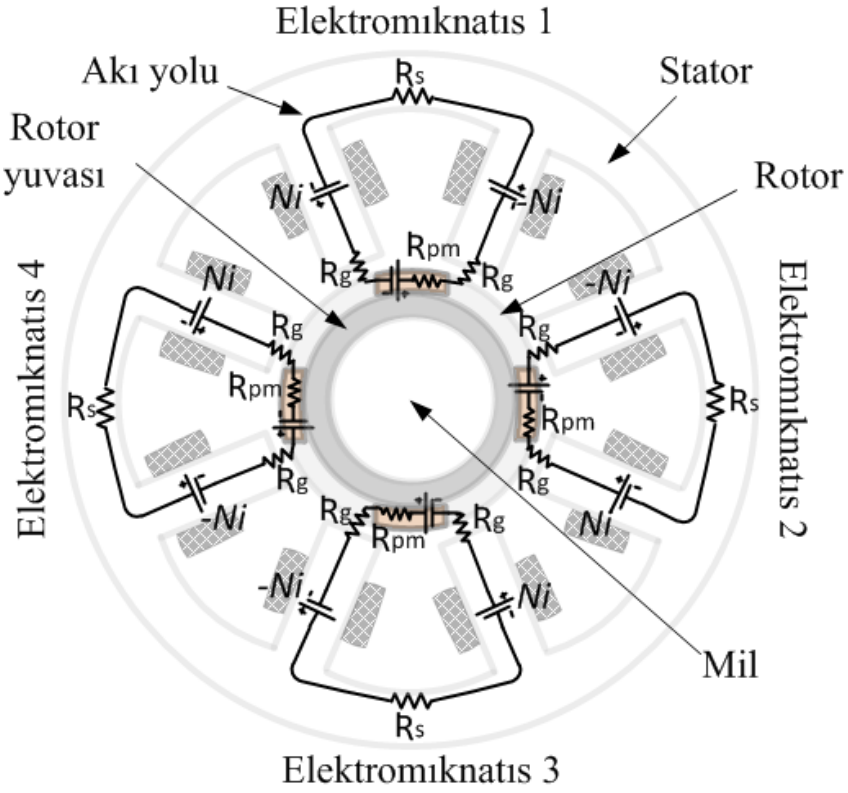


Şekil 3.21. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak kesiti

Sürekli mıknatıslarda oluşacak olan kaçak akıların elimine edilmesi için rotorda ferromanyetik özelliklere sahip olmayan bir rotor yuvası kullanılmış ve şekilde koyu

renkte ifade edilmiştir. Şekil 3.21'de gösterilen sürekli mıknatıslı manyetik yatağın stator yapısının ve fiziksel özelliklerinin klasik manyetik yatak ile aynı seçilmesinin en temel amacı iki farklı tip manyetik yatağın tasarım karşılaştırılmasının yapılması ve avantaj dezavantajlarının çıkarılmasıdır. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın klasik manyetik yatağa göre en temel farkı rotorda bulunan sürekli mıknatısların bir manyetik kaynak olması ve sürekli mıknatıslı manyetik yataktan aynı amper sarım miktarlarında daha yüksek manyetik akı yoğunluğu ve kuvvet elde edebilmesi gelmektedir. Hatta kullanılan sürekli mıknatısın hacmi ve manyetik özelliklerine göre klasik manyetik yataktan elde edilen kuvvet değerleri, sürekli mıknatıs sayesinde daha çok düşük amper sarım miktarlarında aynı kuvvet değeri elde edilebilmektedir. Bu sürekli mıknatıslı manyetik yataklardaki enerji verimliliğinin bir kanıtıdır. Şekil 3.21'de gösterilen sürekli mıknatıslı manyetik yatağın çalışma prensibi klasik manyetik yatak ile aynıdır yani bobinlerden oluşan manyetik akı rotora geçer ve rotor üzerindeki sürekli mıknatıs üzerinden ve rotor sacı üzerinden tekrardan statora geçmekte ve devresini tamamlamaktadır. Sürekli mıknatıslardan kaynaklanacak olan kaçak akıların elimine edilmesi için ferromanyetik özelliği olmayan bir malzeme rotor yuvası olarak kullanılmaktadır ve kaçak akıların bu sayede elimine edilmesi sağlanmaktadır.

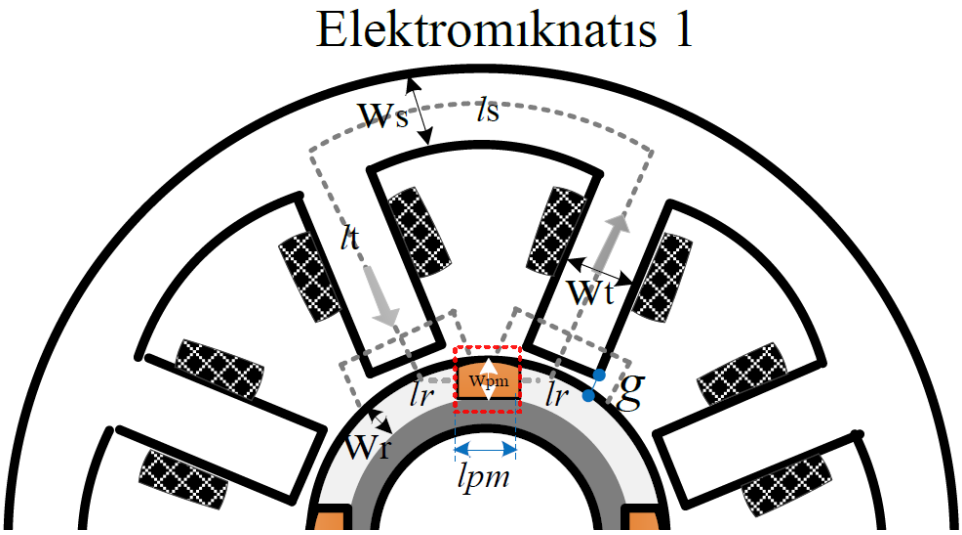
Şekil 3.21'de gösterilen sürekli mıknatıslı manyetik yatağın statoru heteropolardır ve akı yolunu destekleyecek şekilde elektromıknatısların ve sürekli mıknatısların tasarımı yapılmıştır. Yani her bir manyetik kaynak kendinden sonraki manyetik kaynak ile zıt kutuplu olacak şekilde yerleştirilmiş ve bu sayede akı yolu üzerindeki kaçak akıların elimine edilmesi sağlanabilmektedir. Akı yönü ile sürekli mıknatıs kutupları arasındaki manyetik akı yolu aynı olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Rotorda kullanılan yuva sayesinde ise sürekli mıknatıslardan kaynaklanan kaçak akılar minimum seviyeye indirilmiştir. Şekil 3.22'de sürekli mıknatıslı manyetik yatağın manyetik eşdeğer devresi gösterilmiştir. Şekil 3.22'deki eşdeğer devrede hava aralığındaki ve sürekli mıknatıstaki kaçak akılar şeklin sadeliği açısından gösterilmemiştir.



Şekil 3.22. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresi

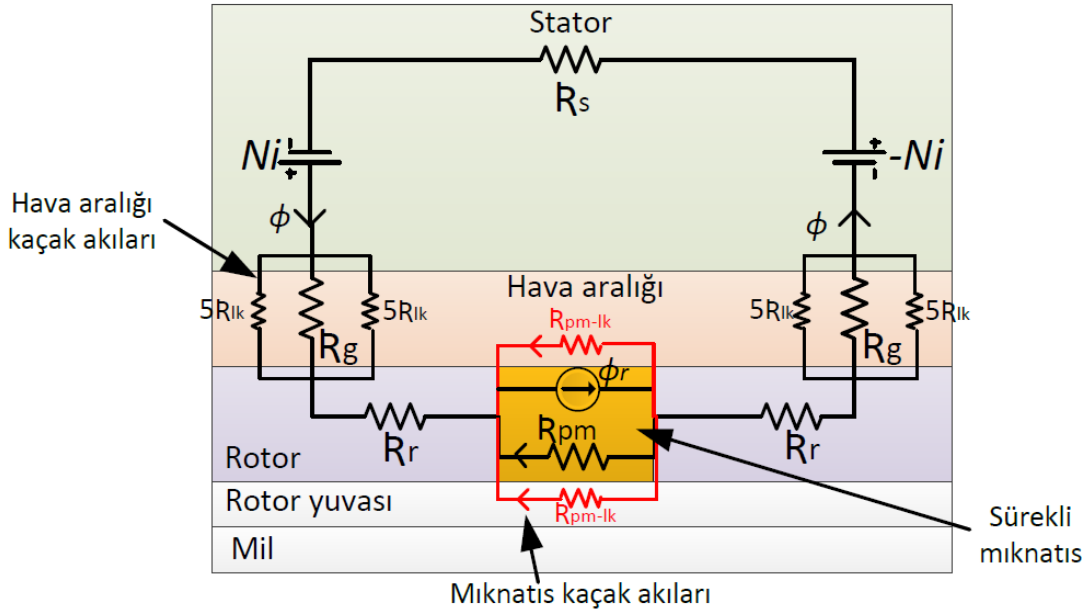
Klasik manyetik yatağın modellenmesi gibi Şekil 3.22'de her bir manyetik devre içinde akan akı modellenmiş ve bu şekilde toplam 4 adet manyetik devre oluşmuştur. Kaçak akıların önüne geçilmesi için manyetik iletkenliği olmayan bir malzemeden rotor yuvası tasarıma dâhil edilmiştir [42]. Bu sayede sürekli mıknatısların rotor üzerinden kolayca devresini tamamlaması azaltılmaya çalışılmıştır. Tasarım yapılırken sürekli mıknatıslardan kaynaklanan kaçak akıların elimine edilmesi ve modellemede bu kaçak akıların konulması hesap hassasiyeti açısından önemlidir.

Klasik manyetik yatakta olduğu gibi rotora etkiyen toplam bileşke kuvvet ise bütün manyetik devrelerin çözümlenmesiyle hesaplanabilmektedir. Tek bir manyetik devreyi çözümlemek diğer bütün manyetik devrelerin rotora etkisini anlamada yeterli olmaktadır. Şekil 3.23'de tek bir elektromıknatısın kesiti ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir ve fiziksel boyutlar parametrelerle anlatılmıştır.



Şekil 3.23. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın kesit görüntüsü ve akı yolu

Şekil 3.23'de sürekli mıknatıslı manyetik yatağın tek bir manyetik devrenin gösterildiği kesit görüntüsü verilmiştir ve fiziksel boyutları ifade edilmiştir. Şekilde w_s stator dış ve iç yarıçap farkını, w_t stator diş genişliğini, w_r rotorda manyetik iletkenliği olan malzemenin iç ve dış yarıçap farkını ve w_{pm} ise mıknatıs genişliğini ifade etmektedir. Tasarımda mıknatıs genişliği ile rotordaki ferromanyetik malzemenin genişliği aynı olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Ayrıca şekilde manyetik devrenin akı yolu ve kaçak akılar gösterilmiştir. Sürekli mıknatıs üzerindeki akı yolunun uzunluğu l_{pm}, stator nüvesindeki akı yolu uzunluğu l_{s}, stator dişindeki akı yolu uzunluğu l_{t}, rotor üzerindeki akı yolu ise sürekli mıknatıstan önce ve sonra olmak üzere l_{r} olarak gösterilmiştir. Akının hava aralığında izlediği yol g simgesiyle ifade edilmiş ve hava aralığındaki kaçak akılar ise Şekil 3.5'deki benzetim baz alınarak uzunluğu $2g$ genişliği ise g olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Sürekli mıknatıs kaçak akıları ise kırmızı kesikli çizgiler ile ifade edilmiştir. Şekil 3.23'de gösterilen kesit görüntüsünün manyetik eşdeğer devresi Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresi

Şekil 3.24'de verilen sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresinde aynı klasik manyetik yatakta olduğu gibi *Ni* bobinin meydana getirdiği manyeto motor kuvvetini, R_g hava aralığındaki relüktansı, R_s stator nüvesinde oluşan relüktansı ve R_r ise rotorda meydana gelen relüktansı ifade etmektedir. Manyetik devredeki akı ϕ simgesiyle gösterilmiştir. Klasik manyetik yataktan farklı olarak sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresinde sürekli mıknatıstan kaynaklanan manyetik kaynak ve sürekli mıknatısta meydana gelen relüktans da modellenmiştir. Manyetik devrede sürekli mıknatıs bir akı kaynağı ve relüktans olarak modellenmiştir. Sürekli mıknatıs akısı ϕ_r, relüktansı ise R_{pm} simgesiyle ve sürekli mıknatıs kaçak akılarının oluşturduğu relüktanslar ise $R_{pm\text{-}lk}$ simgesiyle gösterilmiştir. Sürekli mıknatısın meydana getirdiği manyetik kaynak sürekli mıknatısın artık mıknatıs manyetik akı yoğunluğuna ve mıknatısın kesit alanına bağlıdır. Devredeki sürekli mıknatısın oluşturduğu akı Denklem (3.50)'de verilmiştir.

$$\phi_r = B_r A_{pm} \tag{3.50}$$

Denklem (3.50)'de B_r sürekli mıknatısın artık manyetik akı yoğunluğunu A_{pm} ise mıknatısın kesit alanını ifade temsil etmektedir. Sürekli mıknatıstan akı akarken gösterdiği manyetik direnç ise R_{pm} ile sürekli mıknatıs kaçak relüktansları ise $R_{pm\text{-}lk}$ ifade edilmektedir. Sürekli mıknatıs ve kaçak akıların oluşturduğu relüktans

denklemleri Denklem (3.51) ve Denklem (3.52)'de verilmiştir. Kaçak relüktansların modellenmesinde genişlik katsayısı *k* olarak belirtilmiş ve en düşük seviye olan %5'lik oran kullanılmıştır.

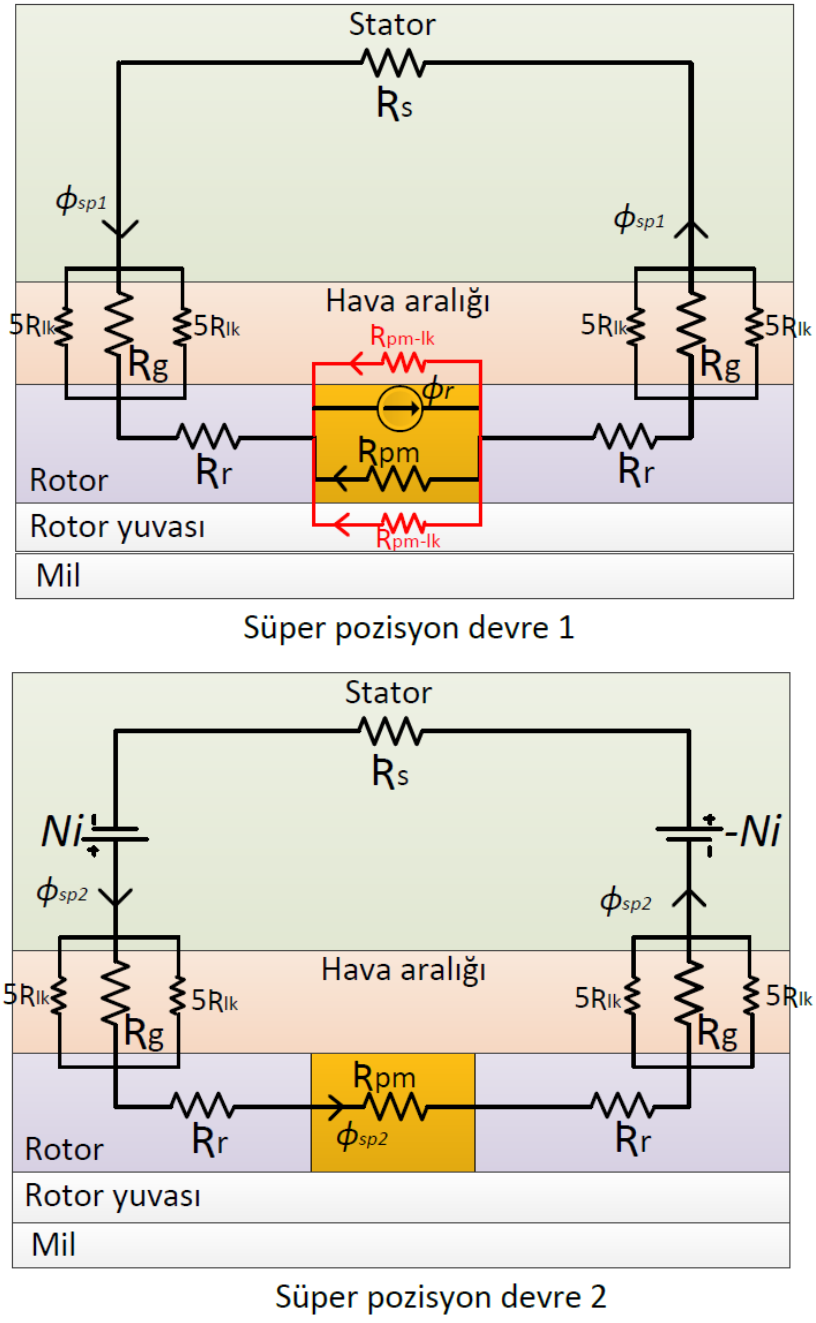
$$\Re_{pm} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_{pm}}{w_{pm} d} \tag{3.51}$$

$$\Re_{pm-lk} = \frac{1}{\mu_0} \frac{l_{pm}}{k w_{pm} d} \tag{3.52}$$

Denklem (3.51) ve Denklem (3.52)'de verilen relüktans denklemlerinde w_{pm} mıknatıs genişliğini, l_{pm} mıknatıs uzunluğunu, *d* paket boyunu ve *k* ise kaçak relüktans katsayısını ifade etmektedir. Sürekli mıknatısın manyetik geçirgenliğini μ_r olarak gösterilmiştir. Şekil 3.24'de verilen manyetik eşdeğer devredeki toplam relüktans ise Denklem (3.53)'de verilmiştir.

$$\Re_{es} = \frac{2\Re_g \Re_{lk}}{2\Re_g + \Re_{lk}} + \Re_s + 2\Re_r + \frac{\Re_{pm} \Re_{pm-lk}}{2\Re_{pm} + \Re_{pm-lk}} \tag{3.53}$$

Manyetik devreden oluşan toplam akı bobinlerin amper sarım miktarına, sürekli mıknatısın oluşturduğu akıya ve devredeki eşdeğer relüktansa bağlıdır. Devrede bir akı kaynağı, iki manyeto motor kuvvet kaynağı ve paralel bağlı relüktanslar olduğundan devrede akan toplam akıyı hesaplamak devre analizi yöntemi ile çok basit hal almaktadır. Toplam akının hesaplanması için manyetik eşdeğer devrede süperpozisyon teoremi kullanılıştır. Şekil 3.25'de manyetik eşdeğer devrenin süper pozisyon devreleri verilmiştir.



Şekil 3.25. Manyetik eşdeğer devrenin süper pozisyon devreleri

Şekil 3.25'de gösterilen süper pozisyon devrelerinin birincisinde manyeto motor kuvvet kaynağı olan bobinler devrede kısa devre yapılmış ikinci devrede ise sürekli mıknatıs kaynağı devrede açık devre yapılarak devredeki iki farklı durumdaki akı elde edilmiştir. Bu iki akının toplamı manyetik eşdeğer devredeki toplam akıyı vermektedir. Şekil 3.25'de verilen birinci ve ikinci devrelerdeki toplam relüktanslar $R_{es\text{-}sp1}$ ve $R_{es\text{-}sp2}$ olarak ifade edilmişlerdir. Şekil 3.24'deki manyetik eşdeğer devrede dolaşan akı ϕ ifadesiyle gösterilmiş ve Denklem (3.54)'de formüle edilmiştir.

$$\phi = \phi_{sp1} + \phi_{sp2} = \phi_r \frac{\Re_{pm}}{\Re_{es-sp1}} + \frac{2Ni}{\Re_{es-sp2}} \tag{3.54}$$

Denklem (3.52)'de manyetik eşdeğer devredeki akının kaynakların birincisi sürekli mıknatısın oluşturduğu akı ikincisinin ise bobinlerin oluşturduğu akı olduğu açıkça gözükmektedir. Sürekli mıknatıslı devrelerde mıknatısın tek başına akı yoğunluğuna ve kuvvete olan etkisi önemlidir ve formüle edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.24'deki devrede amper sarım miktarının sıfır olduğu kabul edilip devrede sadece sürekli mıknatıs olduğu düşünülürse sürekli mıknatısın tek başına uygulayabileceği kuvvet değeri hesaplanabilmektedir. Önceki bölümlerde kuvvet hesabının induktans değerinden yapılabileceği gibi hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğundan da yapılabildiğini anlatılmıştır. Sadece sürekli mıknatıs olan bir manyetik devrede induktans kavramından konuşmak mümkün olmamaktadır. Zira induktans devredeki bobinlerin sarım sayısına ve reluktansa bağlıdır. Fakat literatürde sürekli mıknatısların oluşturduğu kaynak ve relüktanslar bobinlerin amper sarım miktarlarına benzetim yapılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Fakat bu tez kapsamında sürekli mıknatısların akı kaynağı ve relüktans ile modellenmesi yapılacaktır. Bu durumda sürekli mıknatıslı devrelerde kuvvet denklemi akı yoğunluğunu denklemi ile elde edilmektedir. Şekil 3.25'de sadece sürekli mıknatısın olduğu manyetik devreyi ele alırsak hava aralığındaki akı yoğunluğu formülü Denklem (3.55)'de verilmiştir.

$$B_{sp1} = \frac{\phi_{sp1}}{A} = \phi_r \frac{\Re_{pm}}{\Re_{es-sp1}} \frac{1}{(wt + 10g)d} \tag{3.55}$$

Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun bilinmesiyle sürekli mıknatısın etkilediği kuvvet denklemi kolaylıkla elde edilebilmektedir. Denklem (3.56)'da sürekli mıknatısın meydana getirdiği kuvvet verilmiştir.

$$F_{sp1} = \frac{{B_{sp1}}^2}{\mu_0} (wt + 10g)d \cos(\pi/8) \tag{3.56}$$

Bobinlerin ve sürekli mıknatısın meydana getirdiği toplam kuvveti hesaplayabilmemiz için ise Denklem (3.52)'deki formüle edilen manyetik eşdeğer devreden akan akının kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.24'de gösterilen manyetik

devrede hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğu ve rotora etkiyen kuvvet Denklem (3.57) ve Denklem (3.58)'de gösterilmiştir.

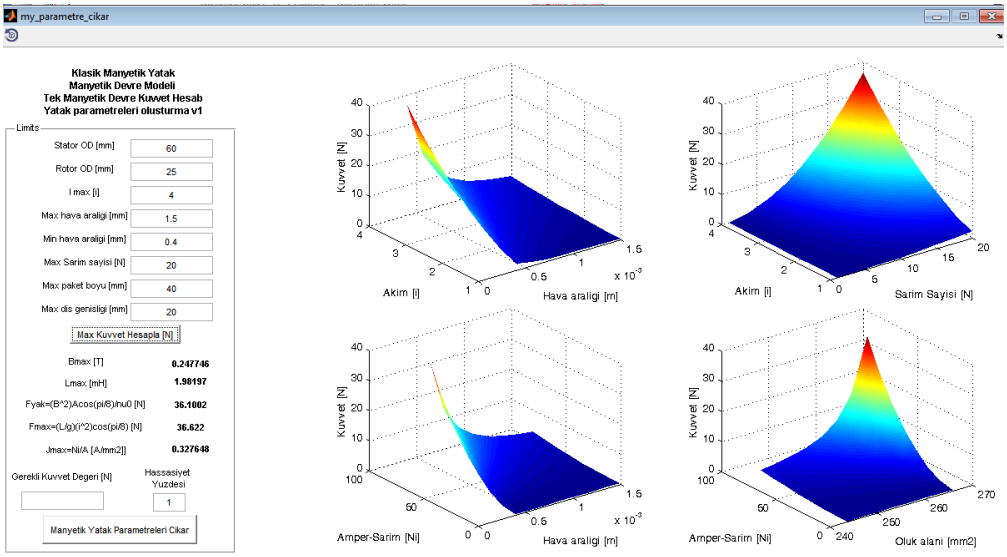
$$B = \frac{\phi}{A} = \left(\phi_r \frac{\Re_{pm}}{\Re_{es-sp1}} + \frac{2Ni}{\Re_{es-sp2}} \right) \frac{1}{(wt + 10g)d} \tag{3.57}$$

$$F = \frac{B^2}{\mu_0} (wt + 10g) d \cos(\pi / 8) \tag{3.58}$$

Şekil 3.24'de manyetik eşdeğer devresi verilen manyetik devrenin rotora etkilediği kuvvet denklemi Denklem (3.58)'de göstermiştir. Bu denklem sayesinde sürekli mıknatıslı manyetik yatak eşdeğer devresindeki diğer devrelerin rotora etki edebileceği kuvvet hesaplanabilmekte ve rotora etkiyen bileşke kuvvet elde edilebilecektir. Tasarım özelliklerine göre sürekli mıknatıslı manyetik yatak parametreleri belirlenebilmektedir. Denklem (3.58)'deki kuvvet denklemine bakıldığında kuvvet değeri hava aralığındaki akı yoğunluğuna ve hava aralığının alanına bağlıdır. Burada kuvveti hesaplarken kaçak akılarında hesaba katılması gayet önemlidir. Zira kaçak akıların ihmal edilmesi kuvvet hesabının hatasını büyültecek ve manyetik devre ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarında ve deneysel çalışmalarda elde edilen değer ile büyük farklılık gösterecektir. Sürekli mıknatıslı manyetik yataklarda bobinlerin amper-sarım miktarlarının yanında sürekli mıknatıs hacmi de önemli yer tutmaktadır. Bu durum sürekli mıknatıslı manyetik yataklarda kuvvete birçok parametrenin etki ettiğinin bir göstergesidir.

3.7. Klasik ve Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatağın Tasarımı

Klasik ve sürekli mıknatıslı manyetik yatağın manyetik eşdeğer devrelerini çıkartılması ve modellenmesi önceki bölümlerde anlatılmıştır. Bu bölümde iki farklı tip manyetik yatağın karşılaştırılması yapılacak ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenecektir. İlk başta iki farklı tip manyetik yatağın belirlenen bazı fiziksel parametreleri altında manyetik yataklardaki eşdeğer manyetik devrelerin rotora uyguladıkları kuvvet belirlenecek ve değişken parametrelerin kuvvete olan etkisi gösterilecektir. Bunun için ilk başta MATLAB GUI'de parametrik çalışmayı sağlayacak olan bir program ara yüzü yazılmıştır. Şekil 3.26'da program ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.26. MATLAB GUI program ara yüzü

Program ara yüzü sayesinde ilk tasarım kriterleri verilen manyetik yatağın 3 boyutlu çıktıları elde edilebilmektedir. Bu sayede manyetik yatağın akım-hava aralığı-kuvvet ilişkisi, akım-sarım sayısı-kuvvet ve bunun gibi istenildiği gibi kuvvetin farklı parametreler altındaki değişiklikleri 3 boyutlu olarak elde edilebilmektedir. Ayrıca programda istenilen kuvvet değeri girildiğinde belirlenen fiziksel sınırlar altında bu kuvveti istenilen hassasiyette sağlayacak olan manyetik yatak parametreleri elde edilebilmektedir. Şekil 3.27'de kuvvet değerinden manyetik yatak parametrelerinin çıkarılması gösterilmiştir.

Figure 1

File Edit View Insert Tools Desktop Window Help

	Akim [i]	Enduktans [L]	Hava araligi [mm]	Sarim Sayisi	Rg [1/h]	Aki yogunlugu [T]	Aki [Wb]	Kuvvet [N]	Paket boyu [mm]
1	3.6000	9.9583e-04	0.4000	20	3.9789e+05	0.2241	1.7925e-04	29.8088	40
2	3.6500	9.7093e-04	0.4000	20	4.0809e+05	0.2272	1.7719e-04	29.8765	39
3	3.7000	9.4604e-04	0.4000	20	4.1883e+05	0.2303	1.7502e-04	29.9135	38
4	3.7000	9.4604e-04	0.4000	20	4.1883e+05	0.2303	1.7502e-04	29.9137	40
5	3.7500	9.2114e-04	0.4000	20	4.3015e+05	0.2334	1.7271e-04	29.9188	37
6	3.7500	9.2239e-04	0.4000	20	4.2957e+05	0.2334	1.7295e-04	29.9594	39
7	3.8000	8.9873e-04	0.4000	19	3.9789e+05	0.2247	1.7975e-04	29.9746	40
8	3.8000	8.9625e-04	0.4000	20	4.4210e+05	0.2365	1.7029e-04	29.8916	36.0000
9	3.8000	8.9874e-04	0.4000	20	4.4087e+05	0.2365	1.7076e-04	29.9749	38
10	3.8000	8.9626e-04	0.4000	20	4.4210e+05	0.2365	1.7029e-04	29.8920	40
11	3.8500	8.7627e-04	0.4000	19	4.0809e+05	0.2276	1.7756e-04	29.9994	39
12	3.8500	8.7135e-04	0.4000	20	4.5473e+05	0.2396	1.6773e-04	29.8311	35
13	3.8500	8.7509e-04	0.4000	20	4.5279e+05	0.2396	1.6845e-04	29.9592	37
14	3.8500	8.7385e-04	0.4000	20	4.5343e+05	0.2396	1.6822e-04	29.9167	39
15	3.9000	8.5380e-04	0.4000	19	4.1883e+05	0.2306	1.7525e-04	29.9944	38
16	3.9000	8.5380e-04	0.4000	19	4.1883e+05	0.2306	1.7525e-04	29.9946	40
17	3.9000	8.4645e-04	0.4000	20	4.6810e+05	0.2427	1.6506e-04	29.7364	34
18	3.9000	8.5144e-04	0.4000	20	4.6537e+05	0.2427	1.6603e-04	29.9115	36.0000
19	3.9000	8.5145e-04	0.4000	20	4.6537e+05	0.2427	1.6603e-04	29.9117	38
20	3.9000	8.4647e-04	0.4000	20	4.6810e+05	0.2427	1.6506e-04	29.7370	40
21	3.9500	8.3133e-04	0.4000	19	4.3015e+05	0.2336	1.7283e-04	29.9587	37

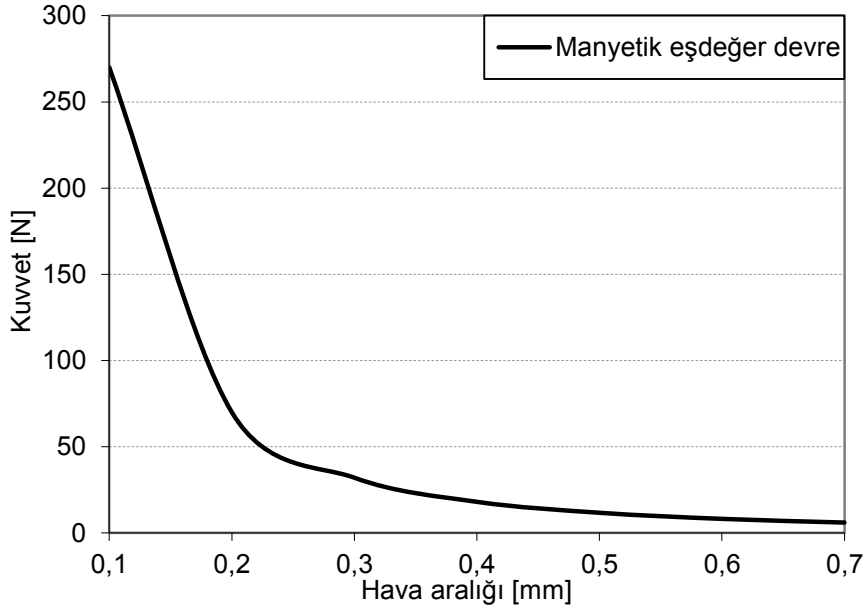
Şekil 3.27. Ara yüz programının manyetik yatak parametre çıkarması

Program ara yüzü kullanılarak manyetik yatağın bazı fiziksel parametreleri gerçekte üretilebilecek ve uygulanabilecek şekilde girilmiştir. Tablo 3.2'de klasik manyetik yatağın fiziksel parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Klasik manyetik yatağın ön tasarım fiziksel parametreleri

Parametre	Birim
Stator dış yarıçapı	60 [mm]
Rotor dış yarıçapı mm]	25 [mm]
Mil dış yarıçapı [mm]	15 [mm]
Hava aralığı [mm]	0,1-0,7 [mm]
Paket boyu [mm]	40 [mm]
Diş genişliği [mm]	10 [mm]
Maksimum bobin DC akımı [A]	4 [A]
Sarım sayısı	20
Oluk sayısı	8
Sac malzemesi	AFK502

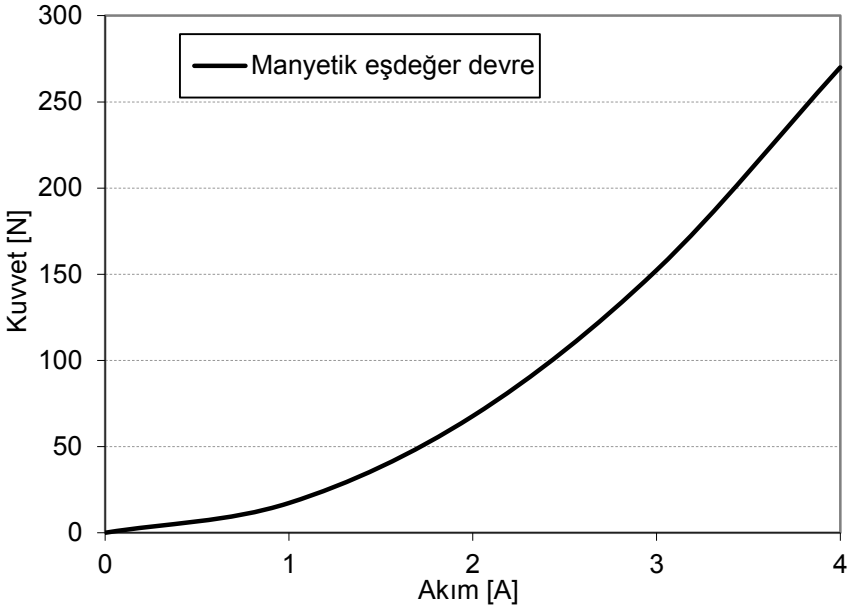
Tablo 3.2'de stator dış yarıçapı, rotor dış yarıçapı ve mi dış yarıçapı verilmiştir. Manyetik yatağın hava aralığı ise 0,1 mm ile 0,7 mm aralığında olacak şekilde değişken bir biçimde tanımlanmıştır. Ayrıca tabloda manyetik yatağın paket boyu, stator diş genişliği, maksimum bobin DC akımı ve sarım sayısı belirtilmiştir. Tablo 3.2'de fiziksel özellikleri verilen klasik manyetik yatakta tek bir elektromıknatıs çiftinin rotora uygulayabileceği kuvvet rahatlıkla hesaplanabilmektedir. 8 oluklu klasik manyetik yatakta 4 adet manyetik devre olduğunu ve her bir devrenin rotora bir kuvvet uyguladığı önceki bölümlerde anlatılmıştır. Bu sayede sadece tek bir manyetik devrenin yani elektromıknatıs çiftinin analizi ile manyetik yataktaki manyetik devrelerin rotora uyguladığı kuvvet hesaplanmaktadır. Şekil 3.28'de manyetik yatağın tabloda belirtilen fiziksel özellikleri altında tek bir elektromıknatıs çiftinin yani tek bir manyetik yolun tam eşdeğer devre modeli kullanılarak rotora etki ettiği kuvvetin hava aralığına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 3.28. Kuvvetin hava aralığına göre değişimi

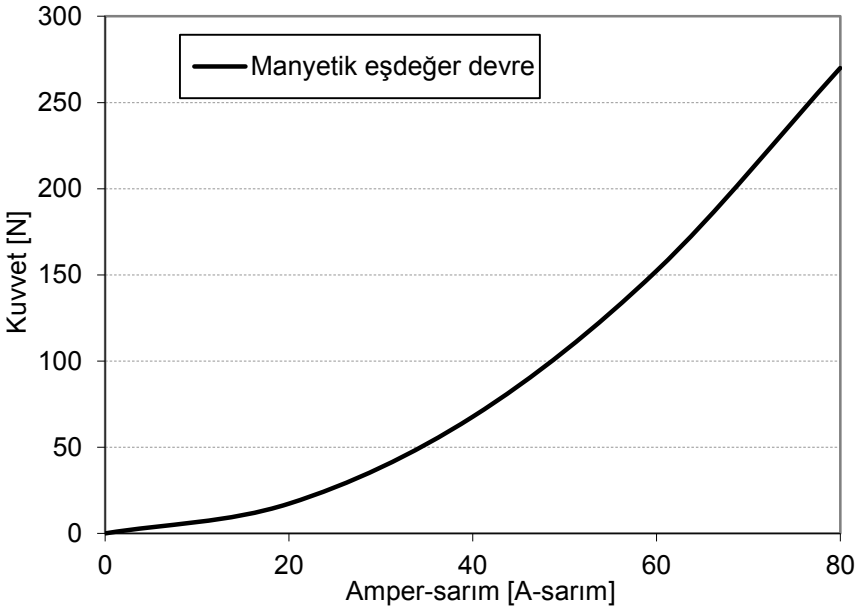
Şekil 3.28'de verilen fiziksel parametreler göre tek bir elektromıknatıs çifti 4 amper akımda rotora 0,1 mm hava aralığında 270N'luk bir kuvvet etki etmekte 0,7 mm hava aralığında ise 5,98N'luk bir kuvvete etki ettiği hesaplanmıştır. Diğer elektromıknatıs çiftleri de aynı akım değerinde aynı kuvveti rotora etki etmektedir. Eğer herhangi bir elektromıknatıs çiftindeki bobinlerin akım miktarı değiştirilirse rotora etkiyen bileşke kuvvet de değişecektir.

Manyetik eşdeğer devreden elde edilen kuvvet denklemine bakıldığında akımın küçük olması ve hava aralığının büyük olması hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun azalmasına o da kuvvetin azalmasına neden olmaktadır. Akım arttıkça etkiyen kuvvet büyürken, hava aralığının azalması ile hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun artmasına ve etkileyen kuvvetin artmasına neden olmaktadır. Kuvvetin hava aralığına göre değişmesinin yanında akıma göre de değişiminin bilinmesi tasarım kriterleri açısından gayet önemlidir. Şekil 3.29'da tek bir elektromıknatıs çiftinin farklı akımlarda rotora etki ettiği kuvvet değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Kuvvetin akıma göre değişimi

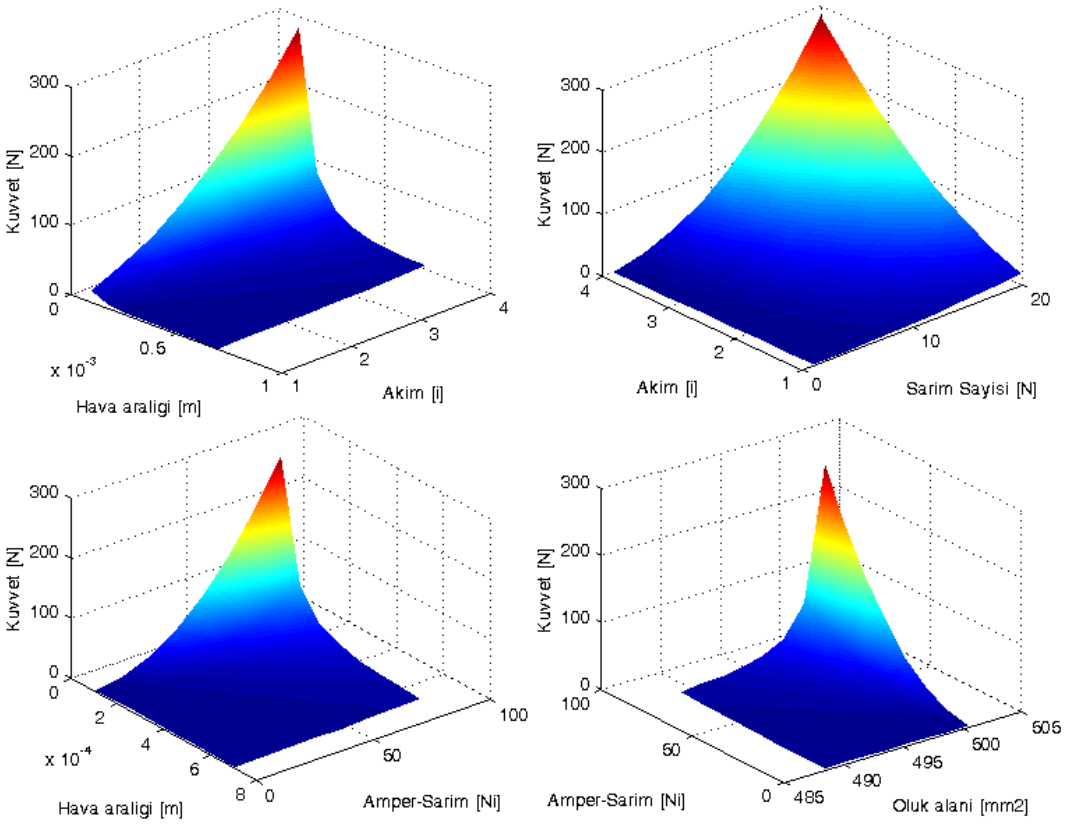
Şekil 3.29'da 0,1 mm hava aralığında tek bir elektromıknatıs çiftinin kuvvetin akıma bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 3.29'da görüldüğü üzere akım miktarı arttıkça rotora etkileyen kuvvet miktarı da artmaktadır. Düşük akım değerlerinde rotora etkiyen kuvvet değeri de düşmektedir.



Şekil 3.30. Kuvvetin amper-sarım sayısına göre değişimi

Şekil 3.30'da ise 0,1 mm hava aralığında rotora etkiyen kuvvetin amper-sarım sayısına göre değişimi verilmiştir. Amper-sarım sayısı da etkiyen kuvvet üzerinde

baskın olduğu açık bir şekilde gözükmektedir. Şekil 3.31'de ise yazılan program ile elde edilen 3 boyutlu grafikler verilmiştir. Bu grafiklerde etkiyen kuvvetin birçok farklı parametre altında değişimleri gösterilmiştir.



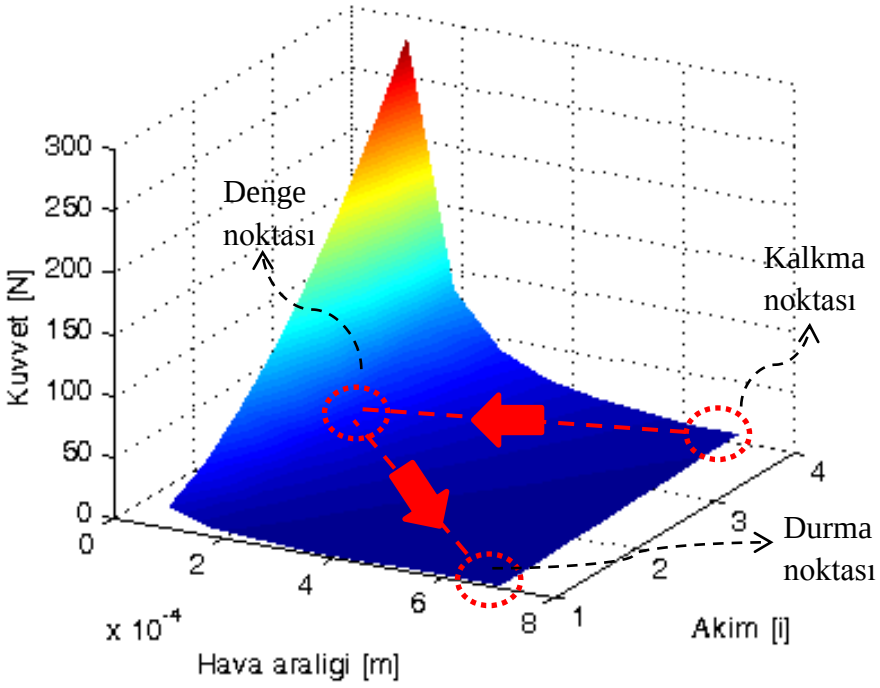
Şekil 3.31. Etkiyen kuvvetin farklı parametrelere göre değişimi

Şekil 3.31'de rotora etkiyen kuvvetin hava aralığı-akım, akım-sarım sayısı, hava aralığı-amper sarım ve amper sarım-oluk alanına göre değişimi gösterilmiştir. Manyetik devrelerde bobinlerin amper sarım değerinin oluk alanına oranı yani akım yoğunluğunun incelenmesi bakımından önemlidir çünkü manyetik ve termal açıdan akım yoğunluğunun belli bir seviyenin altında olması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı akım yoğunluğunu da incelenmesi tasarım kriterleri açısından önemlidir. Akım yoğunluğu çok yüksek olan bir tasarımın manyetik yatağın termal analizde sorun teşkil edeceği ve yüksek akımlarda sorun çıkartacağı aşikârdır.

Tablo 3.2'de klasik manyetik yatağın fiziksel parametreleri verilmiş ve belirtilen değerler altında 0,1 mm hava aralığında ve 4 amper akımda tek bir elektromıknatıs çifti tarafından rotora maksimum 270N'luk bir kuvvet etki ettiği hesaplanmıştır.

Manyetik yatakların tasarımları yapılırken çalışma noktalarının belirlenmesi ve ifade edilmesi kontrolün temeli açısından büyük bir önem arz etmektedir.

Tablo 3.2'de fiziksel özellikleri verilen manyetik yatağın elektrik motorunun rulmanları yerine monte edildiği farz edilirse rulmanların yerine kullanılan iki adet manyetik yatak rotoru sürtünmesiz bir şekilde hava denge tutmaya çalışacaktır. Rotor ve milin toplam ağırlığı 1,2 kg olduğu ön görüldüğünde manyetik yatağın rotoru kaldırma, dengeleme ve tekrar indirme durumlarının akım ve hava aralığı değişimlerine göre tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.32'de manyetik yatağın çalışma noktaları gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Manyetik yatağın çalışma noktaları

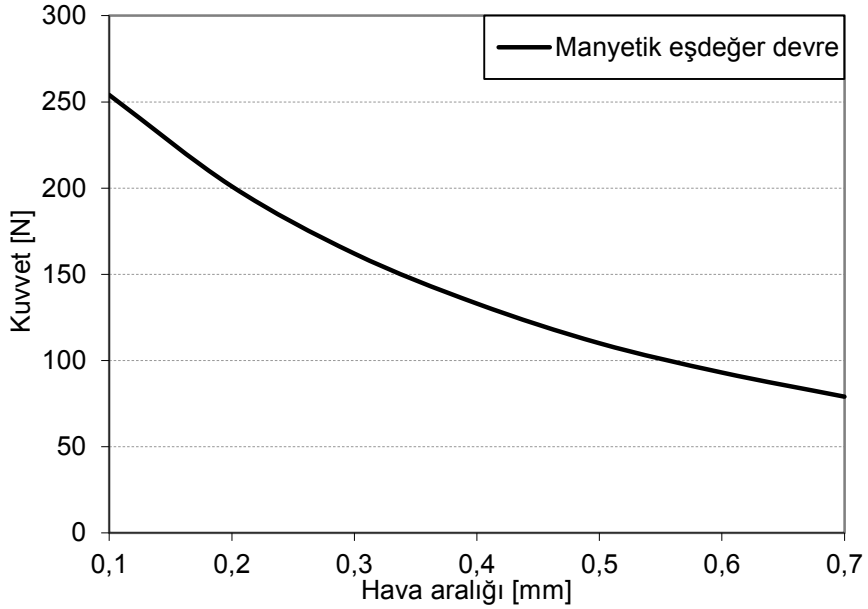
Şekil 3.32'de çalışma noktaları açıkça ifade edilmiştir. Rotor ilk başlangıç durumunda yerçekiminin etkisiyle statora yaslanmış ve bu durumda elektromıknatıs ile rotor arasındaki hava aralığı 0,7 mm'dir. Bu durumda rotoru denge noktasına getirmek için yüksek bir akıma ihtiyaç vardır. Rotor kalkma durumundan sonra ise hava aralığı denge noktasında yani 0,35 mm'de olacağından dolayı manyetik yatağın elektromıknatısından geçen daha düşük bir akım dengelemeyi sağlamaktadır. Rotor en son durma noktasında ise elektromıknatısın akım değeri azaltılarak rotor ilk başlangıç konumuna getirilmektedir.

Klasik manyetik yatak ile aynı fiziksel özelliklere sahip ve rotorunda 4 adet sürekli mıknatıs bulunan manyetik yatağın fiziksel özellikleri ise Tablo 3.3'de verilmiştir. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın klasik manyetik yatak ile aynı fiziksel özelliklere sahip olması iki farklı tip manyetik yatağın karşılaştırılması açısından önemlidir. Bu sayede referans bir tasarıma baz alınarak kıyaslama yapılabilecektir.

Tablo 3.3. Sürekli mıknatıslı manyetik yatağın ön tasarım fiziksel parametreleri

Parametre	Birim
Stator dış yarıçapı	60 [mm]
Rotor dış yarıçapı	25 [mm]
Mil dış yarıçapı	15 [mm]
Hava aralığı	0,1-0,7 [mm]
Paket boyu	40 [mm]
Diş genişliği	10 [mm]
Mıknatıs genişliği	8 [mm]
Mıknatıs uzunluğu	2,2 [mm]
Maksimum bobin DC akımı	4 [A]
Sarım sayısı	20
Oluk sayısı	8
Sac malzemesi	AFK 502
Kutup sayısı	4
Mıknatıs malzemesi	NdFe35

Tablo 3.3'de klasik manyetik yatak ile aynı fiziksel parametrelere sahip sürekli mıknatıslı manyetik yatak fiziksel parametreleri verilmiştir. İlave olarak mıknatısın fiziksel boyutlarının limitleri belirtilmiştir. Sürekli mıknatıslı manyetik yatak da 4 adet manyetik devreden oluşmaktadır ve her bir manyetik devre rotora bir kuvvet uygulamakta ve kendine doğru çekmektedir. Tek bir manyetik devrenin yani elektromıknatıs çiftinin ve mıknatısın oluşturduğu manyetik devre çözümlenerek bu manyetik devrenin rotora uyguladığı kuvvet hesaplanabilmekte ve diğer devrelerinde etkileyebileceği kuvvet miktarı belirlenebilmektedir. Tablo 3.3'de belirtilen özelliklere göre tek bir manyetik devrenin 4 amper akımda rotora etki ettiği kuvvetin hava aralığına göre değişimi Şekil 3.33'de gösterilmiştir.

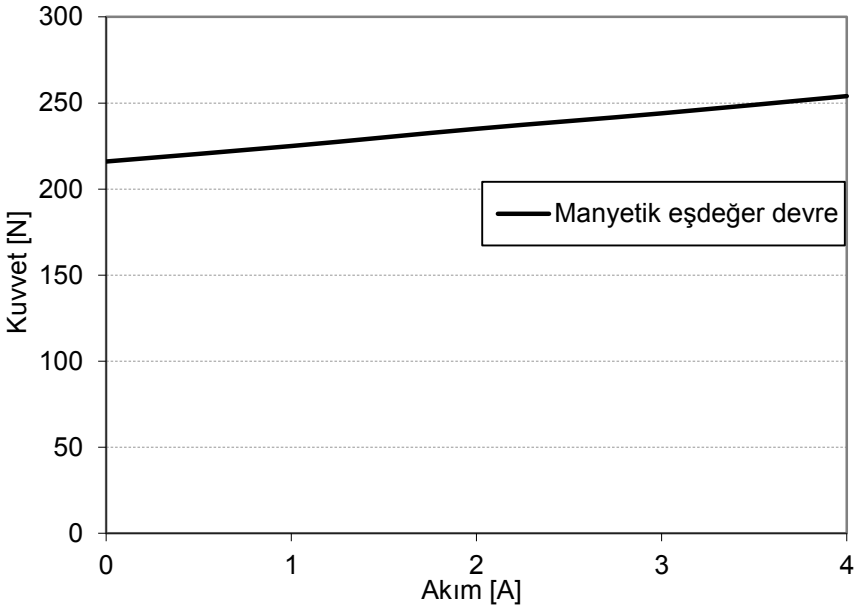


Şekil 3.33. Etkiyen kuvvetin hava aralığına göre değişimi

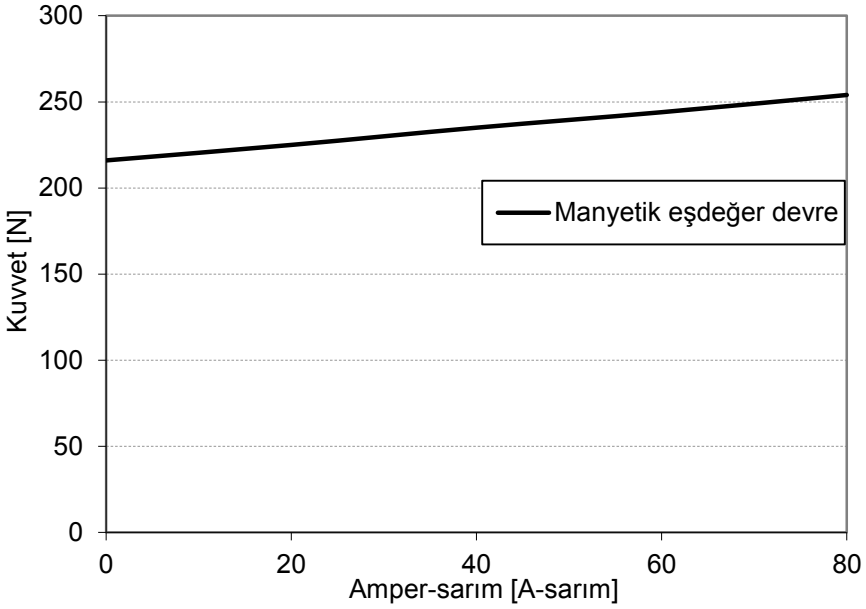
Şekil 3.33'de sürekli mıknatıslı manyetik yatağın bir manyetik devresinin rotora etki ettiği kuvvetin hava aralığındaki ve sürekli mıknatıs üzerindeki kaçak akıların modellendiği manyetik eşdeğer kullanılarak, 4 amper akımda hava aralığına göre değişimi verilmiştir. Şekil 3.33'e bakıldığında verilen özellikler dâhilinde rotora en fazla 254N'luk bir kuvvet etki ettiği hesaplanmıştır. Hava aralığı artığında ise rotora etki eden kuvvet 79N olmaktadır. Diğer manyetik devrelerde de aynı fiziksel özelliklere sahip sürekli mıknatıs ve amper sarım miktarlarında aynı kuvveti rotora uygulamakta ve rotor tamamen dengede tutmaktadır. Eğer herhangi bir manyetik devredeki sürekli mıknatıs fiziksel özellikleri veya amper sarım miktarı değiştirilirse rotora etkiyen bileşke kuvvet de değişecektir.

Manyetik eşdeğer devreden elde edilen kuvvet denklemine bakıldığında akımın küçük olması ve hava aralığının büyük olması kuvvet üzerinde ters etkisi yapmaktadır. Akımın arttıkça etkiyen kuvvet büyürken, hava aralığının artması ile hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun azalmasına ve etkileyen kuvvetin düşmesine neden olmaktadır. Kuvvetin hava aralığının değişmesinin yanında akıma göre değişiminin bilinmesi gerekmektedir. Şekil 3.34'de 0,1 mm hava aralığında rotora etkiyen kuvvetin akıma bağlı şekilde değişimi verilmiştir. Klasik manyetik yatağın akım sarım sayısı grafiği olan Şekil 3.29 ile karşılaştırma yapılırsa klasik manyetik yatakta amper çok düşük iken etki eden kuvvet sıfıra yakındır. Fakat

sürekli mıknatıslı manyetik yatağa baktığımızda ise Şekil 3.34'de görüldüğü üzere sarım sayısı ve akım miktarı sıfıra yakınken bile 210N'luk bir kuvvet rotora etki etmektedir. Eğer akım değerini sıfıra yaklaştırırsak bu bize sürekli mıknatısın açığa çıkardığı kuvvet değerini vermektedir. Sürekli mıknatısın etkilediği kuvvet değeri ise mıknatısın fiziksel özelliklerine ve manyetik devrenin özelliklerine bağlıdır. Şekil 3.35'de rotora etkiyen kuvvetin amper-sarım miktarına göre değişimi gösterilmiştir.

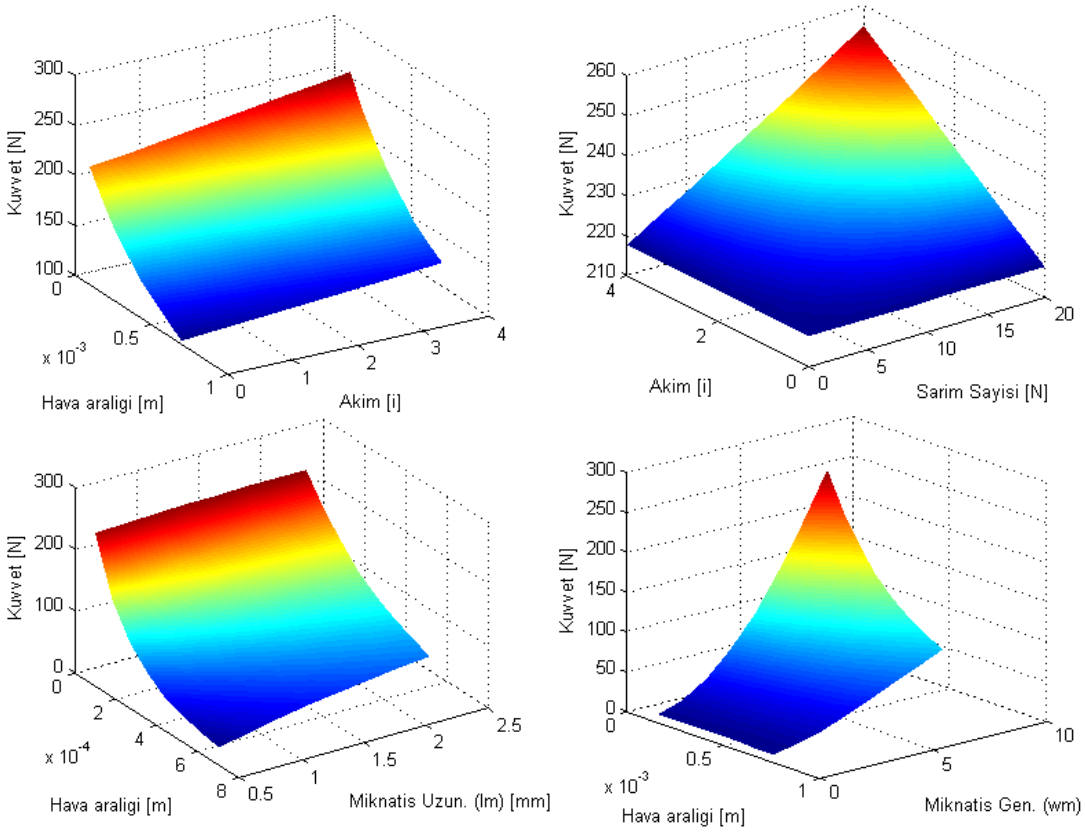


Şekil 3.34. Etkiyen kuvvetin akıma göre değişimi



Şekil 3.35. Etkiyen kuvvetin amper-sarım miktarına göre değişimi

Sürekli mıknatısın fiziksel özelliklerinin manyetik devreyle olan ilişkisi daha net bir biçimde açıklamak için program ara yüzü kullanılarak sürekli mıknatıs fiziksel özellikleri parametrik bir biçimde değiştirilmiştir. Bu sayede rotora etkiyen kuvvetin farklı fiziksel sınırlar altında değişimi elde edilmiştir. Ayrıca program ara yüzü kullanılarak rotora etkiyen kuvvetin hava aralığı-akım, akım-sarım sayısı, mıknatıs uzunluğu-hava aralığı ve mıknatıs genişliği-hava aralığına göre değişimleri 3 boyutlu olarak elde edilmiştir. Şekil 3.36'da elde edilen bu grafikler gösterilmiştir.



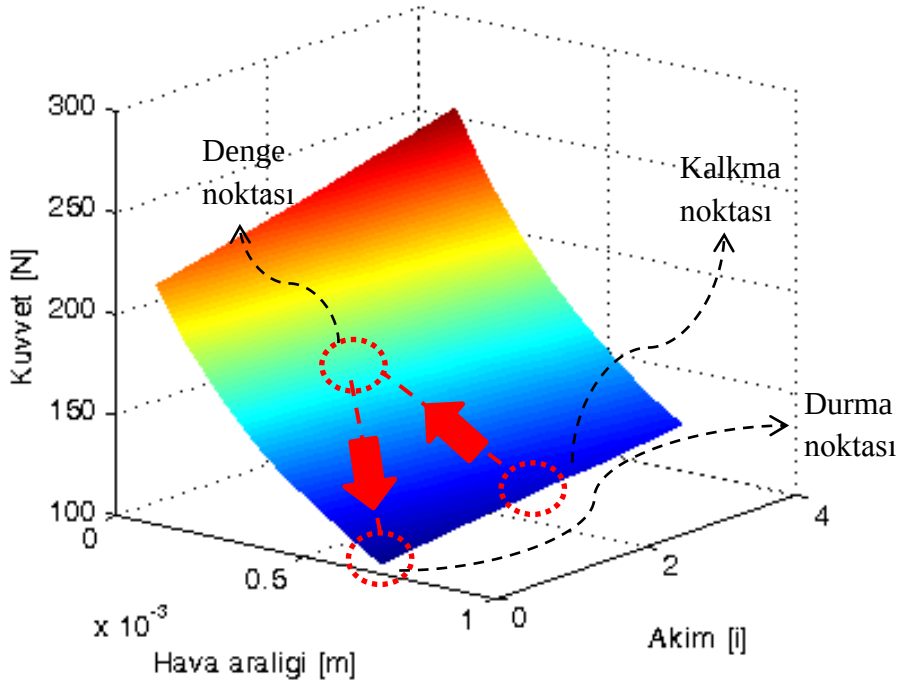
Şekil 3.36. Etkiyen kuvvetin farklı parametrelere göre değişimi

Şekil 3.36'daki grafiklerden de açıkça gözüktüğü gibi sürekli mıknatıslı manyetik yatakta sürekli mıknatısın fiziksel özellikleri kuvvetin temel bileşenini oluşturmaktadır. Hava aralığı ve amper sarım miktarı kuvvet üzerinde sürekli mıknatıs kadar dominant bir etki yapmamaktadır.

Şekil 3.36'da mıknatısın hacmi ile kuvvetin büyüklüğü doğru orantılı olduğu gözükmektedir. Fakat sürekli mıknatısın manyetik devreye etkilediği relüktans değerinin hesaba katılarak tasarımın yapılması gerekmektedir. Çok yüksek hacimli fakat relüktansı yüksek bir sürekli mıknatısın olduğu manyetik yatakta verim

düşüktür ve enerji verimliliğinden bahsetmek zordur. Sürekli mıknatıslı manyetik yataklarda rotoru dengelemek için gerekli olan kuvvetin olabildiğince sürekli mıknatıslardan karşılaması ve çok daha az akım kullanılarak manyetik yataklamanın yapılması enerji verimliliği açısından önemlidir. Sürekli mıknatıslı manyetik yatakların bobinlerin amper sarım değerinin çok fazla yüksek olmaması sayesinde akım yoğunluğunun çok düşük seviyelerdedir ve termal açıdan sürekli mıknatıslı manyetik yataklar daha avantajlıdır.

Tablo 3.3'de fiziksel özellikleri verilen SM manyetik yatağın elektrik motorunun rulmanları yerine montelendiği düşünüldüğünde rotoru ve mili havada denge tutmaya çalışacaktır. Rotor ve milin toplam ağırlığı aynı klasik MY olduğu gibi 1,2 kg olduğu ön görüldüğünde SM manyetik yatağın rotoru kaldırma, dengeleme ve tekrar indirme durumlarının akım ve hava aralığı değişimlerine göre tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.37'de SM manyetik yatağın çalışma noktaları gösterilmiştir.



Şekil 3.37. SM manyetik yatağın çalışma noktaları

Şekil 3.37'de çalışma noktaları gösterilmiştir. Rotor ilk başlangıç durumunda elektromıknatıs ile arasındaki hava aralığı 0,7 mm'dir. Bu durumda rotoru denge noktasına getirmek için elektromıknatısa kalkma çalışma aralığında yüksek bir akım değeri verilmektedir. Rotor kalkma durumundan sonra ise hava aralığı denge

noktasında yani 0,35 mm'de olacağından dolayı manyetik yatağın elektromıknatısından geçen daha düşük bir akım dengelemeyi sağlamaktadır. Rotor en son durma noktasında ise elektromıknatısın akım değeri azaltılarak rotor ilk başlangıç konumuna getirilmektedir. SM manyetik yatak klasik manyetik yatağa göre çok daha az akım değerlerinde rotoru dengelediği hesaplanmıştır. Bu durum SM manyetik yatakların daha az enerji harcayarak klasik manyetik yatak ile aynı değerlerdeki rotor ve mili dengede tutabildiğini göstermektedir. 1,2 kg ağırlığındaki rotor ve mili dengede tutan klasik ve sürekli mıknatıslı manyetik yatağın çalışma noktalarındaki akım değerleri Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Klasik ve SM manyetik yatağın çalışma akımları

	Klasik MY	Sürekli mıknatıslı MY
Kalkma noktası (0,7 mm)	4 amper	2 amper
Denge noktası (0,35 mm)	2 amper	1,1 amper
Durma Noktası (0,7 mm)	1 amper	0 amper

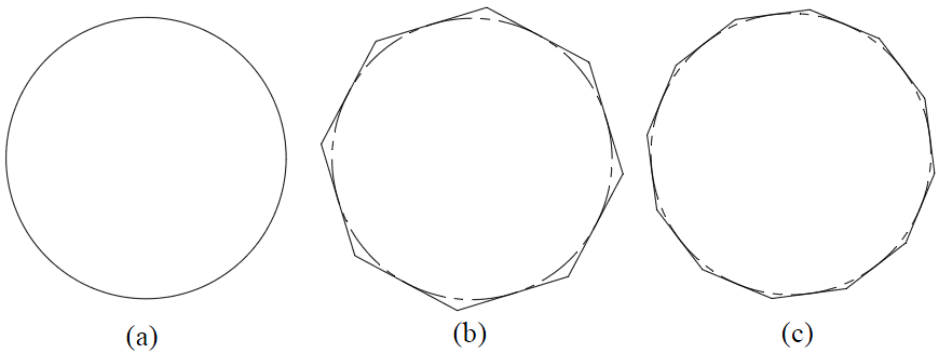
Tablo 3.4'de klasik ve SM manyetik yatağın aynı fiziksel parametreler altında çalışma durumları ve bu durumlarında birinci elektromıknatısın çektiği akım değerleri verilmiştir. Klasik manyetik yatak SM manyetik yatağa göre rotoru ve mili dengede tutmak için daha fazla bir akıma ihtiyaç duymaktadır. SM manyetik yatak ise klasik MY aksine SM sayesinde daha az akım değerlerinde dengelemeyi sağlamaktadır. Bu durum SM manyetik yatakların enerji kullanımı ve termal açıdan avantajlarını ortaya koymaktadır.

4. KLASİK VE SÜREKLİ MIKNATISLI MANYETİK YATAKLARIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bir önceki bölümde klasik ve sürekli mıknatıslı manyetik yatak yapısına ait ön tasarım çalışması yapılarak manyetik yatakların fiziksel özellikleri ve sınır koşulları arasındaki kuvvet akım grafiklerinin yanında birçok değerleri çıkartılmıştır. Bu bölümde klasik ve sürekli mıknatıslı manyetik yatağa ait sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve SEA ile elde edilen sonuçlar manyetik modelleme sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlamalar yapılmıştır.

4.1. Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi karmaşık problemlerin çözümde kullanılan günümüzün popüler sayısal çözümlerinden biridir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gelişen güvenilir ve kullanıcı ara yüzlü paket programlar sayesinde birçok farklı alanda rahatlıkla kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizi inşaat, mekanik, akışkanlar ve sıvı iletimi, elektrik, manyetik dalgalar, elektromanyetik, jeomekanik, biyomedikal, nükleer, mekanizma, otomotiv ve daha birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin temelini kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilebilen problemleri çözmek gelmektedir. Sonlu elemanlar analizinin temeli karmaşık bir sistemi basite indirgeyerek çözümlemek gelmektedir. Şekil 4.1'de bir dairenin sonlu elemanlar yöntemi ile çevresinin hesaplanması gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Dairenin sonlu elemanlar ile çevrenin hesaplanması

Şekil 4.1'de bir dairenin çevresini sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi gösterilmiştir. Bilindiği gibi daire sonsuz sayıda çizginin birleşmesiyle oluşmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde amaç daireyi sonlu bir elemana dönüştürerek analiz etmektedir. Fakat bu sonlu eleman ise tanımlanmaktadır. Eğer sonlu elemanları oluşturan ağ yapısı az tanımlanır ise Şekil 4.1(b)'deki gibi bir modelleme yapılmakta ve hata oranı fazla ve gerçekten uzak bir sonuç elde edilmektedir. Fakat bu az ağ yapısı daha az işlem sağlamakta ve analizin hızlı olmasını sağlamaktadır. Ağ yapısı yoğun olacak şekilde tanımlanırsa ise Şekil 4.1(c)'deki gibi bir modelleme yapılmakta ve hata oranı çok az, gerçeğe çok yakın bir analiz sağlanmaktadır. Fakat bu durumda işlem yükü olarak fazla ve zaman harcanan bir analiz olmaktadır. Bu yöntemde ilgili bölge sonlu elemanlara ayrılmakta ve bu bölgelerde ilgili yaklaşık denklemler uygulanmaktadır. Eğer bölgeler arası ağ yapısı fazla ise hassasiyet fazla olmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir. Eğer ağ yapısı az olursa gerçekten uzak fakat zaman olarak hızlı bir analiz gerçekleşmektedir.

Manyetik devrelerin analiz tarihine bakıldığında 1920'li yıllarda sadece el ile yapılan hesaplamalar gelmektedir. 1980'li yıllarda ise sonlu elemanlar analizi sadece 2 boyutlu kısıtlı olarak yapılmaktadır. Çok basit bir modelin analizi bile o günkü bilgisayar teknolojisi ile saatler almaktadır. Bu uzun sürelere rağmen bile el ile yapılan hesaplamalara göre %75-92 arası bir zaman kazanılmaktadır. Ayrıca 1980'li yıllarda bilgisayarların işlemcileri yetersiz olduğundan 3 boyutlu analiz yapılamamaktadır. 2000'li yıllarda ise yüksek hıza ve işlemcilere sahip bilgisayarların yaygınlaşmasıyla sonlu elemanlar analizi ile 3 boyutlu hesaplamalar daha hızlı bir şekilde ve çok düşük hatalarla ile hesaplanmaktadır [43]. Teknolojinin gelişmesi ve yüksek performanslı bilgisayarların keşfiyle birlikte günümüzde neredeyse bütün uygulamalarda sonlu elemanlar analizi sağladığı yüksek hassasiyet ile güvenle kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin günümüzde gerçek bir uygulamasına örnek vermek gerekirse Airbus A380 serisi yeni nesil yolcu uçağının modellenmesi sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmiş ve tasarım tek bir prototip üretimi ile kusursuz olarak tamamlanmıştır. Yani günümüzde kullanılan modern sonlu elemanlar analizi programları ile gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

SEA elektromanyetik sistemlerin çözümünde sıkça kullanılmaktadır. Elektrik motorlarının tasarımı, modellenmesi, hız, tork, güç ve zıt EMK vb. değerlerin elde edilmesinde güvenle kullanılmaktadır. Elektromanyetik SE analizi Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Maxwell'in düzenlediği ve elektromanyetik sistemlerin temelini oluşturan bu dört denklem sonlu elemanlar analizinde kullanılarak elektromanyetik sistemlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Maxwell'in düzenlendiği bu dört denklem sırasıyla verilmiştir.

$$\nabla \cdot D = p \tag{4.1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{4.2}$$

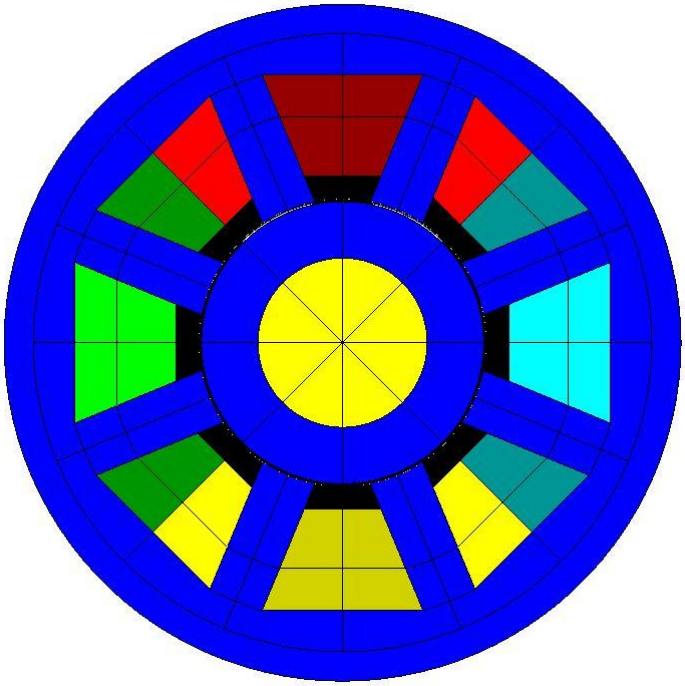
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{4.3}$$

$$\nabla \times H = J_i + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{4.4}$$

Denklem (4.1) Gauss yasasını ifade etmektedir. Gauss yasasına göre herhangi bir kapalı yüzeyden geçen elektrik akı yoğunluğu yüzeyden geçen net yükün elektrik geçirgenliğine bölünmesiyle elde edilmektedir. Denklem (4.2) Gauss yasasının manyetizma için düzenlenmiş halidir. Buna göre kapalı bir yüzeyden geçen net manyetik akı yoğunluğu sıfırdır. Kapalı bir yüzeye giren manyetik akı çizgileri ile çıkan akı çizgileri birbirine eşittir. Denklem (4.3) ise Faraday yasasını ifade etmektedir. Faraday yasasına göre kapalı bir düzlemdeki manyetik akı yoğunluğunun zamana göre değişimi o düzlemde indüklenen EMK'ya eşittir. Denklem (4.4) ise Maxwell'in düzenlemesiyle birlikte Amper yasasının genelleştirilmiş şeklini ifade etmektedir. Amper yasası temel olarak manyetik alan ile elektrik alan arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Değişken elektrik alan ile akımlar tarafından oluşturulan manyetik alanın oluşumunu tanımlamaktadır. Maxwell'in düzenlediği bu dört denklem elektromanyetizmanın temelini oluşturmaktadır. Maxwell düzenlediği bu denklemler ile elektrik ve manyetik alanların birbirleri ile olan etkileşimini ve bu alanların madde üzerinde olan etkilerini açıklamıştır. SEA bu dört temel denklem ağ yapıları ve sınıf koşulları arasında hesaplanarak manyetik eşdeğer devre modeline göre çok daha hassas bir biçimde sonuçlar elde edilmektedir.

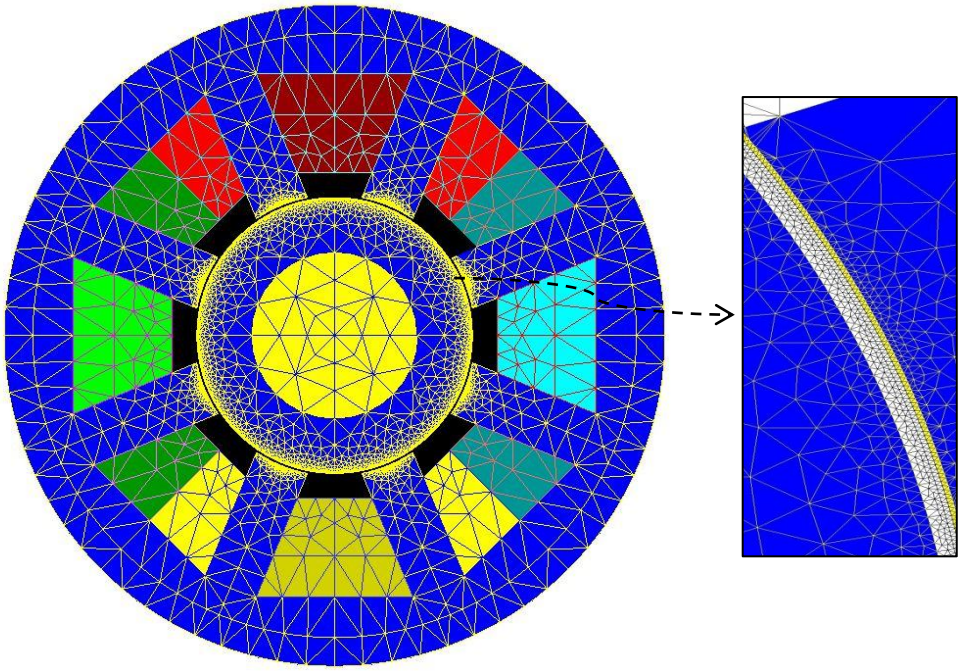
4.2. Klasik Manyetik Yatağın Sonlu Elemanlar Analizi

Bu bölümde klasik manyetik yatağın sonlu elemanlar analizi anlatılmıştır. İlk başta tasarımına karar verilen manyetik yatağın modellenmesi ve ağ yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Manyetik yatağın bobin yapısı ve uygulanan akım değerlerine göre elde edilen kuvvet, manyetik eşdeğer devre ile elde edilen kuvvet değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca klasik manyetik yatağın farklı hava aralığındaki akı yoğunluğu grafikleri çizdirilmiştir. Manyetik yatağın sonlu elemanlar analizi için CEDRAT firmasının FLUX2D paket programı kullanılmıştır. Tablo 3.2'de özellikleri verilen 8 oluklu klasik manyetik yatağın SEA modeli Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



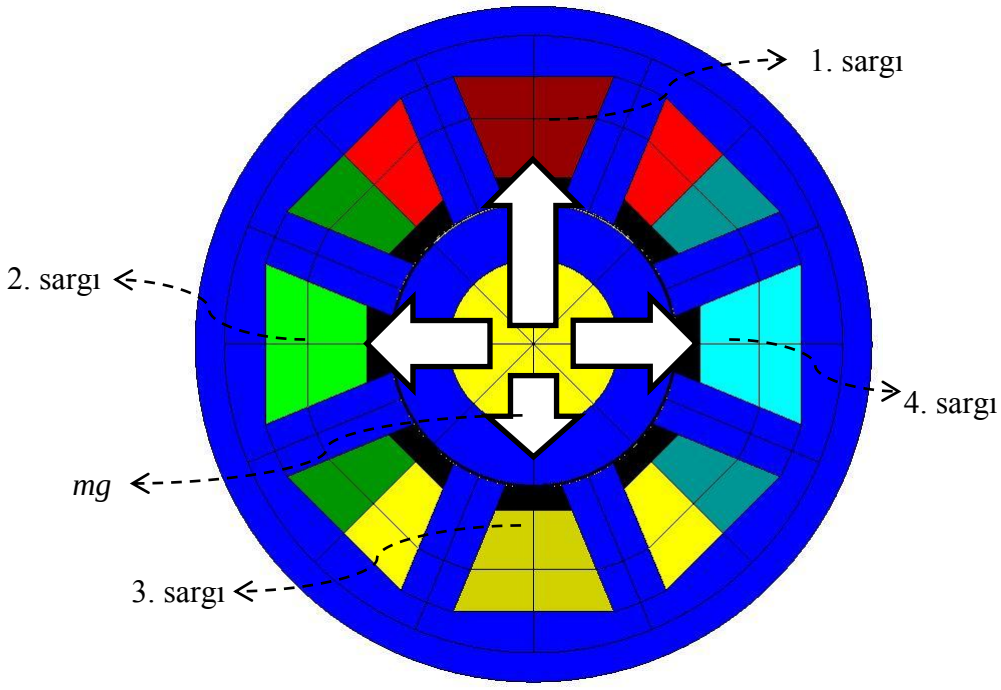
Şekil 4.2. Klasik manyetik yatağın SEA modeli

Bölüm 3'de anlatıldığı gibi manyetik yatak toplam 4 adet elektromıknatıs çiftinden meydana gelmektedir. Kırmızı, yeşil, sarı ve turkuaz renk sargıları temsil etmektedir. Her bir sargı elektromıknatıs çiftlerini meydana getirmekte ve yataklamayı sağlamaktadır. Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı hesaplamanın hassasiyeti açısından gayet önemlidir. Özellikle kuvvet değerini oluşturan temel etken olan hava aralığının iyi bir ağ yapısı ile modellenmesi gerekmektedir. Şekil 4.3'de klasik manyetik yatağın ağ yapısı gösterilmiştir.



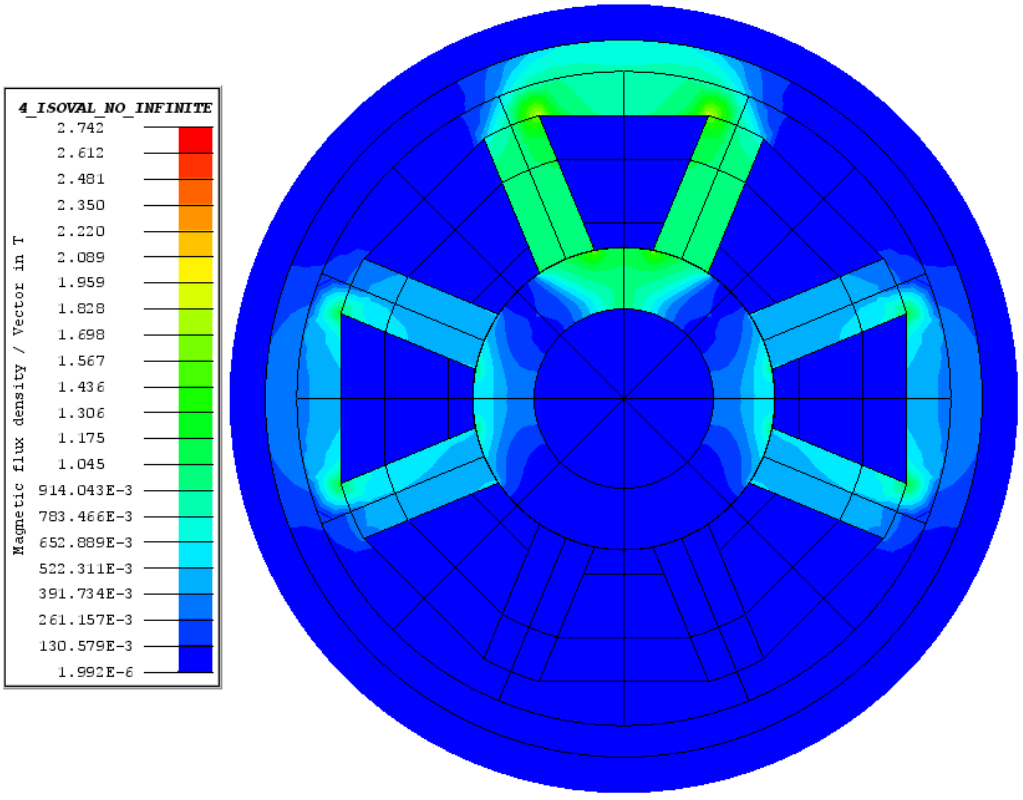
Şekil 4.3. Klasik manyetik yatağın ağ yapısı

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi modellemede hava aralığına ekstra katmanlar konularak buradaki ağ yapısının yoğun olması sağlanmıştır. Bu analizin gerçekliliği için önem arz etmektedir. Manyetik yatakta bobinler sırasıyla numaralandırılmıştır. Şekil 4.4'de manyetik yatağın sargıları gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Klasik manyetik yatağın sargı yapısı ve özellikleri

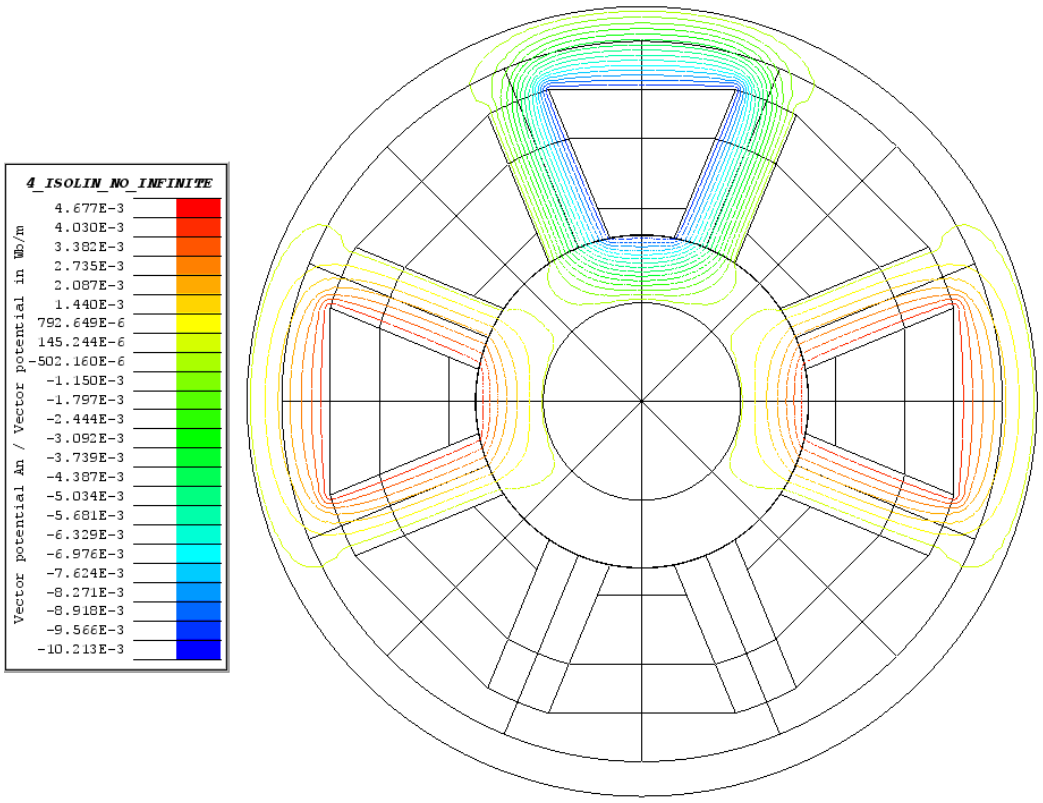
Manyetik yatağın çalışma prensibine bakıldığı 1. sargının en fazla akıma sahip olması gerekmektedir. Çünkü rotoru yerçekiminin aksine çekmeye çalışmaktadır. 3. sargı ise yerçekimi doğrultusunda bir çekme kuvveti oluşturacağı için çok daha az bir akım gerekmektedir veya gerekmemektedir. 2. ve 4. sargılar ise rotoru x ekseninde dengede tutmaktadır ve bu anlamda yüksek akım değerlerine ihtiyaç duymamaktadırlar. Bu sebepten dolayı manyetik yataklarda önemli olan 1. sargının rotora etkiyeceği kuvvetin hesaplanmasıdır. Şekil 4.4'de ayrıca elektromıknatısların rotora etkiyen kuvvet yönleri de gösterilmiştir. SEA modelinde 0,1 mm hava aralığında 1. sargıya 4 amper, 2. ve 4. sargılara 2 amper verildiğinde ve 3. bobine gerilim uygulanmadığında manyetik yatağa ait elde edilen akı yoğunluğu Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Klasik manyetik yatağın akı yoğunluğu değişimi

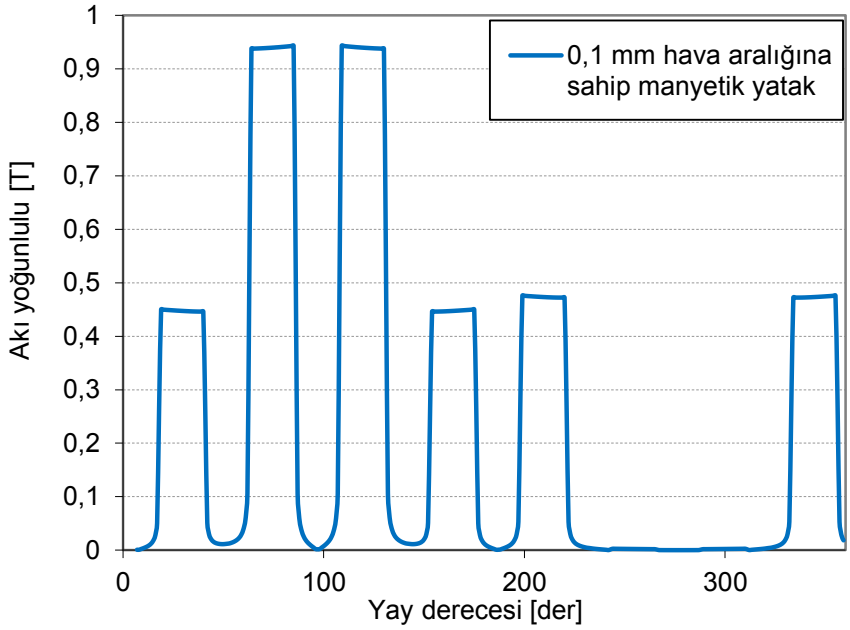
Şekil 4.5'de 1. sargının olduğu elektromıknatıs çiftinin manyetik akı yoğunluğunun 0,94T mertebesinde olduğu, 2. ve 4. sargının olduğu elektromıknatıs çiftlerinin akı yoğunluğu ise 0,45T olduğu gözükmektedir. İkinci ve dördüncü sargılar rotoru kendilerine doğru çekecekleri için rotorun x eksenindeki bileşke kuvveti sıfır olacaktır. 3. sargıya bir gerilim uygulanmadığı için y ekseninde sadece 1. sargının

meydana getirdiği kuvvet değeri rotora etki etmektedir. Bu sayede rotora etkiyen bileşke kuvvet sadece y ekseninde ve 1. sargının etkisindedir.



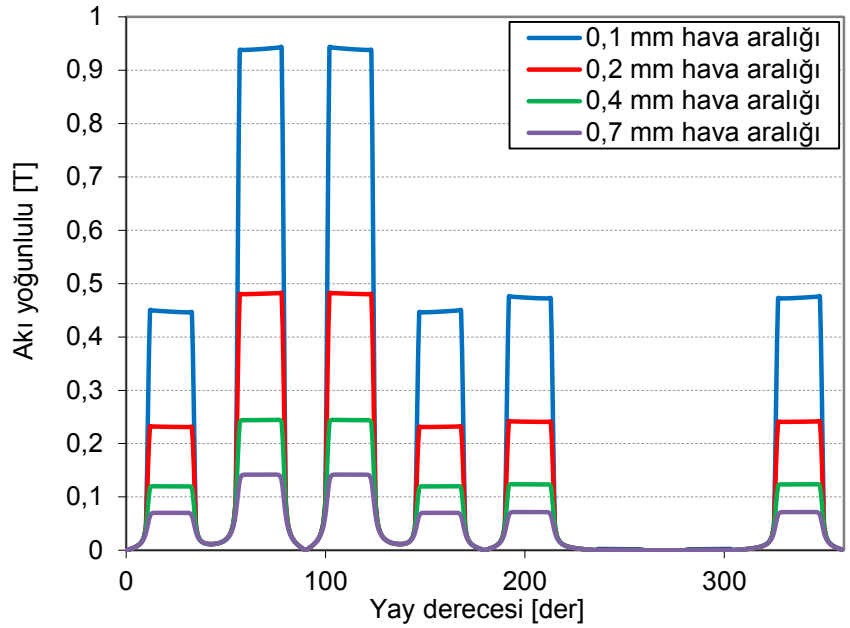
Şekil 4.6. Klasik manyetik yatağın akı yolları

Şekil 4.6'da manyetik yatağın 0,1 mm hava aralığına akı yolları gösterilmiştir. Elektromıknatıs çiftleri ve akı yolları açık bir şekilde gözükmektedir. SEA ile elde edilen bu şekil manyetik eşdeğer devre modelinin doğruluğunun bir göstergesidir. Akı yolları birinci sargının olduğu elektromıknatıs çiftinde yoğun olduğu açık bir şekilde gözükmektedir. Şekil 4.7'de ise hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.7'de gösterilen grafikte 1. sargının elektromıknatıs çiftinin hava aralığındaki akı yoğunluğunun yüksek olduğu ve 2. ve 4. sargının olduğu elektromıknatısların hava aralığındaki akı yoğunluğunun ise az olduğu açık bir şekilde gözükmektedir. 3. sargıya gerilim verilmediği için herhangi bir manyetik devreye sahip olmadığından dolayı hava aralığında akı yoğunluğu yoktur. Üç tane sargıya gerilim verildiğinden grafikte toplam 6 adet tepe akı yoğunluğu gözükmektedir.



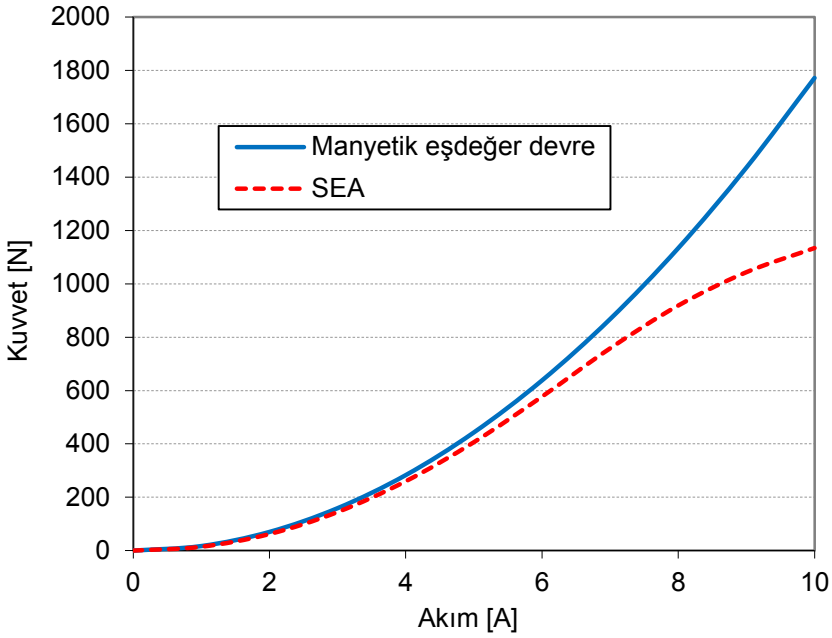
Şekil 4.7. Hava aralığındaki akı yoğunluğu

Parametrik bir çalışma yapılarak hava aralığı 0,1 mm den 0,7 mm'ye kadar arttırıldığında hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi incelenmiştir. Hava aralığının artması sonucunda akı yoğunluğu azalmakta ve rotora etkiyen kuvvet değişmektedir. Şekil 4.8'de farkı durumlardaki akı yoğunluğu değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Hava aralığındaki akı yoğunluğu

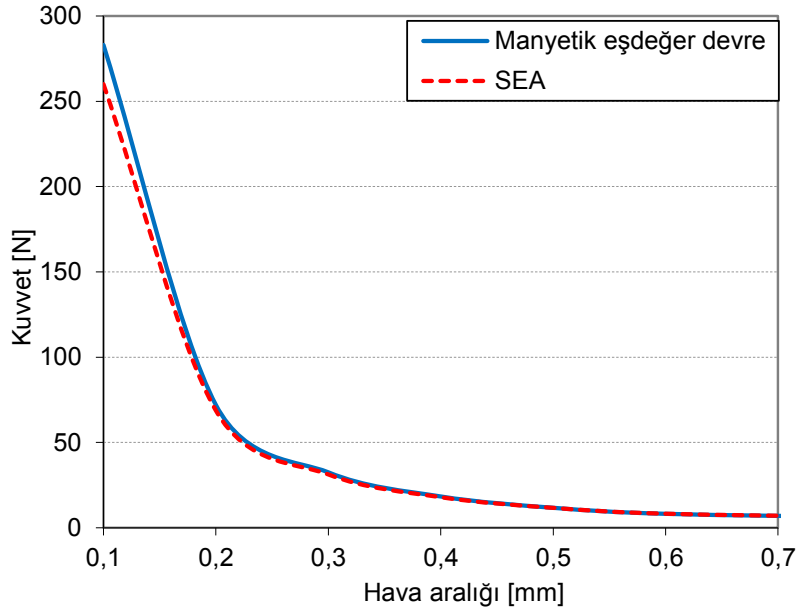
Şekil 4.8'deki grafiklerden 0,1 mm hava aralığında maksimum 0,94T ve 0,7 mm hava aralığında ise 0,15T akım yoğunluğu gözlemlenmiştir. Manyetik yataklarda kullanılan malzemeler anlatılırken yüksek doyuma sahip sac malzemelerinin kullanılması gerektiği bahsedilmiştir. Sac malzemelerinin doyum karakteristiği aynı şekilde manyetik yatakların akım-kuvvet ilişkilerine de yansımaktadır. Parametrik bir çalışma yapılarak hem SEA ile hem de manyetik eşdeğer devre ile 0,1 mm hava aralığına sahip manyetik yatağın herhangi bir sargısına 10 ampere kadar akım uygulandığında elde edilen kuvvet akım grafiği Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. 0,1 mm hava aralığına sahip MY kuvvet akım grafiği

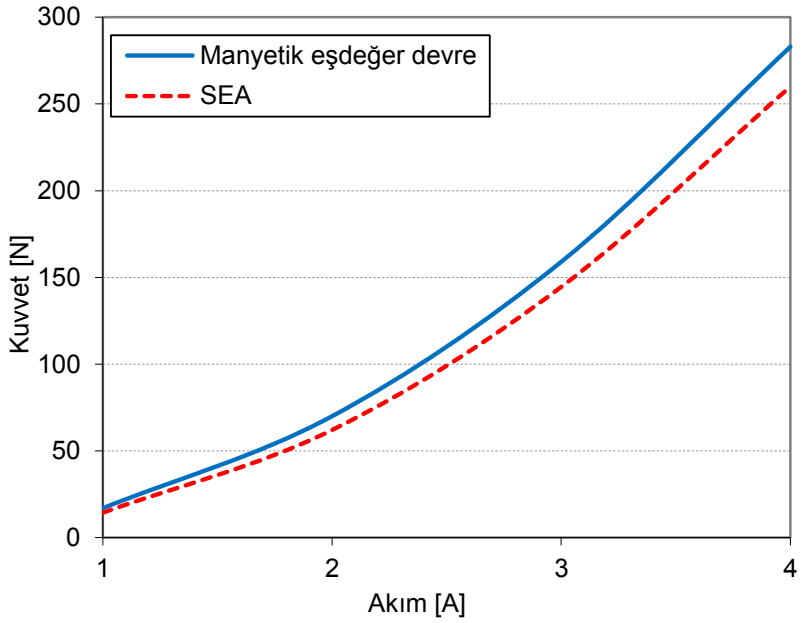
Şekil 4.9'da hem SEA sonuçları hem de manyetik eşdeğer devre sonuçları gösterilmiştir. Kullanılan sac malzeme yaklaşık 8 amper akım değerinde doyuma girmektedir. Manyetik yatakların doğrusal bölgelerinde çalışmaları istenmektedir. Doyuma girmiş sac malzemesinin her açıdan verimi düşmektedir. SEA sonuçları ile manyetik eşdeğer devre sonuçları uyum içerisindedir.

Manyetik eşdeğer devre modeli tasarımında olduğu gibi kuvvetin akıma ve hava aralığına göre değişimi sonlu elemanlar analizi ile de elde edilmiş ve manyetik eşdeğer devre ile hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.10'da 4 amper akımda rotora etkiyen kuvvetin hava aralığına göre değişimi verilmiştir.



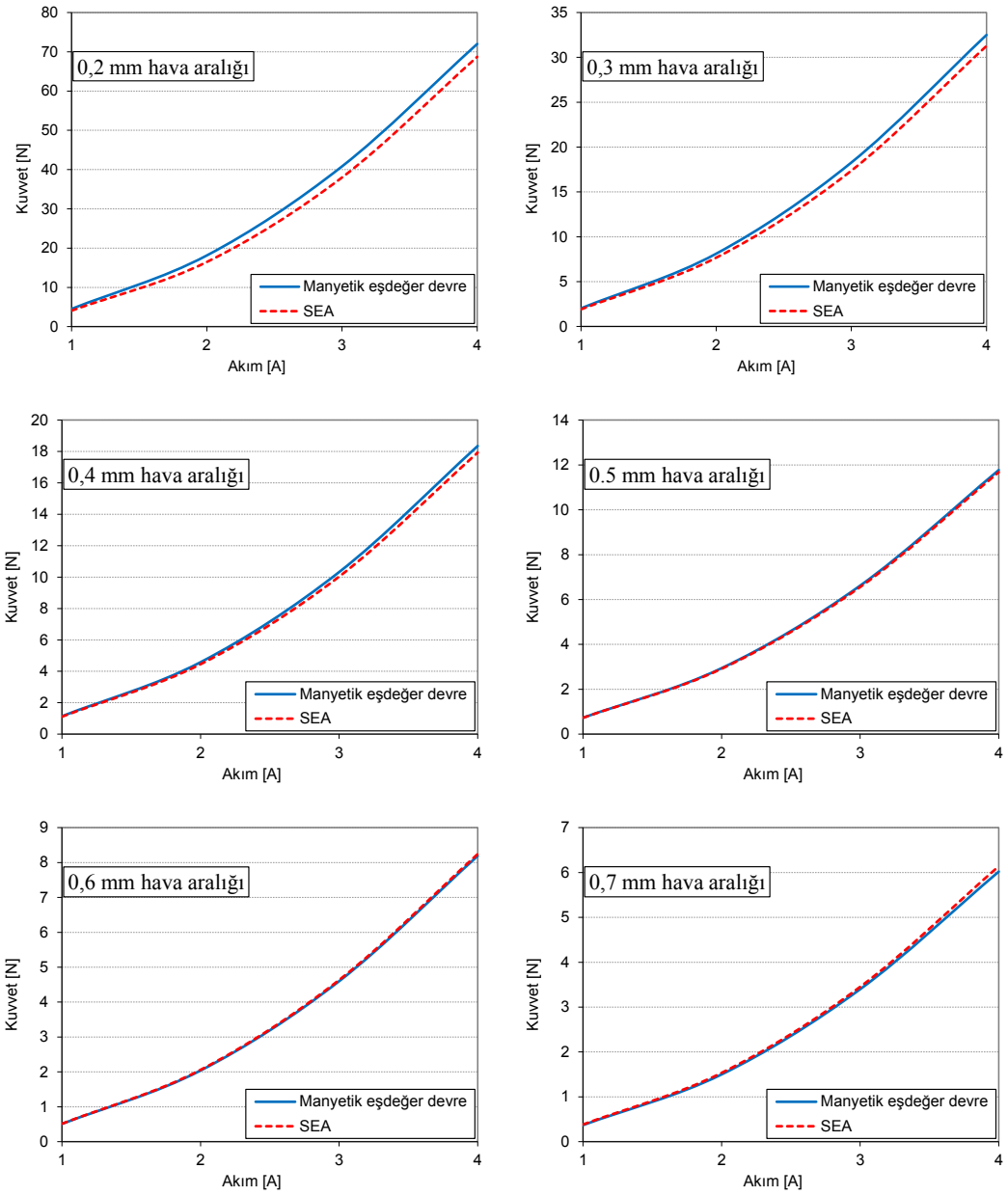
Şekil 4.10. Etkiyen kuvvetin hava aralığına göre değişimi

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere hava aralığının artması ile SEA ile manyetik modelleme arasındaki uyum artmaktadır. 0,1 mm hava aralığı hariç diğer hava aralıklarında çok iyi bir uyum elde edilmiştir. Etkiyen kuvvetin hava aralığına göre değişiminin yanında akıma göre de değişiminin incelenmesi gerekmektedir. 0,1 mm hava aralığına sahip bir manyetik yatağın tek bir sargısının akımı parametrik olarak arttırılmış ve etkiyen kuvvetin değişimi Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kuvvetin akıma göre değişimi

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere 0,1 mm hava aralığında SEA sonuçları ile manyetik eşdeğer devre sonuçları arasında belirgin bir fark vardır. 0.1 mm hava aralığı manyetik yataklar çok hassas hava aralığı değeridir. Parametrik bir çalışma yapılarak hava aralığının 0,7 mm'ye kadar çıkartılması durumda kuvvetin akıma bağlı değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

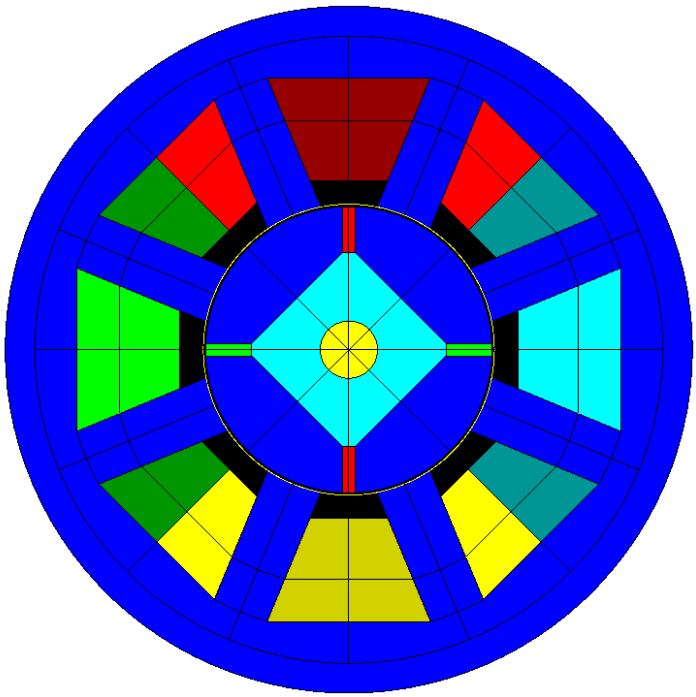


Şekil 4.12. Farklı hava aralığına sahip MY kuvvet–akım grafiği değişimi ve SEA manyetik eşdeğer devre ile karşılaştırılması

Şekil 4.12'de manyetik yatağın hava aralığının yüksek olduğu modellerde SEA sonuçları ile manyetik eşdeğer devre sonuçları arasındaki uyum giderek artmaktadır. 0,2 ve 0,3 mm hava aralığına sahip manyetik yatakta ise sonuçlar arasında farklılıklar çıkmaktadır. Hava aralığının artması ile hata oranı azalmakta ve uyum oranı artmaktadır. Manyetik yatakların hava aralıklarının genellikle çok küçük yani 0,3-0,5 mm arasında olduğu düşünüldüğünde ise elde edilen sonuçlar başarılıdır.

4.3. Sürekli Mıknatıslı Manyetik Yatağın Sonlu Elemanlar Analizi

Bu bölümde sürekli mıknatıslı manyetik yatağın sonlu elemanlar analizi anlatılmıştır. SM manyetik yatağın SEA modeli ve ağ yapısı hakkında bilgiler verilmiş ve SM manyetik yatağın yüksüz ve yüklü durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve akı yolları gösterilmiştir. Sargı yapısı ve akım değerlerine göre elde edilen akım-kuvvet değerleri, manyetik eşdeğer devre ile elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak klasik manyetik yatak ile SM manyetik yatağın rotora etkilediği kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Tablo 3.3'de özellikleri verilen 8 oluklu SM manyetik yatağın SEA modeli Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

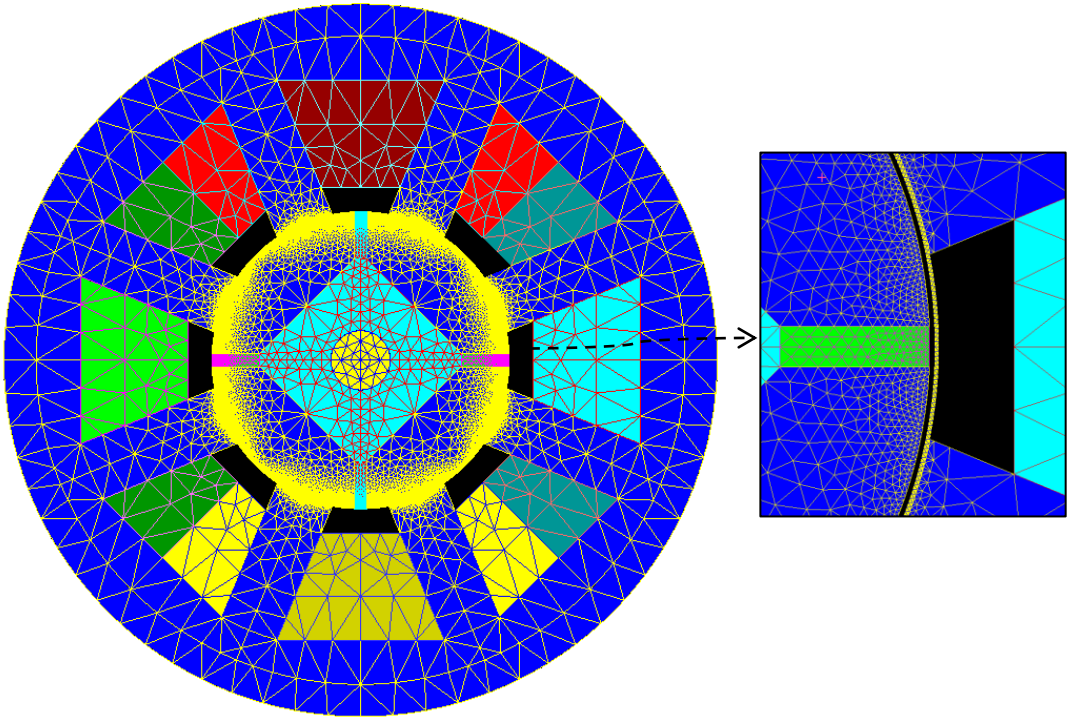


Şekil 4.13. SM manyetik yatağın SEA modeli

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi SM manyetik yatak klasik manyetik yatak ile aynı fiziksel özelliklerine sahip, stator oluk sayısı ve sargı yapısı aynıdır. SM manyetik

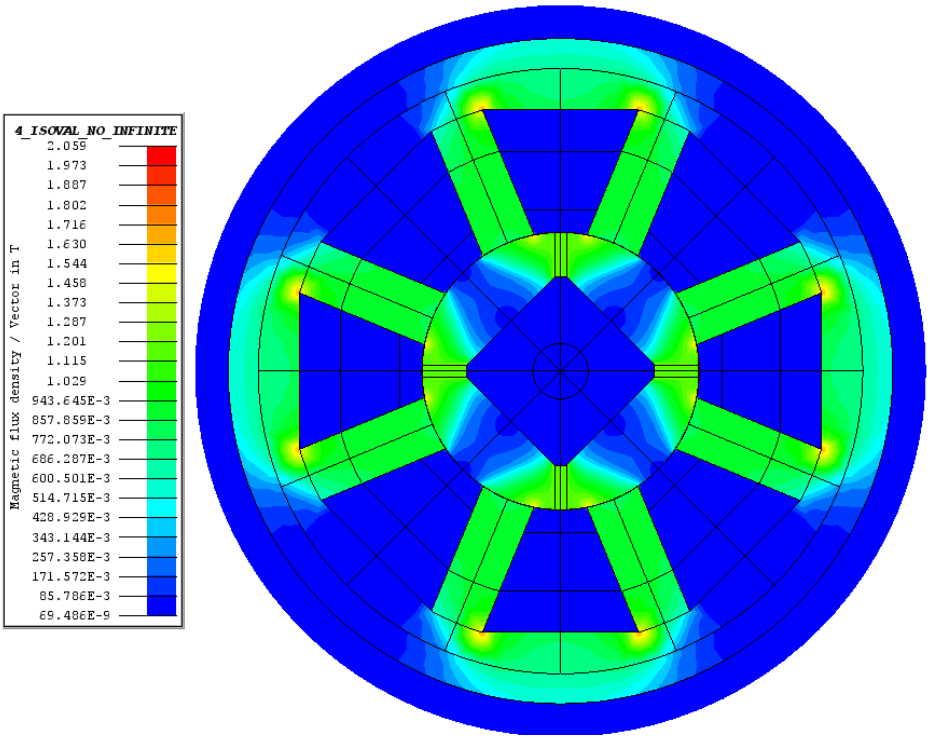
yatak toplam 4 adet sürekli mıknatıstan meydana gelmektedir. Sürekli mıknatıslar düşük relüktans değerine sahip olması için çubuk tip mıknatıs şeklide modellenmiş ve kutuplanma yönleri sağa veya sola olacak şekilde tasarlanmıştır. Sargı yapısı ise klasik manyetik yataktaki gibi 4 adet bağımsız sargıdan meydana gelmektedir.

Sonlu elemanlar analizinde ağ yapısı hesaplamanın hassasiyeti açısından gayet önemlidir ve kuvvet değerini oluşturan temel etken olan hava aralığının iyi bir ağ yapısı ile modellenmesi gerekmektedir. Şekil 4.14'de SM manyetik yatağın ağ yapısı gösterilmiştir.

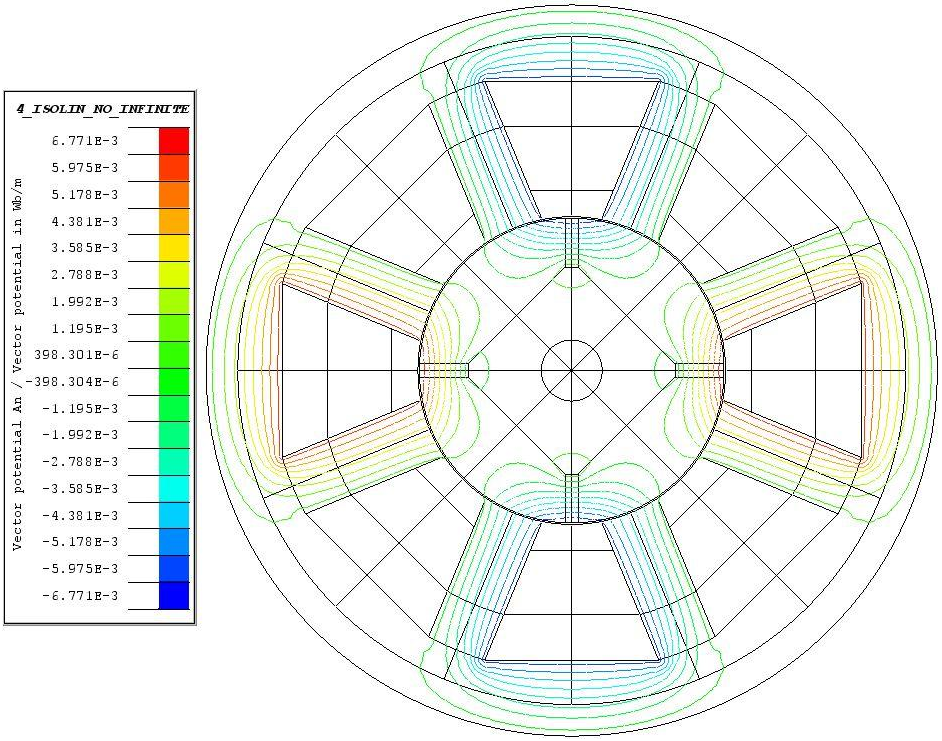


Şekil 4.14. SM manyetik yatağın ağ yapısı

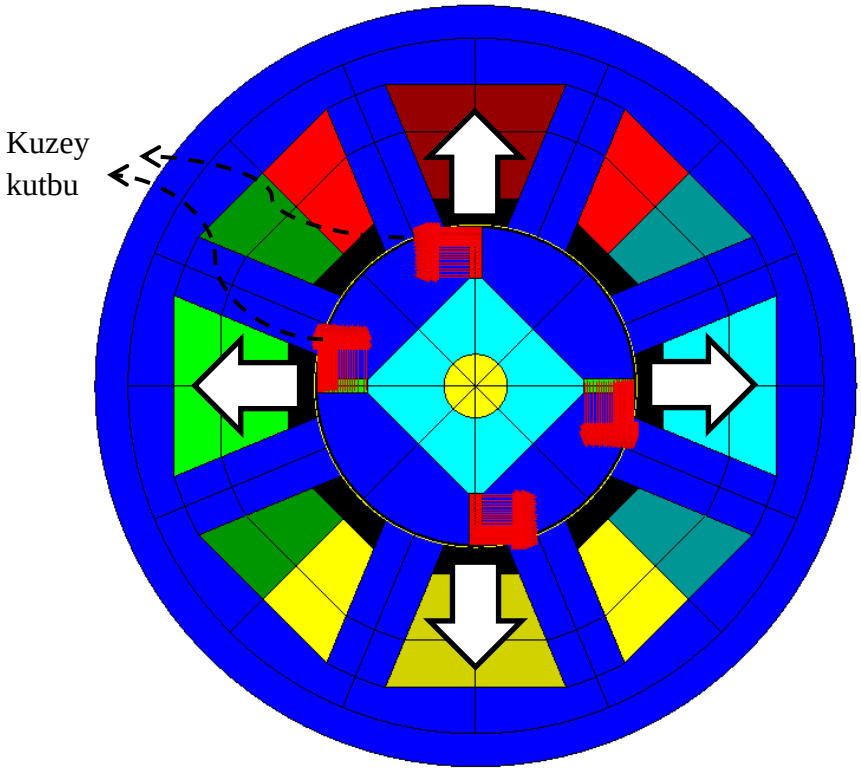
Şekil 4.14'de aynı klasik manyetik yatakta olduğu gibi ağ yapısı hava aralığında yoğunlaşmıştır. SM manyetik yatakta bulunan 4 adet sürekli mıknatısın kutup yönleri ise sargıların oluşturduğu akı ile aynı olarak şekilde modellenmiştir. SM manyetik yatak yüksüz durumda iken 4 adet sürekli mıknatısın oluşturduğu kuvvetin etkisinde kalmaktadır. Sürekli mıknatıslar yüksüz durumda rotoru statora yaklaştırmaya çalışırlar. Yüksüz durumda 0,1 mm hava aralığına sahip SM manyetik yataktaki akı yoğunluğu ve çizgileri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Hava aralığında 0,82T akı yoğunluğu bulunmaktadır. Sürekli mıknatısın kutup yönleri ve rotora etkiyen kuvvetler ise Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. SM manyetik yatağın yüksüz durum akı yoğunluğu



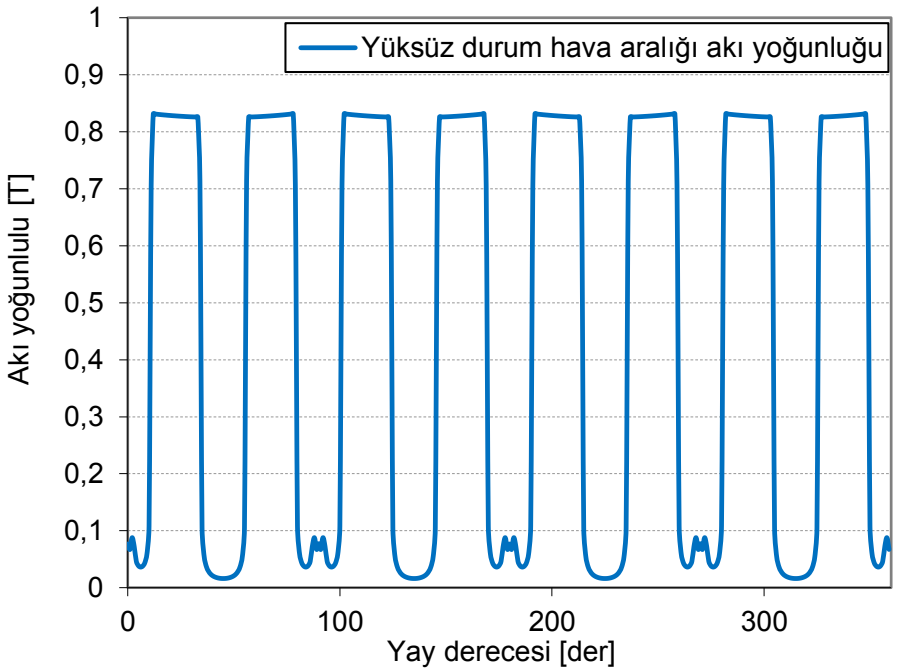
Şekil 4.16. SM manyetik yatağın yüksüz durum akı çizgileri



Şekil 4.17. SM kutup yönleri ve rotora etkiyen kuvvetler

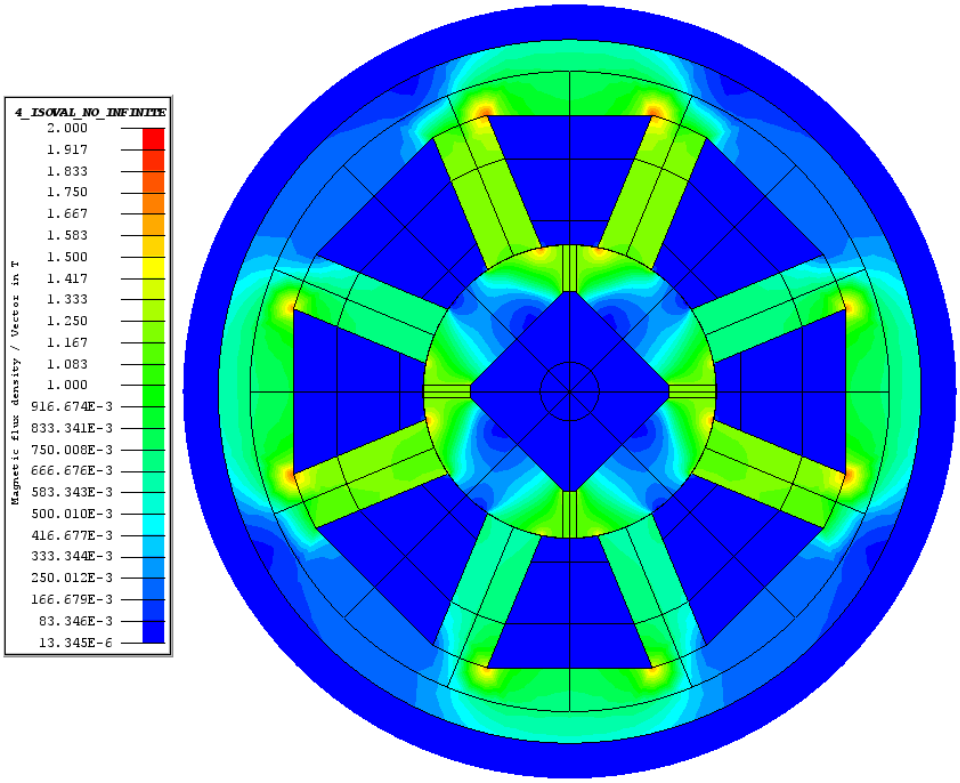
Şekil 4.15'de açıkça manyetik devreler gözükmektedir. Sürekli mıknatıslar kendi manyetik devrelerini oluşturmakta ve rotora eşit miktarda kuvvet etki etmesini sağlamaktadır. Rotora etkiyen kuvvetin eşit olduğunu göstermek için ise hava aralığındaki akı yoğunluğuna bakmak yeterli olacaktır. 0,1 mm hava aralığına sahip modelde yüksüz durumda hava aralığının ortasındaki akı yoğunluğu değişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Şekil 4.18'de hava aralığında manyetik akı yoğunluğu değişimi 360 derecelik bir yay boyunca verilmiştir. Manyetik akı yoğunluğunu oluk sayısı kadar tepe değerinden oluşmaktadır ve hepsinin genlikleri aynıdır. Bu rotora etkiyen kuvvetin sıfır olduğunun bir göstergesidir. Yüksüz durumda sadece sürekli mıknatıstan kaynaklı bir manyetik devrede hava aralığındaki akı yoğunluğu 0,84T değerlerindedir. Bu değer 0,1 milimetrelik hava aralığına sahip modelde elde edilmiştir.



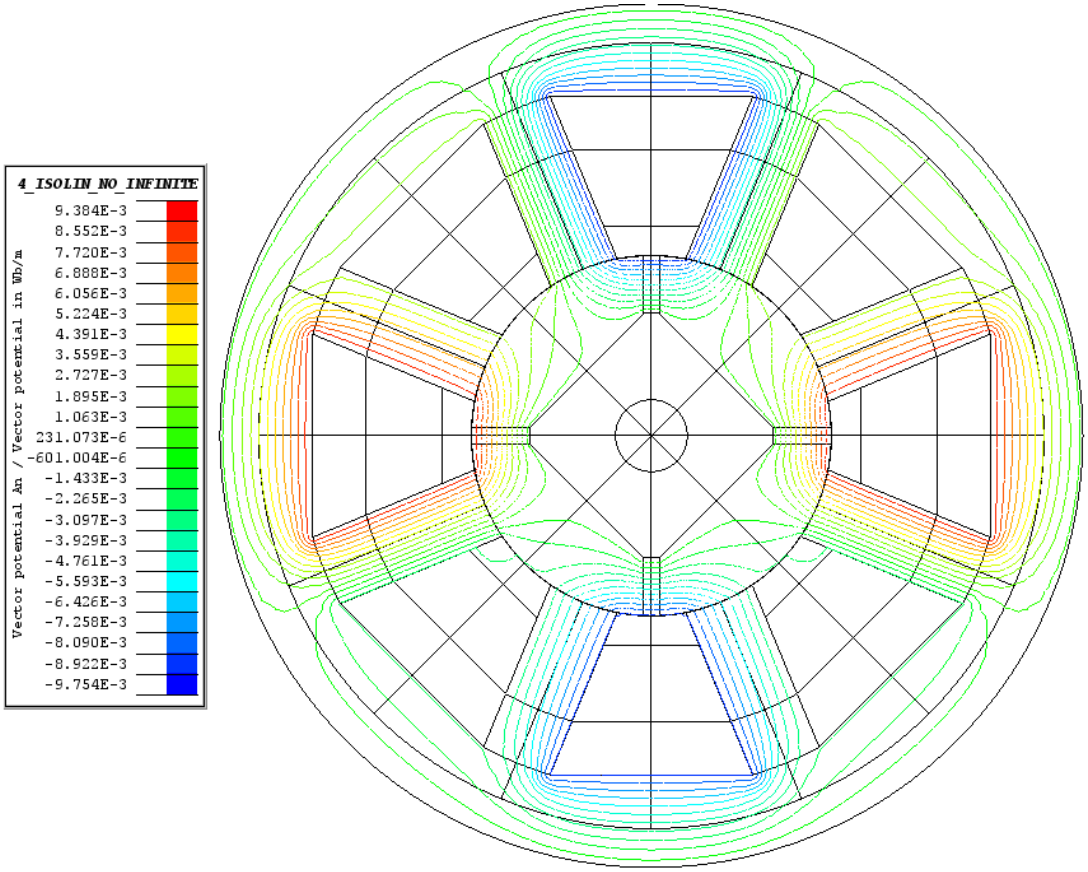
Şekil 4.18. Yüksüz durum hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi

Klasik manyetik yatakta rotoru x ekseninde dengede tutmak için 2. ve 4. sargılara akım vermek gerekmektedir. SM manyetik yatakta ise sürekli mıknatıslar sayesinde x ekseninde dengelemek için herhangi bir gerilime ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak rotora etkiyen çok fazla bozucu dış etken varsa buradaki sargılara akım verilebilmektedir. Manyetik yatağın genel çalışma prensibine bakıldığı 1. sargının en fazla akıma sahip olması gerekmektedir. Çünkü rotoru yerçekiminin aksine çekmeye ve dengelemeye çalışmaktadır. 3. sargı ise yerçekimi doğrultusunda bir çekme kuvveti oluşturacağı için çok daha az bir akım gerekmektedir hatta SM manyetik yataklarda bu sargının kullanılmaması bile olasıdır. Bu sebepten dolayı manyetik yataklarda önemli olan 1. sargının sürekli mıknatıs ile birlikte rotora etkiyeceği kuvvetin hesaplanması ve aynı zamanda tek bir mıknatısın rotora etkilediği kuvvetin bilinmesidir. Tablo 3.3 baz alınarak SEA modelinde 1. sargıya 4 amper, 2. ve 4. sargılara 2 amper verildiğinde ve 3. bobine akım uygulanmadığında manyetik yatağa ait elde edilen akı yoğunluğu Şekil 4.19'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. SM manyetik yatağın yüklü durum akı yoğunluğu

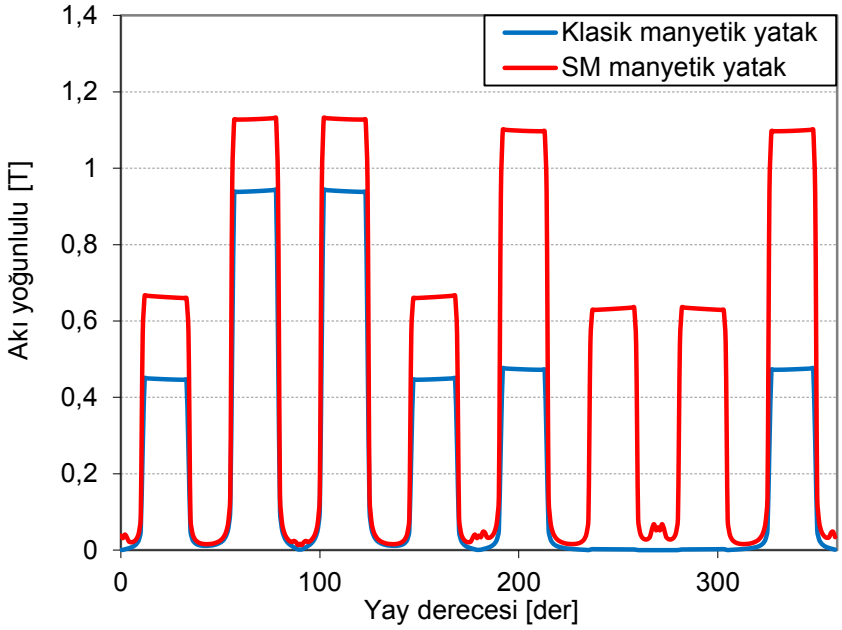
Şekil 4.19'da 1. sargının olduğu elektromıknatıs çiftinin manyetik akı yoğunluğunun 1,12T mertebesinde olduğu, 2. ve 4. sargının olduğu elektromıknatıs çiftlerinin akı yoğunluğu ise 1,1-0,6T ve 3. Sargının olduğu olukların ise manyetik akı yoğunluğunun 0,63T olduğu SEA ile hesaplanmıştır. Manyetik devreler arasında kaçak akılar akmakta ve manyetik modellemesi yapılırken her biri bağımsız olan manyetik devrelerden akılar geçmektedir. Bu durum sonucunda da yüksüz durumda üçüncü sargıya ait hava aralığında akı yoğunluğu 0,84T olması gerekirken 0,63T olmaktadır. Bu durumu akı yollarının gösterimi ile daha belirgin bir şekilde gözükmektedir. Şekil 4.20'de SM manyetik yatağın yüklü durumdaki akı yolları gösterilmiştir. Elektromıknatıs çiftleri ve akı yolları şekilde açık bir şekilde gözükmektedir.



Şekil 4.20. SM manyetik yatağın akı yolları

Şekil 4.20'de manyetik devreler arasındaki kaçak akılar net bir biçimde gözükmektedir. Dört adet bağımsız manyetik devre modellenirken SEA sonuçlarında bütün manyetik devrelerin birbirleri ile ilişkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum rotora etkiyen toplam kuvvetin manyetik eşdeğer devre ile hesaplanmasından ziyade sonlu elemanlar analizi ile hesaplaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

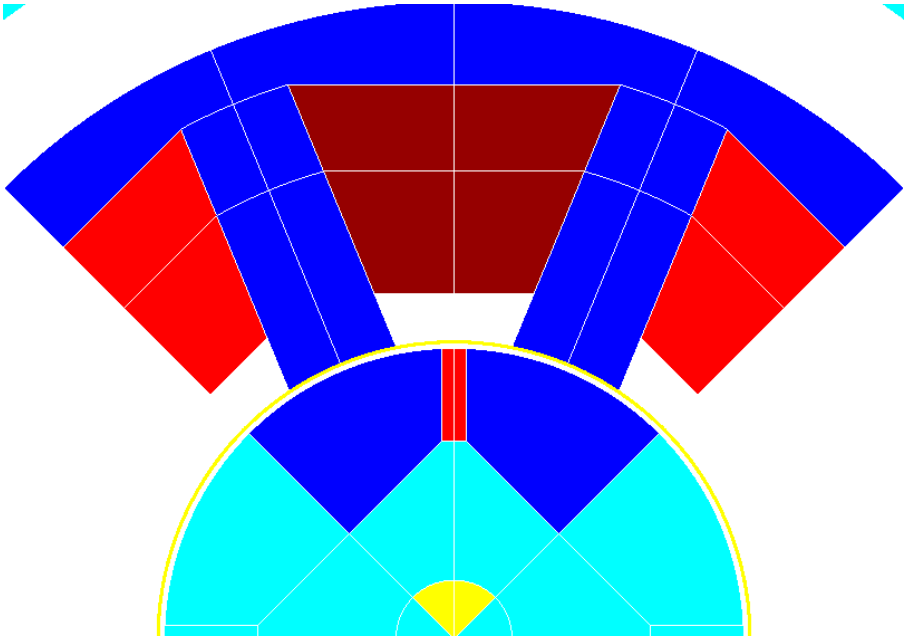
Klasik manyetik yatağın aksine sargılara aynı akım değeri verildiğinde elde edilen akı yoğunluğu ve yolları SM manyetik yatakta farklıdır. Sürekli mıknatısların akı yoğunluğuna etkisi açık bir şekilde gözükmektedir. Klasik ve SM manyetik yatağın bu durumunu karşılaştırıldığında 0,1 mm hava aralığa sahip modellerde hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi

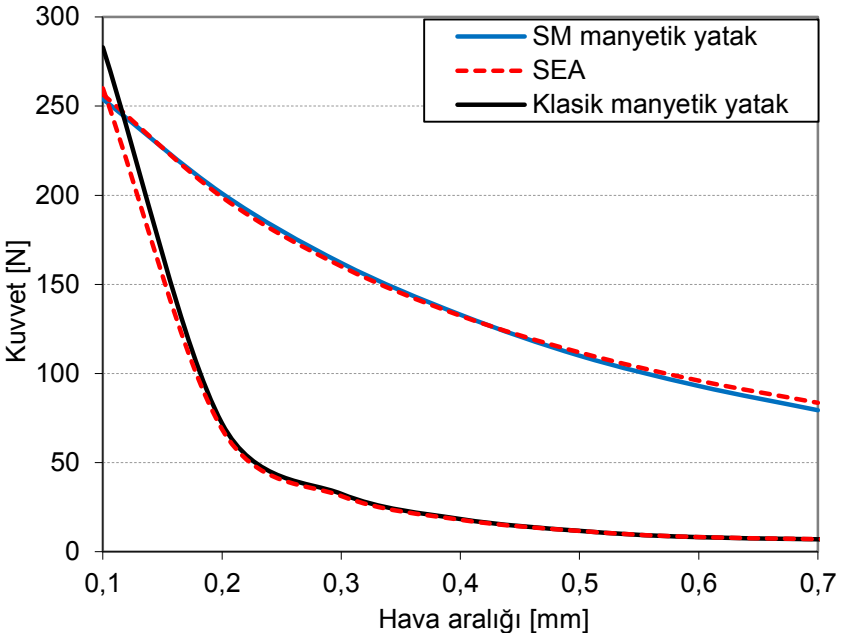
Şekil 4.21'de gösterilen grafikte 1. sargının elektromıknatıs çiftinin hava aralığındaki akı yoğunluğunun yüksek olduğu açık bir şekilde gözükmektedir. Kaçak akılar nedeniyle 2. ve 4. sargının olduğu elektromıknatısların hava aralığındaki akı yoğunluğu gerekenden çok çıkmıştır. SEA ile SM manyetik yatakta kaçak akıların etkisi açık bir şekilde gözükmektedir. Bu da manyetik eşdeğer devre modeli ile elde edilen sonuçların SEA sonuçları ile uyuşmayacağı anlamına gelmektedir. 3. sargıya gerilim verilmediği için herhangi sadece sürekli mıknatıstan kaynaklı akı yoğunluğu vardır. Üçüncü sargıya hiçbir gerilim değeri uygulanmadığı halde yaklaşık 0,64T değerinde bir akı yoğunluğuna sahiptir. 4 amper akıtılan birinci elektromıknatıs ile 2 amper akıtılan ikinci ve dördüncü elektromıknatıs arasında akı yoğunluğu birbirine yakındır. Sürekli mıknatıstan kaynaklı olarak elektromıknatıslar arasında kaçak akılar meydana gelmektedir.

SM manyetik yatağın tek bir manyetik devresini yani 1. sargının ve SM olduğu yapıyı ele almamız dâhilinde manyetik eşdeğer modelde tasarladığımız model ile kıyaslama yapılması mümkün olacaktır. SM manyetik yatağım çeyreğinin ele alındığı sonlu elemanlar modeli Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



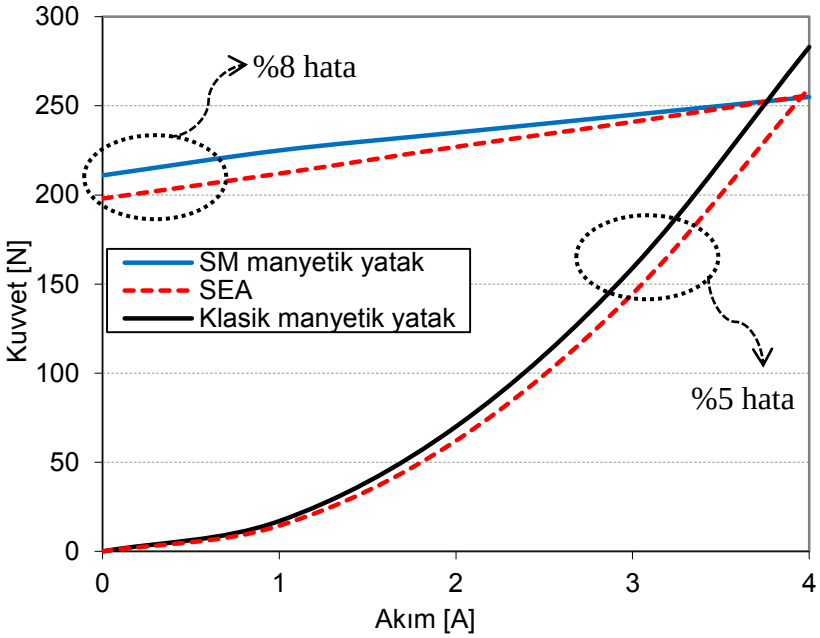
Şekil 4.22. SM manyetik yatağın tek bir manyetik devresi

Şekil 4.22'de SM manyetik yatağın sargıdan ve bir adet sürekli mıknatıstan oluşan SEA modeli gösterilmiştir. Bu SEA modeli ile manyetik eşdeğer devre modelli hedeflenmiştir ve kaçak akıların etkisi elimine edilerek manyetik eşdeğer devre ile karşılaştırma yapılacaktır. Şekil 4.23'de 4 amper akımda kuvvetin hava aralığına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Kuvvetin hava aralığına göre değişimi

Şekil 4.23'de klasik ve SM manyetik yatağa ait tek bir manyetik devrenin SEA sonuçları ile manyetik eşdeğer devre modeli ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Manyetik modelleme ile SEA sonuçları büyük bir uyum içerisindedir. Kuvvetin hava aralığı ile değişiminin yanında akıma göre değişimi de SM manyetik yataklarda da gayet önemlidir. 0,1 mm hava aralığına sahip SM manyetik yatağın tek bir sargı akımının değişiminin etkiyen kuvvete olan etkisi Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

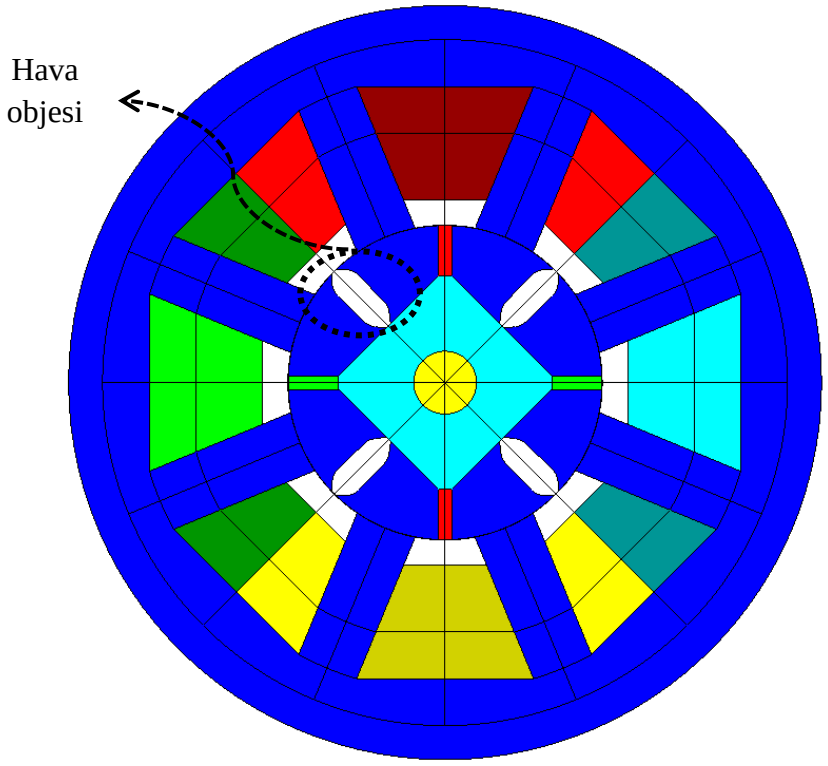


Şekil 4.24. Tek bir manyetik devrenin rotora etkilediği kuvvet

SEA ile manyetik eşdeğer devre modeli arasında düşük akım değerlerinde %8, yüksek hava aralığı değerlerinde ise %1'lik bir hata oluşmaktadır. Düşük amperlerde sürekli mıknatıstan kaynaklı kaçak akıların daha etkin olduğu ele alınırsa SEA ile manyetik eşdeğer devre sonuçları arasında hataların çıkması normaldir. Literatürde yapılan araştırmalarda SEA ile manyetik eşdeğer devre modeli sonuçlarının hata oranının %15'lere kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir [44-45]. SM manyetik yatağın nominal çalışma akım değerlerinde ise SEA ile manyetik eşdeğer modeli sonuçları büyük bir uyum içerisindedir.

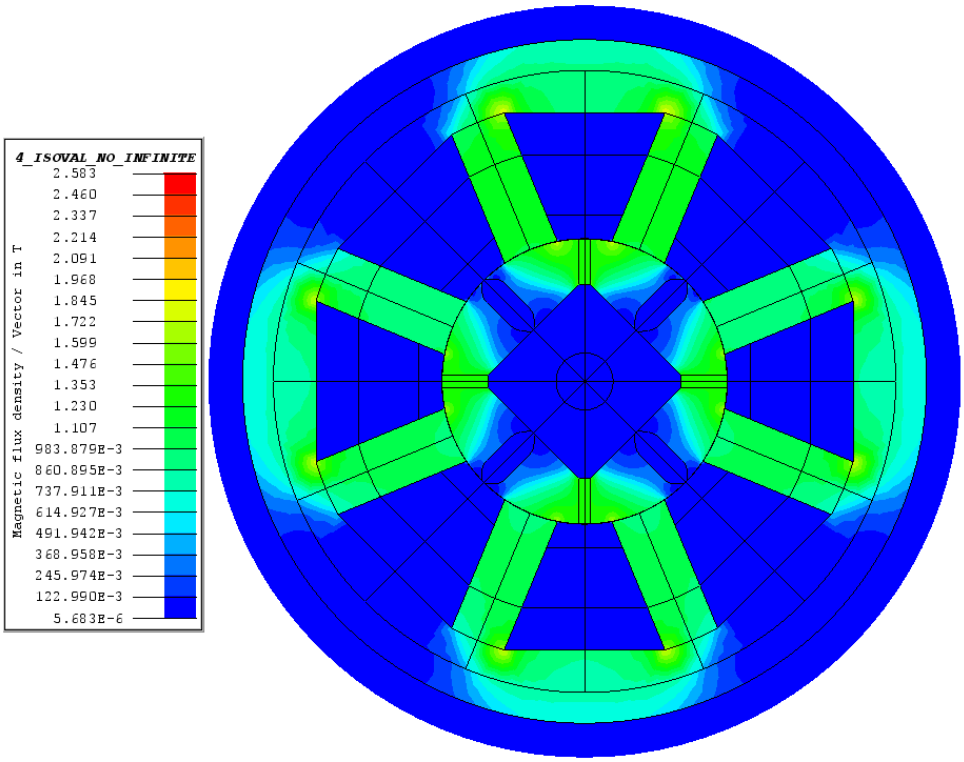
SM manyetik yatak Şekil 4.13'deki gibi modellendiğinde SEA sonuçlarında manyetik devreler arasında kaçak akıların olduğu ve kuvvetin etkisini bu kaçak akılar yüzünden değişken olduğu açıkça gözükmektedir. Bu sebepten dolayı SM manyetik yatağın rotorunda bazı değişikliklere gidilmelidir. Bu revizyon sayesinde manyetik

devrelerdeki kaçak akıların önlenmesi sağlanacak ve her bir manyetik devrenin kuvvet değeri rahatlıkla ve doğrulukla hesaplanabilecektir. Bu sayede akım-kuvvet ilişkisi net bir biçimde ortaya konularak kontrol düzeyindeki karmaşıklıklar en aza indirilecektir. Şekil 4.25'de SM manyetik yatağın rotoruna yapılan yenileme gösterilmiştir.

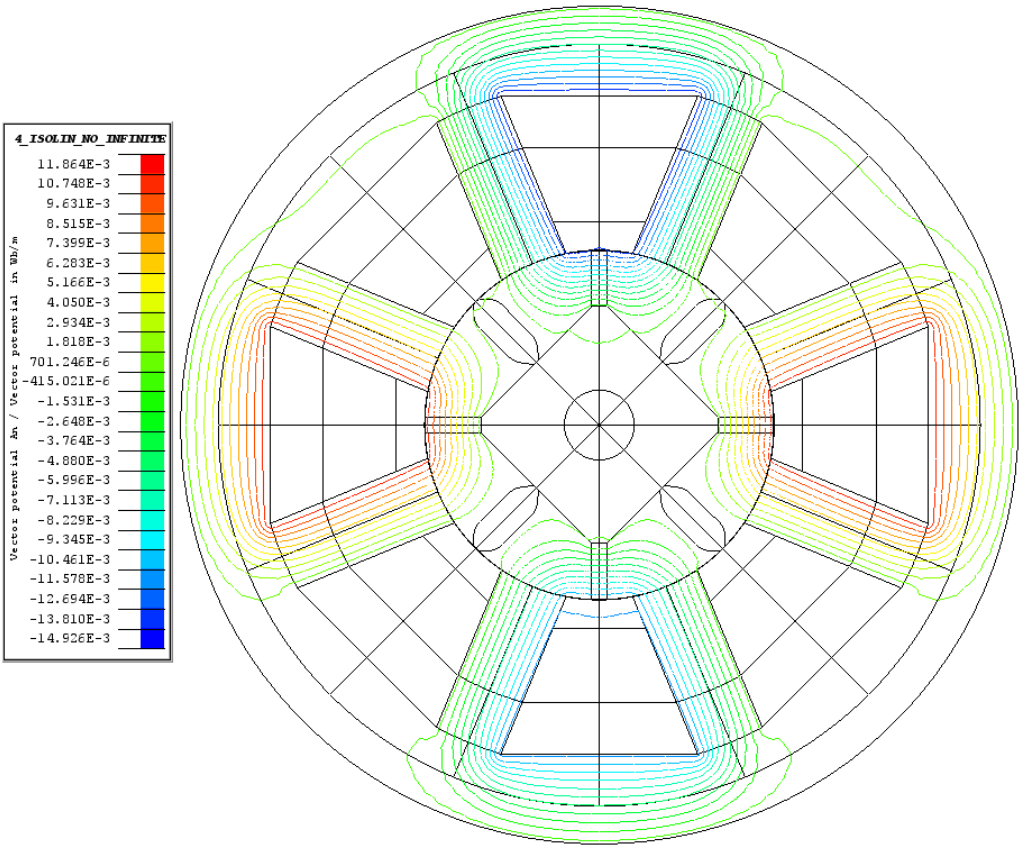


Şekil 4.25. Rotora hava objelerinin eklenmesi

SM manyetik yatağın rotoruna hava objeleri yerleştirilmiştir. Bu sayede kaçak akıların manyetik devreler arasından gitmesi önlenmek istenmiştir. Hava objeleri manyetik devrelerin sınırlarında olacak şekilde oluşturulmuştur. Şekil 4.26'da birinci sargıda 4 amper, diğer sargılarda ise 2 amper olan 0,1 mm hava aralığına sahip SM manyetik yatağın akı yoğunluğu grafiği gösterilmiştir. Şekilde kaçak akıların önlendiği açıkça gözükmektedir. Her bir manyetik devre belirgin bir şekilde gözükmekte ve bu modelleme ile manyetik eşdeğer devre modeline ait akı yolları elde edilmektedir. Şekil 4.27'de yüklü durumda SM manyetik yatağa ait akı yolları gösterilmiştir. Manyetik devreler açıkça belli olmaktadır. Ayrıca kaçak akıların çok büyük bir kısmının önüne geçilmesi sağlanmıştır. Sadece birinci elektromıknatıslara doğru olan kaçak akı gözükmektedir.

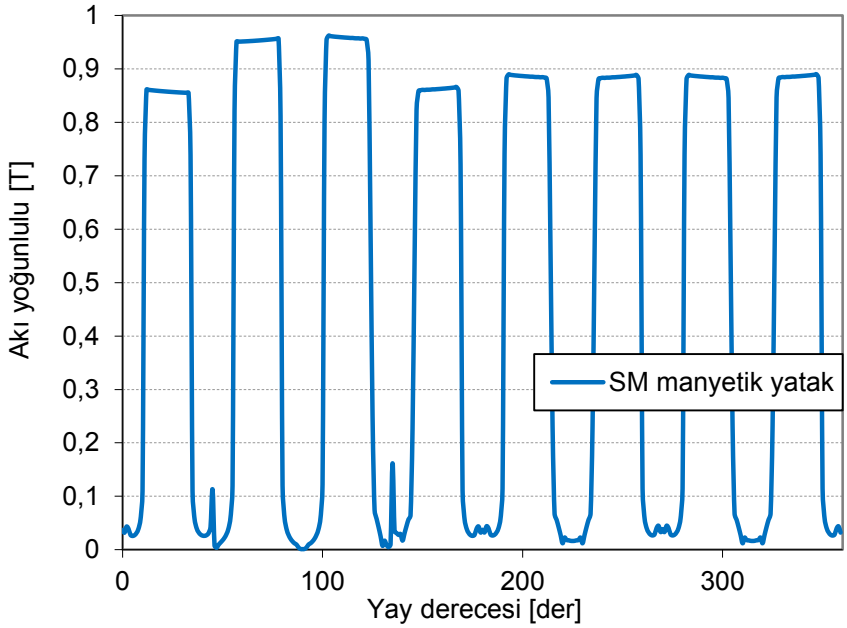


Şekil 4.26. SM manyetik yatağın akı yoğunluğu



Şekil 4.27. SM manyetik yatağın akı yolları

Şekil 4.27'de rotoruna hava objesi eklenmiş SM manyetik yatağın akı yolları ve kaçak akıları gösterilmiştir. Birinci elektromıknatısa doğru çok küçük kaçak akıların olduğu ifade edilmiştir. Kaçak akıları tam anlamıyla belirtmek için hava aralığının akı yoğunluğu değişimine bakmak gerekmektedir. Şekil 4.28'de yüklü durumda hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi gösterilmiştir.

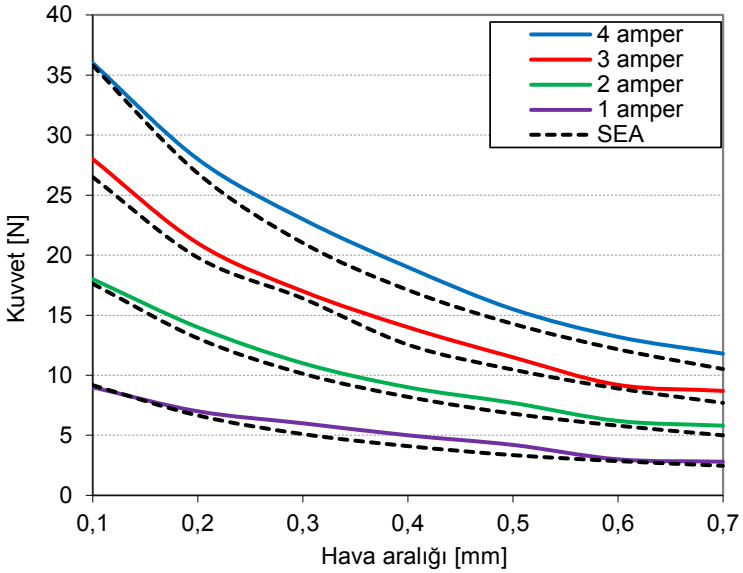


Şekil 4.28. Hava aralığındaki akı yoğunluğu değişimi

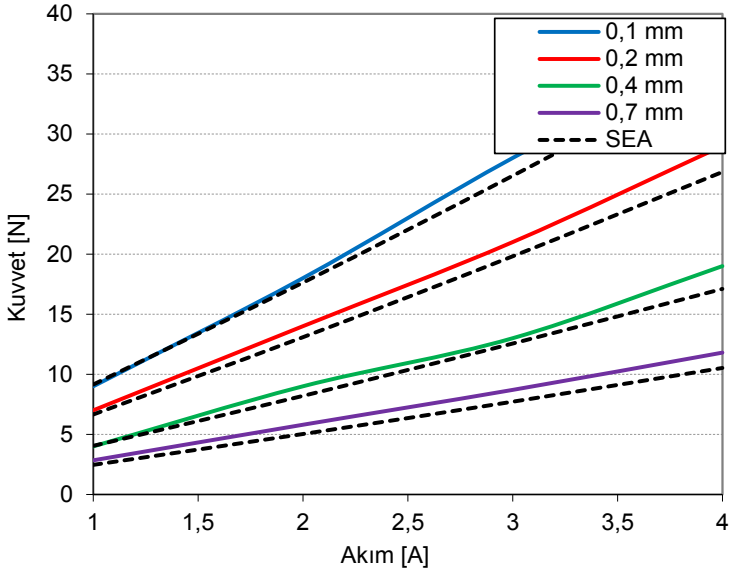
Şekil 4.28'de kaçak akıların etkisi açık bir şekilde gözükmektedir. İkinci ve dördüncü sargıya ait akı yoğunluklarının eşit çıkması gerekirken Aynı sargıya ait stator dişlerinin akı yoğunluğu farklı çıkmaktadır. Kaçak akıların tam olarak elimine edilmediği ve çok az da olsa hava objelerinin içinden kaçak akının aktığı gözükmektedir. Mevcut bu durumda önceki yapıya göre kaçak akıların başarılı bir biçimde elimine edildiği söylenebilmektedir.

Rotorunda hava objesi olan SM manyetik yatağın farklı akım ve hava aralıkları değerlerinde rotora etki eden kuvvetin değişimi Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. SM manyetik yatakta 3. sargıya herhangi bir akım verilmemiş, 2. ve 4. sargılara ise 1. sargının yarısı kadar akım verilmiştir. Şekil 4.29'da hava aralığının 0,1'den 0,7 mm'ye kadar değişimi altında farklı akım değerlerinde rotora etkiyen kuvvet gösterilmiştir. Maksimum 4 amper akımda ve 0,1 mm hava aralığında rotora

37,2N'luk bir kuvvet etki etmektedir. Akımın azalması ve hava aralığının artmasıyla birlikte rotora etkiyen kuvvet 5N değerlerine kadar azalmaktadır. Özetle SM manyetik yatakların manyetik eşdeğer devre ile modellenmesi kaçak akıların öngörülemediği için zor ve zaman alıcı bir süreçtir. Fakat manyetik yatağın ön tasarımını hızlı bir şekilde yapılması için manyetik eşdeğer devre kullanılabilmektedir. Ön tasarım sonucunda ortaya çıkan fiziksel parametreler ışığında SM manyetik yatakların kesin ve hassas çözümleri için kesinlikle SE analizinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.29. SM MY ait kuvvetin değişimi



Şekil 4.30. SM MY ait kuvvetin değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında dönen sistemlerin yataklanmasında kullanılan manyetik yatakların tasarım, modelleme ve SEA konuları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Manyetik yatakların tarihçesi ve çeşitleri örnekler ile anlatılmış ve çalışma prensibi ve avantajları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Klasik ve SM manyetik yatağın manyetik olarak modellenmesi ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Manyetik modelleme ile iki farklı tip manyetik yatağın kuvvet değerleri elde edilmiş ve farklı fiziksel boyutlarda etkiledikleri kuvvet değişimleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar paket programı ile manyetik yatakların SE ile modellenmesi ve analizi gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar manyetik modelleme ile karşılaştırılmıştır.

Manyetik yatakların eşdeğer devre modelleri çıkartılmadan önce temel bir manyetik devrede manyetik modelleme yapılarak SEA ile sonuçlar karşılaştırılmış ve kaçak akılar modellenmiştir. Manyetik yataklar çok az hava aralıklarına sahip oldukları için bu temel modellemede aynı şekilde az hava aralığı kullanılmış ve kaçak akılar bu hava aralığı baz alınmıştır. Kaçak akıların modellenmesi hesaplandıktan sonra klasik ve SM manyetik yataklar modellenmiş ve fiziksel yatak parametrelerine göre kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Bir ara yüz programı hazırmış ve bu sayede girilen manyetik yatak parametrelerine göre birçok farklı değişken altında kuvvet değişimleri gösterilmiştir. Ara yüz programında ek olarak istenilen kuvvet değeri girilerek belli limitler dâhilinde manyetik yatak özellikleri elde edilmiştir.

İki farklı tip manyetik yatağın SEA gerçekleştirilmiş ve farklı durumlardaki kuvvet değerleri çıkartılmıştır. Klasik tip manyetik yatağın akım-kuvvet grafiği çıkartılarak doyum noktaları belirtilmiştir. Klasik manyetik yatağın kuvvet doyum grafiği hem SEA hem de manyetik modelleme ile gösterilmiş ve büyük bir uyum içinde olduğu ifade edilmiştir. Klasik manyetik yatakta SEA ile manyetik modelleme sonuçlarının büyük bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. SM manyetik yatak SEA sonuçlarında manyetik devreler arasında kaçak akılar meydana gelmektedir ve SM manyetik yatağın rotoruna hava objeleri konularak kaçak akılar elimine edilmek istenilmiştir. Hava objesi konulan SM manyetik yatakta kaçak akıların büyük bir

kısmı elimine edilmiş ve manyetik eşdeğer devre modelinde olduğu gibi akı yolları sağlanmıştır. Bu durumda rotora etki eden kuvvet sonuçları SEA ile manyetik eşdeğer devre modeli ile büyük bir uyum içerisindedir.

Sonuç olarak bu çalışmada iki farklı tip manyetik yatağın manyetik eşdeğer devre temelli modellenmesi ve SEA yapılarak manyetik yatakların karakteristiklerini oluşturan rotora etkiyen kuvvet değerleri incelenmiştir. SM manyetik yatağın klasik manyetik yatağa göre modellenmesi zor bir manyetik eşdeğer devresinin olduğu ve SM manyetik yatakta kaçak akıların tam olarak modellenemediği ve bu yüzden rotora hava objelerinin konulduğu vurgulanmıştır. Klasik manyetik yatağın SEA ile manyetik eşdeğer devresin büyük bir uyum sergilemekte iken SM manyetik yatakta ise istenilen hava aralıkların kaçak akılar yüzünden büyük farklar meydana geldiği bahsedilmiştir. Bu yüzden SM manyetik yatağın rotoruna kaçak akıları öncelemek için hava objeleri konulmuş ve kaçak akılar elimine edilmiştir. Bu durumda SEA ve manyetik eşdeğer devre sonuçları uyum içerisinde çıkmıştır.

Klasik manyetik yatakların manyetik eşdeğer modelinin SEA ile uyumlu olduğu fakat SM manyetik yatağın manyetik eşdeğer devre modelinde kaçak akıların modellenmesinin zor ve zaman alıcı bir süreç aldığı düşünürse, manyetik yatağın hava aralığının belirlenmesi ve bundan sonra parametrik olarak her seferinde kaçak akıların tekrar modellenmesi ve bu şekilde hesaplanması SEA ile manyetik eşdeğer devre modeli arasındaki farkın azaltılmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir. SM manyetik yatağın SEA ile çok hassas bir şekilde gerçekleştirildiği ve bundan sonraki uygulamalarda hassasiyet açısından sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasının gerektiği savunulmaktadır.

Gelecek çalışmalar olarak klasik ve SM manyetik yatağın prototiplerinin üretilmesi ve deneysel olarak elde edilen kuvvet değerlerinin hem SEA hem de manyetik eşdeğer devre modeli ile karşılaştırılması düşünülmektedir. Ayrıca yapılan bu çalışma yataksız motorların temelini oluşturacak bir alt yapı sürecini hazırlamıştır. Bu sayede hem rotoru dönmesini sağlayan hem de 3 eksende dengeleyen yataksız motorların ilgi alanına giren çalışmalara ön bir çalışma meydana getirilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Earnshaw S., On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether, *Transactions of Cambridge Philosophical Society*, 1842, **1**, 97-112.

[2] Beams J. W., Young J. L. and Moore W., The Production of High Centrifugal Fields, *Journal of Applied Physics*, 1946, **1**, 886-890.

[3] Suiza H., Totally Active Magnetic Suspension System, *Societe D'Exploitation Des Materiels*, French Patent 1186527, 1957.

[4] Nieman D., Investigation of Magnetic and Electric Forces for Rotating Shaft Suspension, *Technical Documentary Report ASD-TDR*, 62-441, 1962.

[5] Habermann H. and Liard G. L., Practical Magnetic Bearings, *IEEE Spectrum*, 1979, **16**, 26-30.

[6] Schweitzer G. And Lange R., Charachteristics of a Magnetic Rotor Bearing for Active Vibration Control, *Proc. Conf. On Vibrations in Rotating Machinery*, England, 1976.

[7] Studer P. A., Magnetic Bearings Flywheel Energy Storage, *International Journal of Mechanical Society*, 1978, **19**, 133-145.

[8] Ohishi T., Magnetic Bearing Device with a Rotating Magnetic Field, *United States Patent*, Patent No. 5 237 229, 1992.

[9] Antila M., Lantto E., Arkkio A., Determination of Forces and Linearized Parameters of Radial Magnetic Bearing By Finite Element Techniques, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, **34**, 684-694.

[10] Nakamura S., Flywheel Technologies and High Tc Superconductivity, *ISTEC Journal*, 1993, **6**, 43-50.

[11] Ichihara T., Matsunaga K., Kita M., Hirabayashi I., Isono M., Hirose M., Yoshii K., Kurihara K., Saito S., Murakami M., Takabayashi H., Natsumeda M., Koshizuka N., Application of Superconducting Magnetic Bearings to a 10 kWh-Class Flywheel Energy Storage System, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, **15**, 2245-2248.

[12] Pragnell D. A., Holzner D. O. and Uptigrove S. O., Innovations For Rotating Equipmentactive Magnetic Bearings And Mechanical Dry Seal Systems, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1988, **27**, 35-42.

[13] Schmied J., Experience with magnetic bearings supporting a pipeline compressor, Magnetic Bearings. *Proc. Sec. Internat. Symp. On Magnetic Bearings*, Tokyo, 1990.

[14] Jansen R. H. and McLallin K. L., G2 Flywheel Module Operated at 41,000 rpm, *Nasa Research and Techonogly Report*, NASA/TM 2005-312419, 132-133, 2005.

[15] He J. L., Rote D. M., ve Coffey H. T., Study of Japanese electrodynamic-suspension maglev systems, *Center for Transportation Research Argonne National Laboratory*, ANL ESD2, 1994.

[16] http://www.worldheart.com/devices.cfm (Ziyaret tarihi:13.09.2012).

[17] http://web.gyte.edu.tr/magbear (Ziyaret tarihi: 13.09.2012).

[18] Üç fazlı bir asenkron motorda manyetik süspansiyonlu yatak tasarımı ve uygulaması, Yusuf Öner, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998.

[19] Çekme ilkesiyle çalışan elektromanyetik yatak sisteminin modellenmesi, tasarımı ve kontrolü, Ahu Ece Hartavi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.

[20] Yapay sinir ağları ile modelleme ve aktif manyetik yataklamalı bir sisteme uygulanması, Tülay Demir, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.

[21] Aktif manyetik yataklı volan enerji depolama sistemlerinin nonlineer kontrolü, Fatih İşçi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2005.

[22] Rotor-AMY sisteminin bulanık denetleyici ile kontrolü ve denge akımının en iyileştirilmesi, Ahu Ece Hartavi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.

[23] Süper iletken manyetik yatakların analizi ve modellenmesi, Yusuf Çınar, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007.

[24] Control of an active magnetic bearing system with sliding mode controller using nonlinear disturbance observer, Rüstem Tolga Büyükbaş, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.

[25] Elastik rotorlu bir manyetik yatak sisteminde kontrol uygulamaları, Beytullah Okur, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.

[26] Multi-objective robust control of rotor/active magnetic bearing systems, İbrahim Sina Kuseyri, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.

[27] Aktif manyetik yataklı elastik rotorun robust kontrolü, Sinan Başaran, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.

[28] Schweitzer G., Maslen E. H., Bleuler H., Cole M., Keogh P., Larsonneur R., Nordmann R., Okada Y. and Traxler A., *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*, Springer, Berlin, 2009.

[29] Lorentz H. A., La Théorie electromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants at the Internet Archive, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 1892, **25**, 363–552.

[30] Burdet L., Active Magnetic Bearing Design And Characterization For High Temperature Applications, Ph.D. dissertation, École Polytechnıque Fédérale De Lausanne, Institut de production et robotique, Lozan, 2006, 3616.

[31] Bahr F., Entwurf und Verifizierung eines Auslegungswerkzeuges für ein homopolar vormagnetisiertes Radialmagnetlager mit heteropolarer Steuerflussführung, Ph.D. dissertation, TU Dresden, Dresden.

[32] Trudell J., Kascak A., Provenza J. and Buccieri C., Conical Magnetic Bearings Developed for Active Stall Control in Gas Turbine Engines, *Nasa Research and Techonogly Report*, 2005.

[33] Chiba A., Fukao T., Ichikawa O., Oshima M., Takemoto M. and Dorrell D., *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier, London, 2005.

[34] Campell P., *Permanent Magnet Materials and theri Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

[35] Jumonhi S., Senoo J., Ueda K., Chabata S., Amano S. and Ono A., Super heat resistant ceramic insulated wire, *Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference Proceedings*, Illinois, USA, 18-21 September 1995.

[36] Shu-hua L., Origine de la Boussole 11. Aimant et Boussole, *Isis*, 1954, **45**, 175.

[37] Ørsted C., *Experimenta Circa Effectum Conflictus Electrici in Acum Magneticam*, Hafniae, 1820.

[38] Ampère A. M., *Recueil d'observations électro-dynamiques*, Chez Crochard, Paris, 1822.

[39] Maxwell J. C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford Clanderon Press Series, London, 1873.

[40] Hanselman D., *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, Magna Physics Publishing, Ohio, 2006.

[41] Miller T. J. E., *SPEED's Electric Motors*, University of Glasgow, Glasgow, 2008.

[42] Gieras J. G., *Advancements in Electric Machines*, Springer, Rockford, Illinois, 2008.

[43] Hutton V. D., *Fundamentals of Finite Element Analysis*, Mc Graw Hill, Boston, 2004.

[44] Juds M., Trends in Finite Element Analysis, *Ansoft Electromechanical Users Workshop*, Orlando, 27-28 September 2001.

[45] Humphries S., *Finite-element Methods for Electromagnetics*, CRC Press, New Mexico, 2010.

EKLER

EK-A

aperam
made for life

Cold Rolled Strip



AFK502R is an Iron-Cobalt soft magnetic alloy suitable for compact generators, motor and transformer laminations.

International standards

ASTM A 801, IEC404

Chemical composition %weight

	Co	V	Fe
Typical value	49	2	Bal

Physical properties

Density (g/cm3)	Resistivity (µ Ω.cm)	CTE 0-100°c	Curie T°c	Saturation Induction Bs (G)
8.12	40	10	900	24000

Magnetic DC properties

	Hc (Oe)	B at 10Oe	B at 20Oe	B at 50Oe	B at 100Oe
2h at 760°c	1.50	≥ 20500	≥ 21500	≥ 22500	≥ 22800
3h at 850°c	0.90	≥ 21000	≥ 21500	≥ 22500	≥ 22800

Magnetic AC properties: Magnetic losses (W/kg)

	f=50Hz B=1,5T	f=50 Hz B=2T	f=400 Hz B=1,5T	f=400 Hz B=2T
2h at 760°c	3	5	44	84
3h at 850°c	2.3	3.8	42	73.6

Mechanical properties

	Hardness HV	hardness HRC	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation %	Young modulus KN/mm²
Hard	400	33 - 47	1200	800	2	215
2h at 760°c	-	-	600	390	5	-
3h at 850°c	-	-	450	290	4	-

All values declared are typical values measured on rings 36x25mm of 0.34mm material thickness after:
- 2h @ 760°C, cooling 250°C/h under pure and dry hy drogen
- 3h @ 850°C, cooling 250°C/h under pure and dry hy drogen

Standard Delivery & dimensions available

Form	Thickness	Width	Length	Temper
Strip - Sheet	0.10 to 1.50mm	10 to 230 mm	500 to 3500 mm	Hard

The data enclosed in this document are only given as indicative values and correspond to our standard product. Different specific requirement are subject to discussion and formal approval by Aperam Alloys Imphy. For further information or special request, please contact us.

Aperam Alloys Imphy
B.P. 1
Avenue Jean Jaurès
F- 58160 Imphy

Tel + 33 3 86 21 30 00
Fax + 33 3 86 21 31 00
nickel.alloys@aperam.com
www.aperam.com/alloys-imphy

© juin 2012

Şekil A.1. AFK 502 sac malzemesi özellikleri

aperam
made for life

Cold Rolled Strip



AFK18 is an iron-Cobalt soft magnetic alloy suitable for compact generators and motor laminations .

International standards

ASTM A 801, IEC404

Chemical composition %weight

	Co	Fe
Typical value	27	Bal

Physical properties

Density (g/cm3)	Resistivity (μ Ω.cm)	CTE 0-100°C	Curie T°C	Saturation Induction Bs (G)
7,9	30	10.5	940	23000

Magnetic DC properties

	Hc (Oe)	B at 31Oe	B at 63Oe	B at 125Oe
2h at 700°C	1,90	17500	18500	20000
2h at 900°C	0,75	17500	18500	20000

Magnetic AC properties: Magnetic losses (W/kg)

	f=50Hz B=1,5T	f=50 Hz B=1,7T	f=400 Hz B=1,5T	f=400 Hz B=1,7T
2h at 700°C	5.5	6.7	77	99
3h at 900°C	3.3	4.3	66	88

Mechanical properties (Typical values)

	Hardness HV	Ultimate strength (MPa)	Yield strength	Elongation % (MPa)
Hard	310	850	800	2
2h at 700°C	185	470	355	19
3h at 900°C	175	380	210	31

All values declared are typical values measured on rings 36x25mm of 0.34mm material thickness after:
- 2h @ 700°C, cooling 250°C/h under pure and dry hydrogen
- 3h @ 900°C, cooling 250°C/h under pure and dry hydrogen

Standard Delivery & dimensions available

Form	Thickness	Width	Length	Temper
Strip - Sheet	0.10 to 3.5 mm	10 to 320 mm	500 to 3500 mm	Hard

The data enclosed in this document are only given as indicative values and correspond to our standard product. Different specific requirement are subject to discussion and formal approval by Aperam Alloys Imphy. For further information or special request, please contact us.

Aperam Alloys Imphy
B.P. 1
Avenue Jean Jaurès
F- 58160 Imphy

Tel + 33 3 86 21 30 00
Fax + 33 3 86 21 31 00
nickel.alloys@aperam.com
www.aperam.com/alloys-imphy

© June 2013

Şekil A.2. AFK 18 sac malzemesi özellikleri

Cold Rolled Strip



AFK1 is an iron-Cobalt soft magnetic alloy suitable for compact generators and motor laminations.

International standards

ASTM A 801, IEC404

Chemical composition %weight

	Co	Cr	Mn	Fe
Typical value	27	2	0,3	Bal

Physical properties

Density (g/cm3)	Resistivity (μ Ω.cm)	CTE 0-100°C	Curie T°C	Saturation Induction Bs (G)
8	20	10.3	980	24000

Magnetic DC properties

	Hc (Oe)	B at 10Oe	B at 25Oe	B at 100Oe	B at 200Oe
2h at 760°C	2.50	≥ 14700	≥ 17300	≥ 20200	≥ 21900
3h at 850°C	1.20	≥ 14700	≥ 17300	≥ 20200	≥ 21900

All values declared are typical values measured on rings 36x25mm of 0.34mm material thickness after:
- 2h @ 760°C, cooling 250°C/h under pure and dry hy drogen
- 3h @ 850°C, cooling 250°C/h under pure and dry hy drogen

Mechanical properties (Typical values)

	Hardness HV	Ultimate strength (MPa)	Yield strength	Elongation % (MPa)
Hard	300	1000	900	2
2h at 760°C	-	600	350	17
3h at 850°C	-	510	250	13

Standard Delivery & dimensions available

Form	Thickness	Width	Length	Temper
Strip - Sheet	0.10 to 3.5 mm	10 to 320 mm	500 to 3500 mm	Hard

The data enclosed in this document are only given as indicative values and correspond to our standard product. Different specific requirement are subject to discussion and formal approval by Aperam Alloys Imphy. For further information or special request, please contact us.

Aperam Alloys Imphy
B.P. 1
Avenue Jean Jaurès
F- 58160 Imphy

Tel + 33 3 86 21 30 00
Fax + 33 3 86 21 31 00
nickel.alloys@aperam.com
www.aperam.com/alloys-imphy

© June 2012

Şekil A.3. AFK 1 sac malzemesi özellikleri

Typical data for SURA® M270-35A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,06	30,0	0,04	0,09	0,21	0,99	4,10
0,2	0,07	0,17	39,6	0,16	0,37	0,92	3,67	14,9
0,3	0,13	0,29	46,0	0,34	0,79	1,99	7,63	30,7
0,4	0,22	0,44	52,0	0,55	1,31	3,33	12,7	52,0
0,5	0,31	0,61	58,2	0,80	1,91	4,94	18,9	79,1
0,6	0,43	0,81	65,2	1,06	2,61	6,84	26,4	113
0,7	0,54	1,04	73,3	1,38	3,39	9,00	35,4	156
0,8	0,68	1,31	83,1	1,73	4,26	11,4	46,0	209
0,9	0,83	1,63	95,5	2,10	5,23	14,2	58,4	274
1,0	1,01	2,04	112	2,51	6,30	17,3	73,0	353
1,1	1,20	2,58	136	2,98	7,51	20,9	90,1	
1,2	1,42	3,38	178	3,51	8,88	24,9		
1,3	1,70	4,90	272	4,15	10,5	29,5		
1,4	2,12	9,64	596	4,97	12,5	35,4		
1,5	2,47	28,0	1700	5,92	14,9	41,8		
1,6	2,80	72,3	3880					
1,7	3,05	149	7160					
1,8	3,25	264	11600					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	2,47
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,01
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,54
H = 5000 A/m, T	1,65
H = 10000 A/m, T	1,77
Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	700
Resistivity, μΩcm	52
Yield strength, N/mm²	450
Tensile strength, N/mm²	565
Young's modulus, RD, N/mm²	185 000
Young's modulus, TD, N/mm²	200 000
Hardness HV5 (VPN)	215



RD represents the rolling direction
TD represents the transverse direction
Values for yield strength (0.2 % proof strength) and tensile strength are given for the rolling direction
Values for the transverse direction are approximately 5% higher

cogent

June 2008

Şekil A.4. M270-35A sac malzemesi özellikleri

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Güleç M.,** Aydın M., Manyetik Yatakların Manyetik Devre ve 2B Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi ve Tasarımı, *Eleco2012*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım- 01 Aralık 2012.

[2] **Güleç M.,** Aydın M., Sürekli Mıknatıslı Disk Motorların Tasarımı ve Üretimi, *TOK 2012*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.

[3] **Gulec M.,** Aydin M., Influence of Magnet Grouping in Reduction of Cogging Torque for A Slotted Double-Rotor Axial-Flux PM Motor, *IEEE SPEEDAM 2012*, Sorrento, Italy, 20-21 June 2012.

[4] **Gulec M.,** Aydın M., Magnet Symmetry in Reduction of Cogging Torque for Integer Slot Axial Flux PM Motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012 (accepted for publication).

[5] Aydın M., **Gulec M.** and Ocak O., Reduction of Cogging Torque in Double Rotor Axial Gap PM Disc Motors with Magnet Skewing Techniques, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012 (accepted for publication).

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet GÜLEÇ, Eylül 1985, Alaçatı/İzmir doğumludur. Orta ve lise öğrenimini Aydın'da tamamlamıştır. 2003 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2010 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamış ve aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen görevine devam etmektedir. Amatör olarak dağcılık sporu ile ilgilenmektedir.